

Operações de Maquinagem de Tubos com Robô Industrial

José Nuno Abrantes Gomes

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Paulo Abreu

Co-Orientador: Prof. Manuel Romano Barbosa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Dezembro de 2017

Aos meus pais

Resumo

A atual tendência de crescente utilização e importância dos robôs industriais deve-se maioritariamente à descida dos seus custos, ao volume de trabalho elevado que disponibilizam e à sua flexibilidade. No entanto, no contexto mais específico da maquinagem industrial, em particular na fresagem de tubos, é ainda habitual a preferência por máquinas CNC. Estas permitem melhores características de produção comparativamente aos robôs industriais, como por exemplo exatidão e rigidez estrutural, juntamente com a existência de uma maior oferta de *software* de programação e simulação para processos de maquinagem.

Habitualmente, uma dificuldade relevante da indústria na utilização de robôs é a escolha e programação das trajetórias de maquinagem. De forma a ultrapassar este problema, *software* destinados a máquinas ferramenta foram adaptados para a programação *offline* de robôs. É assim permitido que se programem percursos de maquinagem *offline* sem que a célula real precise de parar, aumentando o seu tempo de trabalho e a sua eficiência. A utilização destes *software* de simulação leva a poupanças de tempo, energia e material, pois através das simulações virtuais é possível analisar eventuais erros de trajetória e corrigi-los atempadamente, evitando consumos de energia despropositados do robô e desperdícios de tempo e material.

No âmbito da presente dissertação, para a realização das operações de maquinagem de tubos com robô industrial, foram utilizados o programa de *CAD SolidWorks*, onde foram modeladas as peças, o programa de *CAD/CAM MasterCAM/RobotMaster*, que gerou programas de instruções de maquinagem em linguagem específica do robô, através do uso de pós-processadores, e o programa de *CAD/CAM RobotStudio*, *software* do fabricante do robô utilizado, passível de simulações de operações de maquinagem com a célula virtual igual à célula real. Foram escolhidos quatro acessórios, sendo dois em forma de “Tê”, com dimensões diferentes, e dois tubos de secção irregular, também com dimensões diferentes, para serem maquinados pelo robô, e foram definidos três tipos de ligações para realizar com os acessórios maquinados, cada ligação com requisitos distintos. As operações de maquinagem foram realizadas na célula robótica do Laboratório do DEMec/FEUP.

Todas as peças utilizadas para maquinagem foram modeladas no *SolidWorks*. Posteriormente, em cada caso de ligação, o respetivo programa das operações de maquinagem gerado pelo *software MasterCAM/RobotMaster* continha falhas, que foram detetadas e corrigidas. Os programas foram posteriormente testados no *RobotStudio* e foram efetuadas as simulações finais, terminando assim a fase de teste. Depois, foram introduzidos os programas das operações no controlador real do robô e efetuadas as operações de maquinagem dos tubos. O último passo foi conectar as peças como planeado e comprovar a validade das operações de maquinagem realizadas. Os resultados experimentais permitiram concluir que as operações de maquinagem em robô industrial foram bem sucedidas, resultando em peças com superfícies de ligação muito próximas ao desejado, que permitiram que as ligações fossem asseguradas.

Abstract

The growing trend of robot's usage and importance is due, mainly, to its reduced investment costs, its large work volume and its flexibility. However, in a more specific machining context, in particular in tube or pipe milling, the preference for CNC machines is still common. These provide better production characteristics, such as structural rigidity and accuracy. Furthermore, they offer a wider range of programming and simulation software for machining purposes.

Normally, a significant obstacle of industries regarding robot's appliance is the availability of software tools for programming the machine toolpaths. To overcome this difficulty, software meant for CNC machines were adapted for robot programming. It is thus possible that robot's toolpaths are now edited and verified offline, putting aside the need for the robotic cell to pause while making changes, increasing its workflow and efficiency. The usage of these simulation software leads to time, energy and material savings, as through these virtual simulations it is possible to observe toolpath deviations and correct them.

Within the context of the present dissertation, for the completion of the pipe machining operations with industrial robot, were used the CAD software SolidWorks, to model the parts to be machined, the CAD/CAM software MasterCAM/RobotMaster, which generated programs of machining instructions in the robot's specific coding language, through the usage of post-processors, and the software RobotStudio, which was built by the robot's manufacturer and allows us to do simulations with a virtual cell equal to the real cell. The parts to be machined consisted of two with a "T" shape, with different dimensions, and two tubes of irregular sections, also with different dimensions. Three types of connections to be achieved with the machined accessories were defined, each connection with different requirements. The machining operations were accomplished in the *DEMec/FEUP* laboratory's robotic cell.

After modeling the parts in SolidWorks, for each case, the respective machining operations code generated by MasterCAM/RobotMaster was analyzed to detect and correct the always existing errors. The corrected codes were then tested in RobotStudio, and the final simulations were made, thus completing the testing phase. Later on, the codes were put into the robot's controller and the tube machining operations took action. The last step resided on connecting the machined pieces in order to validate the machining operations accomplished. These experimental results allowed to conclude that the tube machining operations with industrial robot were successful, resulting in parts with surfaces and shapes rather similar of what was intended, which granted the accomplishment of the connections.

Agradecimentos

Aos meus pais que, ao longo de todo o meu percurso acadêmico, e principalmente nas fases negativas, me proporcionaram todas as bases e ajudas possíveis para eu continuar a trabalhar. Foram ambos fulcrais para que eu pudesse terminar esta etapa com sucesso.

À Joana, por toda a preocupação e incentivos.

Aos meus orientadores, Paulo Abreu e Manuel Romano Barbosa, por todo o tempo despendido, críticas construtivas e indicações importantes que me foram transmitindo ao longo da realização desta dissertação.

Ao Sr. Joaquim Silva, pela disponibilidade e ajuda prestada.

Aos meus amigos de fora da faculdade, pela constante motivação e preocupação nos períodos mais difíceis.

Aos meus amigos e colegas de curso, por toda a ajuda e pelos bons momentos passados ao longo destes anos.

Índice de Conteúdos

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
Lista de Siglas	ix
1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento da Dissertação e Motivação	1
1.2 - Objetivos da Dissertação	2
1.3 - Estrutura da Dissertação	3
1.4 - Etapas da Dissertação	4
2 - Operações de Corte e Maquinagem de Tubos	5
2.1 - Processos Tradicionais	5
2.2 - Processos com Máquinas Dedicadas	5
2.3 - Processos com Robôs Industriais	6
2.4 - Síntese e Comparação	7
3 - Operações de Maquinagem de Tubos com Robô Industrial	9
3.1 - Programação das Operações de Maquinagem	9
3.1.1 - Ferramenta e Suporte de Fixação	10
3.1.2 - Parâmetros de Corte	11
3.2 - Ligação a 90°	14
3.3 - Ligação entre Tubos de Secção não Uniforme	17
3.4 - Ligação a 45°	21
4 - Validação e Implementação das Operações de Maquinagem	27
4.1 - Validação das Operações de Maquinagem	27
4.2 - Implementação das Operações de Maquinagem	30
4.2.1 - Célula Robótica Real	30
4.2.2 - Calibração do <i>TCP</i>	32
4.2.3 - Definição do <i>Workobject</i>	33
5 - Análise de Resultados	37
5.1 - Ligação a 90°	37
5.2 - Ligação entre Tubos de Secção não Uniforme	40
5.3 - Ligação a 45°	44
6 - Conclusões	47
Referências	49

Índice de Figuras

Figura 1 - Nº de robôs vendidos por ano	2
Figura 2 - Serra elétrica a cortar tubo	5
Figura 3 - Máquina Dedicada CNC para corte de tubos por <i>Laser</i>	6
Figura 4 - Maquinagem de tubo por robô industrial e <i>Laser</i>	7
Figura 5 - Procedimento seguido para a realização das operações de maquinagem	9
Figura 6 - Dimensões do <i>Holder</i> e da ferramenta	11
Figura 7 - Parâmetros de corte em ambiente <i>MasterCAM X5</i>	12
Figura 8 - Simulação em <i>MasterCAM/RobotMaster</i>	13
Figura 9 - Modelação em <i>CAD</i> do acessório em "Tê" (25x25x20 mm)	14
Figura 10 - Medidas do acessório em "Tê"	14
Figura 11 - Modelação em <i>CAD</i> do tubo (270mm)	15
Figura 12 - Medidas do tubo	15
Figura 13 - Ligação a 90°	15
Figura 14 - Trajetos das operações para ligação a 90°	16
Figura 15 - Utilização da peça como <i>stock Solid</i> em <i>MasterCAM</i>	16
Figura 16 - Simulação da superfície maquinada	17
Figura 17 - Vista lateral da modelação <i>CAD</i> (tubo de 380mm)	18
Figura 18 - Medidas do tubo de secção não uniforme	18
Figura 19 - Superfície de ligação modelada em <i>CAD</i>	19
Figura 20 - Ligação entre os dois tubos	19
Figura 21 - Atribuição da sobre maquinagem na última operação	20
Figura 22 - Simulação do resultado das operações de maquinagem	20
Figura 23 - Modelação em <i>CAD</i> do acessório em "Tê" (32x32x25mm)	21
Figura 24 - Medidas do acessório em "Tê"	21
Figura 25 - Ligação a 45°	22
Figura 26 - Modelação do acessório em "Tê", em <i>CAD</i> , com orifício para encaixe a 45°	22
Figura 27 - Contornos da superfície de geometria complexa em ambiente <i>MasterCAM</i>	23
Figura 28 - <i>Tool Axis Control</i> através de linhas em concordância com as <i>splines</i>	24
Figura 29 - Seleção das linhas criadas para orientação da ferramenta	24
Figura 30 - Simulação da qualidade da maquinagem	25
Figura 31 - Outra vista da simulação da qualidade de maquinagem	25
Figura 32 - Configuração da célula robótica	28

Figura 33 - <i>Assembly</i> do conjunto terminal do robô	29
Figura 34 - Ficheiro <i>CAD</i> importado para <i>RobotStudio</i>	29
Figura 35 - Robô Industrial <i>ABB IRB 2400/16</i>	30
Figura 36 - Alcance do robô <i>ABB IRB 2400/16</i>	31
Figura 37 - <i>Spindle PDC XLC70</i>	31
Figura 38 - Conceito de <i>TCP</i>	32
Figura 39 - Fresa de 1mm de diâmetro	33
Figura 40 - Princípio da definição do <i>Workobject (Wobj)</i>	34
Figura 41 - Início da definição do <i>Workobject</i> numa das peças	34
Figura 42 - Excerto do código <i>RAPID</i> com coordenadas do <i>TCP</i> e do <i>Wobj</i> reais para o caso 3	35
Figura 43 - Posicionamento e orientação da peça para o caso 1	37
Figura 44 - Resultado das operações de maquinagem na simulação do caso 1, em <i>MasterCAM X5</i>	38
Figura 45 - Tê para ligação a 90°	38
Figura 46 - Desvio de localização e desvio angular do furo no caso 1	39
Figura 47 - Ligação tubo-Tê	39
Figura 48 - Outra perspetiva da ligação	40
Figura 49 - Fixação do tubo com recurso a grampos	41
Figura 50 - Resultado das operações de maquinagem na simulação do caso 2, em <i>MasterCAM X5</i>	41
Figura 51 - Resultado das operações de maquinagem do caso 2, na célula robótica real	42
Figura 52 - Ligação entre os tubos	43
Figura 53 - Outra perspetiva da ligação entre os tubos	43
Figura 54 - Posicionamento e orientação da peça para o caso 3	44
Figura 55 - Resultados superficiais na simulação do caso 3, em <i>MasterCAM X5</i>	45
Figura 56 - Tê para ligação a 45°	45
Figura 57 - Ligação a 45°	46
Figura 58 - Outra perspetiva da ligação	46

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Aplicações de Robôs Industriais	1
Tabela 2 - Gráfico de Gantt	4
Tabela 3 - Comparação entre Máquinas CNC e Robôs Industriais para Operações de Maquinagem e Corte em Tubos.....	7
Tabela 4 - Características do <i>Spindle PDC XLC70</i>	32
Tabela 5 - Características da ferramenta	10
Tabela 6 - Coordenadas do <i>TCP</i> definido através do método dos 6 pontos.....	33

Lista de Siglas

ABB - Asea Brown Boveri

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

DEMec - Departamento de Engenharia Mecânica

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IGES - Initial Graphics Exchange Specification

PPR - Polipropileno Reticulado

SLDPRT - SolidWorks Part

STEP - Standard for the Exchange of Product model data

STL - Stereolithography

TCP - Tool Center Point

WOBJ - Workobject

1 - Introdução

Este capítulo introduz o trabalho realizado - Operações de Maquinagem de Tubos com Robô Industrial - com o respetivo enquadramento e os seus objetivos, assim como a estrutura integral da dissertação.

1.1 - Enquadramento da Dissertação e Motivação

A crescente competitividade em todas as indústrias leva a um constante avanço tecnológico, o que se traduz numa exploração por novos caminhos para fazer mais e melhor, de modo a que seja possível elevar a produtividade sem descuidar a qualidade do produto.

Os robôs industriais têm vindo a ter um crescimento exponencial na última década, e prevê-se uma evolução ainda mais acentuada da sua utilização [1], o que motiva a partir à descoberta das características particulares dos robôs que levaram a este crescimento na indústria atual.

Sendo os robôs industriais máquinas dotadas de grande flexibilidade e com capacidade de trabalhar num grande volume espacial [2], é neste contexto que aparece a janela de oportunidade para estudar a aplicação de um robô industrial.

Os *software* de *CAM* atualmente disponibilizam funcionalidades que nos permitem programar a trajetória do robô e escolher diferentes parametrizações, tema explorado nesta dissertação com foco para a geração de cortes de geometrias complexas em tubos, para posterior interligação através destas superfícies ([3] a [6]).

Na Tabela 1, são apresentadas algumas das aplicações atuais de robôs industriais em processos que envolvem remoção de material.

Tabela 1 - Aplicações de Robôs Industriais [7]

Indústria	Processos	Produto
Aeroespacial	Lixagem, polimento, furação	Pás de turbinas, fuselagem
Automóvel	Lixagem, furação, corte, fresagem	Blocos de motor, carroçaria, painéis
Fundição	Rebarbagem, fresagem, furação, acabamento	Moldes e peças fundidas
Médica	Polimento, lixagem	Próteses
Entretenimento	Fresagem	Cenários e figuras de parques de diversão, esculturas
Madeireira	Fresagem	Mobiliário, corrimões, moldes de banheiras
Plásticos	Fresagem	Moldes, capacetes

A Figura 1 ilustra o crescimento do número de robôs industriais vendidos globalmente.

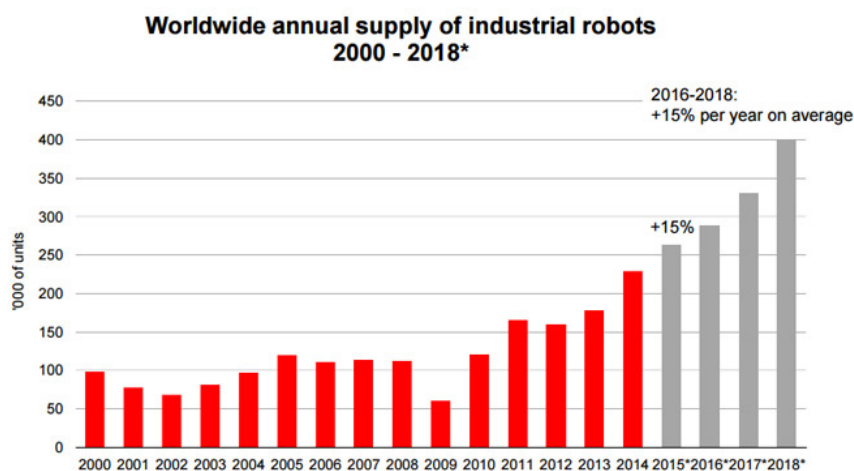


Figura 1 - Nº de robôs vendidos por ano [1]

1.2 - Objetivos da Dissertação

Esta dissertação visa o estudo, planeamento e implementação de operações de maquinagem com recurso a um robô industrial. Pretende-se conceber uma estação robótica para a execução de operações de maquinagem em tubos de tamanhos e formas distintos, de modo a ser possível a sua interligação com distintas orientações.

A implementação deste objetivo passa por:

- definir e modelar as peças iniciais e as superfícies de junção em *CAD*
- gerar o programa de maquinagem que o robô deve executar com base na utilização das ferramentas de *CAM (MasterCAM/RobotMaster)*
- validação do programa gerado através de ferramentas de simulação da célula robótica (*RobotStudio*)
- implementação experimental do procedimento, considerando os equipamentos existentes

O objetivo da dissertação passa por encontrar uma solução que permita programar corretamente a trajetória do robô. Será concretizada a sua aplicação através da simulação e execução de operações de corte, por fresagem, com robô industrial, em tubos de secção e tamanhos variáveis, de forma a que os tubos possam posteriormente ser interligados com distintas orientações.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Tendo em conta os objetivos atrás referidos, a presente dissertação está organizada em seis capítulos. Assim, no capítulo 1, *Introdução*, é apresentado o tema da dissertação, enquadramento do mesmo, as motivações para a realização da dissertação e quais os objetivos a atingir.

No capítulo 2, *Operações de Corte e Maquinagem de Tubos*, são abordados os diferentes processos industriais utilizados atualmente nas operações de corte e maquinagem de tubos, sendo feita uma comparação entre estes processos.

Seguidamente, o capítulo 3, *Operações de Maquinagem de Tubos com Robô Industrial*, encarrega-se de apresentar os casos de estudo definidos para a dissertação, assim bem como quais as estratégias de maquinagem adotadas para realizar as operações.

No capítulo 4, *Validação e Implementação das Operações de Maquinagem*, é apresentado o *software* utilizado para validação final, a definição do *layout* da célula robótica virtual utilizada e como foi abordada a implementação dos percursos de maquinagem escolhidos.

O capítulo 5, *Análise de Resultados*, contém os resultados das operações de maquinagem realizadas, assim como comparações entre as geometrias idealizadas e as peças maquinadas em robô industrial.

Finalmente, no capítulo 6, *Conclusões*, estão presentes as ilações tiradas da realização das operações de maquinagem em tubos com recurso a robô industrial.

1.4 - Etapas da Dissertação

Nesta secção, através da Tabela 2, são apresentadas as etapas envolvidas na realização desta dissertação e a sua distribuição ao longo do prazo das treze semanas em que foi realizada.

Tabela 2 - Gráfico de Gantt

Tarefa	Semanas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Pesquisa /Estado da Arte	■												
Definição das junções de tubos a analisar		■	■	■	■								
Modelação em CAD das superfícies de união (superfície final e original)				■	■	■							
Definição do <i>layout</i> da célula robótica (fixação, robot, <i>Spindle</i> , etc)						■							
Configuração do <i>MasterCAM</i> & <i>RobotMaster</i>						■							
Definição das Sequências de Maquinagem						■	■	■					
Validação dos Programas no <i>RobotStudio</i>								■	■	■			
Validação Experimental										■	■		
Escrita da Dissertação		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

2 - Operações de Corte e Maquinagem de Tubos

Na indústria atual é necessário o corte de superfícies tubulares para interligação nas mais diversas áreas, incluindo por exemplo redes de ar comprimido, saneamento, escapes e estruturas [8].

Neste capítulo é abordado o problema do corte e maquinagem de tubos através de três pontos de vista distintos, ou seja, usando:

- Processos Tradicionais
- Máquinas Dedicadas CNC
- Robôs Industriais

2.1 - Processos Tradicionais

Os processos tradicionais traduzem-se pela sua simplicidade e relativa falta de evolução, em comparação com os processos mais comuns nas indústrias de hoje. São métodos dependentes da ação humana, pois é necessária a presença e atuação de um operário. As operações a serem efetuadas são todas de carácter básico, de cortes de geometria simples, e onde a exatidão não é um requisito essencial, já que tanto os discos de corte como o posicionamento da peça podem não permitir qualidades de corte e precisão elevadas.

Os métodos aqui utilizados são de maquinagem convencional, isto é, requerem o contacto físico entre a peça e a ferramenta, existindo o arranque de material sob a forma de aparas. Não existe necessidade de operários altamente qualificados e a alimentação/remoção do material é feita manualmente. Na Figura 2, é apresentado um exemplo de processo tradicional de corte de tubos com recurso a uma serra elétrica de disco operada manualmente.



Figura 2 - Serra elétrica a cortar tubo [9]

2.2 - Processos com Máquinas Dedicadas

A maquinagem com máquinas dedicadas comandadas por CNC (Comando Numérico Computorizado) é um processo que envolve a utilização de computadores para controlo da ferramenta e da peça a ser maquinada. Os *software* e consolas de comando únicas destes sistemas são o que os distingue e permite o seu uso em máquinas CNC [10] [11].

A maquinagem por CNC é um processo de grande exatidão (até 0,001mm), característica resultante da enorme robustez das máquinas CNC, assim bem como da existência de *software* muito específicos para programação e controlo das trajetórias. Este tipo de máquinas possui igualmente uma repetibilidade muito elevada, isto é, executa tarefas repetitivamente com desvios mínimos entre elas. Executam operações com alguma complexidade, assegurando uma boa produtividade e tolerâncias apertadas, deixando espaço para assumir que as peças geradas por máquinas-ferramenta CNC produzem peças muito similares ao projeto CAD [12] [13]. Possibilitam ainda a fácil fixação das peças para maquinagem e, devido ao seu volume de trabalho aberto, permitem a colocação de tubos mais longos e de maior diâmetro. A Figura 3 ilustra um exemplo de maquinagem de tubos por uma máquina dedicada com recurso a um processo de corte por Laser.



Figura 3 - Máquina Dedicada CNC para corte de tubos por Laser [14]

2.3 - Processos com Robôs Industriais

A maquinagem com robôs industriais é usualmente justificada em situações de operações com peças de grandes dimensões, peças com zonas de difícil acesso ou criação de protótipos. São utilizados robôs industriais:

- Nas peças de grandes dimensões, devido ao seu grande volume de trabalho relativo ao seu próprio tamanho, isto é, um único manipulador robótico é capaz de efetuar operações em pontos espaciais bastante distantes entre si não ocupando ele mesmo muito espaço [5]
- Nas peças com zonas de difícil acesso, devido à manobrabilidade permitida pelos 6 graus de liberdade, o robô consegue ter várias configurações para que o órgão terminal atinja determinado ponto, o que lhe permite desviar de obstáculos [7]
- Na implementação de protótipos, devido à sua fácil programabilidade, o que permite poupar tempo na definição de novas trajetórias e operações [8]

A Figura 4 apresenta um exemplo de uma operação de corte de tubo por robô industrial e *Laser*.



Figura 4 - Corte de tubo por robô industrial e *Laser* [15]

2.4 - Síntese e Comparação

Salienta-se que o processo tradicional apenas serve para corte simples de tubos, normalmente com fraca qualidade, operação manual e raramente é utilizado em indústrias de grande produção, prevalecendo em pequenas oficinas onde não se justifica outro tipo de investimento nem são necessárias outro tipo de utilizações. Este método não é de forma alguma comparável em grande escala às máquinas dedicadas CNC ou aos robôs industriais.

De seguida, e porque são vários os pontos de interligação contextual, apresentam-se na Tabela 3 as vantagens das máquinas dedicadas CNC e dos robôs industriais para operações de corte e maquinagem em tubos.

Tabela 3 - Comparação entre Máquinas CNC e Robôs Industriais para Operações de Maquinagem e Corte em Tubos

VANTAGENS ROBÔ	VANTAGENS CNC
Menor necessidade de reposicionamento das peças a maquinar	Exatidão e repetibilidade das operações
Facilidade de maquinagem de peças com geometria complexa	Robustez e resistência às vibrações
Grande volume de trabalho	Sistemas de programação e simulação com capacidade de gerar trajetórias 100% corretas
Rápida e fácil reprogramação para novas trajetórias e operações	Cadência de produção elevada
Menor investimento inicial	

3 - Operações de Maquinagem de Tubos com Robô Industrial

Neste capítulo está descrito o procedimento seguido na programação *offline* das operações de maquinagem com um robô industrial. A descrição do procedimento visa demonstrar a exequibilidade das operações de maquinagem escolhidas e as diferenças de abordagem tomadas para cada um dos casos. Para executar as operações, foi utilizado o Robô Industrial *ABB IRB 2400/16* localizado no Laboratório de Robótica do DEMec/FEUP. A Figura 5 representa os passos seguidos desde a modelação das peças em *CAD* até à realização das operações de maquinagem.

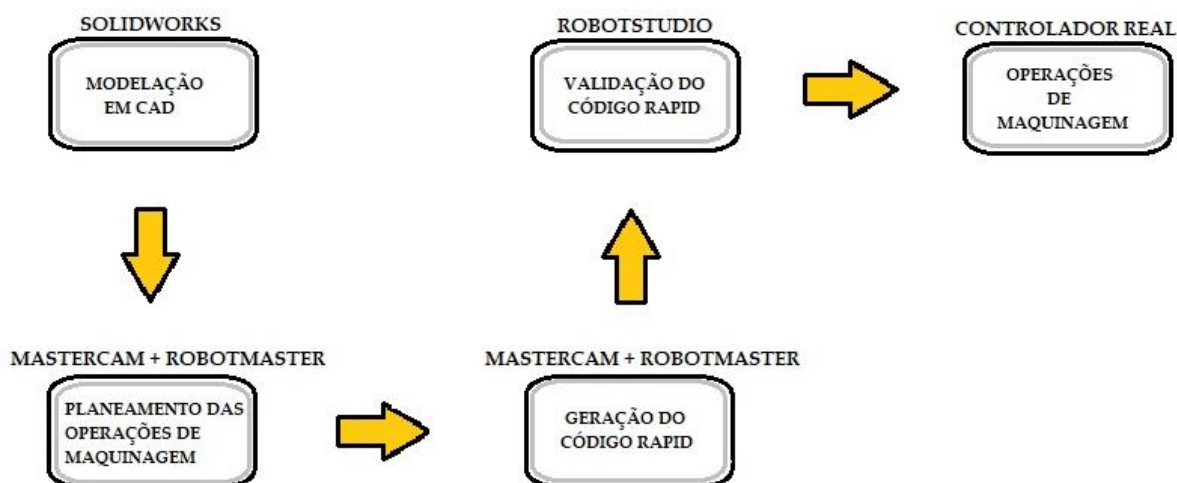


Figura 5 - Procedimento seguido para a realização das operações de maquinagem

3.1 - Programação das Operações de Maquinagem

Iniciou-se o processo através da escolha e definição dos casos de estudo, tarefa que envolveu a escolha de materiais, diâmetros, comprimentos, formas, ângulos de ligação entre as peças e formas de fixação, que serão posteriormente apresentados e explicados. A célula robótica, o robô e as ferramentas utilizadas foram as disponibilizadas no Laboratório.

De um modo geral, depois de modeladas as peças em *CAD*, recorre-se a um *software CAM* para gerar os percursos de maquinagem. Sendo estes *software* de carácter genérico (não são específicos para nenhuma máquina), é necessário utilizar um pós-processador para converter e otimizar as trajetórias de maquinagem para a máquina específica que se pretendem utilizar. Uma vez comprovada a não existência de colisões e/ou erros nos percursos de maquinagem, o pós-processador gera o programa na linguagem de programação do robô.

Dado que a simulação no *software* disponibilizado pelo fabricante do robô será a mais próxima possível da realidade, já que aqui são modelados e inseridos todos os componentes da

célula real, é efetuada uma simulação nesse *software* para comprovar a exequibilidade do programa gerado. Caso esta simulação decorra como planejado, o programa pode ser transferido para o controlador real.

O *software* utilizado para modelação de todas as peças foi o *SolidWorks 2012 e 2016* (versão 2012 disponível no Laboratório de Robótica do DEMec, versão 2016 disponibilizado pela UP para download pessoal), devido às facilidades de manejo das ferramentas de desenho que este *software* apresenta relativamente ao *MasterCAM*, onde é também possível modelar peças. Para a programação das estratégias e parâmetros de maquinagem recorreu-se ao *software MasterCAM X5* com o *add-on RobotMaster*, que providencia vários pós-processadores para a linguagem de programação de robôs de vários fabricantes, incluindo a *ABB*, assim bem como a possibilidade de simulações das operações de maquinagem.

O formato utilizado, que se revelou mais eficaz para transferir a peça de *SolidWorks* para *MasterCAM* foi o *IGES*. Através do formato *IGES*, é possível obter o reconhecimento das superfícies e contornos da peça modelada, o que possibilita uma construção de operações de maquinagem mais simples e concisa.

Para uma validação final das operações de maquinagem geradas e simuladas no *MasterCAM/RobotMaster*, foi utilizado o *software RobotStudio v6.03.02*, programa do fabricante do robô *ABB*, que permitiu a modelação dos componentes reais da célula robótica.

São de seguida apresentados o conjunto Ferramenta e Suporte de Fixação (*Holder*), e os parâmetros de maquinagem escolhidos para as operações com robô industrial.

3.1.1 - Ferramenta e Suporte de Fixação

A ferramenta utilizada nas operações de maquinagem descritas nesta dissertação foi uma fresa plana, referência LH2EMB-060 do fabricante Li-Hsing Precision Tool. Na Tabela 4 apresentam-se as características da fresa.

Tabela 4 - Características da ferramenta

	Fresa Plana LH2EMB-060
Diâmetro	6mm
Nº lâminas de corte	2
Profundidade das lâminas	30mm
Comprimento total	100mm

A Figura 6 apresenta as dimensões da ferramenta e do *Holder*, como definidas no *MasterCAM*:

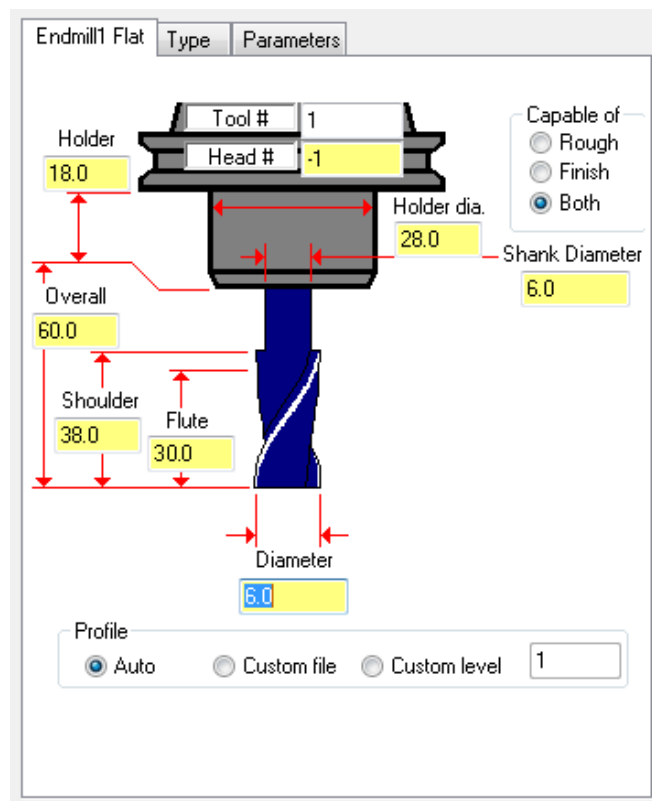


Figura 6 - Dimensões do *Holder* e da ferramenta

3.1.2 - Parâmetros de Corte

Para operações de maquinagem, é essencial definir corretamente os parâmetros de corte, pois estes têm forte contribuição nos tempos de maquinagem, rugosidade superficial e tempo útil de vida da ferramenta [17]. É, portanto, determinante conjugar estes fatores para obter a produtividade e qualidade pretendida no processo. Esta escolha dos valores dos parâmetros de corte tem, como diretriz, valores de referência obtidos por ensaios experimentais e modelos simplificados.

Não tendo como limitação a potência disponível, a segurança da ferramenta ou a taxa de remoção de material, dado que o material a maquinar era o PPR, os três parâmetros de corte tidos em conta são profundidade de corte, velocidade de corte e velocidade de avanço. Com velocidade crescente, aumenta também a temperatura na aresta de corte, logo um aumento da velocidade de corte significa simultaneamente um maior desgaste da ferramenta, traduzindo-se numa redução do seu tempo de vida útil. A escolha da velocidade de corte ideal depende

principalmente do material a processar. Com o PPR, o risco de derreter o material era elevado e, portanto, a velocidade de corte não poderia ser muito alta [18].

A velocidade de corte, segundo [19], deverá rondar os 125 [m/min], o que pela Equação 1:

$$V_C = \frac{D_c * \pi * N}{1000} \quad (1)$$

onde:

- V_c : velocidade de corte [m/min]
- D_c : diâmetro da ferramenta [mm]
- N : velocidade de rotação [rpm]

resulta um valor próximo das 6600 RPM para a velocidade de rotação.

O avanço por aresta de corte/dente (*FPT - Feed per Tooth*), deverá ter valores no intervalo [0.025;0.08] para o PPR [18].

A velocidade de avanço da ferramenta é obtida a partir da Equação 2 [19]:

$$F_m = N * Z * FPT \quad (2)$$

em que:

- F_m : velocidade de avanço da ferramenta [mm/min]
- N : velocidade de rotação do *Spindle* [rpm]
- Z : número de arestas de corte da ferramenta
- FPT : avanço por aresta de corte [mm/aresta]

O controlador do *Spindle* presente na célula robótica do DEMec apenas permite controlos de velocidade de 2000 em 2000 RPM [2000, 4000, 6000, (...)], tendo-se assim optado pela velocidade de 6000 RPM para as operações de maquinagem realizadas. Tendo N definido com o valor de 6000, a velocidade de avanço da ferramenta é traduzida numa gama de valores de [300; 960] (mm/min).

Em ambiente *MasterCAM*, é possível visualizar e especificar os parâmetros da equação previamente referida, como apresentado na Figura 7.

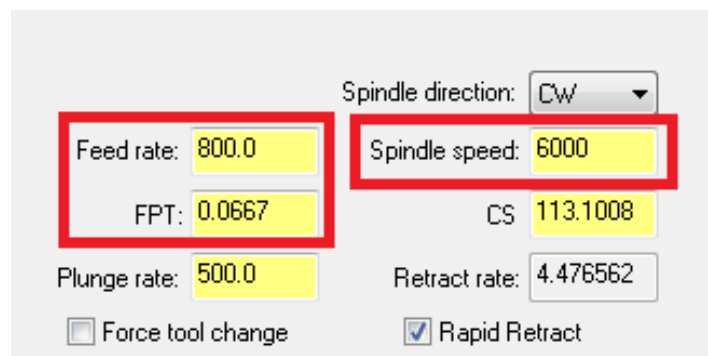


Figura 7 - Parâmetros de corte em ambiente *MasterCAM X5*

Ao definirmos a velocidade de avanço da ferramenta e a velocidade de rotação do *Spindle*, a velocidade de avanço por aresta de corte é calculada automaticamente.

Numa outra nota, o pós-processador do *MasterCAM/RobotMaster*, aquando da geração do código de comando numérico, não converte a velocidade de avanço de [mm/min] para [mm/s] [12]. Esta conversão é fulcral pois o *RobotStudio* utiliza [mm/s] como unidade da velocidade de avanço. A alteração teve de ser realizada manualmente no código RAPID.

A Figura 8 representa uma simulação em ambiente *MasterCAM/RobotMaster*.

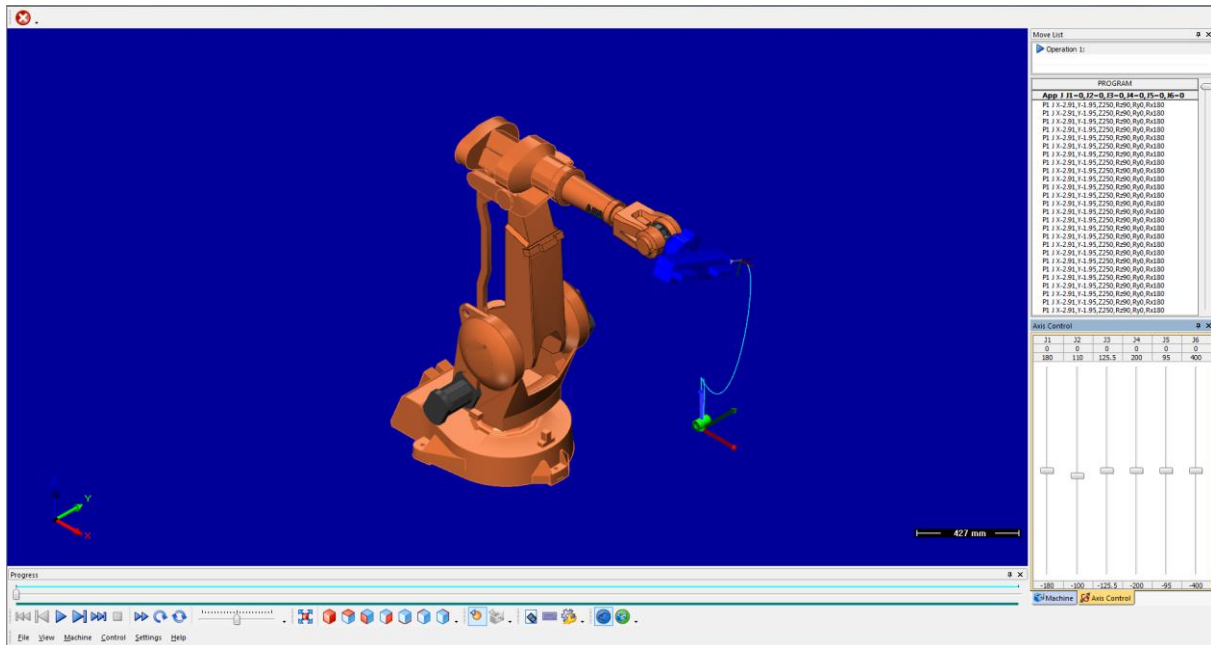


Figura 8 - Simulação em *MasterCAM/RobotMaster*

Para fixação das peças a serem maquinadas, pelo seu tamanho, operações a ser efetuadas e limitações de material, foi utilizado um torno de bancada. Quanto à escolha dos tubos a maquinar, em cada caso de estudo, foi adotado o uso de tubos e acessórios utilizados em instalações de distribuição de água quente, cujo material é o PPR (Polipropileno Reticulado).

Dado que as peças são de dimensão relativamente pequena (descritas nas secções seguintes), o *layout* escolhido para a célula robótica é válido para os três casos de maquinagem efetuados. O robô está fixo, manipula a ferramenta de corte e as peças são mantidas em posição fixa, com recurso a dispositivo de aperto mecânico. O *layout* escolhido garante que o robô tem acesso às zonas das peças necessárias sem colidir com nenhum objeto nem com ele mesmo, permitindo igualmente a fácil introdução e remoção das peças quando tal for necessário.

São agora apresentados os casos de estudo escolhidos para efetuar as operações de maquinagem e corte em tubos por robô industrial:

- Ligação a 90°
- Ligação de Tubos com Secção não Uniforme
- Ligação a 45°

3.2 - Ligação a 90°

Para esta ligação, foi utilizado um acessório de ligação de tubos em forma de Tê (Figura 7), de diâmetros internos de 25x25x20mm, onde foi efetuado o rasgo, e um tubo de secção não uniforme de comprimento 270mm e diâmetros exteriores nas extremidades de 25mm. Neste caso de estudo, a operação mais simples a ser utilizada com as ferramentas disponíveis é a de *Pocket* (abertura de cavidades). Como a superfície pós-maquinagem é bastante simples (um rasgo cilíndrico centrado perpendicularmente à superfície de topo), em termos de planeamento em *MasterCAM* torna-se uma operação trivial. Foram, no entanto, realizados vários testes com as operações de *Pocket* e *Contour* (execução de perfis de contorno), cada uma com diferentes parametrizações para avaliar hipóteses e comportamentos da ferramenta e do robô. A Figura 9 ilustra a modelação em *CAD* do acessório em "Tê" usado para esta ligação.

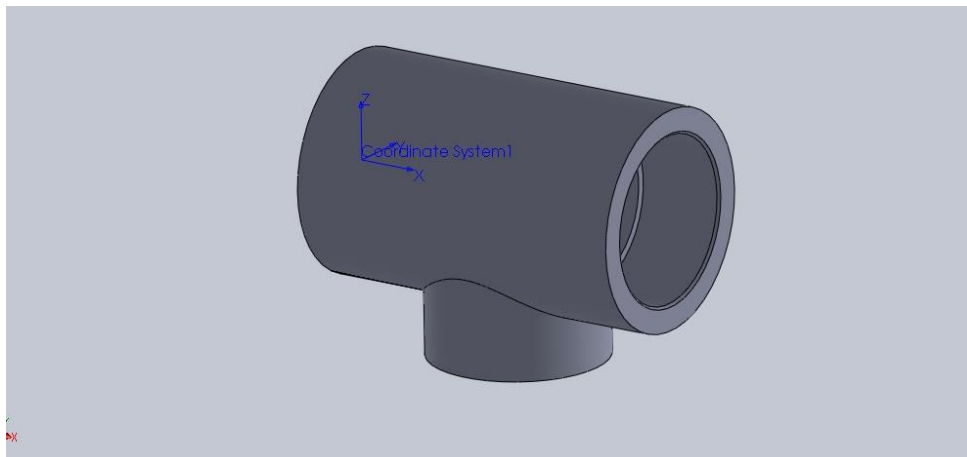


Figura 9 - Modelação em *CAD* do acessório em "Tê" (25x25x20 mm)

A Figura 10 apresenta as medidas do acessório referido (todas as medidas estão em milímetros).

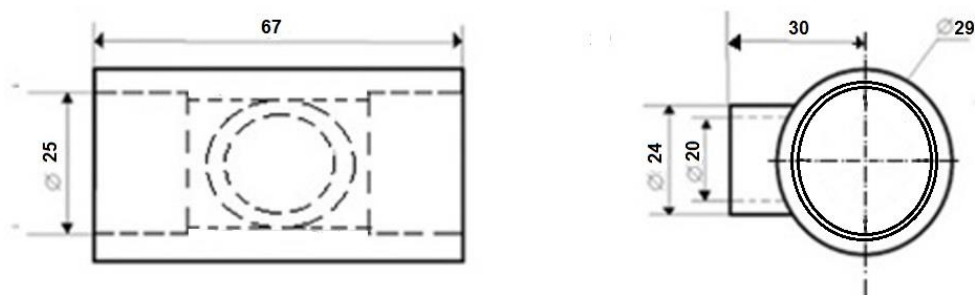


Figura 10 - Medidas do acessório em "Tê"

A Figura 11 mostra a modelação em *CAD* do tubo utilizado nesta ligação.

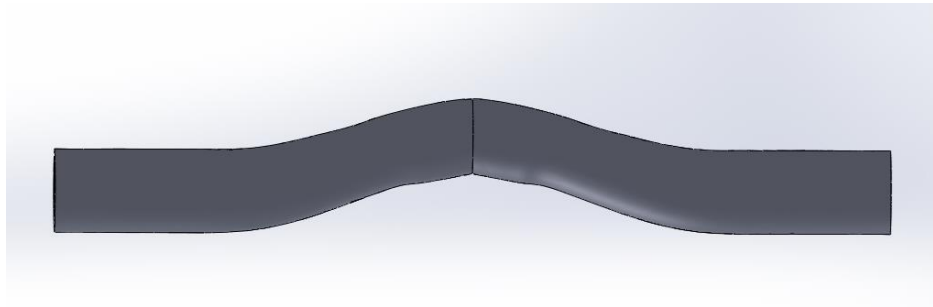


Figura 11 - Modelação em *CAD* do tubo (270mm)

A Figura 12 ilustra as medidas do tubo (todas as medidas estão em milímetros).

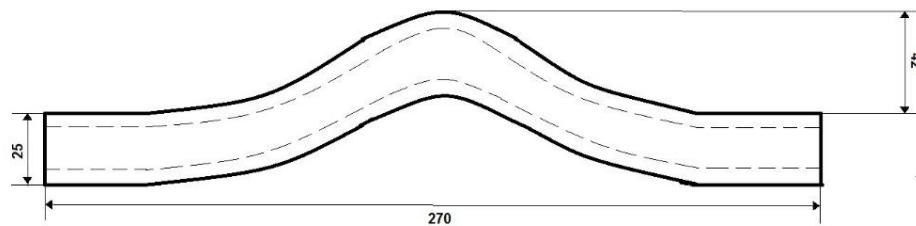


Figura 12 - Medidas do tubo

A Figura 13 ilustra a montagem em *SolidWorks* da ligação a 90° entre o acessório em "Tê" e uma das extremidades do tubo.

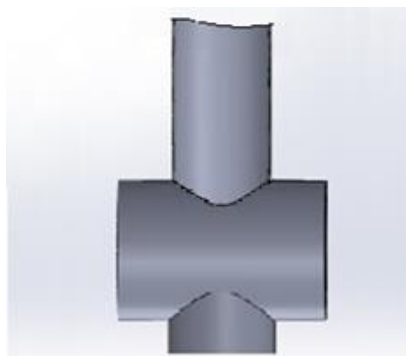


Figura 13 - Ligação a 90°

A Figura 14 representa o planejamento do trajeto da ferramenta nas operações de maquinagem para o caso da ligação a 90°.

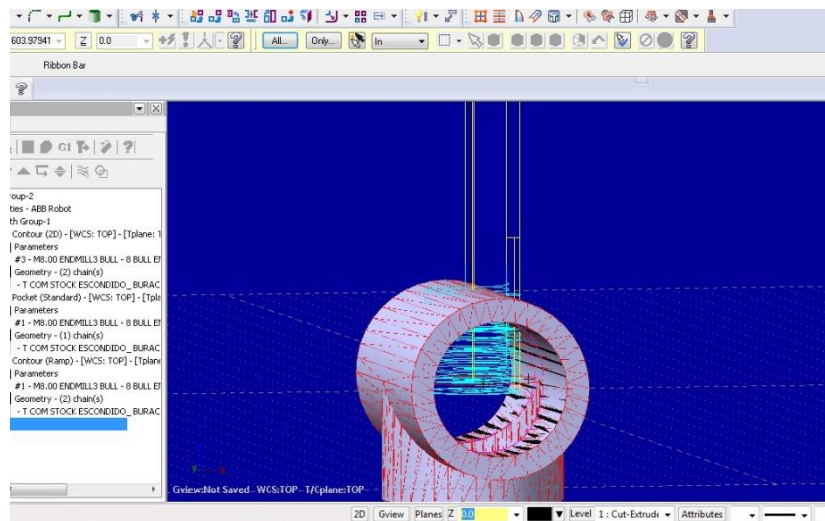


Figura 14 - Trajetos das operações para ligação a 90°

A operação de *Pocket* foi realizada a partir de circunferências criadas em *MasterCAM*, a uma determinada profundidade a partir do topo do *stock* (peça inicial), que serviu como base de orientação para a ferramenta. Um elevado número de diferentes parametrizações podem ser escolhidas a partir deste processo.

Apenas para demonstração e exploração de opções, dado que aqui as operações de maquinagem são mais simples, foi testada a hipótese de utilizar um único ficheiro em formato *SLDPRT* para a peça final e para a peça inicial (*stock*), pois não é necessário o reconhecimento de faces e superfícies para definir as operações de maquinagem. A Figura 15 mostra a janela para a seleção do formato inicial da peça a ser maquinada.

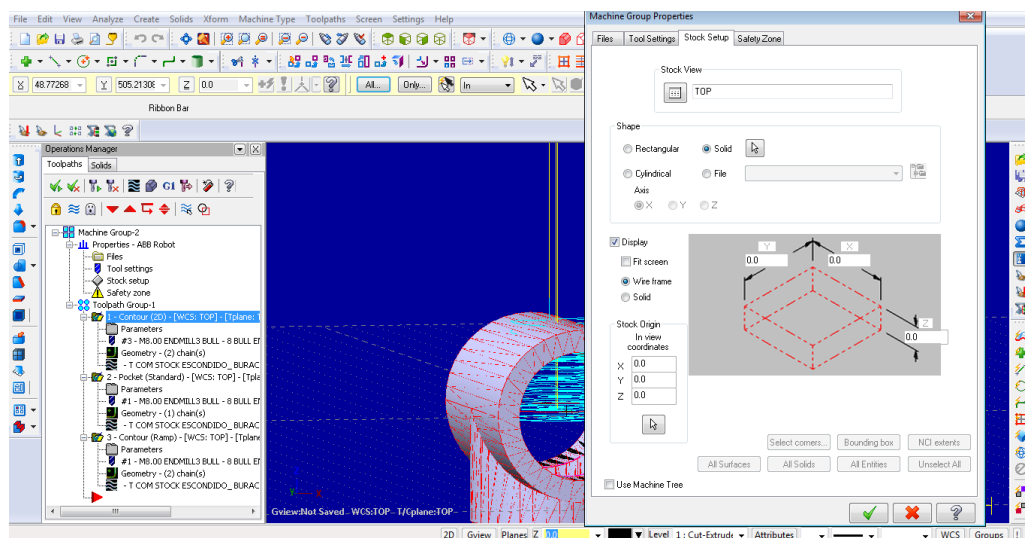


Figura 15 - Utilização da peça como *stock Solid* em *MasterCAM*

Como a geometria da superfície final maquinada é relativamente simples, foi modelada apenas a peça inicial. Neste tipo de casos, é mais célere modelar apenas a geometria inicial em *CAD*, e com o *MasterCAM* programar as operações. Posteriormente, através da opção *Verify* (simulação de percursos), é possível visualizar as geometrias finais da peça, desbastes e comprovar a qualidade das operações.

Para uma ligação mais eficaz, foram modelados dois contornos interiores cilíndricos, de menor diâmetro e a 10mm de profundidade, para que o tubo ali possa encaixar. Não foi possível desenhar um degrau em todo o contorno do rasgo devido à geometria tubular da superfície maquinada, mas o alcançado adequa-se à situação.

Como é ilustrado na Figura 16, as operações de maquinagem realizadas asseguram a forma das superfícies pretendidas, assim como o desbaste de material em todas as zonas pretendidas.

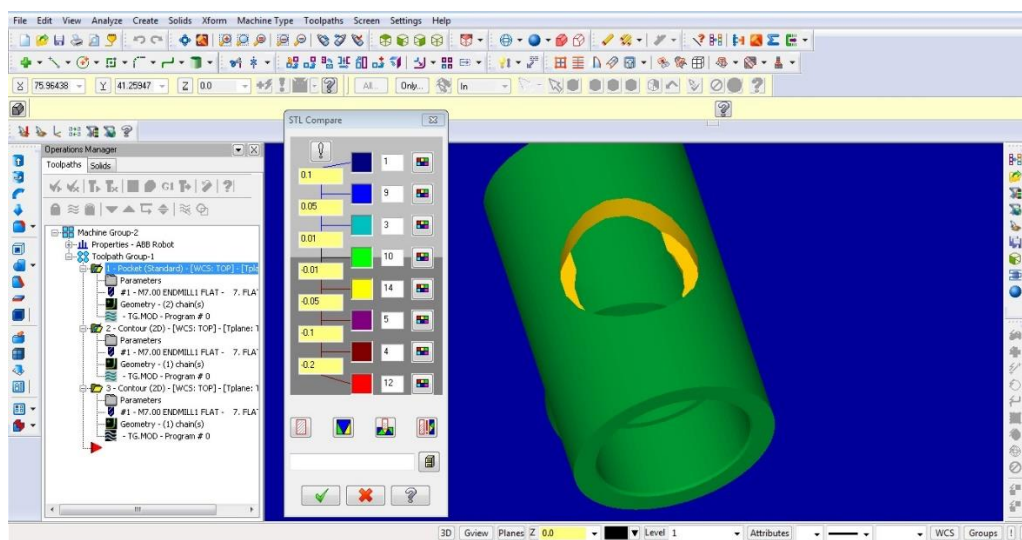


Figura 16 - Simulação da superfície maquinada

3.3 - Ligação entre Tubos de Secção não Uniforme

Este caso utiliza dois tubos de secção não uniforme (comprimento de 380mm e diâmetro externos nas extremidades de 32mm), que são ligados conforme representado na Figura 20. Este tipo de ligação entre os dois tubos permite várias opções de operações de maquinagem com resultados semelhantes. O ideal seria uma operação de *Facing* com uma fresa plana de diâmetro igual ou superior à da secção transversal da peça, resultando numa operação única com o desbaste total do material desejado e uma outra operação de acabamento. Como as fresas disponíveis no Laboratório possuíam diâmetros menores que o necessário para a operação referida, outros caminhos foram escolhidos.

Devido à secção elipsoidal irregular, uma operação de *Pocket* resultaria num percurso de maquinagem demasiado longo e tempos muito grandes. A ferramenta iria estar a "cortar ar" durante grande parte da operação devido à secção da peça ser irregular no plano XY. As duas

formas encontradas de superar este contratempo foram: realizar a operação de *Facing* mas com várias passagens, que assegurariam o desbaste de todo o material, e realizar várias operações de *Pocket*, cada uma com diferentes níveis de desbaste em *ZZ*. A modelação do tubo em *CAD* é apresentada na Figura 17.

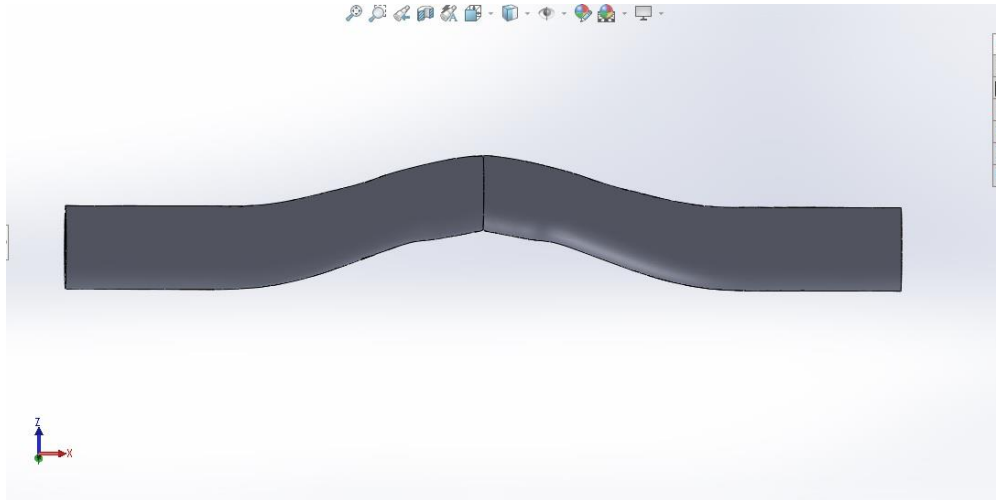


Figura 17 - Vista lateral da modelação CAD (tubo de 380mm)

A Figura 18 apresenta as medidas do tubo utilizado para esta ligação (todas as medidas estão em milímetros).

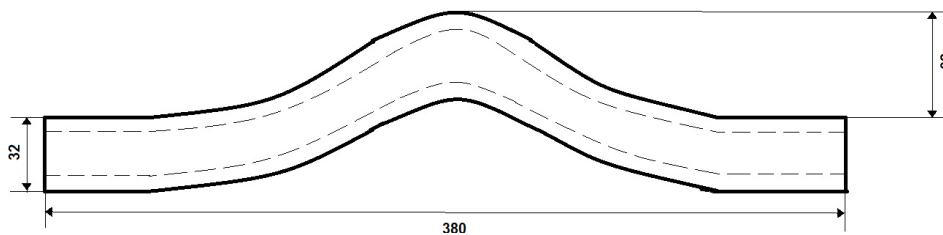


Figura 18 - Medidas do tubo de secção não uniforme

Comparando as duas opções referidas, utilizar várias operações *Pocket* permite que a ferramenta tenha um *toolpath* mais curto e o tempo a "cortar ar" seja quase nulo, pois partimos com um diâmetro pequeno no topo do *stock*, e à medida que vai descendo a profundidade em *ZZ*, incrementa o diâmetro do percurso que a ferramenta deve percorrer. Não só por causa do *toolpath* ser mais curto, mas também devido à natureza de movimentação das juntas do robô, é mais rápido para este seguir a trajetória elipsoidal gerada pela operação de *Pocket* do que a trajetória de *ZigZag* gerada pela operação de *Facing*. Se estivéssemos perante uma máquina-ferramenta de 3 eixos, a conclusão seria a oposta a esta.

Como as superfícies de ligação eram planas de forma elipsoidal, para efeitos deste exemplo a maneira mais expedita de realizar o procedimento foi modelar a peça final em *CAD*, através do formato *SLDPRT*, gravando posteriormente o ficheiro nos formatos *IGES* e *STL*, para depois, no *MasterCAM*, programar as operações de maquinagem que garantiriam as superfícies finais desejadas. A superfície de ligação está representada na Figura 19.

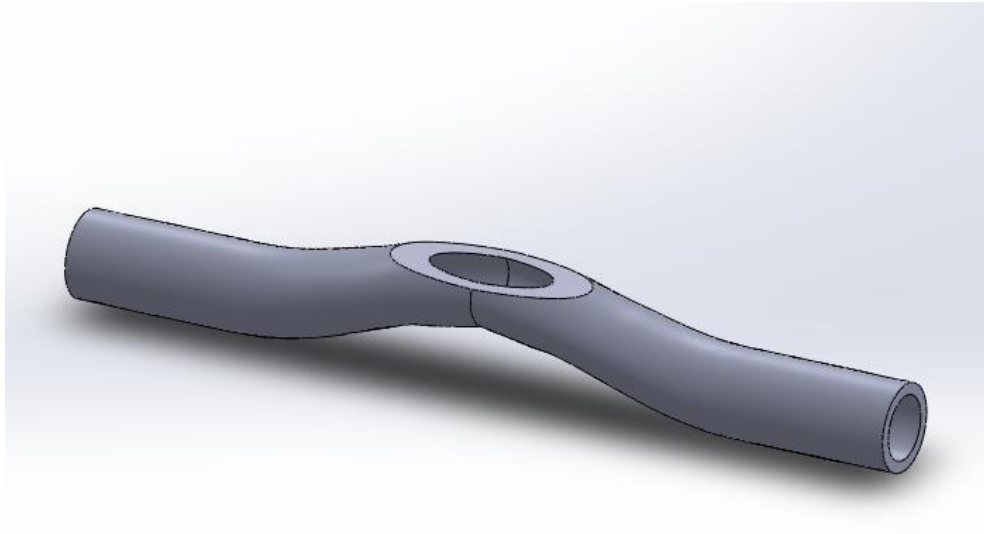


Figura 19 - Superfície de ligação modelada em CAD

A Figura 20 representa a ligação entre os dois tubos.

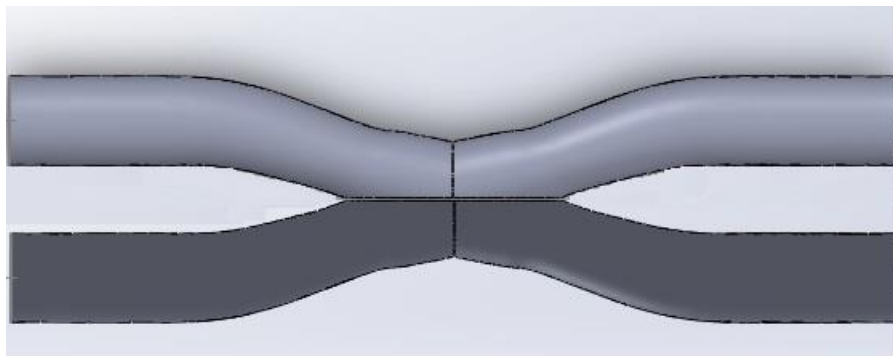


Figura 20 - Ligação entre os dois tubos

De modo a assegurar a qualidade das superfícies maquinadas, e porque teriam de ficar ambas muito similares, optou-se por realizar uma sobre passagem exterior com a medida do raio da ferramenta na última operação. Esta sobre passagem permite assegurar que os limites da superfície elipsoidal são maquinados. Nota para o facto de terem sido criadas três operações distintas, para que a cada uma sejam atribuídos diferentes parâmetros de profundidade e diferentes diâmetros dos percursos de maquinagem, originando o *toolpath* mais curto e célere previamente referido. Alguns dos parâmetros de corte escolhidos (tolerância de linearização, sobre/sub maquinagem) são apresentados na Figura 21.

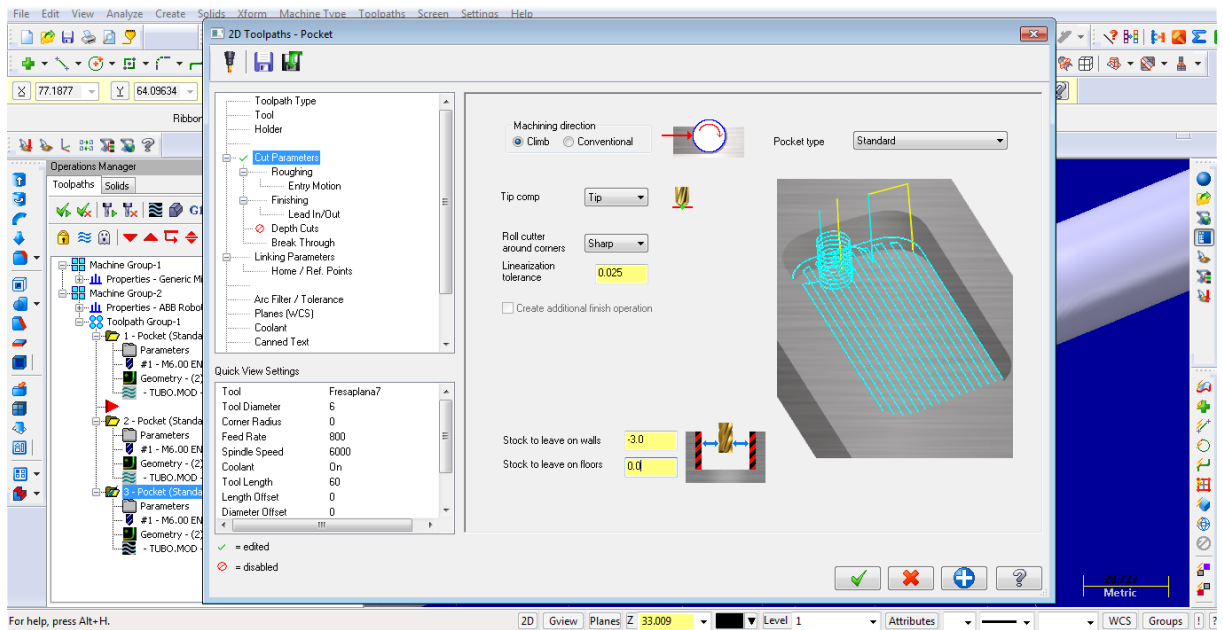


Figura 21 - Parametrização das operações de maquinagem

Para uma visualização do resultado final das operações de maquinagem, utiliza-se mais uma vez a opção *Verify* do *MasterCAM X5*. Não tendo em conta qualquer limitação na movimentação do robô, esta simulação é indicada para verificar os aspetos finais da peça e os percursos de maquinagem envolvidos. Uma simulação das operações de maquinagem é apresentada na Figura 22.

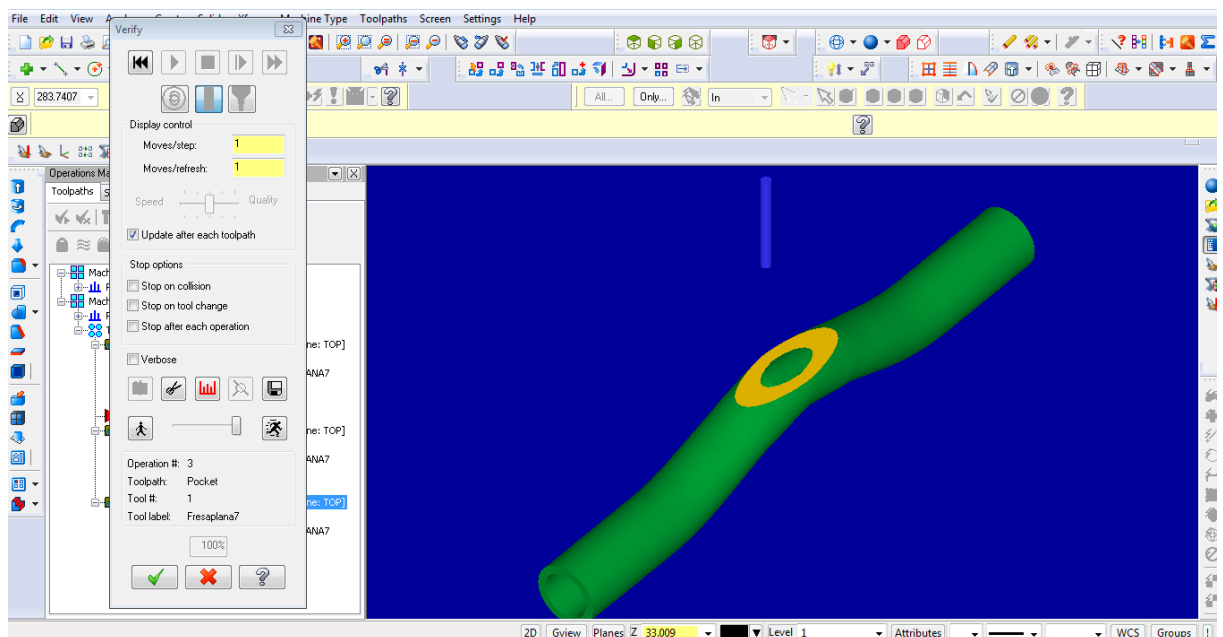


Figura 22 - Simulação do resultado das operações de maquinagem

3.4 - Ligação a 45°

Este caso implementa a união a 45° entre um tubo de secção não uniforme e um acessório em forma de "Tê" (Figura 24). O acessório com formato em Tê possui diâmetros internos de 32x32x25mm, e o tubo de secção não uniforme é idêntico ao do caso de estudo anterior, encontrando-se representado na Figura 17 e na Figura 18.

Nas Figuras 23 e 25 estão representadas as modelações das peças utilizadas para esta ligação.

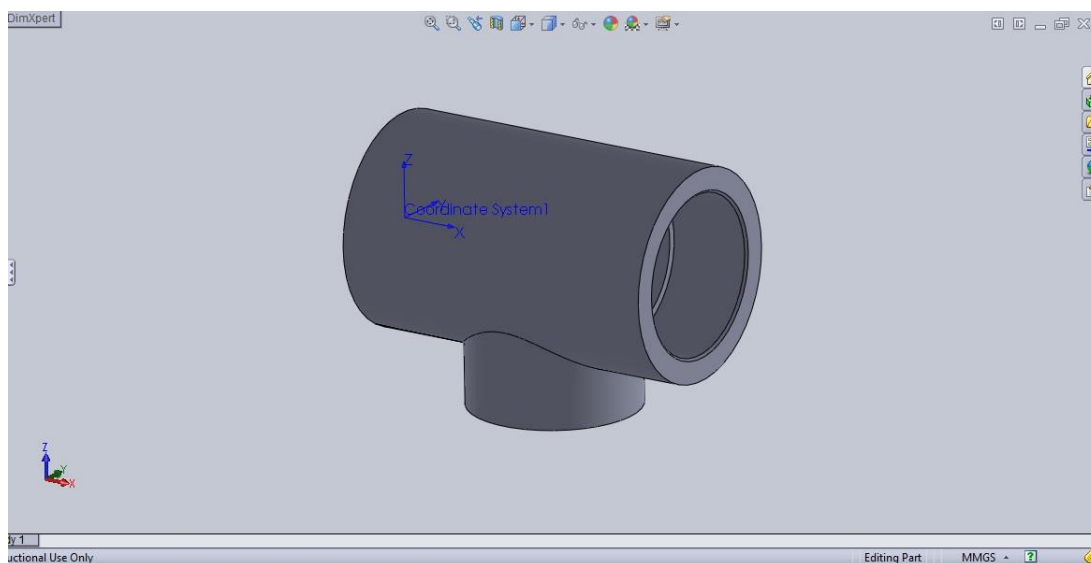


Figura 23 - Modelação em CAD do acessório em "Tê" (32x32x25mm)

A Figura 24 ilustra as medidas do acessório em "Tê" utilizado para esta ligação (todas as medidas estão em milímetros).

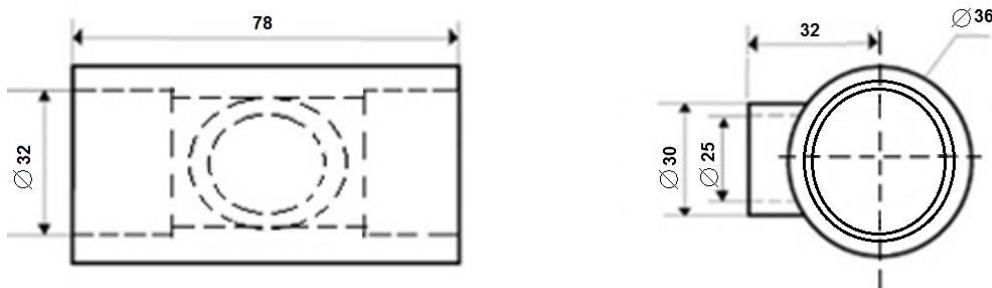


Figura 24 - Medidas do acessório em "Tê"

A Figura 25 representa a ligação a 45° entre o tubo e o acessório em "Tê"

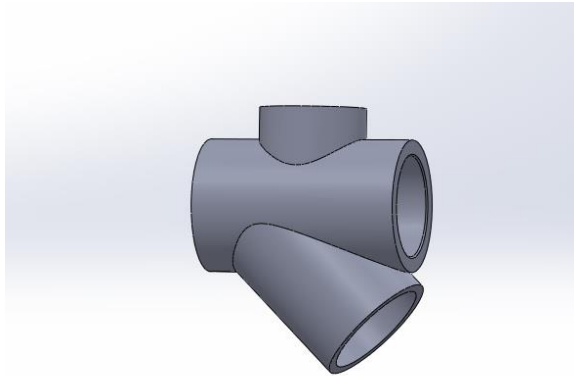
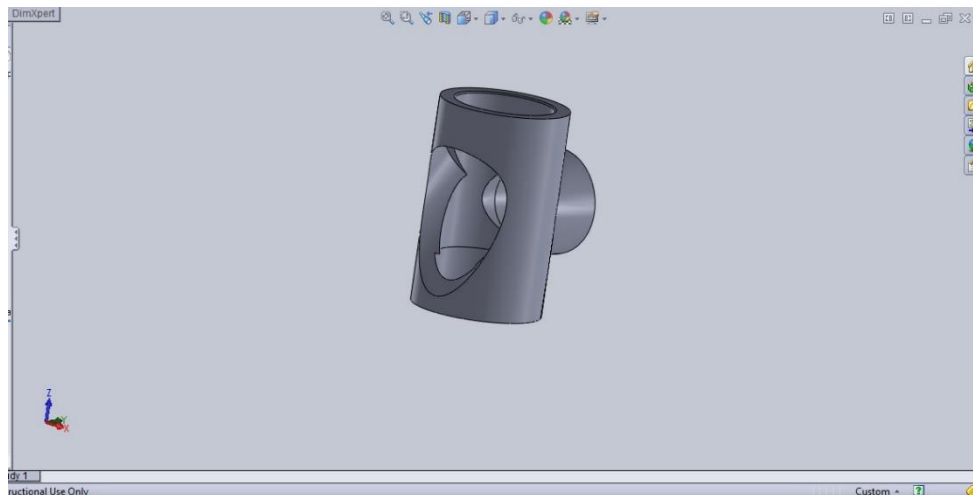


Figura 25 - Ligação a 45°

Enceta-se o processo através da modelação em *CAD* das peças que desejamos utilizar, sendo que nesta dissertação todas as peças foram modeladas em *SolidWorks*. No final de cada modelação é necessário confirmar se as peças se encontram na orientação desejada, pois a parte a maquinar deverá, nestes casos, ficar coincidente com o sentido positivo do eixo *ZZ*.

Para a ligação a 45°, é necessário que, da maquinagem, resulte uma geometria complexa na superfície do tubo que sirva para encaixe do tubo.

Existiam agora duas formas de prosseguir: a primeira seria transferir o Tê em bruto modelado em *CAD* para o *software CAM*, e aí modelar o rasgo. A segunda forma seria efetuar já o rasgo na peça em *software CAD*, e transferir depois esta modelação para o *software CAM*. Na Figura 26 está representado o rasgo modelado, para a referida conexão a 45°.

Figura 26 - Modelação do acessório em "Tê", em *CAD*, com orifício para encaixe a 45°

Para este caso, devido à geometria da ligação, foi mais simples desenhar o rasgo em *SolidWorks* e daí transferir o modelo para os programas de *CAM*.

Para maquinagem de superfícies complexas, tanto a peça inicial como a peça final foram modeladas em *CAD*, sendo depois a peça inicial (*stock*) gravada no formato *STL* e a peça final gravada no formato *IGES*.

Quando da maquinagem resultam peças com superfícies de geometria relativamente simples, como é o caso de furos circulares, pode optar-se por não modelar a peça final. Basta sim modelar a peça inicial e gravá-la tanto no formato *STL* como no formato *IGES*. Para o *stock*, a peça terá de ser gravada em *STL*, formato base para estes propósitos. Ao abrir a peça no *MasterCAM* é permitido escolher um sólido como *stock* e este formato é o único que pode ser utilizado para tal. A vantagem significativa é garantir que o *stock* está indubitavelmente na mesma posição espacial que a peça final. No entanto, este caminho é desaconselhado para geometrias complexas, pois não permite o reconhecimento de superfícies ou contornos e a referida vantagem de posicionamento que proporciona pode ser alcançada pelo conjunto *STL + IGES*. Aquando da gravação da peça em formato *STL*, é necessário ativar uma configuração para não alterar o referencial zero da peça, o que acontece por defeito na passagem do formato *SLDPRT* para o formato *STL*.

A Figura 27 contém a peça modelada com o rasgo, com o início da definição das estratégias de maquinagem em *MasterCAM*.

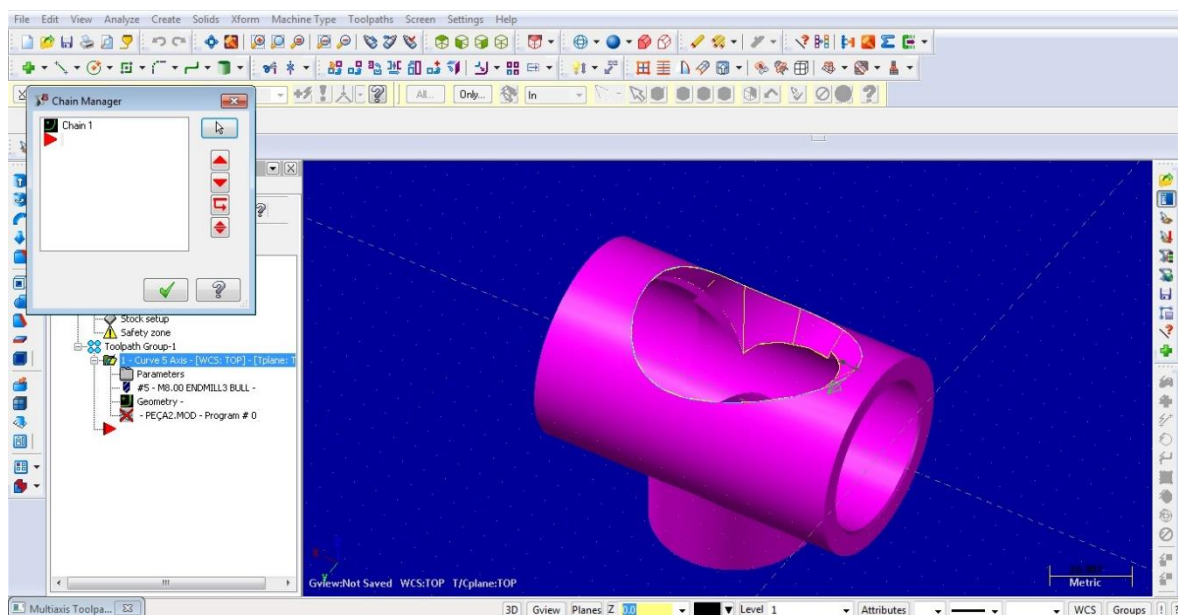


Figura 27 - Contornos da superfície de geometria complexa em ambiente *MasterCAM*

Uma estratégia diferente seria a de posicionar a peça com uma determinada inclinação que permitisse que a trajetória de maquinagem fosse circular (vista no plano XY). Esta alteração da posição seria impossível se a peça a maquinar fosse de grandes dimensões, e o que se quis demonstrar com este caso de estudo foi a versatilidade do robô e as funcionalidades dos *software* de programação *offline*.

O programa conseguiu definir os contornos inferior e superior do rasgo, mas apenas com as *splines* (linhas matematicamente definidas pelas arestas) representadas na Figura 28, não é possível maquinar a peça como desejado para levar à criação daquelas superfícies. Uma possível conclusão poderia ser que o *toolpath type* (tipo do caminho da ferramenta) adequado para este caso seria o *Multi-Axis Swarf*. Devido à complexidade das superfícies interiores resultantes do rasgo modelado, as quinas vivas não permitem que o *Swarf* considere facilmente o contorno inferior disponível para ser definida como *chain* (aresta). Tal pode ser ultrapassado, mas os passos são complexos e exigentes; o processo escolhido como mais direto foi utilizar o *Multi-Axis Curve*.

No *Multi-Axis Curve*, a curva selecionada foi o contorno superior do rasgo. Para orientação da ferramenta, foram criadas linhas entre os dois contornos. É necessário segmentar as *splines* para, que nos pontos de fragmentação, seja possível conectar as linhas. Conciliando as *chains* depois de segmentar as *splines*, foi permitido criar estas linhas que serviram como vetores de orientação para a ferramenta ao longo do *toolpath*. Na Figura 28 está representado como foi definida a orientação da ferramenta ao longo do processo de maquinagem.

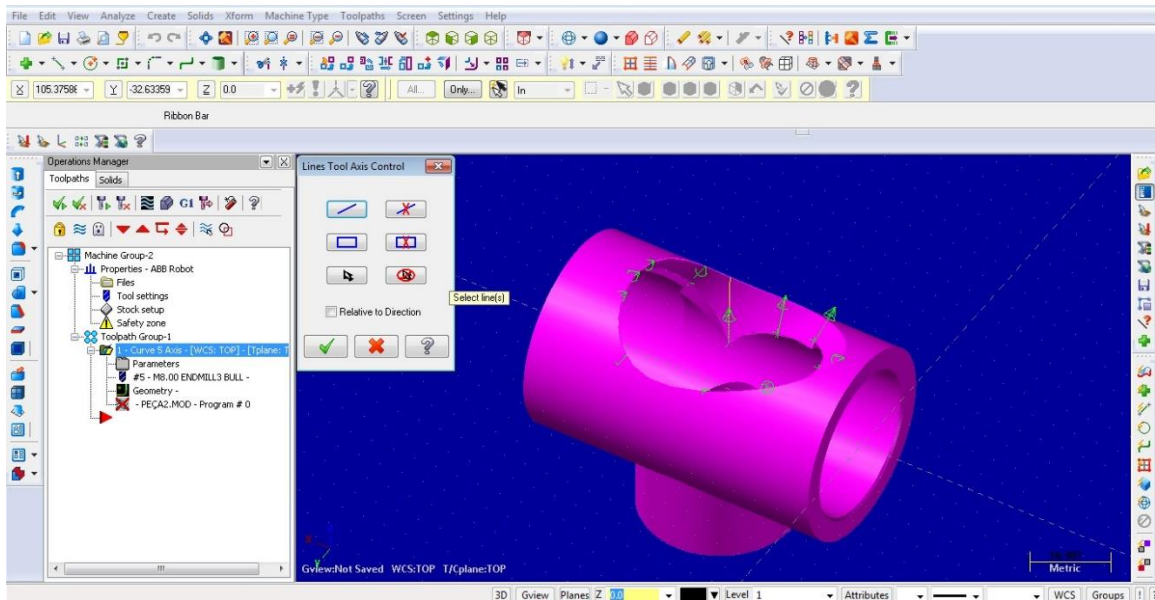


Figura 28 - *Tool Axis Control* através de linhas em concordância com as *splines*

A Figura 29 mostra como estas linhas indicam a direção e sentido que a ferramenta deve ter quando passa por cada segmento da *spline*. Quanto mais linhas forem criadas e selecionadas para o *Tool Axis Control*, mais perto a ferramenta estará da trajetória e inclinação adequada aquando da operação de maquinagem.

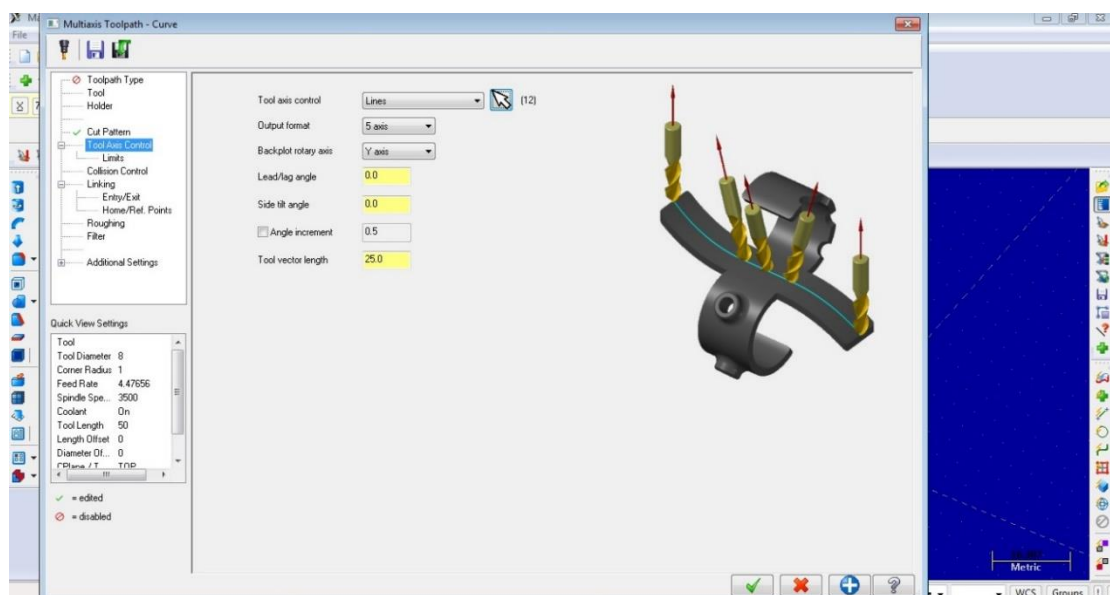


Figura 29 - Seleção das linhas criadas para orientação da ferramenta

Um *bug* de *software* encontrado, relacionado com esta orientação da ferramenta, reside no facto de o *RobotMaster* trocar algumas vezes o eixo YY com o eixo ZZ. Tal não aconteceu apenas neste caso, mas fica comprovado como é notório na Figura 29 onde o *Rotary Axis* a ser escolhido foi o YY, quando deveria ser o ZZ pois a superfície a maquinar encontrava-se devidamente orientada no plano XY. As Figuras 30 e 31 apresentam a simulação da qualidade das superfícies maquinadas.

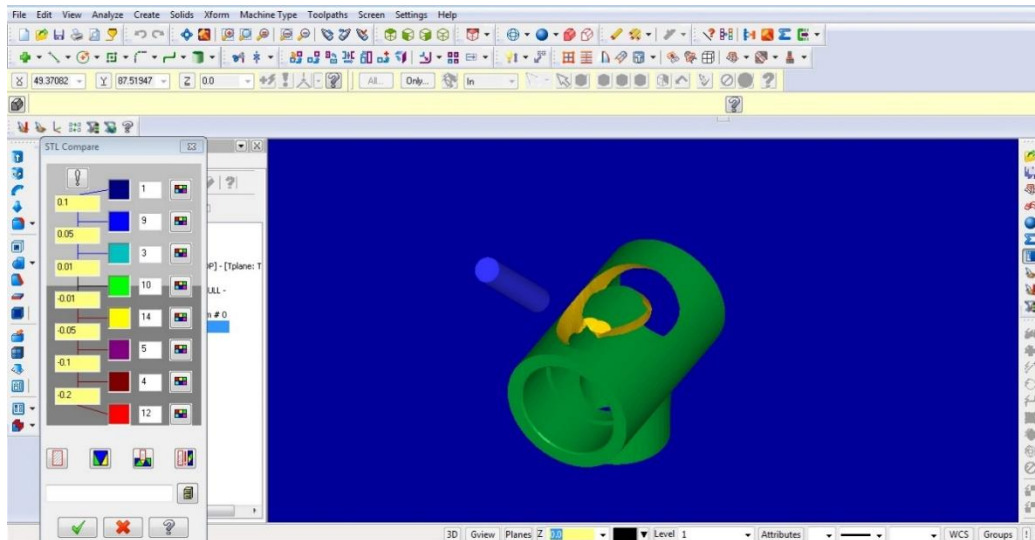


Figura 30 - Simulação da qualidade da maquinagem

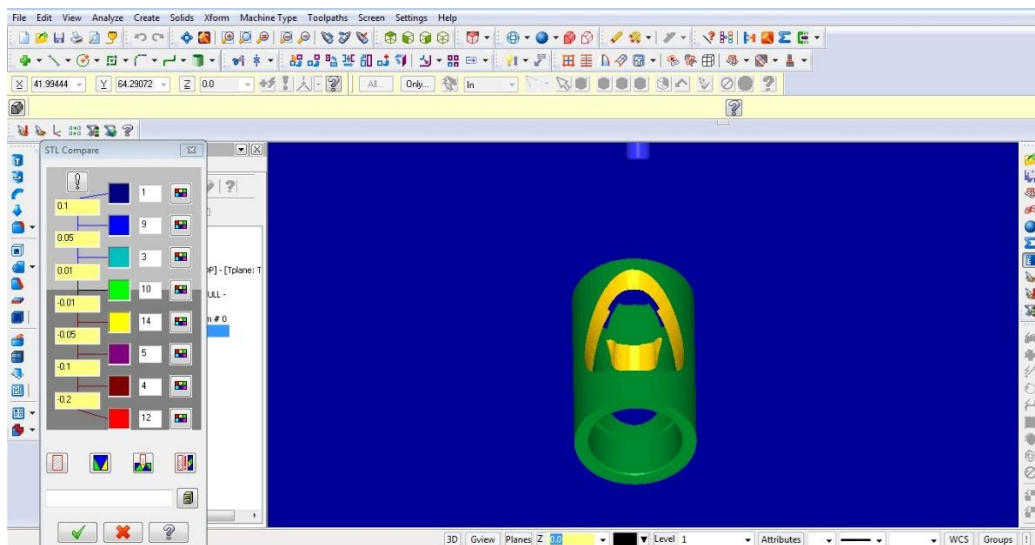


Figura 31 - Outra vista da simulação da qualidade de maquinagem

Como comprovado pelas Figuras 30 e 31, as operações definidas estão, à priori, a realizar o trabalho pretendido, pois não existe qualquer zona da superfície maquinada com desgaste em excesso ou em falta.

Quanto ao material deixado por maquinar no centro do rasgo, ele não perturbaria as operações de maquinagem pois era prevista a sua queda para o interior da superfície tubular do acessório em "Tê" assente na mesa.

4 - Validação e Implementação das Operações de Maquinagem

No presente capítulo são explicados os passos para, com recurso ao *software RobotStudio*, validar as operações de maquinagem geradas através do *software MasterCAM X5/RobotMaster*, assim como a sua implementação no controlador real e realização das operações de maquinagem

4.1 - Validação das Operações de Maquinagem

Nesta dissertação foi utilizada a modelação geométrica da célula robótica existente no DeMec. Esta modelação é essencial para que se consigam identificar problemas, tais como colisões ou trajetórias erradas, sendo o último passo da simulação.

Não existindo erros no código gerado em *MasterCAM/RobotMaster*, o sistema pode ser prontamente transferido para o controlador do robô. Porém, para partir para as operações de maquinagem com maior confiança, utilizou-se o *RobotStudio*, *software* de programação *offline* da *ABB*, a empresa fabricante do robô utilizado, para a simulação e validação final do código gerado. No *RobotStudio* é possível representar a célula robótica através de componentes idênticos aos reais, fornecidos pelo fabricante do robô. O *Spindle* existente no Laboratório de Robótica encontrava-se já modelado na biblioteca virtual do *RobotMaster* e do *RobotStudio*, não sendo assim necessário proceder à sua criação.

Um dos primeiros passos é criar o *layout* da célula e definir o controlador virtual, baseando-se na célula robótica real do DeMec, introduzindo cada componente a partir da biblioteca presente no *software*. É possível, através da biblioteca disponibilizada, escolher *layouts* já pré-definidos, ou o utilizador criar o seu *layout* personalizado, configurando parâmetros do controlador para que se adequem aos requisitos do que se está a desenvolver.

A mesa da *ABB*, o tampo de madeira, os grampos e o torno de bancada existentes permitiram apenas um leque limitado de pontos para fixar as peças a ser maquinadas, tendo sido, portanto, fundamental conjugar a disponibilidade do robô com as hipóteses reais de fixação das peças.

Célula Robótica Virtual

Através do *software MasterCAM X5/RobotMaster*, é possível simular os trajetos de maquinagem programados, já com a presença do robô e *Spindle* modelados. Não é, porém, possível simular com todos os componentes da célula robótica real (as suas modelações não se encontram disponíveis para este *software*), mas o código gerado em *MasterCAM/RobotMaster* já é passível de transferência para o controlador real. No entanto, para melhor verificação das operações de maquinagem, foi utilizado o *software* da *ABB* (*RobotStudio*) para validação das

simulações, introduzindo agora sim, todos os componentes de célula real do DEMec. É então no *software RobotStudio* que se encontra modelada a célula robótica. Os componentes a ter em conta na célula robótica são o robô, o tampo de madeira, a mesa e o *Spindle*. A configuração da célula robótica modelada está representada na Figura 32.

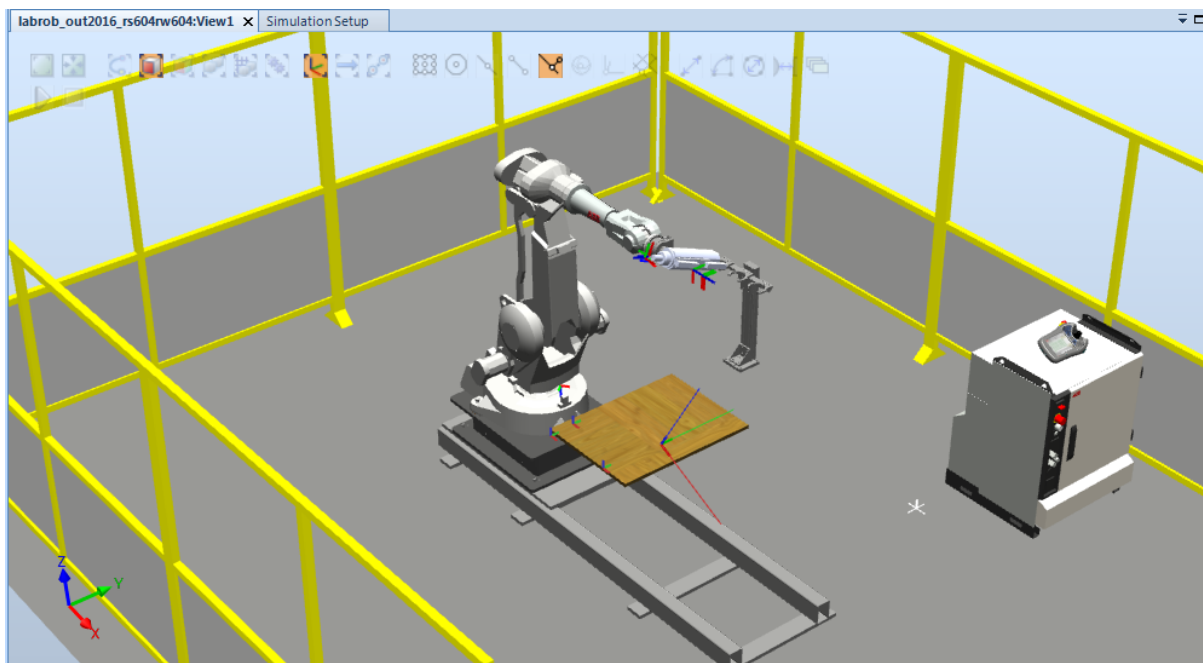


Figura 32 - Configuração da célula robótica

A junta 5 do robô esteve limitada a movimentos de $[-97^\circ ; +97^\circ]$, sendo que tal foi apenas conseguido restringir em *RobotStudio*, não tendo sido possível incorporar esta limitação no ambiente *MasterCAM/RobotMaster*. Esta limitação deveu-se à presença da flange de suporte do *Spindle*.

O *Spindle*, o sistema de troca de ferramentas e a célula de carga já se encontravam devidamente modelados, o que permitiu que os ficheiros fossem exportados em formato *STEP* para utilização em *RobotStudio*, e em formato *STL* para utilização em *MasterCAM/RobotMaster*. Todos os outros elementos da célula robótica já se encontravam disponíveis no *RobotStudio*, pois o fabricante *ABB* fornece estas modelações no seu *software*. De seguida, é apresentado o modelo virtual do conjunto terminal do robô (Figura 33).

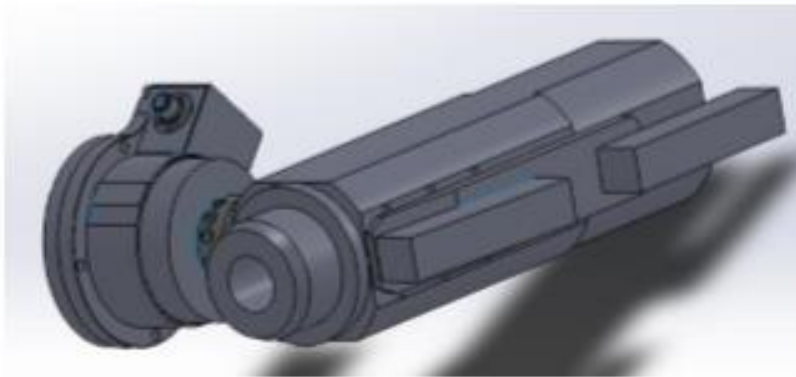


Figura 33 - Assembly do conjunto terminal do robô

A Figura 34 apresenta em ambiente *RobotStudio* o modelo da peça a maquinar, já colocada na posição e orientação desejadas.

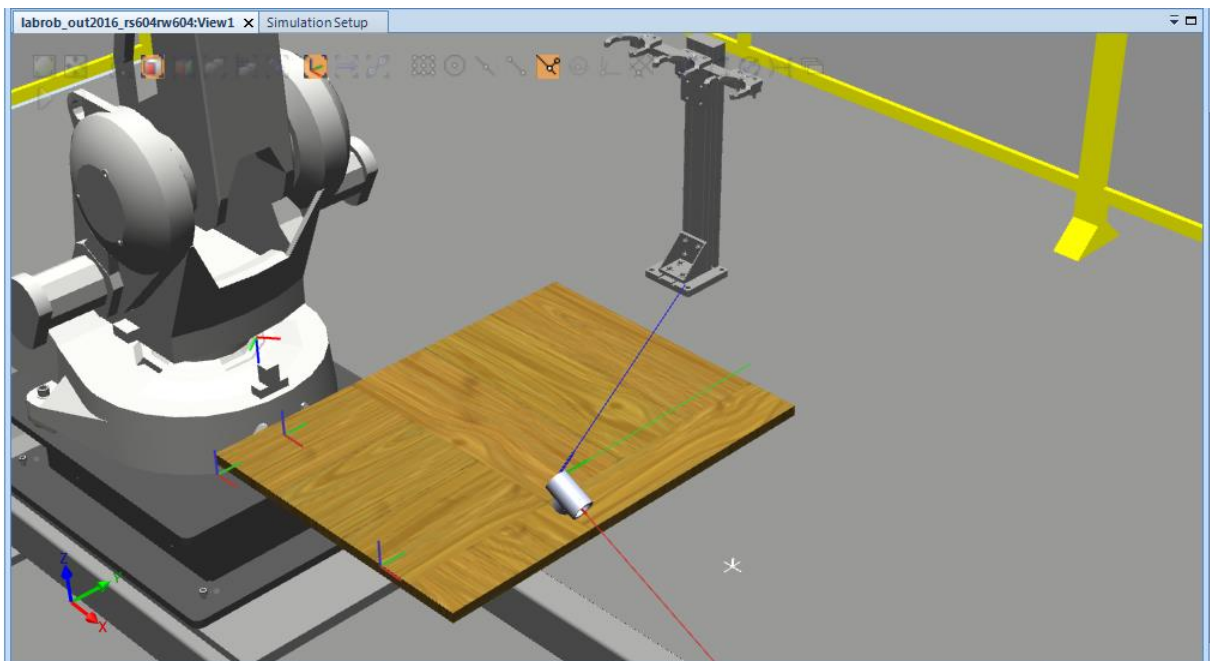


Figura 34 - Ficheiro CAD importado para *RobotStudio*

4.2 - Implementação das Operações de Maquinagem

Para a implementação das operações de maquinagem, foi necessário definir o *TCP* real da ferramenta (ponto em relação ao qual todo o posicionamento do robô é definido), definir o *Workobject* (coordenadas do objeto de trabalho) para cada peça posicionada e introduzir esses dados no *RobotStudio* para cada simulação efetuada. Caso o código não apresente erros e as simulações sejam validadas, o código RAPID é passível de transferência para o controlador real do robô, já com o *TCP* e o *Workobject* corretamente definidos.

4.2.1 - Célula Robótica Real

De seguida apresentam-se os componentes reais da célula robótica.

Robô ABB IRB 2400/16

Este robô *IRB 2400* possui excelente repetibilidade (0,06mm) e velocidade elevada, apresentando-se como um dos robôs mais utilizados globalmente.

Na célula do DEMec, o robô, ilustrado na Figura 35, encontra-se posicionado em cima de uma base para que o seu volume de trabalho na parte inferior seja melhor aproveitado.



Figura 35 - Robô Industrial ABB IRB 2400/16 [12]

A Figura 36 apresenta o alcance espacial de trabalho do robô.

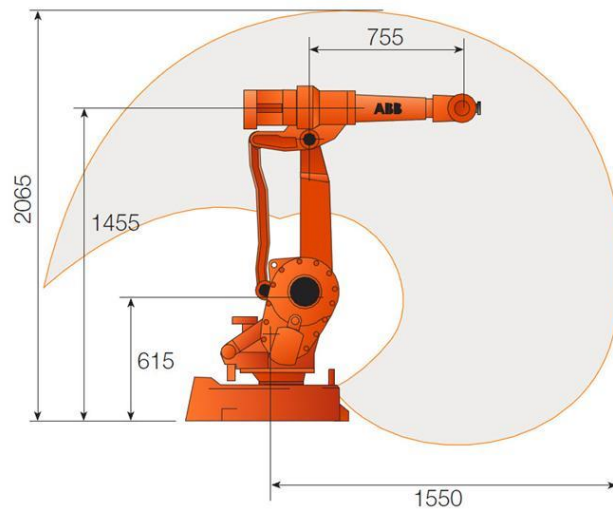


Figura 36 - Alcance do robô ABB IRB 2400/16 [22]

Spindle PDC XLC70

Este motor-árvore, comandado por um variador de velocidade (alimentado a corrente alternada) é indicado para operações de maquinagem a alta velocidade, sendo adequado para utilizações em plásticos, madeiras suaves, placas de partícula e espuma rígida.

A Figura 37 apresenta o *Spindle* montado na extremidade do robô e que foi utilizado nas operações de maquinagem.

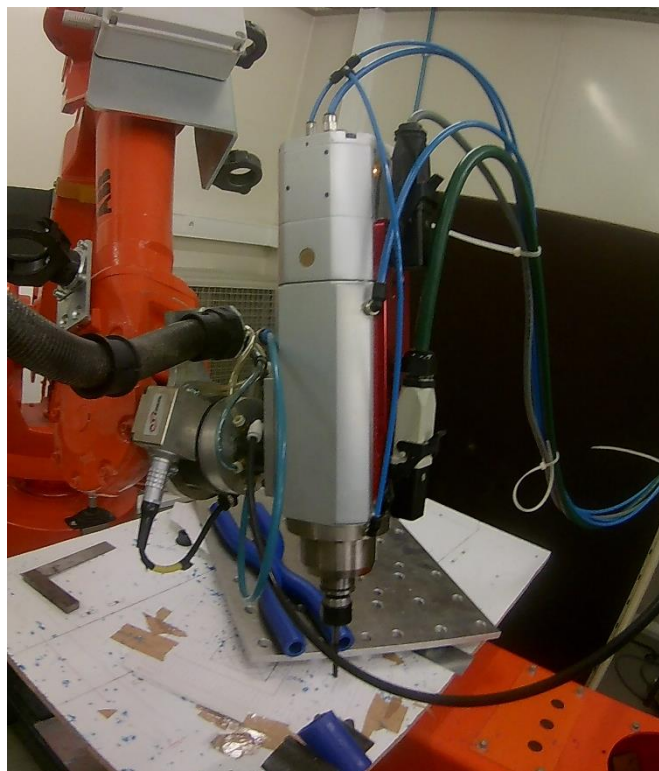


Figura 37 - *Spindle PDC XLC70*

Na Tabela 5 apresentam-se as características do *Spindle* utilizado.

Tabela 5 - Características do *Spindle PDC XLC70* [16]

Alimentação [V]	380
Potência [kW]	2.2
Número de pólos	2
Velocidade máxima [rpm] @ frequência [Hz]	40000 @ 667
Velocidade para o binário máximo [rpm] @ frequência [Hz]	24000 @ 400
Peso [kg]	10

4.2.2 - Calibração do *TCP*

O *TCP* (*Tool Center Point*) constitui a origem do referencial da ferramenta, o *Tool Coordinate System*, e é o ponto à volta do qual a orientação do conjunto terminal/ferramenta é definido, como mostrado na Figura 38.

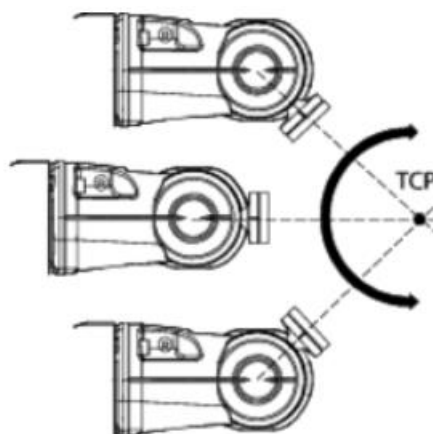


Figura 38 - Conceito de *TCP* [21]

Para a calibração do *TCP*, utilizou-se o método dos 6 pontos, que consiste em levar a ponta da ferramenta até um determinado ponto fixo no espaço, e posteriormente reorientar o robô para outras cinco configurações diferentes, mas sem alterar a posição espacial da ponta da ferramenta. Quantas mais e quanto mais diferentes forem estas configurações, melhor é a aproximação do *TCP* à realidade.

Para que o *TCP* fosse o mais preciso possível, a fresa plana de 6mm de diâmetro foi substituída por uma fresa de 1mm (Figura 39) para esta aferição, o que permitiu um acerto maior na posição da ponta da ferramenta.



Figura 39 - Fresa de 1mm de diâmetro

De seguida apresenta-se, na Tabela 6, as coordenadas do *TCP* (obtidas a partir do método dos 6 pontos) e a orientação do referencial da ferramenta utilizados.

Tabela 6 - Coordenadas (X,Y,Z) do *TCP* e orientação (Q1,Q2,Q3,Q4) do referencial da ferramenta

X	-76,7284
Y	-193,094
Z	171,502
Q1	0,585042
Q2	0,397147
Q3	-0,585042
Q4	0,397147

4.2.3 - Definição do *Workobject*

O *Workobject* é um sistema de coordenadas com propriedades específicas, criados para simplificar a programação do robô, servindo de referência à definição dos diversos "*robot targets*" usados nas definições das trajetórias.

Estabelecido o *TCP* e colocada a peça na posição desejada na célula real, é necessário definir o *Workobject (Wobj)*. Tal é realizado através da definição de três pontos inerentes à peça em questão. Dois desses pontos formam o eixo *XX*; o terceiro ponto definirá a orientação do eixo *YY*. A Figura 40 ilustra o princípio da definição do *Workobject*.

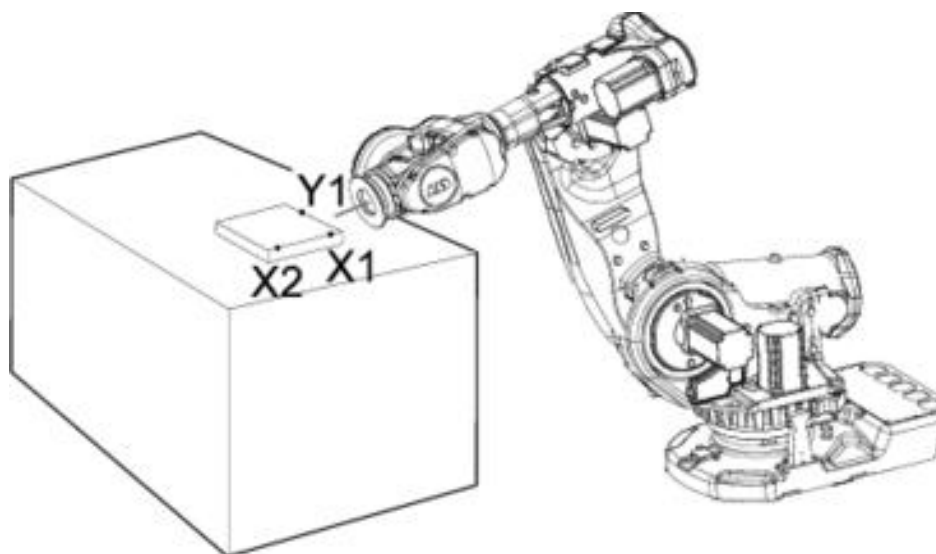


Figura 40 - Princípio da definição do *Workobject (Wobj)* [20]

Este processo da definição do *Workobject* foi realizado através da colocação do braço robótico num modo que permite a sua manipulação manualmente, isto é, o utilizador pode puxar/empurrar o conjunto terminal do robô até este alcançar a posição desejada. É necessário proceder à definição do *Workobject* cada vez que se altera a posição da peça a maquinar. Na Figura 41 é apresentado o início da definição do *Wobj* utilizado para um dos acessórios em "Tê".

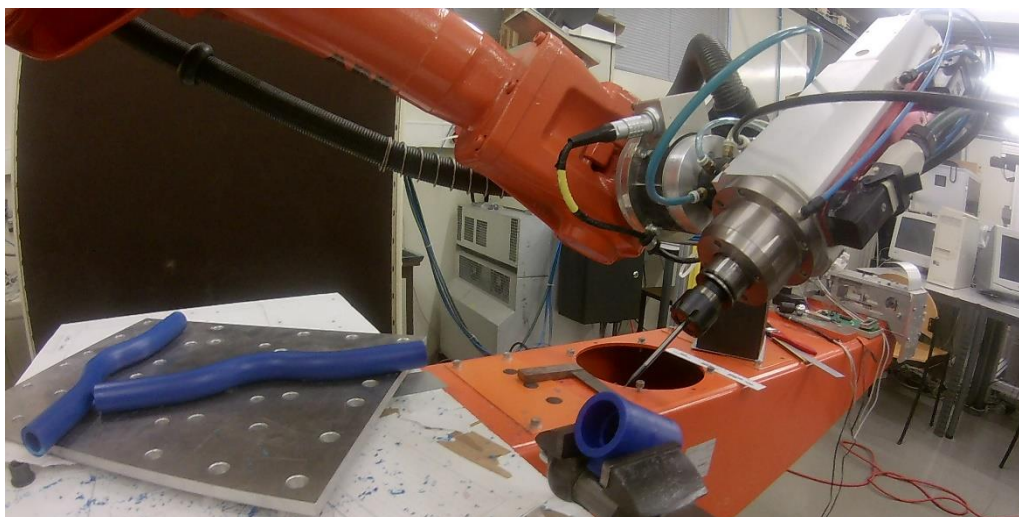
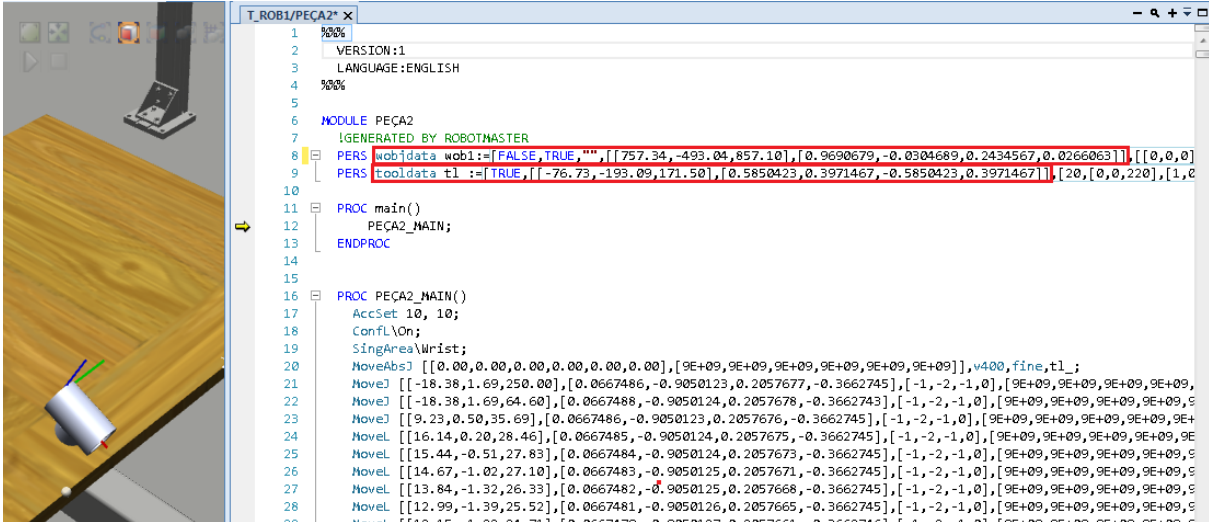


Figura 41 - Início da definição do *Workobject* numa das peças

Dado que a ferramenta utilizada foi a mesma para todos os casos abordados, o *TCP* é então igualmente comum a todos eles. Já o *Workobject* varia, devido às diferentes posições e orientações em que cada peça foi colocada.

Depois de definido o *Workobject* para cada peça, as suas coordenadas e orientações foram então introduzidas no *RobotStudio*, para validação final através de simulação em ambiente virtual. Validada a simulação, o código é então passível de transferência para o controlador real do robô.

A Figura 42 apresenta (em ambiente *RobotStudio*) um excerto de um dos códigos RAPID utilizados.



```

1  %%%
2  VERSION:1
3  LANGUAGE:ENGLISH
4  %%%
5
6  MODULE PECA2
7  !GENERATED BY ROBOTMASTER
8  PERS wobj1data wobj1:=["FALSE,TRUE","",[757.34,-493.04,857.10],[0.9690679,-0.0304689,0.2434567,0.02660631]],[[0,0,0]
9  PERS tooldata t1 :=["TRUE",[[-76.73,-193.09,171.50],[0.5850423,0.3971467,-0.5850423,0.3971467]],[20,[0,0,220],[1,0
10
11 PROC main()
12   PECA2_MAIN;
13 ENDPROC
14
15
16 PROC PECA2_MAIN()
17   AccSet 10, 10;
18   Confl\On;
19   SingArea\Wrist;
20   MoveAbsJ [[0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v400,fine,t1;
21   MoveJ [[-18.38,1.69,250.00],[0.0667486,-0.9050123,0.2057677,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
22   MoveJ [[-18.38,1.69,64.60],[0.0667488,-0.9050124,0.2057678,-0.3662743],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
23   MoveJ [[9.23,0.50,35.69],[0.0667486,-0.9050123,0.2057676,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
24   MoveL [[16.14,0.20,28.46],[0.0667485,-0.9050124,0.2057675,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
25   MoveL [[15.44,-0.51,27.83],[0.0667484,-0.9050124,0.2057673,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
26   MoveL [[14.67,-1.02,27.10],[0.0667483,-0.9050125,0.2057671,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
27   MoveL [[13.84,-1.32,26.33],[0.0667482,-0.9050125,0.2057668,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
28   MoveL [[12.99,-1.39,25.52],[0.0667481,-0.9050126,0.2057665,-0.3662745],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S
29   MoveL [[12.15,-1.39,24.71],[0.0667479,-0.9050127,0.2057661,-0.3662743],[-1,-2,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09],S

```

Figura 42 - Excerto do código RAPID com coordenadas do TCP e do Wobj reais para o caso 3

5 - Análise de Resultados

Sendo o objetivo desta dissertação o planeamento e implementação de operações de maquinagem em tubos por robô industrial, neste capítulo são apresentados os resultados das operações de maquinagem realizadas e comparações entre as peças maquinadas e as geometrias idealizadas.

5.1 - Ligação a 90°

Este caso apresentou, em relação aos outros dois casos de estudo, uma maior facilidade no desenrolamento do planeamento e realização das operações de maquinagem. Com a ligação a ser de 90°, era expectável que as superfícies maquinadas apresentassem uma rugosidade diminuta.

A peça foi fixada no torno, como mostrado na Figura 43, com a superfície a ser maquinada orientada positivamente no eixo dos ZZ, facilitando assim as operações de maquinagem.



Figura 43 - Posicionamento e orientação da peça para o caso 1

A Figura 44 ilustra a simulação da qualidade de maquinagem para o caso 1.

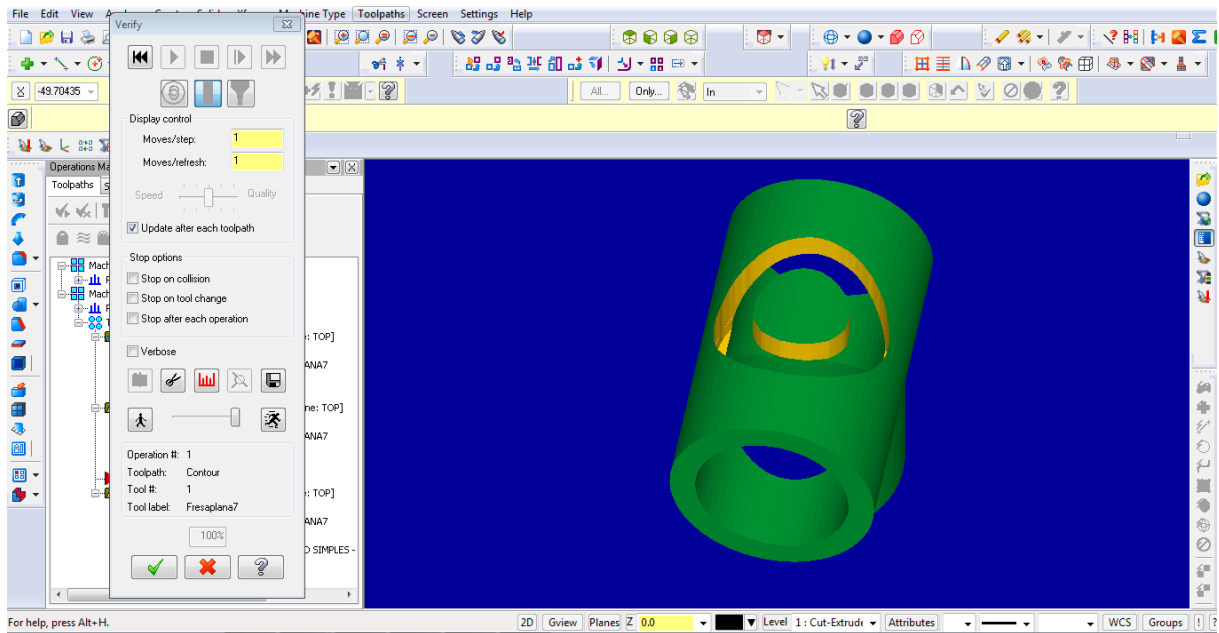


Figura 44 - Resultado das operações de maquinagem na simulação do caso 1, em *MasterCAM X5*

É possível verificar na Figura 45 que a qualidade de acabamento das superfícies maquinadas na peça do caso 1 foi elevada.



Figura 45 - Tê para ligação a 90°

Neste caso de maquinagem, ocorreu um pequeno desvio na centragem do furo devido a imprecisão na definição do *Workobject*, originando um desvio linear em YY e um desvio na rotação em XX, o que resultou num furo ligeiramente ao lado do pretendido. Este desvio não afetou as dimensões do furo, a presença do degrau interior nem a qualidade da maquinagem. A Figura 46 ilustra o desvio referido.

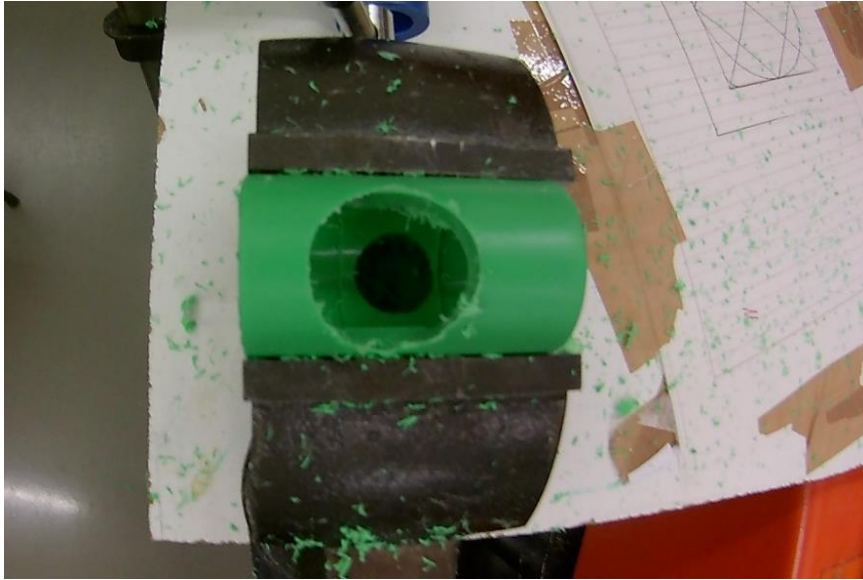


Figura 46 - Desvio de localização e desvio angular do furo no caso 1

De seguida, as Figuras 47 e 48 apresentam diferentes vistas da ligação tubo-Tê.



Figura 47 - Ligação tubo-Tê



Figura 48 – Outra perspectiva da ligação

5.2 - Ligação entre Tubos de Secção não Uniforme

No caso da interligação entre tubos de secção não-uniforme, e como já descrito anteriormente, optou-se por realizar três operações distintas de maquinagem (*Pocket*), cada uma com diferentes parametrizações de profundidade e diâmetro das trajetórias, para uma estratégia de maquinagem mais célere e eficaz.

Com a sobre maquinagem na aresta exterior, garantiu-se planeza em toda a superfície, característica fundamental para a ligação pretendida. Com a impossibilidade de fixação apropriada no torno, optou-se pelo recurso a grampos de fixação, sendo assim possível assegurar o correto posicionamento e imobilização da peça durante o período de maquinagem.

A Figura 49 apresenta a fixação do tubo na célula real, e as Figuras 50 e 51 mostram, respetivamente, a qualidade das operações de maquinagem na simulação e na célula robótica real.



Figura 49 - Fixação do tubo com recurso a grampos

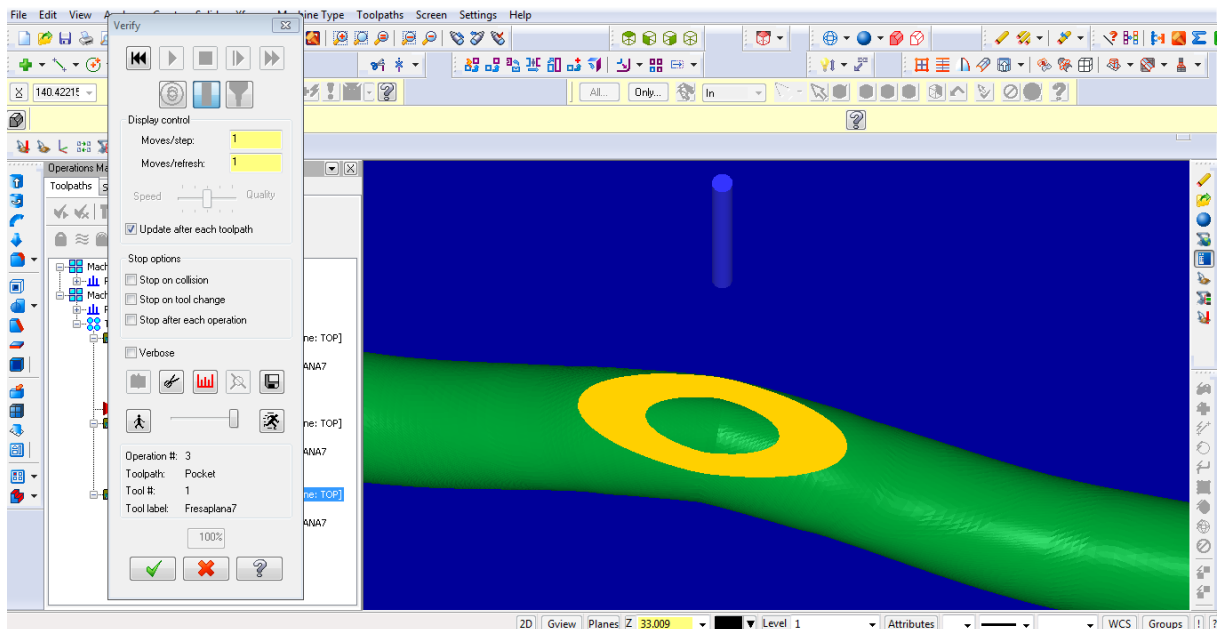


Figura 50 - Resultado das operações de maquinagem na simulação do caso 2, em *MasterCAM X5*

Na Figura 51, é possível ver os relevos resultantes das trajetórias da ferramenta na estratégia de maquinagem utilizada, indicador que o acabamento superficial poderia ainda ter sido melhorado, por exemplo através do decréscimo do *stepover*, mas tal implicaria um significativo gasto de tempo e não traria grandes melhorias na ligação entre os dois tubos. As vibrações

presentes no tempo aquando das operações de maquinagem também contribuíram preponderantemente para uma maior rugosidade indesejada.



Figura 51 - Resultado das operações de maquinagem do caso 2, na célula robótica real

As diferenças da superfície de ligação, entre o apresentado na simulação em *MasterCAM X5/RobotMaster* e a superfície obtida na célula robótica real, resultam da diferença entre a peça real e a sua modelação realizada em *CAD*

Devido à superfície irregular do tubo (elipsoidal variável), a modelação foi realizada com base em aproximações das medidas exteriores da peça. Havendo a impossibilidade de obter as dimensões exatas ao longo de toda a peça, naturalmente surgiram este tipo de diferenças que, apesar de não interferirem na qualidade da maquinagem, proporcionam uma superfície de ligação com geometria diferente daquela prevista nas simulações. Como as referidas diferenças são idênticas em ambas as peças, o resultado foi satisfatório.

Quanto à ligação entre os tubos, o resultado é apresentado nas Figuras 52 e 53.



Figura 52 - Ligação entre os tubos



Figura 53 – Outra perspectiva da ligação entre os tubos

5.3 - Ligação a 45°

Neste caso apenas eram expectáveis e desejadas superfícies resultantes de natureza curva, o que afeta a qualidade de acabamento das superfícies devido à constante reorientação necessária da ferramenta. As superfícies resultantes da operação de maquinagem apresentaram algumas irregularidades, tal como previsto na simulação em *MasterCAM X5*.

A peça foi fixada no torno e surgiu a necessidade da sua colocação com uma ligeira inclinação através de rotação no eixo XX, pois estando a peça na posição horizontal, o robô não conseguia alcançar as configurações necessárias para maquinar a peça da forma desejada. O posicionamento da peça é apresentado na Figura 54.



Figura 54 - Posicionamento e orientação da peça para o caso 3

A Figura 55 apresenta os resultados da simulação das operações de maquinagem para o caso 3.

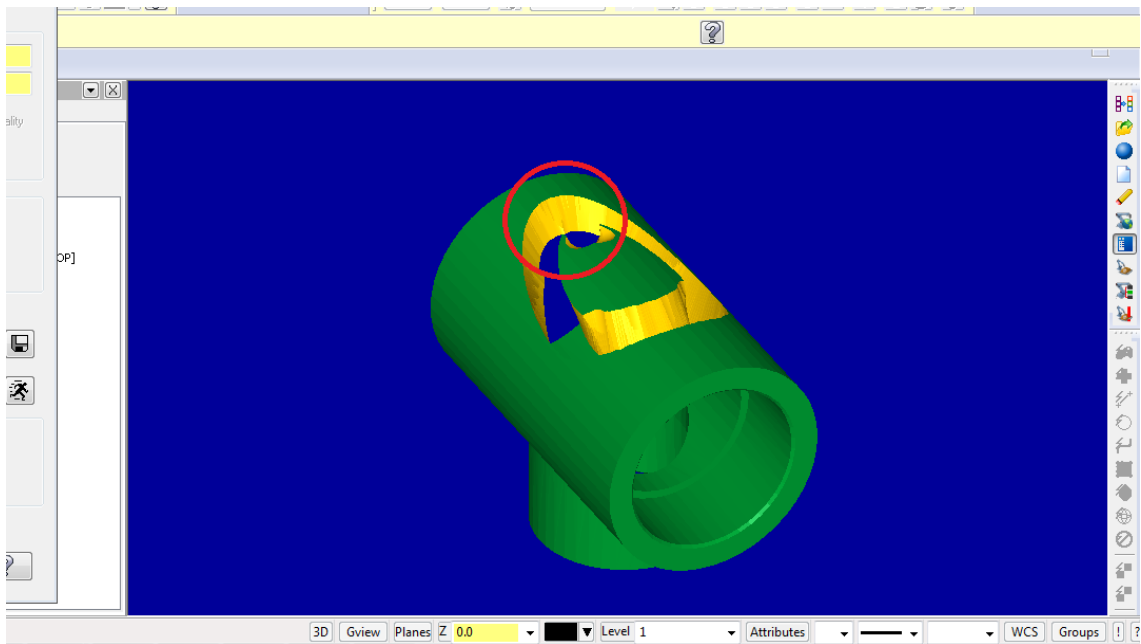


Figura 55 - Resultados superficiais na simulação do caso 3, em *MasterCAM X5*

A Figura 56 mostra o resultado da operação de maquinagem realizada para a ligação a 45°.



Figura 56 - Tê para ligação a 45°

Como é visível na Figura 56, existiu uma sobra de material na superfície mais distante à do início da maquinagem (aresta mais próxima na fotografia) pois, como a ferramenta penetra com um ângulo de 45°, não alcança a parte superior desta aresta. Estas pequenas saliências derivam também da tenacidade elevada do material, o Polipropileno Reticulado, que acaba por deformar ao invés de partir e libertar a aparas. Seria possível aumentar ligeiramente a qualidade da maquinagem, por exemplo com a diminuição do *stepover*, o que resultaria, no entanto, num aumento significativo do tempo de maquinagem. A Figura 57 apresenta a vista lateral da ligação a 45°.

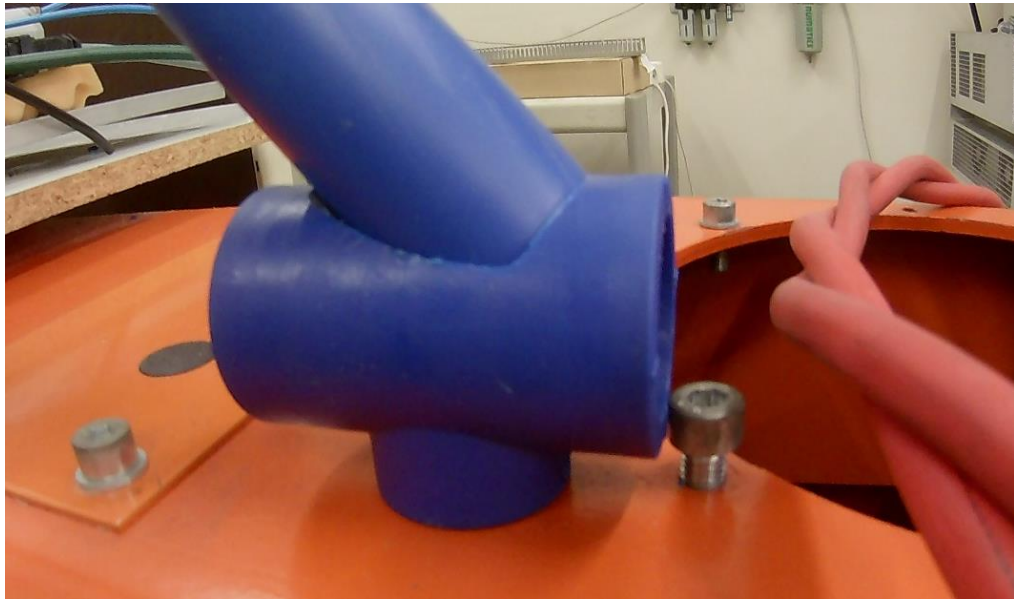


Figura 57 - Ligação a 45°

A Figura 58 apresenta uma vista diferente da ligação.



Figura 58 - Outra perspectiva da ligação

6 - Conclusões

Relativamente a aplicações de maquinagem industrial, as limitações dos robôs ao nível da rigidez estrutural, da repetibilidade, da exatidão e das ferramentas de programação disponíveis, traduzem-se numa utilização industrial ainda pouco significativa. No entanto, a sua flexibilidade, custo inferior e a evolução na programação através da adaptação das ferramentas *CAD/CAM* utilizadas em máquinas CNC, permite, hoje em dia, olhar para a robótica como uma alternativa no setor da maquinagem. Prova disso, é o facto de, no mercado atual, já serem produzidos e comercializados robôs específicos para aplicações de maquinagem, existindo um crescimento sustentado nos últimos anos.

A programação de robôs para este tipo de operações parte de um modelo *CAD* da peça a maquinar, na qual são definidas as trajetórias e as operações de maquinagem pretendidas. Estas são, depois, pós-processadas para a linguagem específica do robô a utilizar, simuladas e validadas. É possível que as aplicações de conversão e pós-processamento estejam integradas nos *software CAM*, ou serem *software* inteiramente independentes. Nesta dissertação utilizou-se o *software* de *CAD SolidWorks 2012* e *2016*, o *software* de programação e simulação *MasterCAM X5/Robotmaster*, e o *software* de programação e simulação do fabricante do robô, *RobotStudio v6.03.02*.

Os ensaios realizados com controlo de velocidade e posição demonstraram que a programação *offline* é capaz de oferecer um programa muito próximo do pretendido. A utilização deste método de programação permite a geração de trajetórias com base no modelo virtual da peça. Em ambiente industrial, a criação do programa é efetuada celeremente, afastando a necessidade de paragem de produção na célula robotizada. No entanto, quando se trabalha com uma peça de geometria de elevada complexidade, a dificuldade do processo de modelação e programação das operações de maquinagem aumenta significativamente, com especial destaque para as configurações do robô, nas simulações.

Através da comparação entre as diferentes opções de maquinagem, foi possível tirar partido das vantagens que as ferramentas de programação ofereceram.

Os três ensaios realizados comprovaram uma concordância elevada entre as simulações e o ambiente real da célula robótica, sendo preponderante o facto de o *software* possuir um controlador virtual incorporado. Contudo, existiu a necessidade de especial atenção na definição da localização das peças e de assegurar que o referencial de trabalho definido na simulação, o *Workobject*, seja redefinido na estação de trabalho de forma correta e expedita.

Dado que este tipo de solução constitui algo de relativa inovação no setor industrial, a dissertação foi desenvolvida no sentido de validar os métodos propostos para uma hipotética implementação da solução numa linha de produção.

Estudando os resultados das operações de maquinagem realizadas, é possível tirar algumas conclusões. Em primeiro lugar, é posta em evidência a versatilidade deste tipo de soluções, pois, com as limitações de fresas e suportes de fixação existentes no DEMec, foi possível criar operações de carácter bastante distinto.

Em segundo lugar, a complexidade da peça influencia em grande parte do cômputo geral, o tempo despendido. Peças com geometrias simples resultantes das operações de maquinagem são rapidamente executáveis e os seus programas tendem a seguir essa consistência, enquanto que peças com geometrias complexas resultantes das operações de maquinagem requerem mais tempo de planeamento das operações de maquinagem, pois é necessário ter em conta mais detalhes.

Em terceiro lugar, a qualidade do acabamento superficial está diretamente relacionada com a velocidade de avanço da ferramenta, e, quanto maior for este parâmetro, pior será a qualidade do acabamento. Com o tempo de fixação utilizado, a velocidades superiores existiu, para o caso 3, uma maior flexão do suporte e vibrações indesejadas, e, como tal, uma variação entre a trajetória percorrida e aquela programada. Pelo lado inverso, se a velocidade de avanço fosse demasiado baixa, seriam atingidas temperaturas elevadas na superfície de corte, o que levaria o PPR a derreter. No entanto, a qualidade do acabamento segue as variações da velocidade de rotação da ferramenta. Sendo necessário manter o *FPT* (*Feed per tooth*) num intervalo apertado de valores, não é aconselhável aumentar significativamente a velocidade de rotação sem diminuir a velocidade de avanço, ou vice-versa (as variações destes parâmetros devem, portanto, serem inversas). Esta análise das velocidades envolvidas foi fulcral para a definição correta dos parâmetros de corte.

O caso 1 (ligação a 90°), ilustra uma dificuldade que poderá estar presente sempre que se altera o *stock* ou a posição inicial do *stock*, que é a concordância entre a posição real da peça e a sua posição/orientação (*Workobject*) introduzida no código de programação das operações. Havendo discrepâncias, o resultado das operações poderá ser grave para o que seria desejado, algo que felizmente não aconteceu no caso 2 pois, apesar do furo maquinado ter sido ligeiramente ao lado do pretendido, a ligação continuou a ser possível e com a mesma qualidade de conexão.

No caso 2, da ligação entre dois tubos, é de fácil conclusão as diferenças, ainda que mínimas, das duas superfícies de ligação, mantendo os parâmetros de corte e sendo as peças teoricamente iguais. Tal prende-se com a repetibilidade do robô, com as vibrações presentes durante as operações de maquinagem dependentes da fixação da peça, e com as diferenças de posicionamento/orientação em cada operação.

Além da variação na velocidade de avanço, foi notória a diferença de qualidade de acabamento entre os casos 1 e 2, e o caso 3. No caso 3, a ferramenta era obrigada a constantes reorientações no *toolpath*, reorientações essas que causaram sulcos superficiais em algumas zonas da superfície maquinada. Ora, mantendo os parâmetros de corte, quanto mais complexa for a superfície a maquinar, pior será o acabamento superficial.

Referências

- [1] International Federation of Robotics, 2014, *Industrial robots market still growing rapidly* - <http://www.expo21xx.com/news/ifr-report-industrial-robots-market/>
- [2] Reinl C, Friedmann M, Bauer J, Pischon M, Abele E and Von Stryk O, 2011, *Model-based off-line compensation of path deviation for industrial robots in milling applications*, *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, AIM 367–72
- [3] Owen-Hill, Alex, 2016, *What Are the Different Programming Methods for Robots?* - <http://blog.robotiq.com/what-are-the-different-programming-methods-for-robots>
- [4] Rehling, S., 2009, *Technologische Erweiterung der Simulation von NC-Fertigungsprozessen*, (Univ. Hann).
- [5] Gizelis Robotics, *Robots change the industrial future replacing the CNC machines* - <http://www.cometproject.eu/publications/gizelis-robots-replace-cnc-machines.pdf>
- [6] Rodrigues, N. F., 2011, *Célula Robótica Industrial: aplicação de ferramentas CAD / CAM na programação de robôs* (U. Porto)
- [7] Angelino, D. F. C., 2012, *Conceção e simulação de uma célula robótica para operações de acabamento de guitarras feitas em materiais compósitos*, (U. Porto)
- [8] International Federation of Robotics, 2005, *World Robotics 2005*, (United Nations Publications)
- [9] Dreamstime, 2017, Dreamstime - <https://www.dreamstime.com/stock-photo-man-cutting-pipe-grinder-workshop-worker-background-image62783125>
- [10] Carvalho, A. L. G. de O. F., 2013, *Utilização de sistemas de CAM para programação de máquinas-ferramenta*, (U. Porto)
- [11] Tschätsch, H., 2010, *Applied machining technology*, (Springer International Publishing AG)
- [12] Figueiredo I. B., *Percursos de Maquinagem Realizados com Robôs*, (U. Porto)
- [13] Smid. P., 2007, *CNC programming handbook*, (Industrial Press Inc.)
- [14] Industrial Machinery Sales, 2017, *Industrial Machines* - www.industrialmachinerysales.net
- [15] Metal Working F &, 2016, *How to Increase Robotic Laser Cutting Path Accuracy* - <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/11/how-to-increase-robotic-laser-cutting-path-accuracy/2/>
- [16] Martins, R. S. and Afonso P., 2010, *Concepção de um Sistema Robótico para Prototipagem Rápida por Maquinagem*, (U. Porto)
- [17] Stautner, M., 2006, *Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung*, (TU Dortmund)
- [18] Kaddeche M, Chaoui K and Yallese M A, 2012, *Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins*, *Mech. Ind.* 13 307–16
- [19] Machinability Data Center, 1980, *Machining Data Handbook*

- [20] ABB, *Defining the work object coordinate system* -
<http://developercenter.robotstudio.com/BlobProxy/manuals/IRC5FlexPendantOpManual/doc105.html>
- [21] ABB, *What is the tool center point?* -
<http://developercenter.robotstudio.com/BlobProxy/manuals/IRC5FlexPendantOpManual/doc208.html>
- [22] ABB, *Technical data for the IRB 2400 industrial robot* -
<http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-2400/irb-2400-data>