



Roberto Edgar Ribeiro Lobo
Estudo e desenvolvimento do comando e controlo para um
equipamento industrial automatizado de enrolamento filamentar

UMinho | 2012

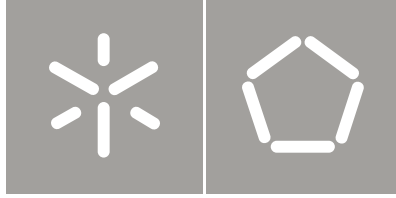


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Roberto Edgar Ribeiro Lobo

Estudo e desenvolvimento do comando e
controlo para um equipamento industrial
automatizado de enrolamento filamentar

Outubro de 2012



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Roberto Edgar Ribeiro Lobo

Estudo e desenvolvimento do comando e
controlo para um equipamento industrial
automatizado de enrolamento filamentar

Tese de Mestrado
Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor João Pedro Mendonça

e co-orientação do
Professor Doutor Ferrie van Hattum

DECLARAÇÃO

Nome: Roberto Edgar Ribeiro Lobo

Correio electrónico: a39712@alunos.uminho.pt; rilo.edgar@gmail.com

Tel./Tlm.: 963764142

Número do Bilhete de Identidade: 12354242

Título da dissertação:

Estudo e desenvolvimento do comando e controlo para equipamento industrial automatizado de enrolamento filamentar

Ano de conclusão: 2012

Orientador(es): Professor Doutor João Pedro Mendonça

Professor Doutor Ferrie van Hattum

Designação do Mestrado:

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Área de Especialização: Tecnologias de Produção

Escola: Escola de Engenharia

Departamento: Departamento de Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

Resumo

Fruto da evolução da tecnologia, inúmeras pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de se obter a melhor otimização dos processos de manufatura. Essa otimização passa por uma rentabilização de recursos, por aumentar a qualidade e também tornar o produto com um custo efetivo inferior.

Devido à sua alta relação resistência/peso e rigidez/peso, compósitos de fibras contínuas reforçadas com material polimérico são cada vez mais usadas em aplicações onde é fundamental a redução de peso. Uma dessas aplicações são os reservatórios de pressão, usados para armazenamento de líquidos ou gases submetidos a baixa e alta pressão, onde a fita de fibra contínua reforçada com material de matriz polimérica é enrolada em torno de um mandril definindo a geometria final, o processo é designado por enrolamento filamental.

Para um melhor desempenho estrutural, e maior poupança de peso, é fundamental enrolar de acordo com um caminho ótimo, que se designa enrolamento geodésico, resultando apenas na tensão axial na direção longitudinal (antiderrapante).

Neste contexto o processo de enrolamento filamental é um processo bastante atrativo para a produção de componentes em materiais compósitos. Contudo a sua automatização aumenta exponencialmente as suas capacidades, quer a nível de flexibilidade de processo quer a nível de maior e melhor repetibilidade do mesmo.

Este trabalho foi elaborado segundo um estágio profissional realizado na instituição PIEP, polo de inovação em Engenharia de Polímeros. Este documento pretende descrever o trabalho desenvolvido no estudo e desenvolvimento do comando de um equipamento de enrolamento filamental robotizado.

Por outro lado pretendeu-se desenvolver conhecimento no sentido de dominar todo o processo de projeto e manufatura relativamente aos materiais compósitos obtidos por enrolamento filamental.

Palavras-chave: compósitos, enrolamento filamental; robótica, automatização.

Abstract

Result of evolution of technology, many researches is conducted with the aim of obtaining a better optimization of manufacturing processes. This optimization is a profitable resource by increasing the quality and also makes the product with a lower actual cost.

Due to their high ratio of strength / weight and rigidity / weight composites reinforced with continuous fibers of polymeric material are increasingly used in applications where it is essential to reduce weight. One such application is the pressure vessel, used for storing liquids or gases subjected to low and high pressure, where the tape continuous fiber-reinforced polymeric matrix material is wound around a mandrel defining the geometry final process is called filament winding.

For optimal structural performance, and greater weight saving is essential roll in accordance with one optimal path which is called geodesic winding, resulting only in axial tension in the longitudinal direction (slip).

In this context the filament winding process is a very attractive process for the production of composite components. However its automation increases exponentially its capabilities, both in terms of process flexibility both in terms of bigger and better repeatability of the same.

This work was done under a traineeship made in establishing PIEP, innovation pole in polymers engineering.. The work focused on the study and development of command of robotized filament winding equipment.

Moreover, it was intended to develop expertise in order to master the whole process with regard to design and manufacture composite materials obtained by filament winding.

Keywords: composites, filament winding, robotics, automation.

Agradecimentos

Tendo como premissa que todo o percurso realizado para a instrução do ser humano é feito com base no cruzamento e partilha de ideias de todos os que nos rodeiam, pretendo aqui homenagear, com um carinho especial, os que diretamente contribuíram à realização deste trabalho. Assim pretendo agradecer:

Ao meu orientador, Professor Doutor João Pedro Mendonça da Silva, pela orientação, acompanhamento e dedicação que sempre demonstrou ao longo do trabalho. Por toda a sua energia transmitida e constante motivação que sem dúvida foram uma mais-valia quer ao nível académico, profissional e pessoal. Um especial agradecimento pela amizade desenvolvida ao longo do percurso académico.

Ao Professor Doutor Ferrie Wander Joseph van Hattum, meu coorientador, por todo o apoio, acompanhamento e dedicação prestados ao longo da realização deste trabalho. Agradeço ainda pelo incentivo de procurar novos desafios e por querer sempre mergulhar mais fundo.

Aos Engenheiros Luis Oliveira e Nuno Vieira pela partilha de conhecimento que me facultaram e pela disponibilidade demonstrada ao longo do trabalho.

Ao PIEP, instituição onde foi desenvolvido o trabalho, por me permitir desenvolver um conjunto de competências num ambiente de pesquisa e desenvolvimento, e por me facultar todas as condições necessária para a realização do trabalho;

Ao Ricardo Figueiredo de Sá por partilha e troca de conhecimento bem como a sua disponibilidade para auxílio de realização de várias tarefas. A amizade desenvolvida ao longo do tempo foi também uma forte influência no desenrolar do trabalho.

Um agradecimento especial ao José Roque Sá da Costa por toda a sua amizade ao longo deste percurso académico, pois foi muito importante a sua colaboração, contributo e dedicação para a minha formação académica.

À minha Mãe e aos meus irmãos Hugo e Filipa, pelo amor prestado ao longo da vida, sem eles não teria os valores humanos para ultrapassar os meus desafios.

Por fim um carinho muito especial à minha esposa, Sofia, e para a minha princesa, Beatriz. São e serão sempre a minha fonte de inspiração.

Índice de Conteúdos

| | |
|---|------|
| Resumo..... | i |
| Abstract..... | iii |
| Agradecimentos..... | v |
| Índice de Conteúdos | vii |
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Tabelas | xi |
| Lista de Acrónimos | xii |
| Lista de Símbolos | xiii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento Institucional | 2 |
| 1.2 Instituição PIEP | 2 |
| 1.3 Objetivos e motivação do projeto | 2 |
| 1.4 Linha orientadora | 2 |
| 1.5 Organização do documento | 2 |
| 2 Revisão Bibliográfica..... | 4 |
| 2.1 Materiais Compósitos | 5 |
| 2.1.1 Matérias – Primas | 6 |
| 2.2 Pré – impregnados..... | 9 |
| 2.3 Enrolamento Filamentar | 10 |
| 2.3.1 Padrões de enrolamento filamentar..... | 11 |
| 2.3.2 Características do processo (enrolamento filamentar)..... | 12 |
| 2.3.3 Propriedades Mecânicas dos compósitos [6]..... | 12 |
| 2.3.4 Configurações de Máquinas | 13 |
| 2.3.5 <i>Software</i> CAM no processo de enrolamento filamentar | 14 |
| 2.4 Robótica/Automatização do processo enrolamento filamentar..... | 16 |
| 3 Aspetos Pragmáticos | 17 |
| 3.1 Dimensionamento de Reservatórios | 18 |
| 3.2 Cálculo de Trajetórias..... | 21 |
| 3.3 Automatização da Programação de robô..... | 24 |
| 3.3.1 Sistema de coordenadas..... | 28 |
| 3.3.2 Calibração de Ferramenta..... | 28 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.3.3 | Tipo de movimentos | 29 |
| 4 | Parte Experimental | 31 |
| 4.1 | Célula de processamento | 32 |
| 4.2 | Enrolamento Circular..... | 33 |
| 4.3 | Enrolamento Helicoidal..... | 35 |
| 4.4 | Enrolamento Polar..... | 38 |
| 4.5 | Processo para automatizar o processo de tratamento de dados | 40 |
| 5 | Considerações Finais | 41 |
| | REFERÊNCIAS..... | 43 |
| Anexo A | Guia de utilização rápida..... | 45 |
| Anexo B | Manual de iniciação..... | 51 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Classificação de Materiais Compósitos [4, 7] | 6 |
| Figura 2 – Tipos de materiais poliméricos. | 7 |
| Figura 3 – Exemplo de equipamento de enrolamento filamentar..... | 11 |
| Figura 4 - Padrões de enrolamento filamentar [12]..... | 12 |
| Figura 5 – a) disposição lathe winder b) disposição tumble winder | 13 |
| Figura 6 - a)Esquema de enrolamento termoplástico b) Esquema enrolamento termoendurecíveis [12, 18]..... | 14 |
| Figura 7 – Exemplo de estudo de reservatório [5]..... | 19 |
| Figura 8 – Equilíbrio segundo direção axial [5] | 19 |
| Figura 9 – Equilíbrio segundo direção circunferencial | 19 |
| Figura 10 – Decremento ângulo teta [12]..... | 22 |
| Figura 11 - Esquema de coordenadas para calculo..... | 23 |
| Figura 12 – a) Robô Motoman HP20 b) Controlador NX100 [27]..... | 27 |
| Figura 13 – Hardware do controlador e do robô adaptado de [26] | 27 |
| Figura 14 – Calibração do TCP [27, 29]..... | 29 |
| Figura 15 – Exemplo de movimentação circular um arco | 30 |
| Figura 16 – Exemplo de movimentação circular dois arcos incompleta | 30 |
| Figura 17 - Exemplo de movimentação circular dois arcos correta | 30 |
| Figura 18 - Célula de enrolamento filamentar conjunto total | 32 |
| Figura 19 – Célula de enrolamento real | 33 |
| Figura 20 – a) sem revestimento b) com revestimento circular | 35 |
| Figura 21 – Trajetória 2D de enrolamento polar | 40 |
| Figura 22 – Processo de automatização..... | 40 |
| Figura 23 – Controlador NX100 e consola de programação..... | 52 |
| Figura 24 – Braço robot motoman HP20 | 52 |
| Figura 25 – Consola de Programação | 53 |
| Figura 26 – Especificações do braço robot..... | 54 |
| Figura 27 – Identificação dos eixos | 54 |
| Figura 28 – Selecção modo manual (TEACH)..... | 55 |
| Figura 29 – Selecção de modo automático (PLAY) | 56 |
| Figura 30 – Selecção de modo remoto (REMOTE) | 56 |
| Figura 31 – Tipo de coordenadas..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 – Esquema de calibração de ferramenta | 60 |
| Figura 33 - Coordenadas usuário | 61 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Propriedades de termoplásticos [13]..... | 7 |
| Tabela 2 – Tipos de fibra no mercado [10]..... | 9 |
| Tabela 3 - Propriedades das fibras de reforço [13] | 9 |
| Tabela 4 – Fatores parciais de projeto | 18 |
| Tabela 5 – deformação limite para termoplásticos | 18 |
| Tabela 6 – Dados de entrada enrolamento circular..... | 21 |
| Tabela 7 - Dados de entrada enrolamento helicoidal..... | 24 |
| Tabela 8 – Softwares proprietários de simulação e programação de fabricantes de robôs adaptado de [26]..... | 25 |
| Tabela 9 – Softwares independentes de simulação e programação genéricos [26, 28]..... | 26 |
| Tabela 10 – Tipos de movimento e instrução | 29 |
| Tabela 11 – Linha de comandos enrolamento circular | 35 |
| Tabela 12 – Linha de comandos enrolamento helicoidal | 37 |
| Tabela 13 – Linha de comandos enrolamento polar | 39 |
| Tabela 14 – Estrutura de código de programação | 62 |

Lista de Acrónimos

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

CNC – Controlo por comando numérico

ISSO - International Organization for Standardization

XLS – Tipo de arquivo do software Microsoft Excel

Lista de Símbolos

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| ρ_m | Densidade da Matriz |
| E_m | Modulo de Elasticidade |
| G_m | Modulo de Rigidez |
| ν_m | Coeficiente de Poisson |
| σ | Resistência à Tração |
| ε | Alongamento |
| d_f | Diâmetro da Fibra |
| ρ_f | Densidade da Fibra |
| E_f | Modulo de Elasticidade |
| G_f | Modulo de rigidez |
| ν_f | Coeficiente de Poisson |
| σ | Resistência à Tração |
| ε | Alongamento |
| E_L | Modulo de Elasticidade Longitudinal |
| E_t | Modulo de Elasticidade Transversal |
| G_{xy} | Modulo de Rigidez |
| ν_{yx} | Coeficiente de Poisson 1 |
| ν_{xy} | Coeficiente de Poisson 2 |
| M_f | Fração de Massa da Fibra |
| M_m | Fração de Massa da Matriz |
| V_f | Fração Volúmica da Fibras |
| V_m | Fração Volúmica da Matriz |

| | |
|------------|---------------------------------|
| ρ | Densidade da Camada |
| H | Espessura da Fita |
| L_F | Largura da Fita |
| n_L | Nº de Camadas |
| e_x | Espessura da Camada |
| e_T | Espessura Total |
| θ | Ângulo de Laminado |
| p_0 | Pressão interna |
| D_i | Diâmetro interno cilindro |
| D_e | Diâmetro externo cilindro |
| L | Comprimento |
| e_t | Espessura do Reservatório |
| σ_L | Tensão Longitudinal Cilindro |
| σ_T | Tensão Transversal Cilindro |
| V_V | Volume do Reservatório |
| M_V | Massa do Reservatório |
| U_M | Velocidade do Mandril |
| U_C | Velocidade do Carro transversal |
| U_F | Alimentação da fita |
| α | Ângulo de enrolamento |
| C_H | Atravacamento Altura |
| C_L | Atravacamento comprimento |
| P_{max} | Peso Máximo |

Capítulo 1 - Introdução

O presente trabalho foi desenvolvido para a obtenção do grau de mestre de engenharia mecânica. Neste capítulo pretende-se contextualizar em que ambiente o trabalho foi desenvolvido e dar uma perspetiva da organização do documento.

1.1 Enquadramento Institucional

O presente documento, enquadra-se na unidade curricular de dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, tendo sido elaborado todo o seu estudo ao abrigo do estágio profissional realizado na instituição PIEP (Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros). Deste modo este documento pretende descrever o trabalho desenvolvido e concretizado ao logo desse estágio.

O estudo realizado debruça-se no desenvolvimento do comando e controlo de um equipamento industrial automatizado para aplicar na tecnologia de enrolamento filamentar. Esta pesquisa e aplicação nasce na necessidade da instituição desenvolver conhecimento nesta área a fim de proporcionar aos seus clientes novas e melhores soluções industriais de forma a promover uma manufatura do processo de enrolamento filamentar mais eficiente.

1.2 Instituição PIEP

A instituição PIEP, Polo de Inovação em Engenharia de Polímeros, é uma Associação privada sem fins lucrativos alocada no Campus de Azurém da Universidade do Minho, em Guimarães. O PIEP foi criado em 18 de Abril de 2001 por iniciativa do sector industrial, em colaboração com a Universidade do Minho através do Departamento de Engenharia de Polímeros e ainda com a colaboração do IAPMEI.

O principal objetivo do PIEP é de gerar soluções às necessidades de inovação e desenvolvimento das empresas, através de apoio científico e tecnológico. Este centro de investigação pretende ser a ponte de transferência de conhecimento científico para aplicação industrial.

1.3 Objetivos e motivação do projeto

O foco do trabalho desenvolvido prende-se com o estudo, desenvolvimento e implementação de um equipamento que permita realizar o processo de enrolamento filamentar. O facto do equipamento a desenvolver ser automatizado recorrendo a um robô torna o projeto mais ambicioso e motivante. A robotização do processo leva a ampliar a variedade de produtos no sentido de produzir peças mais complexas.

1.4 Linha orientadora

De forma a promover um domínio mais aprofundado sobre todo o processo em estudo o encadeamento das várias etapas realizou-se da seguinte configuração: primeiramente foi realizado um levantamento de conceitos fundamentais para a familiarização do objeto de estudo, seguidamente processou-se a análise sobre dimensionamento de reservatórios, em consequência a próxima tarefa baseou-se no cálculo de trajetórias de revestimento de reservatórios, por último procedeu-se à programação do robô para a execução do processo de enrolamento filamentar.

1.5 Organização do documento

Tendo como objetivo de criar um equipamento automatizado para o processo de enrolamento filamentar e tendo como base a metodologia seguida este documento apresenta uma organização evolutiva realizando num primeiro momento uma familiarização de conceitos e posteriormente, realizar um conjunto de tarefas sequenciais, de modo a desenvolver e reunir competências, para a aquisição de conhecimento no processo de enrolamento filamentar.

Primeiramente é realizada uma revisão bibliográfica, capítulo 2, sobre os materiais envolvidos no processo, fazendo uma alusão às matérias-primas envolvidas e uma caracterização do processo de enrolamento filamental. Ainda neste capítulo pretende se justificar a utilização e adaptação da automatização do processo recorrendo à robótica.

No capítulo 3 são descritas as várias fases, necessárias, até se obter os dados necessários para proceder à programação e obtenção do produto final. Assim é descrito o processo de cálculo para o dimensionamento de reservatórios sob pressão, o processo de obtenção de revestimentos/trajetórias e por ultimo a estratégia de programação para inserir na consola.

O capítulo 4 apresenta-se a disposição da célula de fabrico experimental. O objetivo deste capítulo é apresentar uma solução com a finalidade de proceder à validação das coordenadas geradas e conseqüente programa de enrolamento elaborado. São assim apresentados os três padrões de enrolamento filamental, circular, helicoidal e polar.

Por último são apresentadas, capítulo 5, as considerações finais, bem como algumas propostas de melhoria do sistema.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo pretende-se enunciar e caracterizar o processo de enrolamento filamental, assim como os materiais que estão subjacentes a esta técnica de processamento, os materiais compósitos. Por outro lado é objetivo do mesmo capítulo efetuar uma familiarização com conceitos fundamentais para melhor compreensão do tema. Pretende-se fundamentar a utilização de determinados materiais, técnicas de processamento e realçar a importância da necessidade de automatização do processo.

2.1 Materiais Compósitos

Cada vez mais nas diversas aplicações de engenharia a procura de um produto que possua propriedades onde a relação resistência/peso e rigidez/peso seja alta é um objetivo primordial no sentido de encontrar soluções de melhor desempenho com mais baixo custo em diversos domínios desde os mecânicos aos poliméricos.

O avanço tecnológico promoveu novas exigências aos materiais comuns, facto que transporta ao aparecimento de materiais com capacidades de responder de forma mais eficaz a esses novos requisitos. Um paradigma destes materiais são os materiais compósitos. Estes materiais emergem de forma crescente e sustentada no desenvolvimento de produtos em diversas aplicações industriais [1, 2].

A expansão da procura e aplicação de materiais compósitos reflete-se em áreas diversificadas, tais como: automóvel, aeronáutica, aeroespacial, construção civil, aplicações mecânicas, entre outras.

Um material compósito resulta da combinação de pelo menos dois materiais distintos quer nas propriedades físicas quer nas suas propriedades químicas. As características resultantes da combinação das matérias-primas são melhores que as propriedades de cada material quando separado [3-5].

A constituição de um material compósito é agrupada em duas partes a matriz o reforço sendo que a matriz tem como finalidade de conferir a estrutura ao material, transmitir a cargas para as fibras e preencher espaços vazios, ao passo que o reforço é o elemento que concede ao compósito melhores propriedades mecânicas, resistência, rigidez, entre outras [2, 3, 6].

A seleção dos elementos matriz e reforço está relacionado com a técnica de processamento a adotar, o tipo de esforços atuantes e o custo, quer de matérias quer de processos. Contudo dependendo da aplicação/função a desempenhar pode haver outros critérios que se tronem relevantes no processo de seleção de materiais. O melhor material compósito não é o que combina a melhor matriz com o melhor reforço, mas sim o material onde é obtida a melhor interface entre essas duas fases, matriz e reforço [5, 7].

Assim as propriedades dos materiais compósitos dependem diretamente da natureza e a qualidade da interface entre a matriz e o reforço, contudo há um conjunto de parâmetros que influenciam a qualidade do compósito tais como as propriedades dos seus constituintes, a geometria, distribuição, orientação e concentração do reforço, [2, 8, 9].

Em síntese um material compósito contém dois ou mais materiais fisicamente distintos e separáveis, podem fabricar-se misturando os materiais de tal forma que a dispersão de um no outro é passível de ser controlada, por último mas não menos importante as propriedades fruto do conjunto são sempre superiores comparativamente a cada material em separado. Na Figura 1 está esquematizada uma classificação dos materiais compósitos, adaptada de [4, 7].

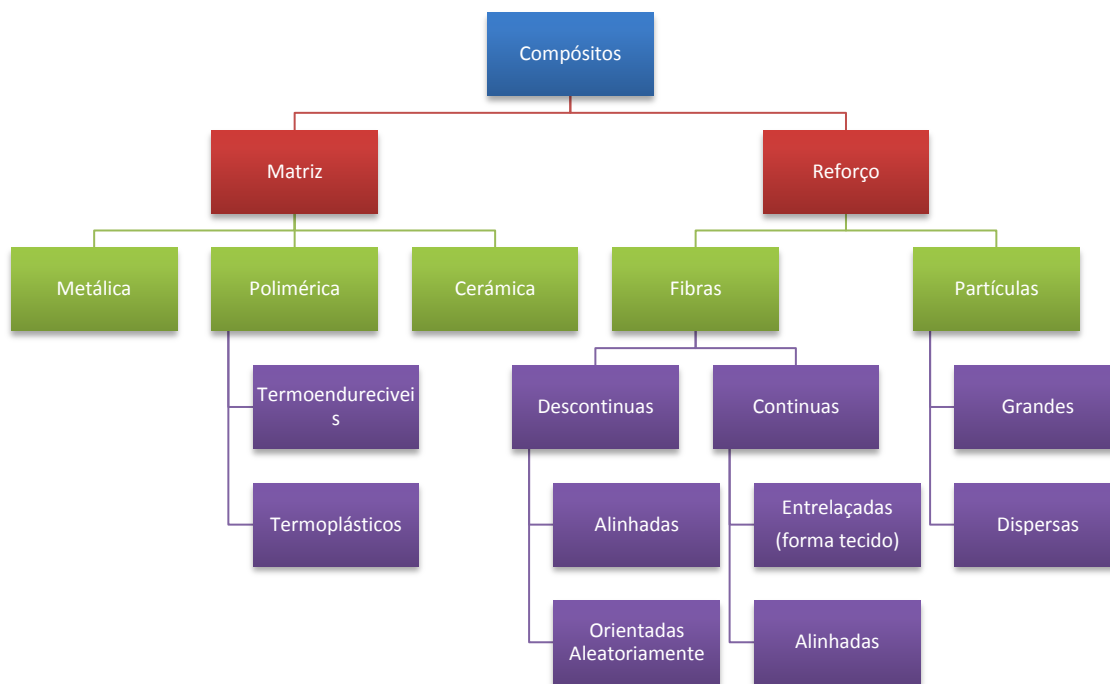


Figura 1 - Classificação de Materiais Compósitos [4, 7]

2.1.1 Matérias – Primas

Com referido anteriormente um material compósito possui duas fases na sua constituição, a matriz e o reforço. Qualquer uma dessas duas fases pode ter várias origens no que concerne à natureza do material. Neste subcapítulo serão apresentados as possibilidades de matérias-primas existentes com ênfase para os materiais selecionados para a aplicação em concreto.

2.1.1.1 Matrizes

A classificação dos materiais compósitos pode se realizar segundo o tipo de matriz, neste pressuposto a sua catalogação efetua-se segundo três origens: matriz metálica, polimérica ou então cerâmica, como ilustrado na Figura 1. No entanto a esmagadora maioria das matrizes é de origem polimérica. Nesse sentido apresenta-se na Figura 2 os vários tipos de polímeros existentes.

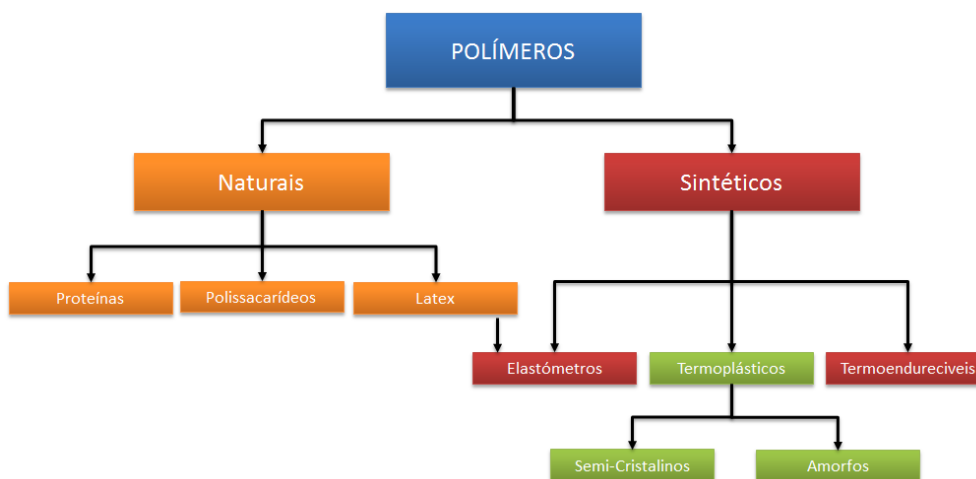


Figura 2 – Tipos de materiais poliméricos.

As propriedades do compósito são altamente influenciadas pelas propriedades da matriz. A função da matriz é de transferir as tensões aplicadas ao reforço, funcionar como barreira química a ambientes agressivos, proteger a superfície das fibras, absorver tensões tangenciais interlaminares e manter o posicionamento das fibras [10, 11].

Relativamente ao processo de enrolamento filamentar a matriz aplicada é polimérica, devido ao seu rácio peso/resistência, sendo os termoplásticos ou termoendurecíveis os materiais mais utilizados [8, 11]. A grande diferença entre estes dois tipos de materiais está no comportamento apresentado quando sujeitos a calor. Enquanto os termoplásticos fundem-se e podem ser reprocessados, tendo uma nova estrutura quando arrefecidos, os termoendurecíveis degradam-se à medida que são expostos a um aumento de temperatura[10, 12].

As resinas termoendurecíveis foram as primeiras a serem empregues e com ampla aplicação. Nos dias de hoje é crescente a utilização de termoplásticos, tendo-se desenvolvido equipamentos para uma maior e melhor aplicação [11]. Os materiais termoplásticos caracterizam-se pela possibilidade de se poderem fundir e reprocessar e apresentam viscosidades mais elevadas. Contrariamente aos polímeros termoplásticos, as resinas termoendurecíveis não se fundem, e no que respeita à viscosidade esta é mais baixa [3].

Na Tabela 1 apresenta-se as propriedades de alguns dos materiais termoplásticos mais usados neste processo.

Tabela 1 – Propriedades de termoplásticos [13]

| Propriedade | Unidade | Termoplástico | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|---------------|--------|---------|-------|------|---------|
| | | ABS | Nylon | PEEK | PP | PC | PET |
| Densidade | Kg/m ³ | 1,04 | 1,14 | 1,3 | 0,905 | 1,15 | 1,36 |
| Calor específico | | 1,3 | 1,7 | - | 2,0 | 1,2 | 1,0 |
| Tensão de rotura | Mpa | 38 | 70 | 62 | 33 | 65 | 75 |
| Modulo | | 2,2 | 2,8 | 3,8 | 1,5 | 2,8 | 3 |
| Coefficiente de expansão térmica | °C ⁻¹ | 8 | 60 | 4 | 150 | 100 | 70 |
| Condutibilidade térmica | W/m°C | 2,1 | 3,9 | 42 | 1 | 4,2 | 3,0 |
| Tensão de rotura | | 0,25 | 0,24 | - | 0,20 | 0,2 | 0,2 |
| Módulo específico | | 252 | 260 | 385 | 204 | 270 | 260-310 |
| Diâmetro das fibras | | 60-105 | 65,177 | 177-315 | 120 | 120 | 80-120 |

2.1.1.2 Reforços

Como já foi referenciado a parte do compósito que confere resistência é o seu reforço. Segundo Marafona [11] um reforço tem uma resistência à tração por unidade de superfície superior aquela que um bloco maciço do mesmo material. Sendo que essa resistência aumenta com a diminuição do diâmetro [11].

Os materiais mais utilizados como reforço em material compósito, sobretudo em fita pré impregnadas, são: fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de kevlar. As fibras de vidro são as que apresenta um custo mais reduzido no entanto o seu desempenho são inferiores quando comparado com os outros materiais. Contudo são amplamente utilizadas por terem uma relação custo desempenho bastante atrativa [3, 10, 11].

A utilização das fibras de carbono, quando comparadas às fibras de vidro, é inferior porque apesar de apresentarem cerca de três a sete vezes maior rigidez, são cerca de quinze vezes mais caras que as fibras de vidro. As aplicações das fibras de carbono são sobretudo em componentes estruturais devido à sua elevada rigidez, por vezes em estruturas que necessitem de uma estabilidade dimensional é corrente a sua utilização pois as fibras de carbono possuem um baixo coeficiente de dilatação térmica. Outra característica e vantagem da fibra de carbono é a condutibilidade térmica sendo assim por vezes uma ótima aplicação para condução elétrica [3].

A fibra de aramida possui alta resistência ao corte e um elevado poder de isolamento térmica. São uma ótima solução para tubulações, revestimento térmico de mangueiras, cabos elétricos, tubulações frigoríficas e de ar condicionado. No entanto este tipo de fibra é menos empregue do que as fibras de vidro e de carbono.

De acordo com Silva [10] a fibra de vidro é o reforço mais utilizado na indústria de compósitos, devido à relação custo/desempenho, tendo as seguintes características:

- Resistência mecânica - resistência específica (resistência à tração/densidade) superior à do aço;
- Características elétricas - excelente isolante elétrico mesmo em espessuras reduzidas;
- Incombustibilidade - esta matéria-prima é incombustível por natureza. Não propaga a chama nem origina fumos com o calor;
- Estabilidade dimensional - é pouco sensível às variações de temperatura e humidade, tendo um baixo coeficiente de dilatação térmica;
- Compatibilidade com as matérias orgânicas - apta a receber diferentes ensimagens, o que lhe permite associar-se a diferentes resinas sintéticas;
- Pequena condutibilidade térmica – aplicações que requeiram reduzidas perdas térmicas;
- Permeabilidade dielétrica – torna-o num material indispensável em aplicações como radares, aplicações magnéticas;
- Resistência a agentes químicos – conjuntamente com resinas apropriadas a fibra de vidro permite a construção de estruturas com elevada resistência química.

No mercado industrial a fibra de vidro surge de formas diversas. Na Tabela 2 elenca-se os vários tipos presentes no mercado [10]. Na Tabela 3 apresenta-se os tipos de fibra mais utilizados e suas propriedades.

Tabela 2 – Tipos de fibra no mercado [10]

| Manta | Roving | Tecido |
|----------------------|-------------|---------------|
| Superfície | Direto | Equilibrado |
| Filamentos curtos | Texturizado | Unidirecional |
| Filamentos contínuos | | Orientado |

Tabela 3 - Propriedades das fibras de reforço [13]

| Propriedade | Unidade | Vidro | | | Carbono | | Aramida |
|----------------------------------|----------------------|-------|------|------|---------|------|-----------|
| | | E | R | S | Pitch | PAN | Kevlar 29 |
| Densidade | Kg/m ³ | 2,56 | 2,49 | 2,58 | 2,0 | 1,8 | 1,44 |
| Calor específico | kJ/kg.k | 0,9 | 0,73 | - | - | - | 1,1 |
| Tensão de rotura | Gpa | 3,6 | 4,5 | 4,4 | 1,5 | 2,8 | 2,8 |
| Modulo | Gpa | 76 | 89 | 85 | 380 | 270 | 62 |
| Coefficiente de expansão térmica | 10 ⁻⁶ /°C | 4,9 | | | -1,3 | -0,6 | -2,0 |
| Condutibilidade térmica | W/m.K | 1,04 | | | 7-28 | 7-10 | - |
| Tensão de rotura | KNm/kg | 1400 | 1800 | 1700 | 750 | 1555 | 1944 |
| Módulo específico | MNm/kg | 29,6 | 34,5 | 32,9 | 190 | 150 | 43,0 |
| Diâmetro das fibras | | 3-20 | 8-13 | 5-24 | 10-11 | 7,5 | 12 |

2.2 Pré – impregnados

Um pré-impregnado resulta de uma mistura entre fibra e resina para posteriormente consolidar. As fibras, reforços, podem ser de natureza diversa, tais como os que foram apresentados anteriormente. No que concerne à qualidade da matriz, esta poderá ser também do tipo termoendurecível ou termoplástico [14].

No caso das matrizes termoendurecíveis a mistura fibra/resina apresenta uma boa consistência, sendo nestes casos é eliminada a necessidade de pesar e misturar resina e catalisador. Contudo nos casos dos termoplásticos a sua validade é ilimitada quando expostos a uma temperatura ambiente. A utilização desta resina apresenta, segundo Pereira [14], vantagens: reprocessamento, resistência a solventes e químicos, tempo de ciclo reduzido, maior resistência, maior potencial de reparabilidade e maior flexibilidade para ligação e montagem por ligação por fusão e consolidação in sitio [14].

Contudo os pré-impregnados termoplásticos requerem temperaturas e pressões de processamento mais altas que os termoendurecíveis.

Métodos de pré impregnação mais utilizados segundo João Simões 1992.

- Pré-impregnados de roving comercial (enrolamento seco)
- Reenrolados (rerolled)
- Enrolamento húmido

A qualidade do pré impregnada é elevada, conteúdo de resina é uniforme e a largura de banda é controlável. É normal adicionar solventes na formulação da resina com o intuito de aumentar a sua vida em armazenado. No entanto esses solventes facilitam a incubação de ar o que leva a uma diminuição da resistência mecânica [6].

2.3 Enrolamento Filamentar

Originalmente, as técnicas de fabricação de compósitos consistiam exclusivamente num processo de trabalho artesanal apresentando uma produtividade e diversidade de produtos muito reduzida. No início dos anos 50, com a multiplicidade e o volume de aplicação destes materiais a indústria iniciou uma pesquisa de forma a automatizar e desenvolver sistemas de produção de materiais compósitos mais competentes [8, 15]. Através da evolução do processo, enrolamento filamentar, nomeadamente da sua automatização, é possível obter produtos de alta qualidade devido à repetibilidade do processo. A relação flexibilidade/volume produzido é uma mais-valia para esta tecnologia de fabrico.

O Enrolamento Filamentar, Figura 3, caracterizou-se inicialmente por um método contínuo e de baixo custo para produção de componentes cilíndricos e sobretudo componentes simétricos, contudo com a evolução das máquinas e ferramentas, que são cada vez mais versáteis, a fabricação de peças com geometrias mais complexas, peças assimétricas tornou-se viável neste tipo de processo, quer em termos económicos quer em termos de exequibilidade de processamento. Os produtos produzidos através desta tecnologia cobrem uma ampla área de diferentes mercados tais como: indústria automóvel, aeronáutica, desportiva, militar [16]. Reservatórios de pressão, tanques, eixos, mancais, secções de fuselagem, raquetes de ténis, mastros são alguns exemplos de peças obtidas pela tecnologia de enrolamento filamentar.

No processo de enrolamento filamentar a resistência das estruturas são sobretudo influenciadas pela orientação da deposição das fibras. Essa orientação, ângulo de enrolamento, é determinada pela combinação entre a velocidade de rotação do mandril juntamente com a velocidade de deslocamento transversal do dispositivo de deposição da fita ou dos rovings.

Numa determinada estrutura podem ser depositadas diferentes camadas com diferentes ângulos de enrolamento, obtendo-se assim laminados com comportamentos distintos. O ângulo ideal de enrolamento depende da grandeza e da natureza da carga aplicada [8].



Figura 3 – Exemplo de equipamento de enrolamento filamentar.

Como dito anteriormente há um universo de parâmetros que influenciam as propriedades finais do compósito obtido por enrolamento. Cataloga-se alguns:

Parâmetros do processo de enrolamento filamentar [10]

- Tensão nas fibras;
- Sequência de empilhamento das camadas;
- Gradiente de tensão nas fibras;
- Tempo de enrolamento entre camadas;
- Grau de sobreposição das fibras umas nas outras;
- Grau de entrecruzamento das fibras;
- Velocidade de produção;
- Viscosidade da resina que impregna as fibras;
- Formulação da resina.

2.3.1 Padrões de enrolamento filamentar

Basicamente no processo de fabricação, enrolamento filamentar, existem três tipos de padrões possíveis de executar, Figura 4. Enrolamento helicoidal, polar e circular são o tipo de trajetórias comuns para uma ampla gama de produtos. A diferença entre estes tipos de enrolamento reflete-se no ângulo de orientação das fibras, que é normalmente medido em relação ao eixo longitudinal do mandril. O enrolamento polar é usado para ângulos de enrolamento próximos de zero e é obtido por enrolamento entre polos. No entanto a gama de ângulos para este tipo de enrolamentos pode variar entre 0° e 15° . Neste tipo de enrolamento o mandril permanece estacionário enquanto a cabeça de deposição desloca-se em torno do eixo longitudinal. Em cada deslocamento da cabeça de deposição o mandril avança o valor da largura da fita. Este procedimento repete-se até o mandril estar totalmente coberto, ou então até se atingir a espessura necessária. A aplicação do enrolamento polar é particularmente usada para reservatórios fechados. De forma a obter-se uma tensão circunferencial requerida este padrão de enrolamento é normalmente combinado com o enrolamento circunferencial.

O enrolamento helicoidal caracteriza-se por se ângulos de enrolamento entre os 15° e 80° aproximadamente. O revestimento completo do mandril é fruto de um conjunto de circuitos alternados em orientações positivas e negativas. A sincronização entre a velocidade rotacional do mandril com a velocidade longitudinal da cabeça de alimentação faz com que se obtenha o ângulo pretendido. O padrão de enrolamento helicoidal é mais versátil do que o enrolamento polar, pois permite um maior número de combinações de dimensões de (diâmetro, comprimento) e de ângulos de enrolamento.

No que diz respeito ao enrolamento circunferencial, este é um caso particular do enrolamento helicoidal sendo que no revestimento circunferencial a orientação das fibras muito próximo de um ângulo de 90° [6, 10-12, 17].

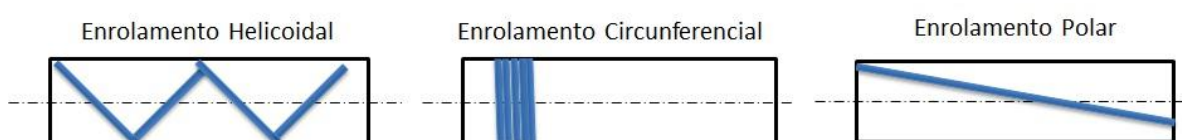


Figura 4 - Padrões de enrolamento filamentar [12]

2.3.2 Características do processo (enrolamento filamentar)

- Não existem limitações relativamente às dimensões das peças a fabricar;
- Possibilidade de realizar a produção de uma forma contínua;
- Produção muito fiável e repetitiva com pouca necessidade de mão-de-obra;
- Necessita de um número de afinações relativamente elevado e mão-de-obra qualificada;
- A cadência de produção é relativamente baixa;
- Permite a obtenção de peças ocas por enrolamento de diferentes reforços impregnados em contínuo por uma resina, sobre um molde;
- As técnicas de produção podem sofrer alterações de acordo com as dimensões da peça, a forma e os reforços utilizados;
- As peças produzidas concorrem diretamente com as peças fabricadas em materiais tradicionais como o aço ou outros metais;
- Obtenção de peças com boas propriedades mecânicas devido à grande percentagem de fibra no material compósito e à sua orientação no sentido das forças a aplicar ao material.

2.3.3 Propriedades Mecânicas dos compósitos [6]

- Os sistemas reforço e resina utilizados convenientemente precisam de avaliação das características;
- O grau de compactação tem um grande impacto nas propriedades, a uniformidade da fibra com a resina, o teor de bolhas de ar, entre outros;
- O ângulo de enrolamento, a sequência de camadas, e o facto de as estruturas serem de geometria fechada leva a obtenção de resultados diferentes.

Quanto maior for a pressão, que está dependente da tensão nas fibras e do ângulo de enrolamento, menor será a tendência para a formação de vazios na estrutura do compósito [6].

2.3.4 Configurações de Máquinas

Com a crescente evolução do processo de enrolamento filamentar encontra-se no mercado vários tipos e configurações de máquinas. Máquinas de vários eixos e com capacidade de realizar vários componentes em simultâneo estão hoje disponíveis. Aliais uma grande parte das soluções deste tipo de equipamento passa por congregar um dispositivo de rotação/translação a um equipamento robótico, sobretudo robôs antropomórficos. Desta forma é garantida a qualidade e repetibilidade do processo aliando uma maior flexibilidade de produtos.

As características de um equipamento variam de acordo com alguns pressupostos: o tipo de produto a conceber, a diversidade de produtos, a qualidade do componente, o custo da máquina e as suas dimensões e/ou capacidades e limitações [11].

A catalogação das máquinas de enrolamento pode-se realizar segundo a sua disposição, assim divide-se em dois grandes grupos: a orientação horizontal (*lathe winder*) Figura 5 a), e orientação vertical (*tumble winder*) Figura 5.

As máquinas de eixo horizontal são sobretudo para executar enrolamento circunferencial e helicoidal. Estão amplamente difundidas na indústria e garantem uma boa versatilidade. Este tipo de máquina pode abranger dois até a seis graus de liberdade. Permitem a conceção de peças de grande porte, possui uma produtividade alta e os graus de liberdade podem aumentar com a adição de um outro carro de deposição.

As máquinas de orientação vertical são utilizadas para enrolamento polar e helicoidal. Neste equipamento o mandril roda em torno do seu eixo e a cabeça de deposição move-se com trajetória circular em torno de um eixo perpendicular ao mandril.

Estas máquinas apesar de terem configurações diferentes apresentam elementos comuns. O sistema de enrolamento da fibra, o sistema de tensionamento da fibra (mecânico, hidráulico ou elétrico), sistema de banho ou aquecimento, comando automático (controlo numérico) e um controlador de gestão interna são componentes comuns em ambos os modelos.



Figura 5 – a) disposição lathe winder b) disposição tumble winder

Enrolamento de termoendurecíveis e termoplásticos

No sentido de promover uma familiarização com o processo de enrolamento filamentar para os dois tipos de materiais, termoplásticos e termoendurecíveis, apresenta-se na Figura 6 os esquemas básicos para o processamento.

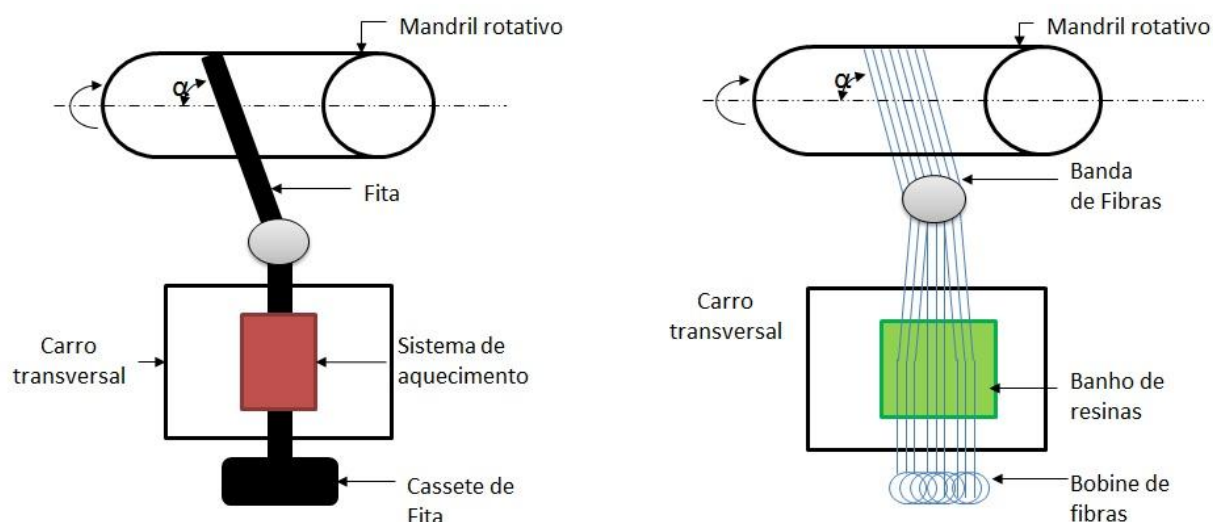


Figura 6 - a)Esquema de enrolamento termoplástico b) Esquema enrolamento termoendurecíveis [12, 18]

O enrolamento de fibras com resinas termoendurecíveis é caracterizado por haver um banho de resinas antes do conjunto fibra/resina ser colocado no mandril. Normalmente as fitas pré impregnadas são produzidas recorrendo a polímeros termoplásticos, sendo que no processo de enrolamento filamental o processo de banho é substituído por um sistema de aquecimento. Este aquecimento é realizado para poder moldar a fita ao mandril. Ao contrário dos materiais termoendurecíveis, os termoplásticos não necessitam de um tratamento de cura quando finda o revestimento total do mandril.

2.3.5 Software CAM no processo de enrolamento filamental

A utilização de ferramentas computacionais é uma prática comum nas mais diversas áreas. No processo de enrolamento filamental o cálculo e dimensionamento do reservatório, a geração de revestimentos, a simulação de trajetórias, assim como a otimização do processo de deposição são realizados recorrendo a essas ferramentas. Hoje em dia a oferta de *software* para o auxílio da engenharia em CAD, CAE e CAM é bastante vasta. A seguir são elencados alguns dos programas mais utilizados para o efeito:

Um sistema CAD/CAM, segundo Simões [6], deve estar dotado de algumas capacidades, tais como:

- Modelador de superfícies tridimensionais;
- *Software* específico para geração de trajetórias;
- Códigos numéricos da teoria de laminados;
- Códigos de análise estrutural;
- *Hardware* necessário à realização do processo.

Em seguida são apresentados alguns *softwares* de auxílio ao processo de enrolamento filamental assim como uma breve descrição de cada um. Esse auxílio é sobretudo ao nível de CAM, contudo alguns são uma ferramenta de, de baixo nível, na área de CAE.

CADWIND®

CADWIND é um *software* com a capacidade de simular as trajetórias de enrolamento. Esta simulação é realizada com base num modelo físico. O cálculo padronizado do enrolamento é

realizado para qualquer geometria, sendo gerado automaticamente o programa peça para qualquer dispositivo de enrolamento [19, 20].

Este programa possui um módulo de simulação de atrito entre fibra e o mandril, permitindo percorrer um caminho geodésico [12].

COMPOSICAD®

Este programa reúne um conjunto de *softwares* (pacotes) capazes de gerar os padrões necessários para a produção de equipamentos CNC... o COMPOSIT CAD tem duas vertentes: a série Metal e a série Stone. A primeira aplica-se para enrolamento filamentar genérico, ao passo que a segunda destina-se a colocação de fibra automatizada. A versão Prata utiliza uma modelagem paramétrica, geração automática de espessura do laminado e padrões de enrolamento simples.

CADFIL®

Este programa é mais uma solução para a programação de enrolamento filamentar para máquinas de comando numérico. É um programa muito versátil pois permite uma personalização completa por parte do utilizador. É possível criar padrões de enrolamento simples bem como de peças com alguma complexidade [21].

A visualização da superfície da peça em formato bidimensional e tridimensional, o sistema de segurança contra a colisão do mandril, a possibilidade de alterar o ângulo de enrolamento entre camadas, a ferramenta de análise de elementos finitos e o output de instruções de CNC são grandes vantagens desta ferramenta computacional [12]

CADPATH®

Esta solução passa por incorporar ferramentas de CAD, CAE e CAM. É assim possível calcular o caminho sinuoso para componentes rotacionalmente simétricos, executar o cobrimento segundo um enrolamento padrão, atualizar a geometria entre as sucessivas camadas, realização de simples forças e análise de rigidez do laminado resultante, transferência de dados dos laminados para programas FEM, e transferência de dados para a geração de arquivos de controlo para máquinas de enrolamento filamentar [22].

FIBERGRAPHIX®

O *software* FiberGrafIX™ foi criado pela empresa *Entec Composite Machines*. Esta empresa é líder mundial no mercado de produção de máquinas de enrolamento filamentar. A experiência adquirida ao longo dos tempos na construção de soluções mecânicas despertou a necessidade de criar um *software* para a geração de caminhos padrão e optimização dos mesmos.

FiberGrafIX™ tem a capacidade de gerar caminhos de deposição da fibra, criando os movimentos necessários das máquinas para a manufatura de peças de enrolamento filamentar entre dois a seis eixos de movimentação. A optimização padrão permite a colocação das fibras com precisão e altas velocidades de enrolamento. Este programa possui um interface de elementos finitos para simplificar a tarefa de criar a análise de elementos finitos paralelamente noutra plataforma.

A opção de automação permite ao utilizador decidir o nível de automação necessário para o projeto. Apesar de a automação tornar mais fácil o programa, limita algum controlo sobre os módulos automatizados [23].

2.4 Robótica/Automatização do processo enrolamento filamentar

A utilização de materiais compósitos deve-se em grande parte ao seu desempenho e ao custo competitivo que apresentam na sua conceção. A competitividade no mercado destes materiais revela-se sobretudo se a sua cadeia de produção for rentabilizada. Essa rentabilização passa pela seleção de um processo adequado, mas também pela automatização desse processo e consequentemente otimização.

A indústria de compósitos tem crescido exponencialmente, sendo que a otimização dos materiais, resinas e reforços, são alvo de uma permanente evolução através de pesquisa e desenvolvimento. Não obstante os processos de fabrico tendem a acompanhar esse crescimento. No que concerne ao processo de enrolamento filamentar o processo que se caracteriza por simples e barato não apresentava uma cadência de produção satisfatória para a indústria o que conduziu ao aparecimento de máquinas mais complexas, nomeadamente máquinas de comando numérico computadorizado (CNC). Estes tipos de equipamentos revelaram-se fundamentais noutro tipo de processos de manufatura. Relativamente ao enrolamento filamentar revela-se importante pois permite aumentar a capacidade deste tipo de equipamentos sendo possível fabricar até quatro reservatórios com 220 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento em simultâneo [24].

Este desenvolvimento, máquinas CNC, ocorreu por volta dos anos 1980, sobretudo como consequência da evolução dos dispositivos computacionais. Uma máquina CNC é facilmente integrada com ambientes CAD/CAM [25].

Capítulo 3 - Parametrização do enrolamento filamentar

O presente capítulo tem como objetivo detalhar as várias etapas realizadas até atingir a programação da trajetória na linguagem do controlador NX100. O processo de enrolamento filamentar está dividido em várias fases: primeiramente efetuar o dimensionamento, com o intuito de conhecer o número de camadas de enrolamento circunferencial e helicoidais /polar necessária para resistir à pressão interna solicitada, seguidamente efetuar o cálculo das trajetórias de revestimento do reservatório. Por último mas não menos importante programar o braço robot com base nas coordenadas obtidas anteriormente de modo a executar o processo de enrolamento.

3.1 Dimensionamento de Reservatórios

O cálculo para o dimensionamento de reservatórios teve como base o livro *Composite Materials – Design and applications* e a norma EN13923-2005.

Tabela 4 – Fatores parciais de projeto

| Factor de projecto parcial | | Valor mínimo | Valor máximo |
|--|-------|--------------|--------------|
| Efeito de heterogeneidades e dispersão | A_1 | 1,0 | 2,0 |
| Efeito do líquido do reservatório e ambiente | A_2 | 1,1 | 1,8 |
| Efeito da temperatura de projecto | A_3 | 1,0 | 1,4 |
| Efeito da carga dinâmica | A_4 | 1,0 | 1,1 |
| Efeito do comportamento a longo prazo | A_5 | 1,25 | 2,0 |

$$K = S \times A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 \quad (3.1)$$

A deformação admitida é dada pela equação

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_{min}}{A_5} \quad (3.2)$$

As deformações limite para as resinas termoplásticas são dadas pela Tabela 5.

Tabela 5 – deformação limite para termoplásticos

| Tipo de material | ε_{lim} |
|------------------|---------------------|
| PE | 0.6 % |
| PP | 0.5 % |
| PVC-C | 0.4 % |
| PVC-U | 0.25 % |
| PVDF | 0.5 % |

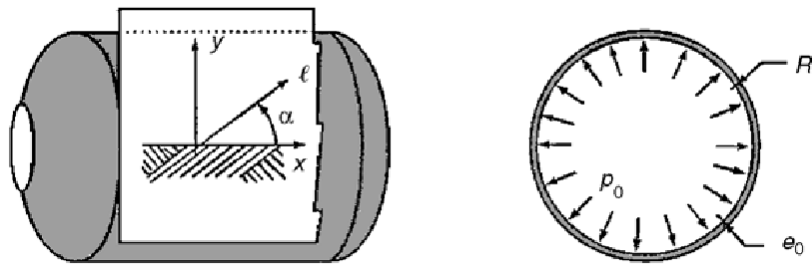


Figura 7 – Exemplo de estudo de reservatório [5]

Na Figura 7 está representada um exemplo de um reservatório cilíndrico sujeito a uma pressão interna. Segundo o equilíbrio ao longo da direção axial, Figura 8, a tensão σ_{ox} é dada por:

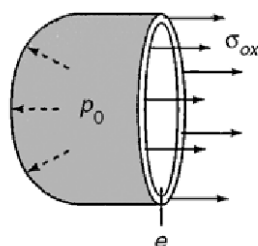


Figura 8 – Equilíbrio segundo direção axial [5]

$$\sigma_{ox} = \frac{p_0 R}{2e} \quad (3.3)$$

Quanto á tensão tangencial circunferencial, onde o equilíbrio está representado na Figura 9, o seu valor é obtido por:

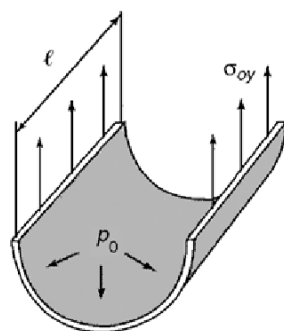


Figura 9 – Equilíbrio segundo direção circunferencial

$$\sigma_{oy} = \frac{p_0 R}{e} \quad (3.4)$$

De acordo com as equações anteriores a tensão nas fibras é dada por:

$$\sigma_l = \frac{3}{2} \times \frac{p_0 R}{e} \quad (3.5)$$

Assim a espessura do reforço será dada por:

$$e = \frac{3}{2} \times \frac{p_0 R}{\sigma_l} \quad (3.6)$$

Sendo que a espessura do compósito é:

$$e_0 = \frac{e}{V_f} \quad (3.7)$$

Anteriormente procedeu-se ao cálculo da espessura necessária de uma material compósito para o revestimento de um reservatório de pressão. No entanto esse calculo não levou em conta a orientação das fibras. Para o cálculo da espessura do revestimento em camadas circunferenciais e helicoidais é dado por e_1 e e_2 respetivamente.

$$e_1 = \frac{p_0}{\sigma_{l1}} \times \frac{R}{2 \times \cos^2 \alpha_1} \quad (3.8)$$

$$e_2 = \frac{p_0}{\sigma_{l2}} \times R \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_1}{2} \right) \quad (3.9)$$

$$e_{min} = \frac{p_0 R}{2 \times \sigma_{lrutura}} \times \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_1} + 2 - \tan^2 \alpha_1 \right) \quad (3.10)$$

$$e_{min} = \frac{3}{2} \times \frac{p_0 R}{\sigma_{lrutura}} \quad (3.11)$$

$$e_{real} = \frac{3}{2} \times \frac{p_0 R}{\sigma_{lrutura}} \times \frac{1}{V_f} \quad (3.12)$$

3.2 Cálculo de Trajetórias

Revestimento circular

Neste padrão de enrolamento as fibras/fita é posicionada de forma precisa e adjacente, preenchendo assim toda a superfície do mandril. Para o cálculo das trajetórias deste tipo de padrão de enrolamento foram considerados alguns dados de entrada, que estão elencados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de entrada enrolamento circular

| Dados de entrada | | |
|-----------------------------|------------|--------------|
| Parâmetro | Símbolo | Unidades |
| Largura da fita | w | mm |
| Raio de abertura polar | r_0 | mm |
| Espessura da fita | e | mm |
| Diâmetro do mandril | D | mm |
| Comprimento do revestimento | C_{rc} | mm |
| Comprimento do mandril | C | mm |
| Distância do olho (pay-out) | d_{pout} | mm |
| Ângulo teta (ponto inicial) | d_t | adimensional |
| Decremento do ângulo teta | d_t | adimensional |
| Velocidade angular | Ω | rad/s |
| Sobreposição da fita | sp | % |
| Número de camadas | N_c | Adimensional |

Após a indicação destes dados a primeira variável a calcular é o número de iterações (N_i) ao longo de um ciclo de 360° através da equação 3.1:

$$N_i = 360 \left(\frac{1}{d_t} \right) \quad (3.13)$$

Onde d_t é o decremento θ como ilustra a Figura 10.

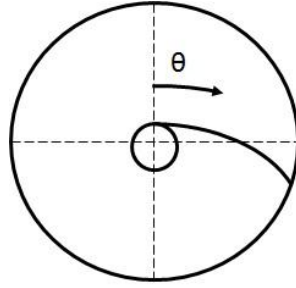


Figura 10 – Decremento ângulo teta [12]

Após o cálculo do número de iterações é calculado o incremento do revestimento circular. Este incremento é necessário e permite colocar as várias revoluções posicionados lado a lado sobre toda a superfície do mandril. O valor do incremento, no caso particular do enrolamento circular, no final de todas as iterações é igual ao passo (largura da fita), a não ser que se pretenda uma sobreposição da fita.

$$I_{rc} = \frac{w * sp}{Ni} \quad (3.14)$$

Após o conhecimento desta variável (I_{rc}) pode-se iniciar o cálculo das coordenadas X, Y, Z, sendo que a coordenada Z inicia em zero e será somado o valor do incremento a cada iteração. Quanto ao valor de X é dado pela equação 3.3 e o valor da coordenada Y é dado pela equação 3.4.

$$X = R \cos \theta \quad (3.15)$$

$$Y = R \sin \theta \quad (3.16)$$

Onde R representa o raio do mandril obtido por:

$$R = \frac{D}{2} \quad (3.17)$$

A determinação real do ângulo de enrolamento (α) é realizada segundo a equação seguinte:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right) \quad (3.18)$$

O sistema de eixos definidos está ilustrado na Figura 11.

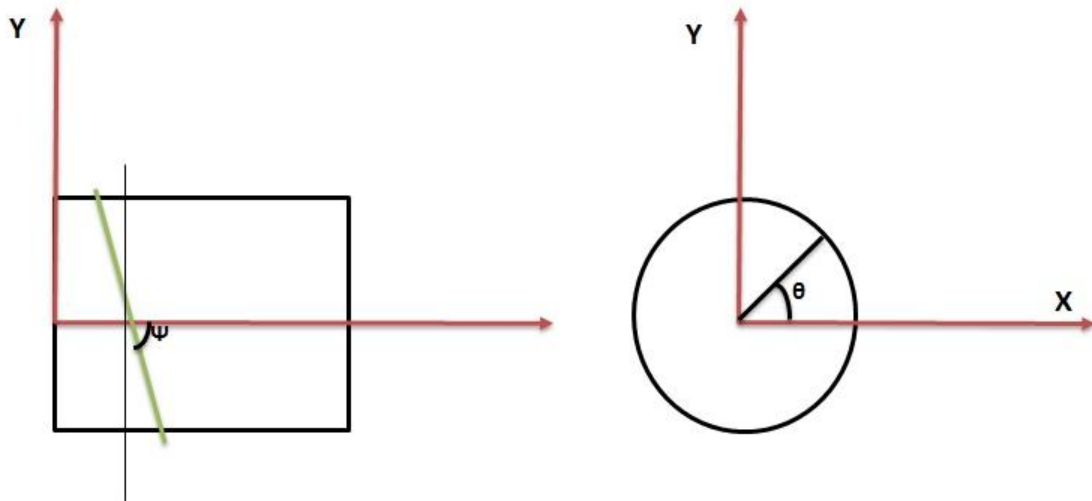


Figura 11 - Esquema de coordenadas para calculo

Por ultimo uma variável que será necessária para a programação do robot é a velocidade longitudinal. Está será obtida por:

$$V = \frac{\Delta Z}{\Delta t} \quad (3.19)$$

Sendo que o tempo em cada instante é dado por:

$$t = \theta * \omega \quad (3.20)$$

a posição do ponto é expressa em radianos multiplicada pela velocidade angular. O tempo está em unidades do SI.

Revestimento helicoidal

Para o cálculo da trajetória para este tipo de revestimento é necessário os dados de entrada que estão elencados na Tabela 7. Neste tipo de enrolamento o melhor posicionamento das fibras não depende do decremento teta mas sim do incremento da posição X. o decremento teta neste tipo de enrolamento é dado por:

$$\theta = \theta_0 + \frac{c_c (x-x_0)}{r\sqrt{r^2 - c_c^2}} \quad (3.21)$$

Ou seja,

$$\theta = \theta_0 + (x - x_0) \tan \omega \quad (3.22)$$

Tabela 7 - Dados de entrada enrolamento helicoidal

| Dados de entrada | | |
|-----------------------------|------------|--------------|
| Parâmetro | Símbolo | Unidades |
| Largura da fita | w | mm |
| Raio de abertura polar | r_0 | mm |
| Espessura da fita | e | mm |
| Diâmetro do mandril | D | mm |
| Comprimento do revestimento | C_{rh} | mm |
| Distância do olho (pay-out) | d_{pout} | mm |
| Ângulo teta (ponto inicial) | θ | Graus |
| Decremento do ângulo teta | d_t | adimensional |
| Ângulo alfa (enrolamento) | α | Graus |
| Velocidade angular | Ω | rad/s |
| Sobreposição da fita | Sp | % |
| Número de camadas | Nc | Adimensional |

A condição de revestimento helicoidal é dada por:

$$\omega_i < W < \omega_f \quad (3.23)$$

Sendo que,

$$\omega_i = \tan^{-1} \left(\frac{D}{L} \right)$$

3.3 Automatização da Programação de robô

A programação de um robô envolve a especificação de um conjunto de pontos no espaço que deverão ser percorridos posteriormente, paralelamente é definido o tipo de movimentação entre esses pontos assim como a sua velocidade de movimentação [26, 27].

A programação robótica basicamente é realizada de duas formas: ensinamento efetuado ativa ou passivamente diretamente na consola (programação online), ou então efetuar as instruções recorrendo a um *software* de simulação de programação (programação off-line) [26, 27].

A programação direta, é uma aprendizagem que implica a movimentação do robô e consequentemente a memorização desses pontos para percorrer automaticamente ou manualmente. Este tipo de programação pode-se ainda fazer por meio de introdução dos pontos na consola através de introdução das coordenadas [26, 27]. Contudo nesta variante não há um total controlo do caminho que as várias articulações executam, aumentando assim o risco de ocorrência de choque. Este tipo de programação, programação online, é complementado com a introdução de uma programação textual onde é especificado o tipo de movimento entre os pontos, tipo de interpolação, as velocidades desejadas e por último outros comandos que permitem uma interação para realizar as tarefas pretendidas [26, 27].

No que concerne à programação off-line, a utilização direta do robô não é requerida enquanto é criado o programa, contudo é necessário possuir um software de simulação de robôs. Este tipo de programação permite uma vantagem no sentido de não se bloquear a produção/processo para que se desenvolva o ensinamento do robô através da criação de um novo programa o que traduz ganhos consideráveis em termos de tempo. Contudo em muitos casos a verificação e do programa e a deteção de erros terá de ser testada na célula de fabrico, por outro lado estes *softwares* requerem um investimento substancial. Recorrer à programação off-line apenas se justifica em casos muito particulares pois é necessário a modelização do robô e de toda a estrutura da célula de fabrico. A modelização 3D de todos os componentes é obtida através de interface com ferramentas CAD ou então pelo próprio *software* de simulação que tem incorporado ambientes de criação de objetos 3D [26, 27]. Na Tabela 8 são apresentados alguns *softwares* dos respetivos fabricantes de robôs, já na

Tabela 9 apresenta-se softwares genéricos de empresas não fabricantes de robôs.

Tabela 8 – Softwares proprietários de simulação e programação de fabricantes de robôs adaptado de [26]

| Empresa | Software |
|----------------|-----------------|
| Motoman | MotoSim EG |
| ABB | RoboStudio |
| Kuka | KukaSim |
| Fanuc | ROBOGUIDE |
| Panasonic | DTPS |
| Kawasaki | PC-ROSET |
| Reis | ProSim |
| DENSO | WINCAPS |
| Stäubli | SRS |

Tabela 9 – Softwares independentes de simulação e programação genéricos [26, 28]

| Empresa | Software |
|----------------------------------|----------------------|
| Wat Solutions | Workspace5 |
| ERXA | Robowave |
| Compucraft | RoboWorks/SolidWorks |
| ComputerVision Corporation, Inc. | Robographix |
| General Electric /CALMA | Robot SIM |
| Intergraph | Robotics |
| Deneb Robotics | Igrip |

Relativamente à solução em concreto deste trabalho a criação de uma célula automatizada foi realizada recorrendo a soluções internas existentes nas instalações do PIEP. Assim o robô utilizado para o processo de enrolamento filamentar foi o robô Motoman de modelo HP20 que tem como controlador o dispositivo NX100.

O robot Motoman modelo HP20, Figura 12 a), é um dispositivo que se insere na classificação Robôs Antropomórficos. A programação deste equipamento é realizada através do seu controlador, NX 100, Figura 12 b), recorrendo ao auxílio de uma consola. A comunicação é estabelecida segundo a linguagem de programação utilizada no universo Motoman que tem como designação INFORM, neste caso em concreto é utilizada a versão número três [27].



Figura 12 – a) Robô Motoman HP20 b) Controlador NX100 [27]

Na Figura 13 são apresentados os vários componentes existentes em cada um dos dispositivos.

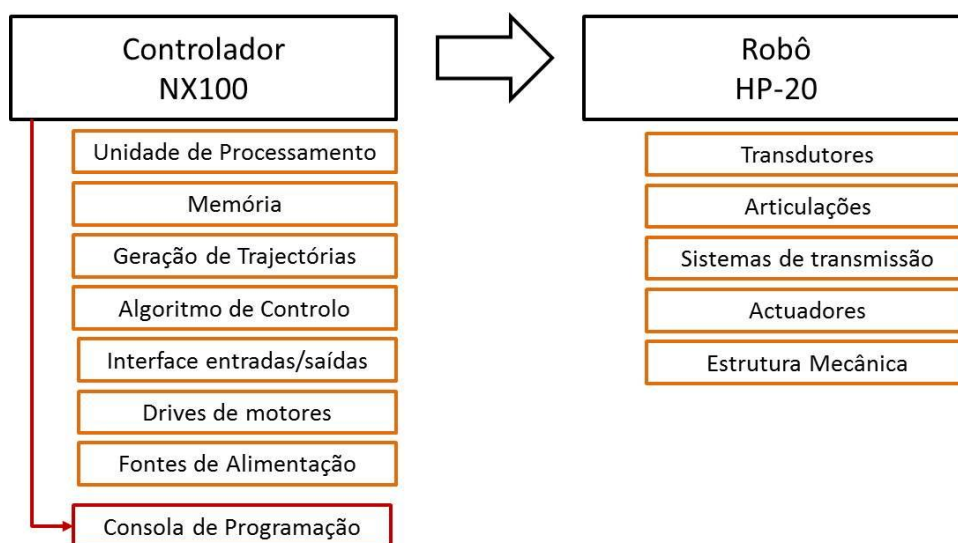


Figura 13 – Hardware do controlador e do robô adaptado de [26]

Como referido anteriormente a linguagem de programação deste controlador designa-se de INFORM II. Esta linguagem apresenta uma fácil compreensão e possibilita uma programação simples, contudo possui algumas limitações. O programa (JOB) é percorrido sequencialmente linha a linha.

A linha de programação é composta por uma instrução e por uma informação adicional. A instrução é utilizada para executar uma determinada tarefa ou processamento, ao passo que a informação adicional é um complemento dessa instrução contendo parâmetros específicos para cada instrução [27, 29].

Relativamente ao tipo de variáveis estas podem ser inteiras, reais, bytes, caracteres, doubles (inteiros de dupla precisão) e por último podem ser variáveis de posição. As variáveis de posição contêm uma estrutura onde é guardada uma posição do manipulador de acordo com o sistema de coordenadas pretendido. Quanto a este tipo de variáveis é permitido introduzir um número máximo de 128 variáveis, contudo existe a possibilidade de ter variáveis de posição locais. Estas são em tudo semelhantes às anteriores sendo que a diferença prende-se com o facto de as variáveis locais apenas poderem ser lidas por um programa (JOB) ao passo que as variáveis de posição do sistema podem ser lidas por vários programas. No entanto as variáveis locais apresentam uma vantagem pois não há um número máximo de variáveis, estando apenas limitada à capacidade de memória interna do controlador.

3.3.1 Sistema de coordenadas

Uma das funcionalidades do controlador/programação é disponibilizar vários sistemas de coordenadas. O utilizador poderá seleccionar um dos cinco possíveis sistemas, que são: sistema de coordenadas junta, coordenadas cartesianas, coordenadas cilíndricas, coordenadas ferramenta ou então coordenado usuário. No sistema de coordenadas juntas a movimentação de cada eixo é realizada de forma independente. No modo de coordenadas cartesianas faz com que o braço robô se movimente paralelamente aos eixos XYZ, sendo o centro da base a referência e o eixo Z perpendicular à mesma. Em coordenadas cilíndricas a movimentação é realizada à volta do eixo S sendo em função do ângulo teta, o eixo Z é coincidente com o eixo Z cartesiano. Quanto ao sistema de coordenadas ferramenta a movimentação é também semelhante ao sistema de coordenadas cartesiano sendo ela paralelamente aos eixos XYZ, contudo a referência encontra-se na extremidade da ponta da ferramenta sendo a direcção do eixo Z a mesma que a direcção efetiva da ferramenta. Por último mas não menos importante o sistema de coordenado usuário é um sistema que é em tudo igual ao sistema cartesiano no entanto aqui pode-se definir as direcções dos eixos bem como a origem do sistema [27, 29].

3.3.2 Calibração de Ferramenta

O sistema de coordenadas a utilizar será o sistema de coordenadas utilizador. Neste sentido torna-se necessário definir a ferramenta a utilizar. A definição da ferramenta pode ser feita manualmente, introduzindo os parâmetros XYX e as rotações respetivas RXRYRZ, ou então fazendo a sua calibração, para tal recorre-se a uma funcionalidade do sistema. A função de calibração da ferramenta permite que os parâmetros sejam introduzidos corretamente. Escolhendo esta funcionalidade o utilizador é necessário que o sistema calcule a localização do TCP, assim a informação precisa da dimensão da ferramenta terá de ser transmitida. A forma de realizar esse processo é de registrar cinco posições distintas onde o TCP contacta sempre o mesmo ponto de referência. Estas posições deverão de ser os mais ortogonais possíveis. Na Figura 14 é ilustrado um esquema da descrição feita anteriormente [27, 29].

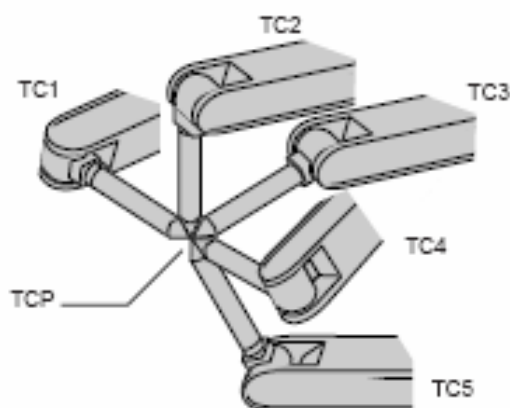


Figura 14 – Calibração do TCP [27, 29]

3.3.3 Tipo de movimentos

Na programação do robô é possível selecionar um de quatro tipos de movimento. Os tipos de movimentos selecionáveis são: linear, circular, articular e spline/elíptico. Seguindo a linha de programação, em que numa linha de programação é uma instrução e um item adicional, na instrução de movimentos essa instrução é feita da seguinte forma:

Tabela 10 – Tipos de movimento e instrução

| Tipo de movimento | Instrução | Ponto final | Velocidade |
|-------------------|-----------|-------------|------------|
| Junta/articular | MOVJ | P005 | VJ=10 |
| Linear | MOVL | P005 | V=10 |
| Circular | MOVC | P005 | V=10 |
| Spline/elíptico | MOVS | P005 | V=10 |

No movimento *move joint* é utilizada quando o braço robô não tem necessidade de passar por um caminho específico entre a posição atual e a posição para a qual se irá movimentar. A movimentação das juntas/articulações é feita com base num método de interpolação, onde são comandadas de forma direta para que cheguem a posição final no mesmo instante. O trajeto percorrido pode ou não ser linear. A velocidade é introduzida em percentagem da velocidade máxima estabelecida [27].

Na instrução de movimento linear a deslocação é realizada em linha reta para o ponto final definido, sendo a velocidade introduzida em milímetros por segundo. Ponto inicial é a posição atual do manipulador [27].

Relativamente ao movimento circular, instrução *MOVC*, o manipulador move-se segundo um arco. Para se efetuar corretamente este tipo de movimento é necessário a introdução de três

pontos. Contudo há algumas nuances que exigem alguma atenção. Na Figura 15 está representado um caminho onde terá uma trajetória curva. Assim é necessário introduzir a instrução *MOVC* para os pontos Step1, Step2 e Step3. A movimentação do Step1 para o Step2 faz-se segundo a ultima instrução definida para o Step1, neste caso seria movimentação linear [27].

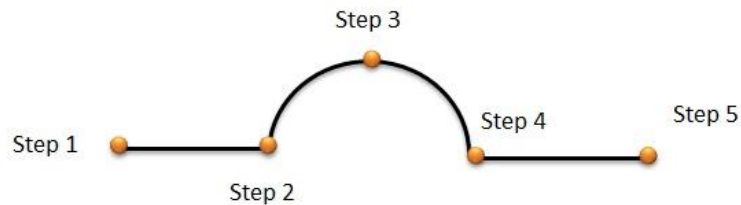


Figura 15 – Exemplo de movimentação circular um arco

Na Figura 16 apresenta-se a ilustração de movimentação do movimento circular de dois arcos. Neste tipo de trajetória não é possível realizar esse movimento apenas dando a instrução de *MOVC* para os pontos de dois a seis. Para se efetuar devidamente o caminho pretendido é necessário uma instrução intermédia entre os dois arcos, podendo ser linear ou uma instrução de articulação. Assim a instrução fica ordenada da seguinte forma: *MOVC* de dois a quatro, em seguida *MOVL* para o ponto cinco e finalmente *MOVC* de cinco a oito [27].

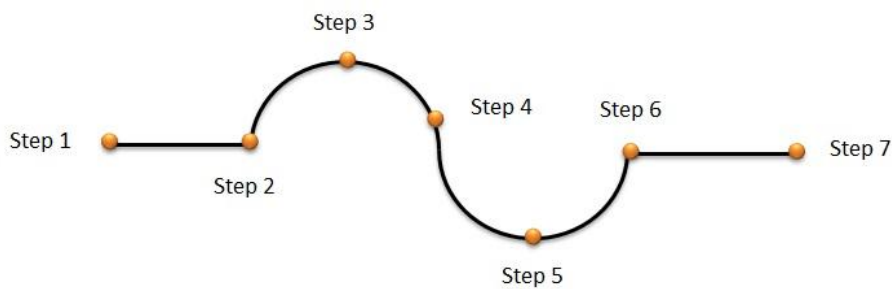


Figura 16 – Exemplo de movimentação circular dois arcos incompleta

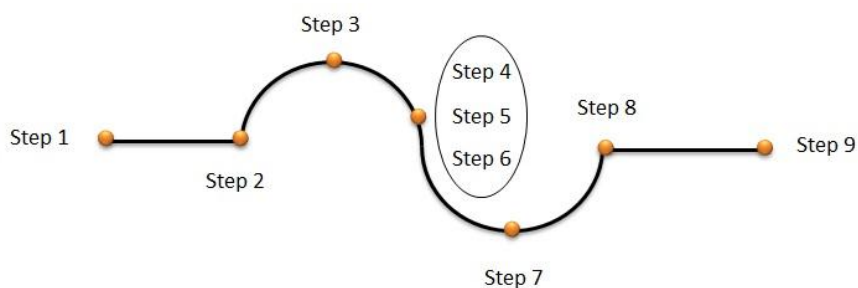


Figura 17 - Exemplo de movimentação circular dois arcos correta

No capítulo quatro, parte experimental é descrito como programar os três tipos de padrões de enrolamento na consola.

Capítulo 4 – Projeto de bancada experimental

O objetivo deste capítulo é de apresentar a solução escolhida para realizar o processo de enrolamento filamental. Com este equipamento pretende-se realizar uma aproximação para a aquisição de um equipamento futuro. Através desta solução de baixo custo pretende-se adquirir experiência do processo de enrolamento filamental, para que seja possível dissipar algumas dúvidas e erros no sentido de otimizar o próximo equipamento.

4.1 Célula de processamento

Para validar o estudo efetuado anteriormente foi necessário criar uma célula de processamento de enrolamento filamentar. Esta célula permite a realização dos três tipos de padrões de enrolamento filamentar, circunferencial, helicoidal e polar. Como foi referido anteriormente pretende-se que este equipamento seja uma base para no futuro obter uma solução otimizada. Os constituintes do sistema resultam, em alguns componentes, de adaptações noutros casos procedeu-se à compra de componentes. Na Figura 18 é apresentada uma visão em perspetiva e virtual dos componentes presentes na célula de enrolamento.

- Robô Motoman modelo HP20;
- Cabeça de deposição;
- Motor elétrico;
- Mesa de apoio;
- Duas chumaceiras;
- Um acoplamento;
- Um veio de transmissão de movimento;
- Uma Bucha para fixação do mandril;
- Um mandril/reservatório.

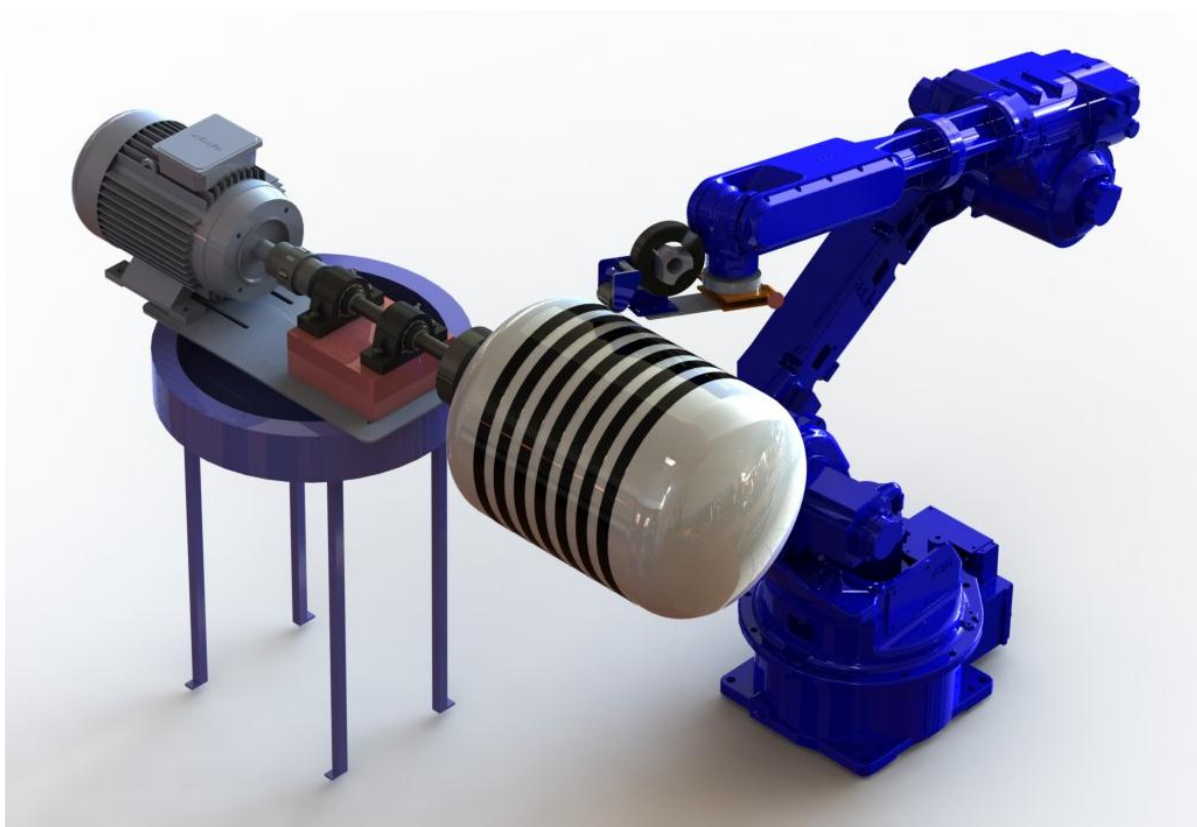


Figura 18 - Célula de enrolamento filamentar conjunto total

Na Figura 19 apresenta-se a célula de enrolamento real, presente nas instalações do PIEP.



Figura 19 – Célula de enrolamento real

4.2 Enrolamento Circular

A realização do enrolamento filamentar circular é o padrão mais simples de realizar.

Neste caso particular o incremento do passo, deslocamento da cabeça de deposição, efetua-se a cada rotação do mandril. Apesar de considerarmos que o ângulo de enrolamento circunferencial é de 90° na realidade é ligeiramente inferior, como visto anteriormente. A diferença será tanto maior quanto maior for a largura da fita, contudo o erro nunca será superior a uma inclinação de quatro graus relativamente à perpendicular com a geratriz do mandril. Para efetuar o enrolamento circular é necessário um conjunto de dados para o *input* do programa, assim como para a realização do programa, em termos de programação robótica, implica a introdução dos seguintes dados:

- Velocidade longitudinal;
- Velocidade de rotação;
- Ponto inicial;
- Ponto final;
- Número de camadas.

Com estes dados é possível realizar o enrolamento pretendido. Sendo que a estratégia de programação é a seguinte: colocar uma variável como ponto inicial e outra como ponto final; mover o braço robô linearmente em coordenadas cartesianas com a velocidade longitudinal; repetir o ciclo de ida e volta conforme o número de camadas. O algoritmo de programação para a execução do enrolamento circular é descrito em seguida. Na Tabela 11 é apresentado o programa para a linguagem INFORM III.

Algoritmo enrolamento circular

Variáveis

A (ponto inicial)

B (ponto final)

C (numero de camadas)

D (contador)

Inicio

Ler Variáveis (A; B; C; D)

Contador $D = 0$

Movimentar ponto inicial

Etiqueta X

Movimentar ponto final

Incrementar contador $D = D + 1$

Se contador menor que numero de camadas então

Movimentar ponto inicial

Se não ir para fim de programa

Incrementar contador $D = D + 1$

Se contador menor que numero de camadas então

Ir para etiqueta X

Se não fim de programa

Fim de programa

Tabela 11 – Linha de comandos enrolamento circular

| Programa enrolamento circular | |
|-------------------------------|--|
| NOP | Instrução de início de programa |
| SET B000 5 | Variável B001 igual ao número de camadas |
| *C | Etiqueta |
| SET B001 0 | Colocar a variável B a zero |
| MOVL P010 V=3.26 | Mover para o ponto inicial |
| MOVL P011 V=3.26 | Mover para o ponto final |
| INC B001 | Introduz incremento à variável B001 |
| JUMP *A IF B000<B001 | Condição de fim de programa |
| END | Instrução fim de programa |

A Figura 20 apresenta o resultado final fruto do revestimento programado em cima apresentado.

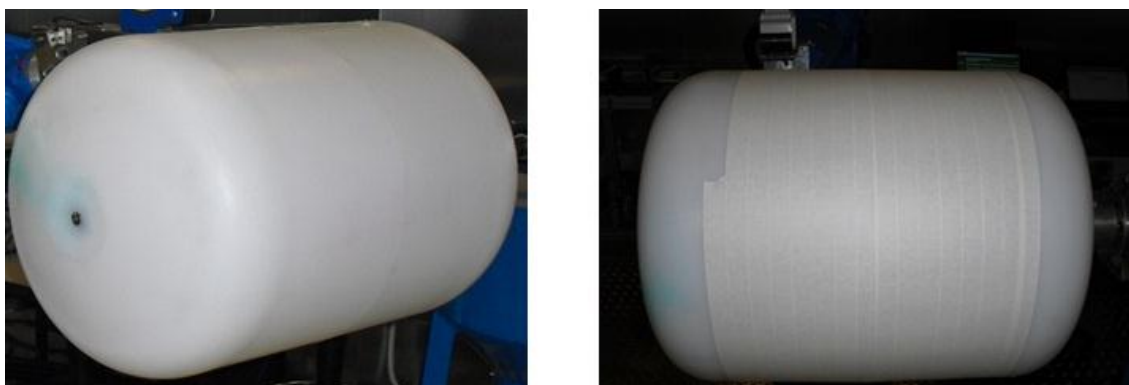


Figura 20 – a) sem revestimento b) com revestimento circular

4.3 Enrolamento Helicoidal

O processo de enrolamento helicoidal é em todo muito semelhante ao enrolamento circunferencial. Contudo há uns pormenores que se diferenciam. Nesse sentido serão seguidamente abordados essas particularidades. Quanto ao programa de enrolamento helicoidal, este está apresentado na Tabela 12, sendo que o seu algoritmo está descrito anteriormente ao programa.

Algoritmo enrolamento Helicoidal

Variáveis

A (ponto inicial)

B (ponto final)

C (número de camadas)

D (número de revoluções)

E (contador camadas)

F (contador de revoluções)

Ler Variáveis (A; B; C; D;E)

Contador camadas $E = 0$

Contador de revoluções $F = 0$

Etiqueta x

Movimentar ponto inicial

Movimentar ponto final

Movimentar ponto inicial

Incrementar contador $F = F + 1$

Etiqueta

Enquanto F menor D

Movimentar para ponto final - incremento

Movimentar para ponto inicial - incremento

$F = F + 1$

Ir para etiqueta y

Fim de ciclo

$E = E + 1$

Se E menor que C então ir para etiqueta x

Se não fim de programa

Fim de programa

Tabela 12 – Linha de comandos enrolamento helicoidal

| Programa enrolamento helicoidal | |
|---------------------------------|--|
| NOP | Instrução de início de programa |
| SET B000 1 | Variável B001 igual ao número de camadas |
| *C | Etiqueta |
| SET B001 0 | Colocar a variável B a zero |
| MOVL P010 V=3.26 | Mover para o ponto inicial |
| MOVL P011 V=3.26 | Mover para o ponto final |
| TIMER T=0.50 | Tempo de espera |
| MOVL P012 V=3.26 | Mover para o ponto x |
| MOVL P013 V=3.26 | Mover para o ponto y |
| INC B001 | Introduz incremento à variável B001 |
| JUMP *A IF B000<B001 | Condição de fim de programa |
| END | Instrução fim de programa |

É possível constatar pelos dois programas apresentados que são muito semelhantes, na verdade em termos de linha de programação sim, mas ao nível de valores das variáveis não. É necessário introduzir nas variáveis de posição uma velocidade de rotação da cabeça de deposição, ou seja, na última articulação do braço robot.

4.4 Enrolamento Polar

Relativamente ao enrolamento polar a diferença existente comparativamente ao enrolamento helicoidal é que temos pontos iniciais (pontos da geometria do calote), assim como pontos finais. Estes pontos são executados com movimentos circulares. No caso presente foram utilizados três pontos iniciais podendo este número aumentar no sentido do de se obter uma melhor aproximação do caminho percorrido à trajetória calculada.

Algoritmo enrolamento Polar

Variáveis

A (ponto inicial)

B (ponto final)

C (número de camadas)

D (número de revoluções)

E (contador camadas)

F (contador de revoluções)

Inicio

Ler Variáveis (A; B; C; D;E)

Contador camadas $E = 0$

Contador de revoluções $F = 0$

Etiqueta x

Movimentar para pontos iniciais dos calotes

Movimentar para pontos finais dos calotes

Movimentar para pontos iniciais dos calotes

Incrementar contador $F = F + 1$

Enquanto F menor que D

Movimentar para pontos finais dos calotes

Movimentar para pontos iniciais dos calotes

Incrementar contador $F = F + 1$

Ir para etiqueta y

Fim de ciclo

$E = E + 1$

Se E menor que C então ir para etiqueta x

Se não fim de programa

Fim de programa

Tabela 13 – Linha de comandos enrolamento polar

| Programa enrolamento polar | |
|----------------------------|--|
| NOP | Instrução de início de programa |
| SET B000 1 | Variável B001 igual ao número de camadas |
| *C | Etiqueta |
| SET B001 0 | Colocar a variável B a zero |
| MOVC P008 V=3.26 | Mover para o ponto inicial |
| MOVC P009 V=3.26 | |
| MOVC P010 V=3.26 | |
| MOVL P010 V=3.26 | |
| MOVC P011 V=3.26 | |
| MOVC P012 V=3.26 | |
| MOVC P013 V=3.26 | |
| TIMER T=0.50 | Tempo de espera |
| MOVC P014 V=3.26 | Mover para o ponto x |
| MOVC P015 V=3.26 | Mover para o ponto y |
| MOVC P016 V=3.26 | Mover para o ponto z |
| INC B001 | Introduz incremento à variável B001 |
| JUMP *A IF B000<B001 | Condição de fim de programa |
| END | Instrução fim de programa |

Na Figura 21 está apresentada a trajetória 2D do revestimento polar sendo que o passo 1, 2 e 3 correspondem aos pontos P008, P009, P010.



Figura 21 – Trajetória 2D de enrolamento polar

4.5 Processo para automatizar o processo de tratamento de dados

Como referido anteriormente no capítulo dois, há uma diversidade de *softwares* CAM para o enrolamento filamentar. Alguns desses programas permitem um interface com máquinas CNC muito amigável. É possível a gravação das trajetórias geradas em código G. Relativamente à exportação para linguagem legível no ambiente robótico não há uma relação direta. No entanto através de uma personalização do programa CAM para enrolamento filamentar, pode se obter a linha de comandos necessária á linguagem de programação do robot utilizado.

Por outro lado é possível criar um processo de baixo nível, Figura 22, capaz de suprimir a utilização do *software* específico CAM. As trajetórias aqui apresentadas foram realizadas na plataforma EXCEL®. Após o cálculo das trajetórias, os dados são exportados para uma folha onde se escreve as coordenadas dos pontos desejados segundo a linguagem INFORM III. Nesta folha é introduzido também o respetivo cabeçalho para leitura correta do ficheiro. Sendo assim é necessário apenas a gravação do ficheiro em formato JBI num dispositivo de memória compact flash para poder importar posteriormente na consola.

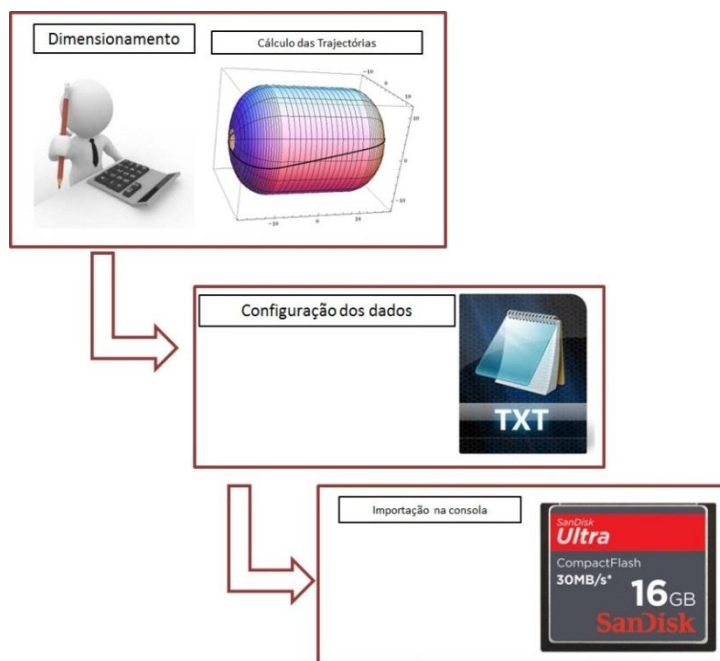


Figura 22 – Processo de automatização

Capítulo 5 – Considerações Finais

Neste capítulo pretende-se fazer uma síntese do tema desenvolvido ao longo do documento. Nesse sentido serão apresentadas as ideias-chave a reter. As conclusões são apresentadas segundo a revisão bibliográfica e todo o levantamento teórico que foi alvo de estudo juntamente com a parte prática efetuada. Por outro lado é objetivo também apresentar algumas ideias para trabalho futuro, com vista a melhorar todo o processo.

O processo de enrolamento filamentar é uma tecnologia de fabrico capaz de produzir uma vasta variedade de produtos recorrendo a materiais compósitos. A aplicação de um braço robot numa estrutura rotativa simples, tal como a adotada, permite a obtenção de um sistema bastante poderoso para criar um equipamento industrial bastante competitivo.

O uso de um software CAM no processo de enrolamento filamentar implica um investimento significativo que apesar de trazer inúmeras vantagens não é de todo justificável caso se pretenda produzir apenas reservatórios. No entanto para outras peças de formas mais complexas onde a geometria não é simétrica a utilização de um *software* é imprescindível.

Os resultados obtidos não foram os melhores ao nível de enrolamento. Um aspeto decisivo deveu-se à reduzida qualidade dos reservatórios utilizados. Existia uma enorme excentricidade do reservatório cilíndrico o que não permitiu um bom revestimento.

O revestimento utilizado também implicou algumas deficiências, pois trata-se de fita-cola de papel. É necessário controlar a suavidade de desenrolamento da cassette da fita para evitar soluços durante o enrolamento.

A programação robótica não sendo muito complexa, requer alguma sensibilidade ao nível de movimentação do braço robótico. É necessário um conhecimento dos graus de liberdade e do envelope que o braço ocupa.

A maior dificuldade da programação prende-se com o caminho traçado pelo braço robot, sendo que possibilidades de colisões ou de percorrer caminhos não desejados, prendem-se com o facto de não haver o controlo total do caminho escolhido pelo robot para a movimentação entre dois pontos.

A principal articulação e que condiciona de todo o caminho percorrido é a articulação "R". Esta deve ser mantida num plano sempre inferior, ou seja, o braço robô deve operar sempre que possível num patamar mais elevado que a mesa de trabalho.

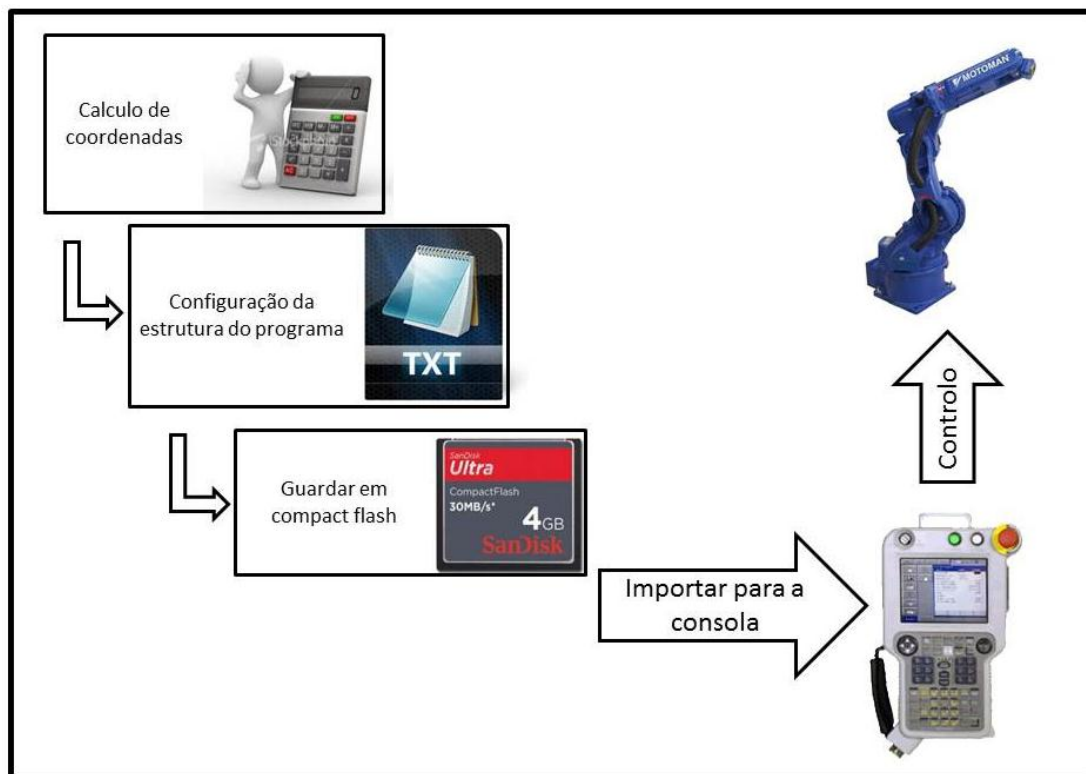
REFERÊNCIAS

1. Lukaszewicz, D.H.J.A., C. Ward, and K.D. Potter, *The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future*. Composites Part B-Engineering, 2012. **43**(3): p. 997-1009.
2. Azevedo, M., *A Articulação de um Banco de Automóvel: Estudo da Utilização de Novos Materiais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*2008, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
3. Silva, J.F.M.G., *Pré-impregnados de matriz termoplástica: Fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamental*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
4. Cidade, R.d.A., *Estudo numérico do comportamento mecânico em ensaio de anel de dutos compósitos produzidos por enrolamento filamental*, in *Departamento de Engenharia de Materiais*2010, Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro.
5. Gay, D. and S.V. Hoa, *Composite materials: design and applications*2007: CRC Press.
6. Simões, J.A.d.O., *Enrolamento Filamental Simulação Visual de Trajectórias Geodésicas e não Geodésicas*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*1992, Universidade do Porto: Porto.
7. Friedrich, K. and A. Almajid, *Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications*. Applied Composite Materials, 2012: p. 1-22.
8. Oliveira, J.G.Á., *Microscopia Digital e Análise de Imagens para Caracterização de Tubos Compósitos Fabricados por Enrolamento Filamental*, in *Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia*2008, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
9. Kollár, L.P. and G.S. Springer, *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge University Press.
10. Silva, J.F.M.G., *Estudo da resistência à pressão interior após impacto de tubagem produzida por enrolamento filamental*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*1996, Universidade do Porto: Porto.
11. Marafona, J.D.R., *Métodos para obtenção da trajectória do olhal de deposição com eliminação de colisão*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*1994, Universidade do Porto: Porto.
12. Justulin, F., *Desenvolvimento de Sistema Computacional para Cálculo de Trajetórias no Processo de Filament Winding*, 2008, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo.
13. Silva, M.M., *Prototipo de uma plataforma para software de cálculos para otimização da trajetória de fibras em revestimento de materiais compósitos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*2005, Universidade de São Paulo: São Paulo.
14. Pereira, G.F., *SensEFil: Monitorização de Reservatórios Produzidos por Enrolamento Filamental Usando Sensores Ópticos Embebidos no Compósito*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.

15. Margolis, J.M., *Advanced thermoset composites: industrial and commercial applications*1986: Van Nostrand Reinhold.
16. Oliveira, J.G.Á., *Microscopia Digital e Análise de Imagens para Caracterização de Tubos Compósitos fabricados por Enrolamento Filamentar*, in *Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio*2008, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Rio de Janeiro.
17. Koussios, S., *Filament Winding: A Unified Approach*2004: IOS Press.
18. Abdalla, F.H., et al., *Design and fabrication of low cost filament winding machine*. *Materials & Design*, 2007. **28**(1): p. 234-239.
19. engineering, e. *CADWIND*. [cited 2012 Janeiro de 2012]; Available from: <http://www.etamax.com.au/index.html>.
20. MATERIAL. *Cadwind*. 1990 [cited 2012 Janeiro de 2012]; Available from: <http://www.material.be/cadwind/features/index.html>.
21. Ltd, C.C. *CADFIL*. 1983 [cited 2012 Janeiro de 2012]; Available from: <http://www.cadfil.com/>.
22. B.S., J., L. A., and J. M.T, *CADPATH: a complete program for the CAD-, CAE- and CAM-winding of advanced fibre composites*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998. **77**.
23. Machines, E.C. *Fibergrafix*. [cited 2012 Janeiro de 2012]; Available from: <http://www.entec.com/fiberG.html>.
24. C., L., *Filament Winding Breathes Life into Gas Bottles*. Vol. 42. 1998, Oxford, ROYAUME-UNI: Elsevier. 2.
25. Antunes, P.J., et al., *Finite element modelling of thermoplastic matrix composite gas cylinders*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2008. **21**(5): p. 411-441.
26. Coelho, D.A., *Ensino rápido de células de quinagem ADIRA*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*2011, Universidade do Porto: Porto.
27. Yaskawa, M.R., *Motoman MX100 Basic Programming*, 2004.
28. Silva, M.F.d.S., *Simulação e Programação Off-line de Robôs de Montagem*, in *Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores*1996, Universidade do Porto: Porto.
29. Azevedo, A.M.L., *Manipulador Industrial Aplicações Auto Ajustáveis*, 2007: Porto.

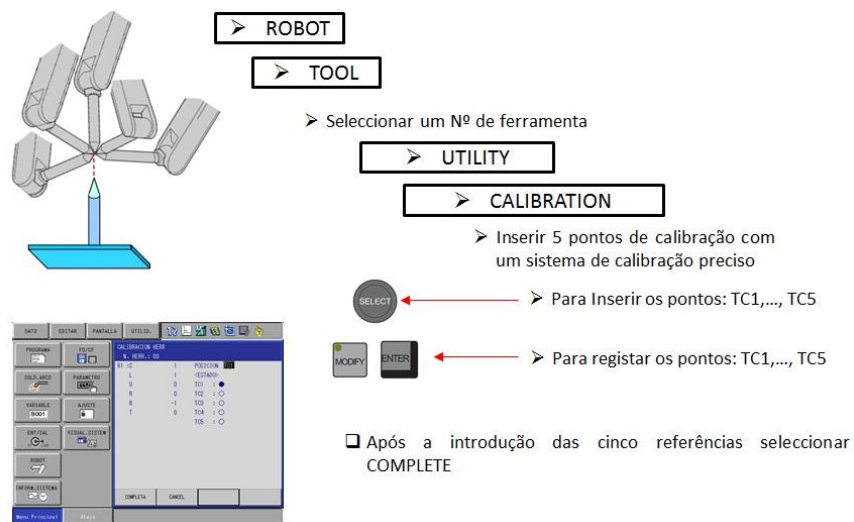
Anexo A Guia de utilização rápida

Motoman HP-20 – Quick Start Guide



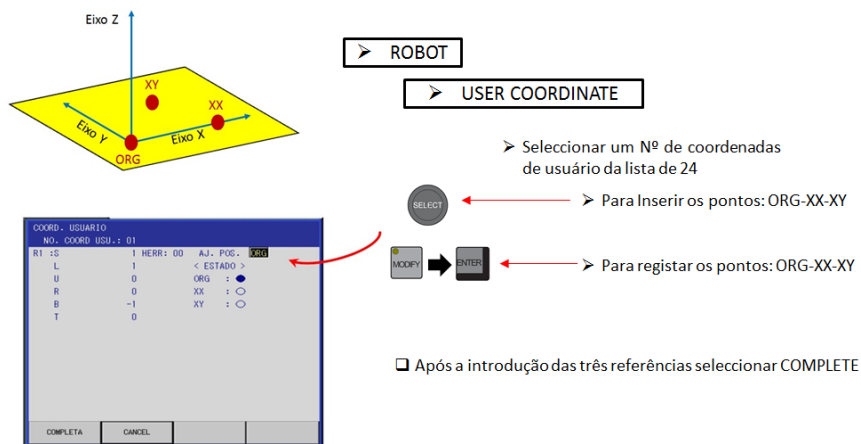
- Para a execução de um programa criado previamente o utilizador deve proceder da seguinte forma:
 1. Calibrar a ferramenta;
 2. Definir um sistema de coordenadas;
 3. Configurar a orientação do vetor ferramenta;
 4. Carregar o ficheiro do cartão de memória;
 5. Correr o programa.

Calibrar Ferramenta



- Basicamente a calibração consiste em gravar o posicionamento de cinco pontos, com ângulos de ataque distintos, onde a extremidade da ferramenta toca num ponto de referência. Através da gravação destas cinco posições diferentes o controlador calcula as coordenadas do vetor ferramenta.

Definir sistema de coordenadas usuário



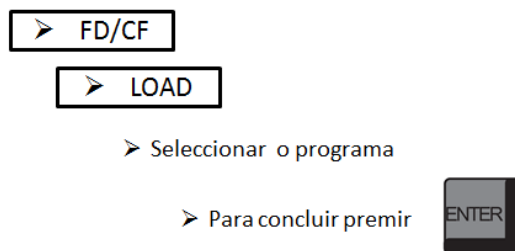
O sistema de coordenadas usuário fica definido através da indicação de três referências. O ponto de origem, a direção e sentido do eixo do X e por último a indicação de um ponto do plano XY. Com estas referências o sistema determina o sistema de eixos XYZ.

Configurar a orientação do vetor ferramenta

Concluídos estes dois processos será necessário definir a orientação do vetor ferramenta em função da orientação do sistema de eixos definido. Para que as coordenadas de rotação sejam zero no ponto de origem (ORG). Essa configuração é realizada no modo de calibração da ferramenta, alterando os valores de rotação do vetor ferramenta.

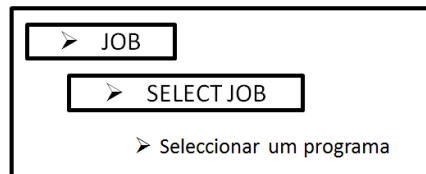
Carregar o ficheiro do cartão de memória

Para carregar um ficheiro na consola que se encontra no cartão de memória deverá proceder-se da seguinte forma:

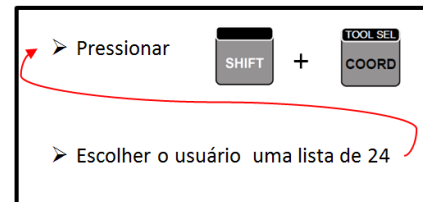


Correr o programa

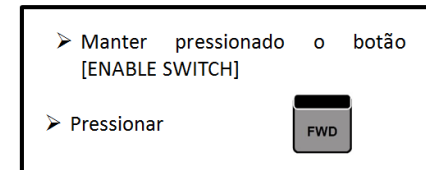
Passo 1 - seleccionar programa



Passo 2 – seleccionar coordenadas



Passo 3 – movimentar o robot segundo as instruções



Anexo B Manual de iniciação

Introdução

A manipulação de um braço robot requer o conhecimento nas áreas de automação e programação. O conhecimento da máquina que irá operacionalizar é também crucial para o encadeamento de toda a programação que se deseja efetuar.

O presente documento serve para que de uma forma rápida e intuitiva qualquer utilizador realize tarefas utilizando o braço robot HP-20 recorrendo ao controlador NX100. Nesse sentido o documento organiza-se da seguinte forma: primeiramente faz-se uma apresentação dos vários componentes que constituem o equipamento. Em seguida é dada a conhecer informação geral para que posteriormente que serve de base para entender o modo de funcionamento da máquina. Por último é descrito o procedimento para a calibração de uma ferramenta e criação de um sistema de eixos do utilizador.

Componentes do Equipamento

O equipamento é formado por um conjunto de três componentes, o braço robô, Figura 24, o controlador NX100, Figura 23, e ainda a consola de programação também ilustrada na Figura 23. A ligação entre estes componentes é muito simples. É apenas necessário conectar os cabos nas entradas correspondentes (ver manual de instalação).



Figura 23 – Controlador NX100 e consola de programação



Figura 24 – Braço robot motoman HP20

Consola de Programação

Na Figura 25 está representada a consola de programação com a devida legendagem dos dispositivos do teclado. A consola é o interface que possibilita ao utilizador comunicar com a máquina. Através da consola o utilizador pode realizar diversas tarefas tais como: criar, editar e copiar programas, programar, entre outras.

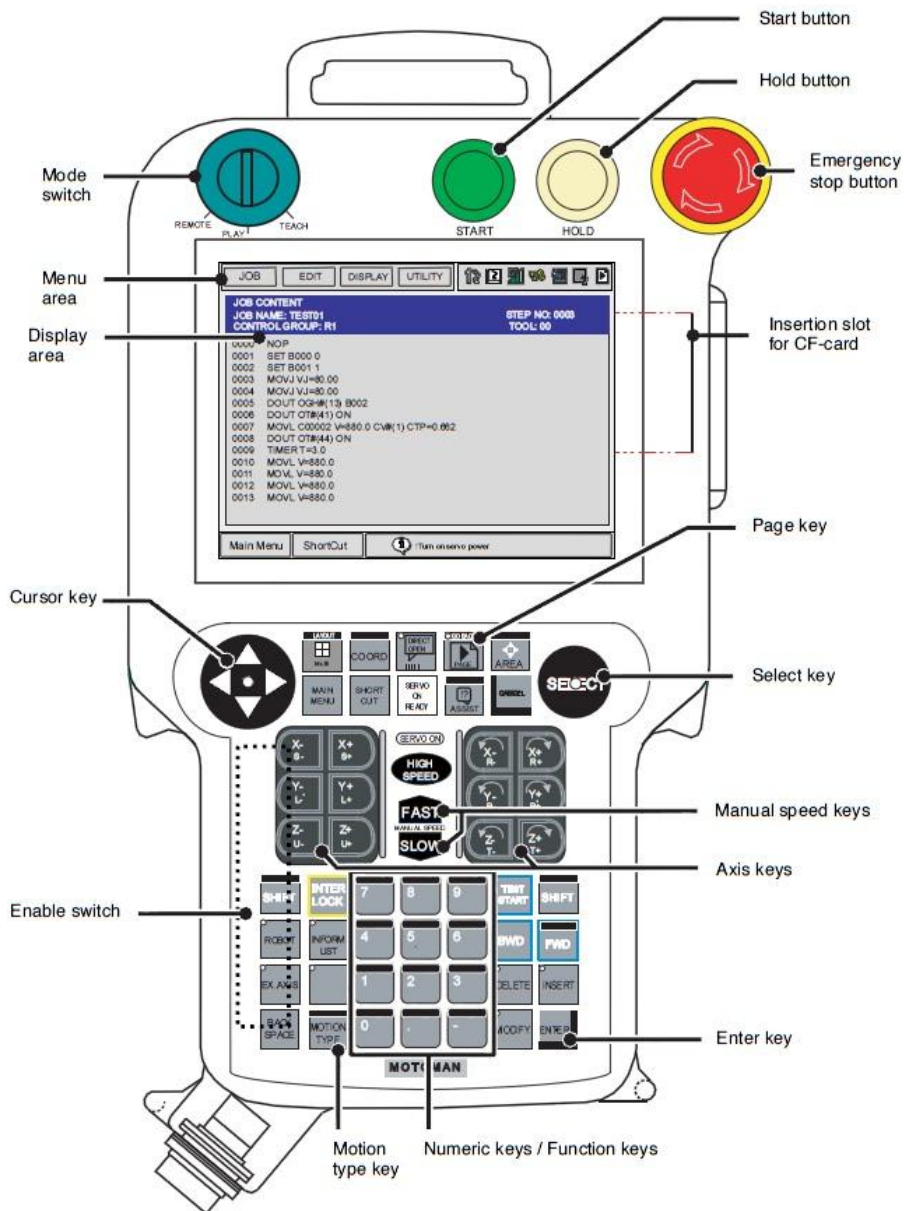


Figura 25 – Consola de Programação

Braço Robot

A Figura 27 pretende estabelecer uma familiarização com a nomenclatura dos eixos (juntas) que o braço robot possui. No Figura 26, está especificado informação relativamente a esses eixos.

| Item | Model | YR-HP20-A00 YR-HP20-B00 | YR-HP20-A10 YR-HP20-B10 |
|--|-------------------------------|--|----------------------------|
| Configuration | | Vertically articulated | |
| Degree of freedom | | 6 | |
| Payload | | 20kg | 6kg |
| Repeatability | | ±0.06mm | |
| Range of motion | S-axis (turning) ³ | ±180° | |
| | L-axis (lower arm) | +155°, -110° | |
| | U-axis (upper arm) | +255°, -165° | +255°, -160° |
| | R-axis (wrist roll) | ±200° | |
| | B-axis (wrist pitch/yaw) | +230°, -50° | |
| | T-axis (wrist twist) | ±360° | |
| Maximum speed | S-axis | 2.96 rad/s, 170°/s | |
| | L-axis | 2.96 rad/s, 170°/s | |
| | U-axis | 3.05 rad/s, 175°/s | |
| | R-axis | 6.20 rad/s, 355°/s | |
| | B-axis | 6.02 rad/s, 345°/s | |
| | T-axis | 9.16 rad/s, 525°/s | |
| Allowable moment ² | R-axis | 39.2Nm (4.0kgfm) | 11.8Nm (1.2kgfm) |
| | B-axis | 39.2Nm (4.0kgfm) | 9.8Nm (1.0kgfm) |
| | T-axis | 19.6Nm (2.0kgfm) | 5.9Nm (0.6kgfm) |
| Allowable inertia (GD ² /4) | R-axis | 0.9kgm ² | 0.24kgm ² |
| | B-axis | 0.9kgm ² | 0.17kgm ² |
| | T-axis | 0.25kgm ² | 0.06kgm ² |
| Mass | | 280kg | 285kg |
| Ambient conditions | Temperature | 0° to 45°C | |
| | Humidity | 20 to 80% RH at constant temperature | |
| | Vibration acceleration | Less than 4.9m/s ² (0.5G) | |
| | Others | Free from corrosive gas, liquid, or explosive gas Free from exposure to water, oil or dust Free from excessive electrical noise (plasma) | |
| Power capacity | | 2.8kVA | |

Figura 26 – Especificações do braço robot

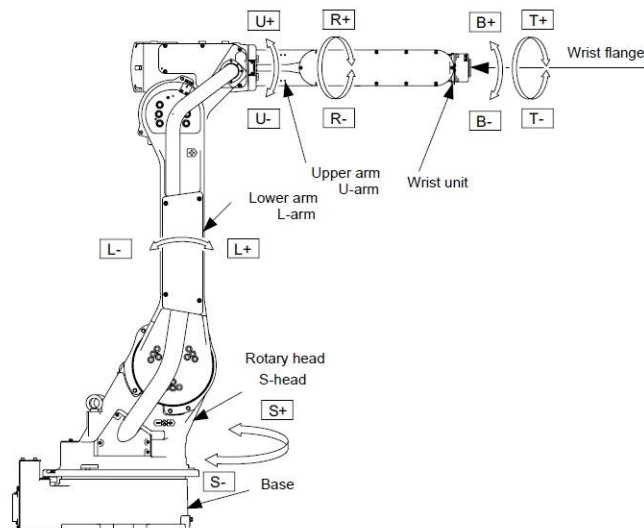


Figura 27 – Identificação dos eixos

INFORMAÇÃO GERAL

Este capítulo pretende de uma forma geral dar conhecimentos dos aspectos mais importantes que o sistema permite operacionalizar. Por outro lado visa dotar o utilizador de conhecimento para efectuar tarefas básicas tais como: movimentar segundo uma determinada trajectória, operações de manipulação, criar um sistema coordenadas, calibrar uma ferramenta, entre outras actividades.

Modos de funcionamento

O sistema permite operar em três modos de funcionamento diferentes, que são: modo TEACH, modo AUTOMÁTICO e modo REMOTO. Para seleccionar um desses modos é necessário posicionar o botão [*mode switch*] para a posição pretendida.

Modo Manual (TEACH)

Para a selecção do modo manual devem-se efectuar os passos indicados na Figura 28:

- Posicionar o botão [*mode switch*] em TEACH;
- Pressionar o botão [*SERVO ON READY*];

Após este procedimento o robot está pronto para movimentar-se de acordo com as coordenadas activas no momento.

Nota: A luz SERVO ON deve estar fixa para que seja possível manipular o robô. Para tal deve-se manter o botão [*enable switch*] pressionado.

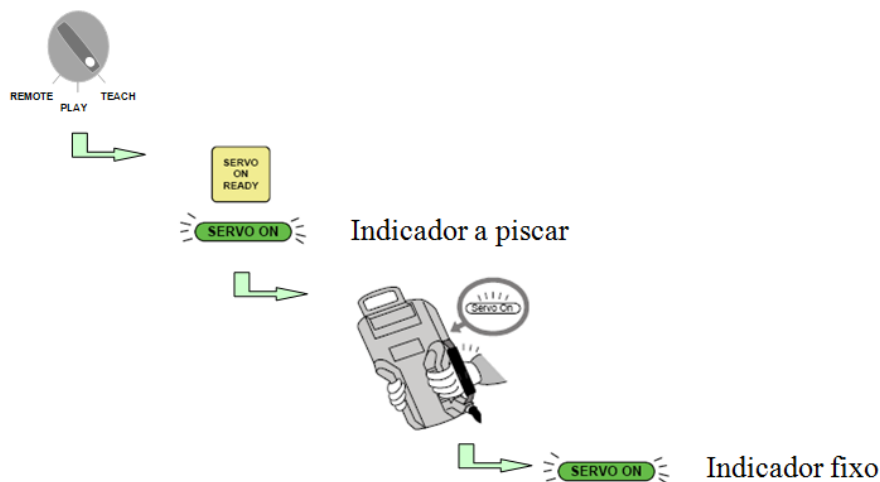


Figura 28 – Selecção modo manual (TEACH)

No modo TEACH, é possível executar as seguintes tarefas:

- Preparação e ensino de um JOB (programa);
- Modificação de um JOB já registado;
- Definição de características e parâmetros de diferentes ficheiros.

Modo Automático (PLAY)

Para a activação do modo PLAY, Figura 29, será necessário:

- Posicionar o botão [*mode switch*] em PLAY;
- Pressionar o botão [*SERVO ON READY*];

- O robot está pronto para movimentar de acordo com as coordenadas activas no momento.

No modo PLAY, é possível executar as seguintes tarefas:

- Reprodução de um JOB registado;
- Configurar, modificar e apagar um JOB já registado;

Seleccionar um programa

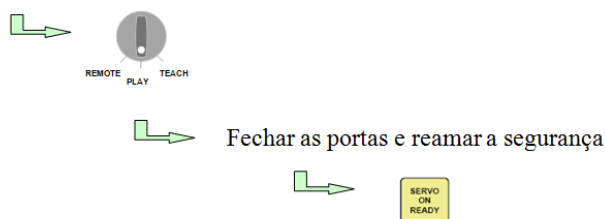


Figura 29 – Selecção de modo automático (PLAY)

Modo remoto (REMOTE)

Para a activação do modo REMOTE, Figura 30, será necessário:

- Posicionar o botão [*mode switch*] em REMOTE;

Seleccionar um programa

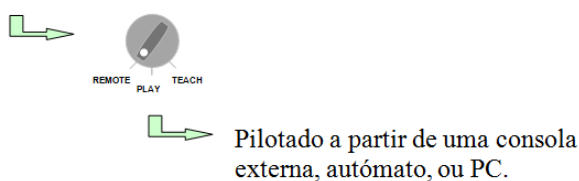


Figura 30 – Selecção de modo remoto (REMOTE)

No modo remoto as operações como SERVO ON READY, START, CYCLE CHANGE, CALL MASTER JOB podem ser comandadas por sinais externos.

As operações de entrada de sinais externos são activas neste modo, ao passo que a função START no programa fica desactivado. A função de transmissão de dados também está disponível no modo remoto.

Tipo de Coordenadas

O sistema permite a utilização de cinco tipos de coordenadas, Figura 31, que podem ser:

- Coordenadas junta;
- Coordenadas cartesianas;
- Coordenadas cilíndricas;
- Coordenadas ferramenta;
- Coordenado usuário.

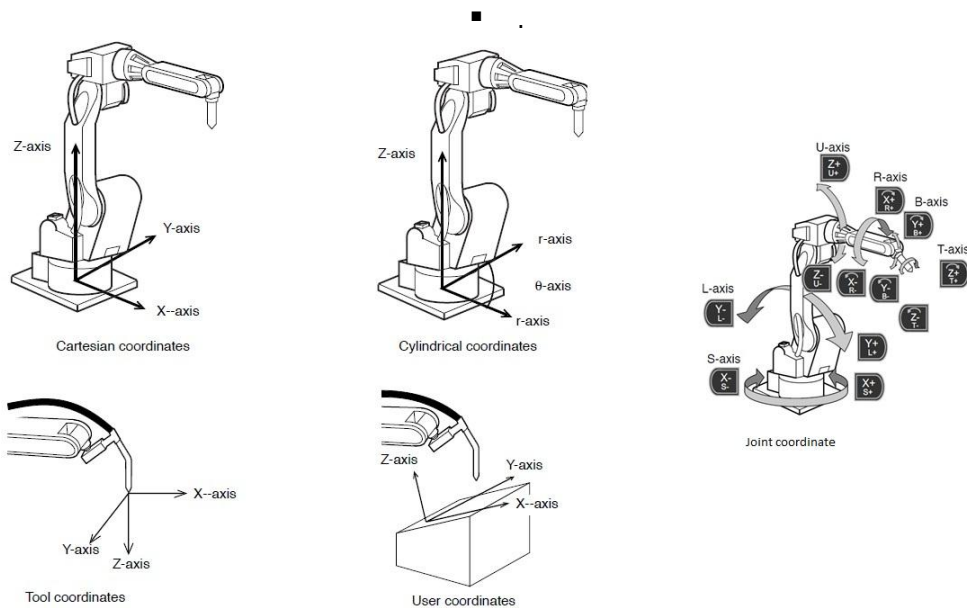


Figura 31 – Tipo de coordenadas

Para poder seleccionar o tipo de coordenadas o utilizador deve carregar no botão [COORD] sequencialmente até encontrar o símbolo das coordenadas desejadas.

Coordenadas Junta

LOCKSEL
COORD

U+

R+

B+

T+

L+

S+

U-

R-

B-

T-

L-

S-

Pressionar para mover cada um dos eixos do robot independente.

| | | | |
|----|----|----|----|
| S- | S+ | R- | R+ |
| L- | L+ | B- | B+ |
| U- | U+ | T- | T+ |

Neste modo de funcionamento a movimentação dos eixos é realizada de forma independente.

É possível mover as juntas em simultâneo ou em alternativa mover apenas os eixos pretendidos.

Coordenadas Cartesianas

Com a utilização das coordenadas cartesianas os deslocamentos do braço robot são realizados paralelamente aos eixos X Y Z. conforme se pode ver na figura anexa.

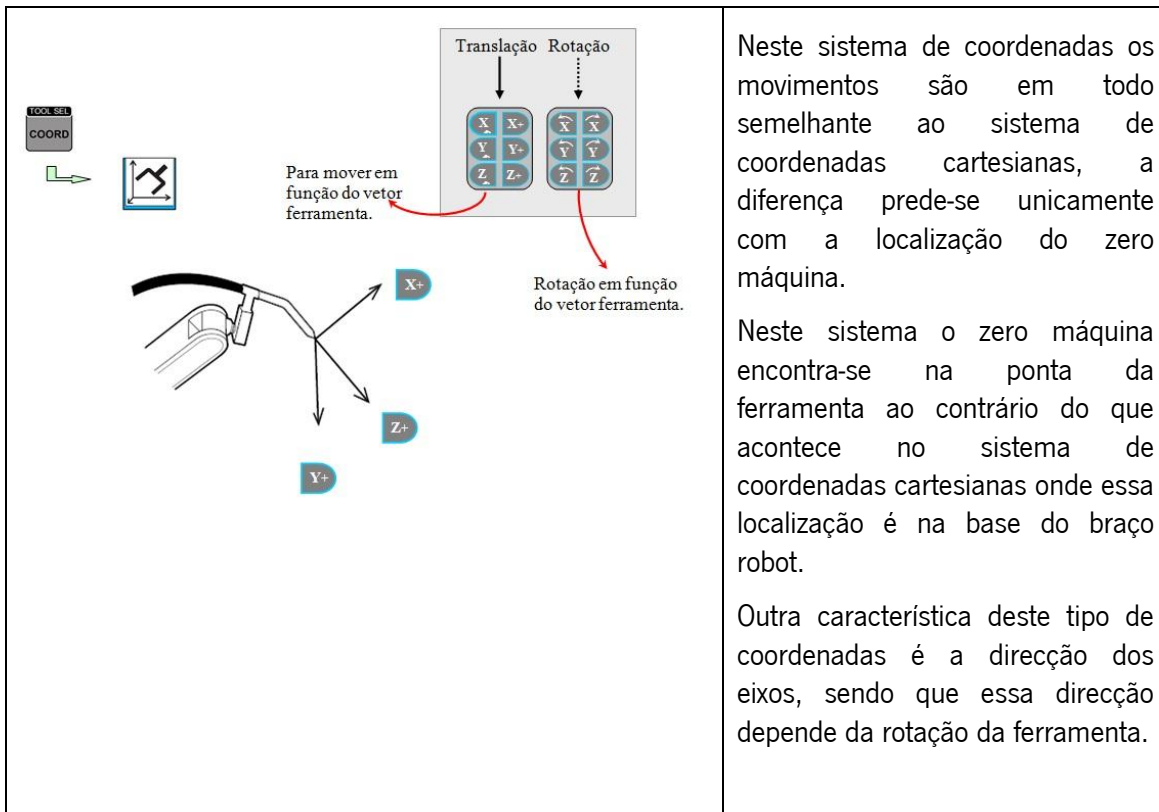
Todos os movimentos são realizados segundo a ponta do braço robô. Este ponto move se de forma paralela contudo a movimentação dos eixos do braço não é necessariamente a mesma para a mesma posição em termos absolutos.

O Zero absoluto encontra se na base do braço.

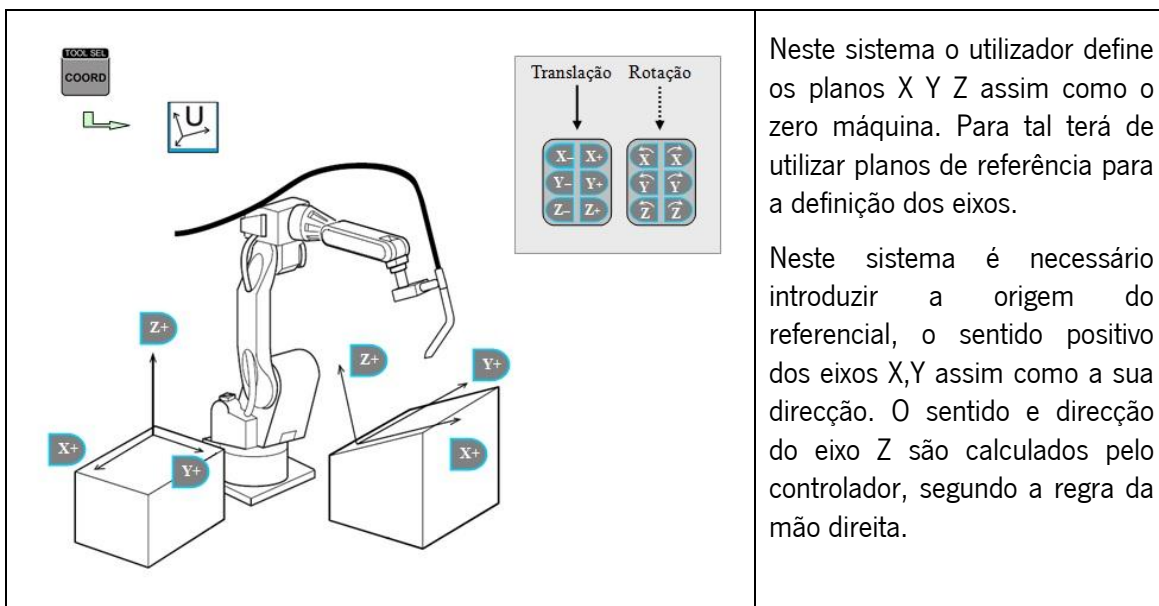
Coordenadas Cilíndricas

A rotação na direção do eixo S é perpendicular ao eixo Z.

Coordenadas Ferramenta



Coordenadas Usuário



Calibração de ferramenta

Quanto à calibração da ferramenta, Figura 32, o processo é simples, contudo é necessário respeitar algumas considerações para que o processo seja o mais preciso possível.

Basicamente a calibração consiste em gravar o posicionamento de cinco pontos, com ângulos de ataque distintos, onde a extremidade da ferramenta toca num ponto de referência. Através da gravação destas cinco posições diferentes o controlador calcula as coordenadas do vector ferramenta.

1. No ecrã principal seleccionar ROBOT;
2. Em seguida seleccionar o separador TOOL;
3. Posteriormente no separador UTILITY escolher CALIBRATION;

Neste momento aparecerá no ecrã o ambiente de calibração da ferramenta. Aqui o utilizador deve gravar o posicionamento dos pontos (TCx). A gravação da posição para cada ponto faz se pressionando o botão [modify] e em seguida o botão [enter]

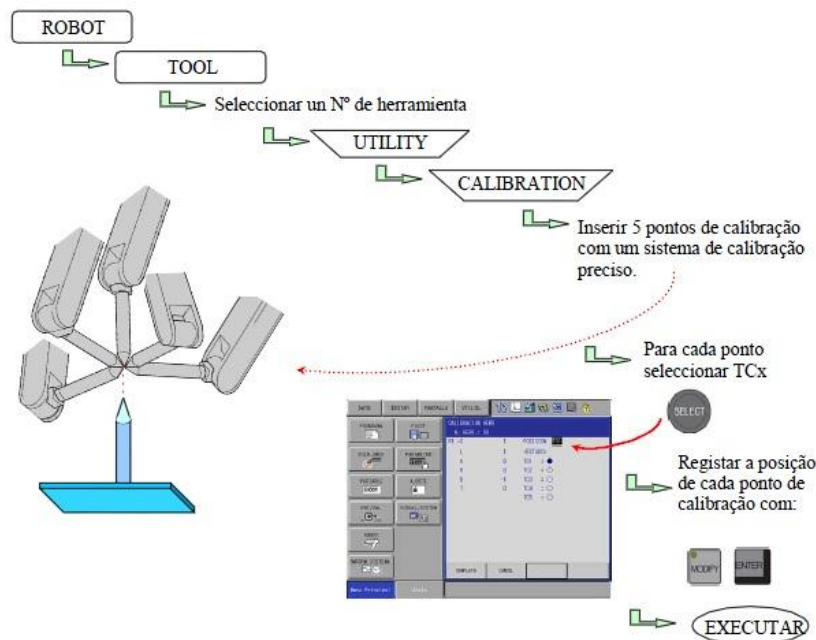


Figura 32 – Esquema de calibração de ferramenta

Definição do sistema de coordenadas Usuário

O uso das coordenadas usuário torna-se interessante em algumas aplicações, sobretudo do ponto de vista em tarefas onde é necessário ter um zero peça. Este sistema de coordenadas permitem definir uma nova origem de coordenadas bem como os respectivos sentidos e direcções dos eixos XYZ. O sistema permite definir 24 coordenadas de usuários diferentes. Para a introdução de um novo sistema de coordenadas deve-se proceder conforme o esquema da Figura 33.

1. Seleccionar o campo ROBOT;
2. Seguidamente escolher o separador USER COORDENATE;
3. Introduzir as coordenadas do ponto de origem:
 - a. Escolher ORG,
 - b. Deslocar o robot para a posição desejada,
 - c. Premir [modify] e em seguida [enter] para guardar a posição;
4. Definir o eixo positivo X:
 - a. Escolher XX,
 - b. Movimentar o robot no sentido positivo no eixo XX (neste passo convém que as coordenadas estejam em modo cartesianas),
 - c. Premir [modify] e em seguida [enter] para guardar a posição;
5. Definir o Plano XY:
 - a. Movimentar o robot no sentido positivo do eixo YY positivo,
 - b. Premir [modify] e em seguida [enter] para guardar a posição.

Após a realização destas tarefas é necessário seleccionar o separador COMPLETE de forma a concluir o processo.

Após definição do sistema de eixos e respectiva origem é necessário corrigir a orientação do vector ferramenta para que as coordenadas de rotação relativas ao sistema de coordenadas do usuário definido estejam com valores nulos.

A configuração da orientação do vector ferramenta é realizada no processo de calibração. Para redefinir basta alterar os valores das coordenadas de rotação do vector ferramenta nos respectivos campos, RX, RY, RZ.

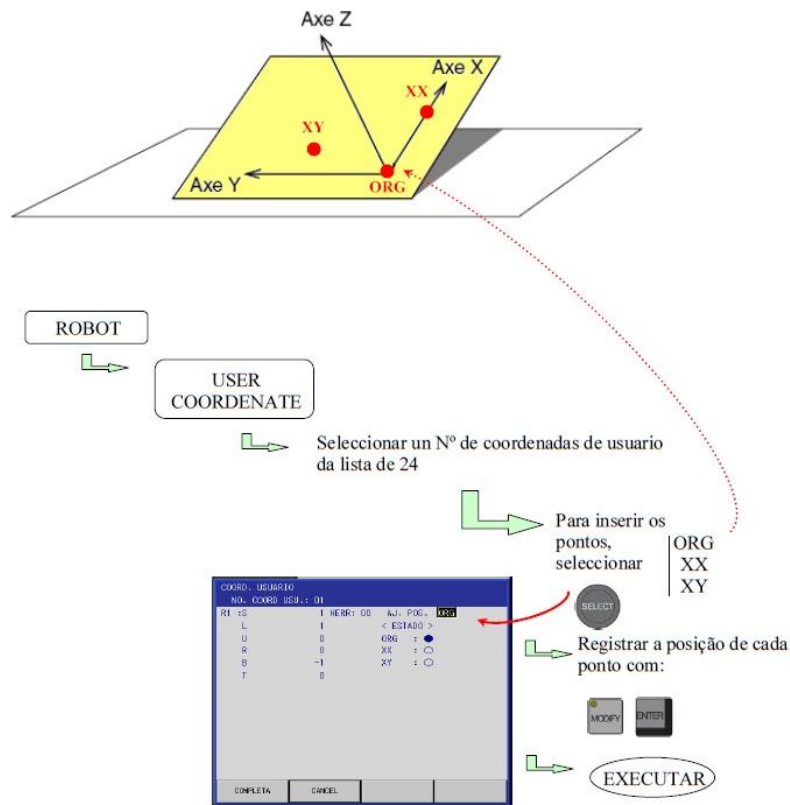


Figura 33 - Coordenadas usuário

Para seleccionar o sistema de coordenadas usuário num determinado programa deve-se proceder da seguinte forma:

1. Premir o botão [coord] até aparecer o símbolo de coordenadas usuários;
2. Seguidamente para seleccionar o sistema de coordenadas de usuário de 1 até 24 deve-se premir os botões [shift] +[coord].

Tabela 14 – Estrutura de código de programação

| ESTRUTURA DE PROGRAMA DE PROGRAMAÇÃO - INFORM III | | |
|---|--|------------------------------|
| <pre>//JOB //NAME teste //POS ///NPOS 0,0,0,4,0,0 ///USER 1 ///TOOL 0 ///POSTYPE USER ///RECTAN ///RCONF 0,0,0,0,0,0,0</pre> | <p>Instrução de programa</p> <p>Nome do programa – Name + "teste"</p> <p>Instrução de programa posição</p> <p>Enumeração do tipo de variáveis de posição</p> <p>Identificação do sistema de coordenadas usuário (1 a 24)</p> <p>Nome da ferramenta</p> <p>Tipo de sistema de coordenadas</p> | CABEÇALHO |
| <pre>P0000-0.000,0.000,20.000,-179.77,0.17,158.18 P0002-100.000,100.000,20.000,-179.77,0.17,158.18 P0003-0.000,100.000,20.000,-179.77,0.17,158.18</pre> | <p>Posição da Variável P000 - Código seguido de coordenadas XYZ-RXRYRZ</p> <p>.....</p> <p>Posição da Variável Pxxx</p> | VARIAVEIS |
| <pre>//INST ///DATE 2012/03/20 15:20 ///ATTR SC,RW,RJ ////FRAME ROBOT ///GROUP1 RB1</pre> | <p>Data de criação de programa</p> | INFORMAÇÃO GERAL |
| <pre>NOP MOVL P000 V=23.0 MOVL P002 V=23.0 MOVL P003 V=23.0 END</pre> | <p>Instrução inicio de programa</p> <p>Ordem de movimentação para o ponto 1</p> <p>Ordem de movimentação para ponto N</p> <p>Instrução fim de programa</p> | INSTRUÇÃO DE COMANDOS |

A estrutura de um programa de programação, Tabela 14, divide-se basicamente em quatro famílias. Primeiramente está o cabeçalho, seguidamente a memorização das variáveis de posição, o terceiro campo corresponde a informação geral (do tipo gestão) e por último no quarto campo encontra-se a linha de comandos, a linha de comandos é exatamente igual às instruções que estão num programa (JOB) na consola de programação.

O formato de leitura do ficheiro na consola é “.JBI”. Contudo é possível editar o ficheiro através de um programa de editor de texto.