

Concepção e Simulação de Célula Robotizada para Operações de Acabamento

João Pedro Marques Barbosa

Dissertação – Relatório Final

Orientadores:

Prof. Paulo Abreu

Prof. António Mendes Lopes



FEUP
Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Porto, Julho de 2010

“A man who carries a cat by the tail learns something he can learn in no other way.”

Mark Twain

Resumo

Hoje em dia, com linhas de produção totalmente automatizadas e com ritmo de funcionamento elevado, a dependência de mão-de-obra qualificada para realizar as operações de acabamento é vista como a causa maior para quebras de produção e maiores custos associados ao produto final.

A introdução de robôs industriais de seis eixos de movimento para a realização desses acabamentos superficiais constituiu a resolução mais indicada para o problema colocado no final do processo produtivo. No entanto, a necessidade de interromper a produção para realizar a programação das células robotizadas – programação online – bem como a dificuldade de controlar a força de contacto entre peça e ferramenta são factores que podem limitar o sucesso da implementação deste tipo de solução.

Neste trabalho é estudada a hipótese da utilização da programação off-line e simulação de células robotizadas para aplicação em operações de acabamento, complementada com o controlo activo da força de contacto integrado nos movimentos do robô.

Em primeira instância, foi realizada uma contextualização deste tema na indústria actual de modo a poderem ser concretamente definidos objectivos para o projecto. Estes objectivos compreendem a focalização do trabalho numa só operação de acabamento – lixagem – e num determinado sector industrial: o das torneiras.

De seguida, são descritos os procedimentos de preparação para a realização da programação e simulação da célula robotizada disponível no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Uma vez realizada a programação em ambiente virtual, utilizando para o efeito o software da ABB® RobotStudio®, foram implementadas e testadas algumas das soluções obtidas com diferentes modos de controlo do robô. A realização destes testes permitiu obter uma maior sensibilidade à possibilidade de introdução no meio industrial e implementação destas novas tecnologias de programação e controlo de células robotizadas.

Design and Simulation of Robotic Cell for Finishing Operations

Abstract

Nowadays, with production lines that have high operating rhythms and are totally automated, reliance on qualified hand labour to perform the finishing operations is seen as the biggest cause for breaks in production and larger costs associated to the final product.

The introduction of industrial robots with six movement axes for the execution of those superficial finishing's was the most suitable solution for the problem set at the end of the production process. However, the need to interrupt the production to programme the robotic cells – online programming – as well as the difficulty in controlling the contact force between the part and the tool are factors that can limit the successful implementation of this kind of solution.

This project studied the hypothesis of using off-line programming and robotic cell simulation applied in finishing operations, supplemented with active force control integrated in the robot's movements.

Firstly the topic was contextualized regarding the current industry, so that the goals for this project could be specifically defined. These goals focus the project on a single finishing operation – belt grinding – and a specific industrial sector: water taps.

Then, the procedures needed to prepare the robotic cell are described. The referred cell is located in the Robotics Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Engineering of the University of Porto.

Once the off-line programming was concluded, using ABB's software RobotStudio®, some of the obtained solutions were implemented and tested. Two different robot control methods were applied in these experiments. The performed tests allowed for some inferences to be made regarding the possibility to introduce and to implement in the industrial world the use of the new programming and control technologies.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, o Professor Paulo Abreu e o Professor António Mendes Lopes, por todo o acompanhamento e disponibilidade demonstrados ao longo deste semestre, desempenhando um papel fulcral para o sucesso deste trabalho.

Agradeço ao coordenador da opção de Automação, o Professor Francisco Freitas, pelo seu empenho em mostrar-nos o que é Engenharia e pela sua dedicação na criação de um excelente ambiente de trabalho entre os alunos da opção.

Quero agradecer à empresa José Gonçalves dos Santos & Filhos, Lda. (JGS), em especial ao Eng. Domingos Gonçalves pelo interesse demonstrado desde início no resultado final deste projecto e, também, pelo apoio e material fornecido.

À empresa NS Máquinas Industriais, Lda., especialmente ao Dr. António Faria, pela sua compreensão e amabilidade de nos ter cedido a máquina lixadeira essencial neste projecto.

Ao Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental e ao Eng. Nuno Viriato por todo o apoio e “know-how” emprestados a este projecto.

Agradeço, também, aos funcionários da Oficina de Mecânica do DEMec e ao Eng. Joaquim Fonseca pela sua colaboração na área de projecto mecânico.

A todos os meus amigos, e especialmente àqueles que estudam para serem engenheiros, que me acompanharam nos momentos de felicidade e de sofrimento que a vida académica proporciona, muito obrigado.

À Kathy, obrigado por tudo.

Por último, quero agradecer aos meus pais, Edmundo Barbosa e Rosa Marques Barbosa, por serem um exemplo de tudo de bom que a vida nos pode proporcionar. Ao meu pai, por me mostrar que, só fazendo aquilo de que realmente se gosta é que se consegue ser feliz. À minha mãe por ser a minha professora de vida, transmitindo-me os valores para atingir o sucesso e a excelência.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Rebarbagem	2
1.2.	Lixagem	3
1.3.	Polimento	4
1.4.	Introdução dos robôs industriais	6
1.5.	Vantagens da utilização de robôs industriais	7
1.6.	Sectores industriais	8
1.7.	Controlo de força	9
1.7.1.	Controlo passivo vs controlo activo da força	10
1.8.	Software de programação	14
1.9.	Soluções Existentes.....	16
1.9.1.	Aesculap	17
1.9.2.	Kuntz Electroplating Inc.....	18
1.9.3.	Franke Sissons	19
1.9.4.	ABB®.....	20
2.	Objectivos do trabalho	23
2.1.	Definição do problema.....	23
2.2.	Abordagem proposta.....	24
2.3.	Metodologia proposta e recursos existentes	25
3.	Preparação da programação	27
3.1.	Escolha da torneira.....	27
3.2.	Estudo e Concepção do sistema de fixação	29
3.2.1.	Modo de fixação do corpo da torneira.....	30
3.2.2.	Modo de fixação do manipulador da torneira.....	31
3.3.	Levantamento da forma 3D da torneira	32
3.3.1.	Rhinoceros®	32
3.3.2.	DAVID® Laserscanner	33
3.4.	Máquina Lixadeira.....	37
3.4.1.	Máquinas lixadeiras industriais	38
3.4.2.	Máquina lixadeira escolhida.....	40
4.	Concepção, Programação e Simulação de uma Célula Robotizada para Lixagem .	43

4.1.	RobotStudio®	43
4.2.	Machining PowerPac®	45
4.3.	Instalação do software	47
4.4.	Layout da célula robotizada e obtenção do controlador virtual	48
4.5.	Introdução de geometrias modeladas e finalização do layout	49
4.6.	<i>Tool frame</i> e <i>Workobject</i>	52
4.7.	Programação – método	55
4.8.	Trajectória gerada e configurações do robô.....	60
4.8.1.	Trajectória gerada	60
4.8.2.	Configurações do robô	61
4.9.	Simulação da solução.....	64
4.10.	Discussão.....	66
5.	Implementação da solução e Ensaios	69
5.1.	Calibração	69
5.2.	Ensaios	71
5.2.1.	Ensaio 1	72
5.2.2.	Ensaio 2	82
5.2.3.	Ensaio 3	87
6.	Conclusões e Trabalhos futuros	93
6.1.	Dificuldades encontradas	93
6.2.	Conclusões	94
6.3.	Trabalhos Futuros	97
	Referências	99

Índice de Figuras

Figura 1.1- Robô industrial a realizar operação de rebarbagem (Bogue, 2009).....	3
Figura 1.2 - Robô industrial a realizar operação de lixagem (www.robotmatrix.org)	4
Figura 1.3 - Esquema de diferentes métodos de lixagem (www.wikipedia.org).....	4
Figura 1.4 - Disco de polimento	5
Figura 1.5 - Robô industrial a realizar polimento de pára-choques (Bogue, 2009)	5
Figura 1.6 - Exemplo de máquina CNC utilizada em polimento	6
Figura 1.7 - Prótese da anca com acabamento superficial de grande qualidade obtido numa célula robotizada (Bogue, 2009).....	8
Figura 1.8 - Pás de turbinas de avião antes (esq.) e depois (dir.) da lixagem e polimento em célula robotizada (Huang, Gong, Chen, & Zhou, 2002).....	8
Figura 1.9 - Transdutor de forças ATI F/T Delta IP60 (http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_productDesc.aspx)	11
Figura 1.10 - Esquema das forças e momentos a que o transdutor se encontra sujeito (http://motionsystemdesign.com/mag/forcetorque_sensors).....	11
Figura 1.11 - Componentes do sistema de ligação do transdutor em rede: Transdutor, cabo e Net Box (http://www.ati-ia.com/Company/images/ATI-Net-F-T-System.jpg)..	12
Figura 1.12 - AFD1100 montado em robô industrial (http://pushcorp.com/Products/afd1100.htm).....	12
Figura 1.13 - Controlador FCU1000 da PushCorp Inc. (http://pushcorp.com/Products/fcu1000.htm).....	13
Figura 1.14 - AFD51 instalado em robô.....	13
Figura 1.15 - Banca de lixagem PushCorp SBS81 com dispositivo de controlo de força passivo AFD80 instalado (http://pushcorp.com/Products/sbs81.htm)	13
Figura 1.16 - Simulação de robô industrial a executar operação de acabamento com controlo de força passivo (http://www.pushcorp.com/Products/afd50.htm).....	14
Figura 1.17 - Operador a utilizar a técnica "lead-to-teach" (http://www.abb.com/cawp/seitp202/df84fb365192587a482573b00025d109.aspx).....	15
Figura 1.18 – Consola virtual disponível no software RobotStudio da ABB	15
Figura 1.19 - Simulação de célula robotizada de acabamento de sapatos (Nemec & Zlajpah, 2008).....	16
Figura 1.20 - Célula de acabamento da Aesculap a trabalhar uma prótese ortopédica ..	17
Figura 1.21 - Célula de acabamento da Kuntz Electroplating Inc.....	18
Figura 1.22 - Esquema da célula de acabamento Flex Finishing Cell da ABB (http://www.abb.com/cawp/seitp202/df84fb365192587a482573b00025d109.aspx).....	21
 Figura 2.1 - Robô Industrial IRB 2400 da ABB.....	 26
 Figura 3.1- Torneira de bidé, colecção "Elena" – JGS (http://www.jgstorneiras.com/site/detalhe.php?ref=387)	 27
Figura 3.2 - Corpo da torneira	28

Figura 3.3 - Manípulo da torneira.....	28
Figura 3.4 - Face inferior do corpo da torneira pela qual é realizada a fixação no robô	30
Figura 3.5 - Vista explodida do sistema de fixação do corpo da torneira (Autodesk Inventor 2010)	30
Figura 3.6 - Face inferior do manípulo.....	31
Figura 3.7 - Vista explodida do sistema de fixação do manípulo da torneira (Autodesk Inventor 2010)	31
Figura 3.8 - Modelo 3D do corpo da torneira (Rhinoceros).....	32
Figura 3.9 - Processo de calibração da câmara (DAVID Laserscanner - Starter-Kit DL-SET01).....	33
Figura 3.10 - Esquema da estação de trabalho (DAVID Laserscanner - Starter-Kit DL-SET01).....	34
Figura 3.11 - Estação de trabalho no LOME.....	34
Figura 3.12 – Imagem recolhida pela webcam para uma face da torneira	35
Figura 3.13 - Imagem recolhida pela webcam para uma face da torneira, após rotação da anterior da fig.3.12.....	35
Figura 3.14 - Duas faces do corpo da torneira.....	35
Figura 3.15 - Fusão de duas faces do corpo da torneira	35
Figura 3.16 - Imagem obtida pela fusão de duas faces do corpo da torneira	36
Figura 3.17 - Modelo final obtido pelo DAVID Laserscanner do corpo da torneira	36
Figura 3.18 - Modelo final obtido pelo DAVID Laserscanner do manípulo da torneira	36
Figura 3.19 - Modelo 3D do corpo da torneira.....	37
Figura 3.20 - Modelo 3D do manípulo da torneira.....	37
Figura 3.21 - Célula de lixagem da Mepsa, Lda (http://www.mepsa.es/acabado_de_superficies.php?idioma=l1&aplicacion=1&proceso=1).....	39
Figura 3.22 - Célula de lixagem da Pulimetal Cittadini (http://www.pulimetal.it/en/robotic-cells.html).....	40
Figura 3.23 - Lixadeira LB 50 da NS Máquinas Industriais, Lda.	41
Figura 4.1 - Ambiente de trabalho do RobotStudio da ABB.....	44
Figura 4.2 - Consola real vs Consola virtual da ABB	45
Figura 4.3 - Esquema demonstrativo do FC Pressure da ABB	46
Figura 4.4 - FC SpeedChange da ABB	47
Figura 4.5 - Layout da célula virtual no RobotStudio	48
Figura 4.6 - Definição dos parâmetros do controlador virtual - controlo de força.....	49
Figura 4.7 - Modelo simplificado da máquina lixadeira	50
Figura 4.8 - Seleção de face.....	51
Figura 4.9 - Modelo da torneira e respectivo sistema de fixação	51
Figura 4.10 - Modelo do manípulo e respectivo sistema de fixação	52
Figura 4.11 - Tool Center Point (TCP) de uma tocha de soldadura	53
Figura 4.12 - Diferentes Tool frames introduzidos no modelo da lixa.....	54
Figura 4.13 - Sistemas de coordenadas	54

Figura 4.14 - Esquema do método de programação do Machining PowerPac.....	55
Figura 4.15 - Definição da solução de maquinagem	56
Figura 4.16 - Definição/Criação das superfícies a trabalhar	56
Figura 4.17 - Definição dos parâmetros de maquinagem.....	57
Figura 4.18 - Definição dos parâmetros de controlo de força	57
Figura 4.19 - Escolha da ferramenta e do Workobject	58
Figura 4.20 - Definição do modo de geração das trajectórias	58
Figura 4.21 - Definição da orientação dos pontos da trajectória	59
Figura 4.22 - Pré-visualização da trajectória gerada	59
Figura 4.23 - Trajectória gerada automaticamente (a vermelho)	60
Figura 4.24 - Visualização dos pontos da trajectória (Path View)	60
Figura 4.25- Diferentes configurações dos eixos para o mesmo ponto de trabalho.....	61
Figura 4.26 - Janela de selecção da configuração pretendida para os eixos do robô	62
Figura 4.27 - Diferentes configurações para o mesmo ponto de trabalho	63
Figura 4.28 - Imagens da simulação	64
Figura 4.29 - Alguns detalhes da linguagem RAPID	65

Figura 5.1- Célula robótica do Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica.....	70
Figura 5.2 - Sistemas de fixação fabricados	70
Figura 5.3 - Processo de calibração da célula (real vs virtual)	71
Figura 5.4 - Estrutura de um ensaio.....	72
Figura 5.5 - Superfície seleccionada no Ensaio 1.....	73
Figura 5.6 - Trajectórias geradas no programa de lixagem com controlo em velocidade e posição	73
Figura 5.7 – Referencial tool0 do robô.....	74
Figura 5.8 - Realização do ensaio 1.....	74
Figura 5.9 - Resultado do ensaio 1 com controlo em velocidade e posição e pormenor I	75
Figura 5.10 - Resultado do ensaio 1 com controlo em velocidade e posição e pormenor II	76
Figura 5.11 - Resultado do ensaio 1 com controlo em velocidade e posição e pormenor III	77
Figura 5.12 - Trajectórias geradas no programa de lixagem com controlo activo de força	78
Figura 5.13 - Robô a realizar procedimento de calibração do sensor de força.....	79
Figura 5.14 - Resultado de ensaio 1 com controlo activo de força e pormenor I.....	80
Figura 5.15 - Resultado de ensaio 1 com controlo activo de força e pormenor II	81
Figura 5.16 - Superfície seleccionada no Ensaio 2.....	83
Figura 5.17 - Trajectórias geradas para o Ensaio 2	83
Figura 5.18 - Resultado do Ensaio 2 com controlo em posição e pormenor	84
Figura 5.19 - Resultado do Ensaio 2 com controlo activo de força, pormenor (em cima) e dano (em baixo)	86

Figura 5.20 - Superfície seleccionada no Ensaio 3.....	88
Figura 5.21 - Trajectórias geradas para o Ensaio 3	88
Figura 5.22 - Resultado do Ensaio 3 com controlo em posição e pormenores.....	89
Figura 5.23 - Resultados do Ensaio 3 com controlo activo de força e pormenores	91

1. Introdução

A evolução industrial teve sempre como base a vontade de produzir mais, melhor e com menores custos. Foi assente nessa filosofia que se introduziu a automação dos processos de produção.

Para qualquer indústria, automação é sinónimo de maior volume de produção, melhor qualidade final e menores custos associados ao produto. No entanto, automatizar não significa só uma melhoria económica mas também progresso noutras áreas como a ambiental, com diminuição de desperdícios e sucata, e também na segurança, proporcionando melhores condições de trabalho.

O desenvolvimento tecnológico permitiu a criação de linhas de produção totalmente automatizadas nas quais é introduzida a matéria-prima e sai o produto quase acabado. Contudo, muitos produtos têm exigências bastantes específicas quanto à sua qualidade superficial, exigências essas que provêm do propósito final da peça. Por vezes tolerâncias dimensionais apertadas e exigências de rugosidade em peças com geometria complexa não permitem a automatização da operação de acabamento pelo que é necessário recorrer a mão-de-obra qualificada para estas tarefas repetitivas e, no entanto, essenciais. Foi então nesse sentido que evoluiu o estudo da automação em linhas de produção com a integração de robôs industriais em operações de acabamento como a rebarbagem, lixagem, acabamento de cordões de solda e polimento.

Robôs industriais com 6 graus de liberdade foram, então, aplicados em células de acabamento chegando-se à conclusão que a reprodução exacta dos movimentos humanos passaria os custos associados à mão-de-obra qualificada dos operadores para custos com os técnicos de programação devido ao demasiado tempo dispendido na tarefa de programação. Actualmente assiste-se ao desenvolvimento dos sistemas de controlo de força para robôs industriais que permitem que o robô “sinta” o contacto com a peça adaptando-se a diferentes geometrias e condições de trabalho. Evolui-se, pois, no sentido de “ensinar” os robôs industriais a serem mais humanos.

As operações de acabamento superficial constituem a última fase de uma inteira linha de produção e lidam com componentes com valor comercial. As exigências em relação ao rigor e à complexidade da operação são bastante elevadas quando comparadas a outras fases do sistema de produção. É devido a tais factores que, desde o início do séc. XX, as técnicas de acabamento modernas são normalmente executadas manualmente aumentando consideravelmente os custos de produção e criando um “bottleneck” na linha de produção por limitarem o volume de peças manufacturadas. Actualmente, estas operações finais são responsáveis por cerca de 10 a 30% do custo final da peça (Pagilla & Yu, 2001). Estes custos estão associados à operação em si, inspecção, possível necessidade de voltar a maquinar e por vezes rejeição das peças.

As operações de acabamento consideradas neste capítulo são: rebarbagem, lixagem e polimento. Estas três operações de abrasão diferem entre si na taxa de remoção de material, qualidade de acabamento superficial e, conseqüentemente, nas forças envolvidas em cada processo e ferramentas a utilizar. Em comum têm o facto de serem operações repetitivas, poeirentas e, por vezes, com libertação de gases tóxicos estando, portanto, na causa de diversas doenças profissionais.

1.1. Rebarbagem

A rebarbagem é uma operação de acabamento de aplicação fulcral em qualquer peça que tenha sido alvo de um processo de fundição, conformação plástica ou maquinagem. Após o processo de produção é natural encontrar irregularidades em arestas ou apenas protuberâncias superficiais que necessitam de ser removidas. Existem diversos meios para rebarbar uma peça: meios mecânicos, químicos e térmicos. Neste trabalho apenas será focado o modo mecânico de rebarbar (figura 1.1).

A operação de rebarbagem mecânica trata de eliminar defeitos através da passagem de uma ferramenta abrasiva constituída por partículas de material de elevada dureza contido numa matriz de um material ligante. Os diferentes parâmetros de que depende o resultado final desta operação são os seguintes:

- Tipo de ferramenta;
- Tipo e tamanho das partículas abrasivas;
- Tipo de matriz ligante;

- Velocidade da ferramenta;
- Pressão de aplicação da ferramenta na peça;
- Velocidade relativa entre a peça e a ferramenta.



Figura 1.1- Robô industrial a realizar operação de rebarbagem (Bogue, 2009)

A rebarbagem é uma operação que confere qualidade superficial, funcionalidade e qualidade estética a uma peça, sendo também importante em termos de segurança no manuseamento ao eliminar irregularidades.

1.2. Lixagem

Este método situa-se entre a rebarbagem e o polimento quanto à taxa de remoção de material: trabalha superfícies menos irregulares que a rebarbagem sem, no entanto, conseguir o acabamento superficial do polimento.

Em aplicações robotizadas, o método de lixagem mais relevante é a lixagem de cinta (figura 1.2). Neste modo existem variantes que diferem entre si no modo de ataque da ferramenta na peça e na utilização de um processo molhado (com recurso a lubrificantes) ou seco. Na figura 1.3 encontram-se esquematizados alguns desses métodos.



Figura 1.2 - Robô industrial a realizar operação de lixagem
(www.robotmatrix.org)

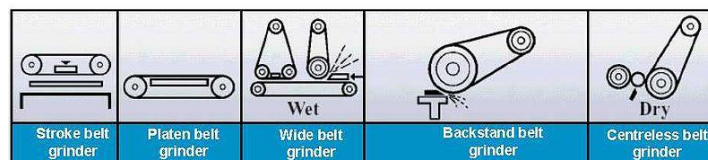


Figura 1.3 - Esquema de diferentes métodos de lixagem
(www.wikipedia.org)

Na operação de lixagem o resultado final depende das seguintes variáveis:

- Propriedades do material a trabalhar;
- Propriedades do material abrasivo e ligante;
- Velocidade da cinta;
- Sequência dos movimentos;
- Local de contacto da cinta com a peça (cinta mais rígida na proximidade do seu apoio);
- Força exercida sobre a peça;
- Tipo de lubrificação utilizada.

1.3. Polimento

A operação de polimento é normalmente a última operação mecânica de acabamento superficial aplicada a uma peça. Este processo é utilizado para eliminar pequenos entalhes e riscos conferindo às superfícies trabalhadas um aspecto brilhante e por vezes espelhado.

Como o polimento é uma operação suave com o objectivo de não alterar a geometria final da peça, as ferramentas utilizadas são compostas por materiais macios que se adaptam às formas a trabalhar. Os principais constituintes dos discos de polimento (figura 1.4) são algodões, couro ou fibras sintéticas que podem operar em conjunto com massas lubrificantes de polimento. A evolução neste ramo tecnológico permitiu a produção de discos de polimento que trabalham a seco com boas propriedades de dissipação de calor. São, pois, discos desse tipo que são utilizados em operações de polimento robotizadas (figura 1.5).



Figura 1.4 - Disco de polimento

Comparando com as outras operações de acabamento, no polimento o material desbastado é bastante menor em quantidade pelo que as forças envolvidas são bastante menores. No entanto, o polimento não tem só por objectivo questões estéticas mas também serve para remover e prevenir a oxidação do material, aumentando o tempo de vida da peça, bem como também é utilizado para preparação de materiais para análise microscópica.

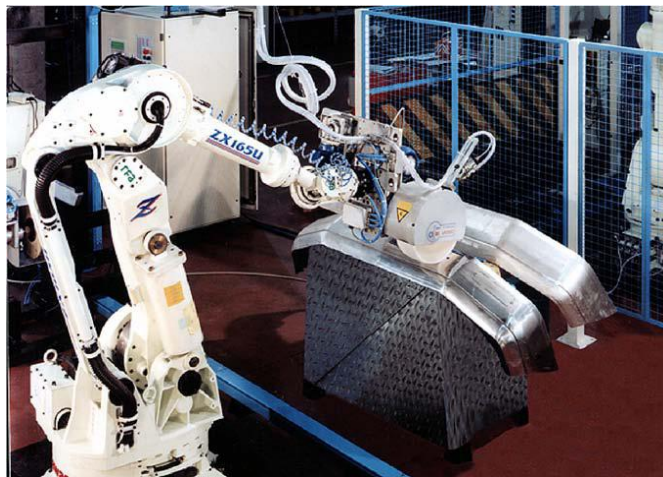


Figura 1.5 - Robô industrial a realizar polimento de pára-choques (Bogue, 2009)

1.4. Introdução dos robôs industriais

Nos anos 50 iniciou-se o processo de automatização das operações de acabamento. Máquinas simples e dedicadas a uma só operação foram implementadas sem grandes resultados práticos: qualquer alteração na peça a produzir implicava enormes custos na alteração da máquina. Foi então, mais tarde, com o surgimento da tecnologia CNC que se conseguiram alcançar alguns resultados para peças com geometrias simples.

As máquinas CNC (figura 1.6) apresentam elevada rigidez permitindo grandes forças de contacto e tolerâncias mais apertadas. A alteração geométrica da peça a trabalhar não é um problema necessitando-se apenas de mudar o dispositivo de aperto e de carregar um novo programa para a memória do controlador. No entanto, com apenas 5 graus de liberdade e normalmente dedicadas a uma só operação, as máquinas CNC apresentam restrições de acesso para algumas geometrias e baixa flexibilidade operacional. Assim sendo, a utilização destas máquinas ficou-se por grandes lotes de peças com geometria simples continuando-se a utilizar mão-de-obra humana e qualificada em peças de maior complexidade geométrica (Miekstyn, 2002).

Com a evolução tecnológica, evoluíram também os requisitos de qualidade das peças produzidas e os prazos de entregas das mesmas: o mercado passou a exigir tolerâncias apertadas em prazos de entrega mais curtos, algo que não é possível obter com uma linha de produção dependente de uma operação final realizada manualmente.



Figura 1.6 - Exemplo de máquina CNC utilizada em polimento

Foi sobre tais exigências que se introduziram os robôs industriais em células de operações de acabamento. A decisão impôs um compromisso entre a flexibilidade humana e o volume de produção do CNC. No entanto, com base em testemunhos de diversas empresas que utilizaram a robótica nesta situação, as vantagens sobrepõem-se às desvantagens.

1.5. Vantagens da utilização de robôs industriais

A gradual introdução de células robotizadas em aplicações de acabamento superficial permitiu às diferentes empresas testemunhar as diversas vantagens dessa mesma mudança.

No que diz respeito aos aspectos económicos, a aplicação dos robôs em operações de acabamento possibilita a redução óbvia de custos com mão-de-obra mas também dá origem a uma melhor utilização de ferramentas e outros consumíveis, com redução dos custos associados. A rapidez com que o robô executa as tarefas designadas possibilita a redução dos tempos de produção e, no caso de se encontrarem inseridos numa linha de produção, a redução de “bottlenecks”. Em comparação com outras máquinas dedicadas ou com operários especializados, a célula robotizada representa um investimento com um bom rácio preço/performance.

A qualidade final do processo de acabamento também sai melhorada quando a operação é realizada por um robô uma vez que este permite elevada repetibilidade associada a uma boa precisão de movimentos. O facto de um robô industrial poder possuir seis graus de liberdade numa configuração antropomórfica garante um melhor acesso a peça podendo-se lidar com peças de elevada complexidade geométrica. Os sistemas de mudança rápida de ferramenta permitem dotar os robôs de uma grande flexibilidade operacional podendo, assim, ser programados para executar diversas operações.

Utilizar robôs industriais para a execução de operações de acabamento possibilita aliviar operadores humanos de trabalhos repetitivos, poeirentos e, por vezes, com a libertação de gases tóxicos, evitando assim lesões e doenças profissionais.

1.6. Sectores industriais

Devido às evidentes vantagens, são várias as indústrias que recorrem com sucesso a células de acabamento robotizadas (Bogue, 2009):

- Médica: implantes (figura 1.7);
- Aeroespacial: pás de turbinas (figura 1.8), câmaras de combustão, fuselagem;
- Cutelaria;
- Canalização;
- Sanitária;
- Indústria marítima: hélices;
- Automóvel: blocos de motores, elementos da carroçaria (pára-choques, tejadilho), jantes;



Figura 1.7 - Prótese da anca com acabamento superficial de grande qualidade obtido numa célula robotizada (Bogue, 2009)

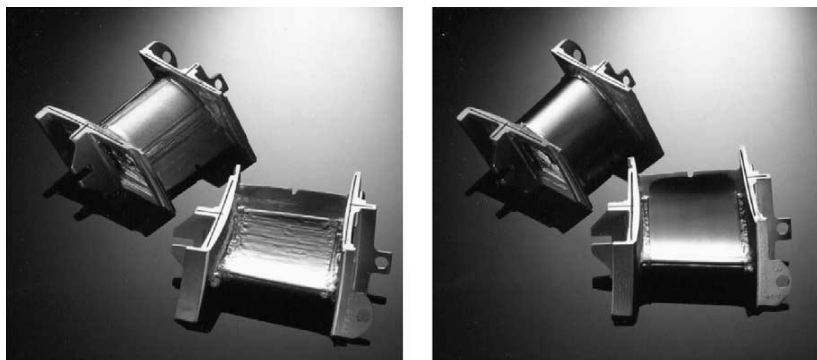


Figura 1.8 - Pás de turbinas de avião antes (esq.) e depois (dir.) da lixagem e polimento em célula robotizada (Huang, Gong, Chen, & Zhou, 2002)

1.7. Controlo de força

A operação de acabamento lida com peças que se encontram terminadas do ponto de vista da sua geometria e que apenas necessitam de um processo de acabamento superficial. Assim sendo, é necessário extremo cuidado com as trajectórias percorridas pela ferramenta e também com a força exercida por essa mesma ferramenta na peça, de modo a que esta não seja danificada. Podem então destacar-se dois aspectos fulcrais das operações de acabamento robotizadas:

- Controlo da força de contacto;
- Geração óptima das trajectórias da ferramenta.

Rapidamente foi compreendido pelos engenheiros que, para que o robô executasse as tarefas a que se propunha, com a mesma qualidade que um operador, o esforço computacional exigido e o tempo dispendido na programação seriam demasiado elevados para que o investimento na automatização dos processos tivesse um retorno imediato. Seria pois necessário dotar os robôs de alguma ferramenta que os fizesse “compreender” o mais rapidamente possível aquilo que lhes fosse pedido.

O controlo de força foi inicialmente aplicado em robôs utilizados em linhas de montagem automóvel provocando uma redução do ciclo de montagem de cerca de 75% do tempo (Fixell et al., 2007).

No que diz respeito às operações de acabamento, várias são as razões que justificam a utilização de controlo de força (MotomanRobotics, 2001):

- O dispositivo de aperto das peças não tem precisão suficiente podendo haver desvios importantes. Para robôs controlados em posição e velocidade estas incertezas podem resultar no dano da peça e da ferramenta;
- De modo a compensar o posicionamento impreciso da peça, normalmente é incluído um servomotor extra, adicionando custos extra na produção;
- De modo a evitar alguns destes problemas o robô é programado para velocidades mais baixas, baixando o ritmo de produção.

A integração do controlo de força habilita o robô com a capacidade de “sentir” obstáculos na sua trajectória podendo ajustar automaticamente a sua velocidade e a

velocidade da ferramenta para diferentes quantidades de material a remover. Este tipo de controlo garante, também, um contacto permanente, de intensidade constante e com a direcção adequada, com a vantagem adicional de compensar o desgaste da ferramenta. Tal faz com que não seja necessário um esforço tão grande na programação das trajectórias uma vez que a malha fechada de controlo de força garante o contacto contínuo da ferramenta com a peça. Com tudo isto, o controlo de força provoca a redução dos ciclos de trabalho em cerca de 20% e a dilatação do tempo de vida da ferramenta até 20% (Fixell et al., 2007).

1.7.1. Controlo passivo vs controlo activo da força

Existem dois tipos de controlo de força: o controlo passivo e o controlo activo.

No controlo de força passivo a força de contacto não é realmente medida e a trajectória programada pode não ser cumprida devido às forças de contacto sobre a ferramenta. Uma vez que não existe feedback para o controlador (controlo em malha aberta) não há também uma adaptação online da trajectória em resposta às alterações das condições de trabalho, tentando, apenas, impor-se um limite máximo à força de contacto. No entanto, o controlo passivo apresenta-se como sendo um sistema simples, barato e com bom tempo de resposta.

Já o controlo activo apresenta uma maior flexibilidade que o controlo passivo, realizando um controlo em malha fechada das forças de contacto. Assim, ao haver alguma alteração de forças o controlador recalcula a trajectória bem como a velocidade do robô e ferramenta. Apesar de ser um sistema mais dispendioso, o controlo de força activo apresenta-se como sendo mais adequado para aplicação em operações de acabamento.

De seguida apresentam-se três exemplos comerciais de sistemas de controlo de força usados em robôs industriais.

Sistema de controlo de força integrado no controlador do robô

O transdutor de força aplicado pela ABB nos seus robôs é fornecido pela ATI e é utilizado para controlo de força activo (figura 1.9).



Figura 1.9 - Transdutor de forças ATI F/T Delta IP60
(http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_productDesc.aspx)

Este tipo de transdutor tem uma estrutura robusta, constituída por peças de aço tratado obtidas por maquinagem, sendo, então, ideal para a medição das 6 componentes de força presentes em aplicações robotizadas, como se pode ver na figura 1.10. A sua robustez permite resultados com baixa histerese e boa repetibilidade.

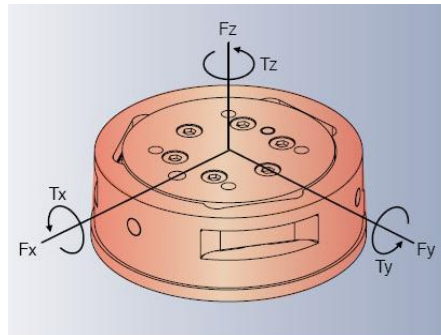


Figura 1.10 - Esquema das forças e momentos a que o transdutor se encontra sujeito
(http://motionsystemdesign.com/mag/forcetorque_sensors)

Na escolha de um transdutor de força é necessário ter em consideração diversos factores:

- Momento máximo que o transdutor é capaz de medir (é necessário especial cuidado pois o momento gerado no transdutor resulta da multiplicação das forças aplicadas na ferramenta pela distância entre a origem do transdutor e o extremo da ferramenta);
- Capacidade máxima de medição do transdutor tendo em conta as componentes estáticas e dinâmicas das forças (aceleração e desaceleração do robô);
- Resolução pretendida. Por vezes pode existir conflito entre a resolução requerida pelo programa do robô e a resolução máxima do transdutor;

Actualmente este transdutor é apresentado com a possibilidade de ligação a uma rede local (LAN) de modo a poder ser controlado remotamente (figura 1.11).



Figura 1.11 - Componentes do sistema de ligação do transdutor em rede: Transdutor, cabo e Net Box
(<http://www.ati-ia.com/Company/images/ATI-Net-F-T-System.jpg>)

Este sistema da ATI é utilizado completamente integrado nos robôs da ABB. O software de controlo do robô usa a informação do transdutor para actuar directamente nos parâmetros de trajectória e velocidade do próprio robô.

Sistema de controlo de força activo independente do robô – PushCorp Active Compliance Force Device

Um outro sistema de controlo activo de força é fornecido pela PushCorp Inc. (figura 1.12). No entanto, o funcionamento deste sistema é bastante diferente do anterior, uma vez que é baseado num sistema pneumático e só controla força numa só direcção. Essa direcção depende do modo de montagem do aparelho na extremidade do robô.



Figura 1.12 - AFD1100 montado em robô industrial
(<http://pushcorp.com/Products/afd1100.htm>)

Este sistema é independente do robô, realizando um controlo de força em malha fechada apenas na ferramenta. O dispositivo encontra-se directamente ligado ao controlador (figura 1.13) que para além de controlar a alteração da força resultante devida ao contacto da ferramenta com a peça também realiza controlo das forças

dinâmicas resultantes de aceleração e desaceleração. O software de monitorização e controlo deste sistema é uma aplicação Microsoft Windows™.



Figura 1.13 - Controlador FCU1000 da PushCorp Inc.
(<http://pushcorp.com/Products/fcu1000.htm>)

Sistema de controlo de força passivo independente do robô – PushCorp Passive Compliance Force Device

Este dispositivo é tal como o seu nome indica uma unidade de controlo de força passivo e tanto pode ser montado na extremidade livre do robô (figura 1.14) como na mesa de trabalho (figura 1.15).



Figura 1.14 - AFD51 instalado em robô



Figura 1.15 - Banca de lixagem PushCorp SBS81 com dispositivo de controlo de força passivo AFD80 instalado
(<http://pushcorp.com/Products/sbs81.htm>)

Este dispositivo é de accionamento pneumático e o seu princípio de funcionamento baseia-se num cilindro pneumático pressurizado de baixo atrito e com haste em grafite. Assim sendo, este dispositivo apenas consegue fazer o controlo da força numa única direcção, normalmente a direcção perpendicular à trajectória executada pela ferramenta

(figura 1.16). Será então a pressão do ar que alimenta o cilindro a determinar a força de contacto máxima a ser exercida na superfície da peça.



Figura 1.16 - Simulação de robô industrial a executar operação de acabamento com controlo de força passivo
(<http://www.pushcorp.com/Products/afd50.htm>)

1.8. Software de programação

Toda a evolução ligada à utilização de robôs industriais para operações de acabamento impulsionou o desenvolvimento dos softwares de programação desses mesmos robôs.

Como já foi referido, inicialmente a programação de um robô necessitava de um elevado período de tempo dispendido, com o técnico a ter que colocar manualmente o robô em diversos pontos da trajectória de modo a poder gerar o percurso exacto da ferramenta. Esta técnica, denominada “lead-to-teach” (figura 1.17) continua a ser utilizada actualmente, no entanto, os softwares evoluíram no sentido de o tempo dispendido nesta tarefa ser menor e de não ser necessária tanta precisão na colocação manual da ferramenta nos pontos desejados.

Actualmente, com o desenvolvimento do controlo de força, o técnico indica alguns dos pontos do percurso desejado e o software, com essa informação e com a informação da força de contacto desejada, gera um percurso óptimo para a ferramenta.



Figura 1.17 - Operador a utilizar a técnica "lead-to-teach"
(<http://www.abb.com/cawp/seitp202/df84fb365192587a482573b00025d109.aspx>)

Os softwares foram progredindo no sentido de se tornarem “user friendly”, podendo o operador ser capaz de alterar parâmetros do processo sem ter de ser um perito em programação. O utilizador consegue operar a célula robotizada por via da visualização de menus e de mensagens de erro sem nunca ter de escrever uma única linha de código e sem ter de conhecer detalhadamente a linguagem de programação nativa do robô. Pode ver-se na figura 1.18 um menu da consola de programação virtual do software de programação off-line da ABB.

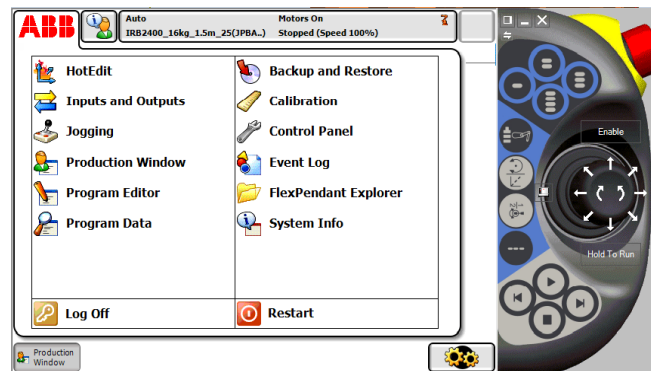


Figura 1.18 – Consola virtual disponível no software RobotStudio da ABB

Um outro grande passo no desenvolvimento deste tipo de software foi a introdução da simulação na programação das trajectórias da ferramenta.

Softwares de simulação (figura 1.19) que eram já utilizados em aplicações robotizadas com o objectivo de determinar o alcance máximo, design de ferramentas e tempos de ciclo foram também adaptados com sucesso à simulação de operações de acabamento.

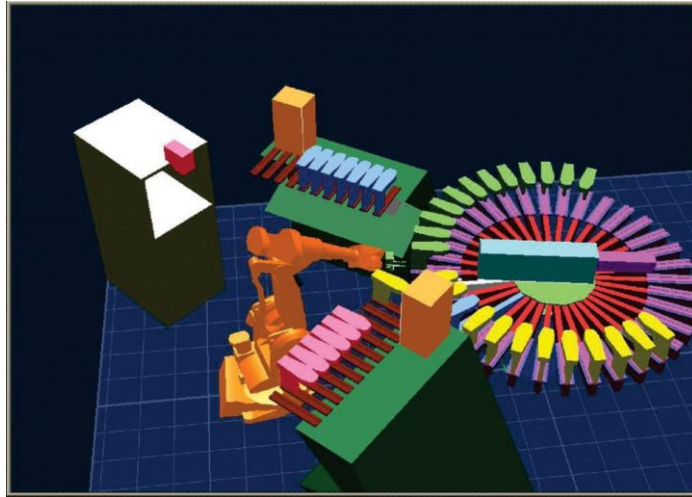


Figura 1.19 - Simulação de célula robotizada de acabamento de sapatos (Nemec & Zlajpah, 2008)

Este tipo de programação – off-line – permite reduzir bastante o tempo necessário para tornar o robô operacional para determinada tarefa, assim como permite aumentar a produtividade de uma célula robotizada uma vez que enquanto está a ser gerado um novo programa o robô encontra-se operacional e a produzir.

Dados da ABB® reportam que a programação off-line permite colocar a célula operacional em cerca de 20% do tempo necessário para programar online essa mesma célula. Extrapolando para o volume de produção, a programação off-line permite aumentar em 80% a produção de uma célula robotizada (Fixell et al., 2007).

1.9. Soluções Existentes

De seguida apresentam-se várias soluções de células robotizadas de diferentes sectores industriais, aplicadas em operações de acabamento e com diferentes tipos de controlo.

1.9.1. Aesculap

Empresa: Aesculap da B. Braun Melsungen AG

Sector: Próteses médicas

Principal produto: Prótese da anca

Operação: Polimento e lixagem

Controlo: em posição e velocidade do robô

Esta solução é constituída por dois robôs KR 30 HA da KUKA® cada um com um controlador, com interface Windows®, do mesmo fabricante. A prensão da peça é realizada por uma garra pneumática projectada especialmente para este tipo de peças. A célula contém estações de lixagem e polimento bem como outras de lavagem e limpeza das peças. Estas, quando finalizadas, são extraídas por um sistema de paletização (figura 1.20).



Figura 1.20 - Célula de acabamento da Aesculap a trabalhar uma prótese ortopédica

Uma vez que a introdução destas células robotizadas constituiu uma novidade na empresa em questão, foi necessário para o seu pessoal adquirir competências nas mais diversas áreas:

- Programação do robô;
- Interacção entre os robôs e o equipamento de lixagem e polimento;
- Instalações de segurança;
- Integração da célula na linha de produção;
- Formação de operadores do cliente.

Os resultados finais da introdução dos robôs nas operações de acabamento das próteses médicas reportados pela empresa vão de encontro às vantagens anunciadas. Obteve-se então melhor qualidade superficial das peças com elevada precisão e repetibilidade. Observou-se pois uma maior flexibilidade geométrica com diminuição dos tempos de produção, constituindo um aumento da eficiência destas operações.

1.9.2. Kuntz Electroplating Inc.

Empresa: Kuntz Electroplating Inc.

Sector: Automóvel

Principal Produto: Jantes para motos e automóveis

Operação: Polimento

Controlo: em força activo, na ferramenta (adaptando a velocidade e trajectória de acordo com a informação da força de contacto).

Esta solução apresentada pela Kuntz Electroplating Inc. é constituída por um robô 20 M-710i da FANUC® equipado com uma ferramenta com controlo activo de força da PushCorp Inc.. O dispositivo de fixação das peças contém dois eixos auxiliares e tem a capacidade para duas peças (uma em trabalho). A célula contém ainda um sistema de medição para robôs RODYM-6D da Krypton Electronic Engineering e um software de programação off-line desenvolvido pela Kuntz Logic Systems Inc., empresa criada aquando do desenvolvimento desta mesma célula (figura 1.21).



Figura 1.21 - Célula de acabamento da Kuntz Electroplating Inc.

Principais considerações:

- O eixo da ferramenta deve ser sempre perpendicular à superfície para que a força exercida seja aplicada na direcção correcta durante toda a trajectória;
- As velocidades linear e de rotação da ferramenta e as forças de contacto entre a superfície e a ferramenta são controladas constantemente, variando de acordo com a geometria local da peça;
- Aceleração e desaceleração são controladas constante e cuidadosamente
- Os pontos de contacto inicial e final devem ser alvo de especial cuidado de modo a evitar descontinuidades;
- Deve existir controlo do desgaste da ferramenta.

Resultados reportados pela empresa:

- Qualidade superficial mais uniforme e de igual qualidade à conseguida por um operador de polimento altamente qualificado;
- O software desenvolvido permite a geração de trajectórias com movimentos mais suaves melhorando a qualidade final da operação;
- Software de geração de trajectórias off-line permite reduzir o tempo de produção em relação à técnica de movimentação manual do robô (“lead-to-teach”). Redução de 10 semanas para 2 semanas;
- Um operador tem capacidade para operar cerca de 16 células de polimento em simultâneo.

1.9.3. Franke Sissons

Empresa: Franke Sissons

Sector: Sanitário

Principal produto: Acessórios sanitários em aço inoxidável

Operação: Polimento

Controlo: em posição e velocidade do robô

A célula robotizada desenvolvida para esta empresa é constituída por dois robôs UP-130 da Motoman®, uma mesa rotativa e outra fixa e uma torreta com 24 ferramentas para os robôs. A alimentação da célula é realizada por duas estações bem com a saída das peças que pode ser feita por duas vias.

Sequência de funcionamento da célula:

- Robô 1, equipado com uma garra de ventosas, coloca uma sanita, proveniente da estação de alimentação 1, na mesa rotativa para que o robô 2 a possa polir numa operação com a duração de 18 minutos;
- Robô 1 pega entretanto num lavatório, proveniente da estação de alimentação 2, colocando-o na mesa fixa. Automaticamente, o robô 1 muda a garra para uma ferramenta abrasiva de polimento e opera na peça durante 2 ciclos de 6 minutos;
- A garra de ventosas é novamente seleccionada e coloca o lavatório na estação de saída 2;
- Entretanto a operação de polimento da sanita termina e o robô 1 retira a peça da mesa rotativa e coloca-a na estação de saída 1.

Resultados reportados pela empresa:

- Redução no tempo de produção (Ex.: a operação de polimento de sanitas durava 70 minutos, demorando agora 18 minutos);
- Elevada consistência na qualidade superficial das peças;
- A possibilidade dos robôs movimentarem peças de grande dimensão reduz a existência de sobreposições durante as passagens da ferramenta;
- Flexibilidade: cerca de 50 produtos diferentes são produzidos na nova célula robotizada;
- Redução nos custos com ferramentas.

1.9.4. ABB®

Como se pode verificar, as marcas ligadas à produção de robôs industriais trabalham em colaboração com as empresas suas clientes de modo a criar soluções personalizadas. Estas soluções são, no entanto, demasiado específicas podendo demorar demasiado

tempo a projectar com custos acrescidos associados. Para combater esta inflexibilidade, foram lançadas no mercado soluções standardizadas produzidas pelas mesmas marcas produtoras dos robôs.

Um exemplo é a célula flexível da ABB® para operações de acabamento (figura 1.22).

Empresa: ABB

Produto: Flex Finishing Cell

Solução:

- Robô IRB 140
- Function Package Force Control Machining
- Armazém de ferramentas com capacidade para 5 ferramentas
- Mesa rotativa manual com duas estações de trabalho
- Graphical User Interface (GUI)
- Human Machine Interface (HMI)

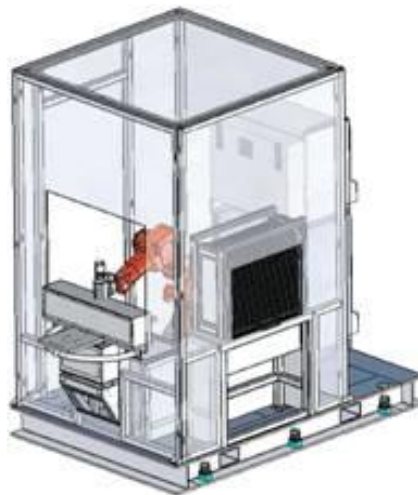


Figura 1.22 - Esquema da célula de acabamento Flex Finishing Cell da ABB
(<http://www.abb.com/cawp/seitp202/df84fb365192587a482573b00025d109.aspx>)

Esta célula standard apresenta como inovação tecnológica o Function Package Force Control Machining. Este pacote de software compreende as funcionalidades necessárias à programação flexível do robô para a execução das operações de acabamento com controlo activo de força. A grande inovação deste sistema consiste na alteração dos

parâmetros de trajectória e/ou velocidade do robô consoante as forças de contacto medidas, diferenciando-se do exemplo da Kuntz Electroplating, Inc. (capítulo 3.9.2) em que o controlo activo da força apenas altera os parâmetros de trajectória e velocidade da ferramenta.

O software é composto por três componentes, cada uma com uma função específica:

- FC Graphical Programming Interface: o operador opera manualmente o robô levando-o a determinados pontos da trajectória necessária para a operação (lead-to-teach). Esses pontos não necessitam de ser totalmente exactos uma vez que este trajecto vai servir apenas de base para a criação de um trajecto final por parte do software
- FC Pressure: este programa garante que o robô seguirá a superfície de acordo com uma trajectória de referência programada anteriormente mantendo uma força constante no contacto da peça com a ferramenta. Assim, a trajectória do robô poderá ter de ser alterada, algo que é realizado automaticamente.
- FC SpeedChange: este componente permite programar o robô de modo a ajustar automaticamente a velocidade de execução de uma dada trajectória em função da força de contacto medida. Assim, em operações de rebarbagem, por exemplo, quando há necessidade de remover mais material, a velocidade do movimentação do robô é reduzida.

As vantagens anunciadas desta célula flexível são as seguintes:

- Facilidade de utilização;
- Rapidez de integração e programação;
- Melhor qualidade do produto final com menor risco de danificar a peça;
- Menores custos com ferramentas devido ao controlo do desgaste das mesmas;
- Maior produtividade com a possibilidade de lidar com eventuais alterações de produtos.

2. Objectivos do trabalho

2.1. Definição do problema

O conhecimento da evolução industrial que levou à introdução dos robôs industriais em operações de acabamento, bem como a contextualização do tema do projecto na realidade tecnológica actual, têm uma importância fulcral na definição dos objectivos deste trabalho de Dissertação.

O tema do trabalho abre portas ao estudo de diversas operações de acabamento bem como a diferentes abordagens, no entanto, foi decidido analisar apenas uma operação e discutir os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos na área da aplicação da robótica industrial nessa mesma operação de acabamento.

Assim sendo a operação de acabamento escolhida para análise foi a lixagem. As outras operações consideradas para estudo foram a rebarbagem e o polimento. Contudo, em relação à rebarbagem, a lixagem envolve forças de contacto bastante inferiores trabalhando a um nível mais superficial com menor remoção de material. É, pois, uma operação mais fácil de realizar no ambiente de laboratorial existente. Também é uma operação na qual o controlo da força exercida na superfície do material é bastante importante no resultado final, enquanto a rebarbagem é mais exigente no cumprimento das trajectórias de posição e velocidade da ferramenta.

Em relação à escolha da lixagem face ao polimento, a opção recaiu sobre a primeira devido ao facto de os resultados finais de uma operação de lixagem serem mais facilmente analisados à vista desarmada do que os do polimento, que necessitariam de análise microscópica. Por outro lado, o controlo activo de força no polimento não se revela tão crítico como na lixagem pois as ferramentas utilizadas para polir têm uma rigidez baixa adaptando-se à forma das peças.

Uma vez definida a operação a estudar, decidiu-se, também, que este trabalho deveria basear-se num sector industrial que recorresse à robótica para realizar a lixagem

de peças. Esta decisão tem naturalmente implicações no tipo de peças, no material e nas estratégias a utilizar na execução do trabalho.

Devido à facilidade de contactar a empresa e à disponibilidade evidenciada pelos seus responsáveis, foi pedida a colaboração à *José Gonçalves dos Santos & Filhos, Lda.* (JGS torneiras - www.jgstorneiras.com). Esta empresa recentemente adquiriu duas células de lixagem da *Mepsa, Lda.* (www.mepsa.es) equipadas com robôs ABB® e controlo passivo de força, implementado na mesa de lixagem.

A definição de todos estes campos viabiliza a estruturação de diferentes abordagens ao tema de modo a que o resultado final do projecto não seja só de interesse académico mas que permita concluir acerca dos recentes avanços tecnológicos na área.

2.2. Abordagem proposta

O levantamento do estado da arte permitiu concluir que existem duas áreas emergentes na utilização de robôs industriais em operações de acabamento: desenvolvimento dos métodos de programação e controlo da força de contacto entre a ferramenta e a peça.

Assim sendo, estão definidas duas abordagens distintas relacionadas com estas duas áreas referidas.

A primeira consistirá em utilizar o software da ABB®, RobotStudio®, para realizar uma simulação de uma célula de lixagem de torneiras. O principal objectivo será utilizar a programação off-line e a simulação para o estudo do ciclo de lixagem de um modelo de torneiras de modo a verificar a sua aplicabilidade enquanto método de programação.

A segunda abordagem será conceber em laboratório uma célula de lixagem que operará alternadamente sobre duas condições de controlo: controlo em posição e velocidade e controlo activo da força de contacto. Sendo o campo do controlo activo de força aquele com mais recente desenvolvimento tecnológico será interessante comparar os resultados finais obtidos pelos dois métodos. A análise de resultados não incidirá apenas sobre a qualidade superficial da peça mas também sobre todo o processo de programação e tempo dispendido no processo.

Assim, os objectivos do presente trabalho são:

- Caracterização das operações de lixagem robotizadas;
- Programação off-line de uma célula robotizada destinada a operações de lixagem.
- Concepção e simulação de uma célula robotizada destinada à lixagem de torneiras com diferentes estratégias de controlo de força.

Os dois últimos pontos adoptam uma abordagem distinta daquilo que é tradicionalmente utilizado na concepção de células robotizadas para lixagem, nomeadamente na JGS®, que privilegia a programação online (lead-to-teach) e o controlo do robô em posição e velocidade.

É importante referir que já existem no mercado sistemas de controlo de força (modo passivo ou activo), no entanto, esses sistemas são sempre exteriores ao robô. Nestes casos o robô é controlado em velocidade e posição sendo o controlo de força realizado numa ferramenta exterior. No caso particular deste projecto, o controlo de força encontra-se integrado com o robô, e todas as trajectórias e velocidades dos diferentes eixos do robô são modificadas de acordo com a força de contacto medida.

Espera-se, pois, que este trabalho contribua para a definição acerca das melhores estratégias para a concepção de uma célula robotizada para operações de acabamento.

2.3. Metodologia proposta e recursos existentes

Como em qualquer outro projecto, é necessário planear com antecipação a metodologia de trabalho de modo a criar as condições necessárias para o cumprimento dos objectivos propostos.

O procedimento nuclear será conceber, programar off-line e simular a célula robotizada de lixagem utilizando o robô disponível no Laboratório de Robótica no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da FEUP. O robô é um IRB 2400 da ABB® (figura 2.1) com uma capacidade máxima de carga de 16Kg na extremidade livre e com um alcance máximo de cerca de 1,5m. O controlador do robô – IRC 5 – tem integrado o sistema da ATI® (www.ati.ia.com) de controlo activo de força com base no

transdutor Força/Momento Delta IP60 (fig. 1.9 - secção 1.7.1.) que se encontra colocado na extremidade livre.

Associada ao robô, encontra-se uma mesa posicionadora IRBP 500 C da ABB® funcionando como sétimo eixo da célula. Esta mesa tem uma capacidade de carga de 500 Kg com uma velocidade máxima de 15 rpm.

No entanto, antes de se programar e utilizar o robô é necessário fazer um levantamento de todos os aspectos de preparação da operação de lixagem das torneiras.



Figura 2.1 - Robô Industrial IRB 2400 da ABB

Foram identificadas três etapas fundamentais de preparação do projecto: o desenvolvimento de um sistema de fixação da torneira, o levantamento de modelos 3D das torneiras para inserir no software de programação do robô e a caracterização da máquina de lixar a utilizar. Estes aspectos são importantes de definir, pois condicionam a programação off-line. Este método de programação contém uma componente gráfica importante pelo que é necessário modelar as geometrias inseridas na célula ou pelo menos conhecer as suas formas geométricas e as suas dimensões.

As duas primeiras etapas referidas estão directamente dependentes da escolha da torneira sobre a qual irão ser realizados os ensaios.

3. Preparação da programação

Neste capítulo é realizada a descrição dos procedimentos de preparação identificados no capítulo anterior.

3.1. Escolha da torneira

Apesar de, no meio industrial, uma solução robotizada para a lixagem de torneiras ter que estar preparada para lidar com uma grande variedade de modelos, para este trabalho foi decidido restringir a programação da célula a um só modelo de torneira. Esta simplificação permite uma maior focalização do projecto na estratégia de controlo do robô podendo ser realizada uma posterior extrapolação de resultados para outros modelos de torneiras.

Uma vez que é pretendido estudar os efeitos do controlo de força na operação de lixagem de torneiras, não foi visto como essencial trabalhar uma peça com geometria muito complexa nem com uma superfície de trabalho muito extensa. Contudo, tem interesse para o desenvolvimento do projecto a lixagem de uma peça com as formas mais comuns de uma torneira. Assim sendo, foi escolhido um dos modelos mais vendidos pela JGS: a torneira monocomando de bidé da colecção “Elena” (figura 3.1).



Figura 3.1- Torneira de bidé, colecção "Elena" – JGS
(<http://www.jgstorneiras.com/site/detalhe.php?ref=387>)

Esta torneira de latão é produzida por fundição em coquilha num processo de baixa pressão. Em relação à sua estrutura exterior é constituída por dois componentes fundamentais: corpo (figura 3.2) e manípulo (figura 3.3). São estes dois componentes que serão o alvo deste trabalho.



Figura 3.2 - Corpo da torneira



Figura 3.3 - Manípulo da torneira

3.2. Estudo e Concepção do sistema de fixação

A recolha de informação acerca de células robotizadas para operações de acabamento, realizada anteriormente, permitiu conhecer algumas das características fundamentais associadas ao posicionamento e manipulação de peças e ferramentas bem como a interacção entre elas.

No que diz respeito a operações robotizadas de lixagem de peças de pequena dimensão, como é o caso das torneiras, a ferramenta é fixa e de grandes dimensões, sendo a peça a trabalhar manipulada pelo robô. Apesar das geometrias algo complexas da torneira, os seis graus de liberdade do robô garantem o acesso total da peça à ferramenta. Como a lixagem de peças metálicas é um processo abrasivo com grande geração de calor, a lixa deve ter um comprimento razoável para promover a dissipação desse calor. Assim sendo e tendo-se definido qual o modelo da torneira a trabalhar, procedeu-se ao estudo da fixação da peça no robô. Para tal foi analisado o processo de prensão utilizado nas células robóticas da JGS®.

O sistema de fixação do corpo da torneira ao robô ABB® da JGS® utiliza pinças pneumáticas desenvolvidas para o efeito. Estas pinças são constituídas por sistemas complexos de modo a obter-se grande repetibilidade no posicionamento das peças bem como uma elevada automatização do processo de alimentação da célula de lixagem. Contudo, para o tipo de trabalho que é pretendido desenvolver, uma pinça com tal nível de complexidade não é de todo necessária. Como apenas se irá realizar um pequeno número de ensaios em laboratório, o sistema de aperto utilizado terá apenas que obedecer a critérios de repetibilidade de posicionamento, tendo, para tal, que ser projectado com o toleranciamento adequado. Foi então projectado um sistema de fixação estático que utiliza um modo de aperto similar ao usado nas pinças da JGS®.

Assim, o sistema de fixação projectado é constituído por cinco peças diferentes: placa de adaptação, espiga de centragem, parafuso, interface para o corpo da torneira e interface para o manípulo.

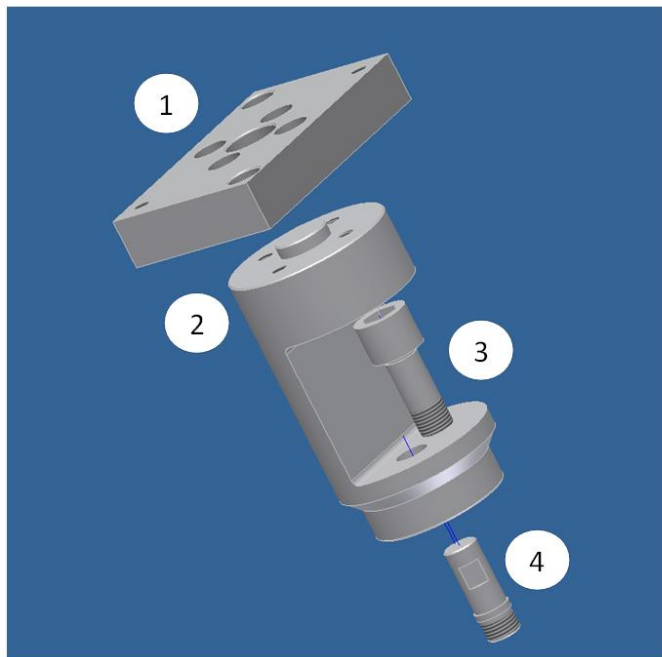
3.2.1. Modo de fixação do corpo da torneira

A placa superior, comum aos dois apertos, tem como função adaptar o sistema de mudança de ferramenta do robô ao sistema de aperto das peças a trabalhar.

O corpo da torneira contém dois furos roscados na sua face inferior (figura 3.4) e é nesses furos que apertam a espiga de centragem e o parafuso. Essa espiga, tal como o parafuso, são introduzidos nos dois furos da face inferior da peça de interface, garantindo o aperto e o posicionamento da peça relativamente ao robô (figura 3.5).



Figura 3.4 - Face inferior do corpo da torneira pela qual é realizada a fixação no robô



Legenda:

- 1- Placa de adaptação
- 2- Interface para corpo da torneira
- 3- Parafuso
- 4- Espiga de centragem

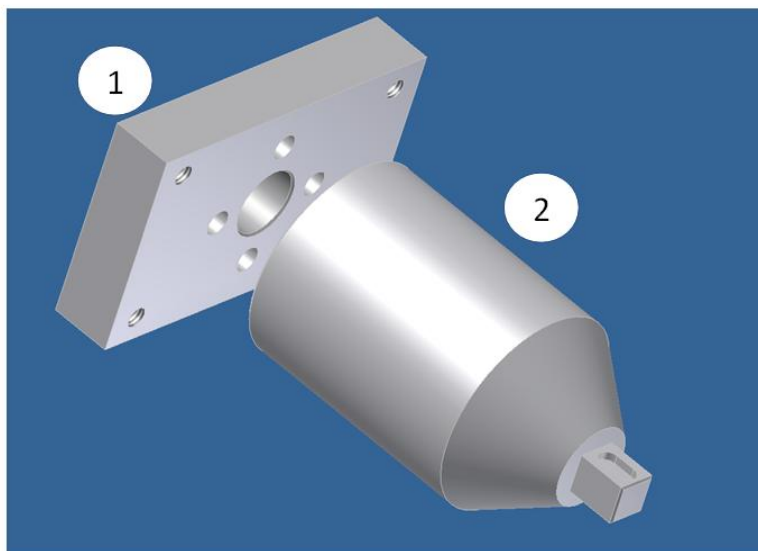
Figura 3.5 - Vista explodida do sistema de fixação do corpo da torneira (Autodesk Inventor 2010)

3.2.2. Modo de fixação do manípulo da torneira

Para a fixação do manípulo é utilizado o furo quadrado existente na sua face inferior (figura 3.6). A forma do furo garante, por si mesma, o posicionamento pretendido, sendo apenas utilizado um pequeno parafuso para garantir o aperto (figura 3.7).



Figura 3.6 - Face inferior do manípulo



Legenda:

- 1- Placa de adaptação
- 2- Interface para manípulo

Figura 3.7 - Vista explodida do sistema de fixação do manípulo da torneira (Autodesk Inventor 2010)

3.3. Levantamento da forma 3D da torneira

Uma vez que é objectivo deste trabalho a utilização da programação off-line do robô, é necessário obter modelos 3D das peças para a definição das trajectórias no RobotStudio®.

Esta questão merece especial atenção uma vez que a JGS não utiliza modelos tridimensionais no projecto das suas torneiras nem desenhos de detalhe das peças. Assim sendo, foi necessário realizar um levantamento 3D com base nas torneiras fornecidas.

Existem diversas estratégias para realizar este tipo de tarefa, no entanto nem todas fornecem o tipo de informação nem o detalhe requerido pelo trabalho proposto.

3.3.1. Rhinoceros®

A primeira tentativa de levantamento 3D das duas peças da torneira foi realizada utilizando o software de modelação Rhinoceros® (www.rhino3d.com). Esta estratégia implicava realizar várias medições das peças e compará-las com as cotas existentes nos desenhos de produção da JGS. Esta tarefa revelou-se bastante ineficiente uma vez que nem todas as formas foram possíveis de determinar por este método, nomeadamente do manípulo. Ainda assim foi possível obter-se um modelo bastante aproximado do corpo da torneira (figura 3.8).

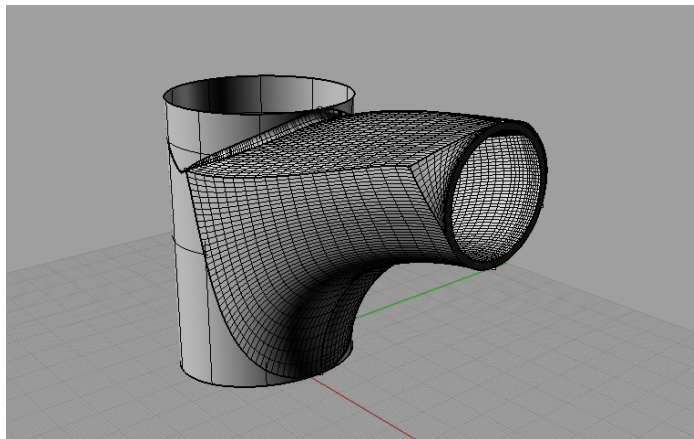


Figura 3.8 - Modelo 3D do corpo da torneira (Rhinoceros)

Foi, contudo, possível concluir sobre as grandes potencialidades deste software para a resolução de questões de geração de formas 3D. Permite a criação de superfícies com

precisão e com relativa facilidade, existindo grande flexibilidade na escolha do formato do ficheiro final. Esta última propriedade é de grande interesse para o software de programação do robô que implica a importação de geometrias criadas em programas de modelação.

3.3.2. DAVID® Laserscanner

A segunda estratégia adoptada para a criação de modelos 3D das peças da torneira implicou a utilização de um equipamento existente no Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da FEUP, bem como a colaboração do staff do laboratório.

O equipamento em causa é um sistema “low cost” de levantamento por laser denominado DAVID® Laserscanner (www.david-laserscanner.com). Este sistema é constituído apenas por uma webcam, um laser de linha, duas placas brancas que delimitam o espaço de trabalho e um software, distribuído gratuitamente, compatível com o sistema operativo Windows®.

O método de utilização deste scanner é bastante simples mas que, sendo um método manual, implica alguma perseverança por parte do utilizador. Inicialmente é necessário montar a estação de trabalho: colocar a webcam num local fixo de modo a que o objecto a trabalhar fique entre a câmara e as placas. Estas devem ser colocadas perfazendo um ângulo de 90° entre elas. As placas contêm uns alvos negros que servem para realizar a calibração da câmara (figura 3.9) e a distância entre alvos determina a escala a introduzir no programa.

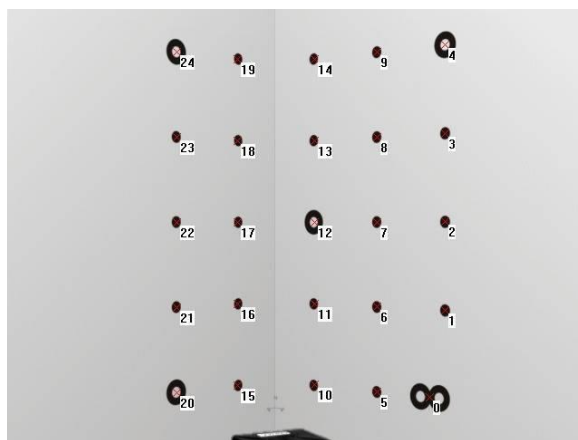


Figura 3.9 - Processo de calibração da câmara (DAVID Laserscanner - Starter-Kit DL-SET01)

Os objectos a trabalhar não devem ser mais escuros que os alvos. A luminosidade na sala de trabalho não deve variar muito durante o processo, caso contrário será necessário voltar a calibrar a câmara.

No final da instalação a estação de trabalho (figura 3.11) deve estar parecida àquela representada na figura 3.10.

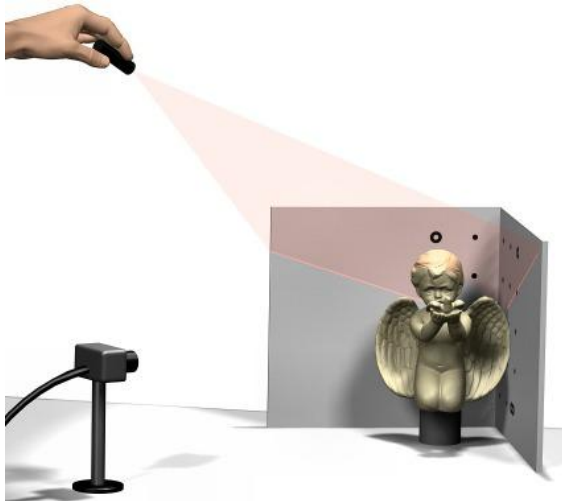


Figura 3.10 - Esquema da estação de trabalho (DAVID Laserscanner - Starter-Kit DL-SET01)

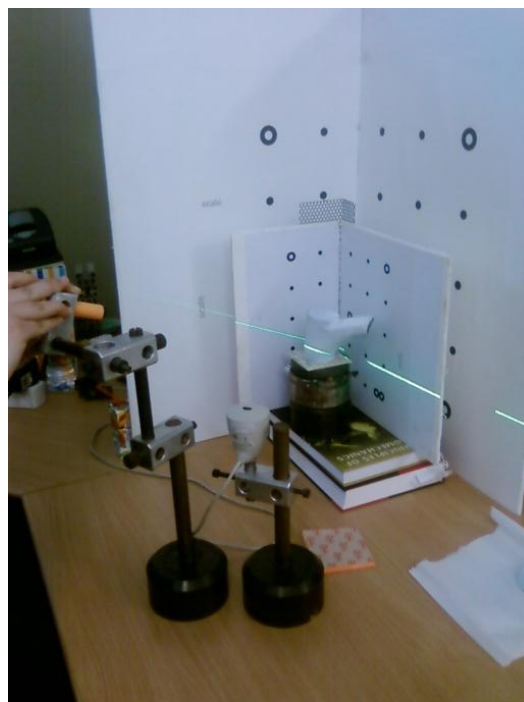


Figura 3.11 - Estação de trabalho no LOME

O procedimento de passagem do laser é semelhante ao de “pintar” a peça com a linha do laser. As passagens devem ser lentas e a distância entre o plano do laser e a câmara, i.e. o ângulo de triangulação deve ser o maior possível para se obter uma maior precisão. Assim, e após uma passagem a face da peça virada para a câmara é representada como na figura 3.12 ou na figura 3.13. As diferentes cores representam as diferentes distâncias dos pontos da peça em relação à câmara.

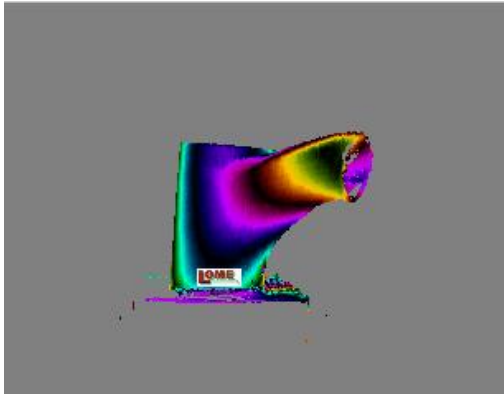


Figura 3.12 – Imagem recolhida pela webcam para uma face da torneira

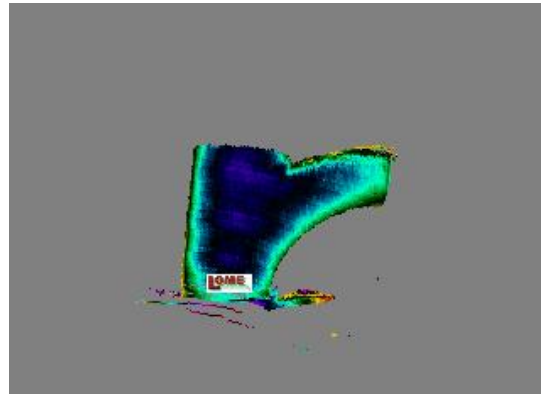


Figura 3.13 - Imagem recolhida pela webcam para uma face da torneira, após rotação da anterior da fig.3.12

Entre cada passagem deve rodar-se um pouco o objecto de modo a que diferentes faces com pontos em comum sejam digitalizadas. Quando a rotação ocorre sobre um eixo conhecido, o software reconhece os pontos em comum das imagens e consegue fundi-las numa só com três dimensões (figura 3.14, figura 3.15 e figura 3.16).

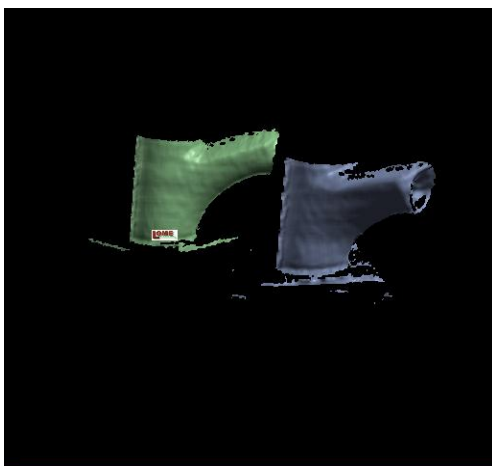


Figura 3.14 - Duas faces do corpo da torneira

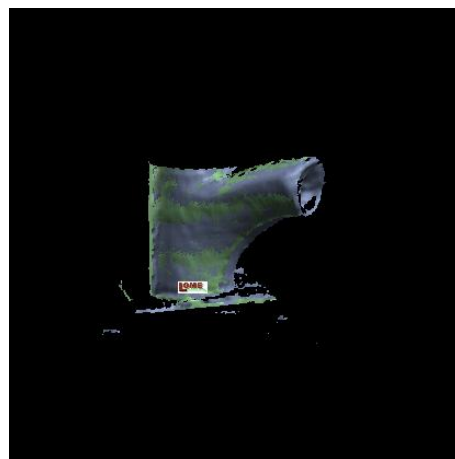


Figura 3.15 - Fusão de duas faces do corpo da torneira



Figura 3.16 - Imagem obtida pela fusão de duas faces do corpo da torneira

As maiores dificuldades deste processo apresentam-se quando é necessário juntar a digitalização de uma face que é obtida através da rotação de vários eixos (uma face superior, por exemplo). Nesse caso, o software não reconhece automaticamente a face pelo que é necessário fazer coincidir manualmente pontos comuns entre a digitalização da face em causa e a digitalização obtida anteriormente. Quanto maior o número de pontos comuns, maior é a probabilidade de se obter uma junção de imagens correcta.

Uma vez que este processo se baseia na incidência de um laser na superfície rugosa de uma peça, as imagens obtidas no final apresentam uma qualidade superficial muito baixa, com uma rugosidade amplificada em relação à peça real (figuras 3.17 e 3.18). Assim sendo, foi necessário tratar a digitalização obtida no programa de modelação SolidWorks® com o objectivo de repor o aspecto uniforme da superfície e também converter o ficheiro para um formato adequado para trabalhar no RobotStudio®.



Figura 3.17 - Modelo final obtido pelo DAVID Laserscanner do corpo da torneira

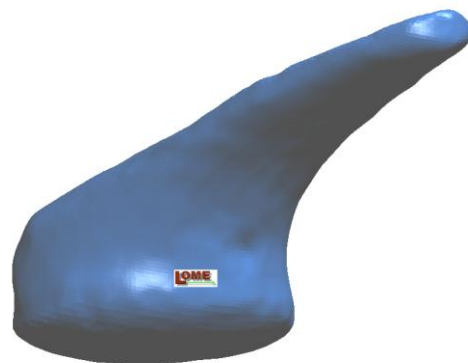


Figura 3.18 - Modelo final obtido pelo DAVID Laserscanner do manípulo da torneira

O procedimento foi realizado para a obtenção das formas 3D digitalizadas do corpo e do manipulador da torneira, obtendo-se finalmente os modelos apresentados nas figuras 3.19 e 3.20

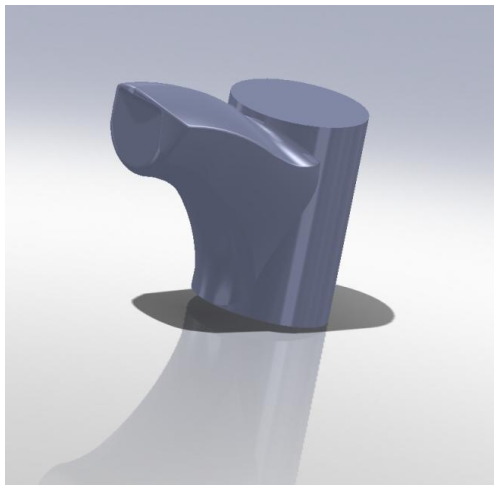


Figura 3.19 - Modelo 3D do corpo da torneira

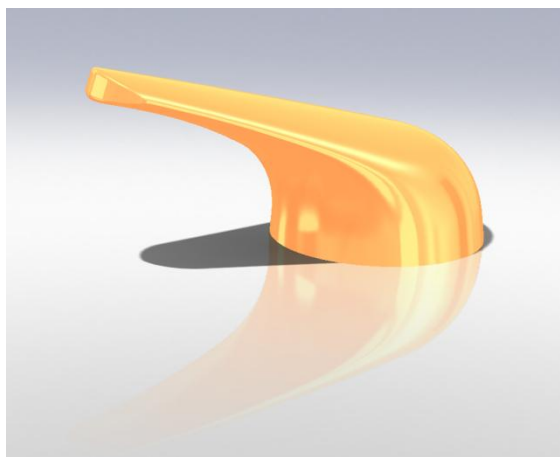


Figura 3.20 - Modelo 3D do manipulador da torneira

Os resultados finais apresentam uma excelente qualidade superficial, tendo em conta a imagem que é obtida pelo varrimento do laser, e também uma boa aproximação dimensional em relação às peças fornecidas pela JGS.

Este sistema apresentou-se pois como uma solução adequada e de baixo custo para a obtenção dos modelos digitalizados das peças. Apesar de ser um processo algo demorado, necessitando de algum trabalho manual preciso e repetitivo, a sua preparação e utilização é simples não sendo exigidos equipamentos auxiliares para a movimentação das peças.

3.4. Máquina Lixadeira

Um dos aspectos mais importantes da simulação e concepção de uma célula robotizada para operações de lixagem é a caracterização da ferramenta a utilizar. Uma vez que a ferramenta tem uma localização fixa, o conhecimento acerca das suas características permite determinar qual será a localização mais correcta relativamente ao robô. Saber qual a geometria da máquina, a orientação da lixa e qual o espaço de trabalho são aspectos fulcrais na programação de qualquer célula robotizada.

3.4.1. Máquinas lixadeiras industriais

As máquinas lixadeiras industriais são máquinas de dimensões médias projectadas para terem robustez e rigidez suficientes para não existir a propagação de vibração durante o funcionamento. Estes são equipamentos que são projectados para trabalhar continuamente, parando apenas para a mudança de lixa quando esta já não se encontra nas condições ideais de funcionamento. As cintas de lixa podem ter um comprimento compreendido entre 2 e 7 metros. Este elevado comprimento tem o objectivo de dissipar o calor gerado durante a abrasão entre os materiais na operação de lixagem, prolongando assim o tempo de vida da ferramenta, proporcionando, simultaneamente, um espaço de trabalho amplo.

As lixadeiras apresentam normalmente três ou mais rolos fixos que funcionam como polias para a lixa, conferindo-lhe o posicionamento e a velocidade adequados. Normalmente existe um rolo móvel que encosta na zona de trabalho da lixa variando a rigidez no contacto com a peça. A existência deste rolo não inviabiliza a utilização dos outros rolos como zonas de contacto sendo que, para tal, devem ser constituídos por materiais adequados. As forças envolvidas no contacto entre a lixa e a peça encontram-se usualmente limitadas ou mesmo controladas por um sistema de accionamento pneumático de controlo de força.

De seguida apresentam-se, como exemplo, as características de máquinas lixadeiras aplicadas em células robotizadas de dois fabricantes diferentes.

Unidade de lixagem da Mepsa, Lda (Espanha)

Este é, como já foi referido, o fabricante das células de lixagem adquiridas pela JGS.

Das principais características das máquinas lixadeiras utilizadas pela Mepsa, Lda nas suas células robotizadas (figura 3.21), a informação disponível é reduzida sabendo-se apenas que possuem:

- Sistema de controlo combinado, em tempo real, da pressão de trabalho, da velocidade tangencial de rotação dos rolos e do desgaste da ferramenta;
- Sistema programável de variação da tensão das cintas de lixa.



Figura 3.21 - Célula de lixagem da Mepsa, Lda
(http://www.mepsa.es/acabado_de_superficies.php?idioma=11&aplicacion=1&proceso=1)

Unidade de Lixagem da Pulimetal Cittadini (Itália)

Este fabricante italiano é dos principais concorrentes da marca anterior, produzindo também soluções robotizadas para acabamento superficial de diferentes tipos de peças.

As informações disponíveis acerca das máquinas de lixar que a Pulimetal Cittadini integra nas suas células robotizadas (figura 3.22) são um pouco mais detalhadas que as da empresa anterior.

As máquinas estão equipadas com motores eléctricos cuja potência varia entre os 4 e os 5,5 kW, estando totalmente comandadas por Controladores Lógicos Programáveis (PLC). O PLC tem a seu cargo o comando do inversor que regula a velocidade da cinta de lixagem, o circuito pneumático de controlo das forças de contacto e do tensionamento da cinta e, também, o sistema eléctrico de centragem da cinta. Estas máquinas incluem também um sistema de segurança para o caso de rompimento da cinta.

As cintas utilizadas nas máquinas de lixar da Pulimetal Cittadini podem ter comprimentos variáveis entre 3,5 e 5 metros.



Figura 3.22 - Célula de lixagem da Pulimetal Cittadini
(<http://www.pulimetal.it/en/robotic-cells.html>)

3.4.2. Máquina lixadeira escolhida

O conhecimento das tecnologias aplicadas actualmente nas lixadeiras industriais, bem como o conhecimento do seu actual custo, permitiu concluir que, no âmbito deste projecto, esse tipo de máquina não é necessária. O número reduzido de ensaios que é previsto realizar aponta para outro tipo de lixadeira de menor capacidade e, consequentemente, de menor custo.

Foi decidido, então, realizar a adaptação de uma lixadeira de bancada à célula robotizada. No entanto, a máquina tem que possuir determinadas características que viabilizem a sua utilização neste tipo de aplicação. Deve existir uma zona de trabalho com espaço suficiente para manobrar a peça, a lixa deve ter zonas com diferente rigidez para diferentes forças de contacto e deve existir pelo menos um rolo de contacto, de material adequado, para se obter rigidez máxima no contacto.

Assim sendo, após alguma pesquisa e obedecendo aos requisitos enunciados, foi escolhida a máquina lixadeira LB 50 (figura 3.23) da NS Máquinas Industriais, Lda. (www.nsmaquinas.pt). Este pequeno equipamento industrial de bancada surge, então, como ideal para este tipo de aplicação, com a potência suficiente e as dimensões adequadas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Características da LB 50

Motor de accionamento	0,75 kw
Velocidade de rotação do motor	2770 rpm
Dimensões da lixa	1750x50 mm
Dimensões da máquina (CxLxA)	760x340x370 mm
Peso aproximado	35 Kg



Figura 3.23 - Lixadeira LB 50 da NS Máquinas Industriais, Lda.

4. Concepção, Programação e Simulação de uma Célula Robotizada para Lixagem

Uma vez concluídas as tarefas de preparação da simulação é necessário aprofundar o conhecimento do software de programação do robô.

Como foi definido nos objectivos do trabalho, será realizada a programação off-line do robô IRB 2400 da ABB® existente no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Assim sendo, o software a utilizar será aquele fornecido pelo próprio fabricante do robô: o RobotStudio®.

Numa primeira abordagem, a programação será realizada tendo por base o robô controlado em velocidade e posição. Posteriormente, será introduzido o controlo activo da força de contacto entre a peça e a ferramenta.

Neste capítulo será feita uma apresentação do software bem como de alguns dos seus recursos e ferramentas. Será também realizada a descrição do processo de construção da simulação.

4.1. RobotStudio®

O software da ABB®, RobotStudio®, permite a criação de um ambiente virtual semelhante às células robotizadas reais (figura 4.1), disponibilizando, para tal, bibliotecas com modelos de equipamentos tais como robôs, mesas posicionadoras, conveyors, ferramentas e eixos lineares. A sua compatibilidade com outros programas de CAD, garante também a possibilidade de importar ficheiros, em formato compatível, com outros elementos necessários à simulação modelados noutros softwares.

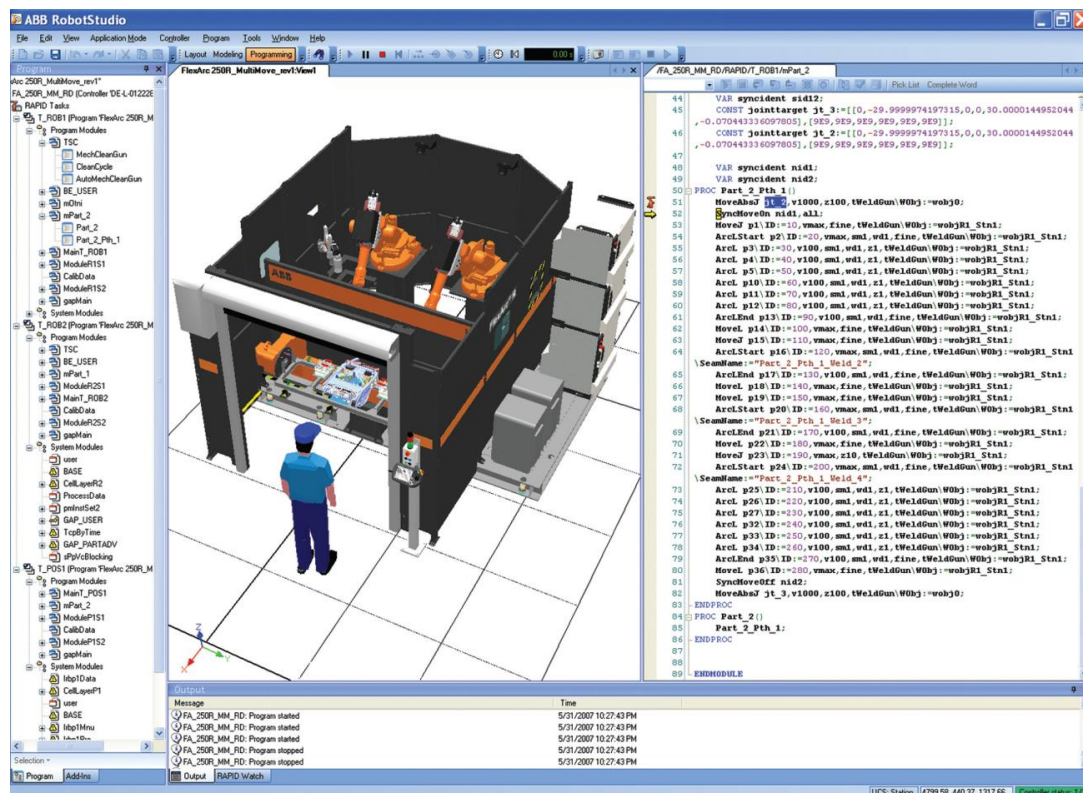


Figura 4.1 - Ambiente de trabalho do RobotStudio da ABB

A grande particularidade do RobotStudio® consiste no facto de incorporar modelos virtuais dos controladores dos robôs reais. Tal propriedade permite ao software realizar a verificação da aplicabilidade do programa gerado, numa célula real. O controlador virtual realiza cálculos de cinemática inversa, garantindo de certo modo, que se a simulação funcionar o programa gerado também irá funcionar na aplicação real. Este facto está também dependente do grau de reprodutibilidade da célula real para a virtual. O processo de correcção dos parâmetros do programa de acordo com as características do sistema real é denominado por calibração.

Uma outra particularidade deste software da ABB® consiste no facto de incluir um modelo virtual da consola de programação do robô (figura 4.2) permitindo ao utilizador programar a sua simulação de um modo semelhante àquele que utilizaria na programação online, tornando a prática de programação virtual e off-line bastante realista.



Figura 4.2 - Consola real vs Consola virtual da ABB

A passagem do programa criado no software para o controlador real pode ser realizada de um modo quase instantâneo através de uma ligação Ethernet entre o computador e o controlador, ou mesmo transportando os ficheiros num dispositivo de armazenamento USB. Isto é possível uma vez que o software converte automaticamente as instruções contidas na simulação para um programa apropriado com a linguagem própria do controlador.

É possível sintetizar nos seguintes pontos algumas das características do RobotStudio® da ABB®:

- Verificação de alcance do robô;
- Importação de ficheiros CAD;
- Geração automática de trajectórias a partir de um modelo CAD;
- Detecção de colisões entre diferentes componentes da célula;
- Disponibilização de software adicional para aplicações específicas (maquinagem, soldadura, pintura, quinagem);
 - Verificação tridimensional das trajectórias programadas;
 - Verificação da aplicabilidade do programa na célula real, devido à inclusão do controlador virtual.

4.2. Machining PowerPac®

Para a realização deste trabalho foi necessário adicionar a aplicação de software Machining PowerPac® ao RobotStudio®.

Todo o projecto envolve a lixagem de superfícies com geometria complexa e, como tal, não é razoável utilizar a versão base do RobotStudio® em que seria necessário marcar diversos pontos nas superfícies da peça a trabalhar para gerar as trajectórias desejadas. O Machining PowerPac® permite, precisamente, inverter esse método: tendo por base uma superfície de um dado modelo em CAD, é possível gerar automaticamente as trajectórias e os pontos nela contidos de modo a percorrer toda a superfície. O processo de programação off-line e simulação torna-se, assim, mais expedito e intuitivo.

Esta aplicação de software também inclui ferramentas de programação das trajectórias para diferentes estratégias de controlo: controlo comum em velocidade e dois modos de controlo activo de força.

Os dois tipos de controlo de força são precisamente aqueles referidos na secção 1.9.4. deste relatório quando se apresenta a célula robotizada para operações de acabamento da ABB®. Tem-se então o modo FC Pressure e o modo FC SpeedChange. A escolha entre os dois encontra-se relacionada com o tipo de aplicação desejado.

Com o FC Pressure são medidas as forças de contacto nas direcções pretendidas. O controlador actua sobre a trajectória programada, alterando-a de acordo com as especificações do programa (figura 4.3). Exemplos de aplicações deste modo são:

- Lixagem de torneiras e pás de turbinas;
- Lixagem e polimento de peças em alumínio;
- Polimento de estruturas para equipamento electrónico: computadores portáteis, telemóveis;
- Polimento de equipamento de cozinha em aço inoxidável.

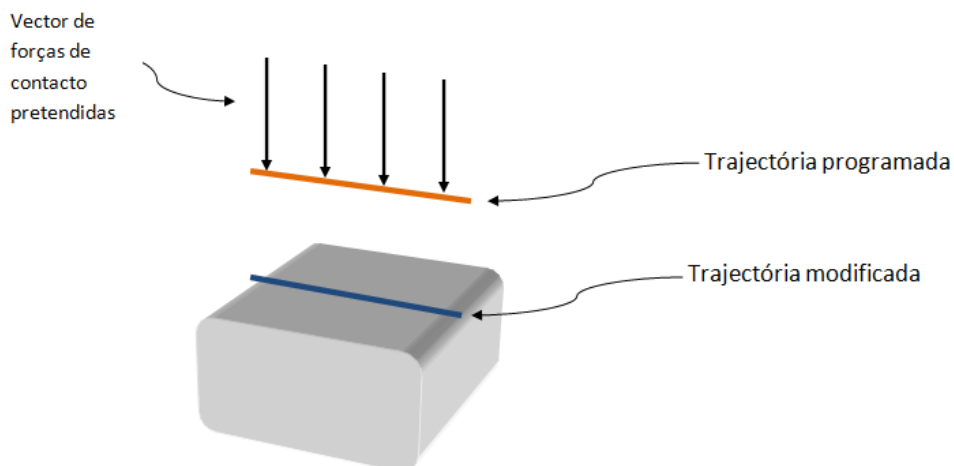


Figura 4.3 - Esquema demonstrativo do FC Pressure da ABB

O FC SpeedChange é utilizado para alterar a velocidade de execução da trajectória programada por parte do robô face a diferentes forças de contacto medidas. No caso da maquinagem, tem como principal objectivo a manutenção das taxas de remoção de material num valor constante (figura 4.4). Temos como exemplos de aplicações:

- Lixagem de superfícies irregulares de peças de fundição
- Rebarbagem de contornos irregulares
- Remoção de rebarba proveniente dos planos de apartação numa peça de fundição.

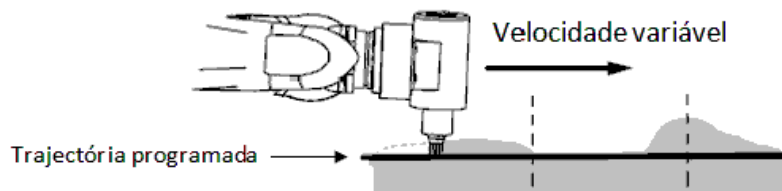


Figura 4.4 - FC SpeedChange da ABB

4.3. Instalação do software

A realização deste projecto implicou a prévia instalação de várias ferramentas informáticas que possibilitam a utilização de todos os recursos necessários, nomeadamente aqueles atrás descritos: a geração automática de trajectórias e o controlo activo de força.

Assim sendo foram instalados os seguintes softwares:

- RobotWare 5.12.04 – Software do controlador;
- ABB RobotStudio 5.12.03 – Software de programação off-line e simulação;
- RobotWare Machining FC GUI – Software que permite o recurso ao controlo activo de força;
- Machining PowerPac 5.12 – Pacote de software de maquinagem para o RobotStudio.

4.4. Layout da célula robotizada e obtenção do controlador virtual

O método de programação off-line com o RobotStudio® é, como já foi referido, um método essencialmente gráfico. Assim, um dos primeiros passos da programação é constituído pela definição do layout da célula e, com isso, definir o controlador virtual.

Tendo como base o layout da célula real do Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foram inseridos, a partir da biblioteca de modelos disponibilizada pelo RobotStudio®, um modelo do robô IRB 2400 e da mesa de indexação IRBP 500C, ambos da ABB® (figura 4.5).

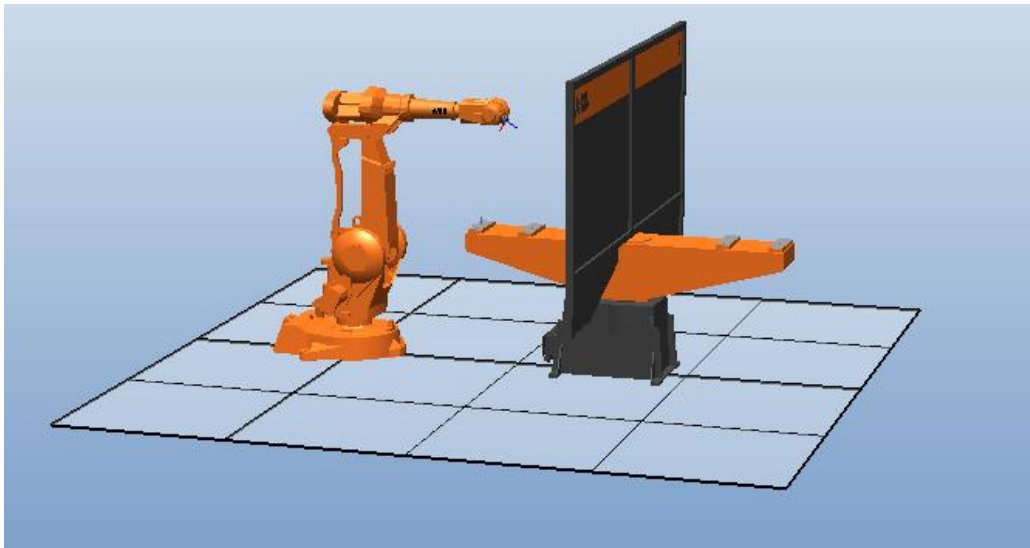


Figura 4.5 - Layout da célula virtual no RobotStudio

O software disponibiliza, também, uma biblioteca de controladores baseados em layouts pré-definidos. Contudo, existe um outro modo de obter um controlador tendo por base um layout construído pelo utilizador. Essa opção permite, também, configurar os parâmetros e funcionalidades controlador virtual de acordo com os requisitos do trabalho. No caso particular deste projecto, das características seleccionadas, aquelas que merecem maior destaque são as relacionadas com o controlo de força (figura 4.6).

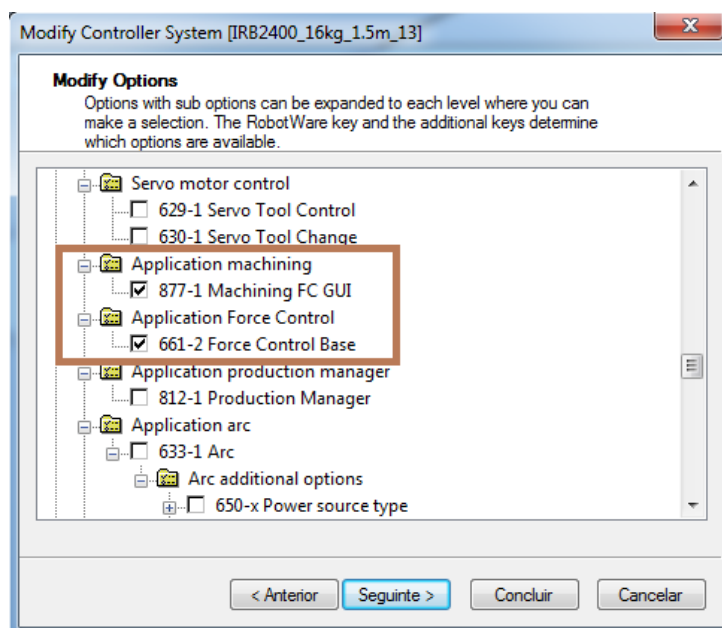


Figura 4.6 - Definição dos parâmetros do controlador virtual - controlo de força

É de salientar que o controlador virtual deve ser sintetizado de acordo com as características do controlador real com o qual se irá trabalhar. Os controladores virtuais podem incluir todos os opcionais disponibilizados pelo fabricante, porém, se essas opções não estiverem disponibilizadas no controlador real não poderão ser utilizadas na célula real.

4.5. Introdução de geometrias modeladas e finalização do layout

O método gráfico de programação off-line promovido pelo software da ABB® implica a modelação de todas as geometrias intervenientes. Só deste modo é que é possível realizar uma correcta simulação controlando graficamente toda a cinemática da célula.

Máquina Lixadeira

Assim sendo, realizou-se uma modelação aproximada da máquina lixadeira utilizando-se apenas as dimensões da lixa e do atravancamento total do equipamento (figura 4.7)

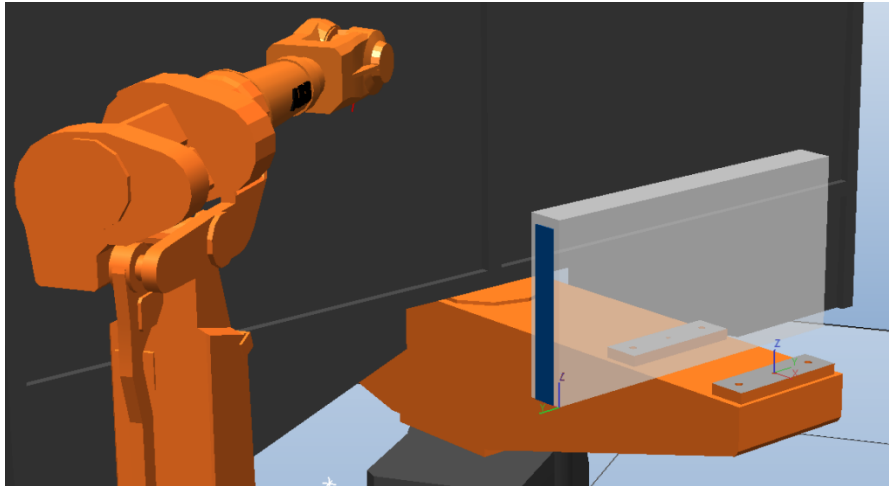


Figura 4.7 - Modelo simplificado da máquina lixadeira

O posicionamento da máquina relativamente ao robô foi escolhido de acordo com as limitações da célula real, pelo que o posicionamento mostrado na figura 4.7 foi aquele que apresentou uma maior flexibilidade de acesso de todas as faces da peça à lixa. Foi, também, tido em conta, durante a programação, a existência de um rolo de contacto na parte inferior da lixa e também o facto de existir uma zona de acesso livre por detrás da zona central da lixa.

Sistema de fixação e peças

Uma vez que a capacidade de modelação do RobotStudio® é um pouco limitada (não é o principal propósito do software) e é possível realizar a importação de modelos CAD provenientes de outros programas, importaram-se as peças já modeladas em SolidWorks e em Autodesk Inventor. O formato do ficheiro importado terá que ser adequado ao software de simulação e, também, à aplicação a simular. Como a lixagem é um procedimento de acabamento superficial e o processo de programação é baseado na geração automática de trajectórias a partir das faces do objecto, é requisito do modelo da peça a possibilidade de seleccionar diferentes faces (figura 4.8). Tal propriedade do modelo está directamente ligada ao formato do ficheiro importado. Neste trabalho o formato adoptado foi o STEP.

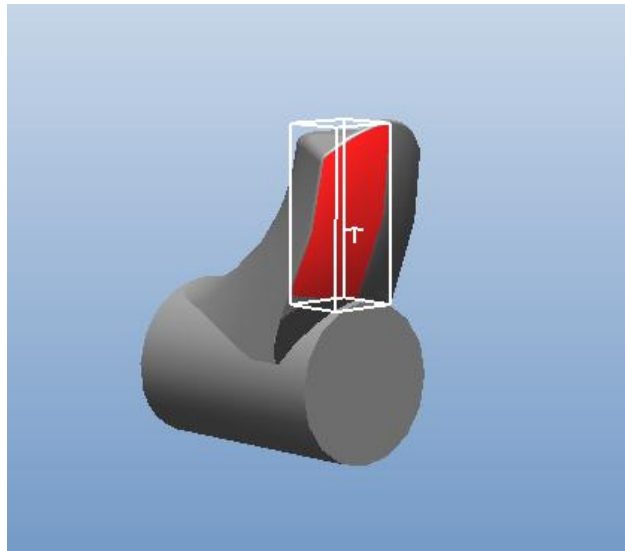


Figura 4.8 - Selecção de face

O posicionamento dos sistemas de fixação das peças na extremidade livre do robô foi realizado de acordo com a célula real (figuras 4.9 e 4.10). Assim sendo, foi realizada uma modelação simples do transdutor de força do robô (forma cilíndrica) para que a posterior colocação dos outros modelos fosse realizada com correcção.

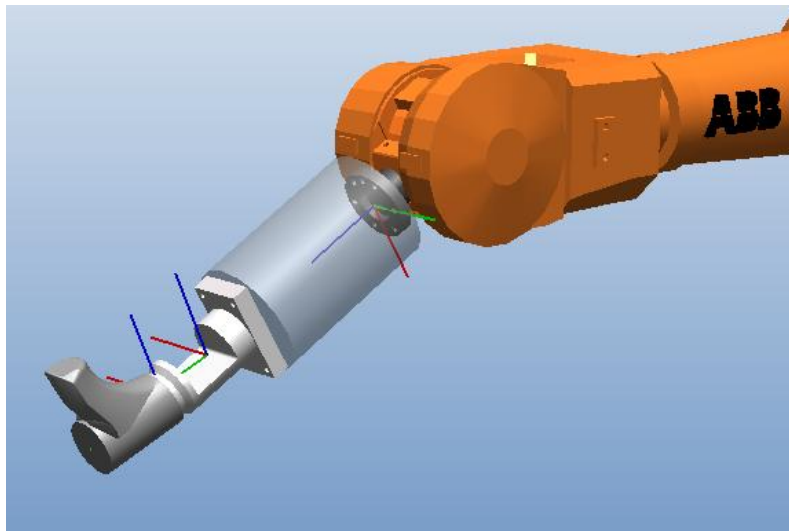


Figura 4.9 - Modelo da torneira e respectivo sistema de fixação

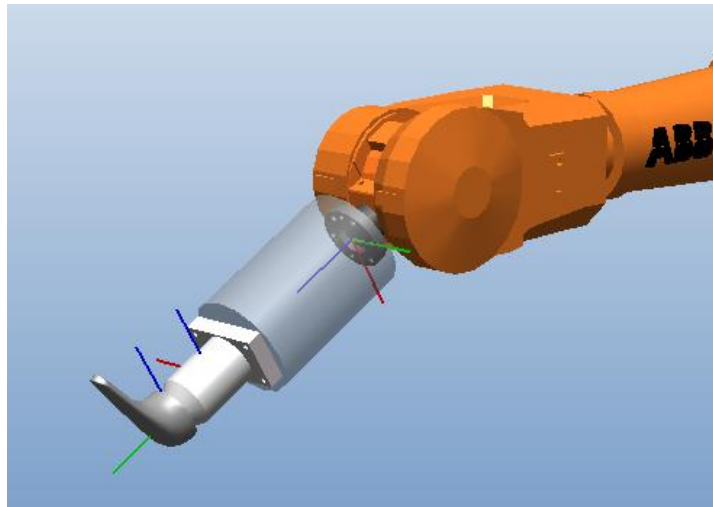


Figura 4.10 - Modelo do manipulador e respectivo sistema de fixação

4.6. Tool frame e Workobject

A programação off-line e a simulação de células robotizadas são campos de desenvolvimento recente na indústria da automação. Como tal, é de esperar que nem todas as situações de utilização de robôs industriais estejam cobertas pelo software de programação RobotStudio®.

Apesar da existência do Machining PowerPac®, que aumenta as capacidades do RobotStudio® na área da maquinagem, a programação off-line de operações de lixagem não se encontra totalmente definida pelo software. As áreas de aplicação mais comum deste programa são aquelas em que o robô segura a ferramenta e a peça a trabalhar se encontra fixa como na soldadura por pontos ou mesmo na fresagem.

A estrutura de programação do RobotStudio® assenta sobre a definição de sistemas de coordenadas (referenciais) com o objectivo de localizar no espaço determinados objectos ou localizações particulares desses mesmos objectos. Com tal definição garante-se o posicionamento relativo dos diferentes elementos constituintes da célula. Os sistemas de coordenadas possuem uma estrutura hierárquica, na qual a origem de cada referencial é definida relativamente a um outro referencial seu antecessor. Neste caso particular de programação de uma operação de lixagem de uma torneira, existem

dois tipos de sistemas de coordenadas que terão que ser definidos de um modo distinto em relação à programação ordinária de uma célula robotizada: o sistema de coordenadas de ferramenta (*Tool frame*) e o sistema de coordenadas *Workobject*.

Sistemas de coordenadas de ferramenta (Tool frame)

Tal como a sua designação indica, este sistema de coordenadas define a posição e orientação relativa da ferramenta. Como normalmente o robô movimenta a ferramenta, o referencial move-se de acordo com os movimentos programados do robô. Dadas as aplicações mais comuns do RobotStudio® já atrás referidas, a origem geralmente adoptada para este referencial é o ponto central da ferramenta (garra, tocha de soldadura), como se vê na figura 4.11, razão pela qual é geralmente designado de *Tool Center Point* (TCP).

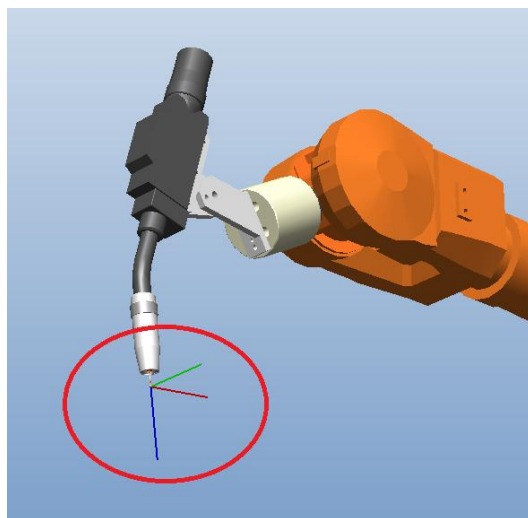


Figura 4.11 - Tool Center Point (TCP) de uma tocha de soldadura

Uma vez que na célula robotizada de lixagem deste trabalho o robô movimenta a peça a trabalhar e a ferramenta encontra-se fixa, todo o conceito de *Tool frame* tem que ser redefinido de modo a satisfazer as condições de lixagem. A operação a executar é de cariz superficial e é de esperar ser necessário utilizar diferentes zonas da cinta de lixa para se obter a lixagem correcta das diferentes formas da torneira. Assim sendo, como preparação do layout da célula foram inseridos diferentes sistemas de coordenadas de ferramenta na superfície modelada da lixa (figura 4.12).

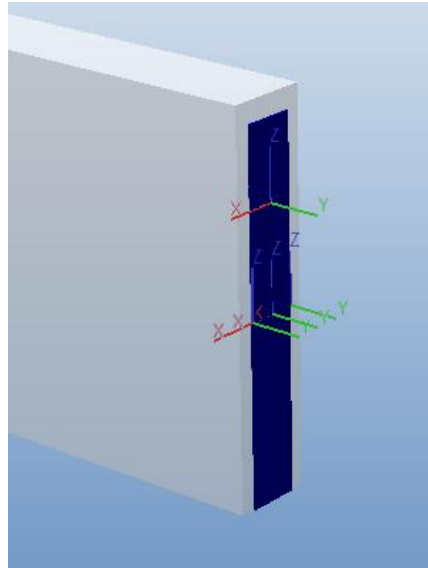


Figura 4.12 - Diferentes Tool frames introduzidos no modelo da lixa

Sistema de coordenadas Workobject

Um *Workobject*, tal como o nome indica, representa a localização de um objecto na estação de trabalho, estando associado a um sistema de coordenadas (*Workobject coordinate system*). A definição desse sistema de coordenadas é realizada por outros dois sistemas: o sistema de coordenadas do utilizador (*user frame*) e o sistema de coordenadas do objecto (*object frame*). Quando se programa um robô, os pontos das trajetórias geradas (*Targets*) encontram-se relacionados com o sistema de coordenadas do objecto que por sua vez mantém uma relação com o sistema de coordenadas do utilizador (estrutura hierárquica – figura 4.13).

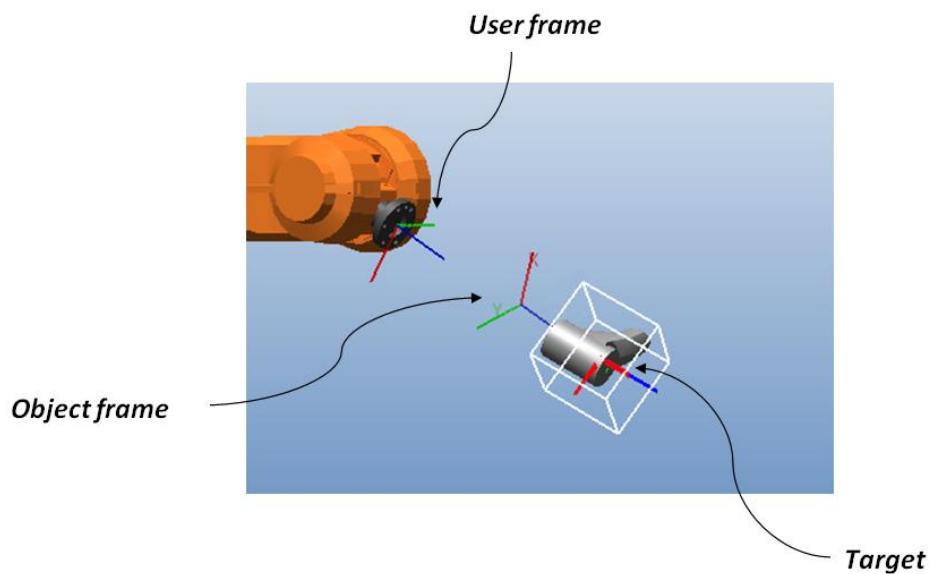


Figura 4.13 - Sistemas de coordenadas

Normalmente, os *Workobjects* são utilizados em posições fixas que não se alteram durante a simulação. No entanto, como mostra a figura 4.13, no programa de simulação da célula de lixagem deste projecto os pontos das trajectórias geradas na superfície do modelo da peça estão definidos por dois sistemas de coordenadas (*user frame* e *object frame*) que, por sua vez, se encontram acoplados à extremidade do robô, movimentando-se durante a execução da simulação.

Em suma, a utilização do RobotStudio® para a simulação da operação robotizada de lixagem de torneiras envolve uma redefinição de alguns conceitos do programa exigindo uma adaptação a uma operação de acabamento que requer que a ferramenta seja fixa e o objecto manipulado. Os referenciais do objecto, definidos normalmente como pontos fixos, circularão em torno de diferentes referenciais de ferramenta que, por sua vez, são comumente dados como móveis e se encontrarão estáticos.

4.7. Programação – método

Uma vez que é possível realizar a adaptação do Machining PowerPac® à simulação do processo de lixagem, pode-se usufruir da metodologia própria do software para gerar as soluções de trajectória. Esse método encontra-se estruturado no esquema da figura 4.14.

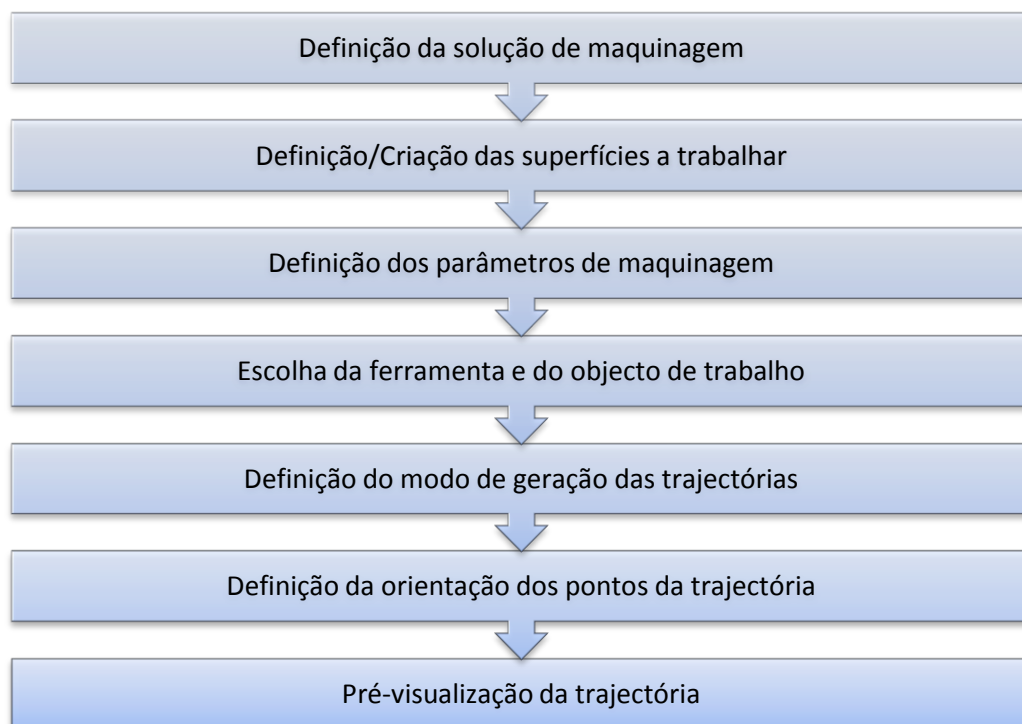


Figura 4.14 - Esquema do método de programação do Machining PowerPac

De modo a facilitar a compreensão do processo, são, de seguida, descritas as etapas percorridas no Machining PowerPac® para a obtenção das soluções.

1º - Definição da solução de maquinagem (figura 4.15)

- Escolha do controlador virtual do robô;
- Escolha da tarefa do robô;
- Escolha do nome para a operação.

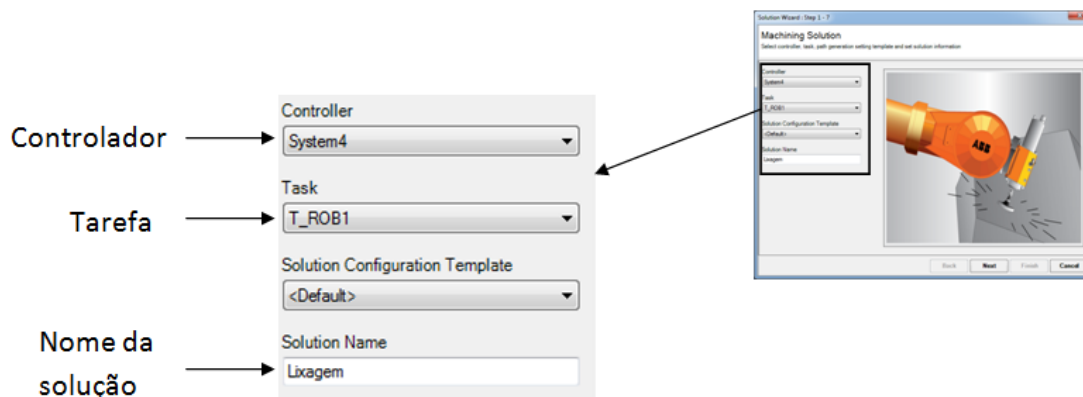


Figura 4.15 - Definição da solução de maquinagem

2º - Definição/Criação das superfícies a trabalhar (figura 4.16)

- Escolha da superfície (ou conjunto de superfícies) que serão alvo da solução.

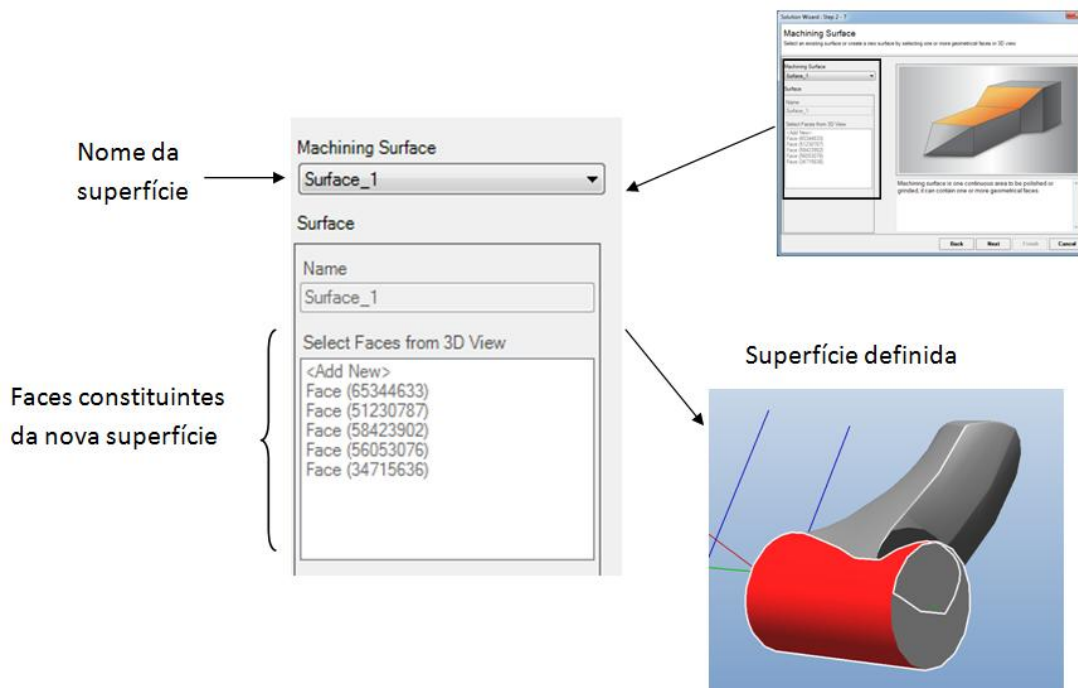


Figura 4.16 - Definição/Criação das superfícies a trabalhar

3º - Definição dos parâmetros de maquinação (figura 4.17)

- Escolha do tipo de controlo do robô (controlo em posição – Normal – ou controlo em força – FC Pressure ou FC SpeedChange);
- Escolha dos parâmetros do controlo de força pretendido (figura 4.18).

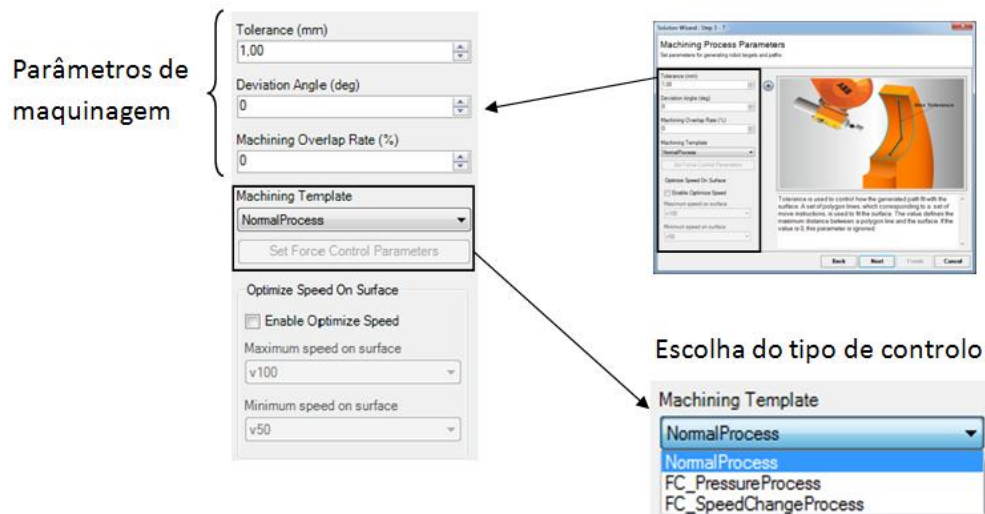


Figura 4.17 - Definição dos parâmetros de maquinação

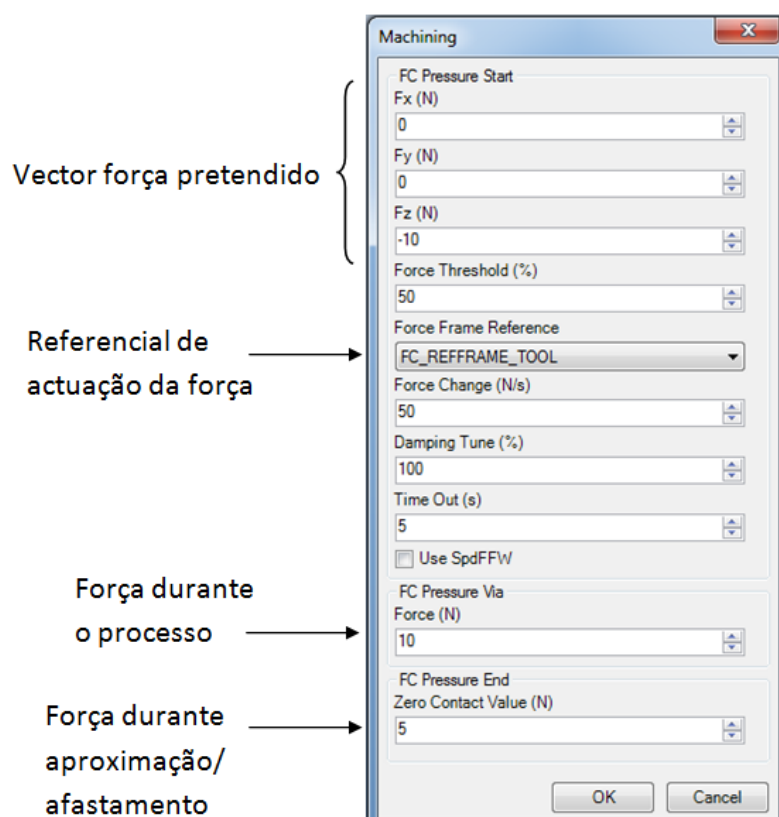


Figura 4.18 - Definição dos parâmetros de controlo de força

4º - Escolha da ferramenta e do objecto de trabalho (figura 4.19)

- Escolha do objecto de trabalho (sistema de coordenadas *Workobject*);
- Definição do tipo de ferramenta e activação da mesma;
- Definição das características da ferramenta.

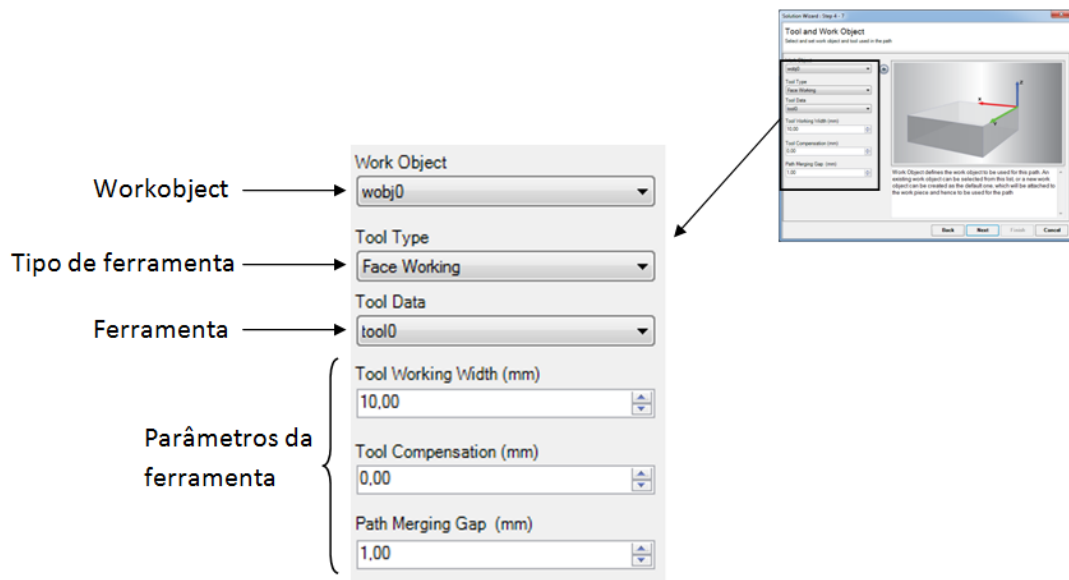


Figura 4.19 - Escolha da ferramenta e do Workobject

5º - Definição do modo de geração das trajectórias (figura 4.20)

- Escolha dos planos de corte.

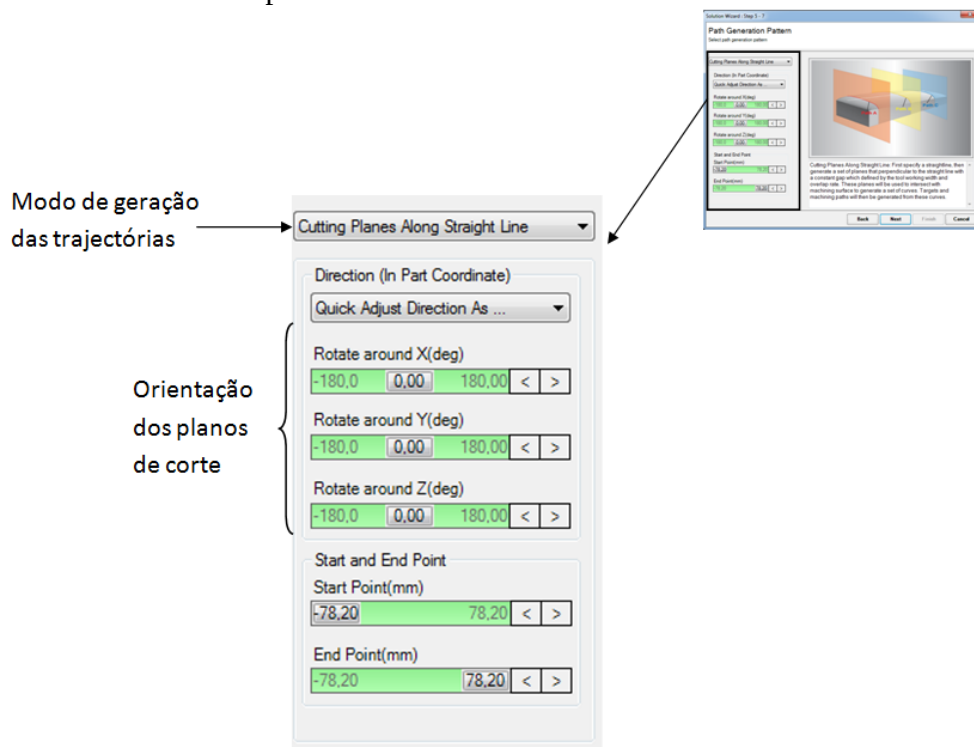


Figura 4.20 - Definição do modo de geração das trajectórias

6º - Definição da orientação dos pontos da trajectória (figura 4.21)

- Orientação perpendicular à superfície;
- Escolha do tipo de trajectória de encosto e afastamento.

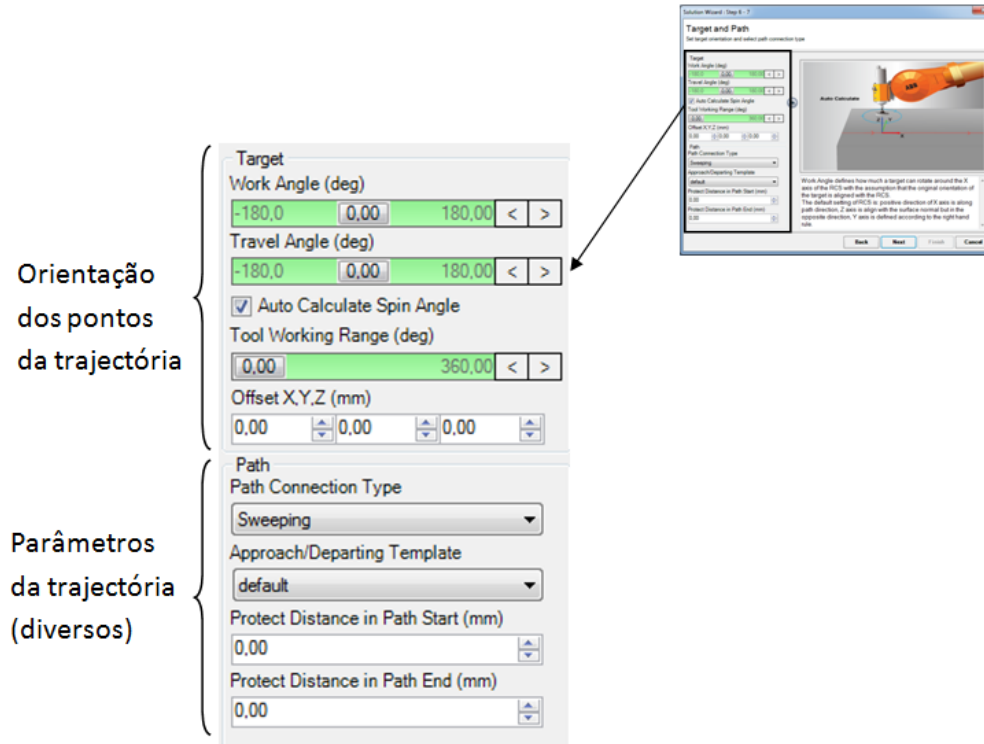


Figura 4.21 - Definição da orientação dos pontos da trajectória

7º - Pré-visualização da trajectória (figura 4.22)

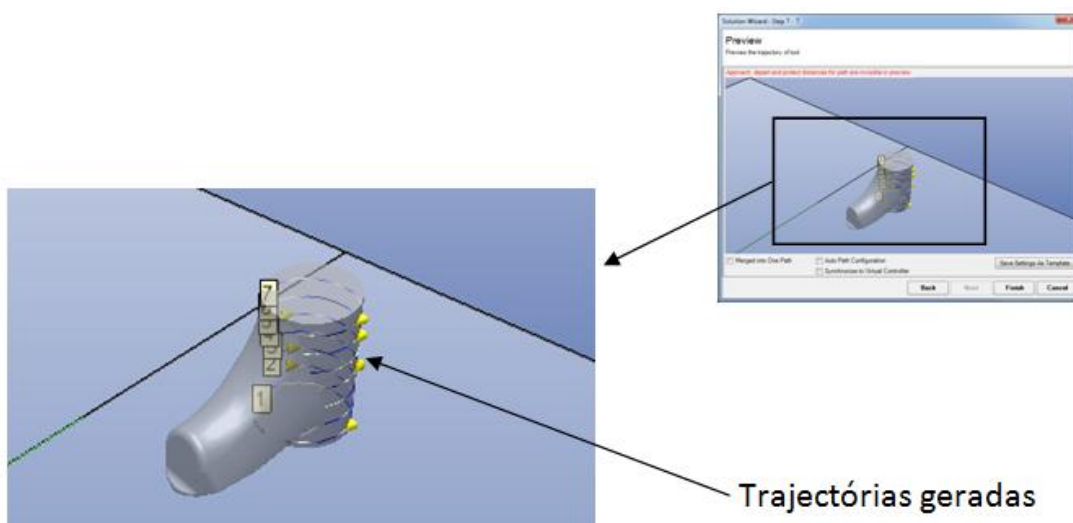


Figura 4.22 - Pré-visualização da trajectória gerada

4.8. Trajectória gerada e configurações do robô

4.8.1. Trajectória gerada

A trajectória automaticamente gerada no Machining PowerPac® é representada como mostra a figura 4.23.

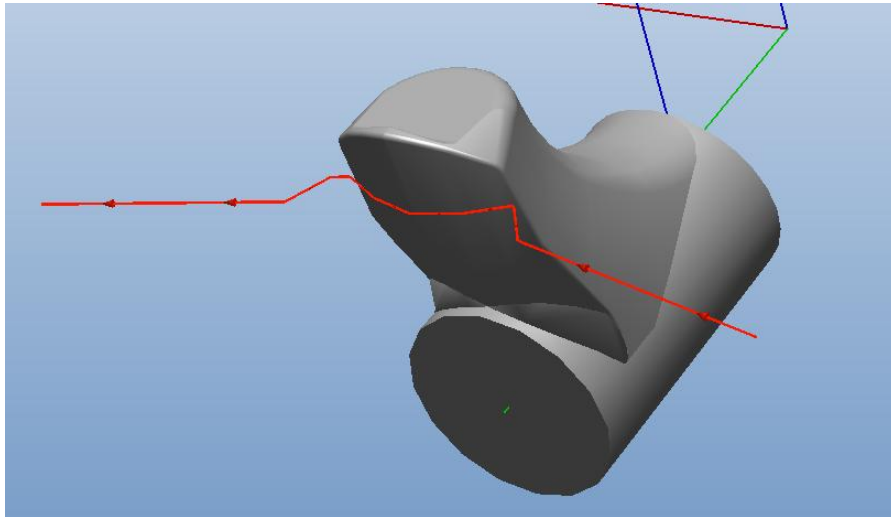


Figura 4.23 - Trajectória gerada automaticamente (a vermelho)

No entanto, numa visualização mais pormenorizada da trajectória gerada (figura 4.24), utilizando o comando “Path View” é possível constatar a orientação dos diferentes pontos que a constituem.

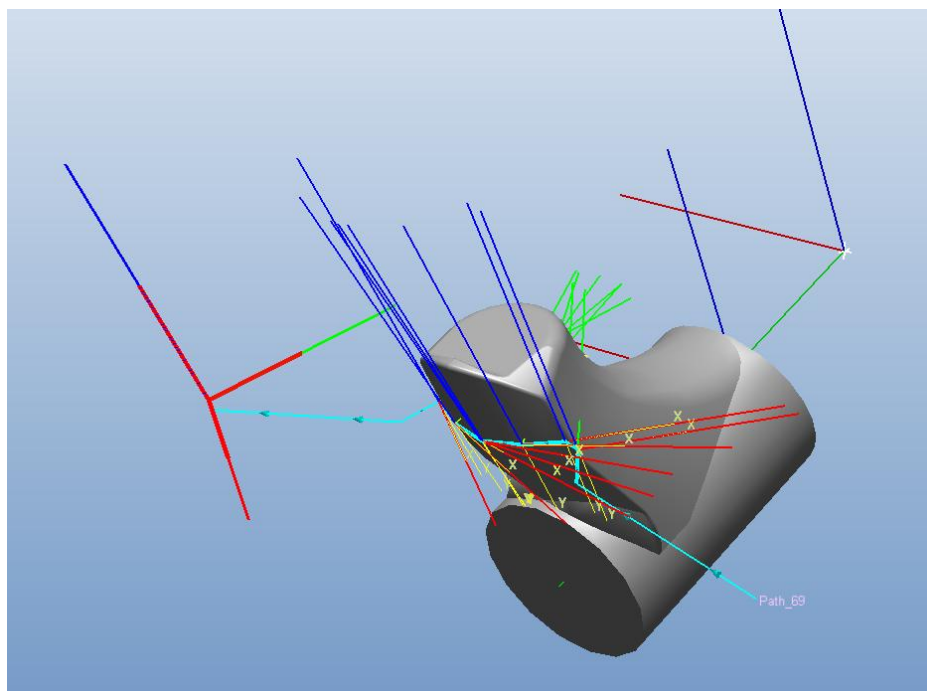


Figura 4.24 - Visualização dos pontos da trajectória (Path View)

Cada ponto é representado por um referencial, podendo observar-se que:

- O eixo dos XX se encontra tangente à superfície (vermelho);
- O eixo dos YY se encontra normal à superfície (verde);
- O eixo dos ZZ encontra-se tangente à superfície e normal à trajectória gerada.

Esta orientação adquire especial importância quando se pretende impor a orientação da peça perante a ferramenta bem como quando se define a força de contacto pretendida e a sua direcção.

4.8.2. Configurações do robô

Estando as trajectórias definidas, os pontos que as constituem são guardados nos respectivos sistemas de coordenadas *Workobject*. Quando o controlador virtual calcula a posição dos eixos do robô para atingir esses pontos, poderá encontrar diversas configurações (figura 4.25). Cada configuração corresponde a uma das soluções da cinemática inversa para o robô atingir o ponto pretendido. Compete, então, ao programador escolher aquela configuração que mais se adequa ao seu objectivo.

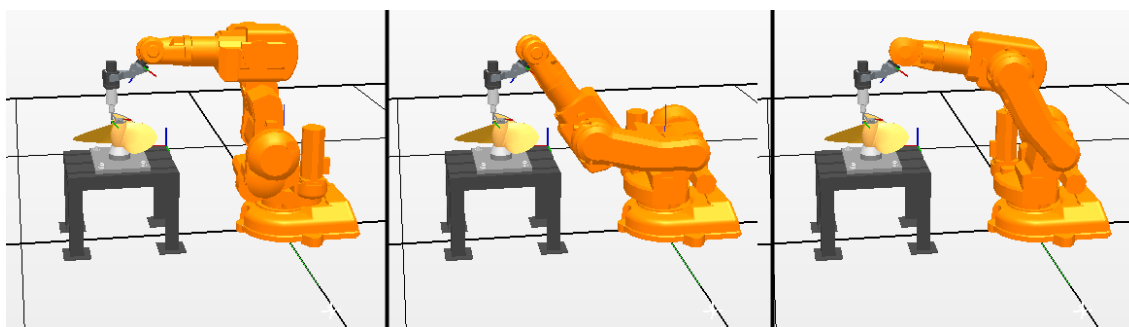


Figura 4.25- Diferentes configurações dos eixos para o mesmo ponto de trabalho

Uma vez pedidas as configurações existentes ao controlador, o software devolve uma janela, semelhante à representada na figura 4.26, para o utilizador proceder à escolha de uma configuração. Nesta janela encontra-se uma lista de vectores, cada um correspondendo a uma diferente configuração das seis juntas do robô (no caso do robô IRB 2400 da ABB® utilizado neste projecto). Os vectores são constituídos por quatro componentes, cada um representado por um número inteiro especificando em que quadrante de uma rotação inteira está cada junta localizada. Os quadrantes são numerados partindo do 0 para um número positivo para rotações no sentido contrário

dos ponteiros do relógio (sentido positivo) e numerados de -1 para números negativos para rotações no sentido dos ponteiros do relógio (sentido negativo).

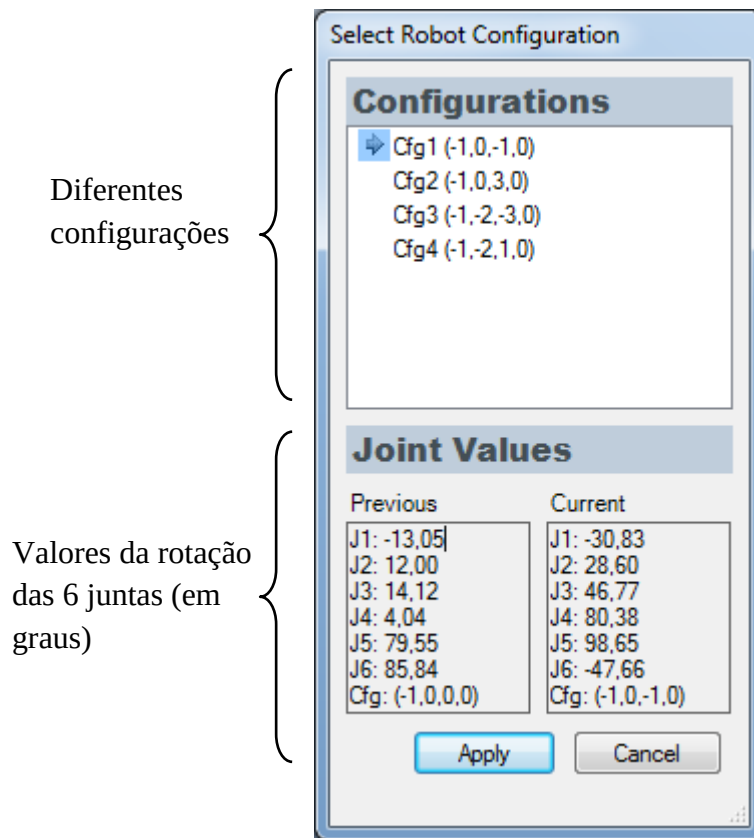


Figura 4.26 - Janela de selecção da configuração pretendida para os eixos do robô

Para simplificar a compreensão deste procedimento de escolha de configurações, considere-se como exemplo a seguinte configuração:

[0 , -1 , 2 , 1]

O primeiro algarismo (0) especifica a posição da junta nº 1: alures no primeiro quadrante positivo (entre 0 e 90°).

O segundo algarismo (-1) especifica a posição da junta nº 4: alures no primeiro quadrante negativo (entre 0 e -90°).

O terceiro algarismo (2) especifica a posição da junta nº 6: alures no terceiro quadrante positivo (entre 180 e 270°).

O quarto algarismo (1) especifica a posição do eixo virtual “x” usado para determinar o centro da extremidade livre do robô face a outros eixos.

Apesar de não especificar a posição de todas as juntas do robô, esta representação apresenta-se efectivamente útil neste método gráfico de programação quando a variação da posição dos eixos não parece significativa e a posição das juntas é bastante diferente. Tal pode verificar-se na figura 4.27 onde, para o mesmo ponto de trabalho, são apresentadas duas configurações distintas que são mais facilmente distinguíveis pela sua representação vectorial.

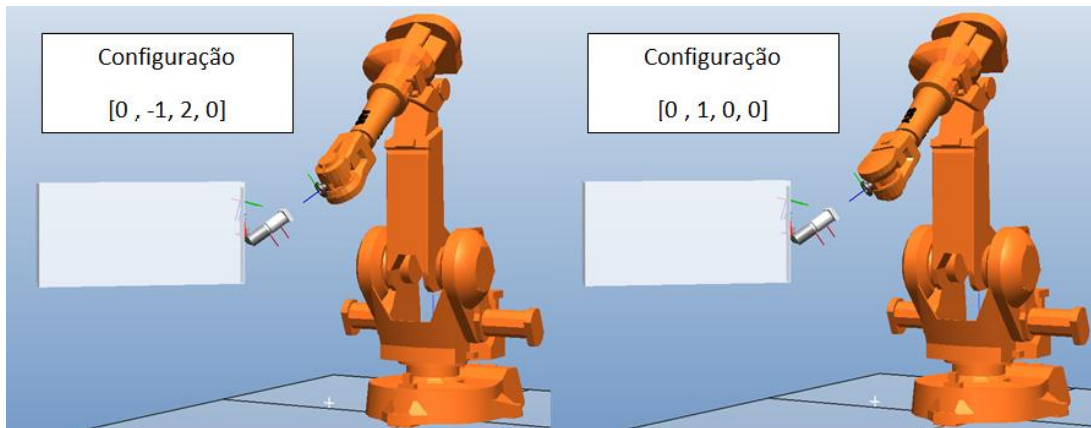


Figura 4.27 - Diferentes configurações para o mesmo ponto de trabalho

É preciso, portanto, bastante cuidado na escolha das configurações para uma trajectória, pois o controlador atribui um conjunto de configurações o mais parecidas possível para os diferentes pontos que constituem a trajectória. No entanto, a prioridade do controlador virtual é designar configurações que se encontram o mais afastadas possível das posições singulares do robô. Como tal, pode acontecer serem atribuídas configurações bastante diferentes para a mesma trajectória, diferenças essas que podem ser bastante difíceis de detectar graficamente. Estas situações tornam-se algo comuns quando se lida com peças de elevada complexidade geométrica como é o caso das torneiras. Um descuido na definição das configurações pode resultar num comportamento imprevisível do robô dando origem a colisões com os restantes elementos da célula.

Torna-se então necessário despende algum tempo de programação totalmente dedicado à visualização das configurações dos eixos do robô em todas as trajectórias geradas.

4.9. Simulação da solução

Executando o procedimento enunciado na secção 4.7 desta dissertação para as diferentes faces do corpo da torneira e do manípulo e procedendo-se à atribuição das configurações possíveis e necessárias, o software organiza o conjunto de trajectórias pela ordem pela qual foram geradas. Essa ordem pode ser alterada de modo a dispor as diferentes trajectórias numa ordem mais apropriada à execução do trabalho de lixagem.

Uma vez tendo a estrutura completa do programa, foi realizada a sincronização com o controlador virtual. Esta sincronização permite a simulação do processo de lixagem usufruindo das características cinemáticas do robô. Nas imagens da figura 4.28 é possível visualizar alguns momentos da simulação.

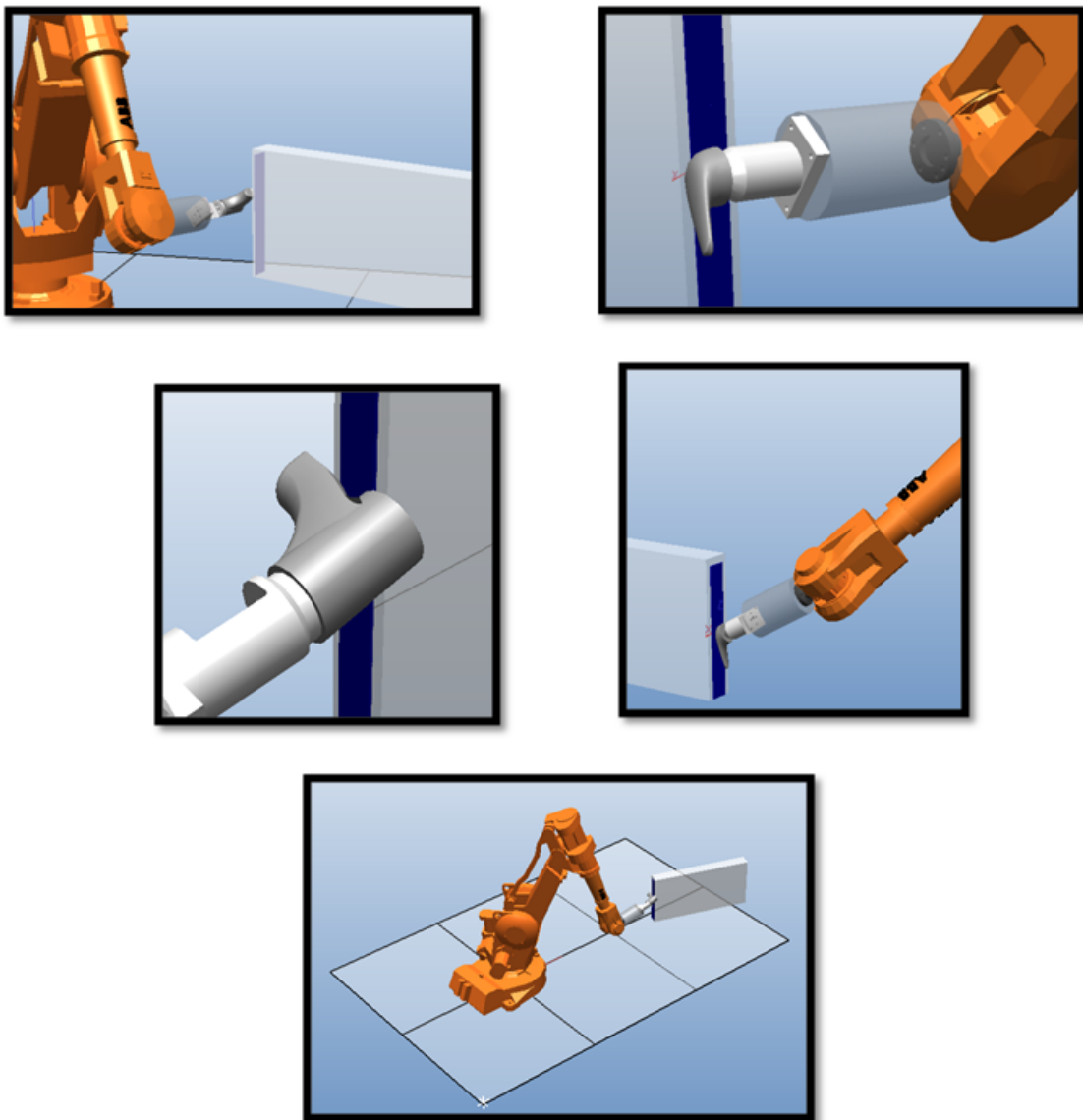


Figura 4.28 - Imagens da simulação

É importante referir que, apesar de nas imagens da figura 4.28 não se encontrarem presentes outros elementos da célula, nomeadamente a mesa IRBP 500 C da ABB® existente na célula real, todas as possíveis interferências desses elementos ausentes foram consideradas.

Foram gerados programas de lixagem para o corpo da torneira e para o manípulo com controlo em velocidade e posição e com controlo activo de força usando, para o efeito, o modo FC Pressure.

Quando se sincroniza o programa criado com o controlador virtual, é gerado um ficheiro em linguagem de programação do robô, RAPID. A figura 4.29 permite mostrar alguns detalhes dessa linguagem de programação.

```

MODULE Surface_2

CONST robtarget
p3399:=[ [19.884686719965,68.7263405050397,85.5242603249622], [0.6919782372
10735,-0.703677081852788,-0.0971718396570961,-0.128694666865116], [-1,-
1,1,0], [9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];

(...)

PROC Path_141()

    MoveL p3399,v500,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;
    MoveL p3398,v500,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;
    MoveL p3397,v500,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;

    FCPress1LStart p3392,v100\Fx:=0\Fy:=-
10\Fz:=0,50\ForceFrameRef:=FC_REFFRAME_TOOL\ForceChange:=50\DampingTune:=
100\TimeOut:=5,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;

    FCPressL p3391,v100,10,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;
    FCPressL p3390,v100,10,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;

    FCPressEnd
p3393,v100\ForceChange:=50\ZeroContactValue:=5,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_
1;

    MoveJ p3396,v500,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;
    MoveJ p3395,v500,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;
    MoveJ p3394,v500,z1,Lixa_dir_1_2\WObj:=Wobj_S_1;

ENDPROC
    
```

Pontos da trajectória

Movimento de aproximação em controlo de posição

Definição do vector de força – início do controlo em força

Processo de lixagem com controlo de força

Fim do controlo activo de força

Movimento de afastamento em controlo de posição

Figura 4.29 - Alguns detalhes da linguagem RAPID

4.10. Discussão

Os objectivos deste trabalho compreendem a análise da programação off-line e da simulação como soluções de programação de robôs para operações de acabamento, nomeadamente para lixagem. Assim sendo, e terminado o capítulo da programação é imperativo retirar algumas conclusões acerca deste processo.

Como é evidente, algumas das ilações retiradas da programação off-line serão respeitantes ao software utilizado para o efeito, o RobotStudio® da ABB®.

O ambiente de trabalho do software utilizado revela-se bastante apelativo e “*user friendly*” facilitando o processo de aprendizagem necessário face a uma nova abordagem como é esta da programação off-line. O facto de se tratar de um modo de programação baseado em simulação, utilizando um método essencialmente gráfico, proporciona uma experiência bastante realista e intuitiva mesmo para aqueles mais habituados a programar online. Mais ainda, no caso deste software, que inclui um controlador virtual semelhante àquele encontrado nas células reais. Este controlador virtual realiza os cálculos de cinemática inversa fazendo com que os movimentos efectuados pelo robô durante a simulação sejam precisamente os mesmos que aqueles que o robô real efectuará. É, contudo, necessário o estudo de alguns conceitos particulares do software como são aqueles relacionados com os sistemas de coordenadas. Esse conhecimento garante o à-vontade necessário para adaptar o programa a situações novas como as relacionadas com este projecto.

Inicialmente, programar off-line e simular necessita de um trabalho de modelação extenso que, normalmente, é realizado aquando do design das peças a fabricar (neste projecto tal não se verifica). Assim, e tendo o modelo 3D das peças, apenas é necessário o cuidado de o mesmo se encontrar no formato adequado para poder ser importado para o software de programação.

A utilização do Machining PowerPac® converteu o processo de geração das trajectórias em algo bastante expedito, o que permitiu rapidamente criar soluções para todas as faces das duas peças deste projecto.

No entanto, devido à complexidade das geometrias e ao facto de o software não se encontrar totalmente preparado para lidar com operações de acabamento, foi necessário

fazer uma observação cuidada de todo o programa criado, com especial atenção para as configurações dos eixos do robô.

Foi, também, denotada alguma fragilidade do software a lidar com os programas que incluem o controlo activo de força, tendo sido necessário efectuar algumas correcções directamente no código RAPID. Uma outra limitação aliada a este tipo de controlo resulta do facto de não ser possível realizar a simulação do controlo de força.

Apesar das limitações apresentadas pelo método exposto, a programação off-line apresenta-se, neste estágio, como uma opção válida para a programação de células robotizadas para operações de acabamento tendo como principais trunfos o reduzido tempo dispendido na programação e o facto de não ser necessário utilizar a célula real para realizar a programação. No entanto, a aplicabilidade deste método apenas poderá ser comprovada com a realização de ensaios numa célula real.

5. Implementação da solução e Ensaios

Os objectivos deste trabalho compreendem o estudo e a análise da aplicabilidade da programação off-line e do controlo activo de força integrado no robô em operações de acabamento robotizadas. Assim sendo, a passagem do mundo virtual para o mundo real é imprescindível e crítica para a qualidade final das operações realizadas. Este capítulo descreve como se processou essa mesma passagem, os testes realizados e os resultados obtidos.

5.1. Calibração

Quando o programa gerado no RobotStudio® é sincronizado com o controlador real do robô, este executa exactamente aquilo que previamente foi visualizado na simulação. No entanto, a reprodução do mundo real na simulação nunca é totalmente exacta: o modelo da torneira não tem exactamente as mesmas dimensões da torneira e a colocação dos elementos intervenientes na simulação, nomeadamente a posição da máquina lixadeira pode não ser totalmente igual à realidade. Assim sendo, antes da passagem dos programas criados para o controlador real, foi realizada uma operação de calibração da célula virtual de acordo com a célula real que foi possível conceber em laboratório (figura 5.1).

Esse procedimento consistiu na colocação de um elemento de geometria conhecida pertencente aos sistemas de fixação (entretanto fabricados) de geometria conhecida e manipulados pelo robô (figura 5.2) num ponto conhecido, retirar as coordenadas desse mesmo ponto, comparar com a simulação criada e ajustar a posição dos modelos virtuais de modo a coincidirem com a realidade.

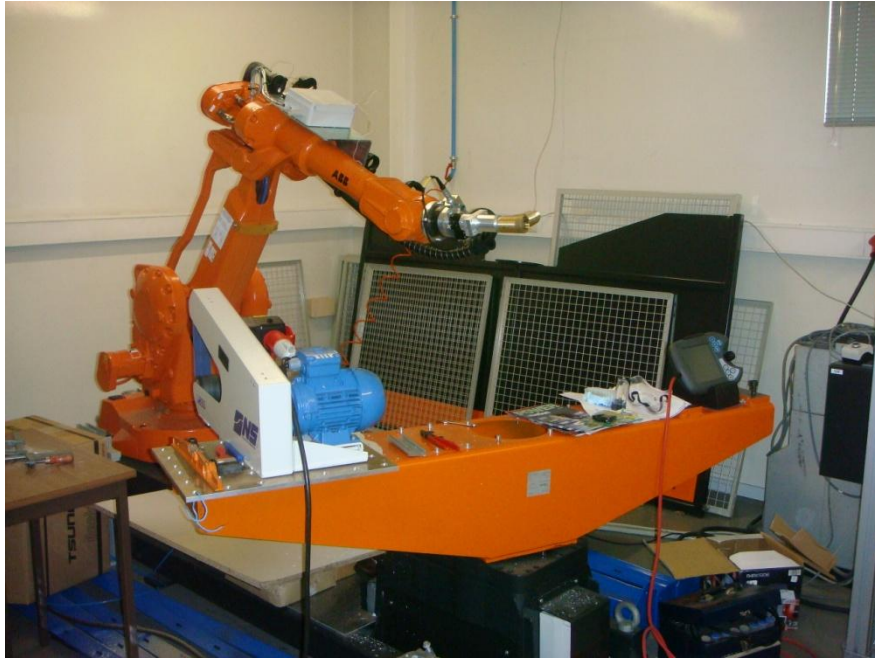


Figura 5.1- Célula robótica do Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica



Figura 5.2 - Sistemas de fixação fabricados

O objecto seleccionado para a função de calibre foi a placa de adaptação pertencente a ambos os sistemas de fixação. Utilizando a consola de programação do robô, a placa foi encostada a um ponto médio do bordo da lixa (figura 5.3) e foram retiradas as coordenadas de posição da placa. Para ser possível conhecer essa posição, foi criado no RobotStudio® um sistema de coordenadas de ferramenta (*Tooldata*) num canto do

modelo da placa e um ponto de trajectória (*Target*) no bordo esquerdo do modelo da lixa.

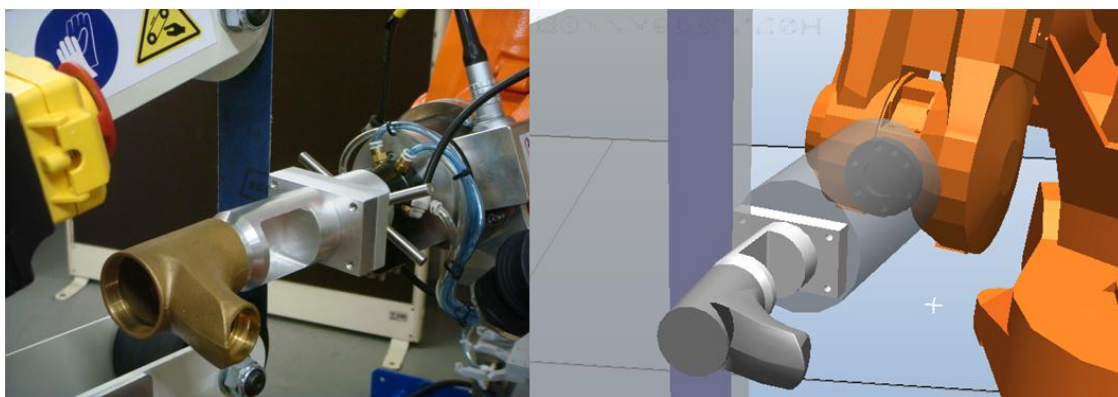


Figura 5.3 - Processo de calibração da célula (real vs virtual)

Uma vez retiradas as coordenadas do ponto real comparou-se com as coordenadas do ponto de trajectória criado na simulação e procedeu-se às respectivas correcções do programa. A orientação da lixa perante o robô é dada pelo ângulo de rotação da mesa posicionadora. Deste modo, o programa recria completamente a célula robotizada real.

5.2. Ensaios

Este projecto tem como principal objectivo verificar a possibilidade da implementação de um método de programação do robô – programação off-line – complementado (ou não) com o sistema integrado de controlo activo da força de contacto entre a peça e a ferramenta. Como tal, foi decidido realizar ensaios, testando apenas o programa elaborado para uma só superfície da torneira. Esta decisão permite realizar ensaios com menor duração de modo a poder ter acesso a resultados práticos mais rapidamente. Também permite uma melhor comparação entre os resultados das diferentes estratégias de controlo.

Assim sendo, estruturou-se cada ensaio como mostra a figura 5.4. Esta estrutura é executada duas vezes por ensaio: uma vez para cada estratégia de controlo adoptada. Cada etapa do ensaio é precedida da validação da etapa anterior.

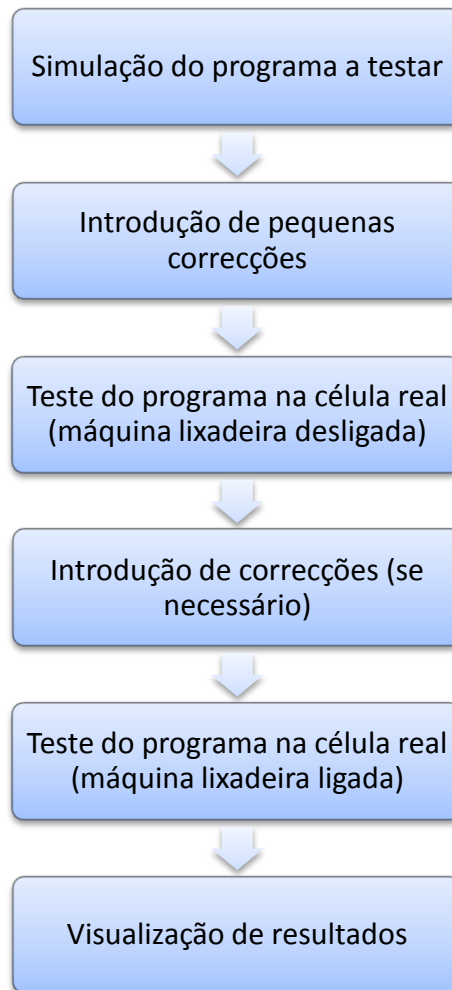


Figura 5.4 - Estrutura de um ensaio

As correcções referidas na estrutura do ensaio (figura 5.4) prendem-se com a introdução de mais pontos de modo a gerar trajectórias de aproximação e afastamento com o objectivo de posicionar o robô correctamente antes e após cada trajectória de trabalho.

5.2.1. Ensaio 1

O primeiro ensaio foi realizado com o objectivo de trabalhar a superfície mostrada na figura 5.5.

Para esta superfície foram gerados dois programas diferentes com o objectivo de testar a eficácia da programação off-line aplicada directamente numa célula real, sendo posteriormente aliada ao controlo activo de força.

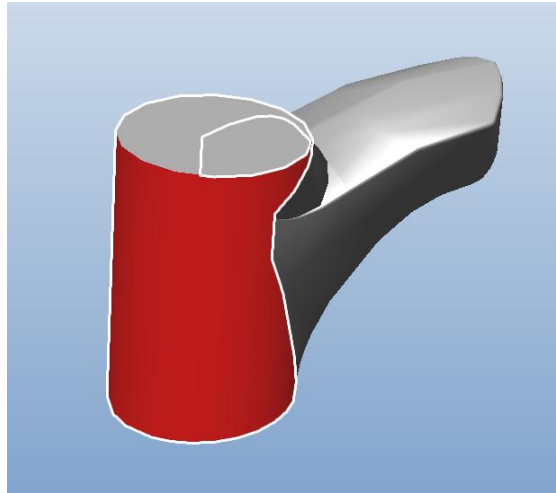


Figura 5.5 - Superfície seleccionada no Ensaio 1

Ensaio 1 – Controlo em velocidade e posição

O programa criado para este primeiro ensaio compreende a geração de cinco trajectórias em volta da face seleccionada (figura 6.6).

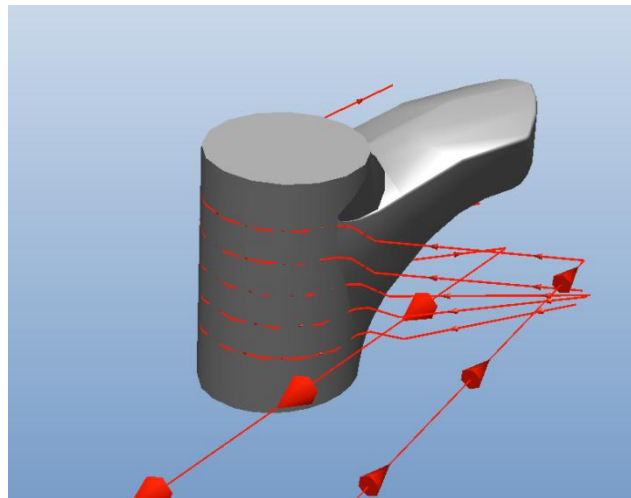


Figura 5.6 - Trajectórias geradas no programa de lixagem com controlo em velocidade e posição

A velocidade de execução das trajectórias pela velocidade do referencial *tool0* (figura 5.7) do robô relativamente ao referencial ferramenta (*tool frame*) colocado na superfície da lixa.

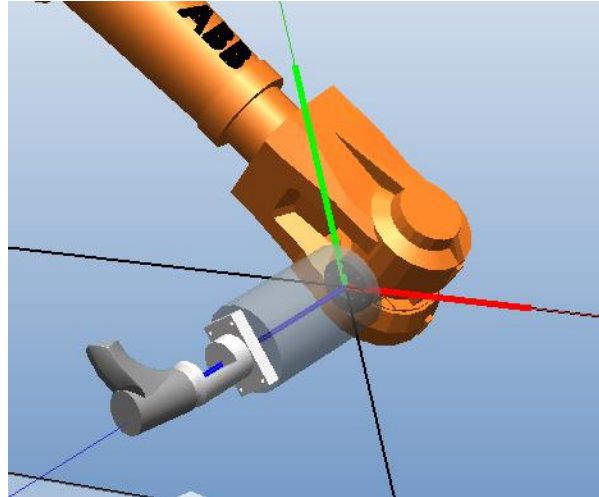


Figura 5.7 – Referencial tool0 do robô

É esperado que exista um contacto pontual entre os pontos das trajectórias e o ponto designado como origem do sistema de coordenadas de ferramenta na superfície da lixa. Apesar de esse contacto ser teoricamente pontual espera-se que exista alguma abrangência superficial por parte da lixa removendo material em torno das trajectórias (figura 5.8).

Condições do ensaio:

- Controlo do robô em velocidade e posição;
- Velocidade linear da lixa: 26,1 m/s;
- Velocidade linear do *tool0*: 7,5 mm/s;
- Grão da lixa: 80 grãos/cm².



Figura 5.8 - Realização do ensaio 1

Resultados:

Os resultados obtidos são ilustrados nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11, onde pode observar-se o aspecto da superfície após lixagem

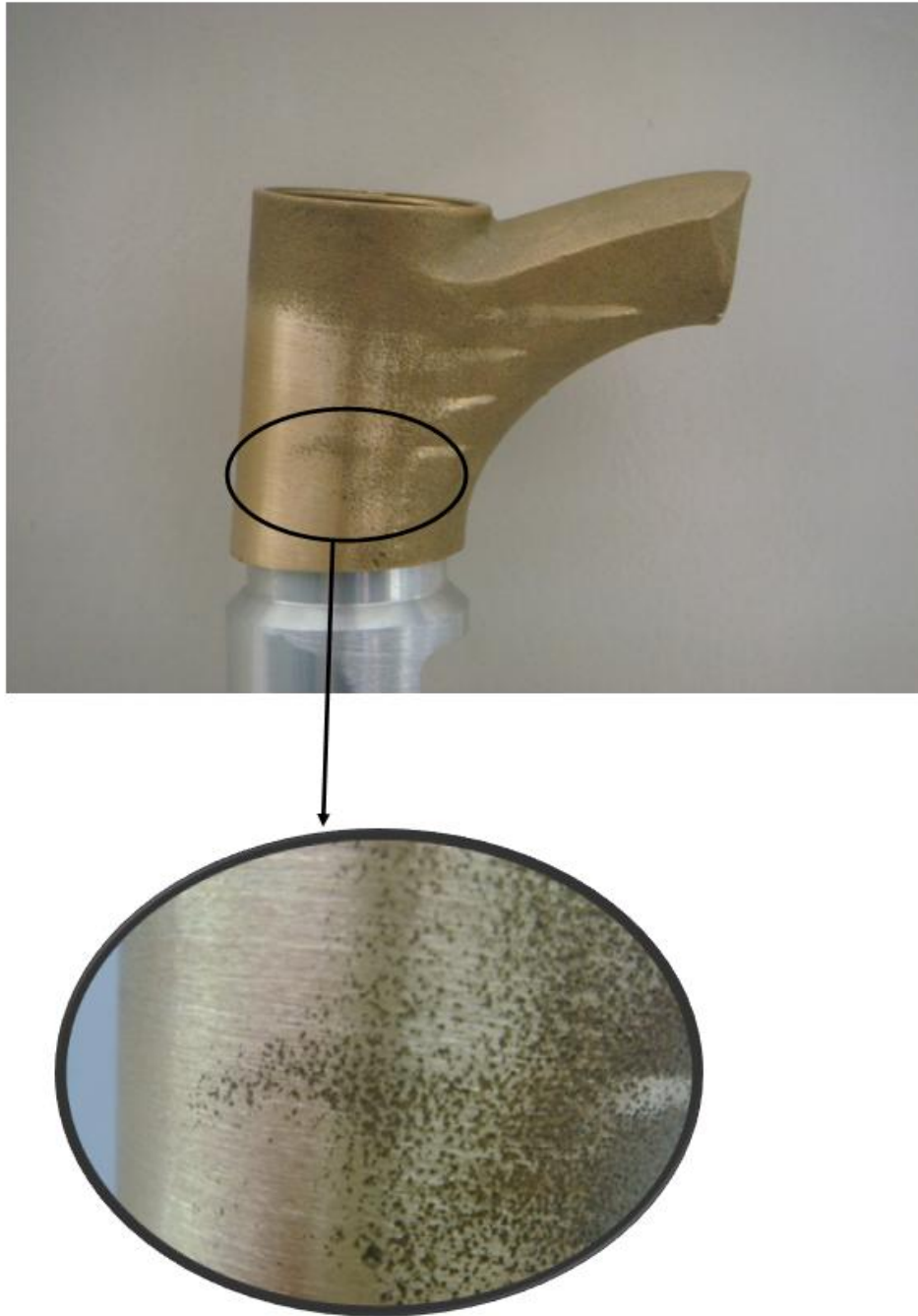


Figura 5.9 - Resultado do ensaio 1 com controlo em velocidade e posição e pormenor I

Comentário (figura 5.9):

- Acabamento muito heterogéneo;
- Baixa quantidade de material removido.

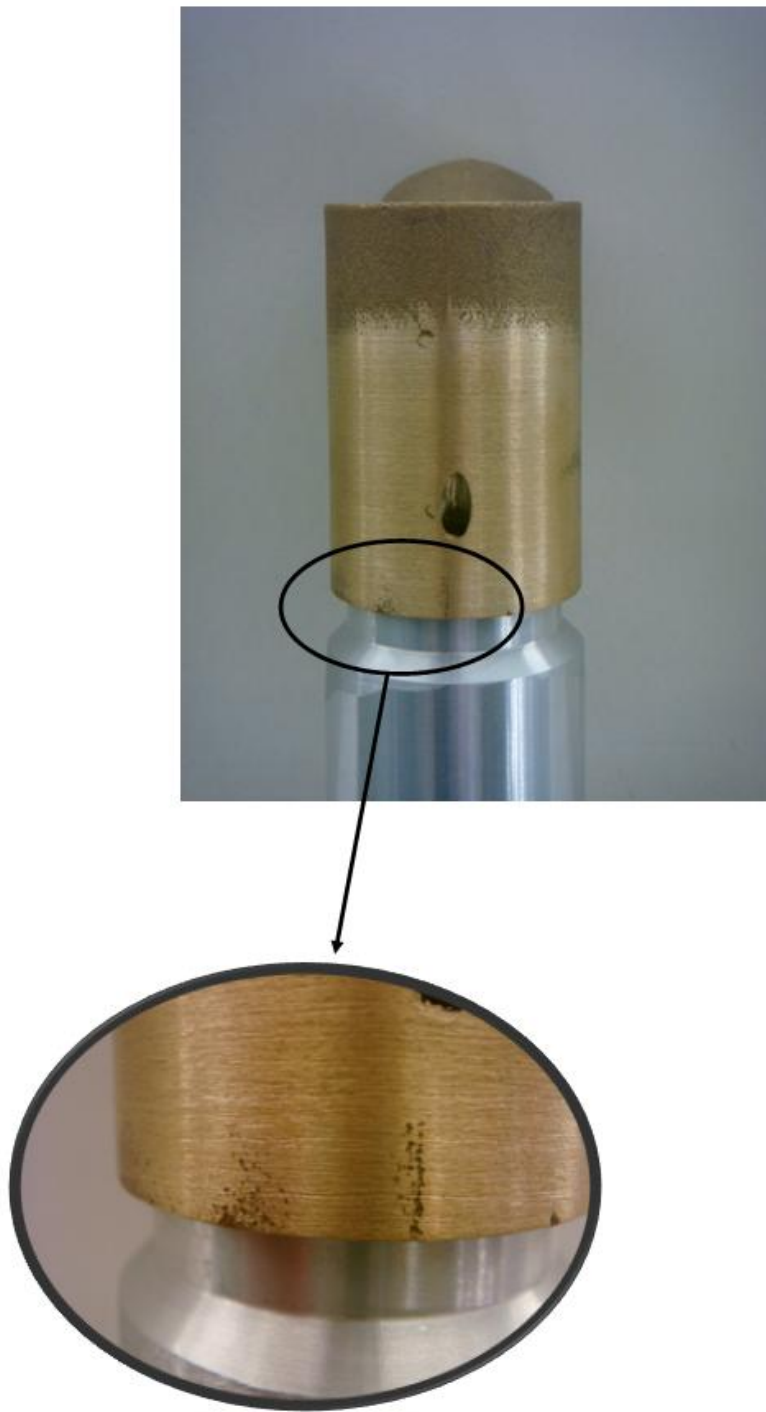


Figura 5.10 - Resultado do ensaio 1 com controlo em velocidade e posição e pormenor II

Comentário (figura 5.10):

- As trajectórias geradas foram insuficientes para abranger toda a superfície;
- Contacto intermitente entre a peça e a lixa.

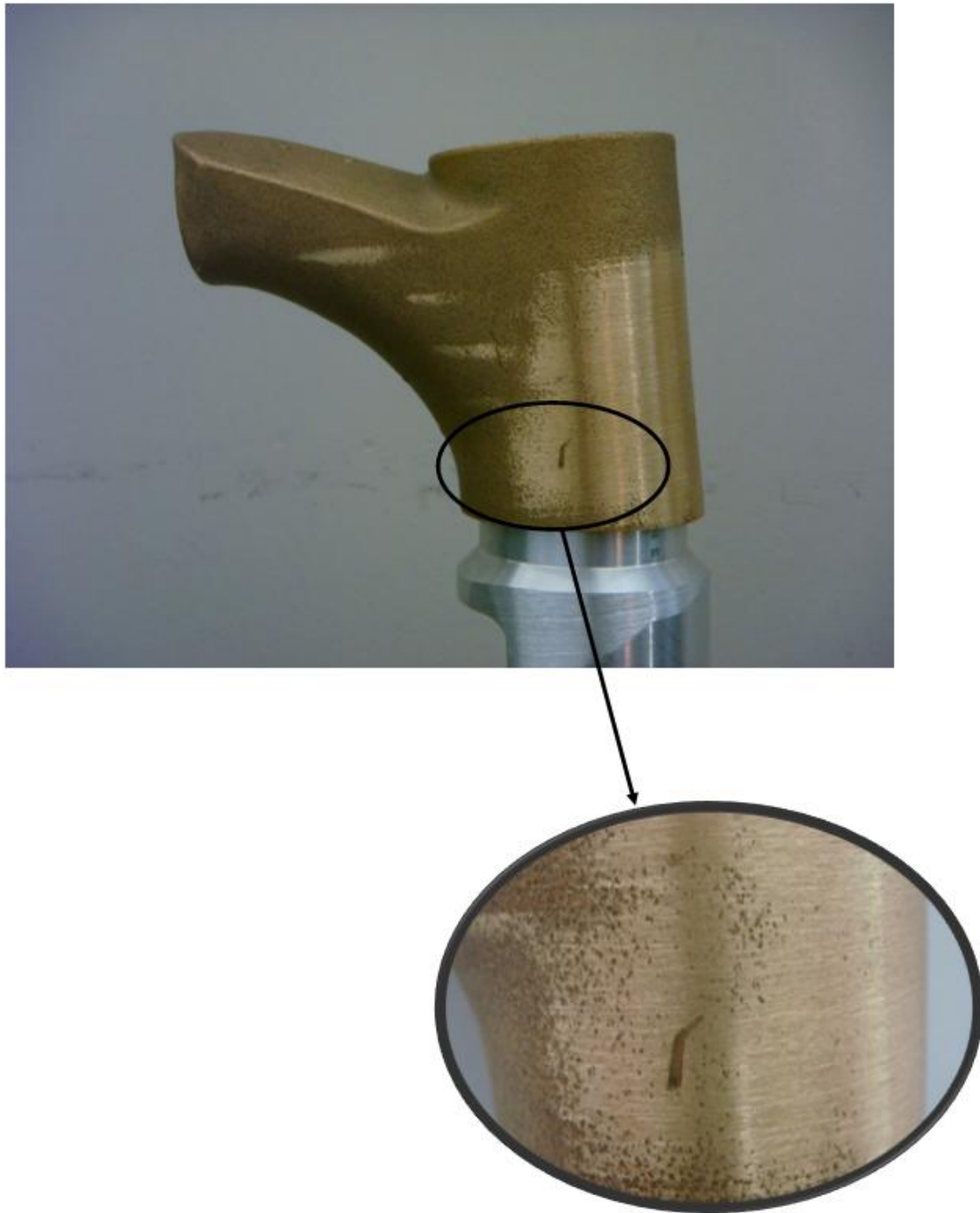


Figura 5.11 - Resultado do ensaio 1 com controlo em velocidade e posição e pormenor III

Comentário (figura 5.11):

- Quantidade de material removido insuficiente para eliminar defeitos de fundição.

Ensaio 1 – Controlo activo de força

Para este ensaio com controlo de força foram apenas definidas duas passagens pela superfície seleccionada (figura 5.12) esperando-se que o controlo activo da força mantivesse a peça sempre em contacto com a lixa. Como tal não seriam necessárias tantas passagens em trabalho.

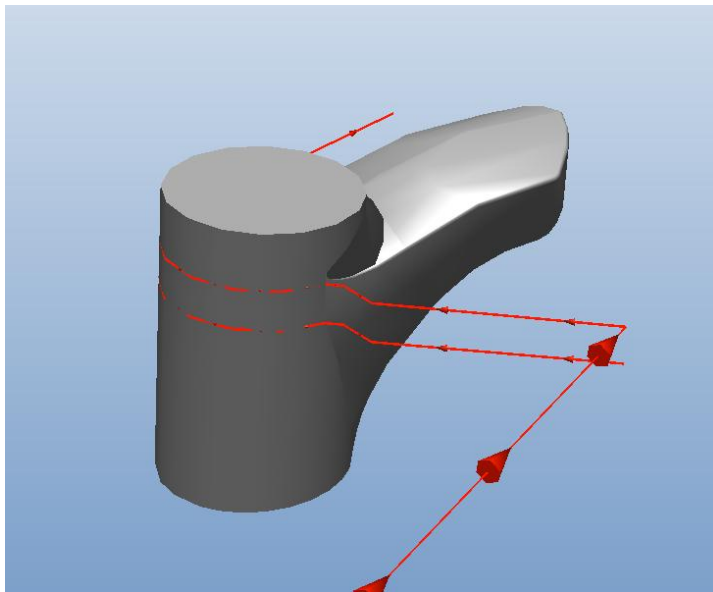


Figura 5.12 - Trajectórias geradas no programa de lixagem com controlo activo de força

Aquando da experimentação do programa criado com a lixa parada, o controlador do robô emitiu uma mensagem de erro afirmando que a velocidade de execução da trajectória seria demasiado elevada para que o controlador tivesse tempo suficiente para realizar a actualização e reorientação do referencial de força definido durante a execução da tarefa. Assim sendo a velocidade de execução deste ensaio foi reduzida em relação ao ensaio em controlo de velocidade e posição.

A força definida para esta experiência foi de intensidade igual a 10N e direcção perpendicular à superfície da lixa. Importante referir que o valor da força foi definido de modo a não exceder a resistência do material da lixa na direcção de contacto, não tendo, no entanto, sido efectuado um estudo das forças envolvidas no processo de lixagem que pudesse concluir quanto ao seu valor óptimo.

Condições do ensaio:

- Controlo do robô em força;
- Velocidade linear da lixa: 26,1 m/s;
- Velocidade linear do *Tool Center Point*: 0,75 mm/s;
- Grão da lixa: 80 grãos/cm²;
- Força definida: 10N na direcção perpendicular à superfície da lixa.

A utilização do controlo activo de força implica previamente a realização da tarefa de calibração do sensor de força para a carga que transporta. Esse procedimento automático consiste na colocação do robô numa posição próxima da posição de trabalho (figura 5.13) e execução de determinados movimentos definidos no próprio controlador. O resultado final é a indentificação da carga movimentada pelo robô, excepto a massa do sensor, e também a posição do centro de gravidade do conjunto (massa + sensor) em relação ao referencial *tool0* do robô (figura 5.7).

Calibração do sensor de força:

- Massa transportada (da carga apenas): 2.86455 Kg
- Posição do centro de gravidade do conjunto (carga + sensor) relativamente ao *TCP – tool0*:
 - X: -0,809645 mm;
 - Y: 3,96137 mm;
 - Z: 107,457 mm.

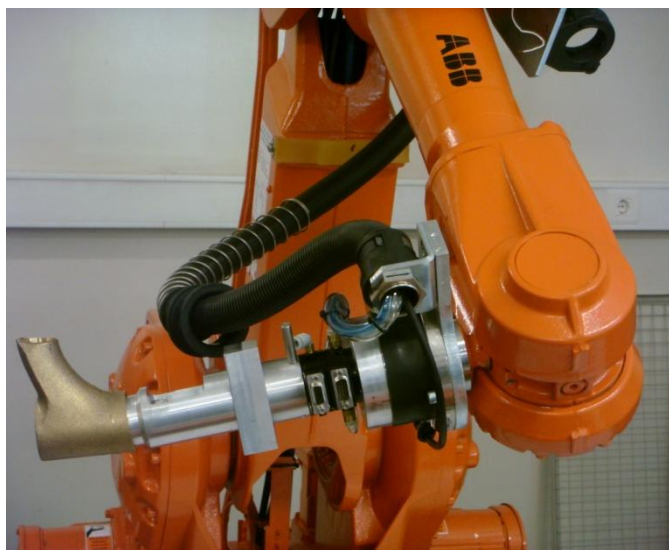


Figura 5.13 - Robô a realizar procedimento de calibração do sensor de força

Resultados:

Os resultados obtidos neste ensaio encontram-se representados nas figuras 5.14 e 5.15.

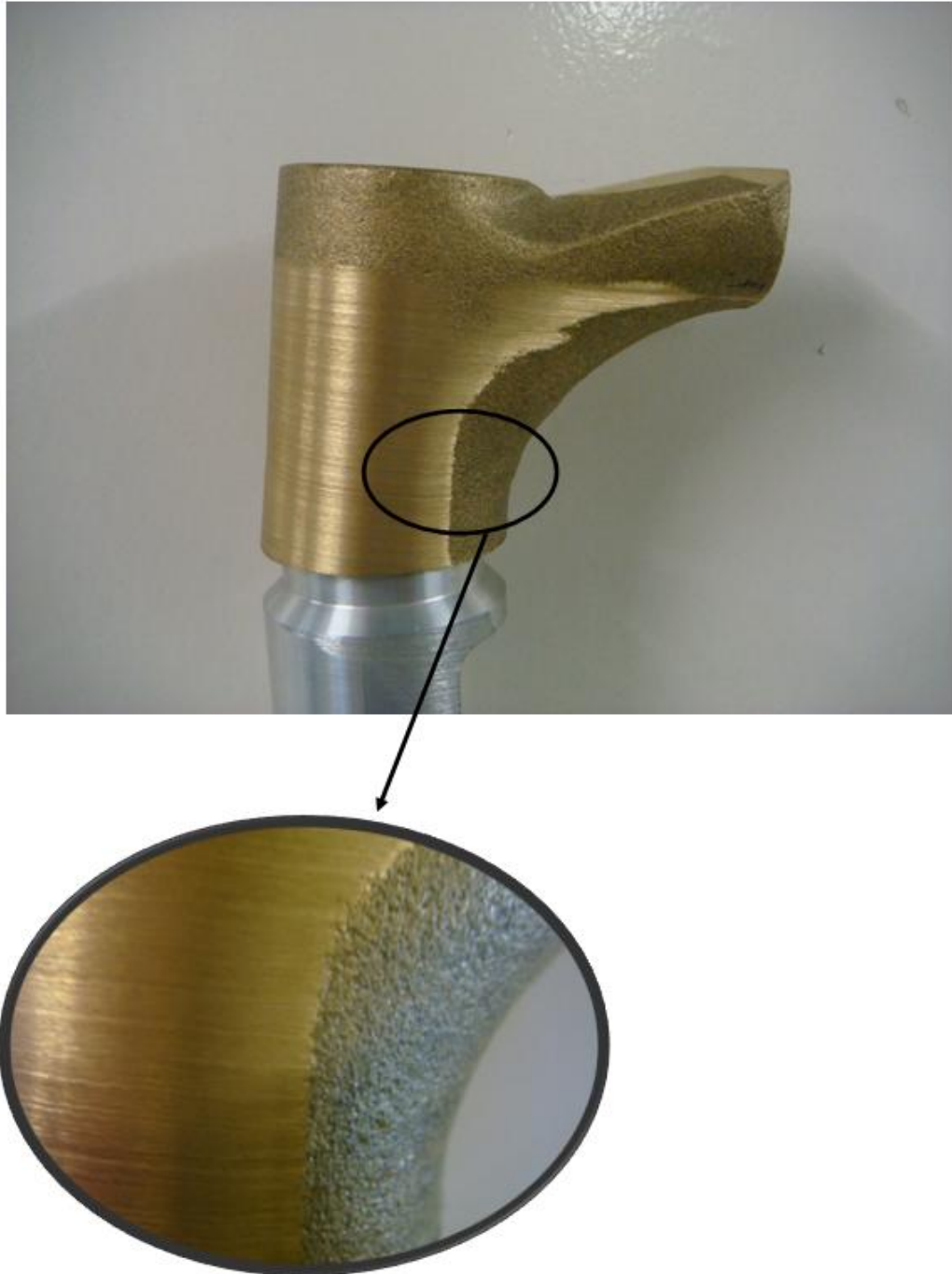


Figura 5.14 - Resultado de ensaio 1 com controlo activo de força e pormenor I

Comentário (figura 5.14):

- Contacto correcto e constante entre a peça e a lixa, sendo possível observar os pontos de início e fim da trajectória de contacto;

- Quantidade de material removido, suficiente para eliminar defeitos de fundição.

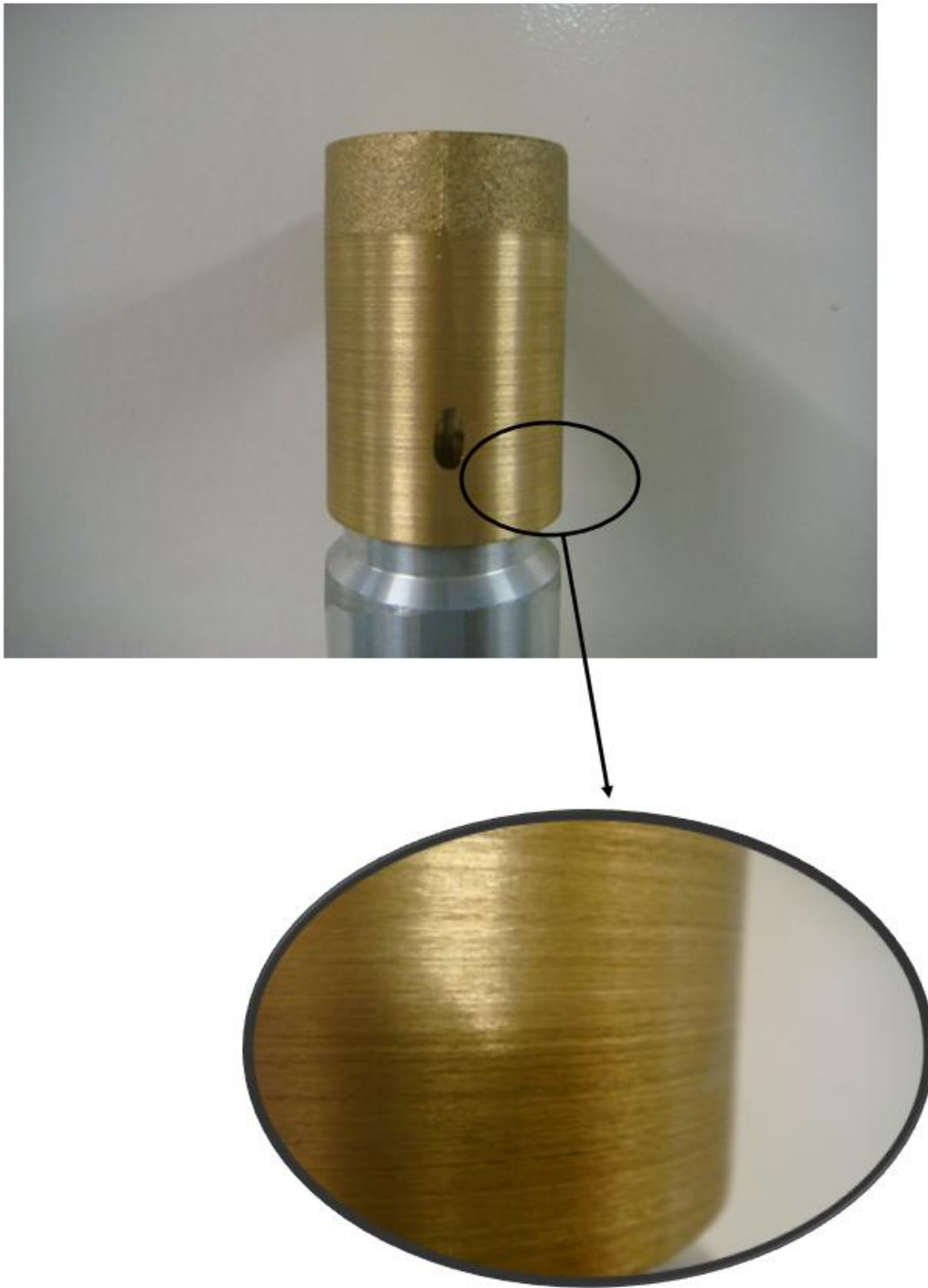


Figura 5.15 - Resultado de ensaio 1 com controlo activo de força e pormenor II

Comentário (figura 5.15):

- Superfície homogénea;
- Toda a superfície abrangida, mesmo só com duas passagens.

Ensaio 1 – Conclusões

Para este primeiro ensaio foi seleccionada uma superfície cilíndrica simples e menos sujeita a erros de modelação 3D. Assim sendo, verificou-se que ocorria um contacto constante entre a peça e a lixa ao longo de toda a trajectória. No entanto, com a programação em velocidade e posição, esse mesmo contacto não foi suficiente para abranger toda a superfície nas cinco passagens programadas existindo ainda algumas zonas com material por remover. Verificou-se, também, que na programação a colocação dos referenciais de ferramenta na superfície modelada da lixa leva a que o robô real não exerça a força de contacto suficiente para remover a quantidade de material necessário para um bom acabamento superficial. Esse problema pode ser contornado colocando os referenciais de ferramenta um pouco atrás da superfície modelada da lixa, sendo essa distância à lixa proporcional à força de contacto pretendida devido à rigidez apresentada pela ferramenta nessa zona.

Com o programa com controlo activo da força de contacto o resultado final foi bastante satisfatório. A intensidade da força programada revelou-se suficiente para eliminar qualquer dos aspectos negativos do resultado do ensaio com controlo em posição. A superfície trabalhada apresentou-se homogénea com apenas duas passagens e sem defeitos de fundição. O único aspecto negativo evidenciado por este ensaio foi a necessidade de diminuir a velocidade de execução do programa pois o controlado não tinha capacidade de reorientar o referencial de força ao longo da trajectória para a velocidade programada. Ainda assim, com cada passagem a ser executada em mais tempo, o programa foi mais curto pois foram necessárias menos passagens .

Este ensaio demonstrou que, para uma geometria simples, a programação off-line expedita e intuitiva aliada ao controlo activo de força integrado nos movimentos do robô permite a obtenção de um bom acabamento superficial.

5.2.2. Ensaio 2

Este segundo ensaio serviu para testar o comportamento dos dois programas gerados com diferentes estratégias de controlo sobre uma superfície mais complexa (figura 5.16) e, portanto, mais sujeita a erros de modelação e mais exigente na geração das trajectórias.

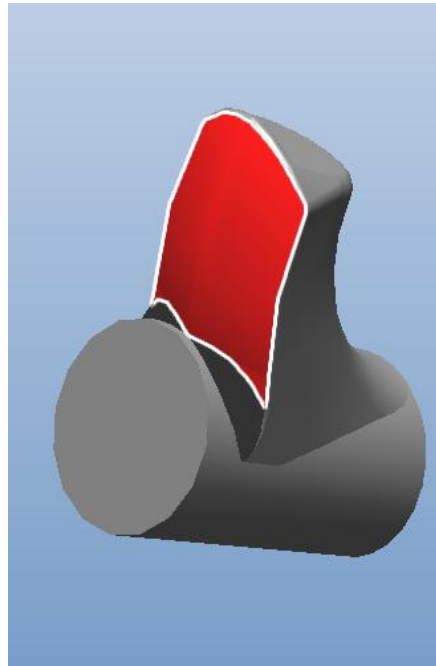


Figura 5.16 - Superfície seleccionada no Ensaio 2

Para este ensaio decidiu-se submeter as duas estratégias de controlo às mesmas condições de teste, antecipando também a obrigação de utilizar uma velocidade mais baixa no programa com controlo activo de força (secção 5.2.1. Ensaio 1). Assim sendo, foram geradas as trajectórias exibidas na figura 5.17 para serem executadas sobre as duas estratégias de controlo.

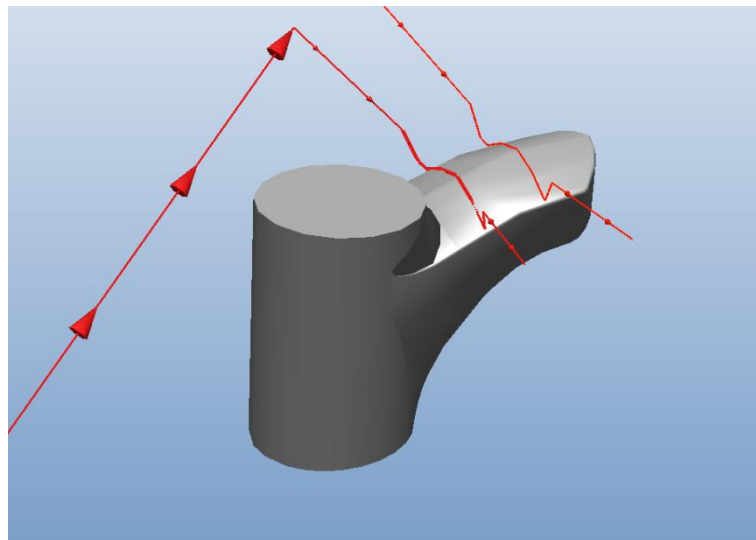


Figura 5.17 - Trajectórias geradas para o Ensaio 2

Ensaio 2 – Controle em velocidade e posição

Condições do ensaio:

- Controle do robô em velocidade e posição
- Velocidade linear da lixa: 26,1 m/s
- Velocidade linear do *Tool Center Point*: 0,75 mm/s
- Grão da lixa: 80 grãos/cm²

Resultados:

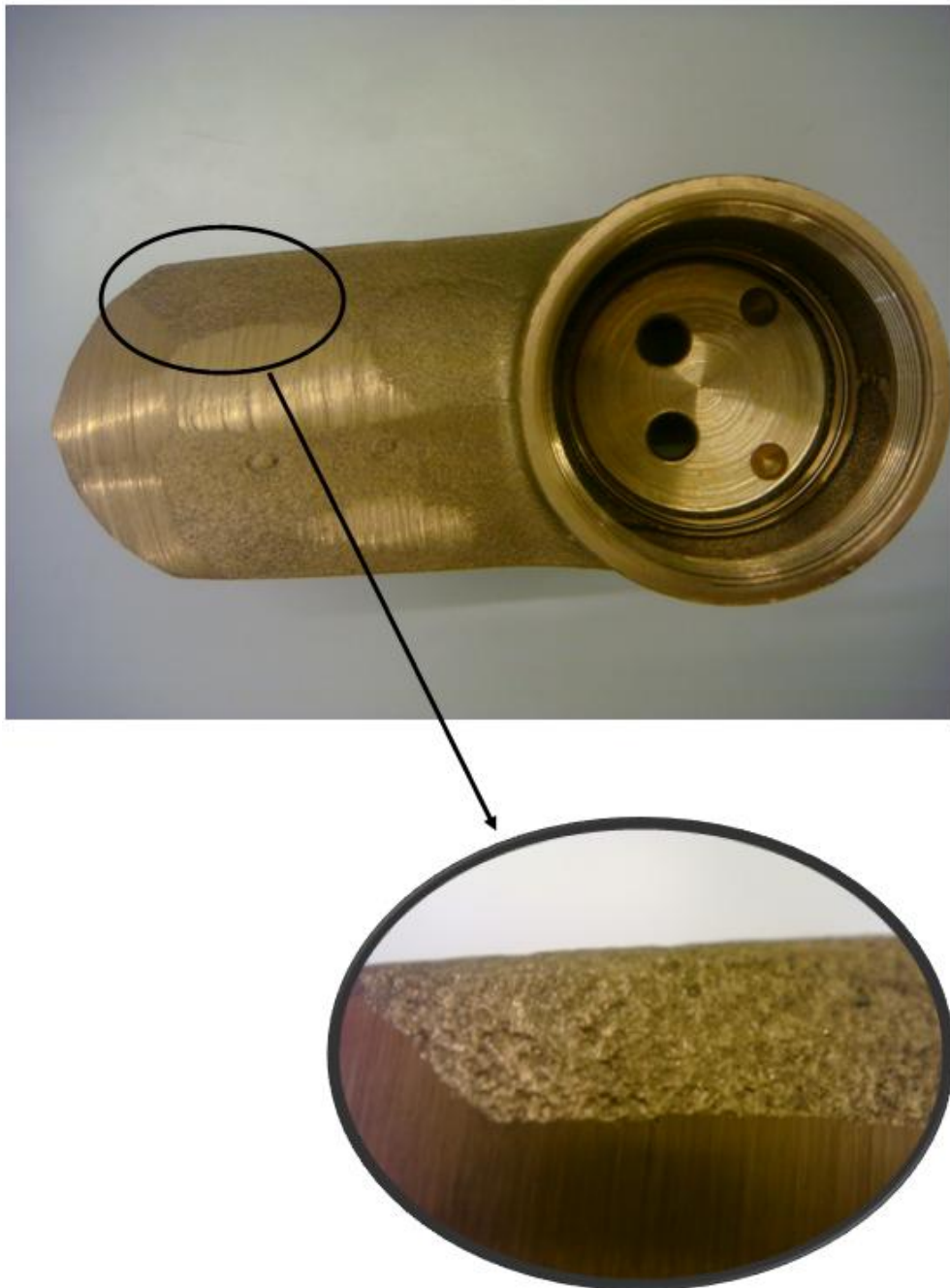


Figura 5.18 - Resultado do Ensaio 2 com controle em posição e pormenor

Comentário (figura 5.18):

- Resultado final muito heterogéneo com zonas de contacto intermitente e zonas sem contacto algum.

Ensaio 2 – Controlo activo de força

Condições do ensaio:

- Controlo do robô em força;
- Velocidade linear da lixa: 26,1 m/s;
- Velocidade linear do *Tool Center Point*: 0,75 mm/s;
- Grão da lixa: 80 grãos/cm²;
- Força definida: 10N/5N na direcção perpendicular à superfície da lixa.

Durante a execução da etapa final do ensaio – teste do programa com a máquina lixadeira ligada – o controlador do robô terminou a execução dos movimentos programados no ponto de contacto inicial entre a peça e a ferramenta. Essa paragem, provocada por um erro do controlador, levou à danificação da peça a trabalhar, uma vez que o controlo de força permaneceu ligado e a exercer a força programa de 10N sobre a lixa.

A solução encontrada para contornar este problema foi reduzir a força de contacto pretendida de 10N para 5N. Assim o programa já foi executado. Dado que o erro apenas aconteceu com a máquina lixadeira ligada (o teste com a máquina desligado decorreu sem problemas), leva a crer que a força de reacção provocada pela lixa em funcionamento introduziu uma perturbação de intensidade elevada na força lida pelo transdutor de força e que o controlador não foi capaz de adaptar a trajectória do robô de modo a obter a força de contacto pretendida. Com a redução da intensidade da força de contacto programada, a reacção da lixa foi bastante inferior pelo que já foi possível obter-se a resultante final pretendida.

Resultados

A figura 5.19 ilustra alguns dos resultados obtidos

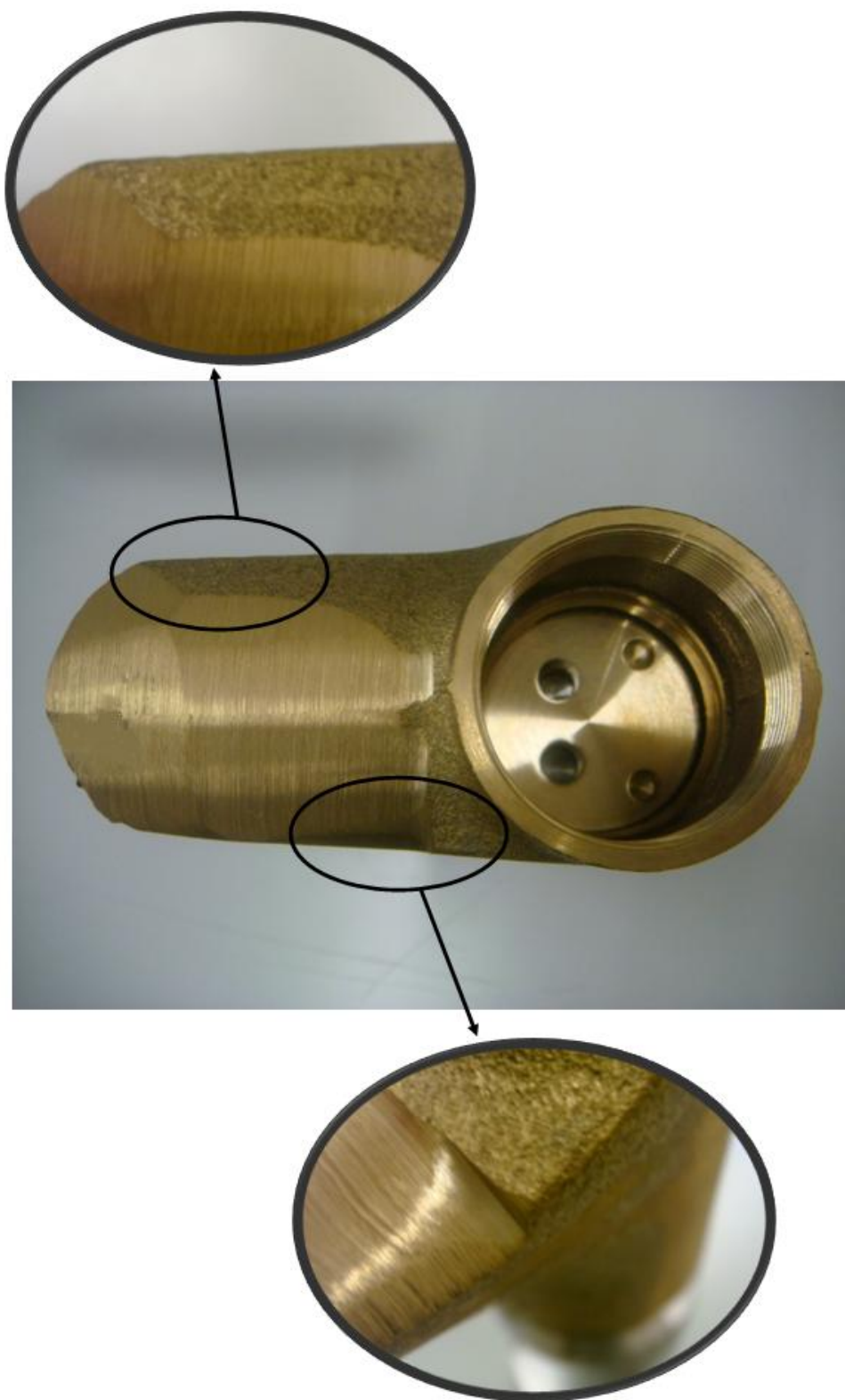


Figura 5.19 - Resultado do Ensaio 2 com controlo activo de força, pormenor (em cima) e dano (em baixo)

Comentário (figura 5.19):

- Superfície não foi toda abrangida pela lixa, mantendo-se a zona sem contacto já revelada no ensaio em controlo de posição;
- Na zona danificada, mostra-se a remoção excessiva de material ocorrida durante o erro referido anteriormente.

Ensaio 2 – Conclusões

Os resultados obtidos neste ensaio foram pouco satisfatórios. Apesar do erro ocorrido e do dano causado na peça, o principal destaque vai para a zona da superfície que não foi trabalhada em ambos os programas. Este defeito no resultado final, mostra a importância da correcta modelação da peça neste método de programação off-line. A diferença entre o modelo e a peça é de tal modo grande que nem com o controlo activo da força de contacto, o robô conseguiu levar a superfície da peça ao contacto com a ferramenta. Constata-se, então, que a trajectória gerada não abrange todos os pontos da superfície real, existindo zonas que não foram levadas a contactar com a lixa no programa em controlo de velocidade e posição. A desejada alteração da trajectória, no programa em controlo de força, não surtiu qualquer efeito uma vez que a forma da trajectória gerada é bastante diferente da superfície real.

5.2.3. Ensaio 3

O terceiro ensaio realizado incidiu sobre o manípulo da torneira, de modo a verificar-se a aplicabilidade do método utilizado também neste componente. A geometria da face seleccionada (figura 6.20) é algo complexa pelo que são esperadas algumas diferenças entre o comportamento em simulação e na célula real.

Para este ensaio foram geradas as trajectórias representadas na figura 5.21 e submetidas às duas estratégias de controlo do robô, nas mesmas condições de teste.

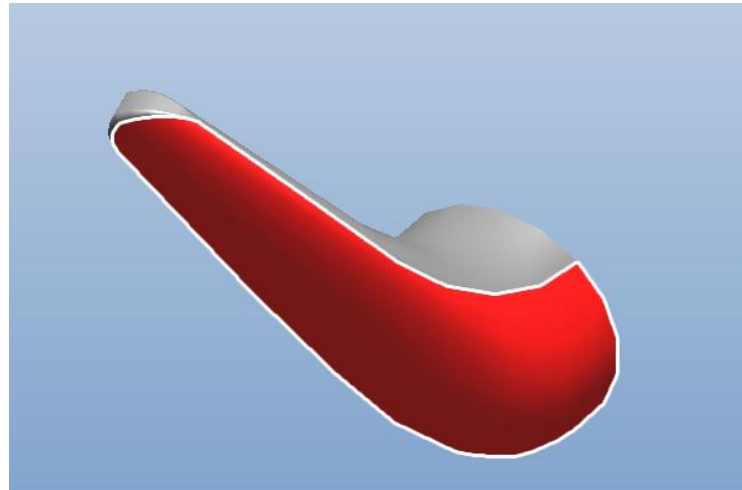


Figura 5.20 - Superfície seleccionada no Ensaio 3

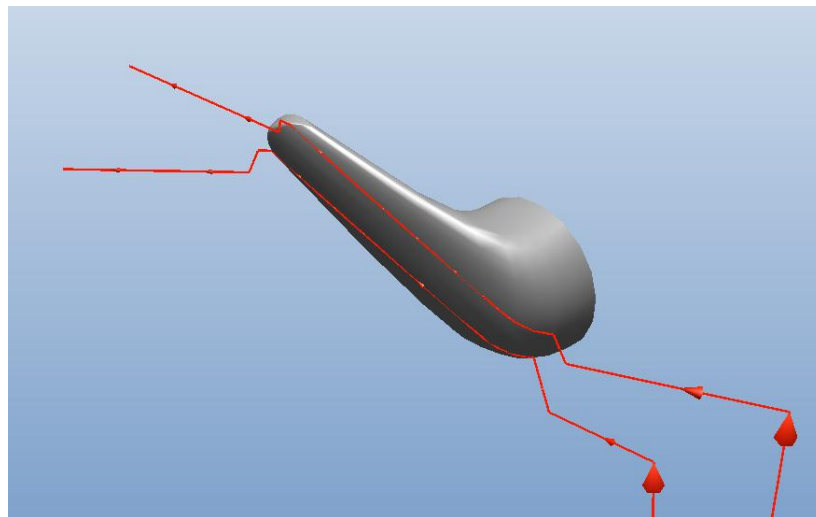


Figura 5.21 - Trajectórias geradas para o Ensaio 3

Ensaio 3 – Controlo em velocidade e posição

Condições do ensaio:

- Controlo do robô em velocidade e posição;
- Velocidade linear da lixa: 26,1 m/s;
- Velocidade linear do *Tool Center Point*: 7,5 mm/s;
- Grão da lixa: 80 grãos/cm².

Resultados

Na figura 5.22 apresentam-se alguns dos resultados obtidos neste ensaio

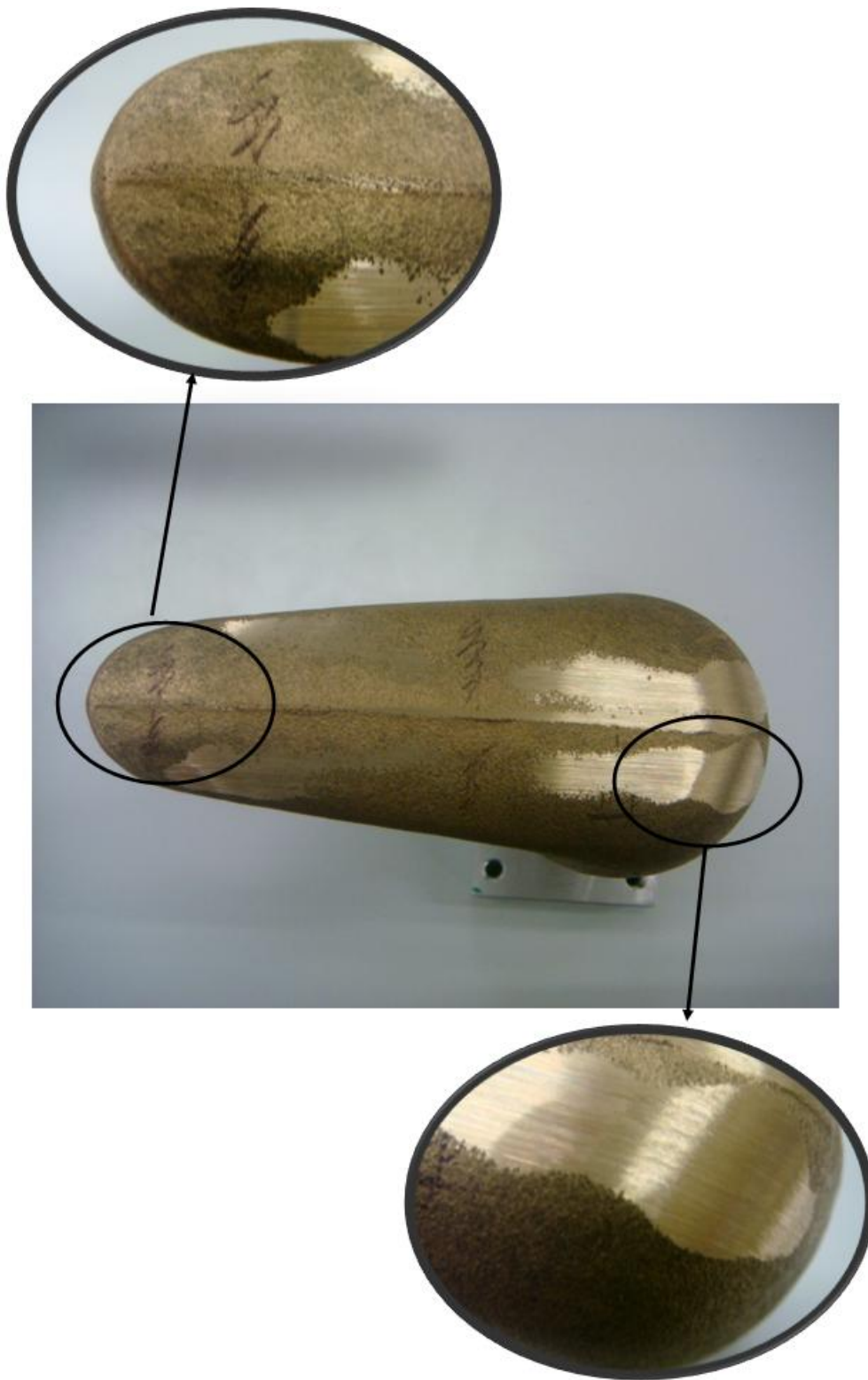


Figura 5.22 - Resultado do Ensaio 3 com controlo em posição e pormenores

Comentário (figura 5.22):

- Contacto entre a lixa e a peça muito irregular, existindo zonas da peça com contacto correcto e outras sem contacto algum.
- Baixa quantidade de material removido.

Ensaio 3 – Controlo activo de força

Uma vez que as peças utilizadas neste ensaio são diferentes daquelas utilizadas em ensaios anteriores, foi necessário voltar a realizar a operação de calibração do sensor de força.

Calibração do sensor de força:

- Massa transportada (da carga apenas): 2.54619 Kg
- Posição do centro de gravidade do conjunto (carga + sensor) relativamente ao *TCP – tool0*:
 - X: -0,966848 mm;
 - Y: -0,44016 mm;
 - Z: 85,3469 mm.

Condições do ensaio:

- Controlo do robô em força
- Velocidade linear da lixa: 26,1 m/s
- Velocidade linear do *Tool Center Point*: 7,5 mm/s
- Grão da lixa: 80 grãos/cm²
- Força definida: 5N na direcção perpendicular à superfície da lixa

Para este ensaio em controlo de força, já foi possível utilizar uma velocidade mais elevada e igual à do ensaio em controlo de posição. Neste caso, o referencial de força não sofre alterações de orientação tão bruscas como no Ensaio 1, pelo que o controlador aceita uma velocidade de execução de valor superior.

Resultados

Alguns resultados obtidos com este teste podem ser observados na figura 5.23.

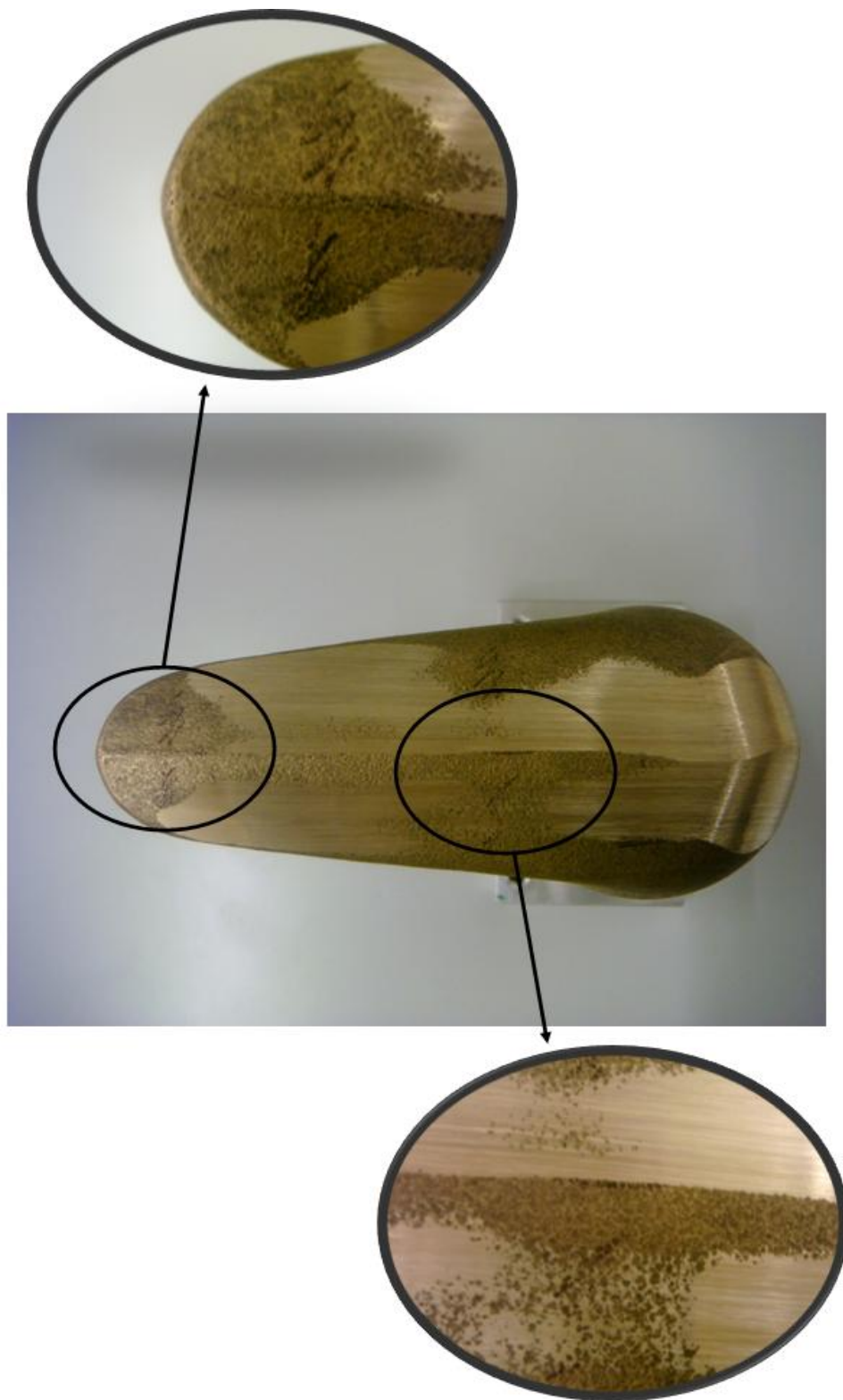


Figura 5.23 - Resultados do Ensaio 3 com controlo activo de força e pormenores

Comentário (figura 5.23):

- Contacto intermitente entre a lixa e a peça;
- Maior quantidade de material removido, no entanto, não existe abrangência de toda a superfície;
- Manutenção da inexistência de acabamento na ponta final do manipulador.

Ensaio 3 – Conclusões

Os resultados obtidos neste ensaio ficaram aquém das expectativas. As duas trajectórias geradas foram insuficientes para cobrir a superfície superior da peça, concluindo-se que a área de abrangência por parte da lixa é, na realidade, menor que a definida no programa. A incerteza acerca da área de trabalho da lixa é uma das grandes limitações do ensaio realizado. Não justifica, no entanto, a existência de áreas não trabalhadas na direcção das trajectórias aplicadas.

O contacto intermitente entre lixa e peça durante a execução do programa com controlo em posição é indicador de erros existentes na modelação 3D da peça. As trajectórias geradas com base na superfície virtual não acompanham a superfície real da peça fazendo com que o robô não se movimente no sentido de promover o contacto de trabalho.

Uma vez que as trajectórias são criadas através das faces seleccionadas no modelo virtual da peça, o robô adquire as configurações de eixos necessárias a cumprir o movimento programado. Quando, com o controlo activo de força, se procura o contacto na direcção perpendicular da lixa, o controlador do robô recalcula a trajectória apenas nessa direcção. Essa adaptação unidireccional é, então, insuficiente para eliminar os efeitos de uma modelação incorrecta.

6. Conclusões e Trabalhos futuros

6.1. Dificuldades encontradas

É importante registar algumas das dificuldades encontradas e limitações que foram sentidas ao longo da execução deste projecto. A descrição dos problemas enfrentados possibilita uma melhor análise do trabalho executado bem como a compreensão de algumas das decisões tomadas.

Devido à reduzida divulgação da utilização de programação off-line em células robotizadas, a procura de informação acerca desse tema foi bastante dificultada, sendo ainda mais escassa a informação relativa ao uso do controlo activo de força integrado no robô. O facto de esta combinação não ser utilizada em meio industrial justifica a ausência quase total de material informativo (apenas algumas notícias em revistas da especialidade) e a apreensão por parte dos agentes industriais contactados.

O facto da execução do trabalho ter ocorrido em ambiente laboratorial limitou de alguma forma a definição dos objectivos e a constituição da célula robotizada. Durante todo o processo de elaboração do trabalho foram detectadas restrições impostas pelas condições disponíveis no Laboratório de Robótica do DEMec principalmente relacionadas com o posicionamento relativo dos elementos pertencentes à célula. Assim sendo, foi decidido realizar a simulação do processo de lixagem da totalidade dos componentes da torneira, no entanto, os programas não foram postos em prática na sua totalidade pois requeriam uma utilização exaustiva da célula que não se encontrava preparada para tal. Optou-se pois, por realizar alguns ensaios de modo a testar os conceitos envolvidos no projecto.

Durante o processo de programação off-line, a grande maioria das dificuldades e dos erros encontrados encontram-se relacionados com a utilização do software RobotStudio® para gerar programas com controlo activo de força. Apesar da opção de utilização do pacote de software FC Pressure se encontrar disponível no programa, a manipulação das trajectórias geradas usando a estratégia de controlo activo da força de

contacto levou ao aparecimento de erros e ao aumento do tempo utilizado para a programação. Também relacionado com o controlo de força, não é possível realizar a simulação dos programas que envolvam essa estratégia de controlo impossibilitando, pois, a análise da validade da solução. Mais uma vez, deve ser dado algum tempo para a adaptação do software à inovação introduzida pelo controlo activo de força integrado no robô.

Finalmente, a ausência do estudo pormenorizado do processo de lixagem, uma vez que fica fora do âmbito deste trabalho, limitou bastante a programação e execução dos ensaios realizados. Aquando da definição dos parâmetros de velocidade de execução e de força de contacto pretendida, existiu apenas a preocupação de se utilizar valores que não excedessem a capacidade da máquina utilizada e que proporcionassem condições de segurança na execução dos testes, mantendo-se à margem da análise dos resultados obtidos.

6.2. Conclusões

Neste trabalho de dissertação a conclusão da definição dos objectivos foi feita após uma análise da utilização a nível industrial das células robotizadas para operações de acabamento e o seu método de programação e controlo. Assim sendo, foi posta em prática a seguinte metodologia de trabalho:

- Caracterização das operações de lixagem robotizadas;
- Programação off-line de uma célula robotizada destinada a operações de lixagem;
- Concepção e simulação de uma célula robotizada destinada à lixagem de torneiras com diferentes estratégias de controlo de força.

Uma vez que este tipo de solução constitui uma novidade no sector industrial, o projecto desenvolveu-se no sentido de validar os métodos propostos para uma posterior utilização em ambiente fabril e integração numa linha de produção.

Foram elaborados dois programas para lixagem de torneiras (um para o corpo da torneira, outro para o manípulo) e submetidos, parcialmente, a ensaios simples numa célula montada com as limitações já conhecidas.

A análise dos resultados obtidos permite encerrar algumas conclusões acerca de toda a metodologia utilizada.

O método de programação off-line e de simulação de células robotizadas para operações de acabamento exige um grande esforço de modelação 3D de modo a poder ser replicado virtualmente o ambiente real da célula. Como o trabalho se realiza ao nível do acabamento superficial de peças com geometrias complexas é necessário extremo cuidado na modelação da realidade. Com os ensaios executados ficou comprovada a importância de um bom trabalho de modelação, pois uma incoerência no modelo virtual da peça leva à criação de trajectórias erradas. No entanto, ultrapassada com sucesso essa fase, a geração de trajectórias para o robô é realizada de uma forma expedita e quase instantânea tendo como base o modelo virtual da peça a trabalhar e as informações da ferramenta a utilizar. Os ensaios realizados mostraram que existe uma elevada sincronia do meio real com o meio virtual modelado, contudo foi necessário intervir ao nível do código RAPID para efectuar algumas correcções nos programas. Essas correcções deveram-se, essencialmente, às limitações introduzidas pela célula real existente no laboratório, mais concretamente devidas a elementos que não se encontram modelados como os sistemas de cablagem e as tubagens do sistema pneumático de mudança de ferramenta.

Os ensaios realizados com controlo de velocidade e posição mostraram que a programação off-line, gráfica e intuitiva permite a programação do robô muito próxima de uma solução final. Contudo, verificou-se a existência de alguns defeitos na qualidade final da lixagem, nomeadamente devido ao contacto intermitente entre peça e ferramenta levando a um acabamento heterogéneo e com baixa taxa de remoção de material. Porém, realizando online alguns ajustes na posição dos referenciais de trabalho é possível obter um resultado aceitável.

Ao nível do método de programação das células robotizadas para operações de acabamento, é proposta uma utilização híbrida do método off-line e do método online. A utilização do método off-line permite uma geração célere de trajectórias baseando-se no modelo virtual da peça. A criação de um novo programa de lixagem para uma nova peça é, portanto, realizada num tempo bastante reduzido não havendo a necessidade de parar a produção na célula robotizada. Os ajustes necessários para promover um acabamento correcto devem ser realizados online pois são apenas necessárias pequenas

alterações. Em suma, este método exige um aumento nos custos de modelação e programação, contra balanceados com um aumento da produção da célula que se mantém inactiva por um período bastante inferior do que quando é utilizada uma programação exclusivamente online.

Os ensaios realizados com controlo activo de força permitiram concluir que é possível exercer um maior controlo sobre a taxa de material removido e o acabamento final pretendido. No entanto, era esperado que esta estratégia de controlo conseguisse contornar os erros de modelação ao recalcular as trajectórias programadas para promover um contacto correcto. Tal não ocorreu verificando-se que aquelas zonas não trabalhadas com controlo de posição também não foram trabalhadas com o controlo activo de força, demonstrando, mais uma vez, a importância de uma correcta modelação. A observação cuidada dos ensaios permitiu também concluir que os resultados menos bons obtidos com controlo activo de força se devem, também, à utilização de uma máquina lixadeira bastante simples que limita as opções de posicionamento da peça perante a lixa. A utilização de uma máquina de nível industrial, com rolos de contacto dispostos em diferentes posições aumentaria as possibilidades de sucesso do controlo de força ao permitir uma maior variedade de zonas de trabalho e maior flexibilidade no posicionamento do robô.

A grande vantagem do controlo activo de força retirada dos ensaios realizados, especialmente do primeiro ensaio, consiste na possibilidade de se gerar off-line programas com menor número de trajectórias. Devido ao conhecimento prévio da força de contacto a ser exercida é possível obter-se um acabamento aceitável com menor tempo gasto em programação e produção das peças, aumentando, assim, o volume de produção da célula.

A área do controlo activo de força integrado no robô é muito recente e implica custos de implementação bastante elevados, sendo aconselhada a continuação da investigação neste campo antes de se promover uma tentativa de integração no meio industrial.

6.3. Trabalhos Futuros

Este projecto, realizado em ambiente laboratorial, constitui o início da pesquisa numa área tecnológica bastante recente. Como tal, os problemas e as dificuldades que foram surgindo são fruto da novidade que constitui este tipo de solução e de alguma inexperiência existente perante os dois principais temas aqui tratados: a programação off-line e o controlo activo de força.

Como tal, e já tendo neste projecto uma base de conhecimentos sólida, é possível propor a execução de outros estudos e testes a fim de se concretizar devidamente o estudo aqui realizado.

Como a modelação 3D de peças foi identificado como sendo um dos campos mais influentes e limitativos para o sucesso deste tipo de programação, propõe-se a execução de testes baseando-se em modelos obtidos por um método de levantamento mais preciso do que aquele utilizado neste projecto ou mesmo utilizando modelos 3D de produção das peças, caso a empresa fabricante os utilize.

Foi também revelada uma dificuldade na parametrização da operação de lixagem aquando da sua programação, pelo que se deve realizar um estudo mais intensivo da operação de acabamento em causa com um intercâmbio de conhecimento entre a Engenharia de Automação e a Engenharia de Produção. Este estudo proposto terá maior relevância para a definição das operações que incluem a utilização do controlo activo de força integrado no robô.

Por fim, deverá passar-se do estudo em laboratório para o estudo em células industriais de modo a concretizar-se e consolidar-se o conhecimento adquirido neste projecto.

Referências

- ABB. (2007). *Application manual - Force Control for Machining*. Västerås: ABB.
- ABB. (2010). *Operating manual - Machining PowerPac*. Västerås: ABB.
- ABB. (2008). *Operating manual - RobotStudio*. Västerås: ABB.
- Abreu, P. (2009). *Robótica - Acetatos e Apoio às Aulas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Abreu, P. (2009). *RobotStudio 5.12 - Manual de Utilização*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bogue, R. (2009). Finishing Robots: a review of technologies and applications. *Industrial Robot: an International Journal* , pp. 6-12.
- Brumson, B. (2007). Robo Removal: Parts Finishing is Big Business for Robots. *Robotic Industries Association* .
- Carlson, G. (2002). Advancements in Automated Polishing, Buffing and Deburring. *Product Finishing* .
- Fixell, P., Groth, T., & Isaksson, M. (2007). A touching movement. *ABB Review* , 22-25.
- Huang, H., Gong, Z. M., Chen, X. Q., & Zhou, L. (2002). Robotic Grinding and polishing for turbine-vane overhaul. *Journal of Materials Processing Technology* , 140-145.
- Kuhkenkoetter, B. (2006). Development of a Robot System for Advanced High Quality Manufacturin Processes. In *Acta Polytechnica Vol. 46*. Czech Technical University Publishing House.
- Levine, W. S. (1996). Force control of robot manipulators. In *The Control Handbook*. CRC Press.
- Miekstyn, P. (2002). Robot Finishing Applications. Acme Manufacturing Company.

MotomanRobotics. (2001). Robotics integral to steel polishing automation. *Engineeringtalk* .

Nemec, B., & Zlajpah, L. (2008). Robotic cell for custom finishing operations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* , 33-42.

Ogando, J. (2007). Force Control and Machine Vision Guide Robots. *Design News* .

Pagilla, P., & Yu, B. (2001, Março). Robotic Surface Finishing Processes: Modeling, Control and Experiments. *Journal of dynamic systems, measurement ando control* , pp. 93-102.

Takeuchi, Y., Asakawa, N., & Ge, D. (1993). Automation of polishing work by an industrail robot. *JSME Internationa Journal* , 556-561.

Todd, R., Allen, D., & Alting, L. (1994). *Fundamental principles of manufacturing processes*. New York: Industrial Press Inc.

Wang, J., Zhang, H., & Fuhlbrigge, T. (2008). Force Control Technologies for New Robotic Applications. *IEEE International Conference on Technologies for Pratical Robot Applications*.