



DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA ROBÓTICA PARA POLIMENTO AUTOMÁTICO DE MOLDES

RÚBEN FILIPE TEIXEIRA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE DO PORTO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR FEUP

ENGENHEIRO VÍTOR MARTINS AUGUSTO

ORIENTADOR NORCAM

ENGENHEIRO BRUNO COUTO

CANDIDATO Rúben Filipe Teixeira Costa

Código 201201749

TÍTULO Desenvolvimento de célula robótica para polimento automático de moldes

DATA Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F106 - 15:15h

JURÍ *Presidente* Professora Ascensão Lopes

DEMM/FEUP

Arguente Professor Carlos Relvas

DEM/UA

Orientador Engenheiro Vítor Martins Augusto

DEMM/FEUP

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao engenheiro Vítor Martins Augusto por me ter aceite como seu orientando numa fase tardia e pela sugestão de tema, ao engenheiro Bruno Couto por toda a sua disponibilidade, compreensão e acompanhamento durante o estágio realizado, ao engenheiro Pedro Vieira de Castro por todas as sugestões valiosas de complementação da dissertação e, de um modo geral, a todos os restantes colaboradores da Norcam pela forma afável como fui acolhido na empresa.

Em segundo, gostaria de agradecer ao engenheiro Simão Moreira, ao engenheiro André Pinho e ao engenheiro Bruno Silva do grupo Simoldes, por todo o apoio e ajuda durante os testes de polimento realizados.

Em terceiro, quero agradecer à minha família, em específico, ao meu irmão e à minha irmã por diariamente me apoiarem e obrigarem a tornar numa pessoa melhor e aos meus pais por todo o esforço e trabalho pelo qual tiveram que passar para me dar as melhores condições possíveis durante todos estes anos.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer aos meus amigos por todos os bons momentos que me proporcionaram, especialmente durante estes cinco anos de curso.

Resumo

Este trabalho surge no âmbito da dissertação para conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais e reporta o estágio realizado na empresa Norcam - Engenharia e Design Industrial e cujo principal foco durante o mesmo foi um projeto elaborado na empresa Moldes de Azeméis, MDA, pertencente ao grupo Simoldes, que visou o desenvolvimento de uma célula robótica para polimento automático de moldes.

Numa fase inicial deste trabalho, serão abordados o *PowerMILL*, o *software* no qual foi elaborada toda a programação do robô responsável pelo polimento, e o *PowerMILL Robot Interface*, PRI, o *plug-in* que estabelece a interface *software-robô* e onde são escritos os programas NC das estratégias elaboradas.

O derradeiro objetivo do grupo Simoldes consiste em conseguir realizar o polimento de moldes de uma forma totalmente automatizada. Para alcançar esta meta, implementou-se uma célula robótica equipada com um robô Motoman MH50 II, dois componentes auxiliares ao polimento, respetivamente o ACF e o BIAX, um sistema de fixação do molde e três tipos de ferramentas de polimento diferentes. Os primeiros ensaios evidenciaram um conjunto de parâmetros que condicionam a qualidade do polimento, pelo que a segunda parte desta dissertação incidiu exatamente na determinação e afinação dos parâmetros de polimento considerados ideais. Concluiu-se que no âmbito desta dissertação, seria um grande avanço se o polimento de um molde pudesse ser parcialmente realizado pela célula robótica, ficando apenas o polimento final a cargo do polidor.

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o objetivo proposto foi cumprido com sucesso, tendo sido realizado 50% do polimento com o robô, logo reduziu-se o trabalho manual para metade.

Por último, foi realizada uma análise preliminar à viabilidade económica do processo que teve como intuito explorar se o robô é rentável economicamente quando comparado com mão de obra qualificada.

Abstract

This work was developed within the scope of the dissertation for the conclusion of the Integrated Masters in Metallurgical and Materials Engineering and reports the curricular internship at Norcam - Engenharia e Design Industrial and whose focus during it was a project elaborated at Moldes de Azeméis, MDA, one of the Simoldes group's companies, which aimed to the development of a robotic cell for automatic polishing of molds.

In an initial phase of this work, PowerMILL, the software in which all the programming of the robot responsible for the polishing was elaborated, will be approached, as well as PowerMILL Robot Interface, PRI, the plug-in that establishes the software-robot interface and enables the user to write the NC programs of the developed polishing strategies.

The ultimate goal of the Simoldes group is to be able to polish molds in a fully automated way. To achieve this goal, a robotic cell was implemented, equipped with a Motoman MH50 II robot, two auxiliary polishing components, respectively the ACF and BIAX, a mold fastening system and three different types of polishing tools. The first tests shown a set of parameters that conditioned the polishing quality, so the second part of this dissertation focused precisely the determination and tuning of the polishing parameters considered ideal. It was concluded that in the scope of this dissertation, it would be a great advance if the polishing of a mold could be partially accomplished by the robotic cell, leaving only the final polishing for the qualified polisher.

Based on the results obtained, it is possible to affirm that the proposed goal was successfully accomplished, with 50% of the polishing being done with the robot, which means that half of the manual work was reduced.

Finally, a preliminary analysis of the economic viability of the process was made, as a purpose to explore whether the robot is economically profitable when compared to a skilled manual polisher.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Lista de Abreviaturas	x
Objetivo	1
1 - Empresas	2
1.1 - Norcam.....	2
1.2 - Grupo Simoldes	2
2 - Introdução.....	3
2.1 - CAD	4
2.2 - CAM.....	4
2.3 - PowerMILL	6
2.3.1 - PowerMILL Robot Interface	7
2.3.1.1 - Robot Library.....	8
2.3.1.2 - Robot Cell.....	9
2.3.1.3 - Robot Control	10
2.3.1.4 - Robot Program	11
2.4 - Célula Robótica	11
2.4.1 - Robô	13
2.4.2 - Robô vs CNC	16
2.4.3 - Aplicações comuns de robôs na indústria	18
2.5 - Cinemática	20
2.6 - Tipos de programação	20
2.6.1 - Programação teach & learn	20
2.6.2 - Programação offline	21
3 - Materiais, métodos e recursos.....	22

3.1 - Célula robótica Simoldes	22
3.1.1 - Motoman MH50 II	23
3.1.2 - Componentes Auxiliares	24
3.1.2.1 - ACF.....	25
3.1.2.2 - Spindle BIAx	27
3.2 - Metodologia de polimento manual	29
3.3 - Ferramentas de polimento	32
3.4 - Parâmetros de polimento	34
3.4.1 - Estado superficial do molde	35
3.4.2 - Força do ACF	35
3.4.4 - Pressão do ar	38
3.4.5 - Desgaste da ferramenta	39
3.4.6 - Formato da ferramenta.....	41
3.4.7 - Entrada da ferramenta na superfície	42
3.4.8 - Óleo de polimento.....	42
4 - Resultados experimentais	43
5 - Robô VS Polidor	54
5.1 - Vantagens e desvantagens	54
5.2 - Análise preliminar à viabilidade económica do processo.....	55
6 - Conclusões.....	57
7 - Trabalhos futuros.....	58
Referências Bibliográficas.....	59
Anexos	60
Anexo A.....	60
Anexo B.....	61
Anexo C.....	62
Anexo D.....	63
Anexo E.....	64
Anexo F	65

Índice de Figuras

Figura 1: Fluxograma de desenvolvimento e processo de fabrico do produto [1, 2].	3
Figura 2: Exemplo de uma máquina CNC [1].	5
Figura 3: Interface PowerMILL.	6
Figura 4: Interface PowerMILL/PRI.	7
Figura 5: Robot Library.	8
Figura 6: Robot Cell: 1) Calculadora de calibração e ferramenta; 2) Editor da posição do modelo; 3) Criação automática de um plano de trabalho alinhado com o eixo da ferramenta.	9
Figura 7: Robot Control: 1) Reposição e início da simulação da estratégia; 2) Controlo da ferramenta; 3) Movimentos dos eixos; 4) Guardar a simulação..	10
Figura 8: Robot Program: 1) Nome do programa; 2) Escrever o programa. ...	11
Figura 9: Célula robótica [7].	13
Figura 10: Robô industrial de 6 eixos.	14
Figura 11: Tipos de robôs industriais [10].	15
Figura 12: Principais fabricantes de robôs industriais [5].	16
Figura 13: Graus de liberdade de um robô de sete eixos e respetiva denominação de cada eixo [7].	17
Figura 14: Tipos de singularidade dos robôs industriais [2].	18
Figura 15: Robô e sistema de fixação da célula robótica da MDA.	23
Figura 16: Controlador DX200 e as funcionalidades do seu comando de controlo (adaptado de [13]).	23
Figura 17: Componente auxiliar ACF [14].	25
Figura 18: Interface do programa de controlo do ACF.	26
Figura 19: Constituintes do spindle BIAX.	27
Figura 20: Sexto eixo do robô Motoman MH50 II com os dois componentes auxiliares.	29
Figura 21: Lixadeira elétrica [16].	30
Figura 22: Técnica de polimento em cruz.	31
Figura 23: Suporte manual de lixa.	31
Figura 24: Mó cónica.	32
Figura 25: Mós de 15 mm e 25 mm de diâmetro.	34

Figura 26: Gráfico Força (N) VS Amplitude (α^0).	37
Figura 27: Gráfico Pressão do ar VS Rotações.	38
Figura 28: Comparação da área de contacto entre uma mó rasa (direita) e uma mó de ponta esférica (esquerda).	42
Figura 29: Modelo CAD do molde exemplo e zonas de teste.	44
Figura 30: Estado superficial final das zonas I, II, III e IV.	46
Figura 31: Estado superficial final das secções IA, IB, IIA e IIB da zona X.	48
Figura 32: Estado superficial final da zona XIII + XIV.	50
Figura 33: Estado superficial final da zona XVII.	51
Figura 34: Mós após o polimento.	60
Figura 35: Secção IB da zona X com maior detalhe.	63
Figura 36: Defeito superficial “picotado”.	64
Figura 37: Estado superficial final da zona XIX.	65

Índice de Tabelas

Tabela 1: Aplicações de robôs em diferentes ramos da indústria (adaptado de [2]).	19
Tabela 2: Características dos vários modelos de ACF da FerRobotics [14]. ...	26
Tabela 3: Características do spindle RSC-S-20000 (adaptado de [15]).	28
Tabela 4: Características principais das mós escolhidas (adaptado de [17]).	33
Tabela 5: Parâmetros de polimento utilizados nas Zonas I, II, III e IV.	45
Tabela 6: Parâmetros de polimento utilizados na zona X.	47
Tabela 7: Parâmetros de polimento da zona XIII + XIV.	49
Tabela 8: Parâmetros de polimento utilizados na zona XVII.	51
Tabela 9: Parâmetros de polimento utilizados na zona XIX.	52
Tabela 10: Valores finais de cada parâmetro de polimento considerado.	53
Tabela 11: Tabela final dos parâmetros de polimento nas zonas I a XIV.	60
Tabela 12: Tabela final dos parâmetros de polimento nas zonas XIII + XIV a XX.	61

Lista de Abreviaturas

CAD - *Computer-Aided Design*

CAM - *Computer-Aided Manufacturing*

CAE - *Computer-Aided Engineering*

NC - *Numeric Control*

PRI - *PowerMILL Robot Interface*

ACF - *Active Control Flange*

CNC - *Computer Numeric Control*

TCP - *Tool Center Point*

Objetivo

O objetivo desta dissertação consistiu na implementação de uma célula robotizada para polimento de moldes, substituindo assim o tradicional polimento manual. Como tal, foram definidos, e posteriormente testados num molde de testes, vários parâmetros de polimento que controlam e influenciam o processo automático. Através dos testes realizados pretendia-se identificar o conjunto de parâmetros ideal para que se reduzisse ao máximo o tempo e as operações de polimento manual, definindo a viabilidade técnica e económica de uma célula automatizada de polimento de moldes.

1 - Empresas

1.1 - Norcam

A Norcam - Engenharia e Design Industrial foi fundada em 1991 e é uma empresa que se dedica ao desenvolvimento e implementação de soluções industriais como, sistemas de CAD/CAM/CAE, sistemas de prototipagem rápida, digitalizadores tridimensionais entre outros meios tecnológicos avançados numa ótica de *Concurrent Engineering*.

A Norcam tem como principal fonte de rendimento a venda e manutenção de *softwares* CAD/CAM da *Autodesk*, antiga *Delcam*, nomeadamente o *PowerMILL*, o *PowerSHAPE*, o *PowerINSPECT* e o *FeatureCAM*, a várias áreas da indústria, principalmente a empresas especializadas em maquinaria de moldes.

1.2 - Grupo Simoldes

O grupo Simoldes nasceu a 30 de novembro de 1959 com a Simoldes Aços, inicialmente uma empresa de fabrico de moldes para brinquedos e utensílios domésticos. Com o passar dos anos a Simoldes Aços foi adquirindo novas empresas como forma de combater as elevadas exigências da indústria, sendo o grupo até ao momento composto por mais cinco empresas em Portugal, a MDA (Moldes de Azeméis), a IMA (Indústria de Moldes de Azeméis), a IGM (Indústria Global de Moldes), a Mecamolde e a Umolde e por mais uma empresa no Brasil, a Simoldes Aços Brasil.

Hoje em dia, o grupo Simoldes é considerado o maior fabricante europeu de moldes, tendo clientes espalhados por todo o globo, desde empresas do ramo automóvel como a *BMW*, a *Ford* e a *Mercedes*, a empresas do ramo eletrónico com a *Nokia* e a *Philips*.

2 - Introdução

A elevada competitividade empresarial e a constante necessidade de satisfazer, melhor e eficazmente, as expectativas e os requisitos dos clientes, obriga a que as empresas alterem o seu método de produção de forma a estabelecer processos mais rápidos e económicos, sem nunca desvalorizar a qualidade ou o valor do produto final.

A introdução de ferramentas CAD-CAM, como por exemplo o *PowerSHAPE* (CAD) e o *PowerMILL* (CAM) permite estabelecer uma interface consistente que interliga as diferentes etapas do processo de fabrico, melhorando significativamente a resposta da empresa aos requisitos do cliente e acrescentando valor ao produto final. Na figura 1 está apresentado um fluxograma ilustrativo do desenvolvimento e processo de fabrico do produto, sendo possível ver as diferentes etapas onde são aplicadas as ferramentas CAD-CAM.

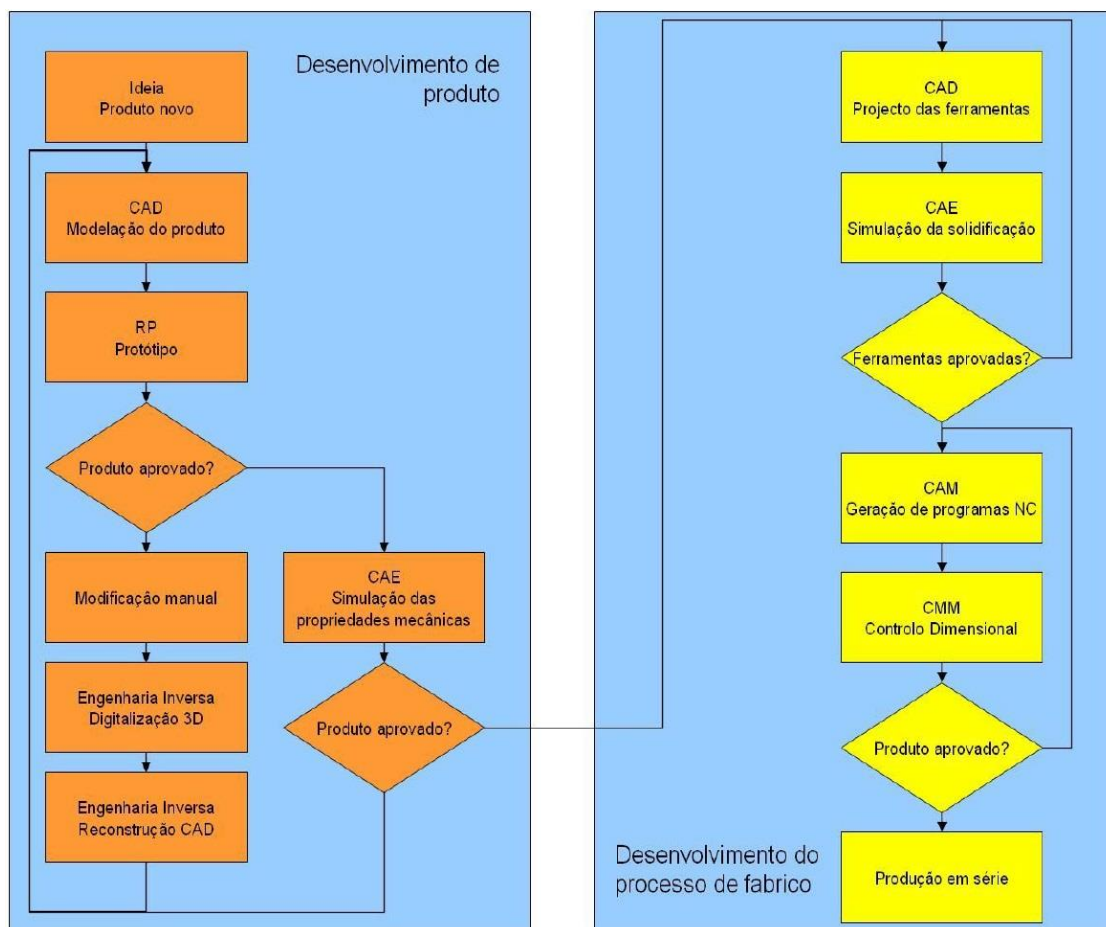


Figura 1: Fluxograma de desenvolvimento e processo de fabrico do produto [1, 2].

2.1 - CAD

A sigla CAD, *Computer-Aided Design*, em português, Desenho Assistido por Computador, engloba todos os *softwares* de modelação 2D e 3D utilizados maioritariamente na fase de desenvolvimento do produto, isto é, na fase onde é idealizado e modelado o produto pretendido. Antes da introdução deste tipo de *softwares*, a modelação era realizada manualmente por desenhadores técnicos qualificados incutidos de representar fielmente a geometria do produto, sendo esta uma tarefa de elevada responsabilidade e competência [1].

A passagem do papel para o computador, através dos CAD, permitiu não só aumentar a produtividade do desenhador, diminuindo o tempo de modelação e a ocorrência de erros de desenho, como também a criação de modelos de arame 3D, que através de fortes algoritmos, possibilitam a criação de superfícies e sólidos, aumentando o leque de geometrias complexas possíveis de desenhar [1]. Entre os *softwares* mais conhecidos estão o *PowerSHAPE*, o *CATIA* e o *SolidWorks*.

No final da modelação, é guardado o ficheiro que contém o modelo CAD do produto, que será utilizado posteriormente em *softwares* CAM para a elaboração de tarefas de manufatura, durante o processo de fabrico.

2.2 - CAM

Os *softwares* CAM, *Computer-Aided Manufacturing*, em português, Manufatura Assistida por Computador, surgem na fase do processo de fabrico do produto, e aplicam-se a qualquer máquina que seja controlada por computador, as chamadas máquinas de controlo numérico ou máquinas CNC, Controlo Numérico Computorizado [1]. Entre os *softwares* CAM mais conhecidos estão, por exemplo, o *PowerMILL*, o *hyperMILL*, o *DEPOCAM* e o *FeatureCAM*.

Dada a enorme versatilidade das máquinas CNC, estas são empregues em diferentes áreas da indústria de transformação, desempenhando, por exemplo, funções de maquinagem, de polimento ou de corte [1]. Alguns exemplos destas máquinas são:

- Tornos mecânicos
- Fresadoras

- Centros de maquinagem
- Eletroerosão
- Máquinas de corte e de medição



Figura 2: Exemplo de uma máquina CNC [1].

Nestas máquinas, inicialmente o operador abre o desenho CAD do produto no *software* CAM e define as estratégias de maquinagem que pretende executar. Posteriormente, as estratégias são escritas de forma completamente automática num programa NC (*Numeric Control*) constituído por dados numéricos ou alfanuméricos que definem o percurso de comando numérico. No fim, o programa é transferido para o controlador da CNC, onde é traduzido em movimentos de motores. Fundamentalmente, são estas as operações executadas por este tipo de *software*, no entanto, com o desenvolvimento da indústria surgem a necessidade de melhorar e alterar os equipamentos utilizados, aumentando o leque de operações disponíveis e a qualidade de execução das mesmas.

A aposta em células robóticas alternativamente às máquinas CNC apresenta algumas vantagens e demonstra na perfeição a evolução da indústria ao impor, por exemplo, o desenvolvimento de *plug-ins* para a utilização de *softwares* CAM em robôs. Este assunto será explorado mais à frente neste trabalho.

2.3 - PowerMILL

O *software* CAM utilizado neste trabalho foi o *PowerMILL*, desenvolvido pela Autodesk e atualmente utilizado por mais de 15.000 organizações em todo o mundo. Trata-se de um *software* bastante intuitivo na programação de trajetórias de maquinação em sistemas multi-eixos, nomeadamente, 3, 3+2 e 5 eixos para máquinas CNC [1, 3, 4].

O *PowerMILL* permite ao operador definir, em função da geometria CAD, qual a melhor estratégia de desbaste, re-desbaste ou acabamento a adotar, após especificadas as ferramentas de corte e as dimensões do bloco. O *software* oferece ainda dois níveis de opções para a simulação das estratégias elaboradas, sendo o primeiro uma simulação apenas com a visualização do movimento da ferramenta de corte ao longo do percurso e o segundo nível, o *ViewMILL*, uma aplicação intrínseca ao *PowerMILL* onde é possível visualizar a remoção do material durante a passagem da ferramenta de corte [4]. A simulação das estratégias de maquinação não só permite uma verificação quanto a colisões da ferramenta com a peça, como também o aumento da eficiência das mesmas, explorando a possibilidade de percursos mais curtos, com o objetivo de reduzir tempos de maquinação e desgaste das ferramentas [3]. Na figura 3 está apresentada a interface do *PowerMILL*.

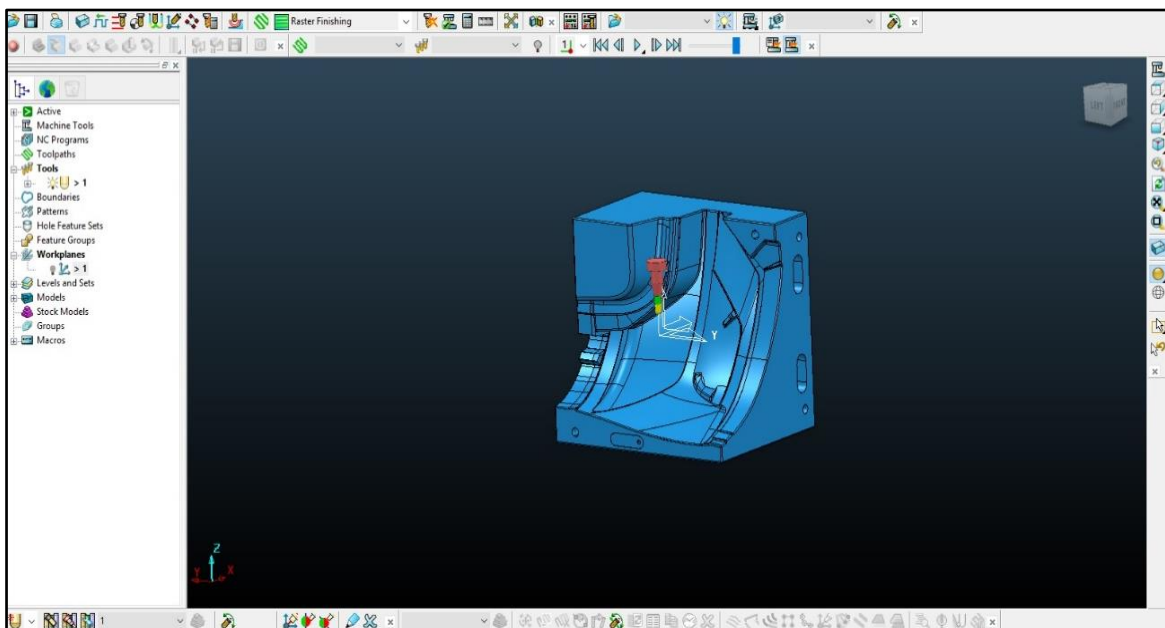


Figura 3: Interface *PowerMILL*.

2.3.1 - *PowerMILL Robot Interface*

A programação a multi-eixos através de métodos *teach-and-learn* sempre foi uma tarefa árdua e complexa de executar em robôs. Desta forma, em colaboração com a Norcam, a Delcam, atual Autodesk, desenvolveu o *PowerMILL Robot Interface*, ou apenas PRI, um *plug-in* do *PowerMILL* que permite a programação *offline* de robôs até doze eixos da mesma forma que seria programada uma máquina CNC [5]. Na figura 4 está apresentada a interface *PowerMILL/PRI*.

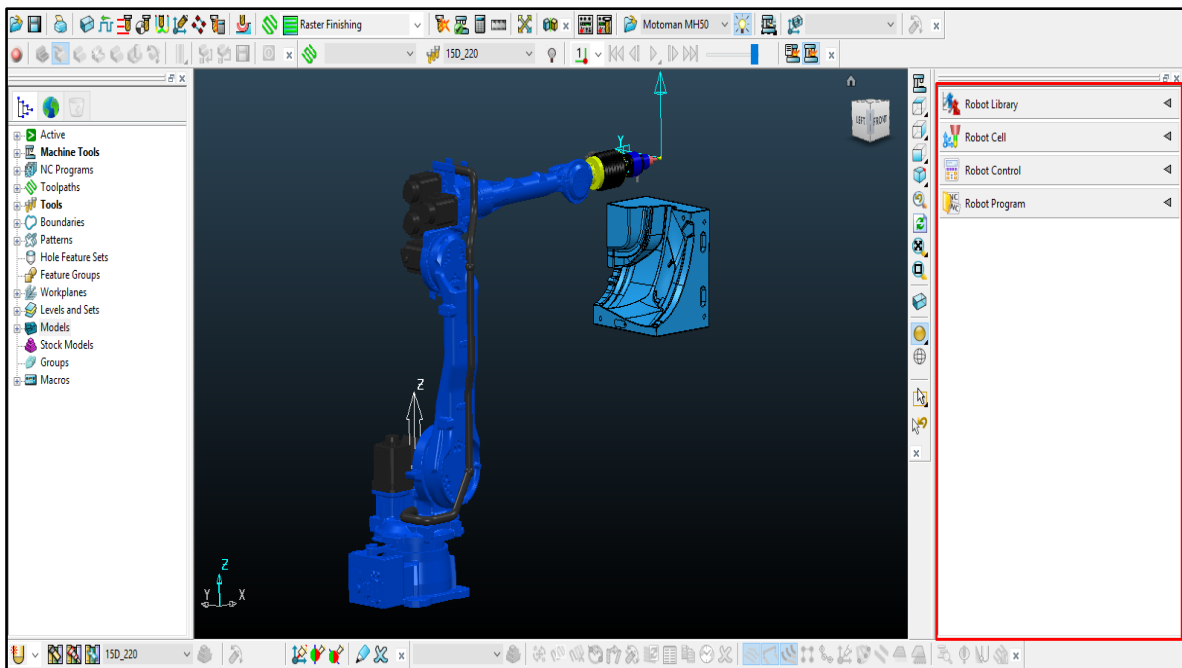


Figura 4: Interface *PowerMILL/PRI*.

Após definidas as estratégias de maquinagem no *PowerMILL*, o PRI disponibiliza quatro menus, cada um com uma operação diferente relativa ao controlo do robô, nomeadamente:

- *Robot Library*
- *Robot Cell*
- *Robot Control*
- *Robot Program*

2.3.1.1 - Robot Library

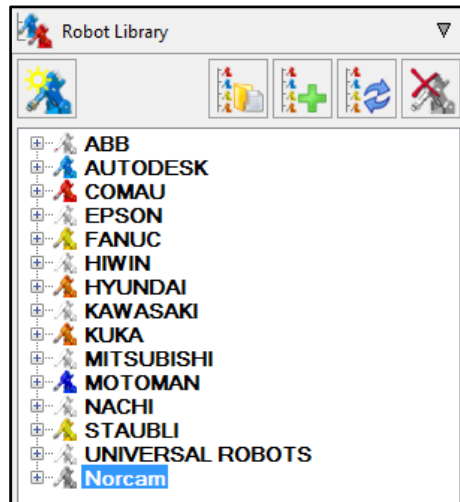


Figura 5: Robot Library.

O *Robot Library*, ou biblioteca de robôs, tal como o nome indica, é o menu onde é escolhido o robô a utilizar. Aqui estão armazenados os atalhos para os ficheiros mtd (*machine tool design*), ficheiros XML que ativam o robô no *PowerMILL*. Nestes ficheiros estão definidos os diferentes dmt (*delcam machining triangles*) de cada um dos eixos e componentes do robô e as coordenadas relativas ao eixo da ferramenta e da mesa da célula, *<head_attach_point>* e *<table_attach_point>*, respectivamente. Este menu contém ainda botões que permitem adicionar, atualizar, ocultar ou remover o robô do projeto e da biblioteca.

2.3.1.2 - Robot Cell

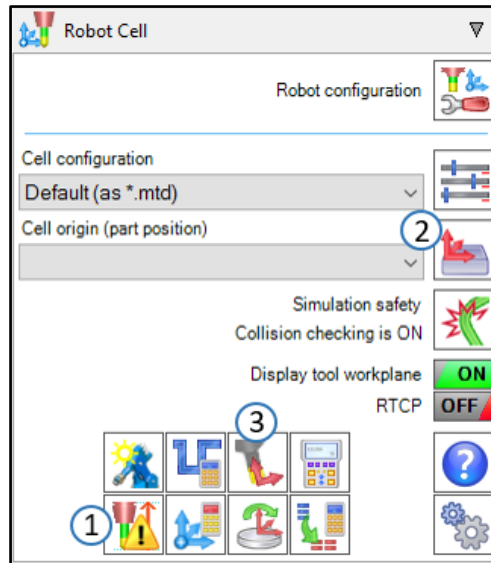


Figura 6: *Robot Cell*: 1) Calculadora de calibração e ferramenta; 2) Editor da posição do modelo; 3) Criação automática de um plano de trabalho alinhado com o eixo da ferramenta.

O menu *Robot Cell*, é onde o operador controla os parâmetros relativos ao posicionamento de todas as partes constituintes da célula robótica, nomeadamente, a ferramenta, a mesa de trabalho e o modelo CAD.

Na figura 6 estão identificados os três botões mais utilizados neste menu: o botão 1 com a calculadora para a calibração da ferramenta, o botão 2 para posicionamento do modelo CAD e o botão 3 para criação automática de um plano de trabalho alinhado com o eixo da ferramenta. No primeiro botão, após medição manual do comprimento da ferramenta (parte cortante, haste e suporte) e inserção do valor medido na calculadora, o operador obtém as coordenadas do eixo da ferramenta que deve inserir no comando do robô para finalizar a calibração do componente; o segundo botão permite ao operador alterar a posição do modelo CAD em relação ao eixo principal do robô e o terceiro botão, cria automaticamente um plano de trabalho igual ao plano do eixo da ferramenta. Além dos botões principais, existe ainda um botão para verificação de colisões dos componentes e um controlador virtual do robô, entre outras operações.

2.3.1.3 - Robot Control

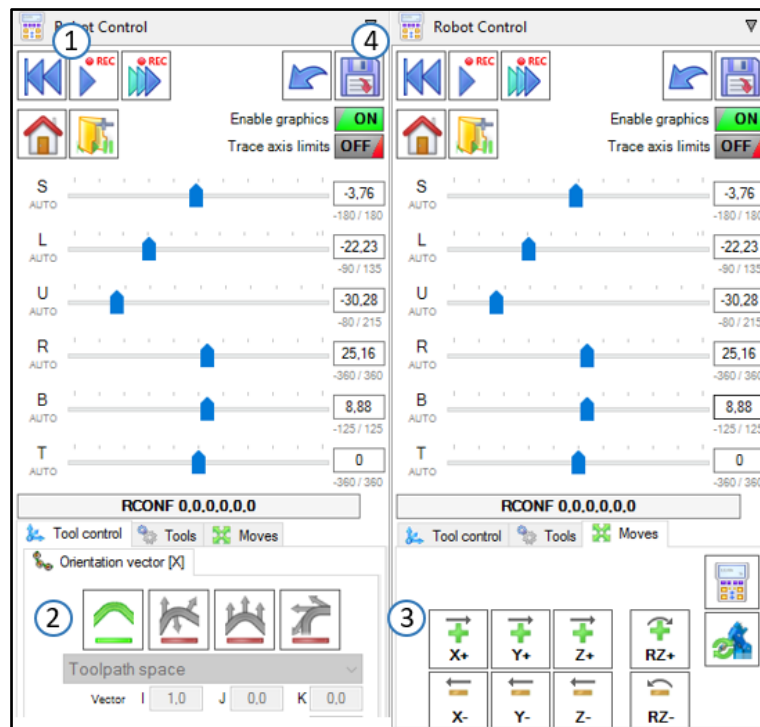


Figura 7: Robot Control: 1) Reposição e início da simulação da estratégia; 2) Controlo da ferramenta; 3) Movimentos dos eixos; 4) Guardar a simulação.

No PRI, ao contrário das máquinas CNC, é necessário simular as estratégias de maquinagem criadas até ao fim do percurso da mesma, de modo a evitar singularidades do robô e colisões. Esta tarefa é executada no menu *Robot Control*.

Na figura 7 estão identificados quatro conjuntos de botões principais deste menu. O conjunto 1, após ativada no *PowerMILL* a estratégia pretendida de programar, leva o robô para a posição inicial, isto é, para o primeiro ponto seguro da estratégia e inicia a mesma. Nos conjuntos de botões 2 e 3, o operador controla a forma com que a ferramenta segue o percurso, podendo seguir de forma livre ou segundo vetores de orientação, e os movimentos dos eixos do robô, respetivamente. No fim da simulação, ou seja, quando o robô atinge o último ponto seguro, é necessário guardar a simulação, utilizando o botão 4, para ser utilizada no último menu do PRI.

2.3.1.4 - Robot Program

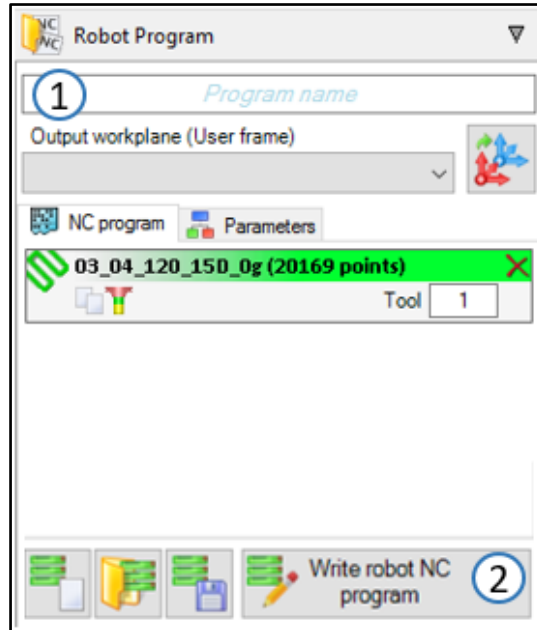


Figura 8: Robot Program: 1) Nome do programa; 2) Escrever o programa.

No menu *Robot Program*, é escrito o programa NC da estratégia pretendida. Após adicionar a simulação previamente guardada no espaço em branco do menu, é escolhido o nome do programa no botão de texto 1 e escrito o programa no botão 2. Dependendo do número de pontos da estratégia, o programa é escrito apenas num, ou em vários ficheiros JBI, sendo que um desses ficheiros está programado para chamar todos os outros ficheiros. Por fim, os ficheiros devem ser enviados, via rede ou manualmente, através de uma *pen drive* por exemplo, do computador para o comando do robô.

2.4 - Célula Robótica

Apesar de o robô ser o órgão principal numa operação industrial, esta nunca seria realizada na totalidade sem a existência de sistemas auxiliares ao robô como, o sistema de alimentação, o sistema de fixação, entre outros. O conjunto robô-sistemas auxiliares denomina-se por célula robótica [6].

Por definição, uma célula robótica é descrita como uma área de trabalho devidamente estudada com um objetivo de produção comum, onde existem distribuições de tarefas, interligando equipamentos, na qual estará um ou mais robôs, permitindo assim a otimização e realização de diferentes operações [6].

Assumindo uma operação de polimento, os sistemas principais que devem constituir uma célula robótica são:

- **Robô e ferramenta** - constituintes que em conjunto vão realizar a tarefa principal, o polimento;
- **Sistema de alimentação** - sistemas responsáveis pelo transporte do produto para os sistemas de fixação;
- **Sistemas de segurança** - sistemas que garantem a segurança e proteção tanto dos equipamentos como do operador;
- **Sistema de posicionamento** - sistemas que irão garantir a calibração dos equipamentos e do produto a polir;
- **Sistema de controlo da operação** - computador onde são escritos os programas NC e controlados todos os constituintes eletrónicos da célula;
- **Sistema de fixação** - constituintes onde será colocado o produto a polir, por exemplo, mesa fixa ou rotativa;
- **Sistema de troca de ferramenta** - sistema onde estão armazenadas as diferentes ferramentas e onde se realiza a troca, manual ou automática, das mesmas;
- **Sistema de inspeção** - sistema responsável pela avaliação do resultado final da operação de polimento, geralmente uma inspeção realizada por um operador especializado.

Um exemplo de célula robótica com robô, sistema de troca de ferramenta e sistema de suporte, com mesa rotativa e fixa, pode ser visto na figura 9.

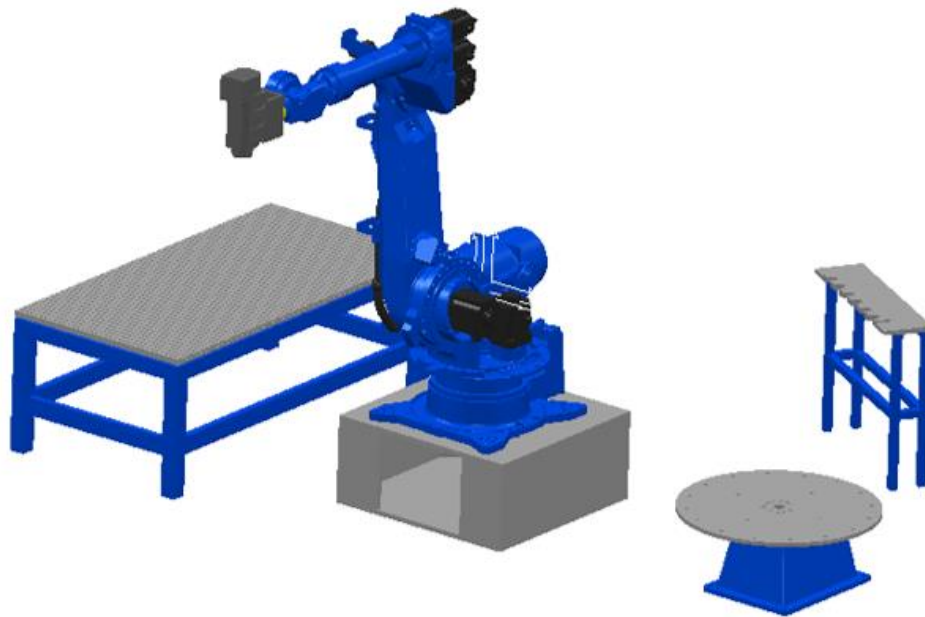


Figura 9: Célula robótica [7].

2.4.1 - Robô

Os robôs, muitas vezes denominados como manipuladores, surgem na indústria, não como substitutos das máquinas CNC, mas sim com o intuito de complementar o trabalho das mesmas, dada a sua precisão, repetibilidade e grande amplitude de movimentos. Normalmente, os robôs apresentam uma grande capacidade de carga e uma precisão na casa das décimas, ou até mesmo milésimas, de milímetro, estando estes dois parâmetros sempre dependentes das dimensões do robô [2, 8].

Um robô define-se como um equipamento composto por um conjunto de corpos conectados em série por juntas, estabelecendo os eixos do robô. Geralmente, um manipulador tem entre 5 a 6 eixos, formando duas extremidades, uma extremidade fixa ao chão, a base, e uma extremidade livre, o atuador, onde podem ser aplicados vários tipos de ferramentas, consoante a tarefa pretendida. Dada a sua geometria e o seu posicionamento, as três primeiras juntas são associadas a um cotovelo humano e tem como função orientar e posicionar o resto da estrutura. Já as restantes juntas têm como função orientar o robô [2, 8, 9]. Na figura 10 está apresentado o esquema de um robô com 6 eixos.



Figura 10: Robô industrial de 6 eixos.

Além da quantidade de eixos, os robôs industriais são também classificados quanto à configuração das três primeiras juntas. Tendo em conta a distribuição dos seus eixos e o tipo de coordenadas utilizado, surgem cinco tipos de robô [2, 10]:

- **Cartesiano** - três juntas prismáticas perpendiculares entre si;
- **Cilíndrico** - a primeira junta rotacional e as duas seguintes são prismáticas;
- **Esférico** - as duas primeiras juntas são rotacionais e perpendiculares entre si e a última é prismática;
- **SCARA** - é semelhante à esférica, sendo apenas as duas primeiras juntas paralelas entre si;
- **Antropomórfico** - três juntas de revolução, sendo a primeira perpendicular às duas seguintes.

Na figura 11 estão esquematizados os cinco tipos mencionados.

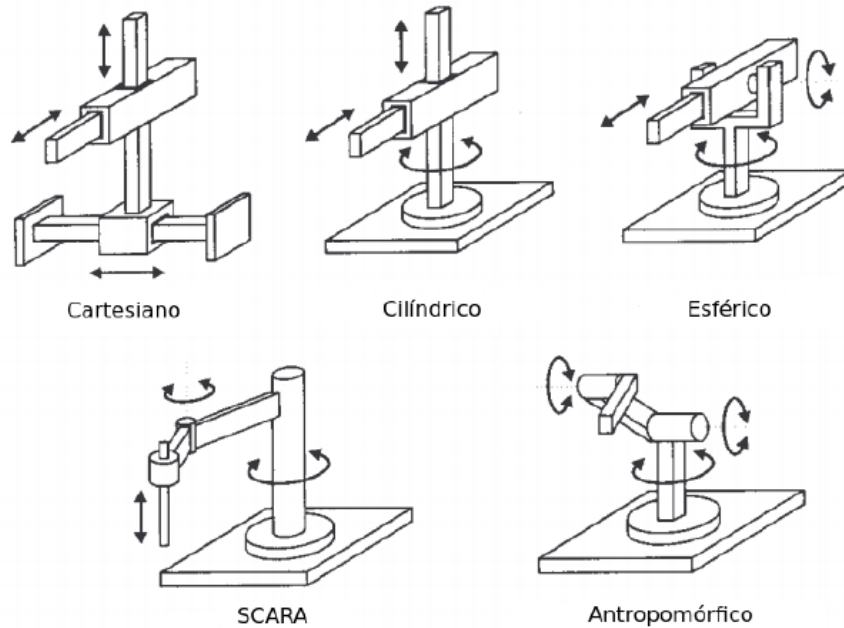


Figura 11: Tipos de robôs industriais [10].

A estrutura de um robô industrial comum é composta pelos seguintes elementos:

1. **Órgão terminal** - dispositivo afixado ao último eixo do robô de forma a anexar elementos para serem manipulados;
2. **Manipulador** - conjunto de corpos ligados entre si por juntas que permitem a cinemática do robô e definem a estrutura mecânica do robô;
3. **Sensores** - componentes responsáveis por avaliar a atuação do robô. Existem sensores internos, responsáveis por fornecer informação sobre a posição, velocidade e aceleração do robô, e sensores externos, como por exemplo câmaras de vídeo para detecção de colisões, responsáveis por fornecer informações sobre o ambiente em redor do robô;
4. **Controlador** - dispositivo que controla todos os movimentos do manipulador;
5. **Unidade de potência** - elemento que tem como objetivo fornecer energia aos vários componentes do robô.

Apesar de serem desenvolvidos para fins idênticos, os fabricantes de robôs destacam-se entre si pelas características como precisão, robustez e velocidade

que o seu modelo apresenta. Os principais fabricantes de robôs e os modelos fabricados por cada um estão apresentados na figura 12.

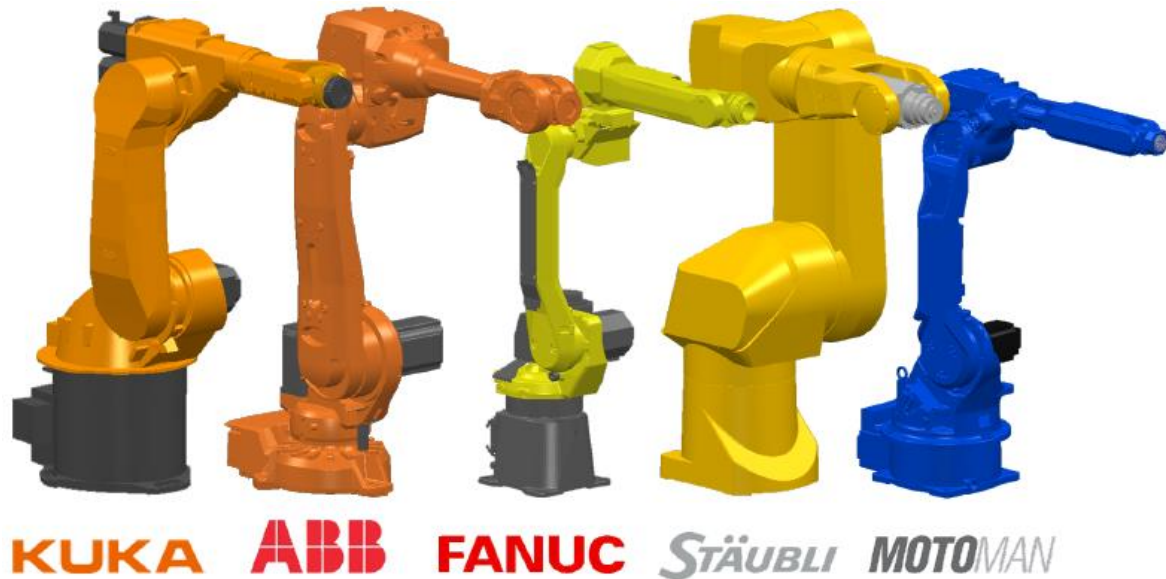


Figura 12: Principais fabricantes de robôs industriais [5].

2.4.2 - Robô vs CNC

Tal como mencionado anteriormente, os robôs não surgem na indústria com o objetivo de substituir as convencionais máquinas CNC, no entanto, dependendo da operação, a utilização de um robô pode ser benéfica relativamente a uma CNC ou ao trabalho manual. Além disso, hoje em dia, trabalhos pesados, desagradáveis, monótonos, repetitivos e prejudiciais à saúde são facilmente realizados por robôs, permitindo uma maior produtividade em comparação com o trabalho realizado por mão-de-obra [11]. Assim sendo, os robôs apresentam como principais vantagens:

- **Adaptação a peças grandes**, dado o comprimento dos robôs, o órgão terminal, a ferramenta, consegue abranger uma grande área de trabalho de uma só vez [2, 11];
- **Excelente liberdade de movimentos**, os graus de liberdade de um manipulador são estabelecidos pelo número de eixos que este possui, geralmente seis eixos, chegando por vezes a ter sete eixos como comprovado na figura 13 [2, 9, 11]. Existem também casos onde, através de eixos externos como por exemplo uma mesa rotativa ou um carril linear, o robô atinge os oito ou nove graus de movimento;

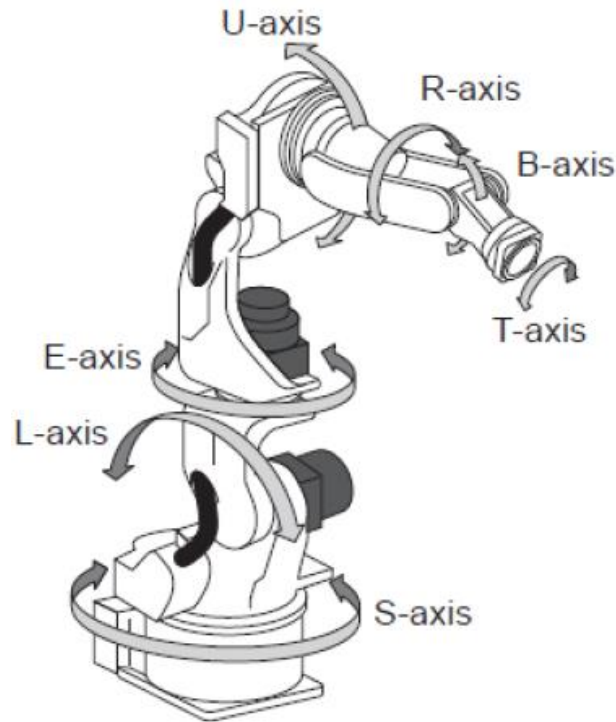


Figura 13: Graus de liberdade de um robô de sete eixos e respetiva denominação de cada eixo [7].

- **Versatilidade**, o leque de tarefas para o qual um robô está habilitado é muito superior ao de uma máquina CNC;
- **Compatibilidade com aparelhos externos**, quando comparados com as CNC, os robôs apresentam maior facilidade em incorporar aparelhos externos como reguladores de força e pressão para operações de acabamento e polimento, por exemplo [9];
- **Utilização em ambientes perigosos**, como já mencionado, um robô consegue trabalhar neste tipo de ambientes sem nenhum impedimento.

Quanto a desvantagens, os robôs apresentam:

- **Precisão limitada**, comparativamente com uma máquina CNC, a precisão de um robô é bastante inferior;
- **Pouca rigidez**, alguns manipuladores não têm rigidez suficiente para realizar certas operações, maioritariamente na área da maquinagem;
- **Vibração da ferramenta**, problema frequente e difícil de resolver. É bastante importante investir numa boa base de suporte para o robô e garantir que a fixação da ferramenta foi a melhor possível de forma a minimizar esta ocorrência e qualquer erro associado [2];

- **Necessidade de calibração da ferramenta**, é o processo de determinação do TCP (*tool center point*) da ferramenta. O método de calibração mais utilizado consiste no uso de paquímetros ou comparadores, o que exige bastante rigor e concentração da parte do operador;
- **Singularidades**, posicionamento dos eixos do robô que leva a uma paragem, fim de percurso, quando existem demasiadas possibilidades para a nova posição ou quando o próximo movimento requer que o robô se mova a velocidade infinita. Na figura 14 estão demonstrados os três tipos de singularidade principais [2, 7, 12]:
 - (a) **Tipo A** - singularidade de cotovelo que acontece quando existe alinhamento entre os eixos 2, 3, 4 e 5;
 - (b) **Tipo B** - singularidade de alinhamento quando o eixo 1 está em linha com o eixo 6;
 - (c) **Tipo C** - singularidade de pulso quando existe alinhamento entre os eixos 4 e 6.

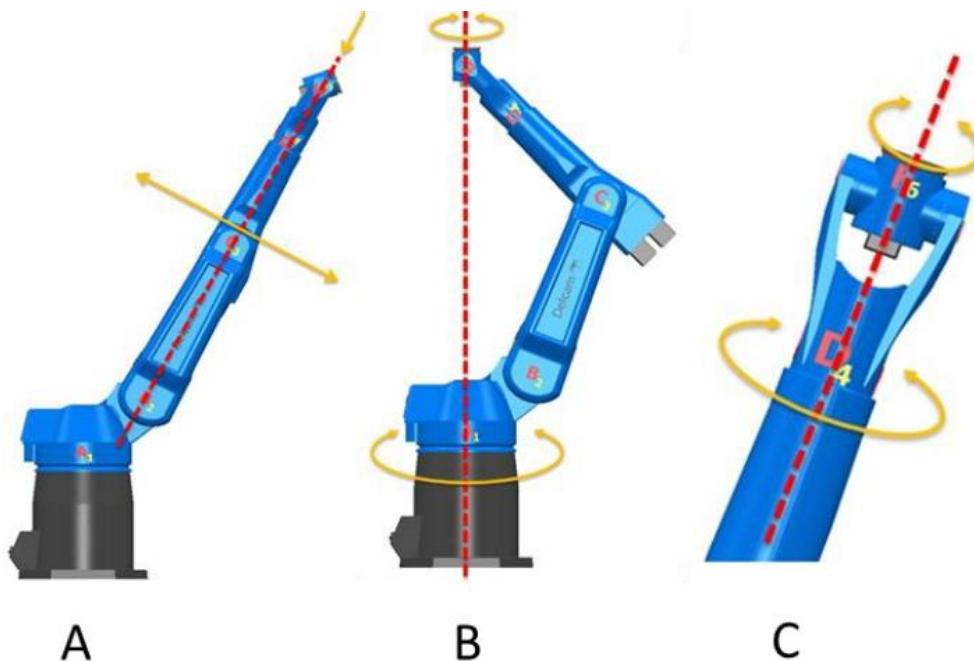


Figura 14: Tipos de singularidade dos robôs industriais [2].

2.4.3 - Aplicações comuns de robôs na indústria

Os robôs industriais têm uma elevada aplicabilidade, motivada pelo vasto leque de ferramentas que podem ser acopladas ao robô de maneira a este executar

um tipo de trabalho diferente, tornando os seu uso atrativo para qualquer tipo de indústria [11].

Em grande parte dos casos, os robôs são aplicados em linhas de produção na indústria automóvel, na indústria da madeira, entre outras, podendo desempenhar funções de fresagem, pintura, polimento, etc. A tabela 1 fornece uma visão generalizada das possíveis aplicações dos robôs industriais nos diferentes ramos da indústria.

Tabela 1: Aplicações de robôs em diferentes ramos da indústria (adaptado de [2]).

Indústria	Processo	Produto
Moldes	Fresagem, polimento	Moldes de componentes
Aerospacial	Corte, perfuração, polimento	Turbinas, segmentos de asas
Automóvel	Pintura, polimento, corte, soldadura	Para-choques, painéis da carroçaria, motoras
Fundição	Rebarbagem, fresagem, perfuração, torneamento	Moldações em areia
Madeira	Fresagem, torneamento	Mobiliário, placas molde
Medicina	Moagem, polimento	Medicamentos, próteses
Moda	Fresagem	Manequins
Náutica	Fresagem	Cascos de barcos
Plásticos	Fresagem, torneamento, corte, soldadura	Moldes de injeção, peças distintas

2.5 - Cinemática

O robô é um sistema composto por um conjunto de corpos interligados por meio de juntas passivas e ativas responsáveis por receber energia e estabelecer os movimentos do manipulador com uma velocidade e aceleração controlada [12].

Em grande parte, os movimentos do robô são controlados no espaço das juntas, enquanto que o planeamento e definição das trajetórias são preparados no espaço operacional do manipulador. Relacionar estes dois espaços, bem como as tarefas que são preparadas em cada um, arca um papel importante no controlo e manipulação deste tipo de equipamentos. Ao leque de movimentos que o robô consegue exercer dá-se o nome de cinemática e esta é avaliada de forma distinta para as juntas e para o órgão terminal [12].

Existem dois modelos cinemáticos pela qual se regem as juntas: o de posição e diferencial. O modelo de posição permite determinar as relações existentes entre a posição das juntas ativas e a posição do órgão terminal através de um conjunto de equações algébricas não lineares. Já o modelo diferencial é traduzido matematicamente por um sistema de equações lineares que relacionam as respetivas velocidades [12].

Quanto ao órgão terminal, distinguem-se dois tipos de cinemática diferentes: a cinemática direta e a cinemática inversa. A versão direta envolve a determinação da posição geral do órgão terminal através da posição das juntas ativas. Em manipuladores de estrutura em série é, na maioria dos casos, um problema simples de solução única. A versão inversa envolve a determinação da posição das juntas ativas a partir da posição geral do órgão terminal. Geralmente em robôs de estrutura em série é um problema difícil para o qual nem sempre existe solução admissível [12].

2.6 - Tipos de programação

2.6.1 - Programação *teach & learn*

Na programação *teach & learn*, em português ensina e aprende, consiste em criar manualmente, sem auxílio a *softwares* CAM, a estratégia de maquinagem pretendida. Para tal, com o controlador do robô o operador desloca o robô

manualmente para cada posição necessária e guarda as coordenadas na memória do controlador, de forma a criar uma trajetória final.

Trata-se de um processo bastante demorado, impedindo que o robô execute outros programas durante a programação, e bastante exigente para certas operações, como por exemplo de maquinagem, onde é necessária uma quantidade enorme de pontos para garantir a estratégia e as geometrias maquinadas são na maior parte dos casos complexas, dificultando imenso a tarefa do operador [3].

Desta forma, a programação *teach & learn* é maioritariamente utilizada para a programação de percursos simples como, por exemplo, deslocações para a posição segura ou para trocar de ferramenta [1, 3].

2.6.2 - Programação *offline*

A programação *offline*, ao contrário da *teach & learn*, é elaborada através de um *software* CAM tridimensional, como por exemplo o *PowerMILL Robot Interface*.

Neste tipo de programação, o operador programa a estratégia no computador, sendo que o controlador do robô apenas é utilizado para abrir os programas escritos. Desta forma diminui-se o tempo de programação e o robô fica livre durante o processo, tornando a programação *offline* o tipo ideal para operações de maquinagem com robô [3].

3 - Materiais, métodos e recursos

Após desbaste e acabamento, os moldes passam por operações de polimento onde são removidas marcas de fresagem e atingidos acabamentos superficiais desejados pelo cliente. Estas operações são elaboradas manualmente por polidores experientes desde os primórdios da indústria dos moldes e costumam demorar dias, ou até semanas, a terminar, consoante a dimensão e a morfologia do molde. No entanto, existem pequenos estudos que suportam a ideia de se realizar as operações de polimento de uma forma automática utilizando robôs. Através de programas NC e das ferramentas apropriadas, é possível imitar o trabalho do polidor com o robô. Neste sentido, com esta dissertação pretende-se explorar o polimento automático, sendo o principal objetivo criar uma célula robótica que reduza ao máximo o trabalho do polidor.

Antes de serem apresentados os resultados obtidos é importante lembrar que alguns sistemas que geralmente constituem uma célula robótica, irão estar em falta na célula que será apresentada. Isto deve-se ao facto de se tratar de um estudo, sendo estes sistemas dispensáveis para a realização de testes e à insuficiência monetária comum a este tipo de estudos.

Dito isto, será agora introduzida a célula robótica e todos os seus constituintes, seguido dos parâmetros avaliados e finalmente pelos resultados obtidos.

3.1 - Célula robótica Simoldes

A célula robótica utilizada neste trabalho pertence à empresa MDA (Moldes de Azeméis) do grupo Simoldes, e trata-se de uma célula simples constituída por um robô antropomórfico Motoman MH50 II de seis eixos, por um computador onde são escritos os programas NC e controlado um dos componentes auxiliares à operação de polimento (sistema de controlo de operação) e por uma bancada onde é colocada a peça (sistema de fixação). O sistema de alimentação é colmatado pela grua comum a todas as bancadas de trabalho do setor onde se encontra a célula. Na figura 15 está apresentada a célula robótica utilizada.



Figura 15: Robô e sistema de fixação da célula robótica da MDA.

3.1.1 - Motoman MH50 II

Como já mencionado, o robô presente na célula robótica é um Motoman MH50 II. É um robô de médio porte, com seis eixos e com uma capacidade de carga máxima variável consoante a distância do braço ao seu TCP. O manipulador é coordenado por um controlador Motoman DX200 e o seu respetivo comando de controlo. Uma esquematização dos dois componentes está demonstrada na figura 16.

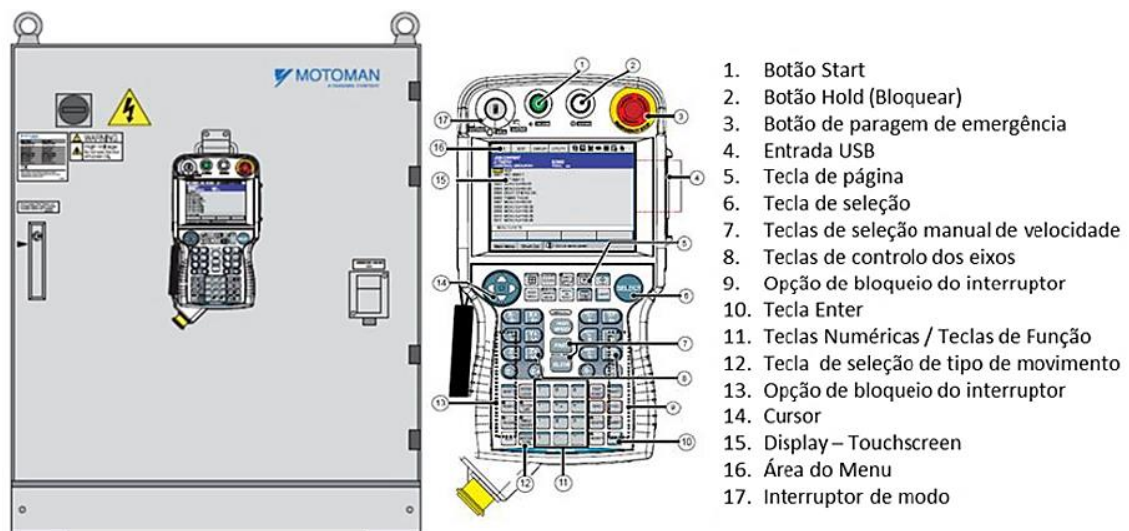


Figura 16: Controlador DX200 e as funcionalidades do seu comando de controlo (adaptado de [13]).

Após escrever o programa NC das estratégias elaboradas, o operador tem de enviar o programa para o comando de controlo via *pen drive* ou via rede caso o comando esteja equipado para tal. Uma vez no comando, os programas NC podem ser executados de forma manual ou automática através dos modos *teach* e *play*, respetivamente. O modo *teach* permite ao operador controlar linha a linha o programa NC, enquanto que em modo *play* o programa é executado de forma contínua havendo paragens apenas se o operador achar necessário. É importante mencionar ainda o modo *remote* que permite a passagem e o controlo remoto, no caso de o computador estar equipado com *softwares* específicos para o efeito, dos programas NC escritos e os botões de pausa, aplicável apenas em modo *play*, e de paragem de emergência, aplicável em todos os modos disponibilizados.

O polimento automático apresenta alguns problemas que afetam a viabilidade e qualidade final das tarefas realizadas. Desta forma, e dada a possibilidade de se adicionar equipamentos externos, foram acoplados ao sexto eixo do robô dois componentes auxiliares às tarefas de polimento.

3.1.2 - Componentes Auxiliares

O polimento automático apresenta como principais obstáculos o desgaste das ferramentas de polimento utilizadas e a fraca sensibilidade do robô quando comparado com mão de obra qualificada. O desgaste da ferramenta constitui um problema pois, contrariamente às operações de fresagem, as ferramentas utilizadas no polimento são ferramentas de material cerâmico sendo que, após cada passagem na superfície de trabalho, a ferramenta vai perdendo material e ficando mais pequena, havendo alturas em que a ferramenta não vai estar a polir a superfície, durante a execução do programa NC, caso não haja uma força a pressionar a ferramenta contra a área de trabalho. Quanto à fraca sensibilidade, é extremamente difícil imitar com o robô o trabalho realizado pelo operador de polimento visto que, o polidor pode ajustar livremente a pressão e a forma como ataca a superfície, enquanto que com o robô, após a criação do programa NC é difícil alterar estes parâmetros sem que seja posta em causa a integridade da superfície.

Desta forma, com o objetivo de colmatar estes problemas, foram acoplados ao sexto eixo do robô dois componentes auxiliares: o ACF (*Active Contact Flange*) e um *spindle* com compensação de movimentos em todas as direções do plano xy do eixo de coordenadas da ferramenta, que para efeitos de simplificação foi denominado como BIAx, o nome da empresa que fabrica este tipo de *spindle*. Ambos os componentes serão introduzidos nos dois próximos tópicos.

3.1.2.1 - ACF

O ACF é o componente auxiliar responsável por compensar o desgaste da ferramenta durante o polimento, aplicando uma força constante que pressiona a ferramenta contra a superfície do molde. O ACF apenas exerce força na direção positiva do eixo.

Existem vários modelos de ACF, no entanto, o modelo presente na célula robótica da MDA é o ACF 121-05 HD fabricado pela FerRobotics. Na figura 17 está apresentado o modelo de ACF mencionado e na tabela 2 as características do ACF em questão.



Figura 17: Componente auxiliar ACF [14].

Desenvolvimento de célula robótica para polimento automático de moldes

Tabela 2: Características dos vários modelos de ACF da FerRobotics [14].

Product	ACF 110-01 X5	ACF 110-04	ACF 110-10	ACF 120-05	ACF 120-10	ACF 111-04 HD	ACF 121-05 HD	ACF 131-05 HD
Max. force (push/pull) [N]	100	100	100	500	500	200	500	800
Stroke [mm]	11.5	35	100	50	100	35	50	50
Max. overturning moment [Nm]	25	40	40	65	65	250	350	350
Max. torsional moment [Nm]	35	30	30	60	60	250	350	350
Height at stroke = 0 [mm]	143.7	190.5	253	236.5	286.5	190.5	236.5	236.5
Cross-section area [mm]	90 x 75	∅ 128	∅ 128	∅ 160	∅ 160	∅ 128	∅ 160	∅ 160
ISO 9409-1 standard flange	∅ 50	∅ 50	∅ 50	∅ 80	∅ 80	∅ 80	∅ 80	∅ 80
Dead weight [kg]	1.2	3.2	3.5	5.4	5.9	3.5	4.3	4.5
Operating medium	Max. 7 bars, 30 µm, ISO 8573-1 Kl.3 (oil & water free)							
Air consuption	5-10 l/min							
Protection class	IP 40	IP 65						
Communication interface	Ethernet TCP/IP (standard), opcional: Profibus, CANopen, Analog I/O, XML,...							
Ambient temperature	+5 ... +45 °C							

O ACF é diretamente afixado ao sexto eixo do robô e permite aplicar forças até um máximo de 500 N, através de um fluxo de ar comprimido que preenche o interior do componente. A força aplicada é controlada por um *software* especialmente elaborado para o ACF, ligado por rede ao robô, que calcula a quantidade de ar comprimido necessária para atingir a força desejada. A interface do programa mencionado pode ser visualizada na figura 18.

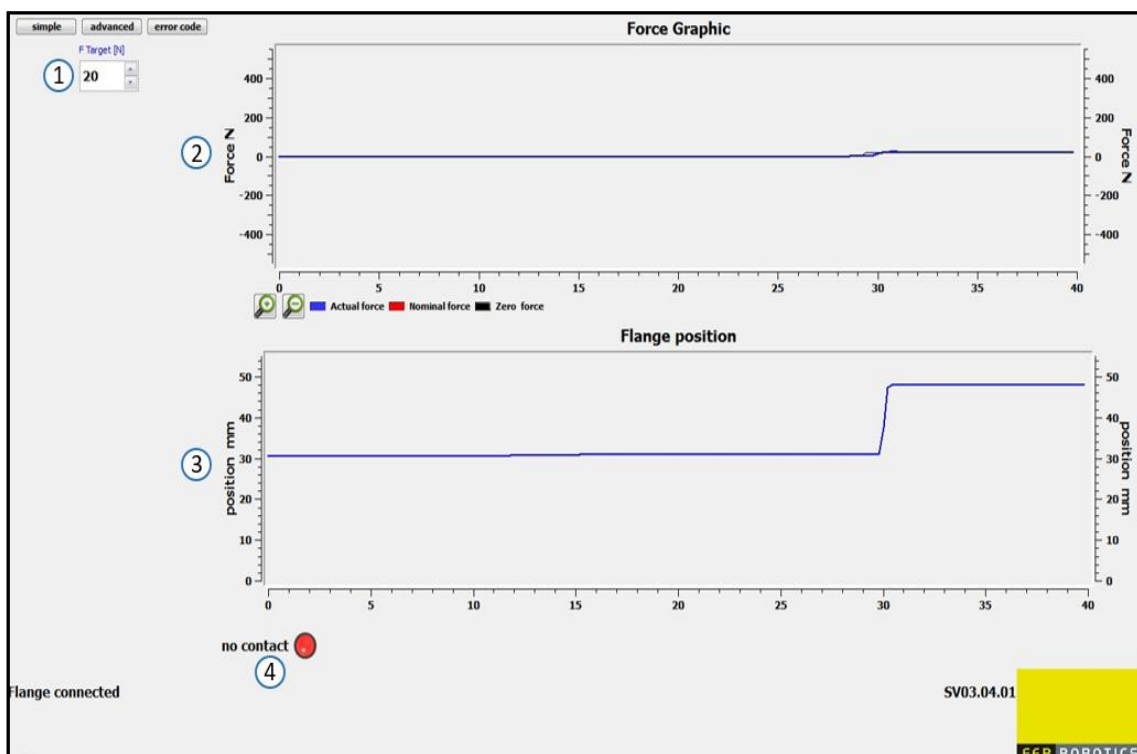


Figura 18: Interface do programa de controlo do ACF.

Trata-se de um programa bastante simples e intuitivo, constituído por um botão de seleção de força (1); por um gráfico de forças (2) que escreve em tempo real as três forças que atuam na superfície de trabalho, respetivamente, a vermelho a força nominal (perpendicular à superfície), a preto a força zero e a azul a força real a atuar; por um gráfico de posição (3) que indica a amplitude atual do ACF em serviço, tendo como referência a sua amplitude máxima de 50 mm, e por fim, por um indicador de contacto (4) que, tal como o nome sugere, indica o contacto ou não da ferramenta com a superfície.

3.1.2.2 - *Spindle* BIAX

O segundo e último componente auxiliar é o *spindle* modular. Como já mencionado, este componente compensa os movimentos em todas as direções do plano xy do eixo do TCP, permitindo uma suavização das entradas e ligações durante o decorrer do programa NC e evitando esforços desnecessários por parte da ferramenta, ambas com o objetivo de melhorar a fraca sensibilidade do robô.

A empresa que fabrica este tipo especial de *spindles*, a BIAX, é líder no fabrico de *spindles* pneumáticos e disponibiliza várias opções de montagem do *spindle* de forma a satisfazer da melhor forma as necessidades do cliente. O *spindle* presente na célula robótica da MDA pode ser visto na figura 19 bem como todos os componentes que o constituem.

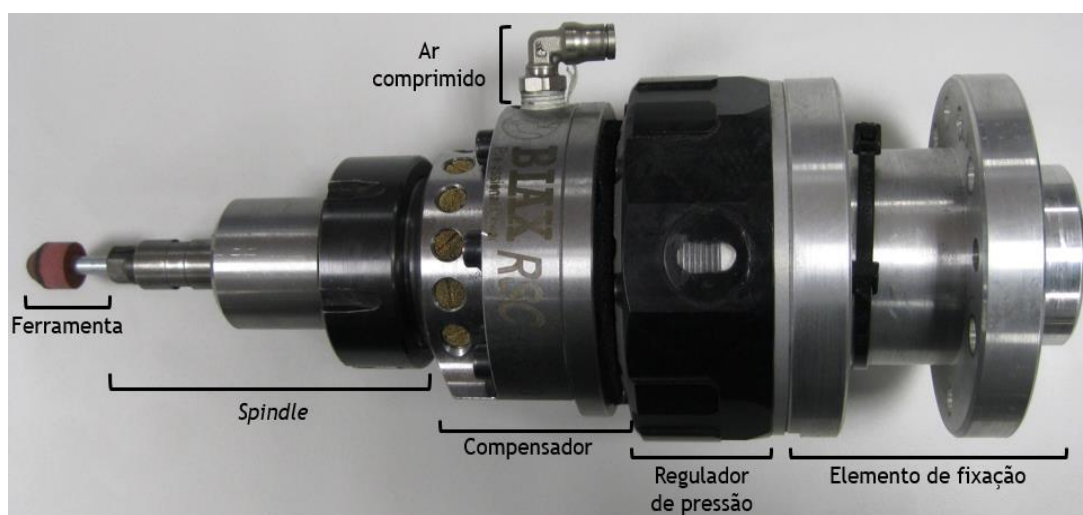


Figura 19: Constituintes do *spindle* BIAX.

O *spindle* BIAx da figura 19 é então constituído por um elemento de fixação que estabelece a ligação entre o BIAx e o ACF; por um regulador manual de pressão, modelo RS-C U, que permite ao operador do robô regular manualmente a quantidade de ar comprimido que entra para dentro do compensador; por um compensador, modelo RSC-C-1000, que tal como o nome indica, é o componente responsável por restringir a amplitude de movimentos da ferramenta durante o percurso NC e, por último, por um *spindle*, modelo RSC-S-20.000, onde é acoplada a ferramenta de polimento. Apesar do modelo de compensador escolhido ser importante, visto ser este componente a estabelecer a compensação dos movimentos da ferramenta, é a escolha do modelo do *spindle* que irá determinar o tipo de tarefas que podem ser realizadas com o BIAx, dado ser este componente a definir o máximo de rotações da ferramenta e o tipo de geometrias que se pode trabalhar. Na tabela 3 estão indicadas as características do modelo do *spindle* em questão.

Tabela 3: Características do spindle RSC-S-20000 (adaptado de [15]).

Modelo	RSC-S-20.000
Tipo de motor	Motor de palhetas
Rotações (rpm)	20.000
Tipo de pinça	ZG7
Consumo de ar (l/min)	600
Potência (W)	350

Este tipo de *spindle* atinge um máximo de 20.000 rpm, parâmetro este que será levado em consideração no cálculo da pressão de ar comprimido que deve ser fornecida ao robô e na escolha do tipo de ferramenta utilizada. O abastecimento de ar comprimido, tanto para o robô como para o compensador, constitui o principal defeito deste componente auxiliar dado ser, em ambos os casos, controlado de forma manual, o que diminui de substancialmente a precisão dos parâmetros utilizados, neste caso, a pressão no compensador e a velocidade de rotação da ferramenta.

Após a montagem dos dois componentes, o sexto eixo do robô fica como apresentado na figura 20.

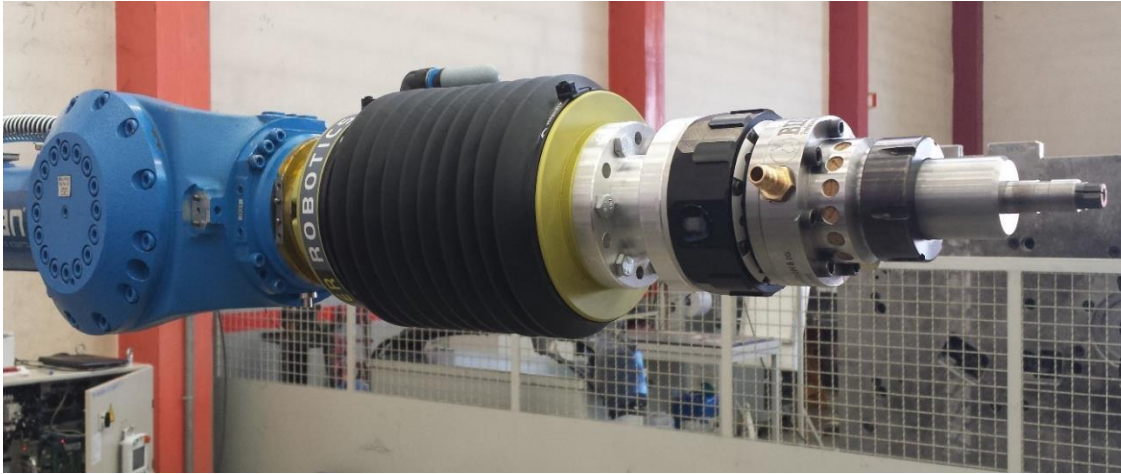


Figura 20: Sexto eixo do robô Motoman MH50 II com os dois componentes auxiliares.

3.2 - Metodologia de polimento manual

As tarefas de polimento em moldes, tal como referido anteriormente, sempre foram realizadas manualmente por polidores experientes. Assim sendo, é conveniente que o operador do robô conheça a metodologia e as ferramentas utilizadas pelos polidores para que as estratégias e os programas NC criados sejam o mais fiel possíveis ao polimento manual.

A metodologia de polimento seguida pelos polidores da MDA varia conforme o tipo de metal e o estado superficial do molde após a fresagem, sendo estes a definir a granulometria inicial das ferramentas a utilizar. No entanto, assumindo que o estado superficial final se mantém de molde para molde, a metodologia de polimento divide-se em quatro passos.

1. Remoção das marcas de fresa nos raios

As primeiras zonas do molde a serem trabalhadas são os raios, ou por outras palavras, as zonas de interseção de duas ou mais superfícies. A razão por se começar pelos raios advém de estes serem as zonas mais difíceis de polir, havendo desta forma maior margem para que qualquer passagem na superfície seja corrigida sem problema no segundo passo da metodologia.

Neste passo, o polidor utiliza uma lixadeira, pneumática ou elétrica, com uma lixa de granulometria ajustada ao estado superficial do molde. Geralmente a granulometria inicial é de 220 ou 320 MESH. Na figura 21 está apresentado um exemplo de uma lixadora utilizada.



Figura 21: Lixadeira elétrica [16].

2. Remoção das marcas de fresa nas superfícies

Após o polidos todos os raios, o polidor inicia o polimento nas superfícies utilizando novamente a lixadora, pneumática ou elétrica, mas desta vez com uma pedra de polimento em vez de uma lixa. A pedra utilizada deve ter a mesma granulometria que a lixa utilizada no primeiro passo, respetivamente de 220 ou 320 MESH.

Neste passo o polidor deve polir na direção perpendicular às marcas de fresa e ter especial atenção aos limites da superfície para que não os ultrapasse e passe de novo nos raios, pois caso isto aconteça, o primeiro passo, e consequentemente o segundo passo também, terão que ser repetidos.

3. Polimento final com pedras Boride

Assim que removidas todas as marcas de fresa do molde, o polidor inicia o polimento final. Nesta fase, são utilizadas duas pedras diferentes produzidas pela empresa Boride, uma Boride AM2 e uma Boride AO, ambas da mesma granulometria utilizada no segundo passo da metodologia. Com a ajuda de um utensílio específico para a tarefa, o polidor pressiona a primeira pedra, a Boride AM2, contra a superfície do molde e inicia o polimento em cruz. O movimento em cruz, ou cruzado, consiste em polir a superfície, inicialmente numa direção perpendicular às marcas de fresa e depois na mesma direção das mesmas marcas, fazendo, como o nome indica, uma cruz. Assim que o polidor considerar que a superfície está pronta para a próxima pedra, é repetido o mesmo processo até que a superfície esteja preparada para a última etapa da metodologia. Na

figura 22 está demonstrada a técnica do polidor durante esta etapa do polimento.



Figura 22: Técnica de polimento em cruz.

4. Polimento final com lixa

Finalmente, a última etapa da metodologia é o polimento manual com lixa. Nesta fase o polidor executa o cruzado com um utensílio específico para o suporte de lixa, como o da figura 23, e com a ajuda de holofotes que iluminam o molde verifica a existência ou não de riscos ou quaisquer outros defeitos indesejados e inaceitáveis pelo cliente.



Figura 23: Suporte manual de lixa.

É importante mencionar que em todos os passos da metodologia é utilizado um óleo de polimento, denominado *Ecocut*, que tem como objetivo diminuir o atrito entre a pedra, ou lixa, e a superfície e manter a área de trabalho limpa. Por último, é importante mencionar que em caso de remoção excessiva, o principal erro que ocorre no polimento, é necessário reencaminhar o molde

para a secção de soldadura para que sejam preenchidas as zonas danificadas. Assim que finalizada a soldagem, o molde volta para a secção de polimento onde é repetida toda a metodologia de polimento. Isto demonstra que o polimento é um processo demorado e trabalhoso onde qualquer erro pode levar a perdas substanciais, tanto a nível de tempo de trabalho como a nível monetário.

3.3 - Ferramentas de polimento

Em tarefas de polimento, como já mencionado nos tópicos anteriores, são utilizadas ferramentas cerâmicas como lixas e pedras de granulometrias diferentes e ajustáveis às necessidades do polidor consoante o estado superficial do molde após a fresagem. No polimento com robô o caso mantém-se, mudando apenas o formato da ferramenta utilizada para que possa ser acoplada ao robô. Enquanto que para o trabalho manual são usadas folhas de lixa e pedras ajustáveis aos utensílios manuais do polidor, para o robô são empregues ferramentas com um formato idêntico ao de uma fresa, as chamadas mós de polimento, como a apresentada na figura 24.

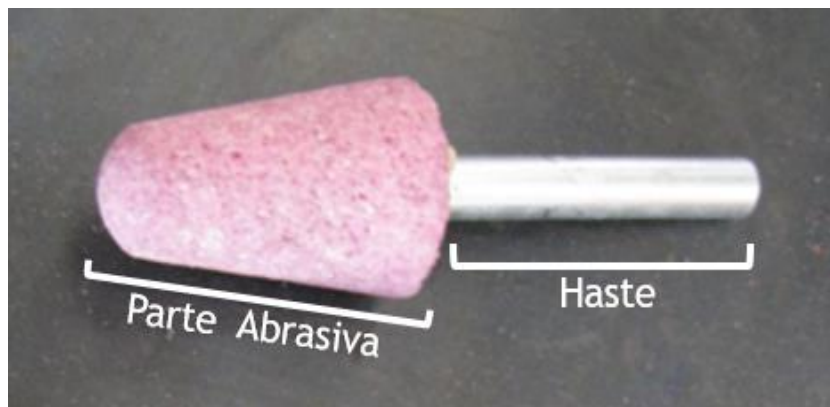


Figura 24: Mó cónica.

As mós de polimento, tal como uma fresa, são constituídas por uma haste, responsável por estabelecer a união entre a fresa e o suporte do *spindle* e por uma parte abrasiva (parte cortante nas fresas) encarregue pela remoção de metal da superfície do molde.

Todas as ferramentas de polimento utilizadas na célula são fornecidas pela PFERD, uma empresa especializada no fabrico de mós de polimento e que

dispõem de um vasto leque de mós com diferentes geometrias, granulometrias e abrasivos que permite ao cliente escolher a mó ideal para a tarefa desejada.

Durante a escolha da mó é importante ter atenção aos seguintes parâmetros:

- **Tipo de metal do molde** - a dureza do metal do molde vai definir a abrasividade da mó a utilizar, pois, se o metal tiver uma dureza superior à da mó, não irá ocorrer remoção de material;
- **Intervalo de rotações do *spindle*** - a capacidade de rotação da mó deve ser compatível com as propriedades do *spindle* utilizado. Não é desejável ter uma mó que aguarde um número de rpm superior ao do *spindle*;
- **Geometria das superfícies a trabalhar** - tal como o nome indica, é importante ter em conta a geometria da superfície do molde de modo a escolher a geometria e as dimensões ideais da mó.

Tendo em conta os três parâmetros enunciados, nomeadamente, que o molde é de aço EN 40 CrMnNiMo 8-6-4 com uma dureza entre 34-39 HRC, que o número máximo de rotações do *spindle* é 20.000 rpm e a geometria do molde, as mós escolhidas foram duas PF ZY 1525/6 AR - GR, respetivamente de 120 e 220 MESH, e uma PF ZY 2525/6 AR 220 GR. Na tabela 4 estão apresentadas as características principais das três mós escolhidas.

Tabela 4: Características principais das mós escolhidas (adaptado de [17]).

Designação da mó		Aglomerado	Velocidade de corte	Rotações sugeridas (rpm)	Rotações máximas (rpm)	Dimensões
PF ZY	1525/6 120 GR	Elastômero GR	10-12 m/s	12.500	19.000	Ø = 15 mm L = 25 mm
	1525/6 220 GR			12.500	19.000	Ø = 15 mm L = 25 mm
	2525/6 220 GR			7.500	11.400	Ø = 25 mm L = 25 mm

Após análise de todas as opções disponibilizadas pela PFERD, as mós de aglomerado de elastômero GR revelaram ser o tipo mais aconselhado para o aço

em questão e as que fornecem um maior leque de aplicações. De mencionar ainda que ambos os tipos de mó têm um máximo de rotações inferior ao máximo do *spindle* e que as suas dimensões são as ideais para trabalhar todas as zonas do molde de teste. Na figura 25 estão apresentadas as mós de 15 e 25 mm de diâmetro, tal como recebidas do fornecedor.



Figura 25: Mós de 15 mm e 25 mm de diâmetro.

Apesar de as mós adquiridas terem uma geometria cilíndrica, não será com este formato que irão ser utilizadas durante as tarefas de polimento. Previamente a serem usadas, as mós são maquinadas para ficarem esféricas na ponta de contacto com a superfície. Esta escolha será abordada ao pormenor no tópico “3.4.6 - Formato da ferramenta”.

3.4 - Parâmetros de polimento

O polimento automático, como já mencionado, é uma operação muito recente, ainda pouco explorada na indústria e cuja qualidade final das tarefas realizadas depende muito dos parâmetros de polimento escolhidos. Estes parâmetros, além de comprometerem a qualidade do polimento, vão definir o modo como operam os diferentes componentes do robô e como é escrito o programa NC. Não havendo informação sobre o assunto, todos os parâmetros de polimento abordados neste trabalho foram inicialmente pressupostos e posteriormente modificados consoante as dificuldades e melhorias que se foram observando durante a realização dos testes, sempre com o intuito de encontrar os parâmetros ideais para que o robô execute as tarefas propostas da melhor forma possível.

Posto isto, neste tópico serão então introduzidos e analisados todos os parâmetros que durante os testes realizados se revelaram importantes e cruciais na realização do polimento.

3.4.1 - Estado superficial do molde

O primeiro parâmetro de polimento é o estado superficial do molde, um parâmetro não quantificável e determinado apenas pela experiência e conhecimento do polidor/programador. Este parâmetro surge sempre que se inicia um novo ponto da metodologia de polimento, sendo este a definir se o molde está pronto ou não para a próxima etapa.

As operações de desbaste e acabamento podem variar de CNC para CNC e de programador para programador, não havendo por isso moldes totalmente iguais. Assim sendo, antes de iniciar o polimento, o polidor deve analisar as superfícies do molde, avaliando a severidade das marcas de fresa e a geometria das mesmas de forma a escolher as ferramentas indicadas e a aplicar a metodologia de polimento o mais eficazmente possível.

No caso do robô a regra mantém-se. Para que os programas sejam eficazes e eficientes, o programador deve seguir os princípios do polidor manual e avaliar as superfícies do molde pelas mesmas razões enunciadas.

Apesar de ser o polidor/programador a definir o parâmetro, continuam a ser as operações de fresagem a definir o estado superficial do molde e, quanto melhor elaboradas forem estas operações, melhor o parâmetro e, conseqüentemente, mais fácil o polimento. Deste modo, uma melhor escolha dos parâmetros de desbaste e acabamento seria benéfico para o polidor. No entanto, parâmetros de desbaste e acabamento mais apertados, envolvem um maior tempo e custo de utilização da CNC, o que impossibilita esta escolha.

3.4.2 - Força do ACF

A força que o ACF tem que exercer durante o polimento é um parâmetro fundamental para o bom funcionamento da tarefa. O ACF, como já mencionado, é o componente auxiliar que tem como função pressionar a ferramenta contra a superfície de trabalho, compensando o desgaste da mesma. De forma a

encontrar a força ideal, é preciso ter em conta dois aspetos: o peso dos componentes acoplados ao ACF e o ângulo entre o quinto eixo e a base do robô. Estes dois aspetos afetam diretamente a força exercida pelo ACF, visto que, quanto menor o ângulo entre o quinto eixo, isto é, quanto mais paralelo estiver o eixo com a base, menor será a influência do peso dos componentes emparelhados. Sabendo que unidos ao ACF estão o *spindle* BIAx e a ferramenta e que ambos perfazem um peso total de 5,4 Kg, é possível determinar o gráfico de forças (F) em função do ângulo com a base (α). Para tal, primeiro é necessário calcular o intervalo de forças em que o ACF trabalha descobrindo a força máxima e força mínima, respetivamente, $F_{\text{máx}}$ e $F_{\text{mín}}$ e definir a amplitude de trabalho do robô. A força máxima é dada pelo peso do conjunto BIAx-ferramenta, que é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Peso} = \text{massa} * \text{aceleração gravítica} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo a aceleração gravítica (g) $9,8 \text{ m/s}^2$ e a massa do conjunto 5,4 Kg, o peso calculado é de aproximadamente 53 N. Definindo uma amplitude de trabalho de 0 a 90 graus e analisando o esquema de forças que atua na superfície do molde, obtemos:

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{F_{\text{ACF}}}{\text{Peso}} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo α o ângulo do quinto eixo com a base do robô e F_{ACF} a força do ACF, através desta equação é possível calcular a $F_{\text{mín}}$ e a $F_{\text{máx}}$, respetivamente a 0 e 90 graus. Pela mesma, calculamos $F_{\text{mín}} = 0 \text{ N}$ e $F_{\text{máx}} = 53 \text{ N}$, no entanto, força nula no ACF implica que a ferramenta não exerça pressão no molde e, conseqüentemente, que não ocorra o polimento da superfície. Não sendo isto desejável, foram elaborados vários testes até se encontrar a força mínima necessária para manter o ACF na sua amplitude máxima, 50 mm, durante todo o polimento. Os testes consistiram em experimentar diferentes F_{ACF} , começando por 0 N e aumentando gradualmente, com o quinto eixo do robô a 0° , até que o ACF atinga a sua amplitude máxima. Foi determinado então que é necessária uma força mínima de 18 N para que o ACF exerça uma pressão constante na superfície. Aplicando a equação 2, é possível determinar o ângulo a partir do qual a força do ACF tem que ser superior a 18 N e neste caso, o

ângulo mínimo é de 20° , o que significa que para todos os ângulos de ferramenta inferiores ao ângulo mínimo, a F_{ACF} será sempre igual a 18 N.

Deste modo, considerando os valores de F_{ACF} obtidos pela equação 2 e o intervalo de amplitudes $[20^\circ; 90^\circ]$, obtemos o seguinte gráfico Força VS Amplitude.

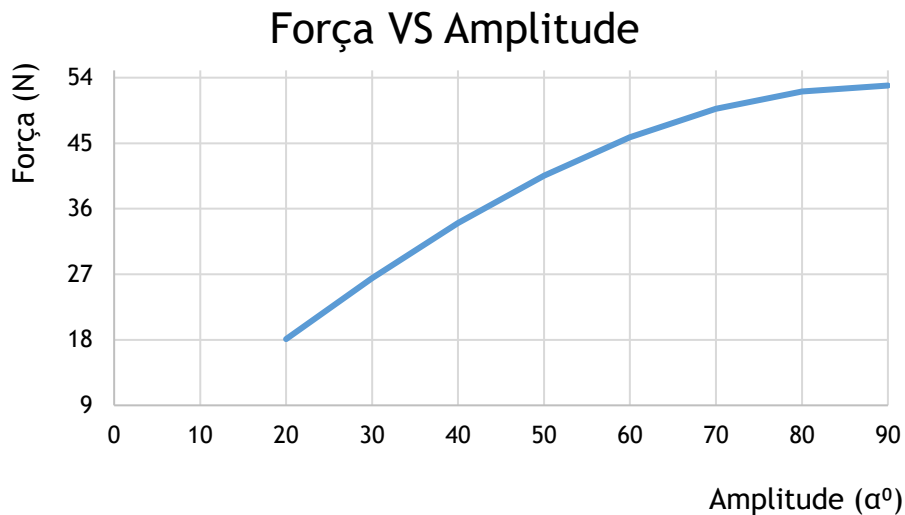


Figura 26: Gráfico Força (N) VS Amplitude (α°).

Este gráfico apenas se verifica pois, neste trabalho, apenas são programadas estratégias a 3 e 3+2 eixos onde o ângulo da ferramenta não varia ao longo do percurso escrito. Para estratégias de 5 eixos, seria necessário contabilizar outras forças.

3.4.3 - Força do BIAx

A força do BIAx é o parâmetro que define a suavização dos movimentos da mó durante as entradas, saídas e ligações do percurso NC. Ao contrário da força do ACF, este parâmetro é controlado manualmente pelo operador no regulador de pressão do *spindle* BIAx (figura 19). O regulador possui uma rosca interna que, conforme o seu número de rotações, permite a entrada controlada de ar comprimido no *spindle*, estabelecendo a pressão. Visto que a rosca permite três rotações completas, foram estabelecidos seis níveis de pressão de 1 a 6, cada um equivalente a meia rotação da rosca. Deste modo, no nível 1 a rosca encontra-se com zero rotações, não exercendo qualquer pressão, e no nível 6 com três rotações, logo exercendo a pressão máxima.

Este parâmetro é bastante difícil de definir pois, tal como o estado superficial do molde, depende de fatores externos como a geometria da superfície ou a granulometria da mó, por exemplo, que impossibilitam uma escolha linear do seu valor.

3.4.4 - Pressão do ar

O ar comprimido possui um papel fundamental nas tarefas realizadas pelo robô e pela célula robótica em geral, sendo o responsável pelo funcionamento dos componentes auxiliares e pela rotação da mó. Embora no ACF e no BIAx não seja necessário estabelecer uma pressão de ar comprimido exata, no caso da rotação da ferramenta de polimento é preciso calcular a pressão de ar fornecida para que as rotações por minuto (rpm) desejadas sejam atingidas. Desta forma surge o parâmetro pressão de ar, que visa determinar a pressão de ar mínima para que as rpm descritas nas fichas técnicas das ferramentas de polimento sejam atingidas. Assumindo que a uma pressão de 6 bar se atingem 20.000 rpm, desenhou-se o gráfico linear, figura 27, que permite a escolha da pressão necessária.

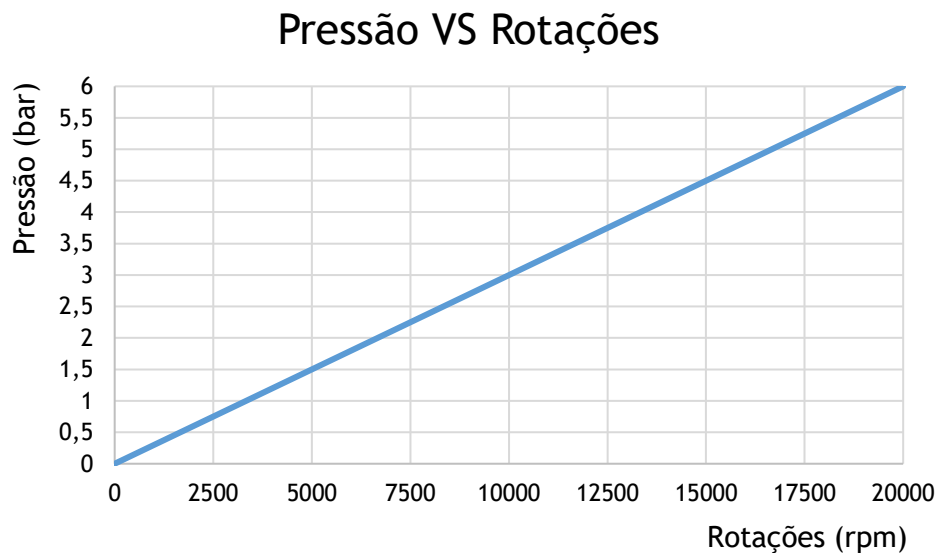


Figura 27: Gráfico Pressão do ar VS Rotações.

Utilizando o gráfico da figura, o polidor determina a pressão que deve inserir no controlador manual de pressão do robô, tendo sempre em conta o limite máximo de rotações do *spindle* e da mó, ambos discriminados nas fichas técnicas respetivas.

3.4.5 - Desgaste da ferramenta

O próximo parâmetro de polimento apresentado é o desgaste da ferramenta, o parâmetro mais crítico e importante durante as tarefas de polimento automático. Contrariamente às operações de fresagem, o desgaste observado durante as operações de polimento é bastante superior, isto porque são utilizadas ferramentas cerâmicas, mais frágeis e fáceis de desgastar sob pressão do que as ferramentas metálicas empregues na fresagem.

Uma boa qualidade final de polimento apenas é obtida mantendo a integridade e igualdade geométrica da ferramenta durante todo o percurso NC escrito, isto é, a mó deve manter a mesma geometria da ferramenta definida no programa NC para que este seja bem executado. Com base nos testes elaborados, o desgaste da ferramenta depende de cinco parâmetros relacionados entre si:

➤ **Feed Rate**

O *feed rate*, em português a velocidade de avanço, é o parâmetro que define a velocidade com que é executado o programa NC. Este parâmetro pode ser alterado durante a criação do programa NC, modificando a velocidade de corte estabelecida no *PowerMILL*, ou diretamente no comando do controlador do robô durante a execução do percurso de polimento, modificando a velocidade de uma forma percentual. Quanto menor for o valor do *feed rate*, maior é o número de passagens da mó na mesma zona e, por conseguinte, maior é o desgaste da ferramenta. No entanto, um *feed rate* elevado, apesar de diminuir o desgaste, leva a um número de passagens insuficiente para que ocorra o polimento. O desafio é encontrar um valor de *feed rate* que permita o polimento da superfície minimizando o desgaste da ferramenta.

Neste trabalho, o parâmetro de polimento *feed rate* é apresentado como percentagem do valor de velocidade de avanço predefinido pelo *software*, que neste caso foi 1000 mm/min.

➤ **Ângulo da ferramenta**

O ângulo entre a ferramenta e a superfície influencia a área de contacto da ferramenta e, naturalmente, uma maior área de contacto implica um maior número de passagens na mesma zona, o que melhora a qualidade do polimento,

mas provoca um maior desgaste na mó. No entanto, um menor ângulo envolve um desgaste desigual da mó, o que, além de permitir menos passagens na mesma zona, impede que a mó seja aproveitada na sua plenitude. É importante encontrar o ângulo de posição ideal para cada superfície, de maneira a minimizar o desgaste enquanto se maximiza a área de contacto.

➤ **Área da superfície**

A área da superfície a polir constitui outro parâmetro importante para o desgaste final da ferramenta. Logicamente, quanto maior a área do molde que se pretende trabalhar, maior o número de passagens que terá que ocorrer e logo, maior o desgaste. Novamente, o desafio é encontrar a área máxima que cada mó consegue polir mantendo a sua geometria original.

➤ **Incremento**

O incremento é o parâmetro que define a distância de ligação entre cada passagem do percurso NC. Este valor é discriminado nas propriedades da estratégia de polimento elaborada no *software* CAM e, à semelhança com outros parâmetros, quanto menor a distância de ligação, maior o número de passagens, logo maior o desgaste da ferramenta. No entanto, incrementos elevados podem levar a passagens insuficientes da mó, não ocorrendo o polimento da superfície. Mais uma vez, o desafio passa por encontrar o valor de incremento ideal, no caso deste trabalho 0,1 ou 0,2 mm, minimizando o desgaste e o tempo de polimento.

➤ **Sobreesspessura**

O último parâmetro a influenciar o desgaste da ferramenta é a sobreesspessura definida durante a elaboração da estratégia de polimento no *software* CAM. Este parâmetro é responsável por manter o ACF relevante e compensar o desgaste da ferramenta durante a execução do programa NC, pressionando constantemente a ferramenta contra a superfície de trabalho. A sobreesspessura é comumente utilizada durante as tarefas de desbaste com objetivo de deixar metal residual nas superfícies do molde, facilitando as posteriores tarefas de acabamento. No caso das tarefas de polimento, esta opção é utilizada precisamente com o objetivo oposto. Ao atribuir valores negativos de

sobreespessura, o *software* assume, durante o cálculo da estratégia, que a ferramenta terá que atuar abaixo da superfície do modelo CAD, sendo esta a forma mais prática de manter o ACF em contacto, pois o TCP é medido com o componente na sua amplitude máxima e, no caso de a sobreespessura ser 0 mm ou superior, o ACF não exerceria pressão na superfície, não permitindo a compensação do desgaste da ferramenta.

Assim sendo, dando valores negativos de sobreespessura, apesar do desgaste contínuo da mó, garantimos que a mó continua pressionada contra o molde. No entanto, é necessário encontrar o valor de sobreespessura ideal para que o desgaste seja compensado durante o percurso, sem que seja removido demasiado material e que a pressão provocada pelo ACF seja excessiva.

O objetivo principal e comum na escolha de cada um dos cinco parâmetros apresentados é a minimização do desgaste da ferramenta com o intuito de aproveitar a mó na sua totalidade e de obter uma boa qualidade final de polimento. Para tal, deve existir uma concordância entre os cinco parâmetros, devendo cada um ser ajustado aos valores dos outros. No anexo A estão apresentadas três nós totalmente desgastadas.

3.4.6 - Formato da ferramenta

Outro parâmetro considerado durante o polimento é o formato da ferramenta utilizada. Tal como mencionado anteriormente, as ferramentas vendidas pelo fornecedor têm um formato cilíndrico, idêntico a uma fresa rasa, havendo, portanto, a necessidade de serem maquinadas afim de ficarem com um formato esférico na ponta de contacto, semelhante a uma fresa esférica. Esta modificação do formato original surge por duas razões: em primeiro porque o fornecedor da Simoldes não vende nós de ponta esférica, sendo este o formato mais idêntico ao desejado e, em segundo, porque com nós de ponta esférica, a área de contacto com a superfície é maior, tal como se pode ver na figura 28.

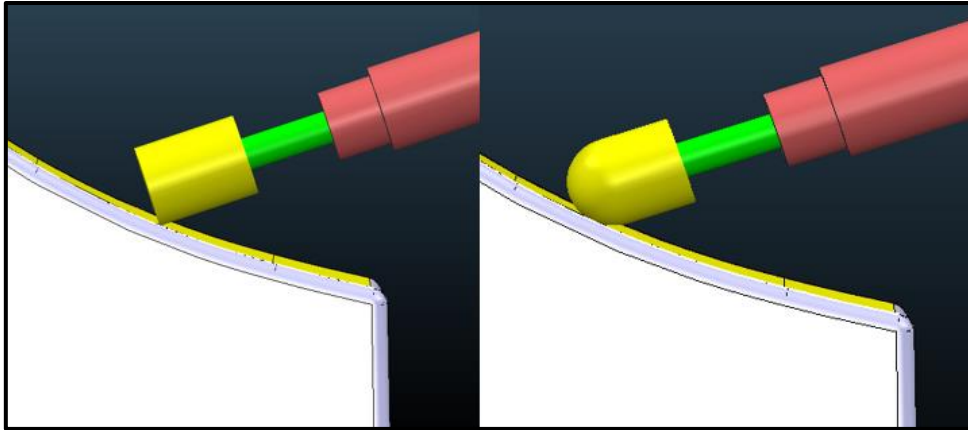


Figura 28: Comparação da área de contacto entre uma mó rasa (direita) e uma mó de ponta esférica (esquerda).

Enquanto que a mó rasa contacta a superfície através de uma aresta, a mó de ponta esférica contacta o molde com uma superfície curva, com uma área superior à aresta da primeira ferramenta. Este parâmetro está diretamente relacionado com o parâmetro ângulo da ferramenta introduzido no tópico anterior, sendo que quanto maior o ângulo, menor a área de contacto.

3.4.7 - Entrada da ferramenta na superfície

Este parâmetro de polimento, como o nome sugere, estuda o tipo de entrada que a ferramenta deve exercer ao contactar pela primeira vez com a superfície. O tipo de entrada é definido no *PowerMILL* durante a elaboração da estratégia, podendo, entre outros, ser do tipo rampa ou rasante, os dois tipos mais utilizados. É importante que a entrada da ferramenta na superfície seja o mais suave possível para que não ocorra uma deformação excessiva da superfície ao primeiro contacto com a mó.

Ainda, durante a realização dos testes observou-se que a qualidade do polimento melhora quando se inicia o programa no topo da superfície escolhida, isto é, quando a ferramenta entra na superfície de cima para baixo, no sentido vertical. Assim sendo, considerando a entrada da ferramenta de cima para baixo e tendo atenção à direção das marcas de fresa, é escolhido o tipo de entrada que a mó deve realizar.

3.4.8 - Óleo de polimento

O último parâmetro de polimento que será considerado é a utilização de óleo de polimento. O óleo em questão é aplicado em todas as etapas da metodologia

de polimento manual, com o objetivo de diminuir o atrito da lixa, ou pedra, com a superfície e manter a área de trabalho limpa, logo é legítimo assumir que a utilização de óleo seja também benéfica para o polimento automático. No entanto, neste trabalho a utilização de óleo foi impossível porque as ferramentas adquiridas são mós para polimento a seco, sendo que para uma melhor avaliação deste parâmetro seriam necessários mais testes.

4 - Resultados experimentais

Assim que estruturada a célula robótica e definidos os parâmetros de polimento iniciais, foram realizados testes de polimento num molde exemplo fornecido pela Simoldes, com o intuito de estudar a potencialidade e eficiência do processo. O objetivo ideal deste projeto era realizar o polimento total do molde, isto é, executar as quatro etapas da metodologia de polimento, apenas com o robô, não sendo necessário qualquer polimento manual. No entanto, após alguns testes, tendo em conta a dificuldade em ajustar corretamente os parâmetros de polimento e a fraca sensibilidade do robô quando comparado com a mão-de-obra qualificada, concluiu-se que o polimento total do molde era algo demasiado ambicioso. Assim sendo, o objetivo final deste trabalho passou a ser a determinação dos parâmetros que permitam reduzir ao máximo o tempo de polimento despendido pelos polidores durante o polimento dos moldes.

Posto isto, para a realização dos ensaios, dividiu-se o molde exemplo em zonas de teste onde foram testados vários conjuntos de parâmetros de polimento diferentes, que iam modificando conforme as dificuldades ou melhorias que se encontravam, até se obterem superfícies polidas aceites pelo polidor. O polidor, no caso deste trabalho, o chefe de polimento da MDA, no fim de cada teste inspecionou a zona acabada de polir, avaliando a qualidade final do polimento realizado pelo robô e, conforme a sua avaliação, determinou se a superfície era ou não aceite.

No final foram ensaiadas vinte zonas, das quais apenas quatro foram aceites pelo chefe do polimento, zonas estas cujos parâmetros utilizados, juntamente com os parâmetros das quatro primeiras zonas ensaiadas, serão descritos e analisados neste tópico. Nos anexos B e C estão disponíveis as tabelas 11 e 12 com todos os parâmetros utilizados em cada uma das zonas testadas. Na figura

29 está apresentado o modelo CAD do molde exemplo com todas as zonas de teste identificadas.

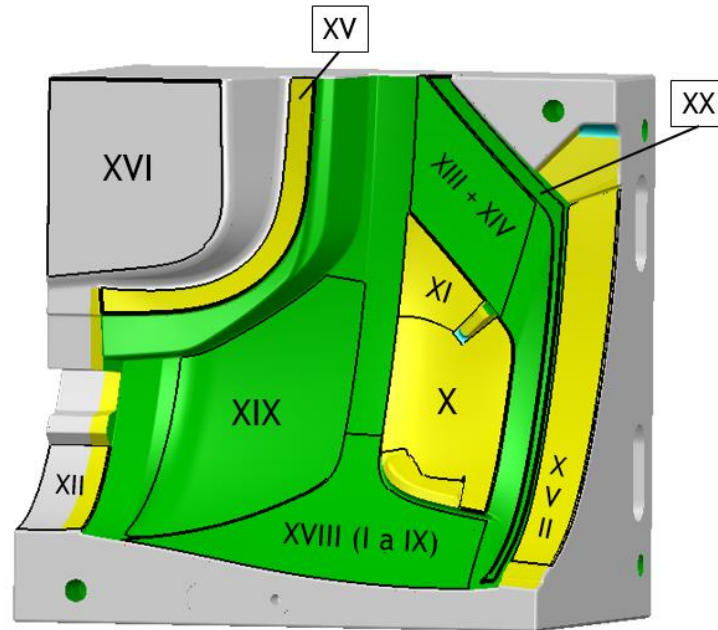


Figura 29: Modelo CAD do molde exemplo e zonas de teste.

➤ Zonas I, II, III e IV

Os parâmetros de polimento inicialmente definidos foram testados nas quatro primeiras divisões, respectivamente, as zonas I, II, III e IV, servindo como ponto de partida deste estudo. Devido à inexistente experiência com polimento automático, os primeiros testes foram elaborados em superfícies amplas, salvaguardando a ocorrência de erros como choques entre o *spindle* e o molde, por exemplo, sendo esta a razão pela qual as primeiras zonas se dividem todas na maior superfície do molde exemplo. Posto isto, os parâmetros de polimento iniciais quantificáveis podem ser vistos na tabela 5.

Desenvolvimento de célula robótica para polimento automático de moldes

Tabela 5: Parâmetros de polimento utilizados nas Zonas I, II, III e IV.

Zonas	I	II	III	IV
Nº de passagens	1	1	1	1
Ferramenta	220 Ø25	220 Ø25	220 Ø15	220 Ø15
Força do ACF (N)	10	10	10	10
Força do BIAx	2	2	1	1
Pressão do ar (bar)	2,5	2,5	4	4
<i>Feed Rate</i> (%)	80	20	20	80
Incremento (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1
Sobreespessura (mm)	-3	-3	-1	-1
Direção de polimento (º)	0	0	0	0

As primeiras ferramentas a serem usadas foram as duas mós de 220 MESH, respetivamente, a mó de 25 mm de diâmetro para as zonas I e II e a mó de 15 mm de diâmetro para as zonas III e IV. Consoante a ferramenta utilizada, alguns parâmetros foram modificando dependendo das características de cada mó, neste caso, a pressão do ar de modo a fornecer as rpm desejadas, a sobreespessura inferior para a mó de 25 mm por ter um diâmetro superior e a força do BIAx ajustada aos movimentos que cada mó exerce, enquanto que outros como o incremento e a força do ACF se mantiveram. A direção de polimento a 0º em todas as zonas representa a execução do programa na direção vertical em relação à base do robô, não tendo sido considerado o ângulo das marcas de fresa.

O ideal era conseguir polir as superfícies executando o programa NC apenas uma vez, daí o número de passagens em cada zona ser apenas uma. O resultado final da aplicação destes parâmetros é apresentado na figura 30.

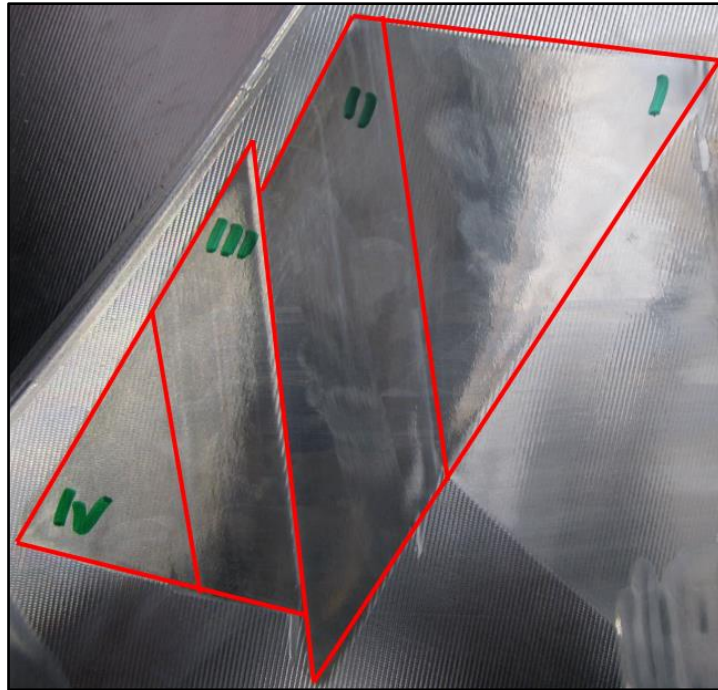


Figura 30: Estado superficial final das zonas I, II, III e IV.

Nenhuma das zonas presente na figura foi aceite, sendo o principal motivo desta escolha a fraca remoção das marcas de fresa. No entanto, destes testes foi possível concluir que: o valor da força do ACF pode ser baixo, não permitindo exercer pressão suficiente na superfície para que ocorra uma remoção eficiente das marcas de fresa; 20% de *feed rate* é muito lento para um incremento de 0,1, fazendo com que a mó se desgaste muito rápido; 80 % de *feed rate* parece ser uma velocidade razoável em termos de tempo-qualidade do polimento; -1 mm de sobreespessura é pouco para acompanhar o desgaste da mó de 15 mm e, por último, um maior número de passagens, ou seja, de execuções do programa NC na mesma superfície, pode ser benéfico para uma melhor remoção das marcas de fresa.

➤ Zona X - IB

A zona X - IB foi a primeira a ser aceite pelo chefe de polimento. No entanto, segundo a avaliação do mesmo, apesar de a superfície ser aceite, alguns parâmetros ainda devem ser afinados de forma a elevar a qualidade final do polimento. Os ensaios realizados na zona X tiveram como objetivo o estudo do melhor valor de incremento, entre 0,1 ou 0,2 mm, a aplicar nos programas, sendo este o único parâmetro a alterar nesta zona em específico. Para facilitar

a inspeção visual das diferenças entre cada incremento, dividiu-se a zona X em quatro secções, IA, IIA, IB e IIB, onde I e II representam a mó utilizada, I para a mó de 15 mm e II para a mó de 25 mm, e A e B o valor do incremento, respetivamente, 0,1 e 0,2 mm.

A tabela 6 apresenta os parâmetros de polimento utilizados em cada uma das secções da zona X.

Tabela 6: Parâmetros de polimento utilizados na zona X.

Zonas	IA	IB	IIA	IIB
Nº de passagens	2	2	2	2
Ferramenta	220 Ø15	220 Ø15	220 Ø25	220 Ø25
Força do ACF (N)	10	10	10	10
Força do BIAX	1	1	1	1
Pressão do ar (bar)	5,5	5,5	3	3
<i>Feed Rate</i> (%)	40	40	40	40
Incremento (mm)	0,1	0,2	0,1	0,2
Sobreespesura (mm)	-2	-2	-2	-2
Direção de polimento (º)	0/90	0/90	0/90	0/90

Comparativamente às primeiras zonas de teste, a força do ACF permaneceu a 10 N, o número de passagens aumentou para duas, uma na vertical (0º) e uma na horizontal (90º), a pressão do ar aumentou de forma a atingir a potencialidade máxima de rotação de cada mó e aplicou-se uma sobreespesura de -2 mm. O estado final da zona X pode ser visto na figura 31 e no anexo D.

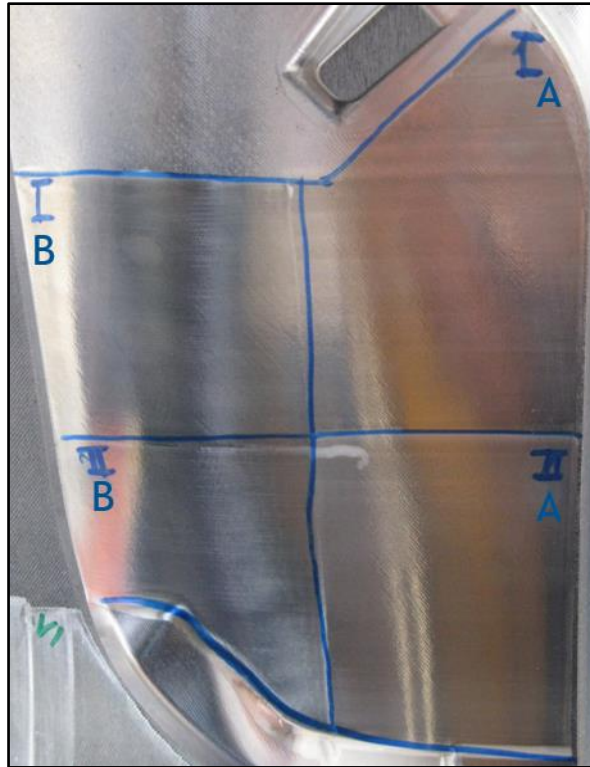


Figura 31: Estado superficial final das secções IA, IB, IIA e IIB da zona X.

Tal como já mencionado, das quatro secções ensaiadas, a IB foi a única aceite pelo polidor, isto porque, o seu estado superficial já facilitava o trabalho manual restante até se obter uma superfície totalmente polida, ou seja, o objetivo proposto foi parcialmente cumprido. Assim sendo, conclui-se que 0,2 mm de incremento é o valor ideal para este parâmetro, visto que faz metade das passagens, quando comparado com 0,1 mm, minimizando o desgaste da mó e, ainda, que para áreas de polimento como as destas secções, a mó de diâmetro 15 mm é mais eficiente que a de 25 mm, possivelmente por permitir um melhor detalhe de polimento por ser mais pequena.

De maneira a elevar a qualidade de polimento da superfície, foi sugerido pelo polidor, começar a cruzar as passagens da ferramenta com as marcas de fresa, tal como acontece no polimento manual (polimento em cruz) e aumentar o valor de *feed rate* e diminuir as rpm da ferramenta, ou seja, a pressão do ar, de forma a reduzir o tempo de polimento e o desgaste da ferramenta.

➤ Zona XIII + XIV

A segunda zona aceite foi a zona XIII + XIV. Inicialmente estas duas superfícies estavam separadas, tendo cada uma o seu conjunto único de parâmetros. No

entanto, como o polimento nestas superfícies não foi aceite, decidiu-se juntar as duas numa só, reaproveitando a área para implementar a técnica do polimento em cruz, tal como sugerido pelo chefe de polimento. Novamente, todos os parâmetros utilizados podem ser vistos na tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros de polimento da zona XIII + XIV.

Zona XIII + XIV							
Passagem	1	2	3	4	5	6	7
Ferramenta	220 Ø25	220 Ø25	120 Ø15	120 Ø15	220 Ø25	220 Ø25	220 Ø25
Força do ACF (N)	18	25	20	18	18	20	20
Força do BIAx	2	2	1	1	2	2	2
Pressão do ar (bar)	3,5	3,5	5,5	5,5	5,5	3,5	3,5
<i>Feed Rate</i> (%)	40	40	60	60	40	80	80
Incremento (mm)	0,2						
Sobreespessura (mm)	-3	-3	-5	-5	-2	-2	-2
Direção de polimento (°)	45	-45	45	-45	45	-45	45
Ângulo da ferramenta (°)	-					60	

Além da introdução do polimento em cruz, foi também testado nas duas últimas passagens nesta zona, uma estratégia de polimento a 3 + 2 eixos que levou ao aparecimento de um novo parâmetro de polimento, o ângulo da ferramenta, correspondente ao ângulo formado entre o eixo da ferramenta e a superfície. Com a utilização das estratégias a 3 + 2 eixos, descobriu-se que, tal como explicado num tópico anterior nesta dissertação, o peso do *spindle* afeta a força do ACF, sendo por isso a zona XIII + XIV a primeira onde o gráfico Força VS Amplitude foi aplicado. Por fim, esta foi a única zona aceite onde se realizaram passagens com a mó de 120 MESH. O estado final após o polimento da zona XIII + XIV está apresentado na figura 32.



Figura 32: Estado superficial final da zona XIII + XIV.

No fim das sete passagens, a superfície ficou sem qualquer marca de fresa, sendo apenas visíveis as marcas de polimento provocadas pela passagem da mó. Apesar de o estado superficial já cumprir em parte o objetivo proposto, existem ainda alguns parâmetros que podem ser afinados. Com base no resultado obtido, pode-se afirmar, que a força do ACF deve ser sempre superior ou igual a 18 N para ângulos de ferramenta superiores a 20°, que tanto o valor de pressão do ar como o intervalo dos valores de sobreespessura parecem ótimos para uma relação desgaste-qualidade de polimento boa, que o polimento em cruz melhora significativamente o trabalho realizado e que o ângulo da ferramenta a 60° parece estar à medida da qualidade desejada.

No fim dos ensaios da zona XIII + XIV e tendo em conta os resultados obtidos em todas as outras zonas onde foi utilizada, ficou decidido que a mó de 120 MESH seria descartada dos próximos testes. A razão que sustenta esta escolha é o desgaste excessivo observado durante a utilização destas mós. Tal acontece, pois 120 MESH é uma granulometria demasiado baixa para o tipo de aço do molde exemplo.

➤ Zona XVII

A terceira superfície a ser aceite pelo chefe do polimento foi a superfície da zona XVII. Tendo em conta as melhorias atingidas nas zonas aceites, restava apenas afinar os parâmetros força do ACF, *feed rate* e sobreespessura, e foram

exatamente estes três parâmetros que foram estudados nesta zona. A tabela 8 contém todos os parâmetros utilizados neste ensaio.

Tabela 8: Parâmetros de polimento utilizados na zona XVII.

Zona XVII							
Passagem	1	2	3	4	5	6	7
Ferramenta	220 Ø25						
Força do ACF (N)	35		20				
Força do BIAx	2						
Pressão do ar (bar)	3,5						
Feed Rate (%)	30		40				
Incremento (mm)	0,2						
Sobreespessura (mm)	-3						
Direção de polimento (°)	-45	45	-45	45	-45	45	-45
Ângulo da ferramenta (°)	60						

Neste ensaio, variou-se então a força do ACF entre 35 e 20 N com o intuito de estudar se uma pressão maior na superfície melhoraria o polimento, definiu-se uma sobreespessura de -3 mm, o valor intermédio dos intervalos identificados nos ensaios anteriores e o *feed rate* variou entre 30 e 40 %. De mencionar que, apesar de o ângulo da ferramenta ser 60°, a estratégia aplicada foi apenas de 3 eixos, ou seja, o quinto eixo do robô estava paralelo com a base do robô, daí o gráfico Força VS Amplitude que define a força do ACF não se aplicar neste ensaio.

O resultado obtido com a aplicação deste conjunto de parâmetros de polimento está apresentado na figura 33.



Figura 33: Estado superficial final da zona XVII.

Analisando o estado final da superfície conclui-se que, dos parâmetros em estudo, 35 N de força no ACF pressiona demasiado a mó contra a superfície, aumentando o desgaste da mesma, sendo melhor diminuir o parâmetro para um valor perto de 20 N, -3 mm de sobreespessura é o valor indicado para a ferramenta utilizada e um *feed rate* inferior a 40% não deve ser utilizado.

Por último, nesta zona apareceu pela primeira vez desde o início dos testes de polimento um defeito superficial conhecido na gíria dos polidores como “picotado”. Este defeito é originado por picos de energia na CNC durante a maquinação do molde e permanece camuflado pelas marcas de fresa até se iniciarem etapas finais de polimento. Apesar deste defeito constituir um novo problema que deve ser eliminado da superfície final, é também a prova visível de que o polimento automático está a ser eficiente havendo remoção suficiente de material. O defeito em questão pode ser visto no anexo E.

➤ Zona XIX

A zona XIX foi a última zona a ser polida com sucesso e definitivamente a superfície com melhor qualidade final de polimento das quatro superfícies aceites pelo polidor. Após o resultado obtido na zona XVII a escolha dos parâmetros passou a ser bastante direta, não havendo muita mais margem para mudanças. A partir desta zona o desafio era diminuir o tempo de polimento, mantendo a qualidade superficial até agora obtida. Na tabela 9 encontram-se o conjunto de parâmetros de polimento aplicados na zona XIX.

Tabela 9: Parâmetros de polimento utilizados na zona XIX.

Zona XIX					
Passagem	1	2	3	4	5
Ferramenta	220 Ø25				
Força do ACF (N)	25		20		
Força do BIAx	2				
Pressão de ar (bar)	3,5				
<i>Feed Rate</i> (%)	40		60		80
Incremento (mm)	0,2				
Sobreespessura (mm)	-3				
Direção de polimento (°)	-45	45	-45	45	-45
Ângulo da ferramenta (°)	60				

Neste ensaio, o *feed rate* e o número de passagens executadas foram os dois parâmetros mais importantes, pois são estes os principais influenciadores do tempo final de polimento. Voltando a aplicar um intervalo de *feed rate* de 40 a 80%, ao fim de cinco passagens obteve-se o resultado apresentado no anexo F, devido às dimensões da imagem.

Como já mencionado, a zona XIX foi a que obteve a melhor qualidade final de polimento, das quatro zonas aceites. Segundo o polidor, o estado superficial final desta zona permite que o molde avance para a terceira etapa da metodologia de polimento, tendo reduzido o trabalho manual em 50%, ou seja, o objetivo proposto para esta dissertação foi alcançado.

Com base no resultado final de cada uma das superfícies aceites pelo polidor, foram determinados os valores que traduzem a melhor relação entre os parâmetros de polimento considerados. Na tabela 10 estão apresentados os valores finais para cada um dos parâmetros.

Tabela 10: Valores finais de cada parâmetro de polimento considerado.

Nº de passagens	5 - 7
Ferramenta	220 Ø15 ou Ø25
Força do ACF (N)	20 - 25
Força do BIAx	2
Pressão de ar (bar)	3,5
<i>Feed Rate</i> (%)	40 - 80
Incremento (mm)	0,2
Sobreespessura (mm)	-3
Direção de polimento (º)	45 e -45
Ângulo da ferramenta (º)	60

Apesar dos bons resultados obtidos durante os ensaios, não é correto afirmar que estes valores apresentados na tabela sejam os valores perfeitos para cada um dos parâmetros, visto que apenas 50% do polimento foi elaborado pelo robô. Para que tal aconteça, são necessários mais testes em superfícies diferentes de forma a otimizar o processo e, quem sabe, que num futuro próximo sejam

encontrados os valores perfeitos para a realização do polimento 100% automatizado.

Por último, na zona XX foi realizado o polimento com óleo de polimento, mas como as mós disponíveis são produzidas exclusivamente para polimento a seco, não foi obtido um bom resultado.

5 - Robô VS Polidor

Neste tópico serão exploradas as diferenças entre o polimento manual e o polimento automático, nomeadamente, enunciando as vantagens e desvantagens do robô em relação à mão de obra qualificada e através de um estudo da viabilidade económica do processo automatizado.

5.1 - Vantagens e desvantagens

Tal como qualquer outro processo industrial, o polimento automático tem vantagens e desvantagens quando comparado com o processo concorrente, neste caso, o polimento manual.

As principais vantagens do robô relativamente ao polidor (mão de obra qualificada) são:

- **O trabalho contínuo**, pois o robô não possui um horário fixo de trabalho, podendo executar tarefas durante 24h seguidas sem nunca se cansar, contrariamente ao polidor que trabalha, geralmente, por turnos de 8h diárias e apresenta desgaste físico após a realização das tarefas;
- **A boa autonomia**, isto é, após escrever, passar e executar o programa NC no robô, o polidor/programador não fica preso ao mesmo molde até ao fim do polimento, podendo controlar outros robôs ao mesmo tempo, podendo assim trabalhar mais do que um molde ao mesmo tempo, enquanto que no polimento manual, o polidor apenas pode passar para o molde seguinte após acabar a tarefa iniciada;
- **A maior liberdade de movimentos** permitindo uma ótima adaptação a moldes de grandes dimensões. Geralmente o robô é capaz de alcançar qualquer zona do molde após este ser fixo à base de suporte, enquanto que o polidor tem que mudar constantemente a posição do molde, aumentando o tempo de polimento.

As principais desvantagens do robô relativamente ao polidor são:

- **O desgaste e o preço das mós** utilizadas no robô que, quando comparadas com as pedras de polimento manual, além de se desgastarem muito mais rápido, são também mais caras;
- **Difícil controlo dos parâmetros de polimento** pois, tal como se observou durante a realização dos testes de polimento, para além de serem muitos parâmetros, as razões que levam à escolha de cada um são também difíceis de apurar, enquanto que o polimento manual apenas depende da sensibilidade e experiência de polimento do polidor;
- **A impossibilidade de trocar a ferramenta** após o programa NC ser iniciado pois não existe forma de efetuar a troca sem que a superfície seja deformada indesejavelmente, enquanto que no polimento manual o polidor possui sensibilidade suficiente para reiniciar a tarefa as vezes que pretender;
- **O tempo de programação**, isto é, enquanto que o polidor atua de imediato na superfície do molde, o programador necessita de definir a estratégia de polimento, simular a mesma, escrever o programa NC e transferi-lo para o comando de controlo do robô antes de poder iniciar o polimento.

5.2 - Análise preliminar à viabilidade económica do processo

Utilizando os parâmetros definidos na tabela 10, sabemos que o tempo de polimento por molde é reduzido em 50%, no entanto, nada garante que a mesma tarefa elaborada com mais um polidor que faça o mesmo trabalho que o robô, não seja mais eficiente. Deste modo foi elaborada uma análise à viabilidade económica do processo de polimento automático com o intuito de comparar o custo/h do robô com o de um polidor. Para a análise, pressupôs-se, baseado em custos reais, os seguintes valores:

1. **Custo do polidor (subcontratado)** - 20 €/h;
2. **Custo total do robô (Robô + ACF + BIAX)** - 49.965 €;
3. **Custo de manutenção do robô (33% do custo total do robô)** - 16.488 €;
4. **Custo de instalação do robô (30% do custo total do robô)** - 14.990 €;
5. **Custo elétrico** - 0,11 €/kWh;

6. Custo das ferramentas de polimento (PFERD) - 4,78 €/unidade.

O custo do polidor de 20 €/h inclui os custos elétrico e das ferramentas de polimento. É comum os robôs industriais de pequeno-médio porte terem uma durabilidade garantida de sete anos, logo, amortizando o custo total do robô obtém-se um custo de 11.635 €/ano. Considerando os custos de manutenção e instalação, que o robô permanece em funcionamento 272 dias por ano e que durante um terço desse tempo pode não estar em funcionamento, obtém-se um custo por hora do robô de 2,66 €/h.

Para uma maior precisão do custo/h total do robô, é necessário ter em conta dois novos aspetos: o custo/h de um programador responsável pela programação do robô e a amortização de uma licença anual de *PowerMILL*. Considerando que o programador está responsável por vários robôs, despendendo apenas 10% do seu horário de trabalho por programa escrito, e que dos três turnos diários, apenas durante os dois primeiros são escritos novos programas, determinou-se um custo total programador-licença *PowerMILL* de 4,83 €/h.

Finalmente, resta contabilizar o consumo energético do robô e a quantidade de mós que é utilizada por hora de polimento. Robôs de pequeno-médio porte geram consumos energéticos por volta dos 4 kWh, o que perfaz um custo elétrico de 0,54 €/kWh. Quanto às mós consumidas, tendo em conta os testes de polimento realizados nesta dissertação, assumiu-se que para estratégias de polimento de uma hora são necessárias duas mós, obtendo-se um custo total de mós consumidas de 9,56 €/h.

Calculando a soma de todos os custos, estima-se um custo total do robô de aproximadamente 18 €/h, ou seja, menos 10% que o custo de um polidor subcontratado, confirmando a viabilidade económica do processo. No entanto, é importante relembrar que metade do valor final remete para um preço unitário de ferramenta de polimento elevado e para um número de horas de trabalho do robô bastante reduzido, sendo que, ajustando estes dois custos, por exemplo, através de um acordo de compra de mós em grandes quantidades com o fornecedor, reduzindo conseqüentemente o custo das ferramentas, e

aumentando o tempo de trabalho do robô, o custo final do robô ficaria ainda mais baixo.

6 - Conclusões

Nesta dissertação foi implementada uma célula robótica com sucesso que foi utilizada para a realização de testes de polimento com o intuito de estudar os melhores valores para os parâmetros de polimento definidos e de concretizar o objetivo proposto de reduzir ao máximo o tempo de polimento e o esforço físico despendido pelo polidor qualificado. Durante os testes foi identificado um conjunto de parâmetros que possibilita a execução das duas primeiras etapas da metodologia de polimento, reduzindo o polimento manual em metade, o que traduz a concretização do objetivo proposto. Deste trabalho foram retiradas as seguintes conclusões:

- O desgaste da ferramenta revelou ser o principal problema deste processo, sendo importante definir e ajustar bem os parâmetros influenciadores do desgaste da mó;
- Não devem ser utilizadas granulometrias de mó inferiores a 220 MESH, pois, tal como se verificou com a mó de 120 MESH, granulometrias menores requerem áreas de trabalho também menores, de maneira a garantir a eficiência da ferramenta durante o polimento;
- A entrada da ferramenta definida na estratégia de polimento deve ser sempre no sentido vertical, do topo para a base da superfície, de forma a obter uma melhor qualidade de polimento.

Apesar do grupo Simoldes não considerar que a célula possa no seu estado atual entrar em produção, as vantagens do robô em relação ao polidor e a análise económica realizada ao abrigo desta dissertação demonstram que a célula já agora consegue ser rentável, reduzindo significativamente o polimento manual.

É expectável que futuros trabalhos possam acabar por substituir por completo o polimento manual, tal como foi idealizado pelo grupo Simoldes.

7 - Trabalhos futuros

Como nota final deste trabalho, serão apresentadas neste capítulo algumas sugestões para otimização de trabalhos futuros. Tendo em conta as dificuldades encontradas durante os testes de polimento elaborados, os aspetos a ter em conta para a melhoria do processo são:

- **A procura de um novo tipo de ferramenta** - o excessivo desgaste das mós de polimento incentiva a procura de novas ferramentas, que sejam mais flexíveis e eficientes na execução da tarefa;
- **Aplicação de estratégias de polimento lateral** - tal como observado nos resultados, utilizar estratégias de polimento com a ferramenta orientada na vertical, apenas desgasta a mó na parte esférica, sobrando bastante aglomerado na lateral da mesma. A introdução de estratégias de polimento lateral pode ser uma solução para acabar com o desperdício observado. Para tal, seria aconselhável a aquisição de um novo *spindle* próprio para este tipo de polimento e de novas ferramentas em formato barril para que a área de contacto da ferramenta seja a maior possível;
- **O uso de óleo de polimento** - tal como mencionado anteriormente, a aplicação de óleo de polimento pode melhorar significativamente a qualidade final do trabalho. No entanto, é necessário que as mós sejam adequadas à utilização do mesmo;
- **A utilização de granulometrias maiores** - a introdução de mós com granulometrias superiores a 220 MESH deve ser explorada, pois uma granulometria maior implica uma dureza da mó também maior, logo um desgaste menor;
- **A melhoria dos sistemas de calibração e de fixação do molde** - No caso de este processo ser aplicado a nível industrial, é necessária a melhoria destes dois sistemas, pois a calibração e fixação manual do molde leva ao aparecimento de erros indesejáveis e que poderiam ser facilmente evitados, por exemplo, com a aplicação de um *scanner* que fosse acoplado ao *spindle* para medir o molde.

Referências Bibliográficas

- [1] V. Martins Augusto, “Textos de apoio à disciplina de Engenharia Assistida por Computador”, 2016.
- [2] B. Couto, “Aplicação e desenvolvimento em células de fabrico por maquinaria robotizada”, 2012.
- [3] S. Costa, “Rebarbagem em célula robô através de programação *offline* em CAM”, 2016.
- [4] Delcam, “*Manual de formação em PowerMILL 2015*”, 2015.
- [5] Delcam, “*PowerMILL Robot Interface*”, 2015.
- [6] N. Moita, “Concepção e simulação de uma célula robotizada para acabamentos de solas de calçado”, 2009.
- [7] A. Basto, “*PowerMILL Robot Interface - Norcam case study*”, 2013.
- [8] J. Ferreira, “Programação de robôs para maquinaria”, 2013.
- [9] D. Angelino, “Concepção e simulação de uma célula robótica para operações de acabamento de guitarras feitas em materiais compósitos”, 2012.
- [10] J. Arenas, “*Retrofitting* do robô ASEA IRB6-S2 baseado em tecnologias de comando numérico usando LinuxCNC”, 2016.
- [11] C. Tavares, “Automatização de uma célula robotizada de corte plasma”, 2011.
- [12] A. Lopes, “Robótica Industrial - Modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estrutura em série”, 2002.
- [13] Delcam-Norcam, “Formação controlador Motoman”, 2012.
- [14] Robowork, “Catálogo ACF”, 2016.
- [15] BIAx, “RSC Modular System”, 2017.
- [16] *Graphite Technologies*, “Catálogo Polimento”, 2017.
- [17] PFERD, “Ferramentas para acabamento e polimento,” 2017.

Anexos

Anexo A



Figura 34: Mós após o polimento.

Anexo B

Tabela 11: Tabela final dos parâmetros de polimento utilizados nas zonas I a XIV.

Zonas	Nº de passagens	Ferramenta	Força do ACF (N)	Rotação do BIAX	Pressão do ar (bar)	Feed Rate (%)	Incremento (mm)	Sobreespessura (mm)	Direção de polimento	Ângulo da ferramenta (º)	Óleo de polimento
I	1	220 Ø25	10	2	2,5	80	0,1	-3	0		
II	1	220 Ø25	10	2	2,5	20	0,1	-3	0		
III	1	220 Ø15	10	1	4	20	0,1	-1	0		
IV	1	220 Ø15	10	1	4	80	0,1	-1	0		
V	1	220 Ø15	10	1	4	80	0,2	-1	0		
VI	1	220 Ø15	10	1	4	20	0,2	-1	0		
VII	1	220 Ø15	10	1	4	20	0,2	-3	0		
VIII	3	220 Ø15	10	1	4	20/50/80	0,1	-3	0		
IX	2	220 Ø15	10	1,5	4	40	0,1	-3	0/90		
X	IA	220 Ø15	10	1	5,5	40	0,2	-2	0/90		
	IB										
	IIA										
	IIB										
XI	I	120 Ø15		1	5,5	40	0,1	-4	90/90/0		
	II										
	I'										
	II'										
XII	1ª	220 Ø25	10	1	5,5	40	0,1	-4	90/0/90		
	2ª										
	3ª										
XIII		120 Ø15	15	2	3,5	80	0,2	-4	90		
XIV		220 Ø25	15	2	3,5	40	0,2	-2	0/90		

Anexo C

Tabela 12: Tabela final dos parâmetros de polimento utilizados nas zonas XIII + XIV a XX.

Zonas	Nº de passagens	Ferramenta	Força do ACF (N)	Rotação do BLAX	Pressão do ar (bar)	Feed (%)	Incremento (mm)	Sobreespessura (mm)	Direção de polimento	Ângulo da ferramenta (°)	Óleo de polimento						
XIII + XIV	-	220 Ø25	18	2	3,5	40	0,2	-3	45	60							
			25	2	3,5	40		-3	-45								
			20	1	5,5	60		-5	45								
		120 Ø15	18	1	5,5	60		-5	-45								
			18	2	5,5	40		-2	45								
			20	2	3,5	80		-2	-45								
			20	2	3,5	80		-2	-45								
XV			Não foi contabilizada														
			XVI	-	120 Ø15	15	2	3,5	80	0,2	-3	90					
						15	1	5,5	100	0,2	-3	90					
			XVII	-	220	35	2	3,5	30	0,2	-3	45	60				
									30								
						20	2		40						0,2	-3	45
									40								
40																	
40	2	40				0,2	-3		45								
		40															
40	2	40	0,2	-3	45												
		40															
XVIII	1	220	30	2,5	3,5	80	0,2	-2	-45	30							
			25	2	3,5	40	-45										
			25	2	3,5	40	-45										
			20	2	3,5	60	-45										
			20	2	3,5	80	-45										
XIX	-	220	20	2	3,5	80	0,2	-3	45	60							
			20	2	3,5	80	-45										
			20	2	3,5	80	-45										
			20	2	3,5	80	-45										
			20	2	3,5	80	-45										
XX	-	220	20	2	3,5	80	0,2	-4	45	60							
			20		3,5				-45								
			25		5,5				45								
			25		5,5				-45								
XX	-	220	25	2	5,5	80	0,2	-4	-45	60	Sim						
			25		5,5				45								
			25		5,5				-45								
			25		5,5				-45								

Anexo D



Figura 35: Secção IB da zona X com maior detalhe.

Anexo E

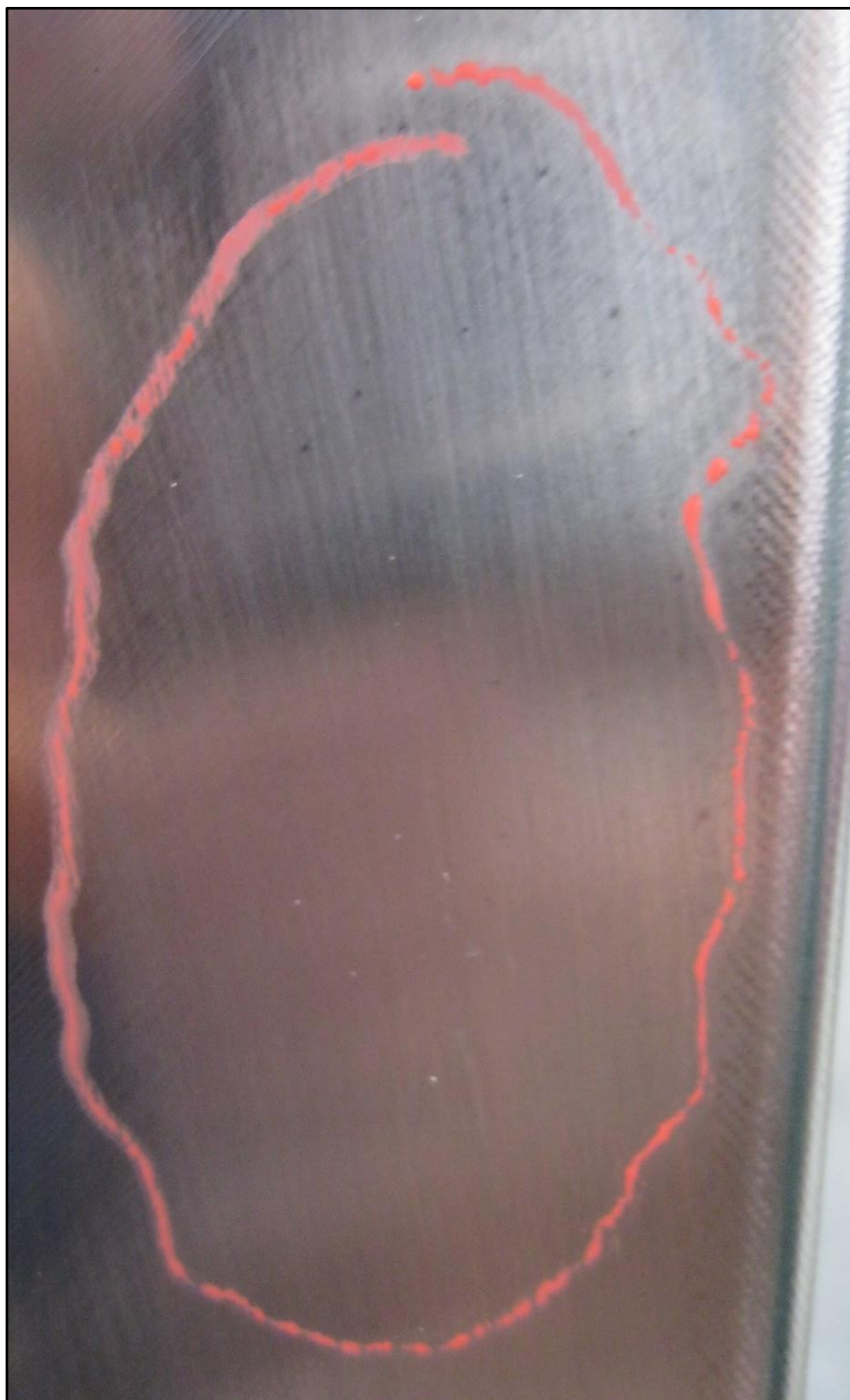


Figura 36: Defeito superficial “picotado”.

Anexo F

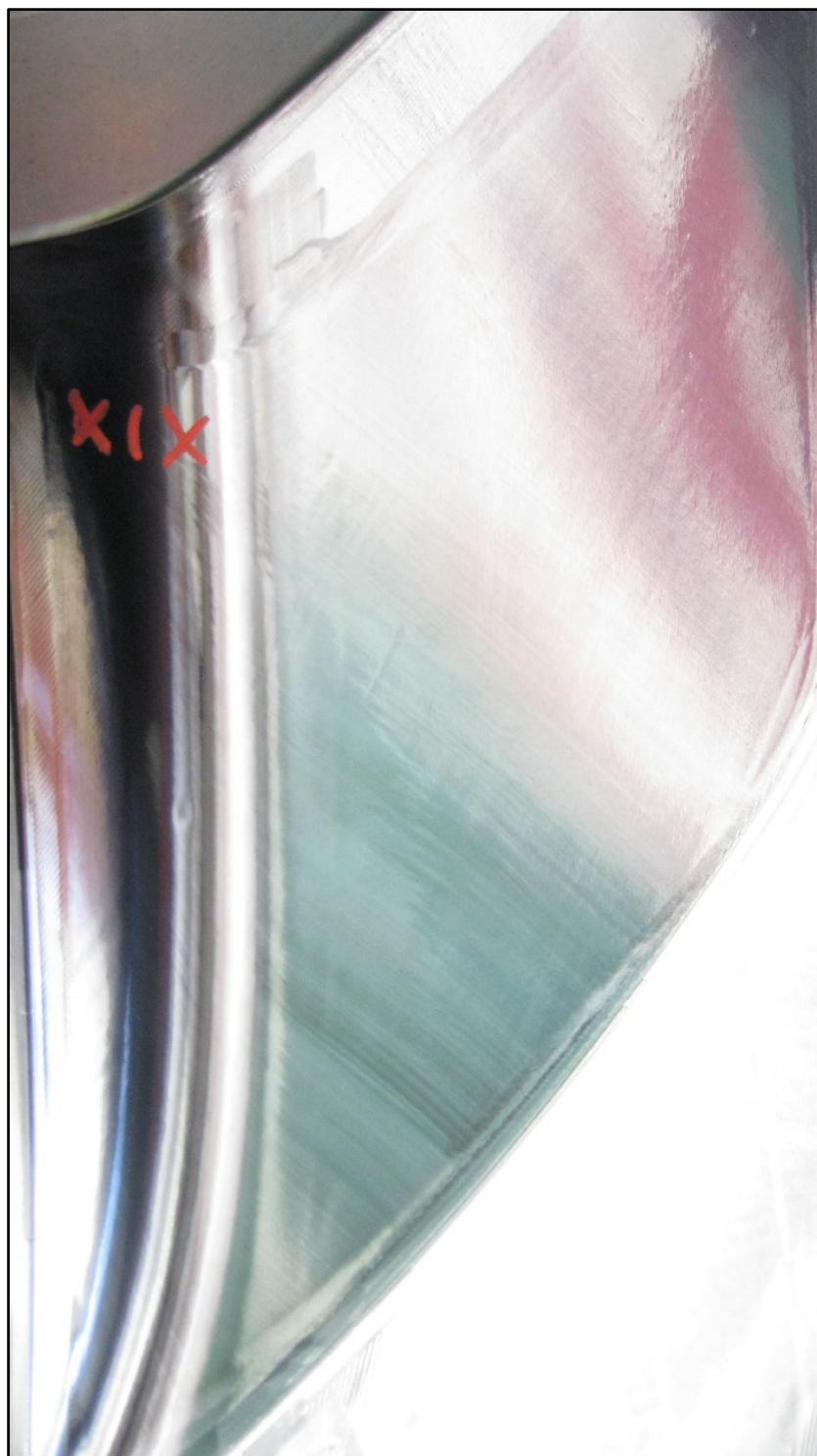


Figura 37: Estado superficial final da zona XIX.