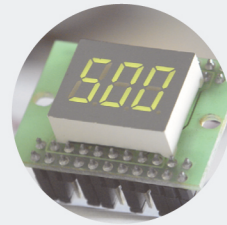


**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

**isep**



# PROGRAMAÇÃO DE ROBÔS PARA REALIZAÇÃO DE TAREFAS DE MAQUINAÇÃO

**PEDRO MIGUEL FERNANDES ALMEIDA**

novembro de 2016

# PROGRAMAÇÃO DE ROBÔS PARA REALIZAÇÃO DE TAREFAS DE MAQUINAGEM

Pedro Miguel Fernandes Almeida



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2016**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Pedro Miguel Fernandes Almeida, Nº 1100366, 1100366@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Fernando José Ferreira, fjf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2016**



*Aos meus pais*



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer principalmente aos meus pais, à minha irmã, à minha avó e ao meu avô por todo o apoio e incentivo dado ao longo deste percurso académico, apoio muito importante para esta etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Manuel Fernando dos Santos Silva pela disponibilidade rápida e constante e pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sem a qual não conseguiria chegar aonde cheguei.

Agradeço também ao Professor Doutor Fernando José Ferreira por todo o apoio e ajuda na elaboração do suporte da ferramenta e pelo conhecimento partilhado sobre tarefas de maquinagem.

Um agradecimento aos Laboratórios de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica pelo fabrico do suporte da ferramenta necessário para o robô, sem o qual a realização deste trabalho não teria sido possível.

Desejo agradecer, de uma forma especial, à Melany pela companhia e pelo incentivo ao longo da realização da Tese, aos meus amigos pela companhia e pelos bons momentos passados ao longo destes anos enquanto estudante universitário.

Por último, realçar que este trabalho foi apoiado no âmbito do Projeto “NORTE-01-0145-FEDER-000020”, financiado pelo Programa Operacional da Região Norte de Portugal (NORTE 2020), sob o acordo de parceria PORTUGAL 2020, e através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



## *Resumo*

Nesta dissertação é analisado o uso de robôs industriais, e a sua programação, em tarefas de maquinagem. Inicialmente são abordados conteúdos sobre robôs industriais, tarefas de maquinagem e programas *Computer Aided Manufacturing*. O objetivo principal deste projeto é compreender de que forma os robôs podem ser utilizados nestas tarefas, e como deve ser realizada a sua programação, utilizando na prática um robô para maquinar peças de esferovite. As soluções utilizadas a nível de *software* foram o Autodesk Inventor Professional 2014, para modelação 3D das peças, e os programas SprutCAM 10 e o ABB RobotStudio, juntamente com o Machining PowerPac, para a programação do robô ABB IRB140. A ferramenta utilizada na extremidade do robô foi a DREMEL 3000.

A utilização de diferentes programas permite uma comparação sobre qual o mais adequado para a programação do robô para tarefas de maquinagem, sendo comparados o tempo de maquinagem e a qualidade final da peça, avaliada após maquinagem pelo robô.

Com a realização deste projeto nas condições existentes, aprendeu-se a programar robôs para este tipo de tarefas, utilizando diferentes programas, concluindo-se que já existem algumas soluções CAM para robôs disponíveis no mercado e que estas, face à evolução tecnológica, continuam a melhorar. Assim, e havendo uma maior oferta, prevê-se que os robôs efetuem tarefas de maquinagem de forma mais recorrente.

### *Palavras-Chave*

Maquinagem, Robôs industriais, CAD, CAM, Autodesk Inventor, SprutCAM, RobotStudio, Machining PowerPac.



## *Abstract*

This dissertation analyses the use of industrial robots, and its programming, in machining tasks. Initially are discussed contents on industrial robots, machining tasks and computer aided manufacturing software. The main goal of this project is to understand how robots can be used for these tasks, and how its programming should be performed, using a real robot to machine styrofoam pieces. The solutions used in terms of software were Autodesk Inventor Professional 2014, for 3D modelling of the parts to machine, SprutCAM 10 and ABB RobotStudio, together with Machining PowerPac, for programming the ABB IRB140 robot. The tool used by the robot was a DREMEL 3000.

Building upon different software applications, allows identifying the most suitable for programming the robot for machining tasks, while being compared the machining time and the final quality of the part, evaluated after being machined by the robot.

With the accomplishment of this project under the existing conditions, it was learned to program robots for such tasks, using different software applications, concluding that there are already some CAM solutions for robots available in the market and that these, in face of the technological developments, will continue to improve. Thus, and having a greater offer of CAM solutions, it's expected that robots will perform machining tasks more recurrently.

### ***Keywords***

Machining, Industrial robots, CAD, CAM, Autodesk Inventor, SprutCAM, RobotStudio, Machining PowerPac.



# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Índice .....	vii
Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xv
Acrónimos .....	xvii
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1.Contextualização .....	1
1.2.Objetivos .....	3
1.3.Calendarização .....	4
1.4.Organização do Relatório.....	4
<b>2. Uso de Robôs em Tarefas de Maquinagem.....</b>	<b>7</b>
2.1.Robôs Industriais.....	7
2.1.1. Definição de Robô.....	7
2.1.2. Vantagens e Desvantagens da Utilização de Robôs.....	8
2.1.3. Componentes Básicos de um Robô Industrial .....	9
2.1.4. Conceitos Teóricos Usados na Robótica.....	11
2.1.5. Configurações Físicas dos Robôs Industriais .....	12
2.1.6. Segurança na Utilização de Robôs .....	12
2.1.7. Programação.....	13
2.1.8. Principais Aplicações Industriais de Robôs.....	15
2.2.Maquinagem de Objetos .....	17
2.2.1. Tornear (Lathe).....	17
2.2.2. Fresar (Milling) .....	18
2.2.3. Abrir Rosca .....	19
2.2.4. Furar .....	20
2.2.5. Máquinas-ferramentas .....	20

2.2.6.	<i>Maquinagem Robotizada</i> .....	21
2.2.7.	<i>Robôs Versus Máquinas CNC</i> .....	24
2.3.	Aplicações CAM .....	25
2.3.1.	<i>Aplicações de Software CAD/CAM</i> .....	26
2.4.	Conclusões do Capítulo .....	31
<b>3.</b>	<b>Especificação do Problema</b> .....	<b>33</b>
3.1.	Requisitos do Sistema .....	33
3.1.1.	<i>Software CAD</i> .....	34
3.1.2.	<i>Programas CAD/CAM</i> .....	34
3.1.3.	<i>Robô Industrial e Controlador</i> .....	34
3.1.4.	<i>Ferramenta e Material de Fixação</i> .....	36
3.1.5.	<i>Material a Maquinar</i> .....	37
3.2.	Conclusões do Capítulo .....	37
<b>4.</b>	<b>Arquitetura da Solução</b> .....	<b>39</b>
4.1.	Diagrama de Blocos e Fluxograma da Solução .....	39
4.2.	Ferramenta e Fresas Para Maquinagem .....	40
4.2.1.	<i>Dados Técnicos da Ferramenta</i> .....	40
4.2.2.	<i>Fresas Utilizadas</i> .....	41
4.2.3.	<i>Modelação das Fresas</i> .....	42
4.2.4.	<i>Modelação do Suporte da Ferramenta</i> .....	43
4.3.	Modelação nos Programas Utilizados.....	45
4.4.	Peças a Maquinar .....	46
4.5.	Conclusões do Capítulo .....	47
<b>5.</b>	<b>Implementação da Solução</b> .....	<b>49</b>
5.1.	RobotStudio 5.15.02 com Machining PowerPac 5.15 .....	49
5.2.	SprutCAM 10 .....	55
5.3.	Conclusões do Capítulo .....	63
<b>6.</b>	<b>Testes da Solução Implementada</b> .....	<b>65</b>
6.1.	Criação e Definição da Ferramenta .....	65
6.1.1.	<i>Definição do TCP no FlexPendant</i> .....	66
6.1.2.	<i>Configuração do TCP no RobotStudio 5.15.02 e SprutCAM 10</i> .....	67
6.2.	Criação e Definição de Objetos de Trabalho .....	67
6.2.1.	<i>Definição de um Objeto de Trabalho no FlexPendant</i> .....	68
6.2.2.	<i>Configuração do Objeto de Trabalho no RobotStudio 5.15.02</i> .....	68
6.2.3.	<i>Configuração do Objeto de Trabalho no SprutCAM 10</i> .....	69
6.3.	Resultados dos Testes Práticos .....	70
6.3.1.	<i>Rampa</i> .....	70

6.3.2.	<i>Ondulado</i> .....	72
6.3.3.	<i>Peão</i> .....	74
6.3.4.	<i>Símbolo DEE</i> .....	75
6.3.5.	<i>Face</i> .....	75
6.4.	Conclusões do Capítulo.....	76
<b>7.</b>	<b>Conclusões e Desenvolvimentos Futuros</b> .....	<b>77</b>
	<b>Referências Documentais</b> .....	<b>79</b>
	<b>Anexo A. Datasheet do Robô ABB IRB 140</b> .....	<b>83</b>
	<b>Anexo B. Datasheet do Controlador ABB IRC5</b> .....	<b>85</b>
	<b>Anexo C. Dimensões das Fresas</b> .....	<b>87</b>



## Índice de Figuras

Figura 1	Estimativa global, entre 2012 e 2014, do número de robôs fornecidos à indústria [1]	2
Figura 2	Movimentos do punho de um robô [5]	10
Figura 3	Exemplo de um robô industrial numa célula de montagem [11]	15
Figura 4	Torneamento de uma peça [15]	18
Figura 5	Fresagem de uma peça [16]	18
Figura 6	Parâmetros do movimento nas tarefas de fresagem [17]	19
Figura 7	Operação de abrir rosca [15]	20
Figura 8	Operação de furar [19]	20
Figura 9	Torno CNC [19] e Fresadora CNC [22]	21
Figura 10	Exemplo do robô RX160 HSM em tarefa de maquinagem [25]	22
Figura 11	Robô da KUKA a esculpir um carro alegórico [27]	23
Figura 12	<i>COMET Plug-and-Produce Controller</i> [28]	24
Figura 13	Robotmaster V6 [33]	27
Figura 14	SprutCAM 7 [35]	28
Figura 15	RobotStudio Machining PowerPac [37]	29
Figura 16	PowerMILL Robot [39]	30
Figura 17	NX CAM Robotics Machining [41]	31

Figura 18	Célula robótica existente no DEE-ISEP	35
Figura 19	Controlador ABB IRC5 <i>Single Cabinet</i> [43]	35
Figura 20	Ferramenta DREMEL 3000 [44]	36
Figura 21	Diagrama de blocos da arquitetura da solução	40
Figura 22	Fluxograma da solução do problema	40
Figura 23	Gama de velocidades da DREMEL 3000 [45]	41
Figura 24	Fresas DREMEL de alta velocidade [46]	41
Figura 25	Desenhos 3D das diferentes fresas	42
Figura 26	Criação de ficheiro “.ipt”	42
Figura 27	Peças para fixar DREMEL ao robô	43
Figura 28	Desenho 3D do suporte da ferramenta	44
Figura 29	Ferramenta montada na célula robótica real	44
Figura 30	Célula robótica modelada no RobotStudio 5.15.02	45
Figura 31	Célula robótica modelada no SprutCAM 10	45
Figura 32	Rampa	46
Figura 33	Ondulado	46
Figura 34	Peão	47
Figura 35	DEE	47
Figura 36	Face	47
Figura 37	Inicialização do Machining PowerPac 5.15	49
Figura 38	Seleção das faces a serem maquinadas	50

Figura 39	Primeiro e segundo passo do “ <i>Solution Wizard</i> ”	50
Figura 40	Terceiro e quarto passo do “ <i>Solution Wizard</i> ”	51
Figura 41	Quinto e sexto passo do “ <i>Solution Wizard</i> ”	52
Figura 42	<i>Path Connection Type</i> – Machining PowerPac 5.15	54
Figura 43	Sétimo passo do “ <i>Solution Wizard</i> ”	55
Figura 44	Sincronização com o controlador virtual no Machining PowerPac	55
Figura 45	Configuração dos parâmetros globais	56
Figura 46	Configuração das faces da peça a ser maquinada	56
Figura 47	Configuração do bloco de trabalho	57
Figura 48	Caixa/bloco de trabalho em torno das faces a serem maquinadas	57
Figura 49	Criar tarefa de maquinagem no SprutCAM 10	58
Figura 50	Janela de configuração da fresa	58
Figura 51	Janela de configuração das velocidades de avanço e de corte	59
Figura 52	Forma de mudar o comprimento de trabalho da fresa	59
Figura 53	Trajatórias geradas no SprutCAM 10 para a peça “Ondulado”	60
Figura 54	Parâmetros da simulação	60
Figura 55	Gerar ficheiro RAPID no SprutCAM 10	61
Figura 56	<i>Load</i> do ficheiro RAPID no RobotStudio 5.15	61
Figura 57	Sincronização com a estação	61
Figura 58	Movimento da ferramenta em torno do TCP [47]	66
Figura 59	Medição da ferramenta com o método de quatro orientações [47]	66

Figura 60	FlexPendant do robô ABB IRB 140	66
Figura 61	Especificação e programação de um objeto de trabalho [47]	68
Figura 62	Criação de um objeto de trabalho no RobotStudio 5.15.02	68
Figura 63	Definição do objeto de trabalho criado no RobotStudio 5.15.02	69
Figura 64	Criação de um objeto de trabalho no SprutCAM 10	69
Figura 65	Definição do objeto de trabalho criado no SprutCAM 10	70
Figura 66	Maquinagem de acabamento da peça “Rampa” com SprutCAM 10 (esquerda) e Machining PowerPac 5.15.02 (direita)	71
Figura 67	Maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa de topo	72
Figura 68	Maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica	72
Figura 69	Maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica cônica	73
Figura 70	Maquinagem da peça “Peão” com SprutCAM 10	74
Figura 71	Maquinagem da peça “Símbolo DEE” com SprutCAM 10	75
Figura 72	Maquinagem da peça “Face” com SprutCAM 10	76

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Calendarização do projeto	5
Tabela 2	<i>Software</i> e linguagem de programação de fabricantes de robôs	14
Tabela 3	Especificações técnicas DREMEL 3000 [44]	41
Tabela 4	Dimensões iniciais dos blocos de esferovite	46
Tabela 5	Tempos de simulação de acabamento para a peça “Rampa”	54
Tabela 6	Comprimentos de trabalho das fresas	59
Tabela 7	Relação entre as peças, fresas, operações de maquinagem e o tempo de simulação de maquinagem	62
Tabela 8	Dados de maquinagem da peça “Rampa”	71
Tabela 9	Dados de maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa de topo	72
Tabela 10	Dados de maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica	73
Tabela 11	Dados de maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica cônica	73
Tabela 12	Dados de maquinagem da peça “Peão”	74
Tabela 13	Dados de maquinagem da peça “Símbolo DEE”	75
Tabela 14	Dados de maquinagem da peça “Face”	76



## *Acrónimos*

ABB	–	<i>Asea Brown Boveri</i>
ATIR	–	<i>Adaptive Tracking System</i>
CAD	–	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	–	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CN	–	Controlo Numérico
CNC	–	Controlo Numérico Computorizado
CND	–	Controlo Numérico Direto
DEE	–	Departamento de Engenharia Eletrotécnica
EPSON	–	<i>Seiko Epson Corporation</i>
FANUC	–	<i>Fujitsu Automated Numerical Control</i>
GDL	–	Graus De Liberdade
HSM	–	<i>High Speed Machining</i>
ISEP	–	Instituto Superior de Engenharia do Porto
HDCM	–	<i>High Dynamics Compensation Mechanism</i>
KDMIR	–	<i>Kinematic and Dynamic Models of Industrial Robots</i>
KUKA	–	<i>Keller und Knappich Augsburg</i>
PSIR	–	<i>Adaptive Robot Path Generation</i>
RIA	–	<i>Robotics Industry Association</i>

SCARA – *Selective Compliance Articulated Robot Arm*

TCP – *Tool Center Point*

# 1. INTRODUÇÃO

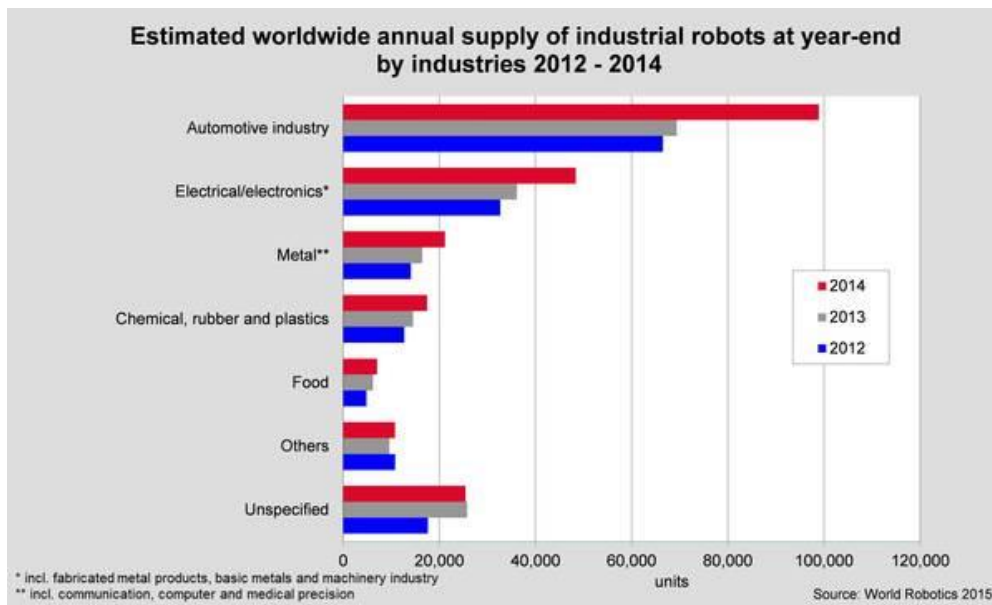
As empresas da área da maquinagem têm que, cada vez mais, produzir produtos de qualidade e em elevada quantidade, usando o menor tempo possível. Devido à sua flexibilidade e ao facto de possuírem uma área de trabalho elevada, os robôs poderão ser aplicados nesta área.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A evolução tecnológica que vem a ocorrer ao longo dos últimos anos tem afetado vários setores do mercado global, sendo um deles o da robótica industrial. Os robôs podem ser utilizados para diversas tarefas nas diferentes áreas da indústria e as suas aplicações têm vindo a crescer, levando a um aumento da eficácia e eficiência das indústrias nos quais se encontram introduzidos.

Segundo estudos estatísticos relativos a 2014, só nesse ano as vendas de robôs superaram as duzentas mil unidades (29% superior às vendas do ano transato), constituindo um novo recorde de vendas num só ano. As indústrias onde os robôs industriais têm maior utilização são a indústria automóvel e a indústria elétrica/eletrónica (Figura 1), podendo ser encontrada uma vasta gama de robôs numa linha de produção, que levam a um aumento de

produtividade, a uma redução de custos de produção e substituem o ser humano em tarefas perigosas, garantindo a sua segurança [1].



**Figura 1** Estimativa global, entre 2012 e 2014, do número de robôs fornecidos à indústria [1]

Ainda que tenha existido um aumento de vendas de robôs industriais, estas não foram equitativamente distribuídas pelo mundo, existindo cinco países responsáveis por 70% do número de vendas, nomeadamente: China, Japão, Estados Unidos da América, Alemanha e República da Coreia [1]. O contínuo aumento de vendas de robôs encontra-se relacionado com a competição no mercado global, o que leva a que as empresas (sejam elas grandes, pequenas ou médias) continuem a modernizar as suas linhas de produção de forma a continuarem competitivas no mercado.

No mercado da indústria da maquinaria, a competição existente entre as várias empresas do setor leva a uma procura por sistemas de maquinaria mais flexíveis e com o menor custo possível. Por este motivo, nesta indústria as empresas equacionam o investimento em robôs para a execução de tarefas normalmente realizadas por máquinas-ferramentas, especialmente tarefas de fresagem e torneamento. No entanto, este investimento não apresenta somente vantagens, existindo fatores que causam incertezas quanto ao uso dos robôs para a realização destas tarefas, como, por exemplo, a diferença a nível de rigidez entre os robôs e as máquinas-ferramentas. Outro dos fatores que causa incertezas está relacionado com o *software* de programação a utilizar para a realização de tarefas de maquinaria. Algumas

marcas de robôs e empresas distribuidoras de *software* têm desenvolvido soluções de forma a colmatar a lacuna existente. O funcionamento destes programas é idêntico aos programas utilizados para as máquinas-ferramentas, podendo ser possível pós-processar o código programado para a linguagem de programação dos robôs de diversos fabricantes.

Este documento tem como propósito dar a conhecer ao leitor de que forma é possível utilizar os robôs na indústria da maquinagem, mencionando as vantagens e desvantagens dos mesmos, mostrando alguns exemplos de programas utilizados para que seja possível a execução de tarefas nesta indústria. Neste trabalho, com recurso a um robô industrial e a diferentes programas de programação, irá ser testada a maquinagem de peças com complexidades crescentes, comparando o resultado final obtido em cada um. A comparação de resultados a nível de tempo de maquinagem, precisão e exatidão, permitirá concluir quais os programas mais apropriados para a execução deste tipo de tarefas.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste projeto é o desenvolvimento de uma célula robótica capaz de maquinar pequenas peças 3D, desenhadas numa aplicação de *Computer Aided Design* (CAD), em blocos de esferovite, poliuretano, ou material similar. Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- levantamento de aplicações similares já desenvolvidas e de aplicações industriais nesta área;
- geração de um ficheiro de geometria da peça a maquinar recorrendo a um *software* de CAD a escolher;
- passagem da informação constante no ficheiro CAD para um *software* de programação de robôs;
- extração da informação do ficheiro CAD, por parte do *software*, de forma a ser possível converter a geometria da peça a maquinar num conjunto de linhas/curvas simples que possam ser interpretadas pelo controlador do robô em termos de *targets* e *paths*;
- geração do programa do robô de forma a maquinar a peça em questão num bloco de esferovite, poliuretano, ou material similar, sendo possível o posicionamento do bloco

base da peça em posições arbitrárias, dentro de certos limites relacionados com o volume de trabalho do robô.

Neste trabalho será utilizado um robô industrial da Asea Brown Boveri (ABB), o modelo ABB IRB140 que se encontra disponível no Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). A ferramenta utilizada é da marca DREMEL, modelo DREMEL 3000, que é acoplada ao robô de forma a realizar tarefas de maquinagem numa placa de esferovite ou de poliuretano. São utilizados dois programas de programação para programar os percursos de maquinagem, o SprutCAM® e o RobotStudio®, e com o propósito de comparar os resultados entre os programas utilizados.

### **1.3. CALENDARIZAÇÃO**

Sendo o uso de robôs para tarefas de maquinagem de geometrias complexas a motivação deste trabalho, a sua prossecução conduziu à calendarização apresentada na Tabela 1. Esta inclui um conjunto de tarefas, nomeadamente: pesquisa de soluções de *software* utilizado na programação de robôs para tarefas de maquinagem, pesquisa de ferramentas de maquinagem a fixar no robô, desenho do suporte da ferramenta, adaptação aos programas utilizados, programação de tarefas nos *programas*, testes práticos e redação da dissertação.

### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

Esta Dissertação encontra-se organizada em 7 capítulos e 3 anexos.

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução ao tema deste trabalho. No capítulo seguinte, 2, é dado a conhecer ao leitor o estado da arte relativo a este trabalho, sendo apresentados conteúdos teóricos sobre robôs industriais, maquinagem de objetos e aplicações *Computer Aided Manufacturing* (CAM). O terceiro capítulo é relativo à especificação do problema, mencionando a célula robótica existente que será utilizada neste trabalho. O Capítulo 4 aborda a arquitetura da solução, sendo descrita a ferramenta usada para a maquinagem, os *programas* utilizados e quais as peças a maquinar. O capítulo seguinte, 5, diz respeito à implementação da solução no RobotStudio 5.15.02, com a utilização do Machining PowerPac 5.15, e no SprutCAM. O Capítulo 6 mostra como realizar os testes práticos da solução obtida no capítulo anterior e quais os resultados dos mesmos testes. No último capítulo, 7, são abordadas as conclusões finais e os desenvolvimentos futuros, onde são

mencionadas melhorias possíveis de efetuar na solução do problema. Em anexo estão apresentados os *datasheets* do robô (Anexo A), do seu controlador (Anexo B) e tabelas referentes às dimensões das fresas (Anexo C).

**Tabela 1 Calendarização do projeto**

Tarefas	2015				2016									
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	
Levantamento do Estado da Arte														
Levantamento de fresas/ <i>spindles</i>														
Levantamento de <i>programas</i>														
Aquisição do <i>spindle</i>														
Aquisição de <i>programas</i>														
Desenho do suporte da ferramenta														
Escrita do Estado da Arte														
Adaptação aos <i>programas</i>														
Programação RobotStudio 5.15.02 com Machining PowerPack 5.15														
Programação SprutCAM 10														
Testes práticos														
Conclusões														
Redação da Dissertação														



## 2. USO DE ROBÔS EM TAREFAS DE MAQUINAGEM

A aplicação de robôs em tarefas de maquinagem afeta diferentes setores da indústria e engloba tarefas que vão desde o cortar, torner, fresar e perfurar até polir, escovar e encerar. Neste capítulo serão abordados os conteúdos teóricos sobre os robôs industriais, a sua utilização na área da maquinagem, sendo realçados os prós e contras sobre o uso dos robôs em detrimento das máquinas-ferramentas, sendo amostrados alguns exemplos de programas utilizados na programação de robôs para maquinagem, bem como aplicações já existentes dos robôs nessa área.

### 2.1. ROBÔS INDUSTRIAIS

#### 2.1.1. DEFINIÇÃO DE ROBÔ

A palavra robô foi obtida da palavra checa *robota*, usada pelo dramaturgo checo Karel Čapek (Malé Svatoňovice, 9 de janeiro de 1890 – Praga, 25 de dezembro de 1938) e que significa trabalho forçado ou servo. Um robô é uma máquina reprogramável capaz de realizar diversas

funções, tendo uma capacidade de responder a entradas sensoriais, comunicar com outras máquinas e efetuar decisões. Este pode substituir o ser humano nas tarefas difíceis em ambientes de trabalho pouco confortáveis. Para além disso, consegue trabalhar num ciclo repetitivo mantendo a sua consistência o que para o ser humano é difícil de conseguir.

Em 1941, o Russo Isaac Asimov (Petrovichi, 2 de janeiro de 1920 – Nova Iorque, 6 de abril de 1992) enunciou as 3 leis da robótica:

- um robô não pode fazer mal a um ser humano e nem, por inação, permitir que algum mal lhe aconteça;
- um robô deve obedecer às ordens dos seres humanos, exceto quando estas contrariem a primeira lei;
- um robô deve proteger a sua integridade física, desde que com isto não contrarie as duas primeiras leis.

Posteriormente foi introduzida uma *lei zero* que afirma: um robô não pode fazer mal à humanidade e nem, por inação, permitir que ela sofra algum mal.

De acordo com a Robotics Industry Association (RIA), organização sem fins lucrativos que se dedica a melhorar a competitividade global dos sectores de fabrico norte americanos através da promoção e divulgação da robótica e automação relacionada, um robô é um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas [2].

### **2.1.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE ROBÔS**

Devido às vantagens dos robôs industriais, estes têm vindo a ser usados cada vez mais na indústria. Conforme visto na Secção 1.1, no ano de 2014 assistiu-se a um aumento do número de vendas de robôs relativamente ao ano de 2013, mas enquanto o número de robôs aumentou cerca de 29%, o volume de vendas só aumentou 19%, ou seja, o custo unitário dos robôs tem vindo a diminuir. O facto de o preço dos robôs estar a decrescer leva a que as empresas comecem a apostar mais nos mesmos, visto que o retorno sobre o investimento será maior. Um dos grandes responsáveis pela descida do custo dos robôs é a China que possui o maior mercado de desenvolvimento robótico como resposta ao estímulo do governo chinês para a produção robótica [3].

As vantagens na utilização dos robôs podem-se dividir em três categorias principais:

- fatores técnicos (versatilidade pela programação; colmatam as capacidades humanas; garantem flexibilidade);
- fatores económicos (mesmo equipamento pode ter várias funções; elevado retorno sobre o investimento; aumento da produtividade);
- fatores sociológicos (tarefas pesadas ou desagradáveis para os seres humanos são feitas por robôs; afastamento do ser humano de locais perigosos para a saúde; redução do número de acidentes).

Relativamente às desvantagens, estas focam-se no facto de existir uma redução do número de atividades acessíveis ao ser humano, o que poderá levar ao aumento do desemprego, e ao facto de poder existir uma subjugação do homem pela máquina [4].

Um estudo da Boston Consulting Group (empresa norte-americana de consultoria fundada em 1963) sugere que as empresas tendem a substituir as pessoas por robôs quando estes representam uma poupança superior a 15% no custo de mão-de-obra para efetuar a mesma tarefa [3].

As empresas que adotam robôs tentam assegurar que nenhum trabalhador perderá o seu posto de trabalho, isto é, os funcionários deixarão para os robôs as tarefas mais repetitivas mas ficarão responsáveis pelas tarefas que necessitem de criatividade, adaptação, aprendizagem e tomada de decisões.

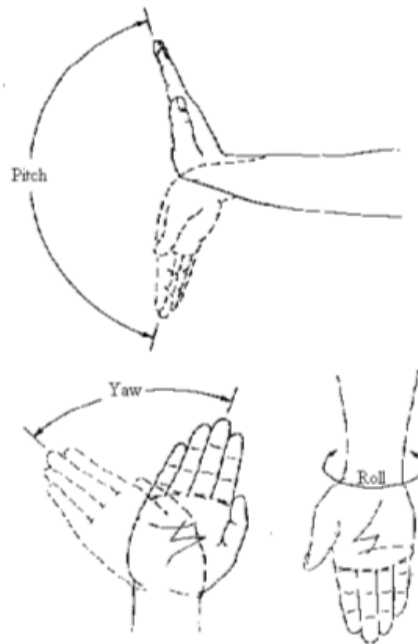
### **2.1.3. COMPONENTES BÁSICOS DE UM ROBÔ INDUSTRIAL**

Um sistema robótico é composto por uma estrutura mecânica, ferramentas, controlador, sensores e a interface com o utilizador.

A nível da estrutura mecânica, um robô é constituído pela base, corpo, braço e punho (análogo ao ser humano). O braço e o punho são compostos por partes rígidas, os elos, e estão ligados entre si através das juntas. Se os elos do robô estiverem ligados em sequência, diz-se que o robô tem uma estrutura em série, e se estiverem ligados em paralelo é considerada uma estrutura paralela. Os movimentos das juntas dos robôs são conseguidos através de atuadores, como por exemplo, motores elétricos e cilíndricos hidráulicos ou pneumáticos.

A extremidade do robô é conhecida por punho e pode efetuar três tipos de movimentos (ver Figura 2):

- *yaw* – em que a rotação do punho é para a esquerda e para a direita e em torno do eixo dos  $xx$ ;
- *pitch* – em que a rotação do punho é para cima e para baixo e em torno do eixo dos  $yy$ ;
- *roll* – em que a rotação do punho é em torno do braço e no eixo dos  $zz$ .



**Figura 2** Movimentos do punho de um robô [5]

As ferramentas ou garras são considerados atuadores finais e são dispositivos que se adaptam à extremidade do robô e possibilitam que seja efetuada uma determinada tarefa específica, como manipular um objeto ou efetuar uma operação sobre esse objeto. Cada operação específica que o robô efetua exige um atuador final próprio para essa tarefa. Dentro da gama das ferramentas, existem as ferramentas rotativas que são utilizadas em aplicações de maquinagem, efetuando tarefas de rebarbagem, polimento, furação, aparafusamento, etc. Com este tipo de ferramentas o robô executa sempre a mesma função e pode efetuar várias operações sobre a mesma peça.

O controlador de um robô é o “cérebro” do sistema robótico pois executa o sistema operativo do robô que faz a interface com o utilizador e executa o *software* de planeamento de trajetórias.

#### **2.1.4. CONCEITOS TEÓRICOS USADOS NA ROBÓTICA**

Na indústria da robótica existem alguns termos teóricos que são usados com alguma frequência, tais como: volume de trabalho, alcance, graus de liberdade (gdl), precisão. Deste modo, é importante o leitor ter uma noção do que estes significam.

O espaço ou volume de trabalho de um robô são todas as posições que o robô consegue alcançar no seu espaço tridimensional. A distância máxima da garra do robô face à base é chamada de alcance, ao passo que os pontos que não são alcançados pela garra encontram-se dentro do que é considerado o espaço morto.

O conceito “Graus de Liberdade” é o número total de movimentos independentes que um robô pode efetuar. Não se deve confundir com o termo “Graus de Mobilidade” que é igual ao número de juntas do sistema robótico.

A precisão ou exatidão é a capacidade de o robô se posicionar sobre um ponto programado dentro do volume de trabalho e mede a distância entre a posição desejada (e programada) e a posição efetivamente atingida pelo robô. Deve-se realçar que existe uma relação inversa entre a precisão e a velocidade dos movimentos.

Para determinar a velocidade mais adequada do robô a uma dada tarefa é preciso ter em consideração os seguintes fatores:

- precisão com que o punho deve ser posicionado;
- peso do objeto que está a ser manipulado;
- distâncias a atingir.

O peso do objeto que está a ser manipulado não deve ultrapassar a capacidade de carga do robô, sendo esta especificada nas condições em que o braço robótico se encontra na posição mais desfavorável. A capacidade de carga pode ser nominal (máxima carga à velocidade máxima sem perda de precisão) ou máxima (máxima carga a velocidade reduzida sem perda de precisão). Os requisitos principais que os robôs deverão ter são [5]:

- elevada precisão, repetibilidade e velocidade;
- grande volume de trabalho;
- facilidade de integração do controlador com estruturas de controlo de nível hierárquico superior;

- facilidade de integração no controlador do robô de controladores subordinados, sensores e atuadores;
- controlo e programação simplificados.

### **2.1.5. CONFIGURAÇÕES FÍSICAS DOS ROBÔS INDUSTRIAIS**

A configuração física de um robô é determinada pelas posições das suas juntas do braço e é um aspeto importante na escolha do tipo de robô para uma determinada aplicação. Existem oito configurações físicas principais, nomeadamente [5]:

- cartesiana ou retangular;
- pórtico ou *gantry*;
- cilíndrica;
- esférica ou polar;
- articulada ou revoluta (também designada por configuração antropomórfica por se assemelhar a um braço humano);
- *selective compliance articulated robot arm* (SCARA);
- *spine*;
- paralela ou pendular.

Aquando da escolha de um robô, as empresas têm que ter em consideração os vários aspetos das configurações acima mencionadas. A lista seguinte apresenta quais as configurações mais indicadas tendo em conta a repetibilidade, alcance e capacidade de carga [5]:

- repetibilidade – configuração cartesiana ou retangular;
- alcance – configuração polar ou esférica e configuração articulada ou revoluta;
- capacidade de carga – configuração cartesiana ou retangular e configuração cilíndrica.

### **2.1.6. SEGURANÇA NA UTILIZAÇÃO DE ROBÔS**

Os robôs são máquinas potencialmente perigosas, embora o seu número de acidentes seja reduzido e ocorra maioritariamente durante as fases de programação ou manutenção. Como operam frequentemente em conjunto com outras máquinas, o risco de ocorrência de acidentes é superior.

Tal como noutras áreas, também a área da robótica industrial obedece a normas de segurança internacionais e nacionais. No mês de março do ano de 2013 foi aprovada a norma

ANSI/RIA R15.06-2012, que é uma atualização da norma ANSI/RIA R15.06-1999 com uma adaptação da norma ISO 10218:2011. Esta norma fornece à indústria as orientações para o uso seguro dos robôs e/ou de sistemas robóticos, assim como os métodos de segurança para a integração de robôs em fábricas e/ou áreas de trabalho [6].

Em Portugal existe legislação relativa às máquinas e equipamentos de trabalho. A Diretiva 2006/42/CE [7], conhecida como “Diretiva Máquinas”, tem como propósito regulamentar a colocação no mercado e a entrada em serviço de máquinas novas, tendo sido transposta para o Decreto-Lei n.º103/2008, de 24 de junho [8].

De modo a reduzir ao máximo o risco de acidentes com robôs são tomadas medidas de proteção passivas e ativas. Quando se trabalha com um robô, é necessário ter em atenção que existem vários perigos associados, nomeadamente: falhas elétricas, hidráulicas, pneumáticas, erros de programação e manutenção, erros do sistema de controlo e a entrada não autorizada de pessoas na área de trabalho do robô. Um operador não deve entrar na área de trabalho de um robô enquanto este possuir a alimentação do braço robótico ligada, pois mesmo que o robô não esteja em movimento, não significa que o venha a fazer a certa altura. Mesmo que o robô esteja a executar uma trajetória padrão, não se deve assumir que este continue a executar essa trajetória [9].

As medidas de proteção passivas são regras de conduta a serem observadas e implementadas de forma a evitar situações que possam levar à ocorrência dos acidentes. A formação de pessoas que irão trabalhar com robôs, a definição de zonas de segurança e zonas de trabalho e o uso de marcações e sinalização para indicar as zonas de perigo são alguns exemplos de medidas de proteção passivas. As medidas de proteção ativas são medidas destinadas a limitar os efeitos ou consequências dos acidentes quando as medidas passivas não o conseguem evitar. As medidas de proteção ativas podem ser observadas em exemplos, nomeadamente: circuito de paragem de emergência, proteção contra colisões e sistemas para impedir o acesso à área de trabalho dos robôs, entre outros [9].

### **2.1.7. PROGRAMAÇÃO**

O objetivo de um sistema de programação é a geração de um programa de controlo de uma forma simples e amigável para o utilizador. No caso dos robôs o programa é uma sequência de localizações (*targets*) no espaço (trajetória – *path*) que o robô tem que percorrer com uma determinada orientação, velocidade e aceleração.

A programação de robôs consiste na geração de movimentos complexos e difíceis de imaginar para os seres humanos. Estes movimentos dos robôs devem ser capazes de alcançar uma posição alvo programada, de forma a posicionar a peça ou a ferramenta, ou mover-se ao longo de uma trajetória programada com velocidades definidas.

A programação de robôs pode ser genericamente classificada em dois tipos: programação *online* e programação *offline*. A programação *online* envolve diretamente o robô e tem como principal vantagem ser simples de realizar e de aprender. Como desvantagem tem-se o facto de ser necessário o robô para efetuar a programação, o que implica a paragem da célula em que este se encontra. A programação *offline* permite programar o robô sem ser necessário a sua utilização durante essa tarefa e é cada vez mais utilizada para aplicações complexas e aplicações que exigem longos tempos de desenvolvimento dos programas. Este tipo de programação tem vindo a utilizar sistemas de simulação gráfica, permitindo testar os programas desenvolvidos e observando-os como seriam na prática, mas com recurso a um simulador. As principais vantagens da programação *offline* são as seguintes [10]:

- poupança de custos em trabalhadores para o projeto, otimização e programação;
- redução significativa de custos para testes de oficina e alterações subsequentes dos sistemas;
- segurança acrescida do programador ao não trabalhar na proximidade física do robô.

Por norma, cada fabricante de robôs tem o seu próprio *software* e linguagem de programação. Na Tabela 2 estão apresentados alguns fabricantes de robôs e respetivos *software* e linguagem de programação.

**Tabela 2** *Software* e linguagem de programação de fabricantes de robôs

<b>Fabricante</b>	<b><i>Software</i></b>	<b>Linguagem de Programação</b>
<b>Asea Brown Boveri (ABB)</b>	RobotStudio	RAPID
<b>Keller und Knappich Augsburg (KUKA)</b>	KUKA.Sim	KRL
<b>Fujitsu Automated Numerical Control (FANUC)</b>	ROBOGUIDE	Karel
<b>Seiko Epson Corporation (EPSON)</b>	EPSON RC+	SPEL+

### 2.1.8. PRINCIPAIS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DE ROBÔS

As aplicações industriais na robótica normalmente subdividem-se nas seguintes operações:

- manuseamento de materiais;
- montagem e inspeção;
- operações de processamento.

Nas tarefas de manuseamento de materiais o robô move um objeto de uma posição para outra. Os robôs são normalmente utilizados nestas tarefas para aplicações como: transferência de materiais (*pick and place*), carga ou descarga de máquinas e paletização. Desta maneira o robô evita que o ser humano manuseie cargas elevadas, aumenta a segurança dos operadores pois não interferem diretamente com as máquinas em situações de carregamento ou descarregamento e conseguem realizar a tarefa repetitivamente.

As operações de montagem e inspeção são semelhantes às operações de manuseamento, isto é, nas operações de montagem os robôs poderão ser utilizados para manusear vários componentes de forma a formar um produto final ou intermédio. Nestas operações os robôs estão normalmente inseridos numa linha de montagem ou numa célula de montagem. Numa linha de montagem os produtos deslocam-se ao longo da linha onde são acrescentados componentes aos produtos e numa célula de montagem (Figura 3) o movimento do produto está confinado a essa célula ou pode nem existir.



Figura 3 Exemplo de um robô industrial numa célula de montagem [11]

Na parte de operações de processamento encontram-se tarefas como pintura, soldadura, maquinagem e corte. Na pintura os robôs integram tipicamente um sistema que envolve o sistema de transporte de peças até ao interior da cabina de pintura e a saída das mesmas após realizada a pintura, evitando que o operador entre em contacto com o interior da cabina. Nas tarefas de soldadura os robôs conseguem reduzir o espaço físico ocupado e aumentam a flexibilidade. As peças que são soldadas mantêm uma qualidade constante e, devido a ser um ambiente de trabalho adverso, salvaguarda-se o operador deste tipo de tarefas. Nas operações de maquinagem os operadores ficam em contacto com elevados níveis de ruído e poeira, existindo manipulação de máquinas elétricas ou pneumáticas ou de peças que estão a ser trabalhadas e sujeitas a elevadas vibrações. Estes fatores estão na origem de elevadas taxas de acidentes. Desta forma, a introdução dos robôs neste tipo de tarefas garante uma maior segurança para o trabalhador, que deixa de estar sujeito a um meio de trabalho hostil.

Os robôs que efetuam estas tarefas têm normalmente um tamanho semelhante ao humano, capacidades de programação avançadas, braço com 3 gdl, punho com 2 ou 3 gdl e uma boa repetibilidade. As operações mais comuns na maquinagem são [12]:

- limpeza de peças fundidas, injetadas ou estampadas (corte, rebarbagem ou lixamento);
- polimento;
- corte de peças de pequena espessura e de grande superfície, volume ou de forma complexa;
- furar, escarear e roscar.

Adicionalmente, começam agora a surgir aplicações de robôs na maquinagem propriamente dita de peças, tema que é alvo deste trabalho.

Neste tipo de operações, as vantagens da aplicação da robótica são essencialmente:

- o robô trabalha de forma quase ininterrupta;
- existe uma maior garantia de respeitar tolerâncias mais apertadas;
- existe uma maior uniformidade de realização da operação.

Neste tipo de operações, os robôs podem ser usados nas seguintes situações:

- o robô utiliza uma ferramenta como órgão terminal de forma a efetuar uma operação de processamento, simulando um operador humano;
- o robô segura a peça que é manipulada em contacto com uma ferramenta.

Nas situações acima descritas o robô terá que suportar o peso da ferramenta ou da peça que esteja a segurar. Para além de ter de suportar o peso (seja da ferramenta ou da peça), quando estiver a executar a tarefa de maquinagem, o robô terá de aguentar as forças de corte associadas a essa tarefa.

As tarefas de corte também são tarefas que constituem algum perigo para o operador e, como tal, os robôs têm vindo a substituir os mesmos. Na robótica, e para este tipo de tarefas, são usadas fontes de laser ou jatos de água, devido ao facto de as ferramentas mecânicas tradicionais estarem sujeitas a um maior desgaste, provocando muitas vezes resultados finais indesejáveis.

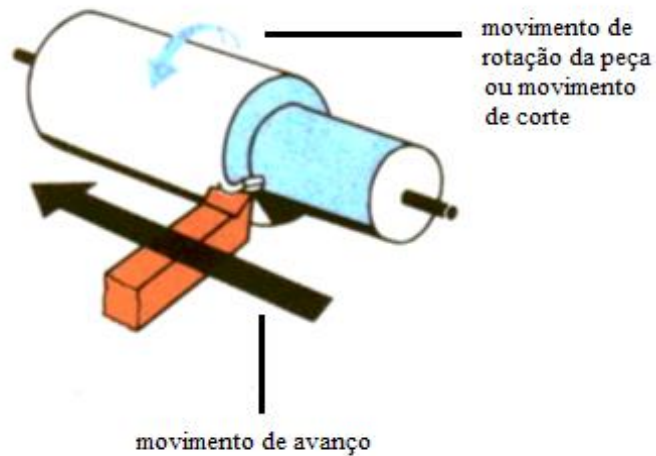
## **2.2. MAQUINAGEM DE OBJETOS**

As tarefas de maquinagem consistem na alteração da geometria de um objeto, removendo algum do seu material, através do uso de ferramentas. Existem diversas operações de maquinagem como, por exemplo: torneiar, fresar, roscar e perfurar. Nestas operações existem três tipos de movimentos: movimento principal ou de corte, movimento de avanço e movimento de penetração.

### **2.2.1. TORNEAR (*LATHE*)**

Nas operações de torneamento (Figura 4) a peça movimenta-se em torno do seu próprio eixo, ou seja, a peça é segura e rodada enquanto uma ferramenta se encontra em avanço e corta a peça de forma a produzir o objeto final desejado [13].

Neste tipo de operações, o movimento de corte é o movimento de rotação da peça, sendo a velocidade de corte a velocidade com que a peça se move quando está em contato com a ferramenta e expressa-se em metros por minuto no caso da velocidade linear ou de corte e em rotações por minuto no caso de se pretender indicar a velocidade angular. O movimento de avanço é o movimento longitudinal da ferramenta de corte em relação à peça e define a espessura da aparta, sendo a velocidade de avanço a velocidade com que a ferramenta se move em relação à peça e pode ser expressa em função do tempo (milímetros por minuto) ou em função da rotação (milímetros por rotação). O movimento de penetração produz-se pelo movimento transversal da ferramenta em relação à peça, ou pelo deslocamento da ferramenta durante o movimento de avanço, determinando a altura da aparta, ou profundidade de corte. O penetramento é expresso em milímetros [14].



**Figura 4** Torneamento de uma peça [15]

### 2.2.2. FRESAR (*MILLING*)

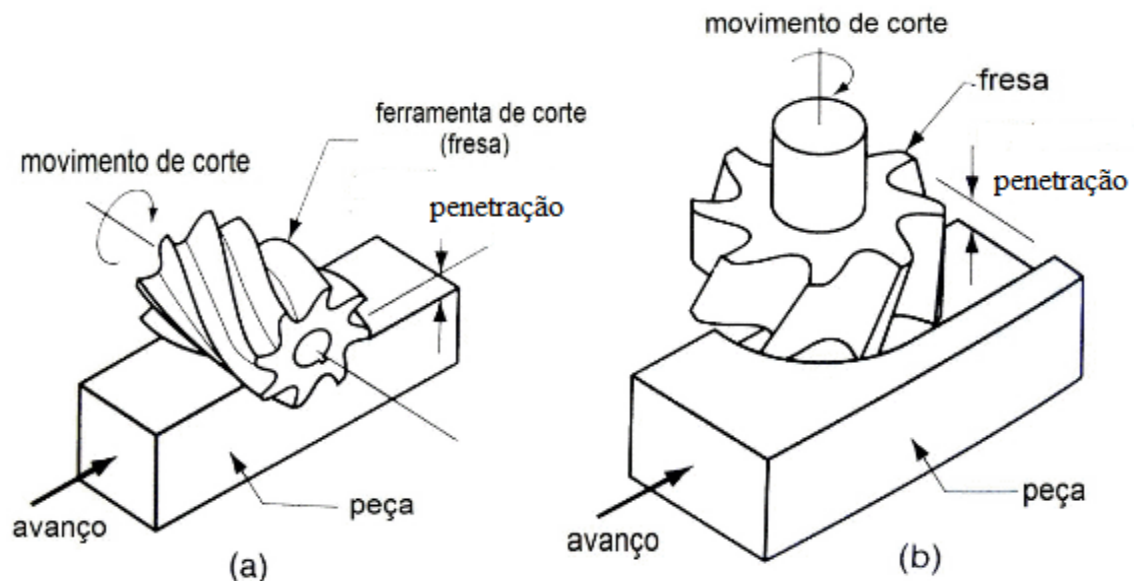
A fresagem (Figura 5) é uma operação em que o material é levantado por uma ferramenta rotativa, fresa, de aresta múltipla. Cada aresta de corte levanta uma pequena quantidade de material por cada rotação do eixo onde a ferramenta é fixada. A fresagem envolve a realização de operações simples de facejamento e contorno, mas também a maquinagem de uma grande variedade de formas complexas. A fresagem pode ocorrer de dois modos distintos, de acordo com a posição relativa entre a peça e a ferramenta: fresagem cilíndrica e fresagem frontal.



**Figura 5** Fresagem de uma peça [16]

A fresagem cilíndrica (Figura 6 - a) caracteriza-se pelo fato do eixo da fresa se encontrar numa posição paralela à superfície de trabalho da peça, onde a operação de corte é realizada. Na fresagem frontal (Figura 6 - b) ou de topo o eixo da fresa é perpendicular à superfície a maquinar. Neste processo o corte pode ser realizado pelo topo da ferramenta, e pela periferia da mesma.

A velocidade de corte nas tarefas de fresagem é a velocidade com que a ferramenta se move quando está em contacto com a peça. O avanço e a profundidade de corte estão exemplificados na Figura 6.



**Figura 6** Parâmetros do movimento nas tarefas de fresagem [17]

De acordo com o movimento relativo entre a peça e a ferramenta podem existir dois métodos de fresagem: em concordância e em oposição. Na fresagem em concordância o movimento de corte da ferramenta é favorável à direção de avanço da peça e na fresagem em oposição estes dois movimentos são contrários. Na fresagem em concordância quando a aresta de corte entra em contacto com a peça, a espessura da peça tem o seu valor máximo. Na fresagem em oposição (ou discordante), a espessura da peça é mínima no momento do contacto da ferramenta com a peça. Neste tipo de fresagem há uma grande geração de calor devida ao atrito inicial da aresta de corte com o material, até que se inicie a formação da peça. Esta situação é desfavorável para a ferramenta porque reduz a sua vida útil e para o processo de corte. Neste tipo de fresagem o esforço de corte é gradual, pelo que este método é mais utilizado em máquinas de baixa potência [18].

### 2.2.3. ABRIR ROSCA

As operações de abrir rosca (Figura 7) permitem a execução de roscas internas ou externas com o auxílio de uma ferramenta de rosca designada por macho. Tal como nas operações de torneamento, a peça movimenta-se em torno do seu próprio eixo e a ferramenta avança para criar a forma final pretendida [14].

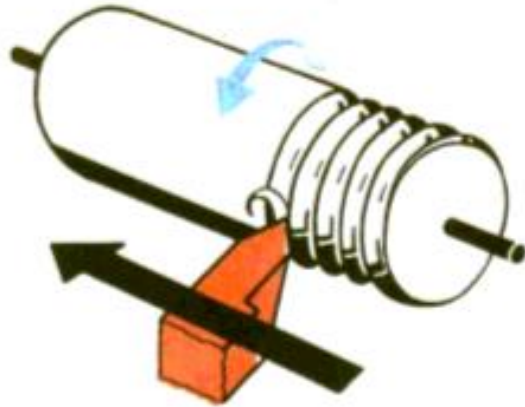


Figura 7 Operação de abrir rosca [15]

#### 2.2.4. FURAR

Nas operações de furar (Figura 8) o objeto a ser maquinado encontra-se fixo e a ferramenta (designada broca) remove o material com um movimento de corte circular e um movimento de avanço linear para a obtenção de um furo, sendo a dimensão do furo determinada pelo diâmetro da broca.

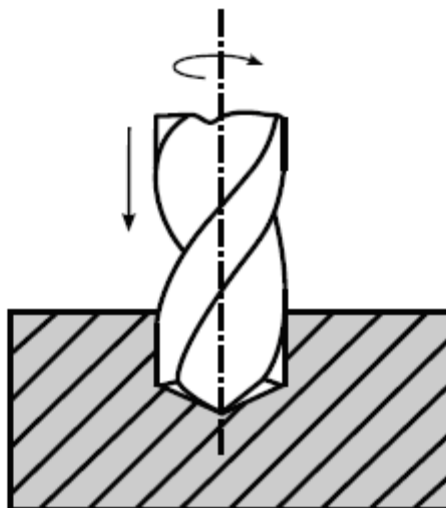


Figura 8 Operação de furar [19]

#### 2.2.5. MÁQUINAS-FERRAMENTAS

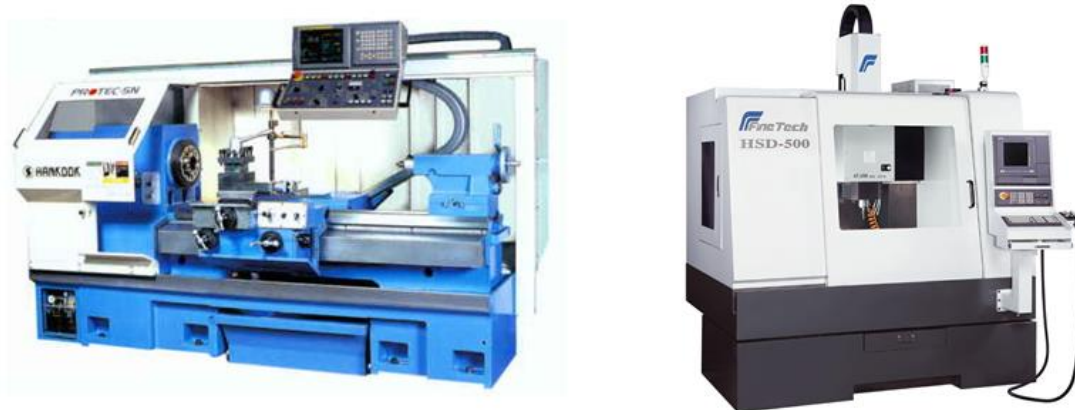
As máquinas-ferramentas são utilizadas em tarefas como as exemplificadas em cima, e outras que envolvam remoção de material, e é norma atualmente a utilização de máquinas

de controlo numérico. O controlo numérico (CN) é uma forma de automação em que o equipamento de processamento é controlado por meio de um programa baseado em números, letras e outros símbolos. Um sistema CN tem de ter os seguintes componentes básicos: programa de instruções, unidade de controlo e equipamento de processamento, nomeadamente, a máquina ferramenta. O programa de instruções consiste numa sequência detalhada de comandos, passo a passo, que controlam a máquina. O controlador é constituído por equipamentos que fazem a leitura e a interpretação do programa de instruções, convertendo-o em ações mecânicas da máquina, sendo esta última que realiza o trabalho útil [20].

A evolução da tecnologia do controlo numérico levou ao aparecimento do Controlo Numérico Direto (CND) nos anos 60 e do Controlo Numérico Computorizado (CNC) nos anos 70. O CNC é um sistema CN que utiliza o microcomputador como unidade de controlo de uma máquina-ferramenta e tem as seguintes características [20]:

- possibilidade de armazenar em memória mais do que um programa CN;
- permite a edição, modificação e teste de programas CN junto à máquina;
- utiliza ciclos e subrotinas;
- possui capacidade de fazer diagnósticos e uma interface de comunicações.

As máquinas-ferramentas mais conhecidas são o Torno e a Fresadora (Figura 9).



**Figura 9** Torno CNC [21] e Fresadora CNC [22]

#### **2.2.6. MAQUINAGEM ROBOTIZADA**

Motivados pela crescente tendência para a maquinagem flexível, pelo seu baixo custo e pelo grande volume de trabalho, os robôs começam a ser utilizados em operações de

maquinagem. Sendo desenvolvidos inicialmente como dispositivos de posicionamento, têm avançado em termos de rigidez, precisão e são cada vez mais utilizados para tarefas de remoção de material. Com os robôs, os fabricantes estão a produzir produtos de maior qualidade a um preço mais reduzido, alcançado a velocidade e a flexibilidade que necessitam para se manterem competitivos no mercado global [23].

Uma célula de maquinagem robotizada consiste em vários componentes, nomeadamente: *software* CAD/CAM compatível, robô e respetivo controlador, *spindle* e as ferramentas.

A lista seguinte enumera as principais vantagens do uso dos robôs nas tarefas de maquinagem:

- melhoria na qualidade e consistência da peça final;
- eliminação de tarefas manuais que podem ser prejudiciais para o ser humano;
- a flexibilidade permite que sejam usados nas mais diversas aplicações de remoção de materiais;
- reduzem os custos, o consumo de energia e o material que não seria aproveitado após as operações;
- redução do tempo de ciclo;
- capacidade de efetuar trabalhos mais precisos em pontos de difícil acesso.

Por exemplo, a Stäubli (empresa da área da mecatrónica fundada na Suíça) desenvolveu uma gama de robôs dedicados para tarefas de maquinagem de alta velocidade (*high speed machining – hsm*). Quer sejam da gama TX90, RX160 (Figura 10) ou TX200, os robôs foram desenvolvidos para se dedicarem exclusivamente às tarefas de maquinagem com uma grande flexibilidade [24].



**Figura 10** Exemplo do robô RX160 HSM em tarefa de maquinagem [25]

Também a KUKA, empresa alemã que fabrica robôs, introduziu o primeiro *software* de controlo CNC que pode ser emparelhado com um robô, o KUKA.CNC. Neste *software*, um *kernel* de um controlador CN é integrado no controlador KR C4, permitindo que este corra programas de controlo numérico. Os programas CN são programados usando sistemas CAD/CAM, sendo executados diretamente no robô sem ser necessário a conversão para a linguagem KRL (linguagem de programação dos robôs da KUKA) [26].

A *Kern Studios* é uma empresa que constrói carros alegóricos, sendo responsável pela festa de carnaval de Nova Orleães, Estados Unidos da América, o *Mardi Gras*. Esta empresa decidiu utilizar um novo método de construção dos carros alegóricos para o ano de 2016, sendo esse método a adoção de um robô da KUKA. Na Figura 11 é possível observar o robô a efetuar tarefas de maquinagem de modo a esculpir a figura pretendida para o carro alegórico [27].



**Figura 11** Robô da KUKA a esculpir um carro alegórico [27]

### **Projeto COMET**

O projeto COMET (*Plug-and-produce COmponents and METHods for adaptive control of industrial robots enabling cost effective, high precision manufacturing in factories of the future*) foi um projeto europeu co-financiado pela Comissão Europeia.

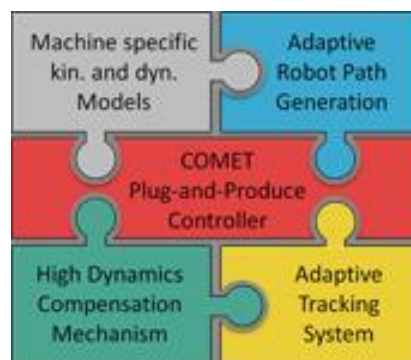
O projeto começou no dia 1 de setembro de 2010 e terminou no dia 30 de junho de 2013 e tinha como objetivo superar os desafios que as indústrias de fabrico enfrentavam,

desenvolvendo sistemas de maquinagem inovadores, flexíveis, confiáveis e com uma média de trinta por cento em poupança de custos em comparação com as máquinas-ferramentas. Devido à flexibilidade e à eficiência, os robôs apresentavam uma boa solução, mas tinham lacunas quanto à rejeição de perturbações em termos de forças de corte e a nível de *software* compatível [28].

Este projeto envolveu entidades de oito países europeus diferentes que trabalharam em conjunto para criar uma solução que permitisse o uso de robôs industriais em tarefas de maquinagem. A solução proposta foi o: *COMET Plug-and-Produce Controller* (Figura 12).

Esta solução depende de quatro metodologias, nomeadamente [28]:

- *Kinematic and Dynamic Models of Industrial Robots* (KDMIR), para definir de forma precisa o comportamento estático e dinâmico de qualquer robô industrial;
- *Adaptive Robot Path Generation* (PSIR), um ambiente integrado de programação e simulação;
- *Adaptive Tracking System* (ATIR), para os robôs industriais detetarem qualquer desvio do trajeto programado, iniciando correções em tempo real, assegurando a precisão do robô;
- *High Dynamics Compensation Mechanism* (HDCM), para realizar uma precisão absoluta.



**Figura 12** *COMET Plug-and-Produce Controller* [28]

### 2.2.7. ROBÔS VERSUS MÁQUINAS CNC

Os robôs e as máquinas CNC têm vindo a experienciar um caminho de evolução paralelo ao longo dos últimos anos. No entanto, existem grandes diferenças que criam uma separação entre a indústria dos robôs industriais e a indústria das máquinas CNC.

Uma das diferenças existentes é em termos de rigidez. Por exemplo, em qualquer operação de maquinagem existem forças de reação que estão diretamente relacionadas com a dureza do material que está a ser maquinado. Se o robô não tiver a rigidez necessária para maquinar esse material, o sistema irá sofrer vibrações que irão afetar o resultado final [29].

Neste aspeto, as máquinas CNC apresentam uma vantagem pois a sua rigidez é superior à dos robôs industriais. Esta diferença é importante na maquinagem pois a falta de rigidez tem influência no produto final, na precisão e tempo de vida da ferramenta utilizada. Também a nível de força as máquinas CNC apresentam vantagens em relação aos robôs [30].

Uma barreira que inicialmente existia e que colocava os robôs em desvantagem era a falta de programas CAD/CAM que permitissem a conversão correta da programação CAD para trajetórias que o robô necessitasse de efetuar. Nos últimos anos têm surgido novos programas que mostram que esta barreira foi ultrapassada [29].

Por outro lado, os robôs apresentam vantagens em relação às máquinas CNC no que toca à flexibilidade e ao custo geral. O facto de o volume de trabalho de um robô ser superior ao de uma máquina CNC e de o robô apresentar uma maior manobrabilidade faz com que sejam vistos como possíveis substitutos das máquinas CNC. É importante também realçar que o robô tem a capacidade de manusear o material, mas numa máquina CNC é o operador que efetua essa tarefa. O custo de um robô, comparado com o de uma máquina CNC, é inferior e o seu preço tende a decrescer, visto que os robôs podem ser utilizados em qualquer tipo de indústria (desde a indústria alimentar à indústria aeroespacial) e as vendas de robôs industriais continuam a aumentar. Mesmo que o custo de integração, das ferramentas e do *software* de uma célula robótica aumente o preço final, esses custos também estão presentes nas células industriais que utilizam máquinas CNC. Aliás, muitas das ferramentas e aplicações de *software* podem, hoje em dia, ser utilizadas nos dois tipos de equipamentos [29].

### **2.3. APLICAÇÕES CAM**

O *Computer Aided Manufacturing* (CAM) é um sistema computadorizado para ajudar no planeamento, gestão e controlo das funções de fabrico. É composto por *software* e *hardware* especializado, em que o *hardware* é o mesmo que o utilizado nos sistemas CAD, mas acrescido de todo o equipamento industrial especializado tais como: máquinas ferramentas,

controladores numéricos, etc. [31]. O *software* CAM engloba todo o mesmo *software* que está envolvido no planeamento e controlo de fabrico: pós-processadores, ferramentas de supervisão, planeamento, controlo de processos, etc.

A aplicação de um sistema CAM a um sistema produtivo divide-se em duas grandes categorias:

- planeamento de processo;
- controlo de fabrico.

O planeamento de processo consiste na utilização *offline* dos computadores para a preparação de um plano onde são especificados os processos e parâmetros que devem ser utilizados para converter materiais de um estado inicial para um estado final pré-determinado. O controlo de fabrico engloba um conjunto de atividades dedicadas à gestão e controlo das operações físicas da fábrica [31].

### **2.3.1. APLICAÇÕES DE SOFTWARE CAD/CAM**

Quer seja em tarefas de desbaste ou acabamento, a remoção de materiais com recurso à robótica está a ser usada para cortar, rebarbar e polir todo o tipo de materiais, desde madeira a componentes de motores de avião. No entanto, existia uma barreira que seria necessária ultrapassar para adotar os robôs em tarefas de maquinagem, barreira esta que era a incapacidade de traduzir facilmente um programa CAD em movimentos do robô.

Os programadores estão a inovar os programas de programação de CAD/CAM para um nível em que seja possível programar e simular tarefas de maquinagem com robôs. Ao contrário do que acontece com as máquinas CNC, os robôs têm erros que são menos intuitivos de resolver, erros como singularidades, colisões, limites das juntas, problemas de alcance, mobilidade do pulso, etc. Estas variáveis precisam de ser controladas, caso contrário o sistema não funcionará corretamente [32].

A vantagem deste tipo de aplicações de *software* de programação e simulação é que mostram graficamente os erros que ocorrem durante a execução do programa do robô e reduzem a dificuldade de gerar trajetórias complexas de maquinagem. Apesar de os fabricantes de robôs já disponibilizarem extensões para os seus programas que são dedicadas a aplicações de maquinagem, também existem programas CAD/CAM genéricos que são desenvolvidos para trabalharem com qualquer tipo de fabricantes.

De seguida são descritos brevemente alguns programas CAD/CAM existentes no mercado, nomeadamente: Robotmaster, SprutCAM Robot, RobotStudio Machining PowerPac, PowerMILL Robot e NX CAM Robotics Machining.

## Robotmaster

A Robotmaster é uma empresa Canadiana de desenvolvimento de *software* CAD/CAM para a programação, otimização e simulação em robôs. Com o *software* Robotmaster, e usando um modelo 3D, a trajetória do robô é otimizada para produzir um programa preciso e livre de erros.

De acordo com o seu fabricante, este *software*, do qual se apresenta uma imagem do ecrã na Figura 13, é ideal para a programação de robôs em aplicações industriais tais como:

- corte;
- fresagem;
- rebarbagem;
- polimento/lixamento;
- soldadura;
- pintura.

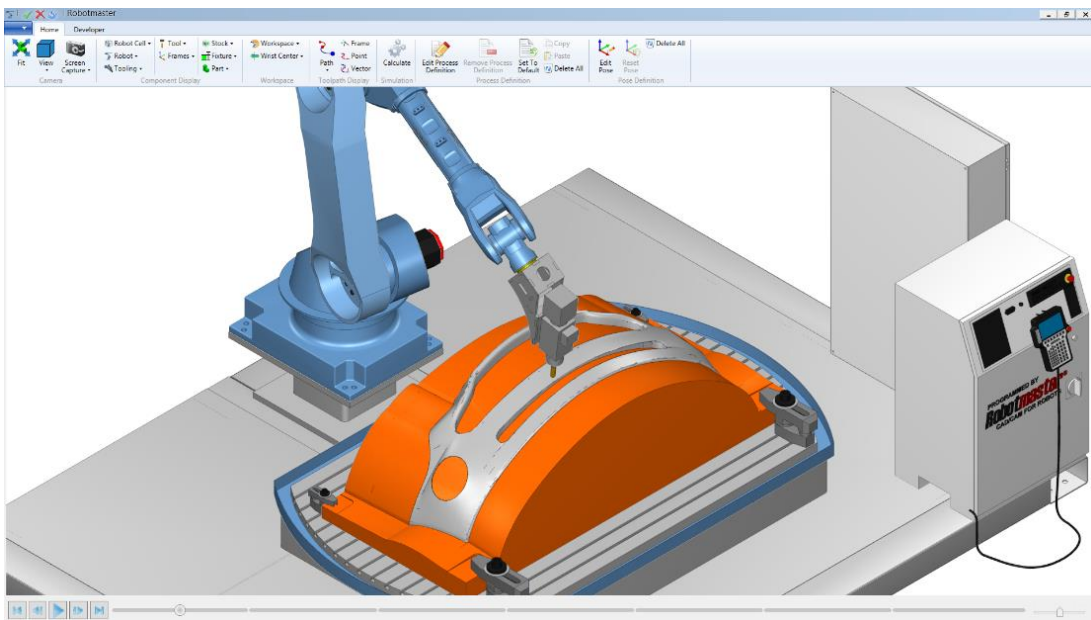


Figura 13 Robotmaster V6 [33]

O *software* Robotmaster permite um controlo fácil e interativo dos robôs, deixando modificar as posições do robô e as suas trajetórias, manualmente ou automaticamente,

arrastando os braços ou os eixos do robô, as ferramentas ou a peça que está a ser trabalhada. A última versão deste *software* é o Robotmaster V6, que contém ferramentas de programação CAD/CAM e uma otimização exclusiva a robôs (o *software* integra a simulação e a geração de programas para qualquer plataforma CAD/CAM). A abordagem *multi-software* permite a utilização de um único *software* CAD/CAM para a programação do robô, conversão das trajetórias em posições do robô, e simulação para validar as trajetórias calculadas. O *software* cria programas *offline*, eliminando a perda de tempo na linha de produção durante a fase de programação, e cria trajetórias de um modo preciso, sejam elas simples ou complexas [34].

A nível de vantagens, pode-se afirmar que o Robotmaster permite [34]:

- um custo efetivo e flexibilidade dos robôs;
- programar robôs num *software* CAD/CAM de um modo fácil;
- às empresas que usam este *software* competir no mercado a nível de custo, flexibilidade e tempo de resposta.

### SprutCAM Robot

A Sprut Technology é uma empresa Russa que já desenvolve aplicações de *software* CAM desde o ano de 1993. O *software* SprutCAM Robot (cuja interface gráfica se apresenta na Figura 14) encontra-se na versão 10 e permite a programação *offline* de robôs industriais de empresas tais como FANUC, KUKA, ABB, Yaskawa Motoman, entre outras.

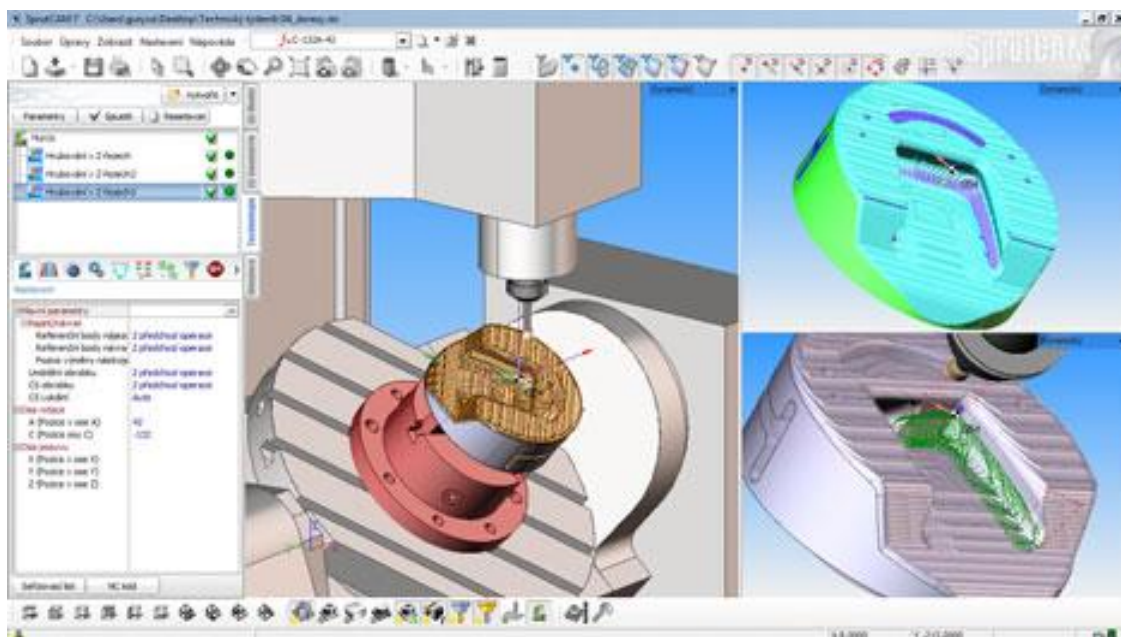


Figura 14 SprutCAM 7 [35]

Tal como o *software* Robotmaster, o SprutCAM Robot é utilizado na programação de robôs para as mesmas aplicações industriais e, de acordo com o fabricante, apresenta as seguintes vantagens [36]:

- uma simulação precisa da cinemática dos robôs;
- simulação da remoção de material;
- deteção de colisões;
- deteta as singularidades do robô e as zonas fora de alcance.

### RobotStudio Machining PowerPac

O RobotStudio Machining PowerPac, cujo conteúdo gráfico se apresenta na Figura 15, é um *add-in* para o *software* RobotStudio da ABB. Este *add-in* cria e otimiza as trajetórias de maquinagem e reduz a complexidade e o custo da programação, melhorando a qualidade do produto final. É utilizado para a programação de aplicações, nomeadamente: maquinagem, polimento, rebarbagem, etc. Pode ser utilizado em conjunto com outros *programas* CAD/CAM e permite aos utilizadores configurar o sistema para uma aplicação específica. Este *PowerPac* converte código de máquinas CNC para código RAPID (linguagem de programação dos robôs da ABB).

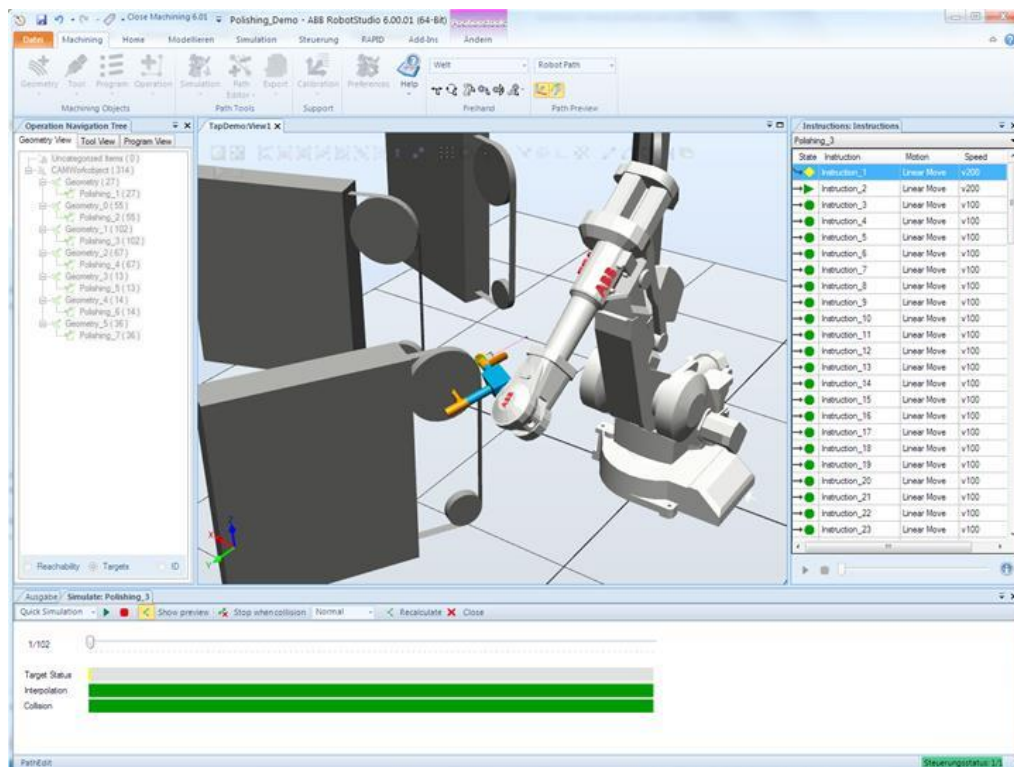


Figura 15 RobotStudio Machining PowerPac [37]

## PowerMILL Robot

O PowerMILL Robot (Figura 16) é um programa desenvolvido pela Delcam, empresa sediada no Reino Unido e que fornece soluções CAD/CAM avançadas para a indústria da maquinagem. Este *software* é usado para as seguintes aplicações:

- escultura de pedra e madeira;
- maquinagem de espuma rígida;
- rebarbagem;
- polimento.

Com este programa é possível programar robôs com eixos externos como, por exemplo, mesas rotativas, e permite uma simulação precisa em três dimensões. Tal como nos programas descritos anteriormente, o PowerMILL Robot também deteta erros como singularidades e alcance, permitindo assim efetuar uma programação correta. As simulações podem ser convertidas em linguagens de programação de robôs de vários fabricantes, não sendo necessário nenhum programa externo para fazer essas conversões [38].

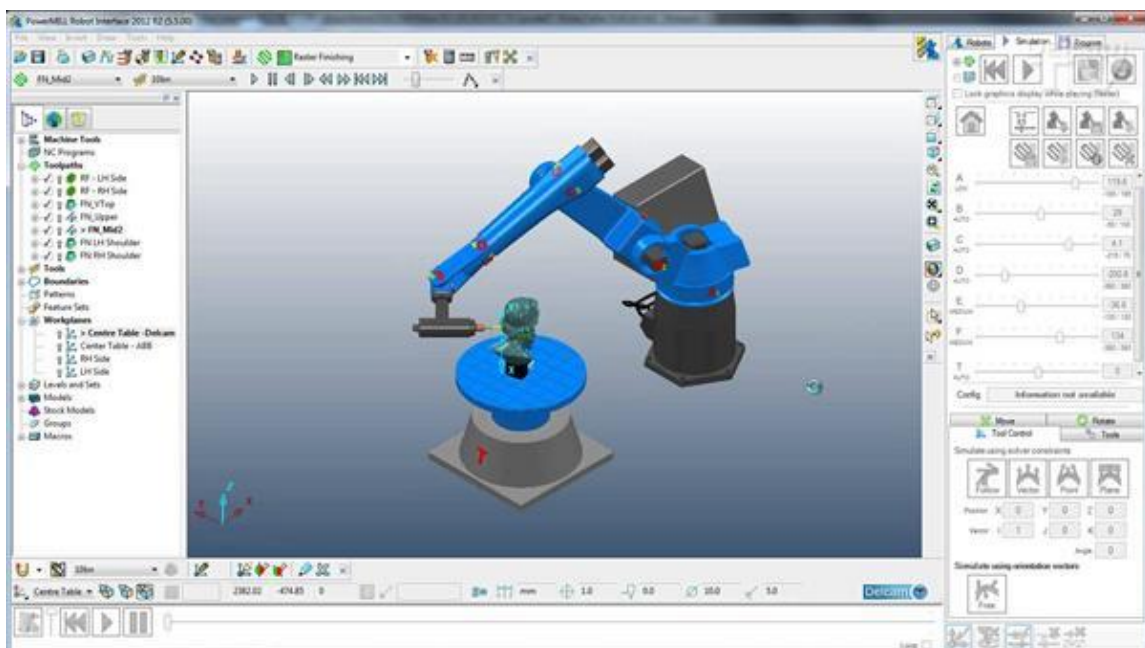


Figura 16 PowerMILL Robot [39]

## NX CAM Robotics Machining

O NX CAM Robotics Machining (Figura 17) é um *software* da SIEMENS que permite a programação e simulação de robôs industriais para tarefas de maquinagem. De acordo com o seu fabricante, tem como principais características [40]:

- criação de programas com trajetórias complexas;
- validação de programas através da simulação a três dimensões em interface gráfico;
- suporta robôs de vários fabricantes;
- suporta eixos externos;
- análise estática e dinâmica de colisões, alcance e singularidades.

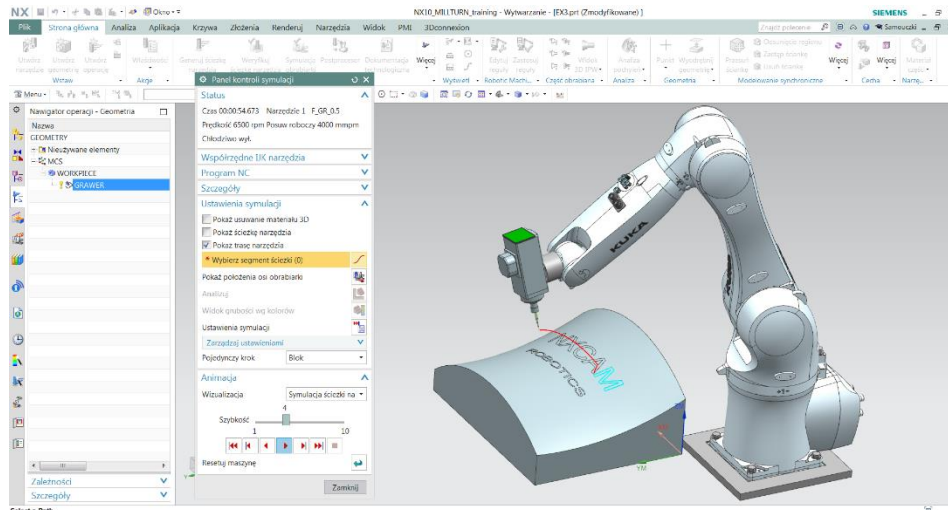


Figura 17 NX CAM Robotics Machining [41]

## 2.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os robôs industriais dando a conhecer a sua definição, as vantagens e desvantagens da utilização de robôs no geral, os componentes básicos e as principais configurações físicas dos robôs industriais, alguns conceitos utilizados na robótica, normas de segurança, a programação de robôs e as suas principais aplicações industriais.

Realizada a introdução aos robôs industriais, foi referido o tema da maquinagem de objetos apresentando algumas tarefas como, por exemplo, tornear, fresar, roscar e perfurar (tarefas estas normalmente realizadas por máquinas-ferramentas). Foram mencionadas vantagens do uso de robôs neste tipo de tarefas, apresentando alguns exemplos práticos já existentes, sendo feita uma comparação entre robôs e as máquinas-ferramentas.

Por fim, foram mencionados alguns programas CAM que permitem a programação de robôs para este tipo de operações, realçando as principais características de cada um.



# 3. ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo será feita a descrição do problema, no qual se abordará quais os seus requisitos, os componentes já existentes, os componentes que não existiam e de que maneira foram obtidos.

## 3.1. REQUISITOS DO SISTEMA

Conforme já mencionado na Secção 1.2, o objetivo a alcançar é a maquinagem de peças desenhadas em *software* CAD, em blocos de esferovite, poliuretano ou material similar, com recurso a um sistema robótico e a programas CAD/CAM. Para solucionar o problema são necessários:

- *software* CAD;
- programas CAD/CAM para a programação da solução;
- robô industrial e respetivo controlador;
- ferramenta (a anexar ao robô) e respetivo material de fixação ao robô;
- material a maquinar.

### **3.1.1. SOFTWARE CAD**

O *software* CAD utilizado neste projeto é o Autodesk Inventor Professional 2014 pois é um *software* que é utilizado numa unidade curricular do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (Sistemas Flexíveis de Fabrico), encontrando-se já disponível. Este *software* permite a modelação de objetos 3D, sendo utilizado neste trabalho para modelar os componentes presentes na célula robótica existente, as peças que permitem a fixação da ferramenta ao robô e as peças a serem maquinadas.

### **3.1.2. PROGRAMAS CAD/CAM**

Os programas CAD/CAM são utilizados para a programação das tarefas a desempenhar pelo robô industrial. Após contactos com empresas que disponibilizam programas deste género, somente duas facultaram de forma gratuita licenças para os seus programas, nomeadamente:

- ABB – Machining PowerPac 5.15;
- SprutCAM – SprutCAM 10.

O PowerPac disponibilizado pela ABB é utilizado juntamente com o *software* para programar os robôs industriais dessa marca, o RobotStudio, cuja versão 5.15.02 já se encontrava disponível devido a ser utilizado numa unidade curricular do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (Robótica Industrial).

### **3.1.3. ROBÔ INDUSTRIAL E CONTROLADOR**

O sistema robótico utilizado neste trabalho (mostrado na Figura 18) encontra-se presente na sala F520 do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, do Instituto Superior de Engenharia do Porto. O robô utilizado é o modelo ABB IRB140, sendo o seu controlador o ABB IRC5 (modelo *Single Cabinet*). Aquando do início do projeto, o robô industrial tinha uma ferramenta acoplada para tarefas de *pick-and-place*, sendo necessária a sua substituição por uma ferramenta capaz de efetuar tarefas de maquinagem no material escolhido.

O robô industrial utilizado tem seis eixos, uma capacidade de carga de 6 quilogramas, um alcance de 810 milímetros e uma repetibilidade de 0,03 milímetros [42]. Pode ser instalado no chão, de forma invertida ou na parede (em qualquer ângulo). Os dados técnicos deste modelo da ABB podem ser encontrados no *datasheet* disponível no Anexo A.



**Figura 18** Célula robótica existente no DEE-ISEP

O controlador IRC5 é conhecido por oferecer segurança, rapidez, precisão e compatibilidade. Otimiza o desempenho do robô reduzindo o tempo de ciclo (QuickMove) e fornece uma boa precisão nas trajetórias (TrueMove) [43]. O modelo deste controlador que se encontra instalado no DEE é o *Single Cabinet* (Figura 19). Este modelo tem a capacidade de controlar até quatro robôs industriais. Outros dados relativamente a este controlador podem ser encontrados no *datasheet* no Anexo B.



**Figura 19** Controlador ABB IRC5 *Single Cabinet* [43]

### 3.1.4. FERRAMENTA E MATERIAL DE FIXAÇÃO

No mercado global existem empresas que se dedicam à comercialização de ferramentas para maquinagem (*spindles*) de uso robótico ou de máquinas CNC. Algumas dessas empresas são a Precision Drive Systems<sup>1</sup>, a ZIMMER<sup>2</sup>, a ATI<sup>3</sup>, a ELTE<sup>4</sup>, a HSD Mechatronics<sup>5</sup> e a MANNESMANN DEMAG<sup>6</sup>.

No entanto, e apesar da vasta gama de ferramentas que estas empresas comercializam, poucas são as ferramentas que podem ser utilizadas no projeto. Um dos fatores fulcrais de não terem sido escolhidos produtos das empresas acima mencionadas prende-se com a capacidade de carga do robô ABB IRB 140 ser de seis quilogramas e muitas das ferramentas disponíveis terem um peso superior a esse. A alternativa encontrada foi a utilização de uma ferramenta da DREMEL, empresa que comercializa ferramentas rotativas de alta velocidade. O modelo escolhido para este trabalho foi a DREMEL 3000 (Figura 20).



Figura 20 Ferramenta DREMEL 3000 [44]

---

<sup>1</sup> [www.pdsspindles.com](http://www.pdsspindles.com)

<sup>2</sup> [www.zimmer-group.de](http://www.zimmer-group.de)

<sup>3</sup> [www.ati-ia.com](http://www.ati-ia.com)

<sup>4</sup> [www.eltesrl.com](http://www.eltesrl.com)

<sup>5</sup> [www.hsdusa.com](http://www.hsdusa.com)

<sup>6</sup> [www.mannesmann-demag.com](http://www.mannesmann-demag.com)

Contudo, esta ferramenta não fica fixa ao robô por si só, tendo sido necessário desenhar e produzir peças que permitam a fixação da DREMEL ao robô ABB IRB140, que se encontram apresentadas no capítulo seguinte.

### **3.1.5. MATERIAL A MAQUINAR**

O material escolhido para ser maquinado pelo robô foi esferovite. A escolha deste tipo de material deve-se ao facto de já se encontrar disponível no laboratório, de ser leve e de poder ser facilmente maquinado pela ferramenta, não apresentando grande risco de danificar o robô ou a ferramenta.

Tal como para a ferramenta, são desenhados no *software* de CAD as geometrias finais das peças de esferovite, sendo estes desenhos posteriormente importados para os programas CAD/CAM.

## **3.2. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO**

Neste capítulo foi realizado um levantamento dos requisitos do sistema, isto é, dos componentes necessários para a realização deste trabalho. Foram apresentados os componentes já existentes e de que forma foram obtidos os componentes em falta. Foi explicado que foram contactadas várias empresas que disponibilizam programas CAD/CAM de programação de robôs mas que nem todas forneciam licenças para estudantes de forma gratuita e explicado porque se escolheu a ferramenta DREMEL, ao invés de outras ferramentas para maquinagem.

No geral, a apresentação dos componentes foi efetuada de uma forma breve, sendo realizado um estudo técnico mais detalhado no capítulo seguinte.



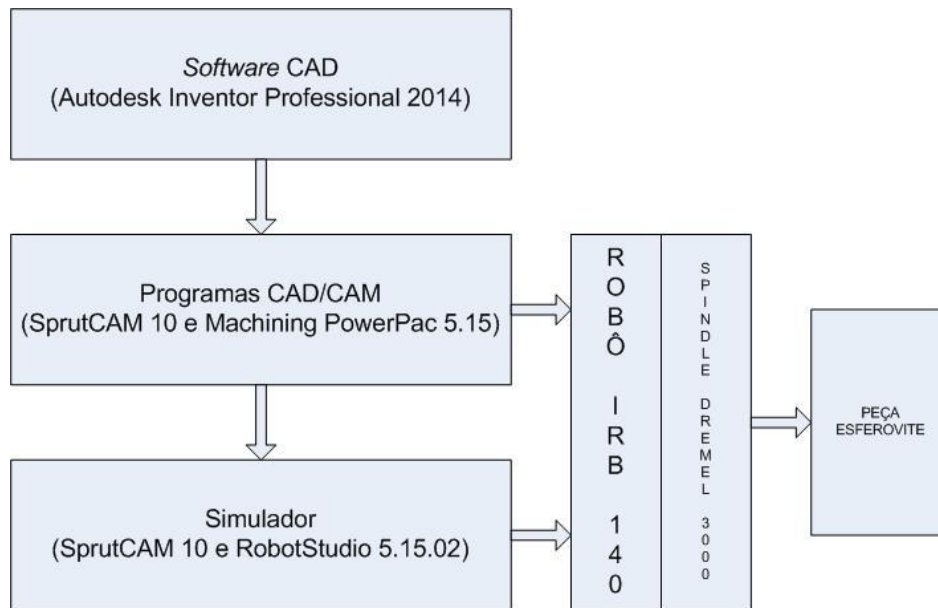
# 4. ARQUITETURA DA SOLUÇÃO

Este capítulo aborda a arquitetura da solução para o problema enunciado no capítulo anterior (Capítulo 3). Visto que o sistema robótico existente já foi descrito, será agora explicado o funcionamento da solução, com recurso a um diagrama de blocos e a um fluxograma. Serão também mencionados os dados relativos à ferramenta e de que forma se solucionou o problema da fixação da mesma. Mostrar-se-á o resultado final da célula robótica real e o resultado da modelação da mesma nos programas de CAD/CAM utilizados neste trabalho. Finalmente, serão apresentadas quais as peças a serem maquinadas.

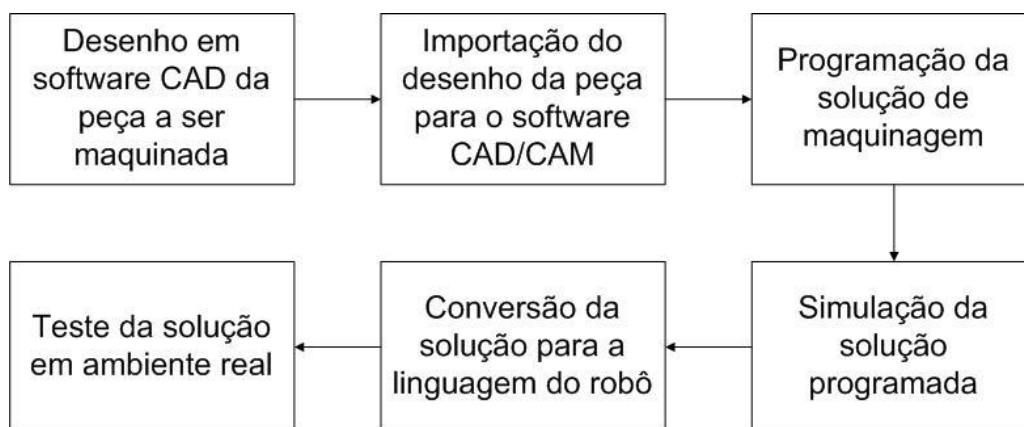
## 4.1. DIAGRAMA DE BLOCOS E FLUXOGRAMA DA SOLUÇÃO

As figuras seguintes mostram o diagrama de blocos (Figura 21) e o fluxograma (Figura 22) da solução encontrada para alcançar o objetivo do trabalho, ou seja, a maquinação de peças pelo robô industrial. Como se pode ver na Figura 22, as peças a serem maquinadas são desenhadas no *software* CAD, sendo depois importadas para os programas CAD/CAM para a programação da solução robótica. Após a programação pode-se simular a mesma para verificar se o robô efetua todos os movimentos de forma correta. Por fim, o programa é

convertido na linguagem do robô utilizado e são realizados os testes da solução em ambiente real usando a ferramenta adquirida.



**Figura 21 Diagrama de blocos da arquitetura da solução**



**Figura 22 Fluxograma da solução do problema**

## 4.2. FERRAMENTA E FRESAS PARA MAQUINAGEM

### 4.2.1. DADOS TÉCNICOS DA FERRAMENTA

A ferramenta utilizada, a DREMEL 3000, tem uma velocidade regulável entre as dez e as trinta e três mil rotações por minuto, não necessita de chave para trocar acessórios (o que ajuda na troca destes) e possui um botão para bloqueio da pinça. A ferramenta tem também um botão que permite regular a velocidade, tendo esse as seguintes posições: OFF, 2, 4, 6,

8, 10. Na Figura 23 pode-se observar a gama de velocidades a que diz respeito cada uma das posições.

<b>Modelo 3000</b>	
<b>Posições do interruptor</b>	<b>Variação de velocidade (RPM)</b>
1-2	10.000-14.000
3-4	15.000-19.000
5-6	20.000-23.000
7-8	24.000-28.000
9-10	29.000-33.000

**Figura 23** Gama de velocidades da DREMEL 3000 [45]

Outras especificações técnicas da DREMEL 3000 estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** Especificações técnicas DREMEL 3000 [44]

<b>Potência nominal consumida:</b>	130 W
<b>Tensão:</b>	230 V
<b>Peso:</b>	0,55 kg

#### **4.2.2. FRESAS UTILIZADAS**

O *kit* adquirido incluía três diferentes fresas para fixar à ferramenta. Os três diferentes tipos de fresas de alta velocidade encontram-se ilustrados na Figura 24. As fresas de alta velocidade podem ser usadas para modelar, escavar cavidades, fazer ranhuras, entalhes e orifícios cuneiformes em metais macios, plásticos e madeiras [46]. As dimensões de cada uma das fresas encontram-se disponíveis no Anexo C.



**Figura 24** Fresas DREMEL de alta velocidade [46]

### 4.2.3. MODELAÇÃO DAS FRESAS

De forma a poder programar a solução com o maior rigor possível, foi necessário criar três desenhos diferentes para cada uma das fresas (Figura 25). Cada uma das fresas foi desenhada, usando o *software* de CAD, com um comprimento de 2,5 cm desde a entrada da fresa na DREMEL até à ponta de trabalho da fresa.

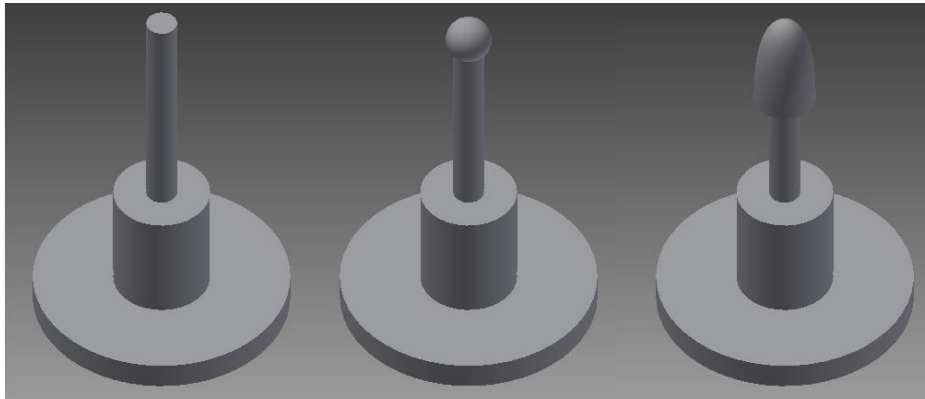


Figura 25 Desenhos 3D das diferentes fresas

Para tal e após inicializar o *software* CAD, escolhe-se a opção “*Standard (mm).ipt*” (Figura 26)

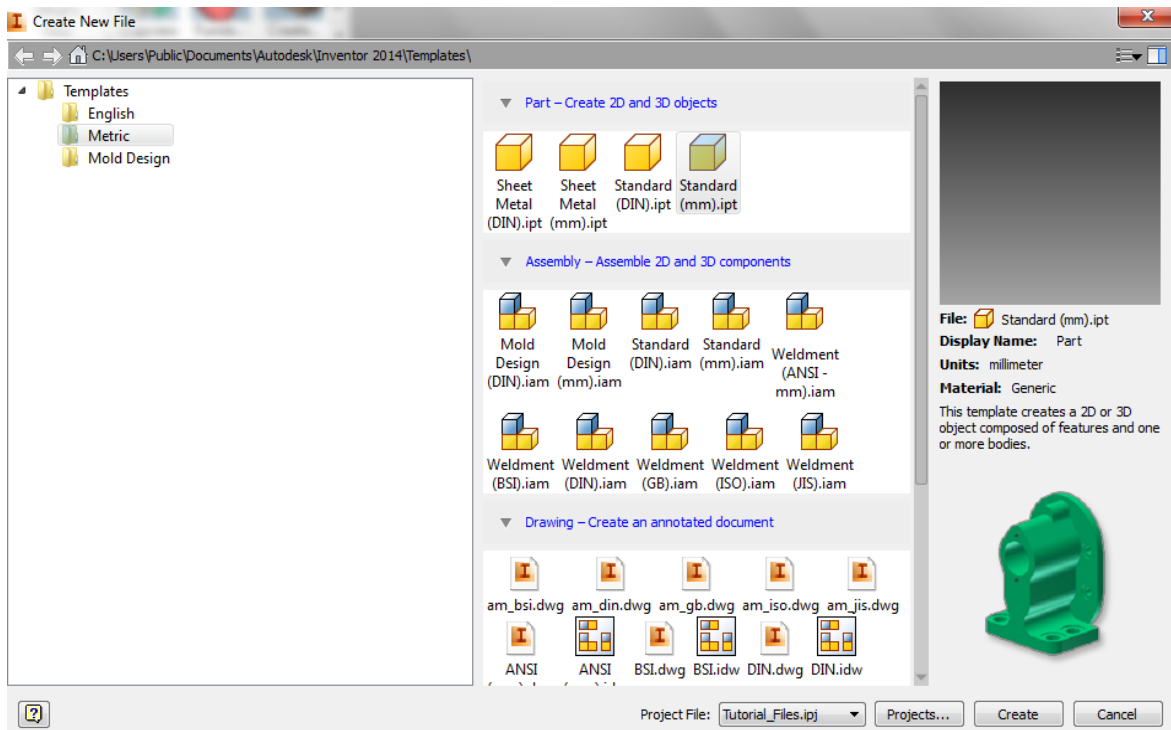


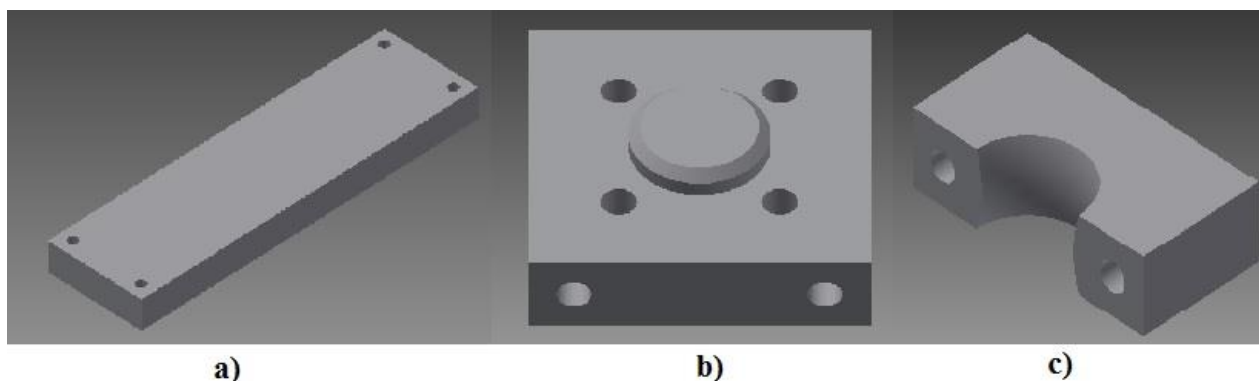
Figura 26 Criação de ficheiro “.ipt”

Criado o ficheiro, começa-se por escolher a opção “*Create 2D Sketch*”, escolhendo o plano do eixo dos ZZ. O *software* permite selecionar várias opções para desenhar a forma dos objetos pretendidos (*Line, Circle, Arc, Rectangle, etc*). Após finalizar cada *sketch* é feito o “Extrude” da mesma para obter o formato final das fresas.

#### 4.2.4. MODELAÇÃO DO SUPORTE DA FERRAMENTA

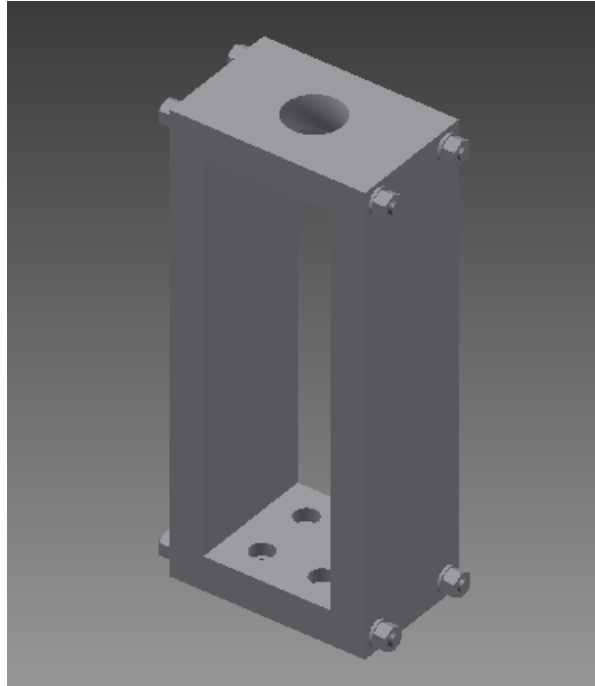
As peças para solucionar o suporte da ferramenta foram desenhadas usando o *software* de CAD. Os ficheiros são guardados nas extensões “.sat” e “.stp” para serem posteriormente importados para os programas CAD/CAM. No total foram desenhadas três peças diferentes, tendo estas sido posteriormente fabricadas nos Laboratórios de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto. No total foram fabricadas cinco unidades, nomeadamente:

- peça lateral – 2 unidades (Figura 27 - esquerda);
- peça de fixação ao robô – 1 unidade (Figura 27 - centro);
- peça de fixação da DREMEL – 2 unidades (Figura 27 - direita).



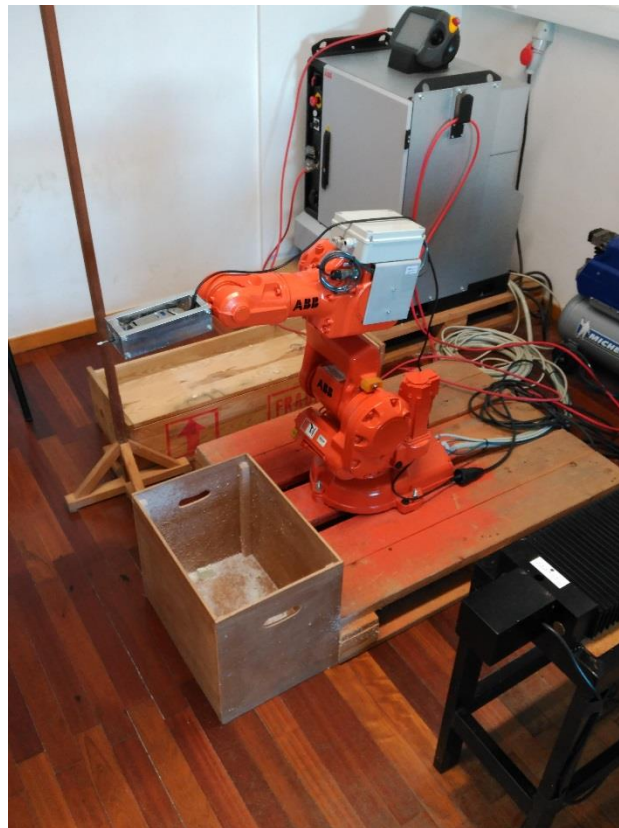
**Figura 27 Peças para fixar DREMEL ao robô**

Montando todas as peças, o aspeto final do suporte da ferramenta é o visível na Figura 28. As peças foram desenhadas com os formatos acima observados pois permitem uma boa fixação da ferramenta, não permitindo que esta se mexa e permitindo a substituição das fresas de uma forma rápida e eficaz devido ao facto de as peças de fixação não interferirem com o botão de bloqueio da pinça. Para além disso, o material em que as peças de fixação foram fabricadas apresenta uma boa rigidez e o seu peso é suportável pelo robô utilizado.



**Figura 28** Desenho 3D do suporte da ferramenta

A Figura 29 mostra o resultado final da ferramenta fixada ao robô industrial.



**Figura 29** Ferramenta montada na célula robótica real

### 4.3. MODELAÇÃO NOS PROGRAMAS UTILIZADOS

Em ambos os programas foi necessário fazer a modelação da célula robótica existente, de modo a que esta se aproximasse o melhor possível da célula real. As figuras seguintes (Figura 30 e Figura 31) mostram a célula modelada em cada um dos programas mencionados.

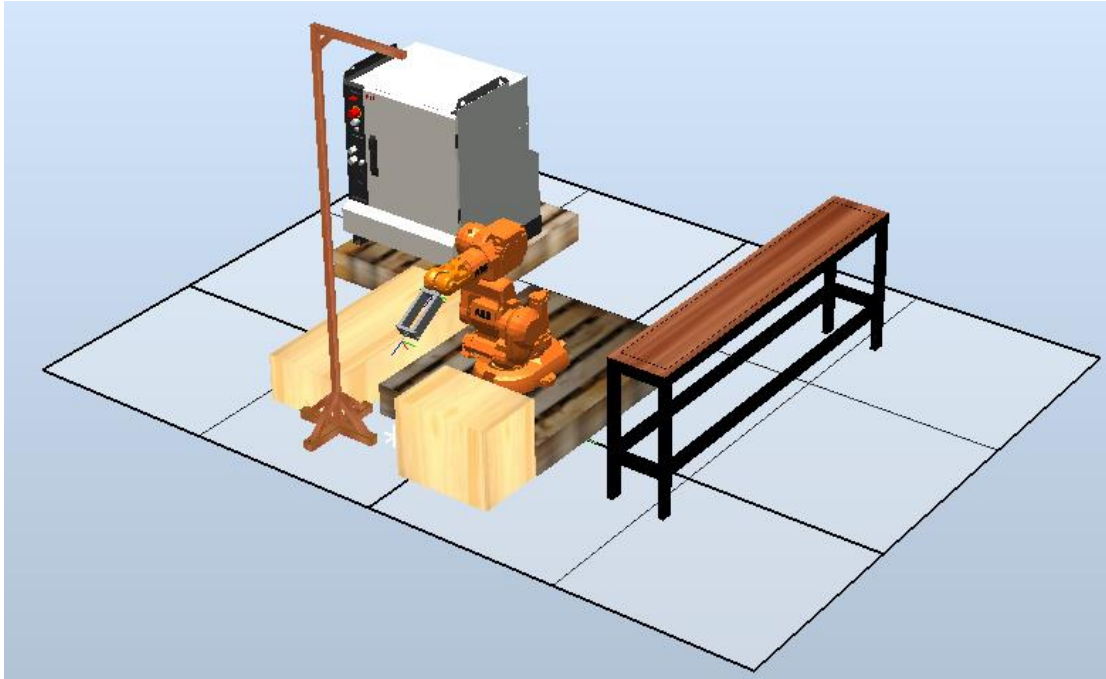


Figura 30 Célula robótica modelada no RobotStudio 5.15.02

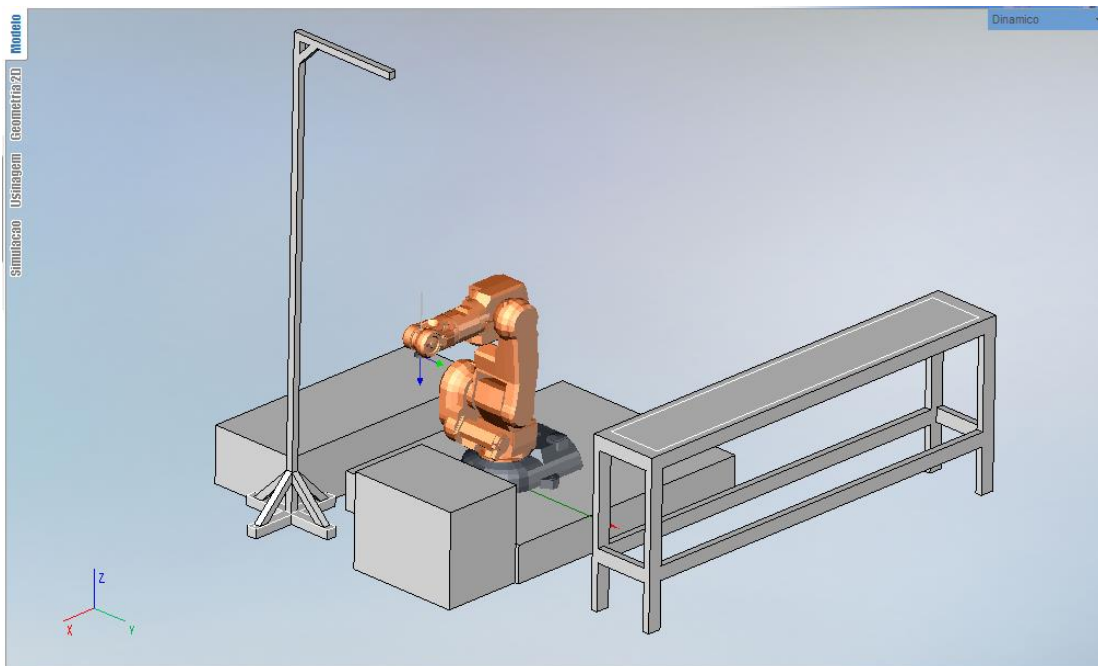


Figura 31 Célula robótica modelada no SprutCAM 10

#### 4.4. PEÇAS A MAQUINAR

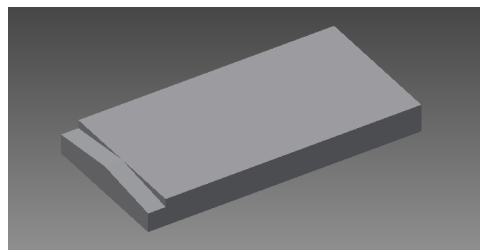
Os blocos de esferovite utilizados já se encontravam disponíveis no laboratório, mas não tinham as mesmas dimensões. No total eram 8 blocos de esferovite, com as dimensões apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 Dimensões iniciais dos blocos de esferovite**

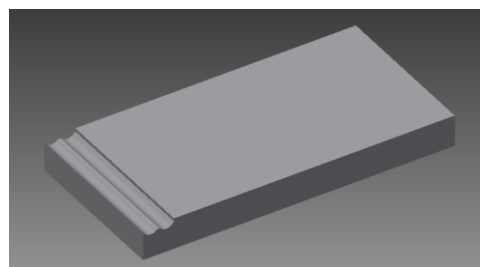
Quantidade	Dimensões		
	Comprimento	Largura	Altura
4	50 centímetros	35 centímetros	5 centímetros
2	50 centímetros	30 centímetros	5 centímetros
1	50 centímetros	25 centímetros	5 centímetros
1	50 centímetros	22 centímetros	5 centímetros

Ao todo foram desenhados cinco objetos diferentes, com um grau de complexidade crescente, que permitem testar diferentes aspectos de maquinagem. Os objetos estão apresentados nas figuras seguintes, nomeadamente:

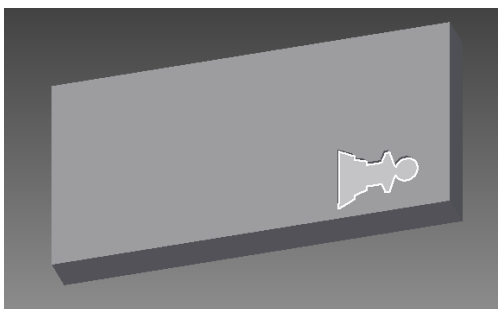
- rampa – Figura 32;
- ondulado – Figura 33;
- peão – Figura 34;
- símbolo DEE – Figura 35;
- face – Figura 36.



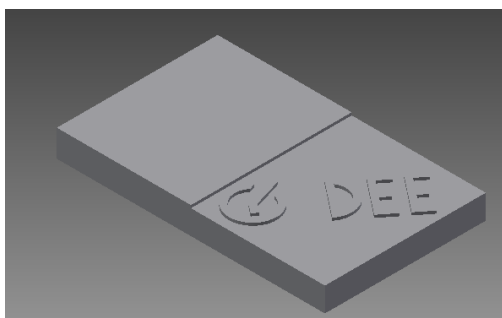
**Figura 32 Rampa**



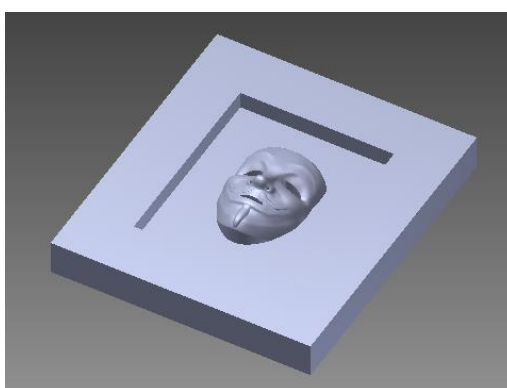
**Figura 33 Ondulado**



**Figura 34 Peão**



**Figura 35 DEE**



**Figura 36 Face**

#### **4.5. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO**

Este capítulo apresentou o diagrama de blocos e o fluxograma da solução encontrada para o problema enunciado no capítulo anterior. Foi explicado, passo-a-passo, o funcionamento da solução, sendo apresentados os dados técnicos da ferramenta, das fresas e dos blocos de esferovite utilizados. Foi explicado como se resolveu o problema de fixação da ferramenta ao robô industrial e foram apresentados os resultados da modelação da célula robótica real nos programas utilizados, não dando uma explicação de como foi realizada visto que não se enquadra nos objetivos deste trabalho.



# 5. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

Neste capítulo são descritos os métodos e procedimentos que foram utilizados para a implementação da solução do problema em cada um dos programas mencionados no capítulo anterior.

## 5.1. ROBOTSTUDIO 5.15.02 COM MACHINING POWERPAC 5.15

Após a modelação da célula robótica no *software*, procedeu-se à inicialização do Machining PowerPac, na aba “Add-Ins” e ativando o botão “Machining 5.15”. Inicializando o PowerPac, surge uma nova aba “Machining” conforme se pode observar na Figura 37.

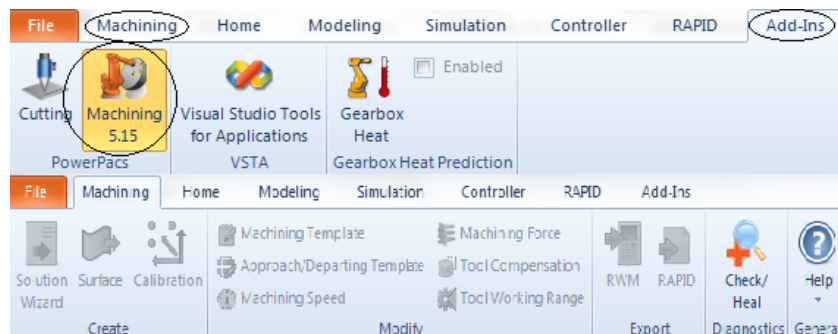
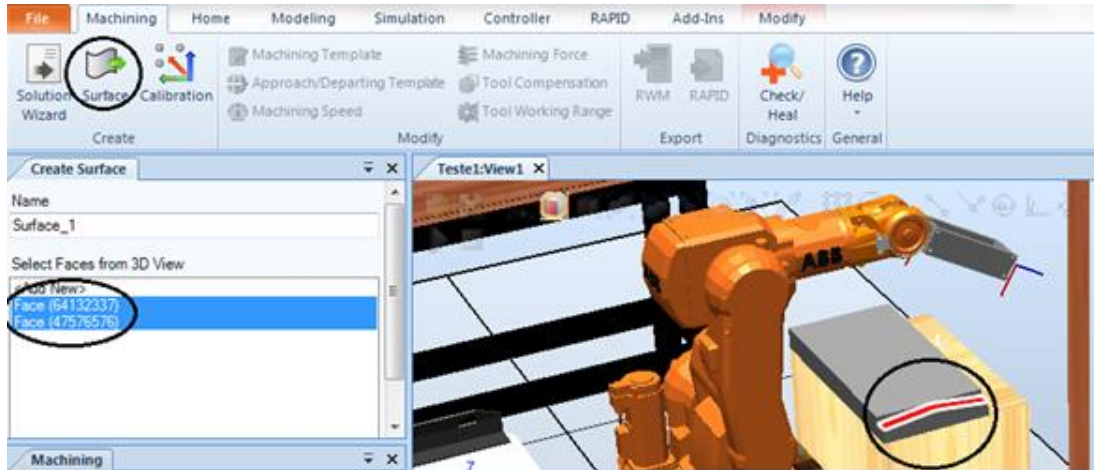


Figura 37 Inicialização do Machining PowerPac 5.15

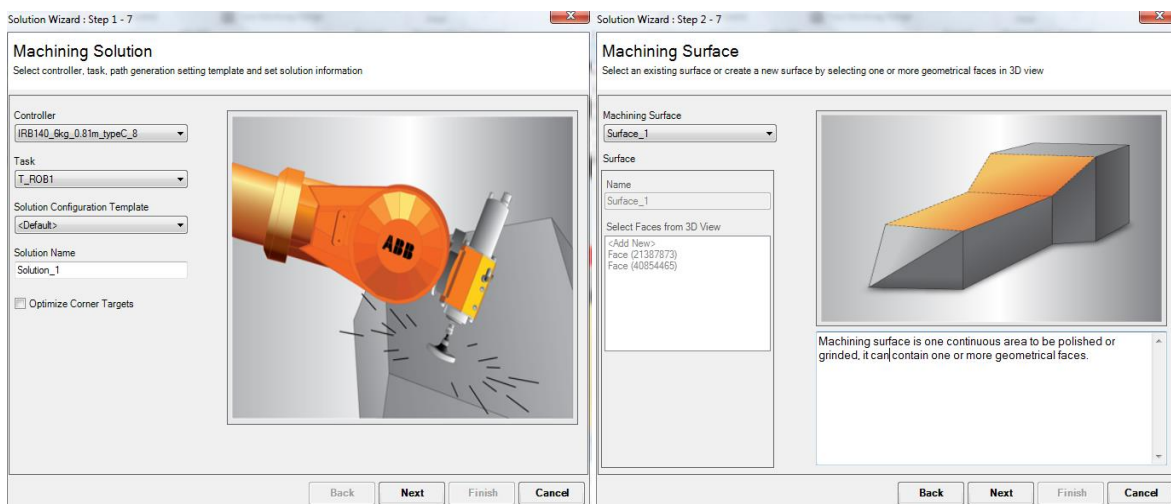
O passo seguinte engloba a seleção de todas as superfícies (*Surface*) que irão ser trabalhadas. Após o carregamento dos modelos das peças para o *software*, carrega-se no ícone “*Surface*”, que se encontra na aba “*Machining*”, e seleciona-se as superfícies que serão maquinadas. A Figura 38 mostra as superfícies selecionadas para o caso da peça “*Rampa*”.



**Figura 38** Seleção das faces a serem maquinadas

Após a seleção das faces, e continuando na aba “*Machining*”, escolhe-se o ícone “*Solution Wizard*” para iniciar o processo de geração das trajetórias de maquinagem. O processo é constituído por sete passos que estão exemplificados nas figuras seguintes.

Na Figura 39 estão representadas a primeira e a segunda janela do “*Solution Wizard*”. Na janela à esquerda é realizada a configuração do robô associado à solução (*Controller*), da tarefa (*Task*), os valores padrão para configuração da solução (*Solution Configuration Template*) e o nome da solução (*Solution Name*).

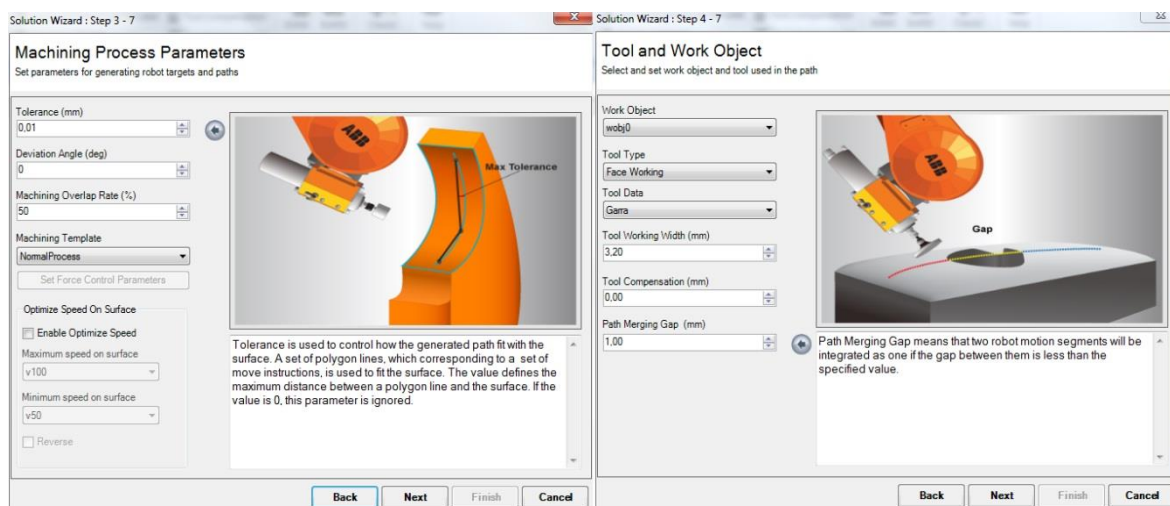


**Figura 39** Primeiro e segundo passo do “*Solution Wizard*”

Ao colocar um visto na opção “*Optimize Corner Targets*”, a aplicação otimiza os pontos (*targets*) que se encontram nos cantos da superfície aquando da compensação de uma trajetória. Após consultar o manual do “*Machining PowerPac*”, sabe-se que esta função é especialmente utilizada quando a trajetória é realizada na direção do eixo dos yy do sistema de coordenadas.

Na janela à direita é feita a escolha da superfície a ser maquinada (*Machining Surface*) sendo que se o “*Solution Wizard*” for escolhido com a face selecionada, ela fica escolhida automaticamente.

A terceira e quarta janela do “*Solution Wizard*” encontram-se na Figura 40. Na janela à esquerda (Passo 3) é configurada a tolerância (*Tolerance*), o ângulo de desvio (*Deviation Angle*), a taxa de sobreposição de maquinagem (*Machining Overlap Rate*), o modelo de maquinagem (*Machining Template*) e a velocidade da ferramenta quando em contacto com a superfície da peça (*Optimize Speed On Surface*).



**Figura 40** Terceiro e quarto passo do “*Solution Wizard*”

O valor da tolerância define a distância máxima entre a linha da trajetória e a superfície a maquinar. O ângulo de desvio é o ângulo máximo permitido entre linhas tangentes de dois pontos adjacentes numa trajetória. A taxa de sobreposição de maquinagem é a percentagem de sobreposição entre duas trajetórias adjacentes.

Na janela à direita (Passo 4) é configurado o *Work Object*, o tipo de ferramenta (*Tool Type*), os dados da ferramenta (*Tool Data*), a largura da ferramenta de trabalho (*Tool Working Width*), a compensação da ferramenta (*Tool Compensation*) e a distância entre duas trajetórias (*Path Merging Gap*).

O tipo de ferramenta apresenta duas opções: *Face Working* (maquinagem com a face frontal da ferramenta) ou *Side Working* (maquinagem com a face lateral da ferramenta) e o *Path Merging Gap* significa que duas trajetórias irão ser integradas como uma se a distância entre elas for inferior ao valor inserido.

A antepenúltima e penúltima janela da configuração da solução estão apresentadas na Figura 41. No quinto, e antepenúltimo, passo são configurados os parâmetros para a geração do caminho a percorrer pela ferramenta.

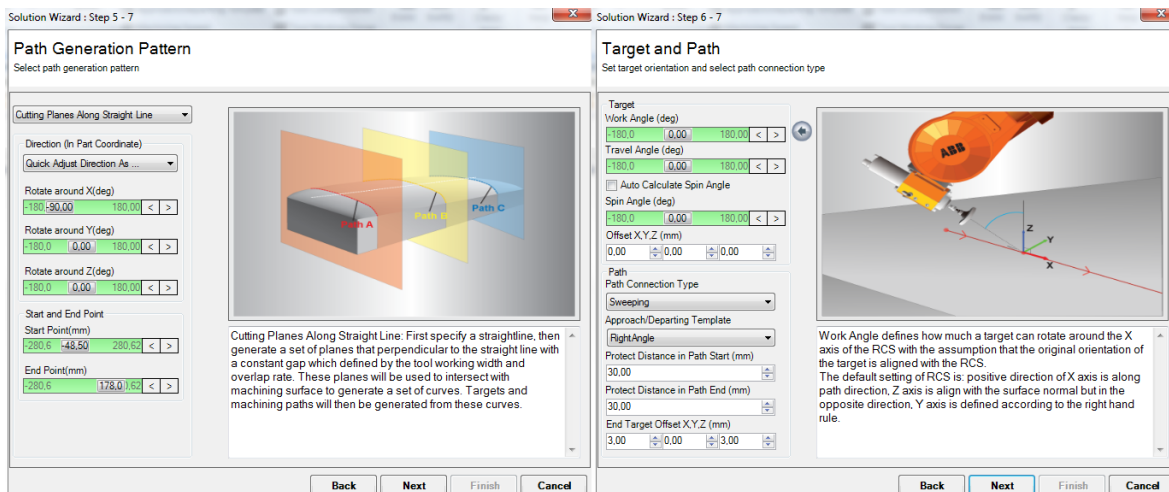


Figura 41 Quinto e sexto passo do “Solution Wizard”

É possível escolher entre seis padrões para a criação de trajetórias de maquinagem, nomeadamente: *Cutting Planes Along Straight Line*, *Cutting Planes Along Customized Line*, *Circular Cutting Planes*, *ISO Parametric Lines*, *Customized Points* e *Edges*.

Após simular com os vários tipos de trajetórias, conclui-se que as opções “*Cutting Planes Along Straight Line*” e “*Circular Cutting Planes*” apresentavam as trajetórias mais coerentes, sendo que a primeira engloba toda a face da peça a ser maquinada.

O padrão escolhido para este trabalho foi portanto o “*Cutting Planes Along Straight Line*”. Ao selecionar esta opção o *software* especifica uma linha reta e gera um conjunto de planos que são perpendiculares a essa linha, separados por uma distância constante que é definida pela largura da ferramenta de trabalho e a taxa de sobreposição.

Estes planos serão usados para intersectar com a superfície a ser maquinada, de forma a criar um conjunto de curvas que irão posteriormente gerar os pontos e as trajetórias de maquinagem.

Após a seleção deste padrão é possível configurar a direção, a rotação em torno de cada eixo e o ponto inicial e final de cada plano.

Para além da direção definida manualmente, é possível escolher outras opções, tais como:

- *quick adjust direction as...* (definido manualmente);
- *along local axis X*;
- *along local axis Y*;
- *along local axis Z*;
- *along global axis X*;
- *along global axis Y*;
- *along global axis Z*;
- *along UCS axis X*;
- *along UCS axis Y*;
- *along UCS axis Z*;
- *along face normal*.

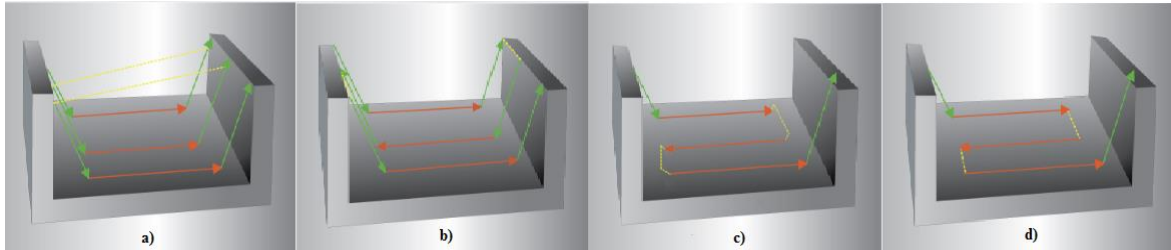
Após várias simulações com os diferentes tipos de direções concluiu-se que o *software* Machining PowerPac não realiza o desbaste da peça por camadas, dirigindo-se logo à face escolhida, concluindo-se que a sua utilização só engloba tarefas de acabamento (lixar e polir). Visto que em certas peças ou o suporte da ferramenta entrava em contacto com o bloco de esferovite ou eram maquinadas zonas que não deveriam ser, este *software* só foi utilizado na peça “Rampa” sendo depois comparado o acabamento entre este *software* e o SprutCAM.

A direção escolhida para as peças a maquinar foi “*along global axis Y*”. As simulações realizadas mostram que esta opção não maquina áreas do bloco de esferovite que não sejam para maquinar, o que acontece com a opção “*along global axis X*”. A opção “*along global axis Z*” não maquina toda a superfície escolhida da peça. Dependendo da orientação da peça, cada uma das opções “*along local*” é semelhante a uma opção “*along global*”.

No sexto e penúltimo passo são configurados os parâmetros relacionados com a ferramenta (*Work Angle*, *Travel Angle*, *Spin Angle* e *Tool Working Range* se estiver um visto na opção *Auto Calculate Spin Angle*) e de que maneira as trajetórias de maquinagem estão relacionadas entre si, isto é, o tipo de movimentação a efetuar entre trajetórias (*Path Connection Type*).

É possível escolher entre quatro tipos:

- *sweeping* (Figura 42 – a);
- *clipping* (Figura 42 - b);
- *miniclipping* (Figura 42 - c);
- *miniclipping without lifting* (Figura 42 - d).



**Figura 42 Path Connection Type – Machining PowerPac 5.15**

Após simular os diferentes tipos de movimentação, verifica-se que para as opções “*sweeping*” e “*clipping*” a solução não apresenta erros. No entanto, nas outras duas soluções aparece um erro na simulação (“*Robot Axes Configuration*”). Para solucionar este problema altera-se a orientação e a configuração de alguns dos *targets* gerados pelo Machining PowerPac.

O parâmetro “*Approach/Departing Template*” define como é que o robô se aproxima do primeiro *target* e como é que se distancia do último *target* de uma trajetória. A opção escolhida para este parâmetro foi: “*AcuteAngle\_30\_deg*” devido a ser a que apresenta, na simulação, os tempos de maquinagem mais rápidos.

A tabela seguinte (Tabela 5) apresenta os tempos de simulação dos diferentes tipos de movimentação para a peça “Rampa” a uma velocidade de 100 mm/s, com as opções “*along global axis Y*” e “*AcuteAngle\_30\_deg*”, tendo a peça de esferovite as dimensões “50 × 25 × 5”.

**Tabela 5 Tempos de simulação de acabamento para a peça “Rampa”**

<b>Tipo de Movimentação</b>	<b>Tempo de simulação</b>
<i>Sweeping</i>	36,6 segundos
<i>Clipping</i>	37,3 segundos
<i>Miniclipping</i>	28,7 segundos
<i>Miniclipping without lifting</i>	28,4 segundos

A sétima e última janela (Figura 43) do “*Solution Wizard*” é relativa à previsão da solução.

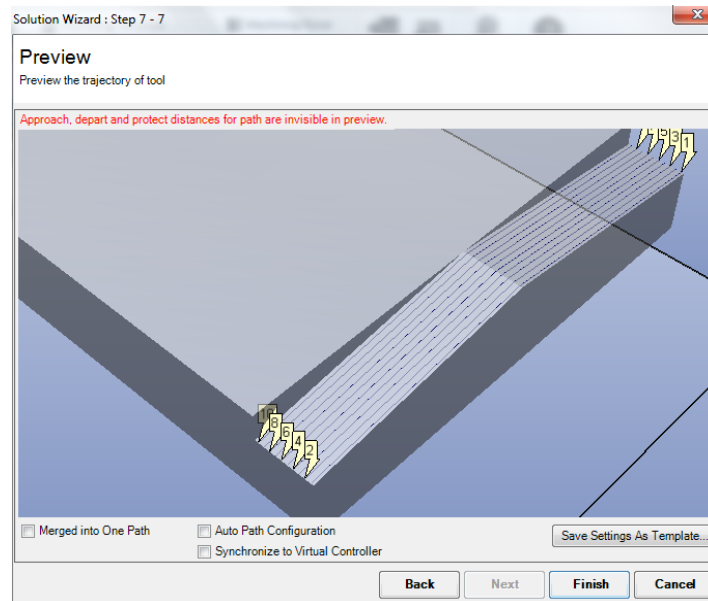


Figura 43 Sétimo passo do “*Solution Wizard*”

Para visualizar a simulação é necessário sincronizar a solução criada com o controlador virtual (*virtual controller*). O passo para fazer a sincronização encontra-se visível na Figura 44.

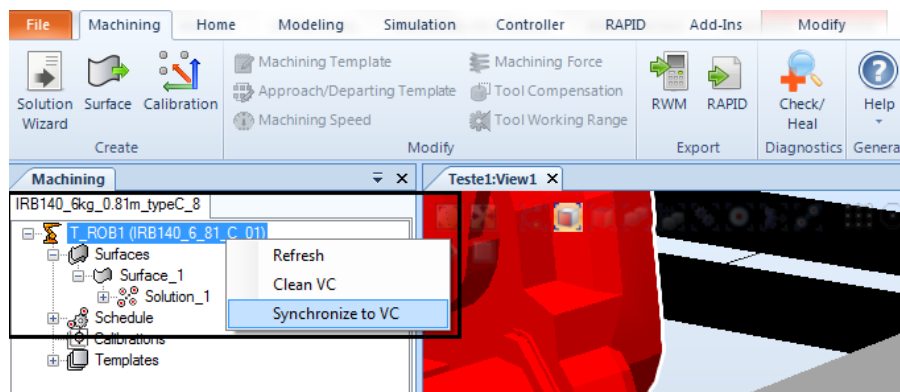
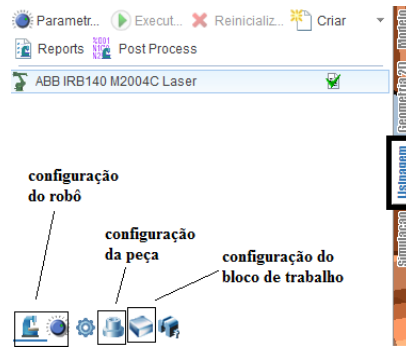


Figura 44 Sincronização com o controlador virtual no Machining PowerPac

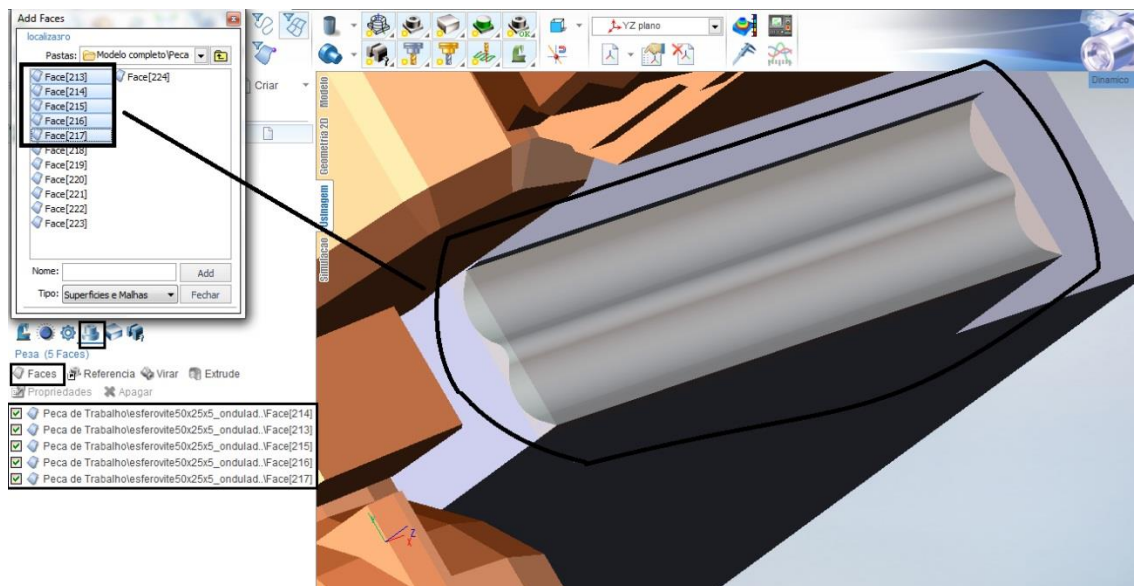
## 5.2. SPRUTCAM 10

Após a modelação da célula robótica no *software* SprutCAM 10, na aba “Modelo”, foi necessário configurar as tarefas de maquinagem necessárias para obter o resultado final das peças a maquinar. Para efetuar essa configuração é preciso situar o *software* na aba “Usinagem” e começar por configurar os parâmetros do robô utilizado, da peça a maquinar e da área do bloco de trabalho, como se mostra na Figura 45.



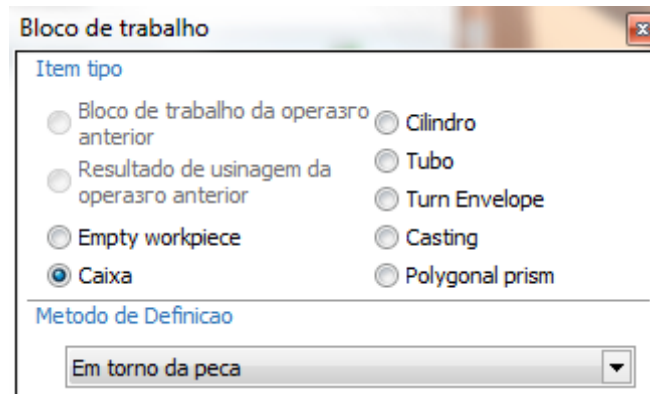
**Figura 45** Configuração dos parâmetros globais

Nos parâmetros de configuração do robô é possível escolher se o bloco de trabalho vai ser simples ou colocado sob um suporte rotativo, o método de simulação (*default*: Voxel 5d), o eixo de rotação (eixo 5 do robô com uma rotação de 90°), entre outros parâmetros. Na secção de configuração da peça são selecionadas as faces da peça que irão ser alvo de maquinagem por parte do robô (Figura 46). O exemplo mostrado na figura seguinte diz respeito à peça “Ondulado”.



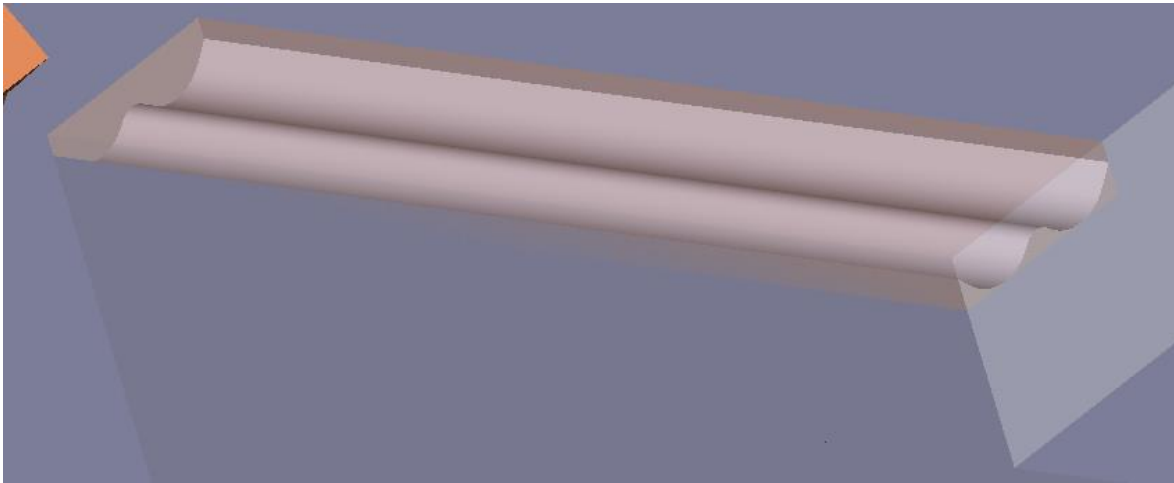
**Figura 46** Configuração das faces da peça a ser maquinada

Por fim, na secção do bloco do trabalho é também possível seleccionar quais as faces que fazem parte do bloco de trabalho, ou utilizar a opção de o *software* criar uma caixa em torno das faces da peça que foram seleccionadas na secção anterior (Figura 47).



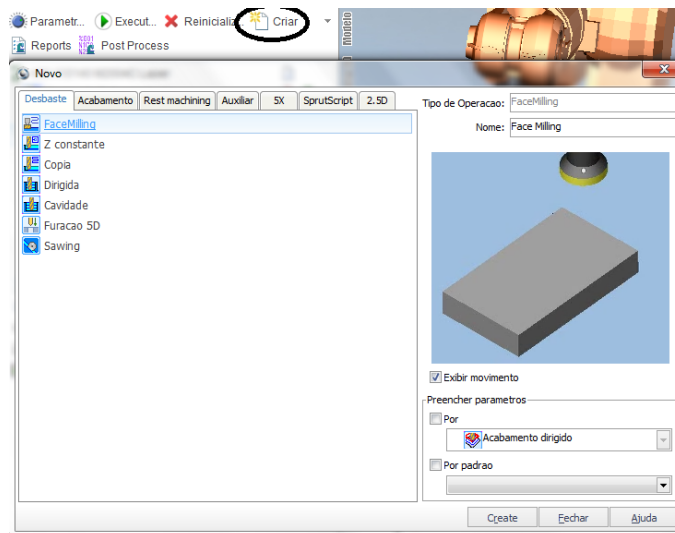
**Figura 47** Configuração do bloco de trabalho

Após as configurações anteriores, o resultado deverá ser semelhante ao visível na Figura 48.



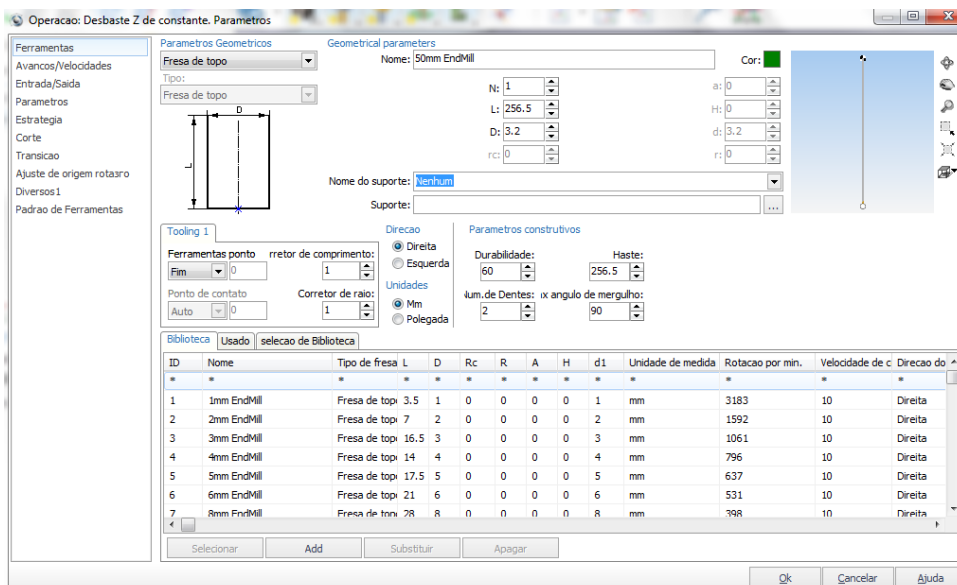
**Figura 48** Caixa/bloco de trabalho em torno das faces a serem maquinadas

De seguida, carregando no botão “Criar” surge uma janela para escolher a operação pretendida. Conforme se pode visualizar na Figura 49, existem várias operações nas diferentes abas (Desbaste, Acabamento, Rest Machining, Auxiliar, 5X, SprutScript e 2.5D). Dentro de cada operação é possível escolher uma diferente tarefa.

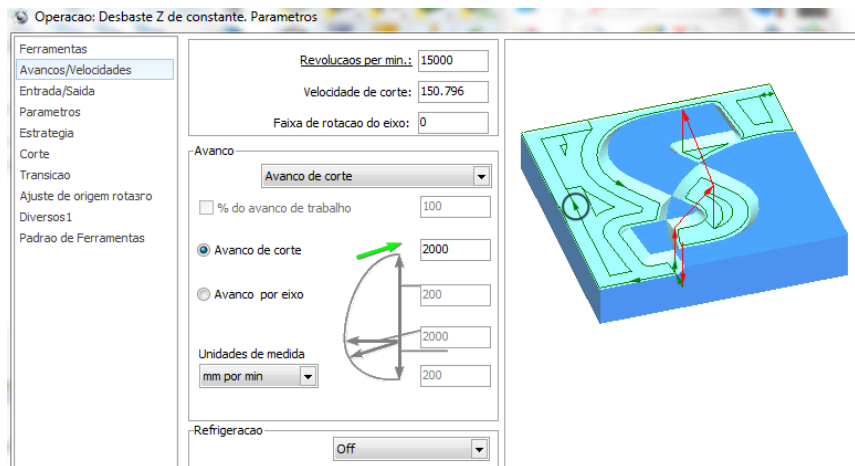


**Figura 49 Criar tarefa de maquinagem no SprutCAM 10**

Posteriormente a escolher a tarefa é preciso configurar o tipo de fresa (com os parâmetros dos três tipos de fresa disponíveis no Anexo C, como se mostra na Figura 50), velocidades de avanço e de corte (Figura 51), entre outros parâmetros. A configuração do tipo de fresa é necessária pois o *software* SprutCAM 10 não permite que sejam importados ficheiros CAD 3D para que estes sejam utilizados como uma ferramenta do robô. Devido a este último fator, foi medido no *software* Autodesk Inventor Professional 2014 o comprimento total da ferramenta de fixação com a fresa colocada na DREMEL, sendo esse resultado 25,65 centímetros (o que corresponde aos 256,5 milímetros que se podem observar no parâmetro “L” da figura seguinte).



**Figura 50 Janela de configuração da fresa**

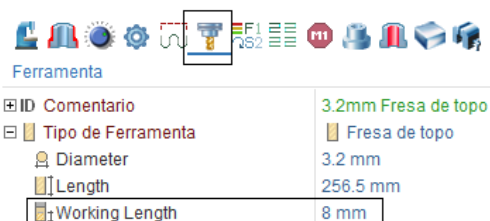
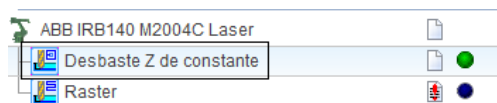


**Figura 51** Janela de configuração das velocidades de avanço e de corte

Os três tipos de fresas selecionadas no programa foram as seguintes: “fresa de topo”, “fresa esférica” e “fresa esférica cônica”. No entanto, o *software* assume por predefinição que o comprimento de trabalho da fresa é igual ao comprimento da mesma, sendo necessário alterar esse parâmetro. Na Tabela 6 encontram-se os dados relativos aos comprimentos de trabalho de cada uma das fresas e na Figura 52 a explicação de como se altera esse valor.

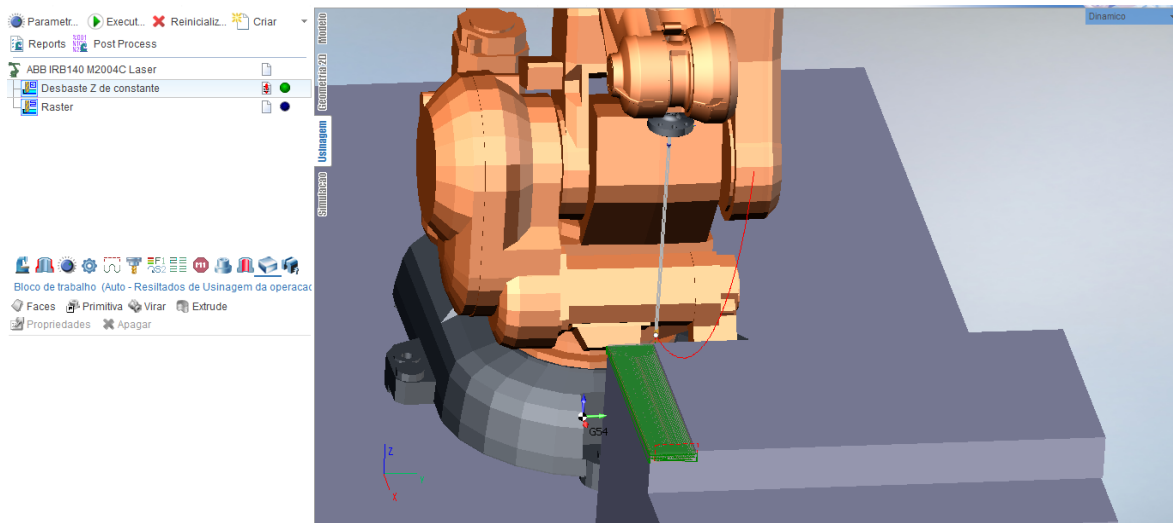
**Tabela 6** Comprimentos de trabalho das fresas

Nome da fresa	Comprimento de trabalho
Fresa de Topo	8 milímetros
Fresa Esférica	4 milímetros
Fresa Esférica Cônica	11 milímetros



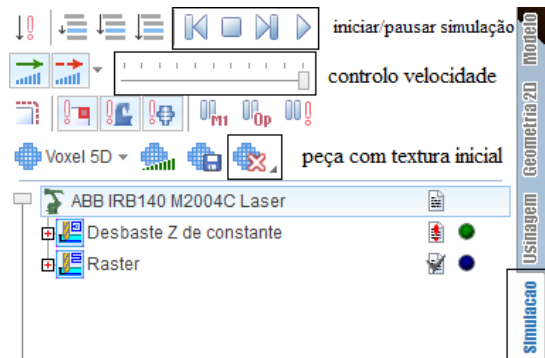
**Figura 52** Forma de mudar o comprimento de trabalho da fresa

Após esta configuração, é efetuada a geração das trajetórias para cada uma das operações carregando no botão “Executar”. Na Figura 53 encontra-se representado um dos modelos com as trajetórias geradas.



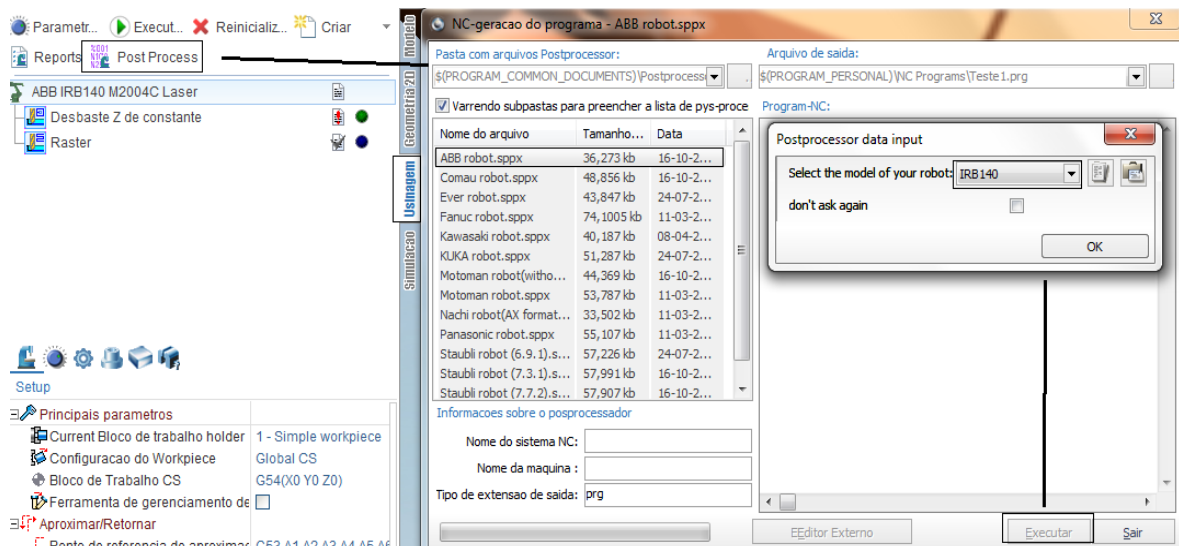
**Figura 53** Trajetórias geradas no SprutCAM 10 para a peça “Ondulado”

Gerando cada trajetória das operações de maquinagem é possível visualizar no *software* a simulação e o aspeto final da peça após cada operação. Para se efetuar a simulação é selecionada a aba “Simulação”, onde é possível iniciar a simulação e controlar a velocidade a que a mesma corre no programa (Figura 54).



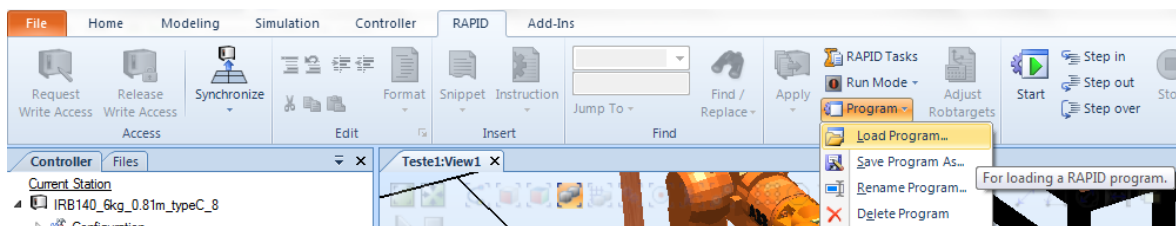
**Figura 54** Parâmetros da simulação

Geradas e simuladas todas as trajetórias, o SprutCAM 10 permite a conversão destas para a linguagem do robô a ser utilizado. Neste caso irá gerar um ficheiro em código RAPID. Para tal, e na aba “Usinagem”, é necessário carregar no botão “Post Process” que abrirá uma nova janela onde será escolhido o fabricante do robô utilizado (ABB). Nessa mesma janela, e carregando em “Executar”, surgirá uma nova janela para escolher o modelo do robô (ABB IRB140). Todos estes passos estão demonstrados na Figura 55.

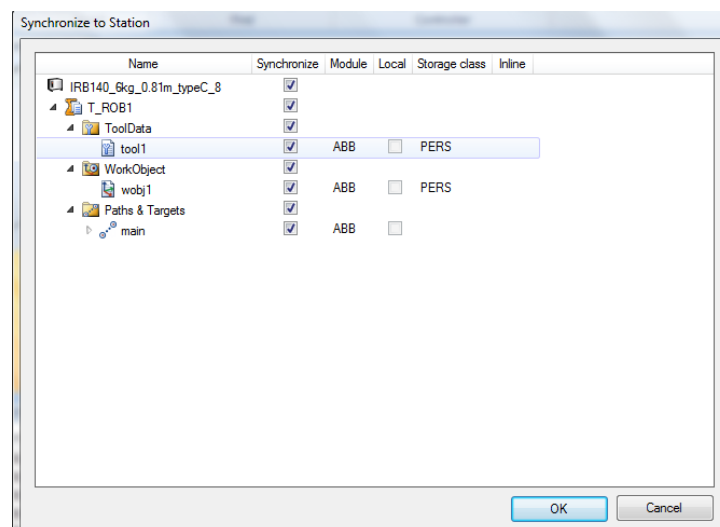


**Figura 55 Gerar ficheiro RAPID no SprutCAM 10**

Após o ficheiro com o código RAPID ser gerado, existe a possibilidade de o testar no *software* RobotStudio 5.15. Após abrir este *software* e na aba “RAPID”, carrega-se no botão “Program”-“Load Program...” (Figura 56). Carregado o ficheiro é necessário fazer a sincronização com a estação (Figura 57).



**Figura 56 Load do ficheiro RAPID no RobotStudio 5.15**



**Figura 57 Sincronização com a estação**

Na Tabela 7 são apresentadas, para cada uma das peças, as fresas utilizadas, as operações de maquinagem realizadas (o SprutCAM mostra uma previsão dos movimentos efetuado em cada operação) e o tempo de simulação de maquinagem a uma velocidade de 6000 mm/min (o equivalente a 100 mm/seg), para a peça maquinada a partir de um bloco de esferovite com as dimensões “50 × 25 × 5”.

**Tabela 7 Relação entre as peças, fresas, operações de maquinagem e o tempo de simulação de maquinagem**

Peça	Fresa	Operação de maquinagem		Tempo de simulação de maquinagem (desbaste + acabamento)
		Desbaste	Acabamento	
Rampa	Fresa de topo	Z Constante	Dirigido	50 seg + 36 seg = 01:26 min
	Fresa esférica	Z Constante	Dirigido	02:26 min + 37 seg = 03:03 min
	Fresa esférica cônica	Cópia	Dirigido	01:19 min + 31 seg = 01:50 min
Ondulado	Fresa de topo	Z Constante	Dirigido	01:54 min + 01:18 min = 03:12 min
	Fresa esférica	Z Constante	Dirigido	04:18 min + 58 seg = 05:16 min
	Fresa esférica cônica	Cópia	<i>Raster</i>	02:02 min + 46 seg = 02:48 min
Peão	Fresa de topo	Z Constante	Não Aplicado	34 segundos
	Fresa esférica	Z Constante	Não Aplicado	01:13 min
	Fresa esférica cônica	Z Constante	Não Aplicado	29 segundos
Símbolo DEE	Fresa de topo	Cópia	Dirigido	05:19 min + 20 seg = 05:39 min
	Fresa esférica	Cópia	Dirigido	10:12 min + 05:01 min = 15:13 min
	Fresa esférica cônica	Cópia	Dirigido	04:07 min + 04:53 min = 09:00 min
Face	Fresa de topo	Dirigido	Não Aplicado	19:49 min
	Fresa esférica	Dirigido	Não Aplicado	42:10 min
	Fresa esférica cônica	Dirigido	Não Aplicado	11:26 min

### 5.3. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou a programação realizada nos dois programas utilizados. Foram descritos todos os passos efetuados para a programação de robôs para tarefas de maquinagem.

Relativamente ao RobotStudio 5.15.02 foi explicado como se utiliza o Machining PowerPac 5.15, embora este *add-in* para o software da ABB não seja o mais indicado para tarefas de desbaste, sendo que poderá ser utilizado para programar o robô para realizar tarefas de acabamento. Foram clarificados os passos para selecionar as faces a serem trabalhadas e como se configura a solução, mostrando os vários parâmetros a configurar e explicando a influência de cada um para a solução final.

Foram também devidamente justificadas as escolhas realizadas na programação da solução para a peça “Rampa” e o porquê de não se efetuar a programação das outras peças neste *software*.

Para o *software* SprutCAM 10 também foram clarificados todos os passos para selecionar as faces a maquinar, como se configura passo-a-passo os parâmetros da solução, explicando sempre as escolhas realizadas.

No final foi apresentada uma tabela comparativa dos vários tempos de simulação de maquinagem (desbaste e acabamento), para cada uma das peças, utilizando diferentes fresas.

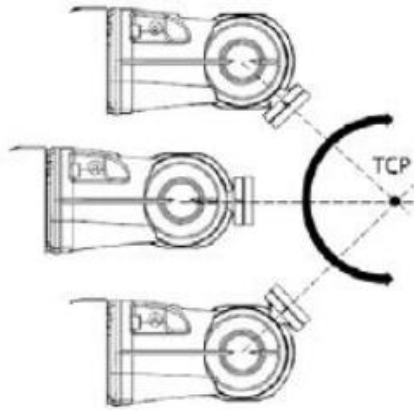


# 6. TESTES DA SOLUÇÃO IMPLEMENTADA

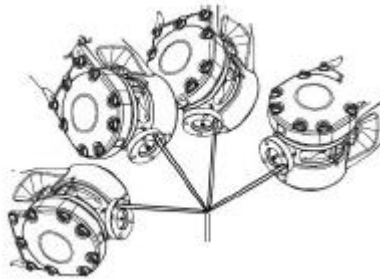
Neste capítulo serão mostrados os resultados dos testes práticos às soluções implementadas. Também será explicado como são obtidos os valores do *Tool Center Point* (TCP) da ferramenta e as coordenadas do *WorkObject* na realidade, usando o FlexPendant do robô, e como se criam os mesmos em *software*.

## 6.1. CRIAÇÃO E DEFINIÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta utilizada é montada na flange do robô e deve ser definida com um *Tool Center Point* (TCP), conforme se pode visualizar na Figura 58. A posição do robô e os seus movimentos estão relacionados com o sistema de coordenadas da ferramenta, isto é, o TCP e a orientação da ferramenta. Para obter bons resultados na prática, é importante definir o sistema de coordenadas da ferramenta de forma tão precisa quanto possível. O sistema de coordenadas pode ser definido manualmente ou o robô pode ser usado como uma ferramenta de medição. A programação de uma ferramenta utilizando o robô para medição consiste em levar a ponta da ferramenta que se quer programar a um ponto fixo no espaço com, no mínimo, quatro orientações diferentes, como se mostra na Figura 59 [47].



**Figura 58** Movimento da ferramenta em torno do TCP [47]



**Figura 59** Medição da ferramenta com o método de quatro orientações [47]

### 6.1.1. DEFINIÇÃO DO TCP NO FLEXPENDANT

Para medir as coordenadas da ferramenta reais usando o robô é necessário utilizar o FlexPendant, isto é, a consola de interface entre o utilizador e o robô (na Figura 60 apresenta-se a consola do robô ABB IRB 140).



**Figura 60** FlexPendant do robô ABB IRB 140

Os passos a efetuar para obter o sistema de coordenadas da ferramenta são os seguintes [47]:

- carregar em “Colocação em movimento”;
- carregar em “Ferramenta” e criar uma nova;
- seleccionar a ferramenta criada, carregar em “Editar” e “Definir”;
- movimentando o robô em redor do mesmo ponto, escolher quatro orientações diferentes.

### 6.1.2. CONFIGURAÇÃO DO TCP NO ROBOTSTUDIO 5.15.02 E SPRUTCAM 10

Obtidos os valores do TCP a partir do FlexPendant é necessário introduzir os mesmos no código da simulação, mais propriamente na linha seguinte (os valores a negrito são os valores a serem alterados):

```
PERS tooldata
Garra:=[TRUE, [[0,0,256.5], [1,0,0,0]], [1, [0,0,
1], [1,0,0,0], 0,0,0]];
```

## 6.2. CRIAÇÃO E DEFINIÇÃO DE OBJETOS DE TRABALHO

Um objeto de trabalho (*WorkObject*) é um sistema de coordenadas com propriedades específicas associadas a ele. O seu uso principal é simplificar a programação e movimentação do robô, bem como definir uma origem das coordenadas dos pontos programados [47].

O sistema de coordenadas do objeto de trabalho pode ser definido com dois referenciais: o referencial do utilizador (relacionado com o sistema de coordenadas do “Mundo”) e o referencial do objeto (relacionado com o sistema de coordenadas do utilizador) [47].

A programação de um objeto de trabalho, utilizando o robô para a sua medição, consiste em levar a ponta da ferramenta de medição a dois pontos quaisquer situados no eixo dos *XX* e a um ponto situado no eixo dos *YY*, como mostrado na Figura 61 [47].

A criação do objeto de trabalho é importante pois permite fazer a calibração do sistema, isto é, mesmo que a modelação da célula robótica nos programas seja efetuada com o maior rigor possível, existirão sempre ligeiras diferenças relativamente à célula robótica real. Portanto, a calibração permite “ajustar” a célula modelada com a célula real para uma maior precisão e eficácia das soluções programadas.

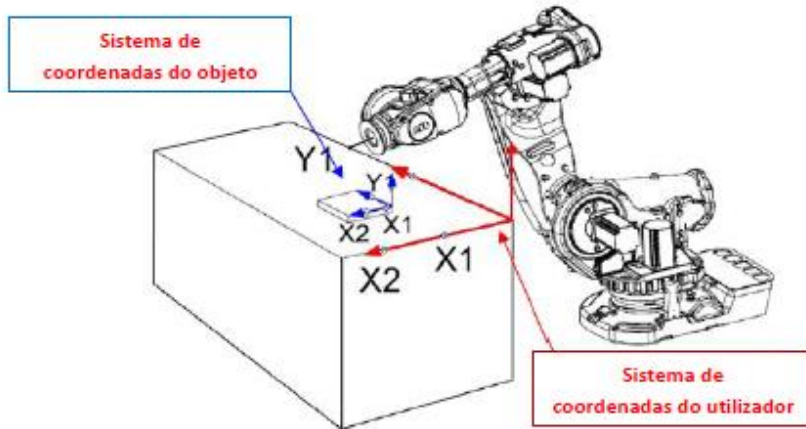


Figura 61 Especificação e programação de um objeto de trabalho [47]

### 6.2.1. DEFINIÇÃO DE UM OBJETO DE TRABALHO NO FLEXPENDANT

Os passos a efetuar para programar um objeto de trabalho são os seguintes [47]:

- carregar em “Colocação em movimento”;
- carregar em “Objeto de Trabalho” e criar um novo;
- seleccionar o objeto de trabalho criado, carregar em “Editar” e “Definir”;
- verificando que a ferramenta ativa corresponde à criada anteriormente, escolher dois pontos no eixo dos  $XX$  e um ponto no eixo dos  $YY$ .

### 6.2.2. CONFIGURAÇÃO DO OBJETO DE TRABALHO NO ROBOTSTUDIO 5.15.02

Após definir o objeto de trabalho no sistema real é necessário criá-lo no *software*. O procedimento para criar um objeto de trabalho no RobotStudio 5.15.02 encontra-se visível na Figura 62.

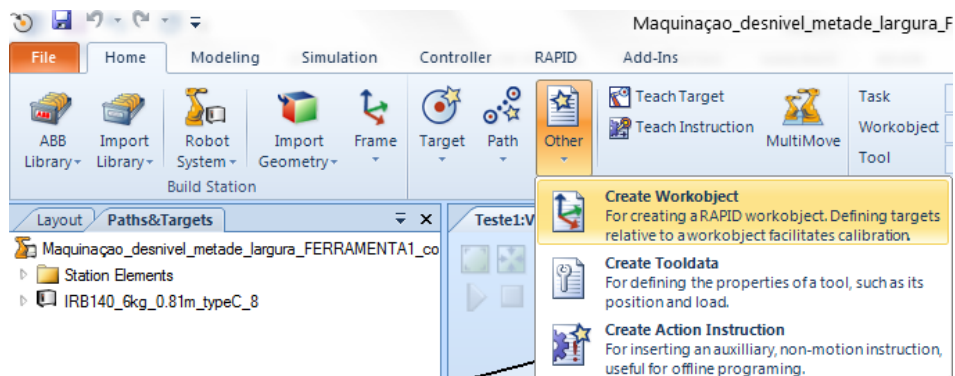


Figura 62 Criação de um objeto de trabalho no RobotStudio 5.15.02

Surgirá uma janela do lado esquerdo, onde terão que ser alterados os valores da lista “User Frame” com os valores obtidos no FlexPendant (Figura 63).

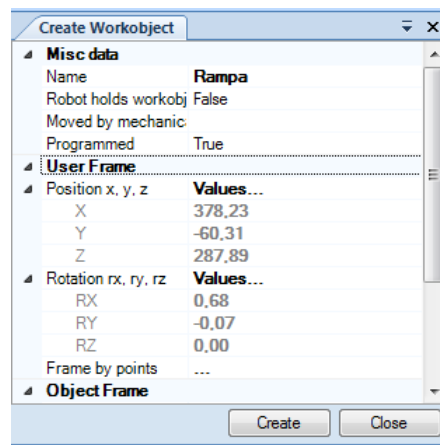


Figura 63 Definição do objeto de trabalho criado no RobotStudio 5.15.02

### 6.2.3. CONFIGURAÇÃO DO OBJETO DE TRABALHO NO SPRUTCAM 10

No *software* SprutCAM também é preciso criar o objeto de trabalho real. Para tal são efetuados os passos apresentados na Figura 64 e na Figura 65. Os valores de “Eixo X”, “Eixo Y”, “Eixo Z” e da rotação “q1”, “q2”, “q3” e “q4” devem ser preenchidos com os valores obtidos no FlexPendant.

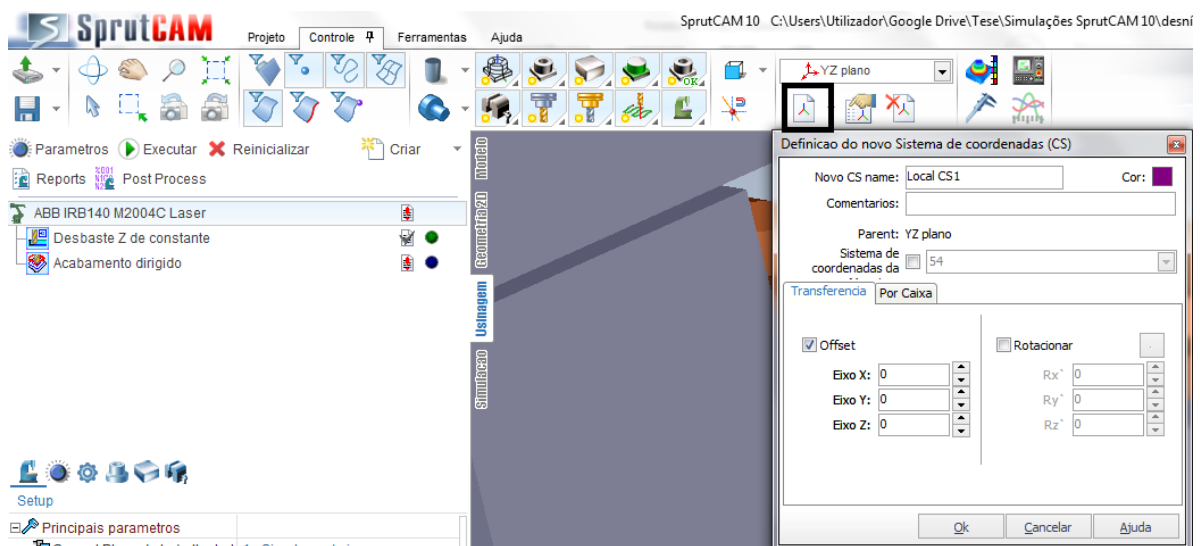


Figura 64 Criação de um objeto de trabalho no SprutCAM 10

A Figura 65 mostra um exemplo da definição de um objeto de trabalho criado no SprutCAM 10. Alguns parâmetros estão realçados pois são importantes para uma correta definição do objeto de trabalho.

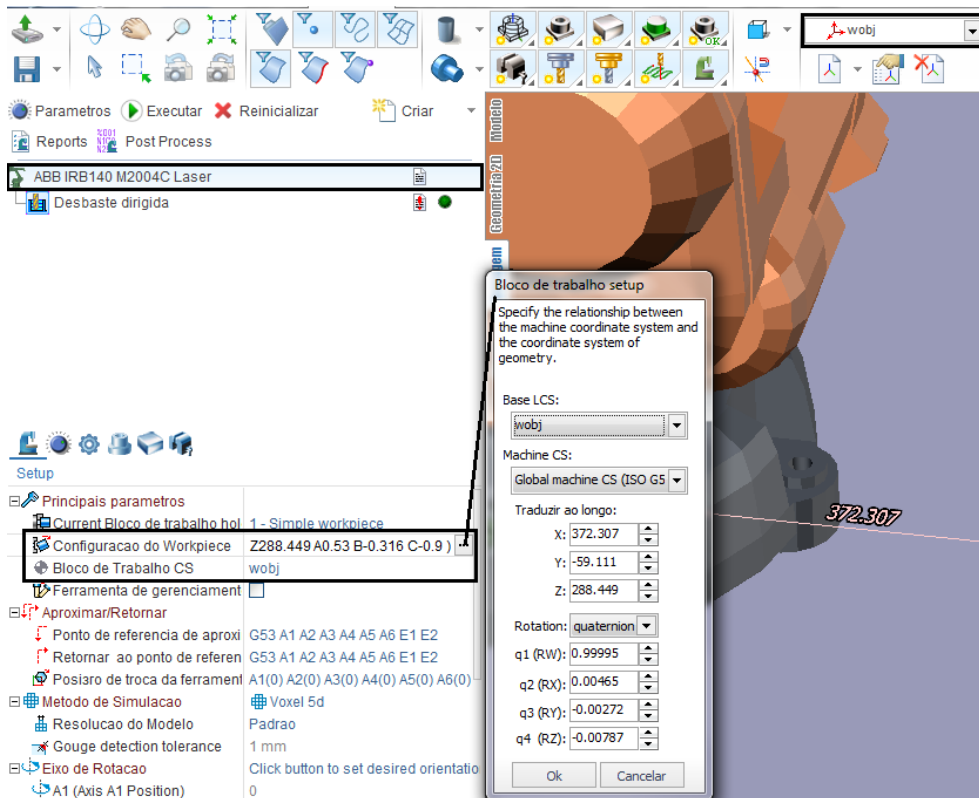


Figura 65 Definição do objeto de trabalho criado no SprutCAM 10

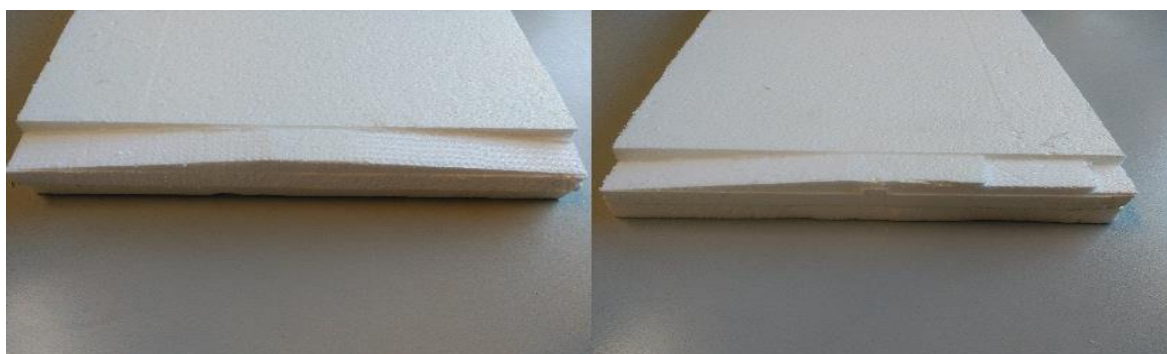
### 6.3. RESULTADOS DOS TESTES PRÁTICOS

Nesta secção são apresentados os resultados dos testes práticos realizados durante este trabalho. No total foram realizados oito testes práticos. Os dois primeiros testes foram realizados para a peça “Rampa”, em que um teste diz respeito ao acabamento com o SprutCAM 10 e o outro teste ao acabamento com o Machining PowerPac 5.15. Para a peça “Ondulado” foram realizados três testes, com cada uma das fresas, sendo a programação toda efetuada no SprutCAM 10. As restantes peças (“Peão”, “Símbolo DEE” e “Face”) só foram testadas uma vez.

#### 6.3.1. RAMPA

Nesta peça a operação de desbaste só foi programada no SprutCAM 10 (para os dois testes), sendo a operação de acabamento programada nos dois *programas* de forma a ser possível distinguir qual o *software* mais apropriado para este tipo de tarefa.

A Figura 66, no lado esquerdo, mostra o resultado obtido usando o acabamento programado no SprutCAM 10 e, no lado direito, o resultado usando o acabamento programado no Machining PowerPac 5.15.



**Figura 66** Maquinagem de acabamento da peça “Rampa” com SprutCAM 10 (esquerda) e Machining PowerPac 5.15.02 (direita)

Conforme se pode ver nesta figura, relativamente ao Machining PowerPac só se efetuou o acabamento da primeira metade da rampa pois para o tamanho do bloco de esferovite utilizado o robô não alcançava alguns pontos da solução criada para a segunda metade da rampa. No entanto, a solução gerada com o SprutCAM 10 permitia o acabamento total da peça devido ao facto de forçar o eixo 5 do robô com uma rotação de 90°. A Tabela 8 apresenta os dados relativos à maquinagem.

**Tabela 8** Dados de maquinagem da peça “Rampa”

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 35 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa de topo
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	02:49 minutos desbaste + 02:27 minutos acabamento = 05:16 minutos
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aprox. 6 minutos
<b>Tempo de simulação (Machining PowerPac 5.15)</b>	53.6 segundos acabamento
<b>Tempo de maquinagem (Machining PowerPac 5.15)</b>	Aprox. 1 minuto
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	3000 mm/min = 50 mm/seg
<b>Penetração</b>	6 mm

A nível do toque com a superfície maquinada, o acabamento feito pelo Machining PowerPac apresenta um toque mais suave e regular do que o acabamento realizado pelo SprutCAM.

### 6.3.2. ONDULADO

A peça “Ondulado” foi totalmente programada usando o SprutCAM 10 sendo testadas diferentes fresas no desbaste e acabamento. As figuras e tabelas seguintes dizem respeito ao desbaste a acabamento com a fresa de topo (Figura 67 e Tabela 9), com a fresa esférica (Figura 68 e Tabela 10) e com a fresa esférica cónica (Figura 69 e Tabela 11).



**Figura 67** Maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa de topo

**Tabela 9** Dados de maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa de topo

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 25 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa de topo
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	41:30 minutos desbaste + 1:17 minutos acabamento = 42:48 minutos
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aproximadamente 45 minutos
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	250 mm/min
<b>Penetração</b>	6 mm



**Figura 68** Maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica

**Tabela 10 Dados de maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica**

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 35 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa esférica
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	15:25 minutos desbaste + 2:23 minutos acabamento = 17:48 minutos
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aproximadamente 19 minutos
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	3000 mm/min
<b>Penetração</b>	2.4 mm



**Figura 69 Maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica cônica**

**Tabela 11 Dados de maquinagem da peça “Ondulado” utilizando a fresa esférica cônica**

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 35 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa esférica cônica
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	4:59 minutos desbaste + 5 segundos acabamento = 05:04 minutos
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aproximadamente 05:20 minutos
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	3000 mm/min
<b>Penetração</b>	8 mm

Após comparar o resultado final de cada fresa pode-se concluir que mesmo alterando a velocidade de corte (entre a fresa de topo e as fresas esférica e esférica cônica) o resultado não difere muito, sendo possível utilizar velocidades de corte elevadas e obter resultados semelhantes. No entanto, a comparação entre a maquinagem com as fresas esférica e esférica

cônica permite concluir que apesar do tempo de maquinagem da fresa esférica ser superior ao da fresa esférica cônica (porque a profundidade de corte da fresa esférica cônica é superior) esta demonstra apresentar um melhor acabamento.

### 6.3.3. PEÃO

Nesta peça a programação foi unicamente realizada no SprutCAM 10. Apenas se efetuou a tarefa de desbaste não sendo programada a tarefa de acabamento visto que o desbaste era constante no eixo dos ZZ. O resultado final é o visível na Figura 70. A Tabela 12 apresenta os dados relativos à maquinagem desta peça. A marca em forma de círculo visível na figura já se encontrava presente no bloco de esferovite, não tendo sido criada pela fresa ou pela ferramenta.



**Figura 70** Maquinagem da peça “Peão” com SprutCAM 10

**Tabela 12** Dados de maquinagem da peça “Peão”

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 35 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa de topo
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	4:54 min
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aprox. 5 minutos
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	500 mm/min
<b>Penetração</b>	6 mm

#### 6.3.4. SÍMBOLO DEE

A peça “Símbolo DEE” foi programada utilizando o *software* SprutCAM 10. Foi programada uma tarefa de desbaste englobando a peça toda e outra de acabamento somente nas laterais das letras e do símbolo, pois a operação de desbaste foi programada para ser constante no eixo dos ZZ. O resultado é o visível na Figura 71. A Tabela 13 mostra os dados relativos à maquinagem desta peça.



Figura 71 Maquinagem da peça “Símbolo DEE” com SprutCAM 10

Tabela 13 Dados de maquinagem da peça “Símbolo DEE”

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 35 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa de topo
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	01:01:40 horas desbaste + 03:46 minutos acabamento = 01:05:26 horas
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aproximadamente 1 hora e 15 minutos
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	500 mm/min
<b>Penetração</b>	6 mm

#### 6.3.5. FACE

Para a peça “Face” foi programada apenas a tarefa de desbaste no SprutCAM 10. Não foi realizada tarefa de acabamento porque, após a simulação da mesma, verificava-se que o resultado final não se alterava significativamente e o tempo de acabamento era bastante reduzido tendo em conta a complexidade da peça. Devido à complexidade desta peça foi

escolhida a fresa esférica cônica para o teste prático por na simulação apresentar os melhores resultados. O resultado é o mostrado na Figura 72.



**Figura 72** Maquinagem da peça “Face” com SprutCAM 10

**Tabela 14** Dados de maquinagem da peça “Face”

<b>Dimensão bloco de esferovite</b>	50 cm comprimento, 22 cm largura, 5 cm altura
<b>Fresa utilizada</b>	Fresa esférica cônica
<b>Tempo de simulação (SprutCAM 10)</b>	33:38 min
<b>Tempo de maquinagem (SprutCAM 10)</b>	Aproximadamente 35 min
<b>Velocidade de corte</b>	201.062 m/min
<b>Velocidade de avanço</b>	2000 mm/min
<b>Penetração</b>	6 mm

## 6.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados dos testes práticos às soluções implementadas. Também foi explicado como são obtidos os valores do TCP da ferramenta e as coordenadas do *WorkObject* na célula robótica real, para calibrar a célula robótica modelada nos programas. Para cada um dos testes práticos são referidos quais os blocos de esferovite utilizados, qual a fresa utilizada, o tempo de simulação (desbaste e/ou acabamento) e o tempo de maquinagem (desbaste e/ou acabamento), e a velocidade de corte utilizada. Pode-se verificar que nos dois programas utilizados o tempo de maquinagem foi sempre ligeiramente superior ao tempo de simulação.

# 7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com esta dissertação mostra-se de que forma é possível programar robôs industriais para efetuarem tarefas de maquinagem, conforme se pode comprovar com os resultados obtidos.

O facto de só se encontrarem disponíveis dois programas não permitiu fazer um estudo mais alargado (visto que já existem no mercado uma variedade de soluções CAD/CAM para robôs). No entanto, chegou-se à conclusão que o Machining PowerPac 5.15 não é o mais aconselhado para tarefas de desbaste, sendo a sua utilização específica para tarefas de acabamento.

Uma das vantagens de programas como o SprutCAM 10 consiste no facto de possuírem um pós-processador que permite a conversão das trajetórias de maquinagem para qualquer modelo de robô, independentemente da marca, desde que este se encontre na biblioteca do *software*, como foi o caso do robô utilizado neste trabalho (ABB IRB 140). Assim, pode-se concluir que este tipo de programas fornece uma grande ajuda às empresas que queiram utilizar os seus robôs industriais para tarefas de maquinagem. Outra vantagem do *software*

SprutCAM 10 é o facto de que à medida que a simulação decorre, “retira” o material que é maquinado da peça, tendo o utilizador uma maior noção do trabalho que a fresa está a efetuar.

Porém, nem tudo são vantagens, visto que o SprutCAM 10 apesar de permitir adicionar desenhos CAD de outros programas, não permite identificar os mesmos como suporte/ferramenta a anexar à extremidade do robô. No entanto, contactos efetuados com um membro da equipa SprutCAM permitiram saber que a mesma funcionalidade surgirá numa próxima versão do *software*.

Relativamente às fresas utilizadas, o encabadouro das mesmas tinha de ser adequado à ferramenta utilizada, neste caso, a DREMEL 3000. Devido a este fator, as únicas fresas utilizadas foram da mesma marca que a ferramenta pois apresentam o encabadouro necessário para a ferramenta. Pode-se concluir que a marca DREMEL é limitativa neste aspeto.

Em termos de desenvolvimentos futuros é sugerida a programação de robôs industriais com uma maior capacidade de carga de forma a ser possível utilizar fresas de calibre superior para maquinar objetos com uma densidade superior à do esferovite ou poliuretano.

Também será interessante testar a maquinagem usando o robô com outras orientações que não a vertical (a utilizada neste trabalho) e pesquisar sobre a interligação entre os sistemas de reconhecimento facial, os programas de geração de código para maquinagem e os robôs industriais de forma a poderem ser utilizados integrados para o desbaste de esculturas humanas.

Pode-se concluir que os robôs podem ser utilizados para a maquinagem de objetos e que, face aos programas de programação já disponíveis para estas tarefas, os robôs podem ser vistos como uma nova solução complementar às máquinas CNC, ou ao próprio ser humano.

## *Referências Documentais*

- [1] <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>, acessido pela última vez a 7 de Junho de 2016.
- [2] [http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/North-American-Robotics-Market-Sets-New-Records-in-First-Half-of-2015/content\\_id/5626](http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/North-American-Robotics-Market-Sets-New-Records-in-First-Half-of-2015/content_id/5626), acessido pela última vez a 23 de Maio de 2016.
- [3] <http://www.mmsonline.com/columns/supply-side-robotics>, acessido pela última vez a 18 de Maio de 2016.
- [4] Slides de ROBIN: Robótica Industrial – Introdução à Robótica, Ano letivo 2011/2012.
- [5] Slides de ROBIN: Robótica Industrial – Noções Básicas da Robótica, Ano letivo 2011/2012.
- [6] [http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/New-Robot-Safety-Standard/content\\_id/4133](http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/New-Robot-Safety-Standard/content_id/4133), acessido pela última vez a 20 de Junho de 2016.
- [7] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:pt:PDF>, acessido pela última vez a 3 de Outubro de 2016.
- [8] <https://dre.pt/application/dir/pdf1s/2008/06/12000/0376503795.pdf>, acessido pela última vez a 3 de Outubro de 2016.
- [9] Slides de ROBIN: Robótica Industrial – Segurança na Programação e Operação de Robôs Industriais, Ano letivo de 2011/2012.
- [10] Slides de ROBIN: Robótica Industrial – Métodos de Programação de Robôs, Ano letivo de 2011/2012.
- [11] <http://www.fanuc.eu/pt/pt/casos-de-clientes/wildkupfer>, acessido pela última vez a 13 de Julho de 2016.
- [12] Slides de ROBIN: Robótica Industrial – Aplicações Industriais da Robótica, Ano letivo de 2011/2012.

- [13] Slides de SIFFA, Sistemas Flexíveis de Fabrico – Torno, Ano letivo de 2008/2009
- [14] RELVAS, Carlos – Controlo Numérico Computorizado Conceitos Fundamentais. Publindústria, Edições Técnicas, 2ª Edição, Fevereiro de 2002. ISBN 972-95794-6-6
- [15] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABM2gAB/usinagem-torno-mecanico>,  
acedido pela última vez a 23 de Junho de 2016.
- [16] <http://www.fanuc.eu/pt/pt/aplica%C3%A7%C3%B5es/fresagem-com-centros-de-maquina%C3%A7%C3%A3o-vertical>,  
acedido pela última vez a 23 de Junho de 2016.
- [17] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVjAAH/fresa-pronto-ebah>,  
acedido pela última vez a 14 de Outubro de 2016.
- [18] DAVIM, J. Paulo; CORREIA, A. Esteves – Maquinagem a alta velocidade Fresagem/CNC. Publindústria, Edições Técnicas, Junho de 2006. ISBN 972-8953-05-4
- [19] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA5HgAI/processo-producao>,  
acedido pela última vez a 7 de Novembro de 2016.
- [20] Slides de SIFFA, Sistemas Flexíveis de Fabrico – CNC, Ano letivo de 2008/2009.
- [21] <http://www.geocities.ws/industrialmarketplace/lathe-machine.html>,  
acedido pela última vez a 23 de Junho de 2016.
- [22] [http://www.diytrade.com/china/pd/3312367/High\\_Speed\\_CNC\\_Milling\\_Machine.html](http://www.diytrade.com/china/pd/3312367/High_Speed_CNC_Milling_Machine.html),  
acedido pela última vez a 23 de Junho de 2016
- [23] <http://www.robotmaster.com/en/why-robotmaster>,  
acedido pela última vez a 18 de Maio de 2016.
- [24] <http://www.staubli.com/en/robotics/robot-solution-application/high-speed-machining-robots/>,  
acedido pela última vez a 27 de Junho de 2016.
- [25] <http://www.plasticportal.eu/en/processing-of-plastics-materials-with-robot-staubli/c/2114>,  
acedido pela última vez a 27 de Junho de 2016.
- [26] [http://www.kuka-robotics.com/res/sps/9cb8e311-bfd7-44b4-b0ea-b25ca883f6d3\\_KUKA\\_CNC-Flyer\\_EN.pdf](http://www.kuka-robotics.com/res/sps/9cb8e311-bfd7-44b4-b0ea-b25ca883f6d3_KUKA_CNC-Flyer_EN.pdf),  
acedido pela última vez a 27 de Junho de 2016.

- [27] <https://blog.adafruit.com/2016/06/07/floats-for-mardi-gras-sculpted-by-kuka-robot-arms/>, acessido pela última vez a 27 de Junho de 2016.
- [28] <http://www.cometproject.eu/>, acessido pela última vez a 27 de Junho de 2016.
- [29] [http://www.robotics.org/content-detail.cfm?content\\_id=4502](http://www.robotics.org/content-detail.cfm?content_id=4502), acessido pela última vez a 27 de Maio de 2016.
- [30] <http://www.a3automate.org/programming-robots-for-greater-productivity/>, acessido pela última vez a 23 de Maio de 2016.
- [31] Slides de SIFFA, Sistemas Flexíveis de Fabrico – CAM, Ano letivo de 2008/2009.
- [32] [http://www.robotics.org/content-detail.cfm?content\\_id=5278](http://www.robotics.org/content-detail.cfm?content_id=5278), acessido pela última vez a 27 de Maio de 2016.
- [33] [http://www.robotics.org/userAssets/image/Robotmaster%20v6%20new%20interface\(3\).png](http://www.robotics.org/userAssets/image/Robotmaster%20v6%20new%20interface(3).png), acessido pela última vez a 30 de Maio de 2016.
- [34] <http://www.robotmaster.com/pt/>, acessido pela última vez a 30 de Maio de 2016.
- [35] <http://nl.sprutcam.com/images/products/SprutCAM/articles/sprutcam-02.jpg>, acessido pela última vez a 30 de Maio de 2016.
- [36] <http://www.sprutcam.com/>, acessido pela última vez a 30 de Maio de 2016.
- [37] <http://new.abb.com/products/robotics/application-software/machining/robotstudio-machining-powerpac>, acessido pela última vez a 30 de Junho de 2016.
- [38] <http://www.delcam.com/software/robotics/index.asp>, acessido pela última vez a 30 de Junho de 2016.
- [39] <http://www.3ders.org/articles/20160119-delcam-to-research-metal-3d-printing-with-new-abb-robot-arm-and-powermill-robot-interface.html>, acessido pela última vez a 30 de Junho de 2016.
- [40] <http://www.geopl.m.com/knowledge-base-resources/Siemens-PLM-NX-CAM-Robotics-Programming-fs-Y5.pdf>, acessido pela última vez a 30 de Junho de 2016.
- [41] <http://camdivision.pl/wp-content/uploads/2015/10/NX-CAM-Robotics-KUKA.png>, acessido pela última vez a 30 de Junho de 2016.
- [42] [https://library.e.abb.com/public/98ba43a906331fec48257c6f00374818/PR10031EN%20R15\\_En.pdf](https://library.e.abb.com/public/98ba43a906331fec48257c6f00374818/PR10031EN%20R15_En.pdf), acessido pela última vez a 1 de Agosto de 2016.

- [43] [https://library.e.abb.com/public/bedd1769ea1e4bb9c1257da10037e215/IRC5\\_IndustrialRobotController\\_ROB0295EN.pdf](https://library.e.abb.com/public/bedd1769ea1e4bb9c1257da10037e215/IRC5_IndustrialRobotController_ROB0295EN.pdf), acessido pela última vez a 1 de Agosto de 2016.
- [44] <http://www.dremeleurope.com/pt/pt/dremel%C2%AE3000-6013-ocs-c/>, acessido pela última vez a 3 de Agosto de 2016.
- [45] <http://www.dremeleurope.com/pt/pt/ocs/download/originalpdf--/Manual%20de%20instru%C3%A7%C3%B5es-20010.pdf>, acessido pela última vez a 3 de Agosto de 2016.
- [46] <http://www.dremeleurope.com/pt/pt/fresasdealtavelocidade-6020-ocs-c/>, acessido pela última vez a 3 de Agosto de 2016.
- [47] Slides de ROBIN, Robótica Industrial – Tutorial: Criação e Definição de Ferramentas e Objetos de Trabalho, Ano letivo de 2014/2015.

## Anexo A. *Datasheet* do Robô ABB IRB 140

Robotics

### IRB 140 Industrial Robot

#### Main Applications

Arc welding  
Assembly  
Cleaning/Spraying  
Machine tending  
Material handling  
Packing  
Deburring



#### Small, Powerful and Fast

Compact, powerful IRB 140 industrial robot. Six axis multipurpose robot that handles payload of 6 kg, with long reach (810 mm). The IRB 140 can be floor mounted, inverted or on the wall in any angle. Available as Standard, Foundry Plus 2, Clean Room and Wash versions, all mechanical arms completely IP67 protected, making IRB 140 easy to integrate in and suitable for a variety of applications. Uniquely extended radius of working area due to bend-back mechanism of upper arm, axis 1 rotation of 360 degrees even as wall mounted.

The compact, robust design with integrated cabling adds to overall flexibility. The Collision Detection option with full path retraction makes robot reliable and safe.

Using IRB 140T, cycle-times are considerably reduced where axis 1 and 2 predominantly are used.

Reductions between 15-20 % are possible using pure axis 1 and 2 movements. This faster version is well suited for packing applications and guided operations together with PickMaster.

IRB 140 Foundry Plus 2 and Wash versions are suitable for operating in extreme foundry environments and other harsh environments with high requirements on corrosion resistance and tightness. In addition to the IP67 protection, excellent surface treatment makes the robot high pressure steam washable. Also available in white Clean Room ISO class 8 version, making it especially suited for environments with stringent cleanliness standards.

Power and productivity  
for a better world™ **ABB**



# Anexo B. *Datasheet* do Controlador ABB IRC5

Robotics

## IRC5 Industrial Robot Controller

Based on more than four decades of robotics experience, the IRC5 is the robotic industry's benchmark in robot controller technology. In addition to ABB's unique motion control it brings flexibility, safety, modularity, application interfaces, multi-robot control and PC tool support.



### Safe

Operator safety is a leading benefit of the IRC5. It fulfills all relevant regulations and is certified by third party inspectors world wide.

Electronic position switches and SafeMove™ represent a new generation of safety, enabling more flexible robotic cell safety concepts, e.g. enabling floor space reduction and collaboration between robot and humans.

### Fast and accurate

The IRC5 gives our robots the ability to perform their tasks in a highly efficient manner. Based on advanced dynamic modelling, the IRC5 automatically optimizes the performance of the robot by reducing cycle times (QuickMove™) and providing precise path accuracy (TrueMove™).

Thanks to ABB's IRC5 technology, a robot's motion is predictable and its performance high, with no tuning required by the programmer. What you program is what you get.

### Compatible

No matter where in the world your robot is located, and regardless of what regulatory standards apply, the IRC5 is up to the task. ABB's controller is compatible with various types of main voltages and can handle a broad spectrum of environmental conditions. IRC5 communicates with other machines in a manufacturing environment; in a safe and

predictable way. It supports the majority of all state-of-the-art industrial networks for I/O. Sensor interfaces, remote access and a rich set of programmable interfaces are examples of the IRC5's many powerful networking features.

### Programmable

All ABB robot systems are programmed with RAPID™, ABB's flexible, high-level programming language. On the surface RAPID's basic features and functionality are easy to use, but dig deeper and you will find that this programming language allows you to create highly sophisticated solutions. It is a truly universal language on and off the shop floor which supports structured programs, and advanced features. It also incorporates powerful support for the most common robot process applications such as welding and assembly.

### Reliable

The IRC5 is practically maintenance free, and its outstanding quality ensures unmatched up-time. Built-in diagnostic functions help ensure fast recovery and production restarts when operations are interrupted on the factory floor.

The IRC5 also comes equipped with remote monitoring technology, ABB Remote Service. Advanced diagnostics allow quick investigation of failures as well as real-time monitoring of the robot condition throughout its lifecycle; all made to increase your productivity.

Power and productivity  
for a better world™ **ABB**

Versions, a cabinet range covering every need.  
 The IRC5 comes in different variants to provide a  
 cost-effective and optimized solutions for every need.



IRC5 Single Cabinet Controller	
Dimensions	(H x W x D Weight):
Single cabinet	970 x 725 x 710 mm 150 kg
Multimove drive modules	720 x 725 x 710 mm 130 kg
Electrical connection	Supply voltage: 3 phase 200-600 V, 50-60 Hz
Level of protection	IP54 (cooling ducts IP33)
Environment	Ambient temperature: 0-45°C option 0-52°C Relative humidity: Max. 95% non condensing
Extended safety options	Electronic Position Switches: 5 safe outputs monitoring axis 1-7
SafeMove	Supervision of stand-still, speed, position and orientation (robot and additional axes): 8 safe inputs for function activation, 8 safe monitoring outputs

- Designed for high IP protection and full expandability.
- Provides a protected environment for auxiliary equipment in the robot system.
- Capable of control of up to four robots in a MultiMove™ setup. Just add a compact drive module to each additional robot.
- MultiMove opens up previously unthinkable operations, thanks to the perfect coordination of complex motion patterns.

IRC5C Compact Controller	
Dimensions	(H x W x D Weight):
	310 x 449 x 442 mm 30 kg
Electrical connection	Supply Voltage: Single phase 220/230 V, 50-60 Hz
Level of protection	IP20
Environment	Ambient temperature: 0-45°C Relative humidity: Max. 95% non condensing

- Offers the capabilities of the powerful IRC5 controller in a compact format.
- Delivers space saving benefits and easy commissioning through one phase power input
- External connectors for all signals and a built in expandable 16 in, 16 out I/O system.

## Anexo C. Dimensões das Fresas



Fresa de alta velocidade de 3,2 mm

<b>Diâmetro do encabadouro</b>	3,2 mm
<b>Diâmetro de trabalho</b>	3,2 mm
<b>Comprimento do acessório</b>	39,0 mm
<b>Rotações por minuto máximas</b>	30.000 r.p.m



Fresa de alta velocidade de 6,4 mm

<b>Diâmetro do encabadouro</b>	3,2 mm
<b>Diâmetro de trabalho</b>	6,4 mm
<b>Comprimento do acessório</b>	38,0 mm
<b>Rotações por minuto máximas</b>	30.000 r.p.m



Fresa de alta velocidade de 4,8 mm

<b>Diâmetro do encabadouro</b>	3,2 mm
<b>Diâmetro de trabalho</b>	4,8 mm
<b>Comprimento do acessório</b>	39,0 mm
<b>Rotações por minuto máximas</b>	30.000 r.p.m