

Polimento Robotizado com Controlo de Força

João Carlos Alves Henriques

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu



Mestrado em Engenharia Mecânica

Março de 2022

"Nada é difícil se for dividido em pequenas partes." (Henry Ford)

Resumo

À medida que aumentam as exigências no mercado da qualidade da superfície de peças, processos como a operação de polimento estão-se a tornar cada vez mais complexos. Atualmente, grande parte desse trabalho ainda é feito manualmente, por operadores muito habilitados. Consequentemente, este processo acaba por ser dispendioso, lento e pouco eficiente. Como resposta a este problema surge o polimento robotizado com controlo de força, o tema desta dissertação.

O controlo de força permite que o robô controle as forças de contacto na superfície a ser trabalhada, uma operação crucial para obter bons resultados no polimento automatizado. Numa primeira instância são apresentadas as soluções de polimento robotizado com controlo de força, mais relevantes no mercado. De seguida é analisada através da experimentação, a implementação da operação de polimento no robô *ABB IRB2400* dotado de um sistema de controlo de força, que se encontra disponível no Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Todos os procedimentos para a preparação e programação destas experiências são descritos detalhadamente. É analisada a capacidade do controlo de força do robô em questão para a variação de um conjunto de parâmetros: a força de contacto programada, a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de avanço da ferramenta, a inclinação da ferramenta, a complexidade da geometria da peça e o método de programação utilizado.

Verificou-se que o *spindle* em conjunto com a ferramenta de polimento, quando se encontram em rotação, introduzem ruído significativo na leitura do sinal do sensor de força, dificultando a capacidade do controlo de força do robô, em particular, para baixas forças de contacto programadas. Para ultrapassar estas limitações, a velocidade de rotação da ferramenta foi limitada a 3000 rotações por minuto e foi programada uma força de contacto de 15N, tendo sido possível verificar a capacidade do robô em implementar o controlo de força.

Robot polishing with force control

Abstract

As market demands on surface quality increase, processes such as polishing operations are becoming more complex. Today, most of this work is still done manually by highly skilled operators. Consequently, this process turns out to be expensive, slow, and inefficient. As an answer to this problem, robotic polishing with force control is considered and addressed on this dissertation.

Force control allows the robot to control the contact forces on the surface of the piece, a crucial operation to obtain reliable results in automatic polishing. In a first instance, it is presented the relevant solutions in the market for robot polishing executed with force control. Then, it is analysed through experimentation, the polishing operation in the ABB IRB2400 robot equipped with force control system. This robotic cell is available at the Robotics Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Engineering of the University of Porto. All preparation procedures and experiments are described in detail. It is analysed the ability of the robot on controlling the contact forces for variations of different parameters: the programmed contact force, the tool rotation speed, the tool feed speed, the complexity in the geometry of the surface to be polished and the programming method used.

It was verified that the spindle and the polishing tool used, when they are rotating, they introduce noise in the force sensor, limiting the capability to implement force control, in particular, for low contact forces. To overcome these limitations, the operating speed of the polishing tool was limited to 3000 rpm and the programmed contact force set to 15N. With these operating conditions it was possible to implement and verify the capability of the robot.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de deixar um profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Paulo Abreu, pela orientação, paciência e por todo o tempo despendido, que me permitiu realizar esta dissertação com o devido apoio e confiança.

Gostaria de agradecer também a todas as grandes amizades construídas ao longo destes anos, nesta Faculdade, por todos os momentos bem passados e histórias vividas que levo comigo para o resto da vida.

À minha família, por me proporcionarem a oportunidade de estudar, e pelo apoio dado em todas as decisões tomadas.

Aos meus primos do quebra, por todo o apoio e por estarem sempre presentes quando mais precisei deles.

Aos amigos de Esmoriz, com quem cresci, e continuarei a crescer ao longo da minha vida. A todos aqueles que, de certa forma, contribuíram para o meu desenvolvimento académico e pessoal, deixo aqui a minha sincera gratidão.

Índice

Resumo.....	ii
Agradecimentos.....	vi
Índice.....	viii
Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xiv
1. - Introdução.....	1
1.1 - Introdução do polimento robotizado no contexto atual.....	1
1.2 - Objetivos.....	3
1.3 - Estrutura da dissertação.....	4
2. - Polimento Robotizado.....	5
2.1 - Polimento.....	5
2.2 - Soluções automáticas industriais de polimento.....	7
2.3 - Robôs de Polimento.....	8
2.4 - Controlo de força.....	9
2.5 - Soluções de polimento robotizado existentes.....	12
3. - Metodologia do trabalho.....	29
3.1 - Abordagem proposta.....	29
3.2 - Recursos existentes.....	29
4. - Preparação dos ensaios experimentais.....	40
4.1 - Localização e fixação da prancha.....	40
4.2 - Programação Online.....	42
4.3 - Programação Offline.....	55
4.4 - Método de recolha de Dados.....	60
5. - Apresentação e análise dos dados obtidos.....	62
5.1 - Análise das interferências na leitura das forças envolvidas, com o robô parado e o <i>spindle</i> ligado.....	63
5.2 - Análise da capacidade de medição do sensor.....	66
5.3 - Análise a força de contacto máxima, sem movimento.....	69
5.4 - Análise a força de contacto máxima, com movimento.....	71
5.5 - Ensaio com a ferramenta inclinada.....	74

5.6 - Ensaio às velocidades de avanço	78
5.7 - Método de geração da trajetória para a superfície plana da prancha.....	80
5.8 - Avaliação da capacidade do controlo de força para superfícies complexas.	84
6. - Conclusões.....	89
6.1 - Conclusões.....	89
6.2 - Trabalhos futuros.....	90
Referências.....	91
Anexos	93
A: Código <i>RAPID</i> desenvolvido para o polimento da face plana da prancha, na programação offline	94
B: Código <i>RAPID</i> desenvolvido para o polimento da face lateral da prancha, na programação offline	97

Lista de figuras

Figura 1: Número de robôs vendidos por ano no mundo.	1
Figura 2: Robôs instalados anualmente a nível mundial, por setor de atividade.....	2
Figura 3: Exemplo de uma peça metálica antes de ser polida (esquerda) e depois de polida (direita).....	5
Figura 4: Ferramenta de polimento composta por uma boina de esponja.	6
Figura 5 : Zeeko IRP1200, máquina CNC de polimento, (www.glyndwrinnovations.co.uk).	7
Figura 6: Robô ABB, adaptado para polimentos. (www.meshautomationinc.com)	8
Figura 7: (a) Robô de Polimento onde a peça é fixa; (b) Robô de Polimento onde a ferramenta é fixa [4].....	9
Figura 8: (a) Mola colocada na cinta de polimento (ferramenta fixa); (b) Mola colocada no manipulador do robô (peça fixa) [4].....	11
Figura 9: Ilustração de ferramentas fixas com <i>compliance</i> : (a) <i>compliance</i> no eixo horizontal; (b) <i>compliance</i> radial [16].	12
Figura 10: Acessórios de Polimento Robotizado desenvolvido pela SHL, respetivamente modelo: DKS, EP100, UBT550 (www.shl.pt).	13
Figura 11: Célula Robotizada com várias estações de polimento da INTEC ROBOTICS. (www.intecrobotics.com).....	14
Figura 12: Ilustração de ferramenta passiva para ser montada no manipulador [4].	14
Figura 13 : Representação do balanço de forças envolvidas numa ferramenta passiva montada no elemento terminal do robô, com ênfase no efeito da gravidade para diferentes orientações [16].....	15
Figura 14: Ilustração do funcionamento de um mecanismo passivo de contrabalanço mecânico [16].....	16
Figura 15: Ilustração do funcionamento de um mecanismo passivo de contrabalanço pneumático [16].	18
Figura 16: Representação do funcionamento de uma ferramenta ativa colocada no fim do manipulador [16].....	20

Figura 17: Representação dos componentes de uma ferramenta ativa colocada no fim do manipulador [17].....	20
Figura 18: Robô industrial a utilizar o controlo de força fornecido pelos acessórios da <i>PushCorp</i> (www.PushCorp.com).	22
Figura 19: Alguns dos dispositivos de controlo de força comercializados pela <i>PushCorp</i> , (www.pushcorp.com).	23
Figura 20: Ilustração do controlo de força ativo embebido no braço robótico [16].	24
Figura 21: Transdutor de força ATI F/T (ati-ia.com)	25
Figura 22: Acessório para robôs colaborativos - <i>Robotiq Sanding Kit</i> , (www.Robotiq.com).	27
Figura 23: Exemplo de trajetória a ser calculada pelo <i>sanding kit</i> da <i>Robotiq</i>	28
Figura 24: Célula Robótica disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP (DEMec).....	30
Figura 25: Diferentes componentes da célula robótica.....	31
Figura 26: Ferramenta de polimento adaptada para a análise experimental.....	32
Figura 27: Forças e momentos aplicados no transdutor, no seu respetivo eixo de coordenadas [13].....	32
Figura 28: Disposição dos eixos da ferramenta e do transdutor, num robô ABB com controlo de força. X_s , Y_s e Z_s representam o referencial da ferramenta, e X_r , Y_r e Z_r representam o referencial do transdutor [14].	33
Figura 29: Funcionamento do modo <i>FCSpeedChange</i> [15].	34
Figura 30: Demonstração da variação da velocidade de percurso, no modo <i>FcSpeedChange</i> para 3 níveis de velocidade programados [15].	35
Figura 31: Ilustração do modo de funcionamento do modo de controlo <i>FCPressure</i> da ABB [15].....	36
Figura 32: Software <i>RobotStudio</i> desenvolvido pela ABB (new-abb.com).	37
Figura 33: <i>Balance-board</i> , em cima uma aplicação. Em baixo a <i>balance-board</i> utilizada.....	38
Figura 34: Duas configurações testadas para a localização da peça na mesa de trabalho para polir a superfície plana, (esquerda), e para polir as laterais da prancha, (direita).....	41
Figura 35: Consola <i>FlexPendant</i> , do controlador <i>IRC5</i>	42
Figura 36: Exemplo da disposição de o referencial do disco de polimento, (X_1 , Y_1 , Z_1), e a sua localização em relação ao <i>tool0</i> , (X_0 , Y_0 , Z_0).....	44

Figura 37: Visualização do programa para definir o referencial da ferramenta no <i>FlexPendant</i>	45
Figura 38: Fresa utilizada para definir o TCP do disco de polimento.	46
Figura 39: Os 4 pontos utilizados para definir o TCP do disco de polimento, com o auxílio de uma fresa.	46
Figura 40: <i>RobotWare Machining FC</i> , funcionalidade do <i>FlexPendant</i>	48
Figura 41: Introdução a criação de um projeto no <i>RobotWare Machining FC</i> , do <i>FlexPendant</i>	49
Figura 42: <i>Settings</i> do <i>RobotWare Machining FC</i> do <i>FlexPendant</i>	50
Figura 43: <i>Paths</i> do <i>RobotWare Machining FC</i> do <i>FlexPendant</i>	50
Figura 44: <i>Summary</i> no <i>FlexPendant</i> do <i>RobotWare Machining FC</i>	51
Figura 45: <i>Teach</i> no menu <i>Path</i> do <i>RobotWare Machining FC</i> no <i>FlexPendant</i>	52
Figura 46: Disposição recomendada dos targets de aproximação.	52
Figura 47: Direção da ferramenta nos targets de contacto.....	53
Figura 48: Parâmetros de aproximação (esquerda) e de saída (direita).	54
Figura 49: Trajetos visualizados na interface <i>learn</i> , para um dos ensaios realizado na prancha. A esquerda o trajeto ensinado no teach. A direita o mesmo trajeto, mas após o <i>learn</i>	55
Figura 50: Representação de parte da célula robótica disponível no DeMec, no software <i>RobotStudio</i>	56
Figura 51: Exemplo de um código básico em <i>RAPID</i> para o <i>FCPressure</i>	58
Figura 52: Exemplo de código, com os argumentos todos que a função <i>FcPress1LStart</i> pode ter.	59
Figura 53: Código <i>RAPID</i> utilizado para recolha de dados (parte 1).	60
Figura 54: Código <i>RAPID</i> utilizado para recolha de dados (parte 2).	61
Figura 55: Análise dos ruídos causados pela rotação, experiência 1.....	65
Figura 56: Ensaio 2.1 - Adição de uma massa de 2.6kg.	67
Figura 57: Ensaio as forças de contacto (de 10 N e 15 N) em movimento para 3000 rpm e sem rotação	72
Figura 58 : Contacto entre um disco de polimento e uma superfície de geometria complexa, com a ferramenta inclinada, para um ângulo θ entre a superfície inferior do disco e o plano tangente a superfície da peça [22]......	77

Figura 59: Análise à variação da velocidade de avanço para 3000 rpm de rotação da ferramenta e 15N de força de contacto.	79
Figura 60: Trajeto percorrido pelo robô na superfície plana. Imagem retirada da simulação realizada no <i>RobotStudio</i>	81
Figura 61: Gráficos para os ensaios realizados ao polimento da superfície plana da prancha, para 3 métodos de programação da trajetória diferentes.....	83
Figura 62: Configuração para o polimento das laterais da prancha, com o disco de polimento horizontal em relação à superfície a polir. Imagem retirada de uma simulação realizada no <i>RobotStudio</i>	85
Figura 63: Configuração para o polimento das laterais da prancha, com o disco de polimento vertical em relação à superfície a polir. Imagem retirada de uma simulação realizada no <i>RobotStudio</i>	86
Figura 64: Variação da força de contacto para o controlo em força na superfície lateral da prancha.	87

Lista de tabelas

Tabela 1: Análise dos ruídos causados pela rotação, experiência 1.	64
Tabela 2: Análise aos valores obtidos para a experiência 2, capacidade de medição do sensor.	69
Tabela 3: Análise aos valores obtidos para a experiência 3, força de contacto máxima com movimento.	74
Tabela 4: Comparação dos valores obtidos para inclinação (12°) da ferramenta, fase aos valores obtidos sem inclinação, todos os ensaios foram realizados para 3000 rpm.	76
Tabela 5: Análise da força de contacto para os ensaios realizados ao polimento da superfície plana da prancha, para 3 métodos de programação da trajetória diferentes.....	82
Tabela 6: Análise da força de contacto para o controlo em força na superfície lateral da prancha.	88

1. - Introdução

1.1 - Introdução do polimento robotizado no contexto atual

Um dos grandes focos da indústria sempre foi produzir mais, melhor e com menos custos. Esta filosofia aliada aos desenvolvimentos tecnológicos dos últimos anos, introduziu a automação dos processos de produção. A robótica é uma área da automação que tem crescido imenso nos últimos anos. Cada vez mais são as empresas que convertem processos de mão de obra humana em mão de obra robotizada, com o fim de aumentar a produtividade, o que se traduz pelo aumento de vendas de novos robôs verificado nos últimos anos (Figura 1).

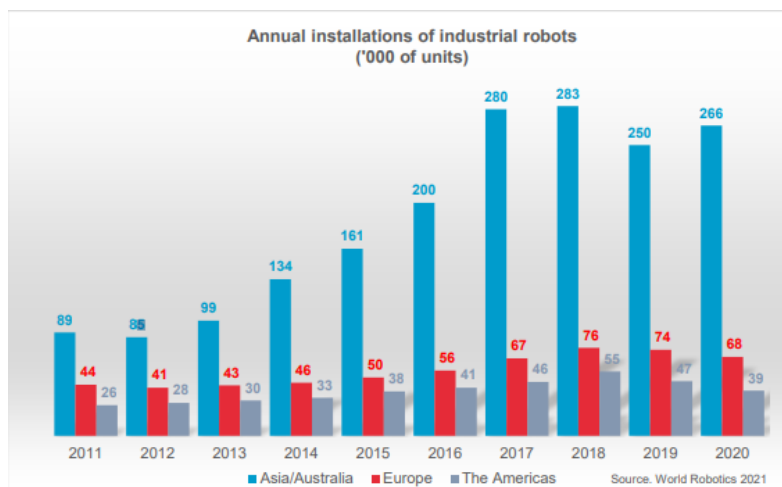


Figura 1: Número de robôs vendidos por ano no mundo.

O crescimento destes sistemas automáticos, deve-se principalmente à grande versatilidade que estes robôs possuem, que lhes permite desempenhar variadas tarefas, em diferentes ramos da indústria. Para além disso, eles possuem outras características bastante atraentes para a indústria, como a elevada capacidade de repetição de movimentos com precisão, a capacidade de trabalhar sem pausas, a facilidade de disposição no espaço, a interação com outros equipamentos e a facilidade de programação de tarefas simples [1].

Contudo, os elevados custos de aquisição, manutenção e programação de tais equipamentos, são fatores a ter em consideração. Os robôs só são utilizados onde são necessários, fiáveis e rentáveis. Por exemplo, em certas tarefas que exigem muito do ser humano (condições de trabalho perigosas, ambientes de risco elevado para a saúde, utilização de forças elevadas ou continuas durante largos períodos de tempo, alta repetibilidade, e excesso de tempo e concentração dedicados a uma tarefa).

Alguns exemplos de aplicações onde os robôs são mais utilizados atualmente são: a pintura, a soldadura, o corte, a montagem, a desmontagem, o empacotamento e transportes de cargas na linha de produção. Estas tarefas e muitas outras, são realizadas atualmente pelos robôs nos mais variados setores de atividade industrial. Na Figura 2 pode-se visualizar o número de robôs instalados anualmente a nível mundial, por setor de atividade.

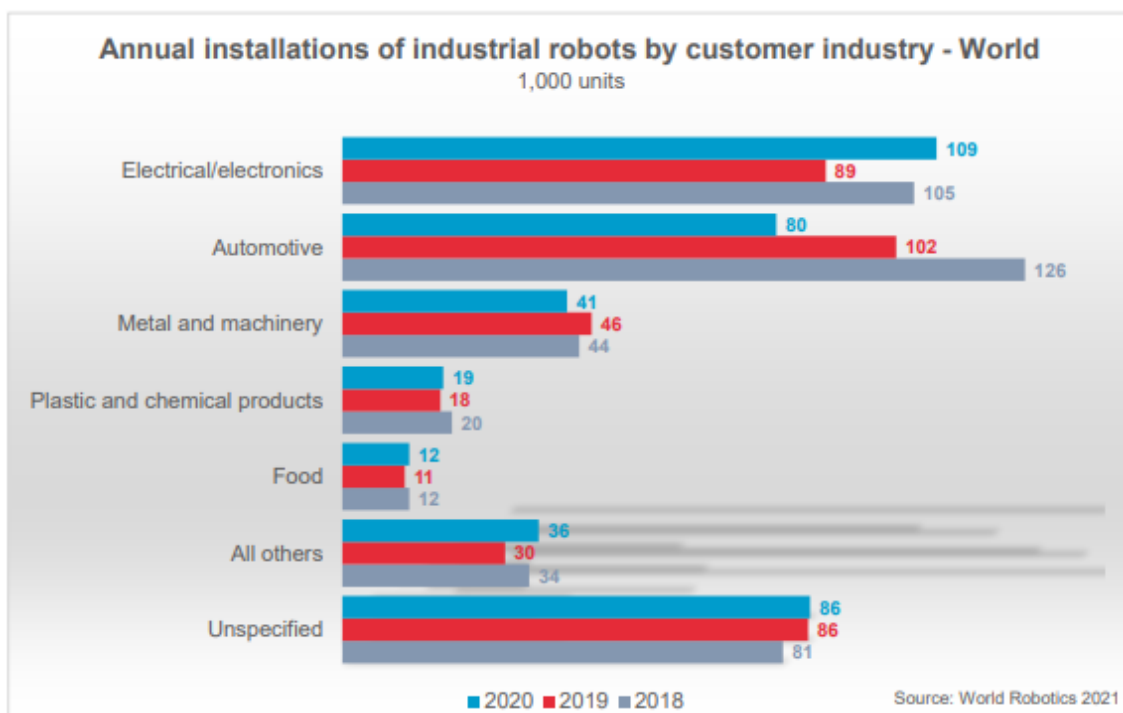


Figura 2: Robôs instalados anualmente a nível mundial, por setor de atividade.

Concluindo, a automação está a revolucionar o mundo industrial e a crescer de ano para ano. Mas ainda existem inúmeros desafios de hardware e software para permitir que robôs desempenhem tarefas mais complexas. Nesta dissertação é abordado um desses desafios, que é a realização de polimento robotizado, uma tarefa complexa e delicada.

Uma das melhores soluções para esta área, são os robôs dotados de controlo de força, capazes de garantir forças de contacto entre a ferramenta e a peça constantes, uma característica considerada fundamental para um polimento de qualidade.

1.2 - Objetivos

Esta dissertação visa estudar a viabilidade e potencialidades da utilização de um robô industrial (*ABB IRB2400*), dotado de um sistema de controlo de força, para a realização de processos de acabamento superficial, nomeadamente o polimento.

Assim, são definidos os seguintes objetivos específicos desta dissertação:

- Conhecimento e manuseamento das potencialidades da programação do robô *ABB IRB2400* com controlo de força.
- Utilização de software da ABB.
- Aprofundamento do conhecimento de programação em código *RAPID*.
- Demonstração de implementação de processo de polimento robotizado com controlo de *FCPressure*.
- Recolha e análise de dados experimentais.

1.3 - Estrutura da dissertação

Tratando-se este capítulo do primeiro, o presente documento encontra-se organizado em mais 5 capítulos e anexos.

No capítulo seguinte, Capítulo 2, expõem-se algumas soluções de polimento automatizado, bem como os conceitos fundamentais para a perceção destas.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no trabalho experimental, bem como os recursos existentes para este estudo, desde o hardware ao software.

No Capítulo 4 são descritos todos os passos fundamentais utilizados na criação dos programas para as experiências desta dissertação, com ênfase na programação offline e na programação online.

No Capítulo 5 prossegue-se a apresentação das experiências mais relevantes e análise dos resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste projeto, assim como a apresentação de propostas para trabalhos futuros.

Este documento inclui também, dois anexos correspondentes ao código utilizado na programação offline para o polimento das superfícies da peça utilizada.

2. - Polimento Robotizado

2.1 - Polimento

O polimento é a última etapa do processo mecânico de acabamentos superficiais, e a mais delicada. Esta é uma das mais importantes na produção de peças, que tem o intuito de dar um acabamento superficial regular, sem imperfeições e em alguns casos (dependendo do material em questão) realçar o brilho natural do material. Na Figura 3 pode-se observar as diferenças de uma peça metálica antes e depois de ser polida.



Figura 3: Exemplo de uma peça metálica antes de ser polida (esquerda) e depois de polida (direita).

Uma peça bem polida pode trazer inúmeras vantagens. Uma vantagem diz respeito à estética, pois vai deixar as peças muito mais brilhantes e suaves. Outra vantagem é a redução de eventuais atritos na superfície, ao torná-la micrometricamente mais regular, como por exemplo nas pás de uma turbina [2]. Para além disso também serve para prevenir e remover a oxidação do material, aumentando assim o tempo de vida da peça.

Este processo, pode ser utilizado em diversos materiais, como metais, madeiras e materiais compósitos. Tem diversas aplicações sendo as principais, na indústria automóvel, aeronáutica, e na indústria dos móveis e decoração.

Este processo é muito semelhante ao processo de lixagem, que ocorre antes do polimento. Apenas varia na quantidade de material removido (que no polimento é muito menor) e nas ferramentas utilizadas na operação. Na lixagem o objetivo é desbastar o material em questão para tornar a sua superfície o mais regular possível, através da fricção dos grãos da lixa com a peça em questão. Este é um processo por etapas, onde se começa sempre pelas lixas mais abrasivas, de maior grão, até as menos abrasivas. Só assim é possível garantir que possíveis riscos/defeitos são eliminados corretamente. Só após a superfície ter sido corretamente lixada, é que é possível realizar-se o polimento, a última etapa, que vai ser responsável por ativar o brilho natural do material e tornar a superfície ainda mais suave.

O polimento normalmente é realizado com um disco de polimento (Figura 4), acompanhado por um produto (abrasivo ou não abrasivo), que pode ser sobre a forma de massa, óleo, verniz, compostos, etc... Contudo, com a evolução tecnológica já existem no mercado alguns discos de polimento capazes de trabalhar a seco. Estes são os mais utilizados nos processos de automação. Quanto aos discos, como não é pretendido mudar a forma original da peça, são feitos de materiais macios, que se adaptam a forma da peça, tais como algodões, esponjas, couro ou fibras sintéticas.



Figura 4: Ferramenta de polimento composta por uma boina de esponja.

A escolha do disco e do produto adequado depende do material em causa, bem como, do resultado final pretendido. Existe uma enorme variedade de escolhas no mercado, para dar respostas as múltiplas aplicações, pelo que é fundamental escolher os materiais adequados para obter os melhores resultados.

Convém realçar que a realização de uma lixagem, com lixas com um grão abrasivo muito baixo, por exemplo as lixas de água, também pode ser considerado polimento.

As operações de polimento, atualmente ainda são feitas maioritariamente de forma manual [3]. É assim um excelente desafio para a indústria da automação, utilizar robôs para replicar e automatizar um trabalho tão complexo. É nesta área que o presente trabalho se insere.

2.2 - Soluções automáticas industriais de polimento.

À medida que aumentam as exigências da qualidade da superfície de peças com formas complexas, como turbinas de grandes dimensões, pás eólicas e hélices de veículos aéreos, o polimento está-se a tornar cada vez mais complexo. Atualmente grande parte desse trabalho ainda é feito manualmente, por operadores muito habilitados. Consequentemente, este processo acaba por ser dispendioso, lento e pouco eficiente, devido ao uso intensivo de mão de obra. Para além de que tal ambiente pode ser prejudicial para a saúde humana, devido ao ruído e poeiras associadas a este processo [3].

Foi por estes mesmos motivos que se começaram a desenvolver soluções automáticas de polimento, como máquinas de CNC (Controlo Numérico Computadorizado) (Figura 5), robôs de polimento (Figura 6) e outros tipos de máquinas automáticas [4].



Figura 5 : Zeeko IRP1200, máquina CNC de polimento, (www.glyndwrinnovations.co.uk).



Figura 6: Robô ABB, adaptado para polimentos. (www.meshautomationinc.com)

Apesar das máquinas de CNC possuírem uma elevada rigidez, uma elevada precisão de posicionamento e repetibilidade, nem sempre são a melhor solução para o polimento. Isto porque, o espaço de trabalho é limitado, são pouco flexíveis e são caras. Então para polir peças com geometrias mais complexas é necessário outro tipo de tecnologia [5]. Uma das soluções para estes casos é o uso de robôs industriais, porque são mais baratos, têm um espaço de trabalho maior, são bastante flexíveis e permitem uma fácil reconfiguração das condições de trabalho. Para além disso, uma outra vantagem é que estes podem ser controlados em força. Ao polir uma superfície, vão sempre existir forças de contacto entre a ferramenta e a peça, e o controlo destas forças vai ser fundamental para definir a qualidade do trabalho final de polimento [6].

2.3 - Robôs de Polimento

Dependendo da peça a polir, os robôs de polimento são utilizados em duas configurações, ou têm a peça fixa e o robô movimenta a ferramenta de polimento ao redor dela, ou o robô movimenta a peça em direção a sistemas/máquinas de polimento fixas (Figura 7). O primeiro caso, Figura 7(a), é mais adequado para peças de grandes dimensões, onde se torna mais simples a programação do percurso, já o segundo caso, Figura 7(b), é mais adequado para peças de pequenas dimensões, onde certos ângulos e detalhes não são possíveis de ser trabalhados com a primeira configuração.

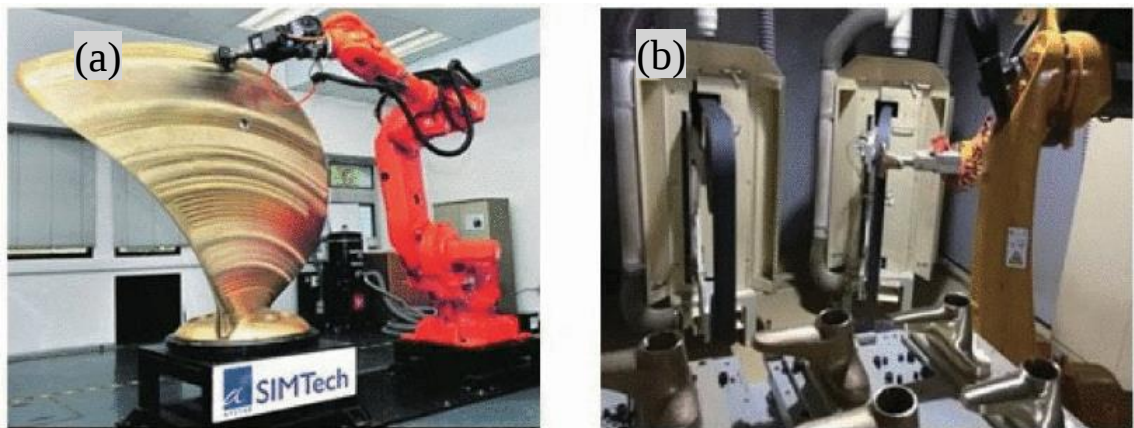


Figura 7: (a) Robô de Polimento onde a peça é fixa; (b) Robô de Polimento onde a ferramenta é fixa [4].

Independentemente do tipo de configuração utilizada existe ainda um outro parâmetro bastante importante para classificar estes robôs, que é o controlo de força, que pode ser passivo ou ativo. As diferenças entre um e outro são apresentadas no próximo subcapítulo.

2.4 - Controlo de força

Antes de abordar o controlo de força, é fundamental referir o conceito de *compliance*. *Compliance* é o termo utilizado na robótica para caracterizar a relação entre deslocamento e força, decorrente do contacto do robô/ferramenta com a peça. Este termo pode ser descrito como o inverso da rigidez. Ou seja, uma alta *compliance* significa que o manipulador se move bastante quando submetido a uma força externa. Já uma baixa *compliance* está associada a uma elevada rigidez, onde por exemplo, o manipulador mantém a posição quando submetido a uma força externa. Isto pode ser útil se o objetivo pretendido for precisão da trajetória. No caso de operações de polimento, onde o pretendido, é manter as forças de contacto constantes, o robô deverá ter um comportamento de alta *compliance*, para que possa adaptar a sua trajetória de modo a assegurar as forças de contacto pretendidas [7].

O controlo de força, permite que o robô controle as forças de contacto na superfície a ser trabalhada. Como já referido, o controlo da força é crucial no polimento automatizado. Como o polimento envolve uma operação de contacto entre a ferramenta e a superfície da peça, se as forças de contacto variarem à medida que o robô percorre superfícies mais complexas, pode fazer com que umas áreas sejam polidas em excesso e

outras sejam pouco polidas. No limite, um excesso de força aplicado poderá gerar defeitos tanto na geometria da peça, como danificar a ferramenta. Torna-se por isso muito importante que o robô seja capaz de se adaptar e manter essas forças regulares ao longo de toda a superfície, para garantir um polimento de qualidade.

No que diz respeito a operação de polimento, várias são as razões que justificam o uso de controlo de força:

- Compensar o posicionamento incerto da peça a ser trabalhada.
- Pequenos desvios da geometria da peça em relação ao percurso programado pelo robô.
- Desgaste da ferramenta e da peça.
- Aumento do ritmo de produção, porque por vezes sistemas sem controlo de força são programados para velocidades mais baixas, como forma de prevenção, diminuindo o ritmo da produção.

A implementação deste controlo provoca a redução de ciclos de trabalho em cerca de 20% e a dilatação do tempo de vida da ferramenta em 20% [8].

2.4.1 - Tipos de Controlo de Força

Existem dois tipos de controlo de força: o passivo e o ativo, onde um funciona em malha aberta e o outro em malha fechada, respetivamente [9].

Nos robôs com **controlo de força passivo** a força de contacto não é medida, trata-se de um controlo em malha aberta, onde não existe feedback para o controlador. Apenas é definido um valor máximo para a força de contacto a exercer. Isto normalmente é alcançado através de um sistema tipo mola, geralmente pneumático, que fornece ao sistema uma certa *compliance* [4]. Estas molas podem ter diferentes disposições, dependendo da configuração do robô – ferramenta fixa ou peça fixa. Na Figura 8 pode-se ver uma simples representação destes sistemas, cujo funcionamento é descrito no subcapítulo seguinte.

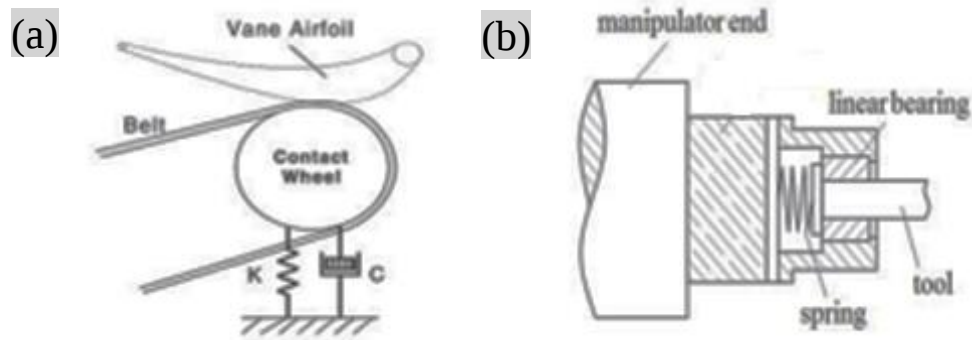


Figura 8: (a) Mola colocada na cinta de polimento (ferramenta fixa); **(b)** Mola colocada no manipulador do robô (peça fixa) [4].

Este método apresenta-se como um método de baixo custo, simples e com bom tempo de resposta, mas insuficiente para operações mais complexas, por não possuir a capacidade de determinar as forças envolvidas.

O **controle de força ativo** apresenta uma maior flexibilidade, porque já é um controle em malha fechada. O sistema é capaz de ler em tempo real as forças envolvidas, e se adaptar a estas variações, recalculando a trajetória e, ou, as velocidades da ferramenta e do robô, para manter a forças de contacto o mais constante possível ao longo da operação [4]. O controle de força ativo pode ser alcançado de diferentes formas, com o uso de robôs colaborativos, ou através de sistemas independentes do robô colocados na ferramenta ou no braço robótico. Apesar deste método ser mais dispendioso, apresenta-se como sendo o mais adequado para operações de polimento, por conseguir manter forças constantes ao longo de qualquer tipo de geometria da peça, incluindo as mais complexas.

2.5 - Soluções de polimento robotizado existentes.

A rápida procura por sistemas automáticos capazes de desempenhar polimentos com qualidade e eficiência, levou a criação de um novo mercado na robótica onde várias empresas tentam vender as suas soluções. Muitas delas são bastante semelhantes, porque partilham o mesmo princípio de funcionamento, por isso esta dissertação foca-se apenas na explicação dos princípios de funcionamento mais relevantes. Começando por apresentar os mais simples até chegar aos mais complexos.

2.5.1 - Ferramenta fixa com *compliance*.

Este tipo de sistema envolve um método de controlo de força passiva numa ferramenta fixa na célula robótica. Ou seja, o controlo de força é independente do robô. Não é necessário qualquer *compliance* por parte do robô, mas também não invalida que este sistema seja acoplado a um robô com *compliance* para melhorar a sua performance.

O exemplo apresentado, está retratado na Figura 9 e trata-se de uma cinta de abrasiva, que tanto pode ser utilizada para lixar ou para polir, dependendo do grão de abrasividade da lixa.

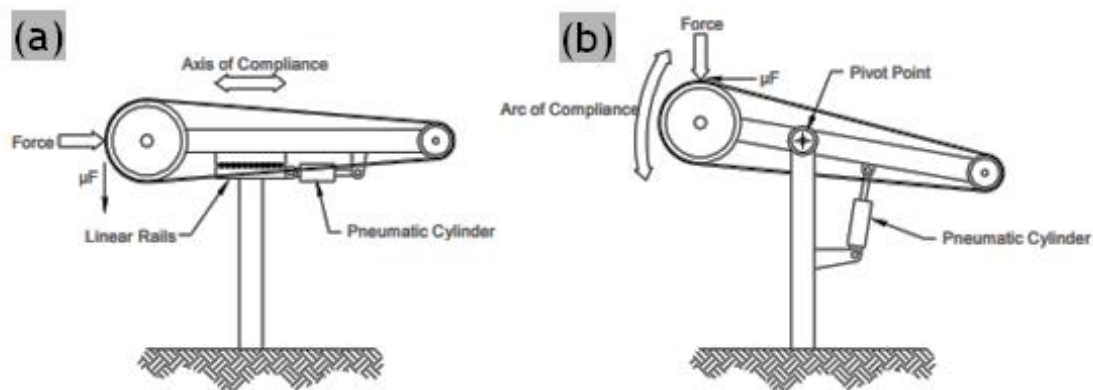


Figura 9: Ilustração de ferramentas fixas com *compliance*: (a) *compliance* no eixo horizontal; (b) *compliance* radial [9].

Na Figura 9(a), pode-se ver que a ferramenta está conectada a uma guia linear, que por sua vez está conectada a um cilindro pneumático. Esta configuração vai garantir ao sistema uma *compliance* linear na direção da guia, neste caso horizontal. Ou seja, a ferramenta vai-se movimentar para se adaptar ao movimento do robô, de forma a manter

as forças constantes. A pressão necessária para mover o cilindro pneumático deverá ser calculada à priori, para o valor de força máxima de contacto pretendido no trabalho.

Na Figura 9(b), o funcionamento da ferramenta é muito semelhante ao anterior, apenas varia a direção da *compliance*, que agora é radial. Graças ao ponto pivot, a força aplicada, no lado esquerdo, vai ser contrabalançada pelo cilindro pneumático do lado direito. Mais uma vez, fazendo com que a ferramenta se aproxime ou afaste sobre o robô, para manter as forças de contacto constantes [9] e [10].

Empresas que comercializam este tipo de solução:

A SHL (www.shl.pt) é uma empresa especializada na venda de acessórios fixos de polimento para utilização com robôs em diversas aplicações. Na Figura 10 pode-se ver alguns exemplos dos seus produtos.



Figura 10: Acessórios de Polimento Robotizado desenvolvido pela SHL, respetivamente modelo: DKS, EP100, UBT550 (www.shl.pt).

Um outro exemplo de produtor deste tipo de soluções é a INTEC (www.intecrobotics.com), que desenvolve células robóticas completas para o polimento (Figura 11). Estes tipos de células utilizam a configuração de ferramenta fixa. Onde se destacam por ter mais do que um disco polidor/ cinta de polimento, permitindo assim um trabalho sequencial com várias ferramentas.



Figura 11: Célula Robotizada com várias estações de polimento da INTEC ROBOTICS. (www.intecrobotics.com)

2.5.2 - Ferramenta passiva montada no manipulador do robô

Esta é a configuração mais simples, mas apresenta alguns problemas para realizar o polimento em peças complexas. Uma ilustração deste mecanismo está representada na Figura 12.

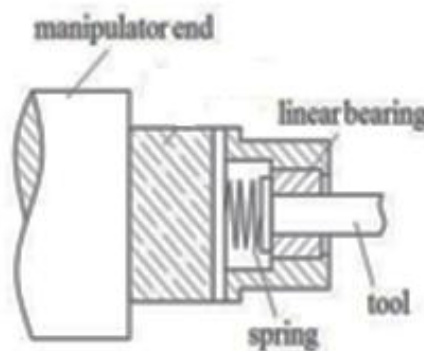


Figura 12: Ilustração de ferramenta passiva para ser montada no manipulador [4].

Tal como pode-se ver, o funcionamento é muito semelhante ao descrito até agora, onde uma mola ou um cilindro pneumático permite definir uma força limite de contacto. O valor desta força vai depender da rigidez da mola ($F=k*\Delta x$)¹, tal que se esta for ultrapassada a mola vai ser acionada e provoca um deslocamento da ferramenta no sentido

¹ $F=k*\Delta x$, Onde F representa a força exercida sobre a ferramenta, k a rigidez da ferramenta e Δx o deslocamento provocado por esta força. A força de contacto vai ser dependente da posição de contacto e da rigidez da ferramenta.

inverso do contacto. Isto funciona bem, se a peça a ser trabalhada for por exemplo uma superfície plana em que não há mudanças de direção do braço robótico, e como tal, uma direção de *compliance* é suficiente. O problema está quando é necessário que a ferramenta trabalhe em várias direções, porque a gravidade vai ter influência na força de contacto. Como a gravidade atua sempre na vertical de cima para baixo, vai ter repercussões diferentes para orientações diferentes do braço robótico. Para entender melhor a Figura 13 ilustra as forças envolvidas para diferentes direções, de uma ferramenta semelhante a esta.

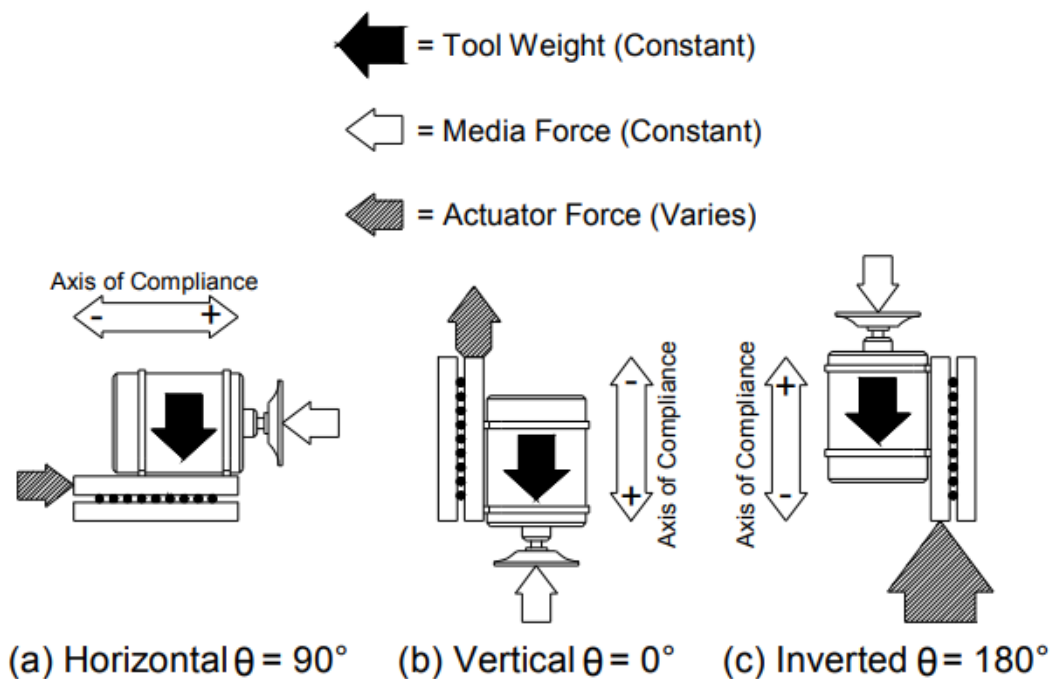


Figura 13 : Representação do balanço de forças envolvidas numa ferramenta passiva montada no elemento terminal do robô, com ênfase no efeito da gravidade para diferentes orientações [9].

Na Figura 13 estão representadas por setas os eixos de *compliance* e as forças envolvidas: a força do atuador pneumático, a força de contacto na ferramenta, e o peso da ferramenta. Cada força está representada no respetivo sentido, direção e magnitude (através do tamanho relativo das setas). O intuito desta ferramenta, é manter a mesma força de contacto, independentemente da direção de trabalho, por isso pode-se ver que a amplitude da força de contacto é a mesma em cada caso. Já a força da gravidade, possui a mesma direção, sentido e magnitude para cada caso, tal como seria de esperar. Por fim a força do atuador pneumático vai ser a responsável por contrabalançar o efeito da gravidade, por isso tem diferentes valores para as diferentes orientações, de forma a manter as forças de contacto constantes.

Estes exemplos, demonstram como é complexo trabalhar com forças de controlo passivas ao nível do manipulador, porque uma pequena variação da direção de trabalho, já vai envolver diferentes forças ao nível do atuador pneumático, e consequentemente requer uma nova configuração das pressões no atuador. Peças mais complexas, vão exigir uma maior flexibilidade do sistema de controlo. Não é como nas ferramentas passivas fixas, onde o peso da ferramenta não tem qualquer impacto, porque esta apenas tem *compliance* numa direção. Nestes casos, a *compliance* terá mais do que uma direção, sendo por isso mais complexo [3]. No entanto, existem algumas soluções passivas com o intuito de resolver este problema.

2.5.2.1 - Mecanismo passivo de contra balanço mecânico.

A primeira solução a ser apresentada é um mecanismo passivo de contrabalanço mecânico, representado na Figura 14. Este mecanismo utiliza uma massa para contrabalançar o peso da ferramenta. Tanto a ferramenta como o contrapeso estão conectados, e tem liberdade para rodar sobre um ponto pivot, centrado com a direção do manipulador, ou seja, as duas massas estão a mesma distância do ponto pivot. O que faz com que independentemente da direção de trabalho do mecanismo, as duas forças se anulem, eliminado assim o problema do peso da ferramenta. Para além disso, pode ainda ser adicionado um cilindro pneumático na ferramenta, para aumentar a força exercida pela ferramenta.

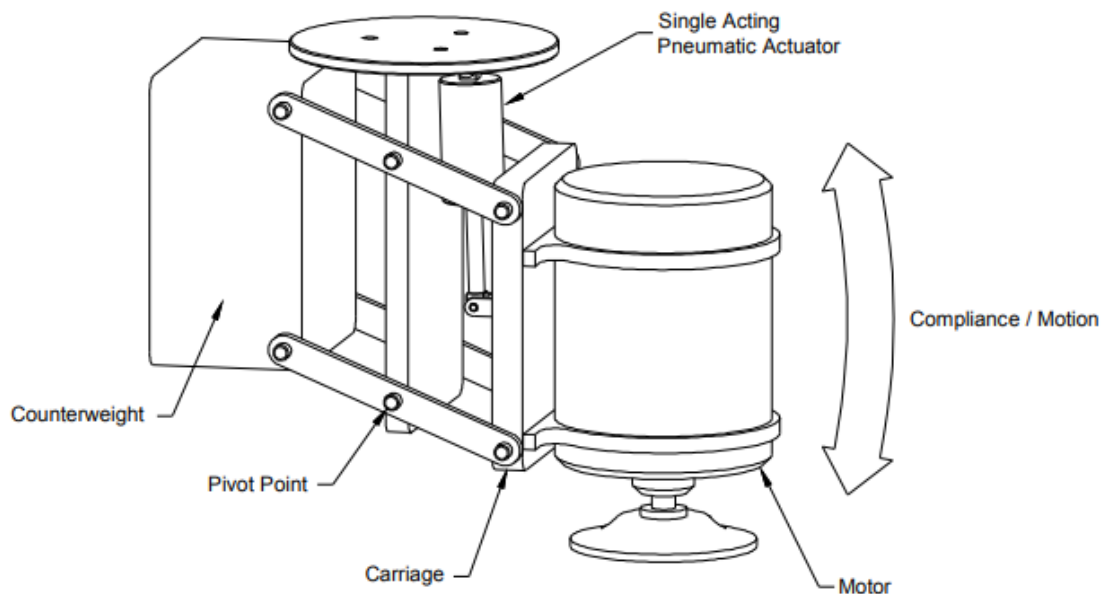


Figura 14: Ilustração do funcionamento de um mecanismo passivo de contrabalanço mecânico [9].

Contudo este sistema possui alguns problemas. O primeiro é a necessidade de reconfigurar manualmente o contrapeso, para casos em que o peso da ferramenta mude. Isto pode acontecer, porque algumas ferramentas com o uso/desgaste variam a sua massa, ou porque a tarefa do robô, envolve o uso de várias ferramentas com massas diferentes. Se a unidade não for devidamente reconfigurada, vai ocorrer um erro proporcional a diferença de massas sempre que a direção de trabalho é alterada. Um outro problema é as oscilações que podem ocorrer para baixas forças de contacto. Ao tratar-se de um sistema mecânico simples com uma elevada massa, acoplado a uma ferramenta abrasiva com baixo coeficiente de amortecimento, este sistema torna-se muito suscetível a oscilações, que consequentemente vão originar um mau acabamento. Este baixo coeficiente de amortecimento, resulta da rigidez da ferramenta e as forças de fricção envolvidas no trabalho abrasivo. Estas, para uma baixa força de contacto podem gerar uma força oposta à do peso da ferramenta, e consequentemente desequilibrar o mecanismo originando oscilações. Normalmente, este problema é reduzido à medida que é aumentada a força de contacto, porque as forças de fricção deixam de ser relevantes no balanço de forças.

Por esta razão este sistema é pouco utilizado, sendo mais rentável o uso de atuadores pneumáticos para contrabalançar. No entanto convém realçar, que no caso do polimento feito com discos de espuma, estes já vão ter um coeficiente de amortecimento maior, o que poderá reduzir as oscilações. Mas para ferramentas de polimento mais rígidas, o problema volta a surgir [9].

2.5.2.2 - Mecanismo passivo de contrabalanço pneumático

Esta solução baseia-se no mesmo princípio de contrabalanço da anterior, mas em vez de utilizar um contrapeso, usa dois atuadores pneumáticos, com o intuito de resolver os problemas do mecanismo anterior. Na Figura 15 está representado um esquema do funcionamento deste tipo de ferramentas.

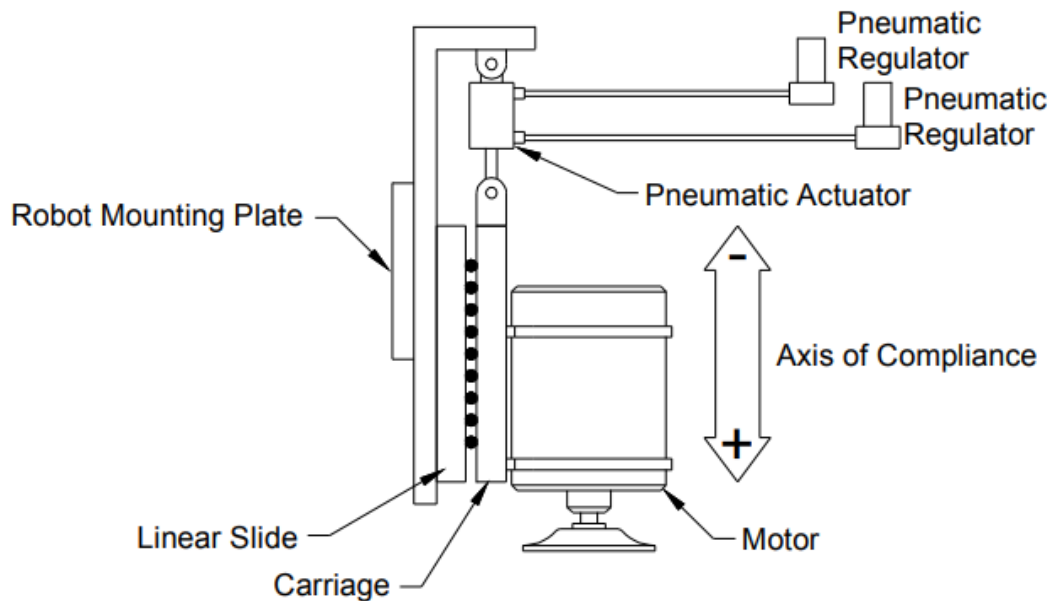


Figura 15: Ilustração do funcionamento de um mecanismo passivo de contrabalanço pneumático [9].

Pode-se observar, que existem dois reguladores pneumáticos, ligados a um cilindro pneumático de duplo efeito. Os dois reguladores são fundamentais, para quando a direção da ferramenta é diferente da direção do seu peso. Nestes casos, a existência de duas câmaras vai garantir uma maior estabilidade de posicionamento da ferramenta. Por outro lado, quando a direção de trabalho é vertical, igual à da força da gravidade, esta só vai ter influência numa direção, podendo-se só usar um regulador para equilibrar as forças, tal como no caso descrito na secção 2.5.2. Uma outra exceção é quando a direção de trabalho é perpendicular, porque nesses casos tal como foi explicado anteriormente, a força da gravidade não tem efeito no balanço de forças, podendo também apenas ser utilizado uma das câmaras, para manter a força de contacto.

Para regular os atuadores pneumáticos, existem 3 estratégias.

A primeira utiliza um tipo de sistema de medição das forças, por exemplo, uma célula de carga exterior à ferramenta. Com estes valores, determina-se a pressão necessária nos atuadores, para a manter a força pretendida. Este método, admite que o trabalho vai ser sempre realizado na mesma direção, para que a pressão no atuador seja constante e não seja necessário calibrar de novo. Os reguladores pneumáticos podem ser ajustados manualmente, ou seja, não são necessários o uso de comandos elétricos. Torna-se por isso uma solução bastante simples, mas pouco flexível.

A segunda solução é utilizada para quando o robô vai variar a sua direção ao longo do trabalho. Tal como foi explicado anteriormente, a mudança de direção tem de ser acompanhada por uma mudança na pressão dos atuadores para contrabalançar as forças. As forças envolvidas vão ser medidas de forma semelhante a solução anterior, mas em vez de serem medidas só uma vez, vão ser medidas para cada mudança de direção. Com esses dados, obtém-se os valores de pressão, que são guardados no controlador, para cada ponto do trajeto (*target*). Assim, os reguladores são calibrados cada vez que há uma mudança de direção. Este sistema, já envolve algum tipo de método eletrónico para regular rapidamente a pressão, sempre que necessário. Um problema desta solução, é que para acabamentos de peças complexas, que envolvam muitas mudanças de direção, pode tornar-se uma tarefa bastante repetitiva e tediosa, medir e inserir todas as pressões no controlador.

A terceira solução envolve a execução de cálculos numéricos no controlador, para que este possa regular a pressão. Este método pode ser utilizado, caso a pressão varie ou não. Para isso é necessário fornecer ao controlador as variáveis necessárias, que são estas o peso da ferramenta, o ângulo de trabalho em relação a gravidade e a força de contacto pretendida.

O peso pode ser facilmente obtido com uma célula de carga. A mais difícil de obter é o ângulo, que tem de ser medido manualmente para cada direção. Ou então, há certos sistemas que calculam no controlador o ângulo, com base na posição de cada junta. No entanto. Apesar deste sistema poder funcionar em tempo real com o percurso, pode não ser uma solução viável, por limitações na velocidade de processamento de dados, que poderá originar atrasos na resposta [9].

Estas soluções passivas apresentam algumas desvantagens por funcionar em anel aberto e não medir diretamente as forças envolvidas. Para além de que manter uma pressão constante, não é o mesmo que manter uma força constante. O ar é compressível, o que pode levar a problemas de precisão. Tornam-se por isso uma solução adequada para trabalhos lentos, em peças com poucas curvaturas [11].

2.5.3 - Ferramenta ativa montada no manipulador do robô.

Esta ferramenta é uma evolução da ferramenta passiva de contrabalanço pneumático. O modo de funcionamento é muito semelhante, mas só que possui uma célula de carga e um acelerómetro embebido na ferramenta, que lhe permite trabalhar em anel fechado. Pode-se ver um exemplo deste tipo de ferramentas na Figura 16 e na Figura 17.

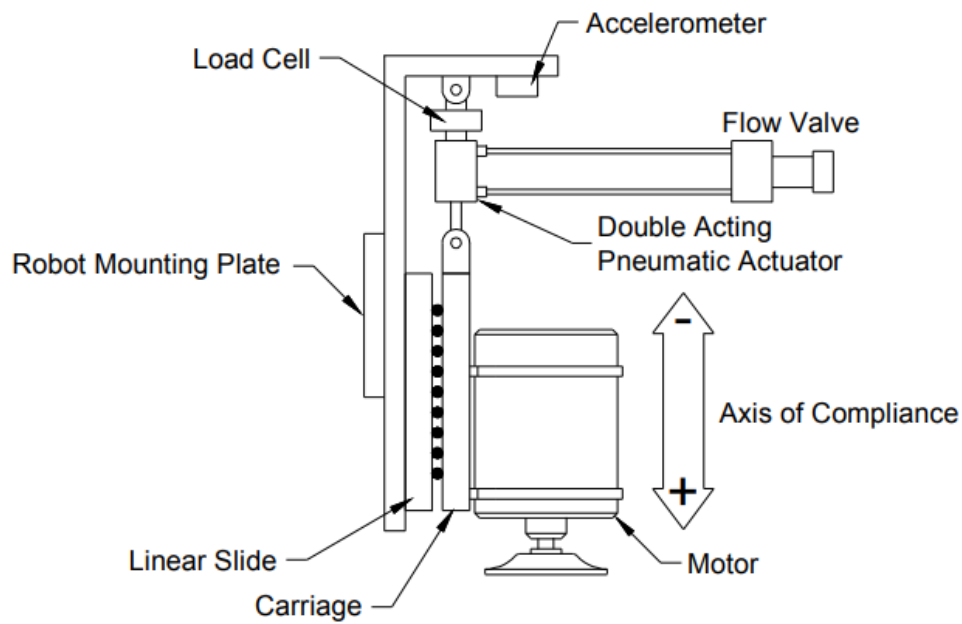


Figura 16: Representação do funcionamento de uma ferramenta ativa colocada no fim do manipulador [9].

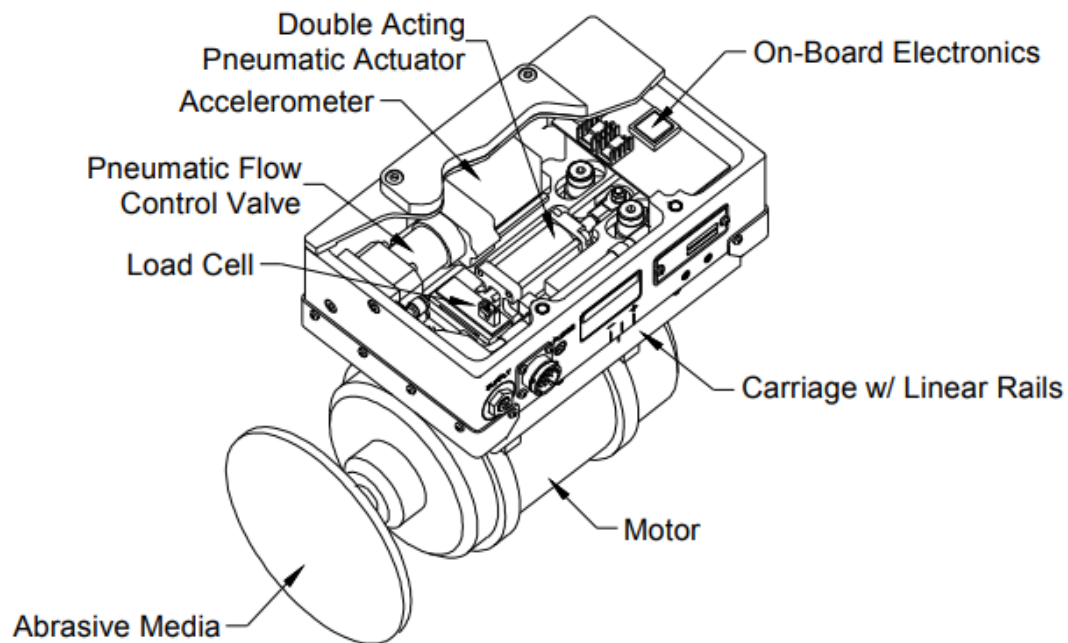


Figura 17: Representação dos componentes de uma ferramenta ativa colocada no fim do manipulador [7].

A carga aplicada pelo atuador pneumático duplo, é constantemente medida, com uma célula de carga colocada em serie com o atuador, e corrigida quando há algum desvio dos valores pretendidos. Esta disposição permite medir diretamente as forças no atuador,

em vez de monitorizar as pressões, o que resolve os problemas de incerteza de medição do método passivo, nomeadamente:

- (i) o atrito no atuador, porque é medida a força resultante no atuador;
- (ii) a compressibilidade do ar, que pode induzir em erros ao calcular as forças quando são as pressões que são monitorizadas em vez das forças.

O acelerómetro permite uma leitura do ângulo da ferramenta em relação à gravidade quase instantânea, ao contrário do método das juntas. O acelerómetro não é dependente do controlador ou da sua velocidade de processamento, isto significa que a direção pode ser diretamente medida a cada milissegundo, ou até mais rápido [9].

Em suma, são estas pequenas diferenças na medição das grandezas exteriores que tornam este sistema ativo, uma melhor opção em relação ao sistema passivo de contrabalanço pneumático. Relembrando, que no passivo tenta-se controlar as forças através de uma inserção, à priori, das pressões pneumáticas para cada *target* do percurso robótico. Já no ativo as forças de contacto também se controlam através da variação das pressões nos atuadores pneumáticos. Mas neste caso, o controlo de força é feito em tempo real, a partir de uma leitura direta das forças envolvidas, e de uma rápida correção da posição da ferramenta para alcançar a força de contacto definida pelo utilizador.

Empresas que comercializam este tipo de solução:

Tanto a ferramenta passiva com mecanismo de contrabalanço pneumático (secção 2.5.2.2), como esta que acabou de ser apresentada, são comercializados pela *PushCorp* (www.pushcorp.com) (Figura 18).

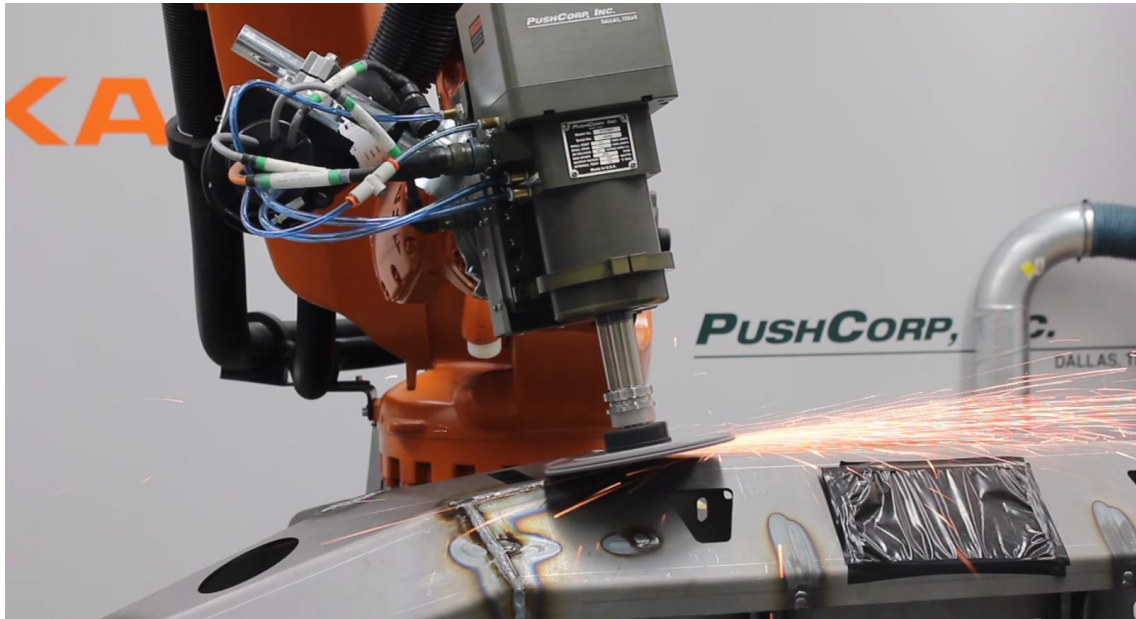


Figura 18: Robô industrial a utilizar o controlo de força fornecido pelos acessórios da *PushCorp* (www.PushCorp.com).

Esta empresa tem um grande foco na construção de ferramentas para acabamentos robotizados de superfícies, através do controlo de força. Os seus dispositivos (Figura 19) têm um uso universal, sendo feitos para ser colocados no elemento terminal de um braço robótico. Existe uma elevada gama de modelos capazes de suportar forças desde 1 N até 1100 kN. Outra característica que todos tem em comum é que só possuem uma direção de *compliance* (na direção da ferramenta). Para além disso, possuem também um mecanismo que permite definir os intervalos de tolerância para eventuais desvios da trajetória, na direção da ferramenta.

Para superfícies mais complexas, os controladores de força ativos da *PushCorp* são mais adequados porque conseguem regular as pressões automaticamente através dos sensores de força, posição e aceleração. Trata-se de um sistema de malha fechada, entre a ferramenta e o dispositivo. Estes dispositivos são mais caros, mas apresentam melhores resultados.

Active Compliance



Passive Compliance



Figura 19: Alguns dos dispositivos de controlo de força comercializados pela PushCorp, (www.pushcorp.com).

2.5.4 - Controlo de força ativo no braço robótico.

Para o controlo de força ativo no braço robótico é utilizado um transdutor de força colocado no elemento terminal do robô, onde depois a ferramenta vai ser acoplada (Figura 20). Este transdutor vai medir para cada instante, as forças e binários em cada direção dos 3 eixos ortogonais x, y e z. O controlador vai receber esta informação, e se necessário, vai corrigir a trajetória do robô para aumentar ou reduzir a força de contacto, de forma a eliminar o erro entre a força pretendida pelo utilizador e a força que está a ser exercida pelo robô. Ou seja, o transdutor passa a estar diretamente ligado ao controlador, e torna-se o elemento fundamental para controlar as forças neste tipo de sistemas [12].

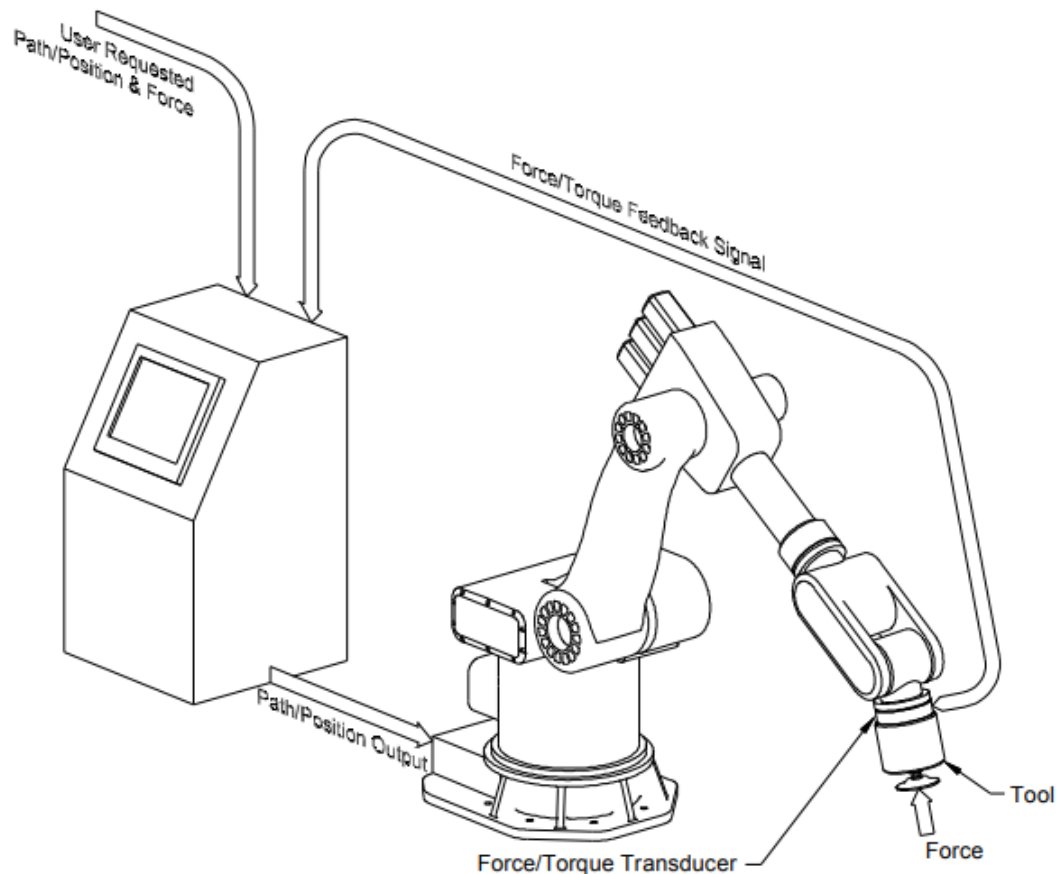


Figura 20: Ilustração do controlo de força ativo embebido no braço robótico [9].

Apesar desta solução parecer simples e eficaz, tem alguns problemas na implementação. Como já se sabe, o robô tem uma baixa *compliance*, elevada rigidez, para garantir uma alta precisão de posicionamento e execução de trajetórias. Ou seja, caso seja necessário alterar a trajetória para manter as forças pretendidas, isto só vai acontecer se assim o controlador ordenar o robô. Caso contrário, este vai se manter fiel ao seu percurso devido a sua elevada rigidez, independentemente das forças envolvidas (desde que estas não ultrapassem a capacidade de carga, do robô em questão). Isto aliado ao facto de o controlador ter de executar duas tarefas em simultâneo: corrigir as forças de contacto e fazer o percurso definido pelo utilizador, pode causar um problema de resposta. Por vezes, o robô pode não ser capaz de responder rápido o suficiente para corrigir o erro de força, o que pode levar a consequências graves no trabalho desejado, como surgir um pico de força quando o robô deteta um obstáculo no seu percurso. Isto pode acontecer por dois motivos, ou porque o processamento de dados no controlador foi lento, ou porque o robô não tem aceleração suficiente para se movimentar a tempo de evitar o pico [9].

Apesar do intuito deste mecanismo ser tornar um robô rígido, numa ferramenta mais *compliant* e mais sensível às forças exteriores, vai ser sempre muito difícil de

alcançar essa distinção, porque ele nunca vai ter uma reação instantânea, por mais rápido que o controlador seja e por mais rápidos que os motores do robô sejam.

No entanto, existem algumas formas de contornar este problema. Uma delas, é a adição de uma ferramenta com elevada *compliance*, para que esta possa dar uma resposta instantânea as mudanças no trajeto. Outra seria trabalhar a velocidades mais baixas de forma a evitar atrasos na resposta. Em suma trata-se de uma solução eficaz para ser utilizada com ferramentas de alta *compliance*, a baixas velocidades de trabalho e em peças relativamente planas [9].

Empresas que comercializam este tipo de solução:

A empresa ABB comercializa robôs dotados de controlo de força deste tipo. Para estes robôs são utilizados transdutores de força/binário da ATI (www.ati-ia.com), (Figura 21) montados no elemento terminal do robô.



Figura 21: Transdutor de força ATI F/T (ati-ia.com)

Este tipo de transdutor é capaz de ler as 6 componentes de força e binário presentes em aplicações robotizadas, e fornece esses dados diretamente ao controlador do robô.

A empresa Fanuc (www.fanuc.eu) e a empresa Kuka (www.kuka.com) também disponibilizam este tipo de solução.

2.5.5 - Robôs colaborativos.

Uma outra solução são os robôs colaborativos. Estes são caracterizados pela sua capacidade de colaborar com os humanos em atividades industriais e domésticas, de forma a aumentar a produtividade e sem pôr em questão a segurança dos operadores.

Estes robôs estão equipados com vários sensores que permitem determinar as forças envolvidas quer a nível do elemento terminal, quer a nível de cada junta e dispõe de controlo de força, para além do controlo de posição e velocidade. Para além disso, também são conhecidos pela sua facilidade de programação. Ou seja, não é necessário alguém com conhecimentos aprofundados na área de automação, para lhes ensinar as suas tarefas. Uma forma muito simples de os programar consiste em: aprenderem as suas tarefas, ao imitar os movimentos realizados por um operário que ensina o robô / cria um programa semelhante à sua tarefa. Basta movimentar o manipulador para os diferentes pontos do trajeto, e especificar os parâmetros fundamentais, para realizar a tarefa (alguns robôs com controlo de força ativo no braço robótico também têm esta funcionalidade) [13].

O controlo de força nos robôs colaborativos, é muito semelhante à solução anterior, onde os dados recolhidos pelos sensores vão ser processados no controlador, para que sejam feitas correções no trajeto de forma a manter as forças de contacto. Também podem recorrer ao uso de ferramentas de polimento *compliant*, para ter uma resposta mais adequada.

Um estudo realizado na Universidade Politécnica de Valência, [14], sobre o controlo de força no uso de robôs colaborativos para lixar materiais, permite tirar algumas conclusões sobre o uso destes robôs em processos de acabamento, em comparação com os robôs industriais com controlo de força ativo que foram aqui expostos. Este estudo conclui que os robôs colaborativos apresentam resultados muito semelhantes aos industriais em termos da rugosidade da superfície, após a lixagem. No entanto, existem algumas limitações a ter em conta: a baixa capacidade de carga e a reduzida área de trabalho, por serem robôs pequenos e pouco robustos.

Em suma, os robôs colaborativos são uma ótima solução, para produções mais pequenas e simples. Onde não vai ser necessário contratar algum especialista na área da automação, para os programar, e a capacidade de carga necessária e área de trabalho são compatíveis com o material e as peças a serem trabalhadas.

Empresas que comercializam este tipo de solução:

A *Kuka*, a *ABB*, a *Fanuc* e a *Universal Robots* são exemplo de empresas que produzem robôs colaborativos. Para além dos robôs, o uso de ferramentas para operações de acabamento é também uma necessidade. A empresa *Robotiq* (www.Robotiq.com) é conhecida pela produção de acessórios para robôs colaborativos. Um destes acessórios é a ferramenta de acabamentos, o “*sanding kit*”, que pode ser utilizado para lixar e polir. (Figura 22).



Figura 22: Acessório para robôs colaborativos - *Robotiq Sanding Kit*, (www.Robotiq.com).

Esta ferramenta vem equipada com um software para integração com o controlador que facilita a programação. O software permite programar de uma forma expedita as trajetórias de polimento a partir de um conjunto reduzido de pontos da superfície a polir, que são ensinados manualmente. Na Figura 23 é possível ver um exemplo em que a trajetória do robô é gerada automaticamente a partir de o ensino, de apenas, 6 pontos na superfície a tratar.

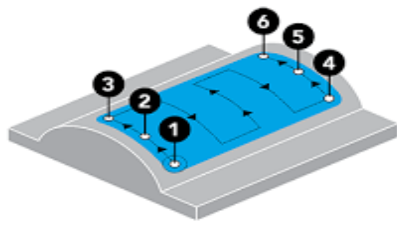


Figura 23: Exemplo de trajetória a ser calculada pelo *sanding kit* da Robotiq.

3. - Metodologia do trabalho

3.1 - Abordagem proposta

Face aos recursos existentes e aos objetivos do trabalho, são realizados um conjunto de ensaios de polimento na célula robótica. Para testar a viabilidade do robô neste processo, primeiramente são testadas peças planas de geometria simples, e posteriormente peças com geometrias mais complexas.

Para além disso, também é explorada a influência de alguns parâmetros relevantes na programação do controlo de força no controlador tais como:

- Programação online vs programação offline
- Variação das velocidades de avanço e de rotação da ferramenta
- Variação das forças de contacto
- Variação do ângulo de trabalho da ferramenta
- Variação de parâmetros específicos, disponibilizados na programação pelo software de controlo de força da ABB

Face aos meios disponíveis, a avaliação da operação de polimento é feita pela análise da força de contacto, medida com o transdutor de força disponível no robô.

Pretende-se assim testar até que ponto o robô é capaz de manter as forças de contacto constantes durante todo o processo. Se for assegurado que o robô as mantém, então pode-se assumir que este é capaz de realizar polimentos de qualidade, para as mais variadas aplicações. Será depois necessário seleccionar as ferramentas adequadas para o material em questão (disco de polimento e massa de polimento).

3.2 - Recursos existentes

3.2.1 - Célula Robótica

Para a análise experimental desta dissertação foi disponibilizada a célula robótica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), que pode ser vista na Figura 24.

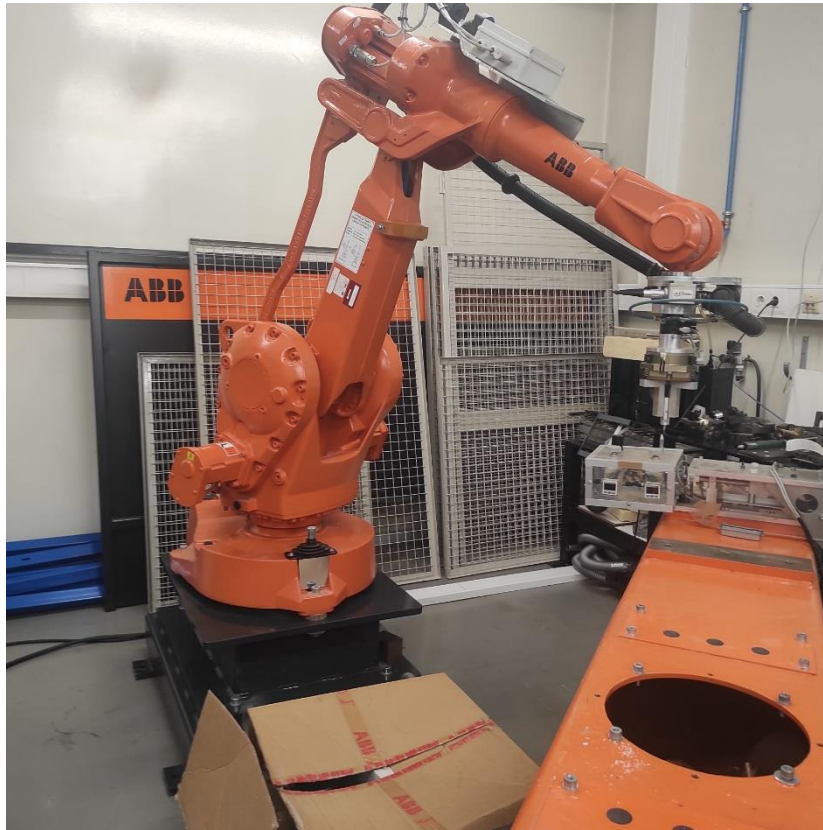


Figura 24: Célula Robótica disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP (DEMec).

O robô em causa é um *IRB 2400* da *ABB* (Figura 25a)), com uma capacidade de carga de 16 kg na extremidade livre e com um alcance máximo de 1,5m. Ao robô encontra-se associada uma mesa posicionadora, *IRB500 C* da *ABB* (Figura 25c)), que roda 360°, funcionando como o sétimo eixo da célula. Esta mesa tem uma capacidade de carga de 500 kg e uma velocidade de rotação de 15 rpm. O controlador do robô é um *IRC5* (Figura 25b)), que tem integrado o sistema da *ATI* de controlo ativo de força com base no transdutor de força/binário, *Delta 60* (Figura 25d)), colocado na extremidade livre do braço robótico.



Figura 25: Diferentes componentes da célula robótica.

3.2.2 - Ferramenta de Polimento

O robô está dotado de um *Spindle XLC-070* (motor-árvore), com um sistema automático de troca de ferramenta. O *spindle* é controlado por um variador de frequência, podendo operar até 20000 rpm, com um binário máximo de 0.97 Nm, e com uma potência de 2.2 KW. O arrefecimento é feito por ar comprimido. A este *spindle* é acoplado um disco de polimento esponjoso com 100mm de diâmetro, Figura 26.



Figura 26: Ferramenta de polimento adaptada para a análise experimental

3.2.3 - Tipo de controlo de força disponibilizado

Tal como já foi referido, o tipo de controlo de força desta célula é o: Controlo de força ativo na extremidade do braço robótico (secção 2.5.4), onde controlador do robô utiliza as forças e binários lidos diretamente pelo transdutor (Figura 27) para implementar duas estratégias de controlo de força.

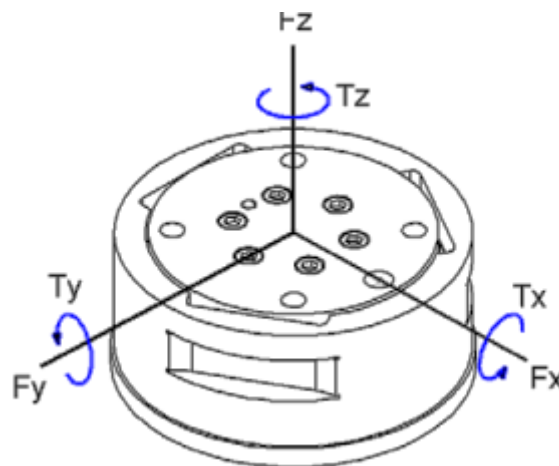


Figura 27: Forças e momentos aplicados no transdutor, no seu respetivo eixo de coordenadas [15].

O sensor tem o seu próprio sistema de coordenadas, assinalado na Figura 27. No entanto, é possível traduzir as forças lidas nesse sistema, para qualquer outro sistema de coordenadas, através do controlador [15]. Isto pode ser bastante útil, para quando se

pretende controlar as forças numa dada direção que seja diferente dos eixos ortogonais do transdutor.

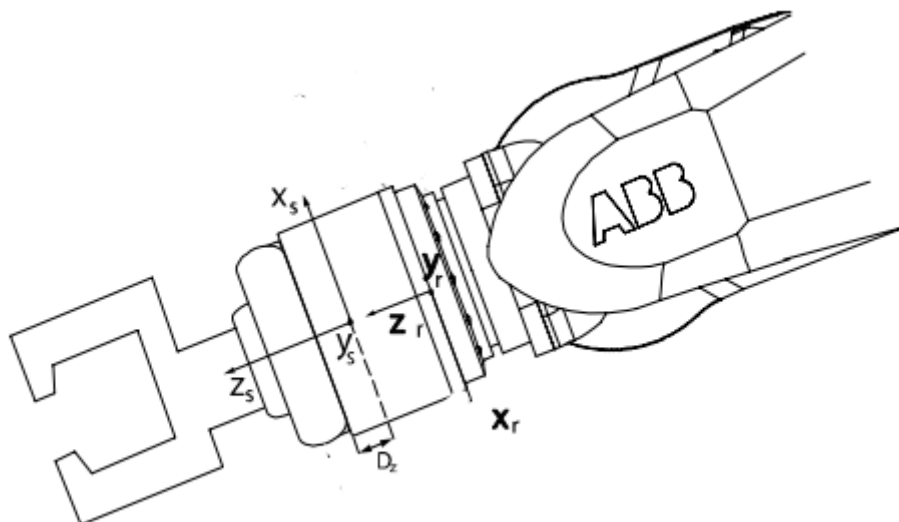


Figura 28: Disposição dos eixos da ferramenta e do transdutor, num robô ABB com controle de força. X_s , Y_s e Z_s representam o referencial da ferramenta, e X_r , Y_r e Z_r representam o referencial do transdutor [16].

Na figura 28, pode-se ver um exemplo de dois referenciais importantes, no braço robótico, o referencial do transdutor e o referencial da ferramenta. Apesar destes partilharem o mesmo eixo dos Z's, os outros eixos são diferentes. Então, se por exemplo, o intuito fosse controlar as forças em X, para o referencial da ferramenta (Xs), pode-se facilmente dar a instrução ao robô para controlar as forças nessa direção no referencial da ferramenta, poupando assim trabalho, ao tentar perceber a direção de tal força nos eixos do transdutor. Isto vai ser extremamente relevante, para este caso de estudo, em que na configuração da célula robótica utilizada, o referencial da ferramenta do spindle não se encontra alinhado com o referencial do sensor.

Este controlo pode ser implementado pelo controlador através de duas estratégias: o *Speed Change* e o *Pressure Change*.

3.2.3.1 - Controlo de força Speed Change

O *RobotWare Force Controle Speed Change* é um produto da família de programas da ABB, desenvolvido para os seus controladores. Este programa foi concebido para variar a velocidade do percurso programado em função da força medida.

Na Figura 29, pode-se ver um esquema que exemplifica o princípio de funcionamento deste programa.

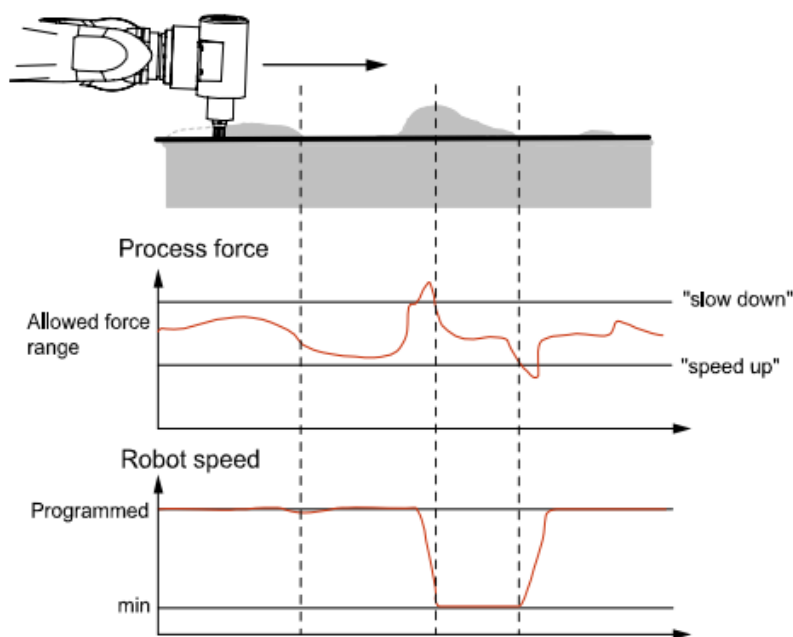


Figura 29: Funcionamento do modo *FCSpeedChange* [12].

Neste modo de controlo, quando no percurso do robô este encontra um alto inesperado, as forças de contacto podem ultrapassar o limite definido pelo utilizador. Aí o robô vai diminuir a sua velocidade de percurso. Depois desta diminuição, a velocidade volta aos valores pretendidos/programados, e vice-versa, desde que não volte a chegar ao limite de força pretendido.

Para configurar este modo, o utilizador define a janela de forças de contacto aceitáveis durante o processo (força máxima e força mínima pretendida), bem como os níveis de velocidade. Existe a possibilidade de escolher vários níveis de velocidade, para aumentar a precisão do trabalho. Por exemplo, o uso de 3 velocidades, como está ilustrado na Figura 30, onde há a velocidade máxima, a velocidade mínima e a velocidade intermédia. Esta última é útil para evitar mudanças de velocidade abruptas [12].

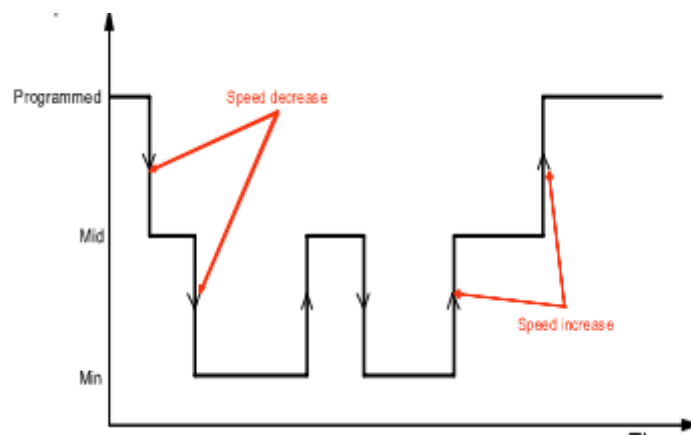


Figura 30: Demonstração da variação da velocidade de percurso, no modo *FcSpeedChange* para 3 níveis de velocidade programados [12].

Este modo de controlo de força é aconselhado para quando a precisão da trajetória do robô é importante, e as peças a serem maquinadas têm de ter dimensões específicas. Sendo por isso, muito utilizado em processos de furação ou de rebarbagem. Este controlo permite que nessas aplicações o tempo de vida da ferramenta e da peça sejam preservados, e que o tempo de trabalho seja diminuído.

3.3.3.2 - Controlo de força *Pressure*

O *RobotWare FCPressure* é o modo mais adequado para polimentos.

Este tipo de controlo de força permite conferir ao robô uma certa *compliance*, que faz com que este seja capaz de adaptar a sua trajetória, em função da força de contacto medida. Desta forma o robô pode ser programado de forma a manter constante a força de contacto, mesmo que isso implique desviar-se da trajetória previamente programada. Na Figura 31 pode-se ver um exemplo simples de um trajeto realizado com este controlo.

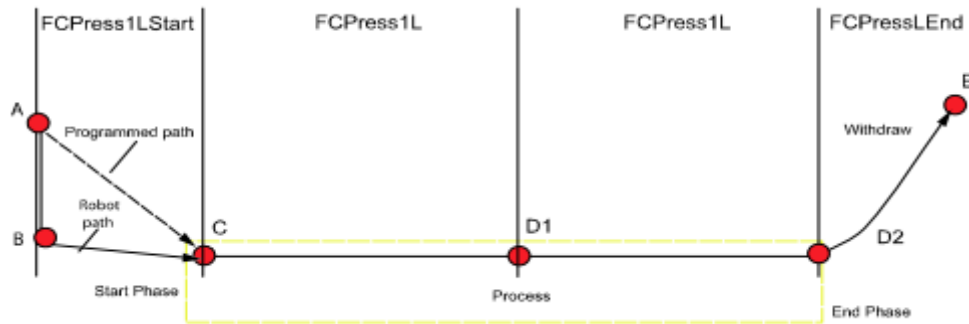


Figura 31: Ilustração do modo de funcionamento do modo de controlo *FCPressure* da ABB [12].

Quando este modo é ativado pelo comando *FcPress1LStart* (função de programação *RAPID*), no ponto A, o robô vai mudar para o modo de controlo de força, e vai-se movimentar na direção da força pretendida até entrar em contacto com a peça, ponto B. Depois movimenta-se para o ponto programado, ponto C. Onde é começado o trabalho, com a função *FCPress1L*², ou a função *FCPress1C*³, até chegar ao fim do trajeto, no ponto D2. Nesse instante, é ativa a função *FCpressLEnd*, que encerra o processo afastando o robô na direção da força oposta à de contacto até esta ter um valor nulo no Ponto E [12]. Ou seja, vai sempre haver 3 zonas muito importantes a programar: a zona de aproximação, a zona de trabalho e a zona de afastamento.

²**FCPress1L** – Função do modo *FCpressure*, que faz com que o robô se mova linearmente até ao próximo *robtarget*, com uma força constante definida pelo programador. Esta força pode ser alterada ao longo do percurso para cada *FCPress1L* no código.

³ **FCPress1C** – Função do modo *FCpressure*, que faz com que o robô se mova circularmente até ao próximo *robtarget*, com uma força constante definida pelo programador. Esta força pode ser alterada ao longo do percurso para cada *FCPress1L* no código.

3.3.4 - Software Utilizado

3.3.4.1 - RobotStudio

O principal software a ser utilizado neste trabalho é o *RobotStudio* da ABB (Figura 32).

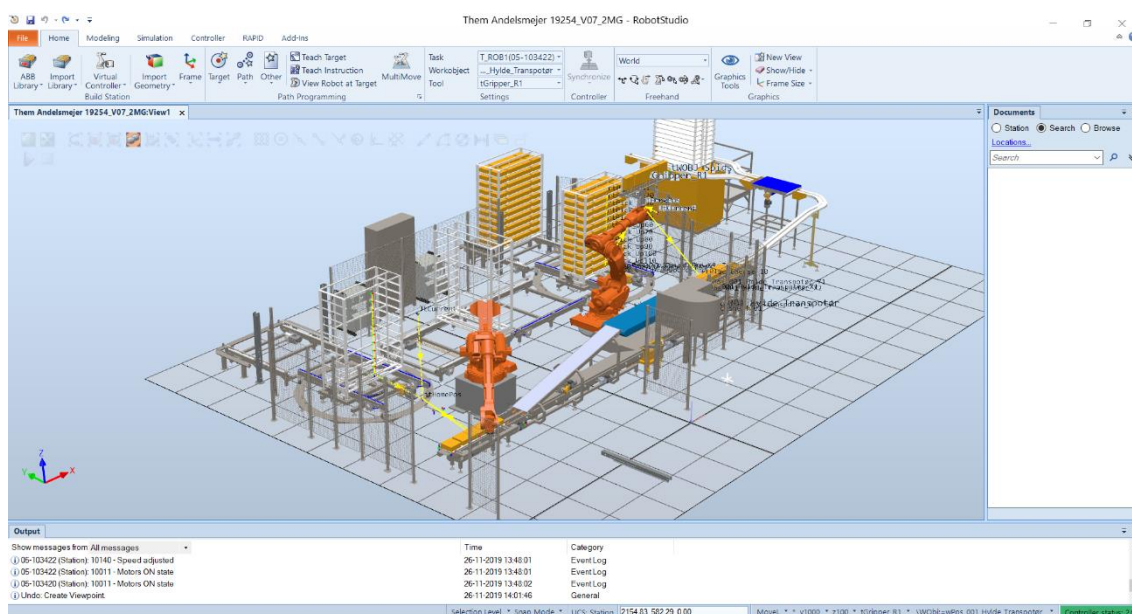


Figura 32: Software *RobotStudio* desenvolvido pela ABB (new-abb.com).

Este software foi desenvolvido pela ABB, com o principal intuito de programar os seus robôs offline. Para além disso, também permite a simulação computacional desses programas, para que possam ser testados e visualizados antes de serem implementados

A programação dos robôs ABB tem uma linguagem própria denominada de *RAPID*, que posteriormente pode ser editada no *RobotStudio*.

Uma outra vantagem deste software, é que permite estabelecer uma ligação com o controlador do robô real, e fazer alterações aos programas existentes no controlador. Esta aplicação vai ser amplamente utilizada neste trabalho, principalmente para a aquisição de dados. No próximo capítulo esta funcionalidade é abordada em mais detalhe.

Existem ainda outras funcionalidades que são disponibilizadas por este software, mas aqui foram apenas apresentadas as mais relevantes para este trabalho.

3.3.5 - Peça a ser polida

Para o estudo do polimento, a peça utilizada é uma *balance-board*. Esta peça pode ser descrita como uma prancha de madeira, que é utilizada para desenvolver o equilíbrio de desportistas, que realizam atividades com pranchas tal como skate, surf e snowboard. Na Figura 33 pode-se ver a aplicação de uma balance board, e a prancha que vai ser utilizada neste estudo.

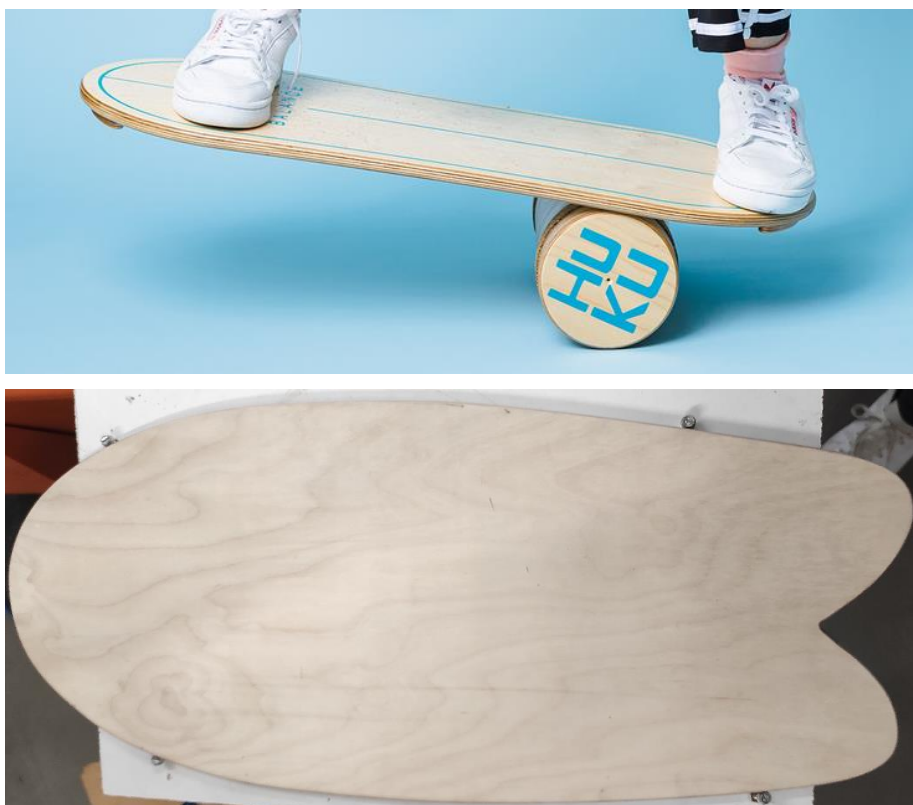


Figura 33: *Balance-board*, em cima uma aplicação. Em baixo a *balance-board* utilizada.

Esta peça foi escolhida principalmente pelas suas características geométricas. Primeiro de tudo, porque para o disco de polimento disponível, as suas dimensões têm o tamanho adequado (72x31x1.5cm). Se a peça fosse pequena demais, seria difícil polir certos detalhes devido as dimensões do disco. Outra característica geométrica fundamental é o facto de a prancha possuir duas faces planas, que vão ser utilizadas para a primeira parte deste trabalho, onde o intuito é polir uma superfície regular e plana, que

não envolva mudanças de direção no trabalho da ferramenta e do controlo de força. De seguida, os rebordos da tábua vão ser utilizados para a segunda parte do trabalho, onde o pretendido é estudar as forças de contacto, numa superfície mais complexa, onde existe mudança na direção de trabalho.

4. - Preparação dos ensaios experimentais

Neste capítulo são apresentados os passos utilizados para preparar e para programar o robô para realizar as operações do polimento à prancha e para recolher dados relevantes de cada ensaio.

Quanto a programação, a célula robótica possui duas formas de ser programada: a online e a offline. A online é realizada com o uso da consola do controlador, onde pode-se programar em tempo real. Já a offline é programada fora da célula robótica, num computador com o *RobotStudio* instalado (o software de simulação da ABB), sendo depois necessário efetuar o upload do programa gerado para o controlador. Neste capítulo são apresentados os detalhes mais relevantes, sobre estas dois meios de programação, para criar um programa com o controlo de força *FCPressure*.

4.1 - Localização e fixação da prancha

A peça foi posicionada e fixa à mesa de trabalho. Foram utilizadas duas localizações distintas para permitir, num dos casos, polir a face plana da prancha, e no outro a superfície lateral da prancha. As localizações escolhidas permitem que o robô consiga atingir com a orientação adequada as superfícies de interesse, sem necessidade de mover a peça. A Figura 34 ilustra o posicionamento e fixação da prancha para duas configurações testadas.

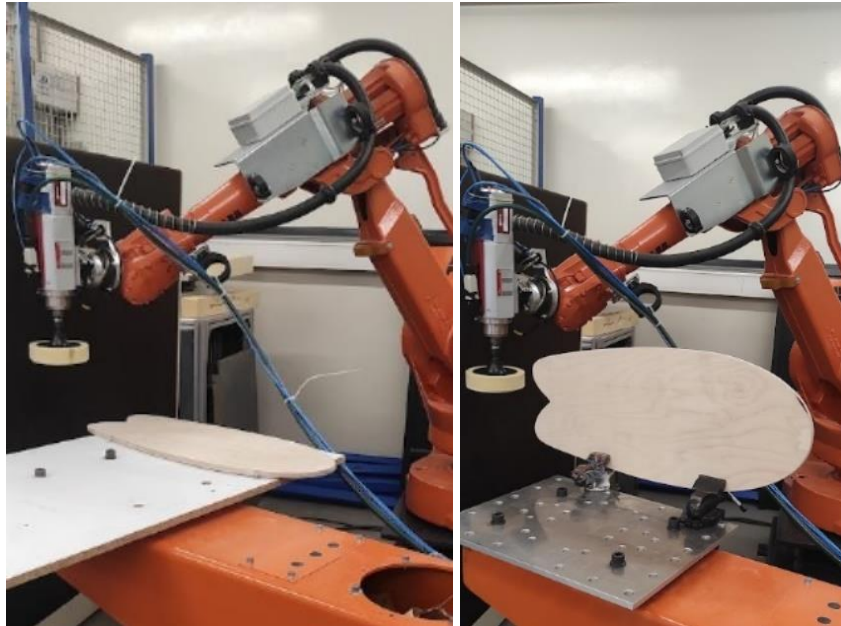


Figura 34: Duas configurações testadas para a localização da peça na mesa de trabalho para polir a superfície plana, (esquerda), e para polir as laterais da prancha, (direita).

Os sistemas de fixação utilizados permitiram manter a peça imobilizada durante as operações de polimento.

4.2 - Programação Online.

A programação online é realizada na consola, que está diretamente ligada ao controlador por cabo. A consola disponível é o *FlexPendant* do controlador *IRC5* (Figura 35). O *Flexpendant* é o conjunto hardware mais software da consola. Quanto ao hardware, trata-se de uma consola robusta e resistente, desenhada para operar em ambiente industrial. Quanto ao software, a interface disponibilizada é bastante intuitiva, e permite realizar várias tarefas, tais como:

- movimentar o robô (jogging);
- criar, modificar e executar programas;
- calibrar o robô;
- visualizar dados relevantes em tempo real, como as forças envolvidas, trajetos do robô, velocidades, etc.



Figura 35: Consola *FlexPendant*, do controlador *IRC5*.

Toda a programação online deste trabalho é realizada com o *FlexPendant*, sendo neste subcapítulo apresentados os passos fundamentais para programar o polimento robotizado da superfície plana da prancha.

4.2.1 - Definição do referencial de trabalho.

A definição ou escolha do referencial de trabalho, é uma das tarefas fundamentais para a criação de qualquer programa robótico, porque cada *target* do fica definido em relação a esse referencial. O referencial escolhido, foi o *Wobj0*, o referencial geral do

robô, que tem como origem a base do robô. Escolheu-se este referencial, porque a posição da prancha não varia para os diferentes ensaios, ou seja, as coordenadas vão ser sempre as mesmas em relação ao referencial escolhido. Uma outra opção poderia ser escolher um referencial na prancha, que nos permitiria movê-la em qualquer posição na área de trabalho, desde que o referencial tivesse sempre a mesma origem e direção dos eixos em relação a peça.

4.2.2 - Definição da ferramenta

Para definir a ferramenta no controlador, é necessário definir o referencial da ferramenta e a massa da ferramenta.

4.2.2.1 - Definição do referencial da ferramenta

Para definir o referencial da ferramenta é necessário definir a sua origem, o TCP (*Tool Center Point*), e a direção dos eixos.

O TCP é o ponto do referencial da ferramenta que vai ser utilizado para o posicionamento do robô face a um *target*. Ou seja, quando é dada a instrução para o robô se mover para um dado *target*, ele vai-se mover até que o referencial da ferramenta coincida com o *target*. Para ferramentas montadas no manipulador, este é definido em relação ao referencial *tool0*. O *tool0* está definido no elemento terminal do robô. Para uma melhor compreensão, na Figura 36, pode-se ver a representação do *tool0* (X_0 , Y_0 , Z_0), e o referencial de uma ferramenta (X_1 , Y_1 , Z_1).

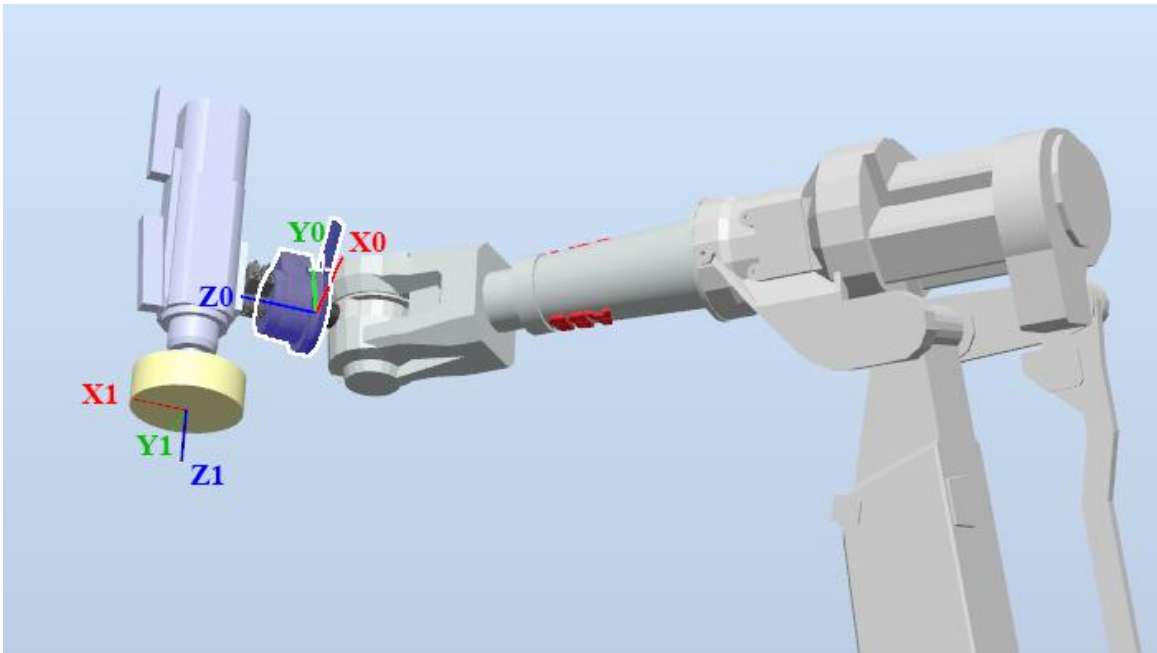


Figura 36: Exemplo da disposição de o referencial do disco de polimento, (X_1, Y_1, Z_1) , e a sua localização em relação ao *tool0*, (X_0, Y_0, Z_0) .

Para a ferramenta a ser utilizada neste trabalho (spindle + disco de polimento) o referencial que faz mais sentido, corresponde ao centro da face de baixo do disco de polimento, onde vai haver o contacto com a superfície (Figura 36). Depois de saber a localização do TCP na ferramenta é necessário ensinar ao robô onde se situa esse ponto, para isso recorremos a um programa no *FlexPendant* (Figura 37), denominado por *Defining the tool frame* (definir o referencial da ferramenta).

Manual
MySystem (RSTEST4)

Motors On
Stopped (2 of 2) (Speed 100%)

Program Data - tooldata - Define

Tool Frame Definition

Tool: tool1

Select a method, modify the positions and tap OK.

Method: TCP (default orient.) No. of points: 4

Point	Status
Point 1	-
Point 2	-
Point 3	-
Point 4	-

Positions Modify Position OK Cancel

Figura 37: Visualização do programa para definir o referencial da ferramenta no *FlexPendant*.

Neste programa define-se 4 pontos (no mínimo) no qual o TCP pretendido está sempre na mesma posição e apenas se varia a orientação da ferramenta. O centro do disco de polimento, não está marcado no disco, por isso foi necessário determiná-lo. A estratégia implementada para o determinar, foi trocar no *spindle*, o disco de polimento por uma fresa com exatamente a mesma altura, e utilizar a extremidade da fresa como se fosse o centro do disco. Para garantir que a fresa e o disco têm a mesma altura, colocou-se os dois sobre a mesma superfície, com uma régua por cima do disco (Figura 38) e ajustou-se a profundidade da fresa no porta-ferramentas, até esta igualar a altura do disco. Com este método garantimos uma maior precisão na determinação do centro da ferramenta.



Figura 38: Fresa utilizada para definir o TCP do disco de polimento.

Procedeu-se então a identificação dos 4 pontos. Para garantir que a posição é igual para os 4 pontos, utilizou-se um ponteiro como referência, que se manteve sempre na mesma posição para os diferentes pontos. Na Figura 39, pode-se ver os 4 pontos utilizados.

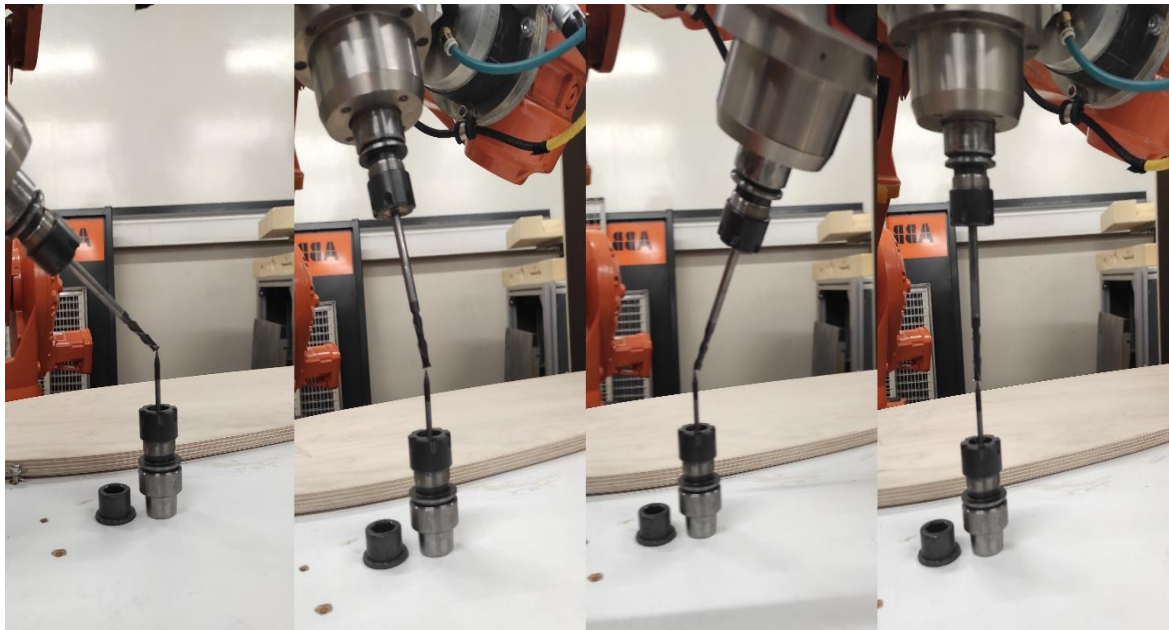


Figura 39: Os 4 pontos utilizados para definir o TCP do disco de polimento, com o auxílio de uma fresa.

Após identificar os 4 pontos, o controlador calculou a posição do TCP em relação ao tool0, e armazenou esta informação na sua memória, para que não seja necessário, definir novamente o TCP. A orientação do referencial foi mantida paralela a existente do referencial do spindle, com o eixo dos z alinhado com o eixo do z do *spindle*.

4.2.2.2 - Definição da massa da ferramenta.

O *LoadID* é utilizado para identificar a massa da ferramenta e o seu centro de gravidade. Este pode ser feito no *FlexPendant* ou no código RAPID através da função *FCLoadID*. Esta função faz com que o robô mova os eixos 5 e 6 no espaço que tem livre na posição em que se encontra (a rotação recomendada no eixo 5 é no mínimo de -30° a +30° e no eixo 6 de -90° a +90°). Enquanto este movimento ocorre, o controlador recolhe informação do sensor de força, que depois é utilizado para calcular o centro de gravidade e a massa da ferramenta. Estes dados são guardados numa variável do tipo *LoadData*, que serve para calibrar o sensor de força, para que esta possa desprezar o efeito do peso da ferramenta, quando o controlo de força for ativo.

4.2.3 - Criar um programa com controlo de força *FCPressure*

Depois de definir o referencial e a ferramenta, já se pode começar a criar um programa. A criação de um programa com controlo de força faz uso do software *RobotWare Machining FC* disponível a partir da consola de programação, (Figura 40).



Figura 40: RobotWare Machining FC, funcionalidade do FlexPendant.

Nesta interface (Figura 40) o **FC Setup** tem duas funções: permite ativar/desativar o controlo de força, que pode ser útil para, por exemplo, movimentar o manipulador do robô arrastando-o manualmente; e também permite fazer o *LoadID* da ferramenta. Os outros 4 botões **Load**, **Create**, **Modify** e **Execute** são utilizados respetivamente para abrir, criar, modificar e executar projetos com controlo de força. O **Load** acede a um explorador de ficheiros para procurar na memória do controlador o programa que queremos abrir. O **Create** é o mais importante, porque é neste que são definidos uma série de parâmetros essenciais para o controlo de força. O **Modify** é igual ao **Create**, a única diferença é que no **Modify** não se cria um programa novo, mas altera-se os parâmetros de um projeto já criado. Por fim, o **Execute** permite executar o projeto aberto, visualizar o trajeto realizado pelo robô e monitorizar as forças em tempo real.

Para criar um projeto, no menu **Create** é necessário passar por uma série de passos. Nomeadamente o *Process*, o *Data*, o *Settings*, o *Paths* e o *Summary* (Figura 41).

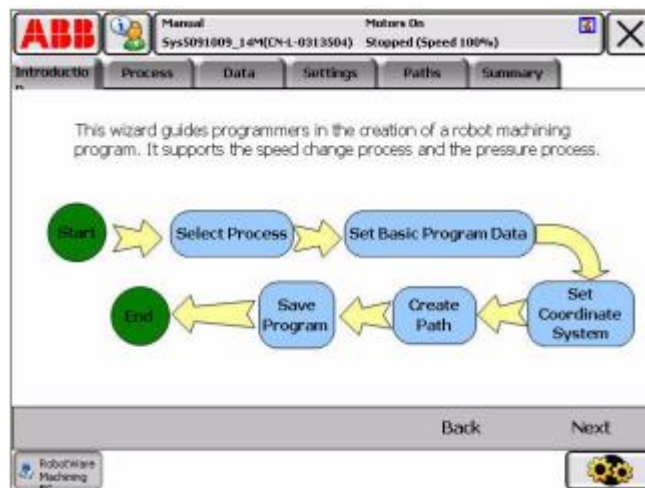


Figura 41: Introdução a criação de um projeto no *RobotWare Machining FC*, do *FlexPendant*.

i. Process

No *Process* escolhe-se qual o tipo de controlo de força pretendido: o *FCPressure* ou o *FCSpeed*. O modo que é utilizado neste estudo é o *FCPressure*.

ii. Data

No *Data* são especificados os dados gerais do projeto, nomeadamente o nome do ficheiro e uma breve descrição (facultativa).

iii. Settings

No *Settings* (Figura 42) é onde é selecionada/definida a ferramenta (*tool*) e o referencial de trabalho a ser utilizado (*Wobj*). Se a ferramenta e o referencial pretendido já estiverem definidos no controlador, irão aparecer na lista da esquerda e da direita respetivamente. Caso contrário, é possível defini-los neste menu e identificar a carga da ferramenta. Basta clicar em *NEW*, *Define* e depois *Force Control Load ID*.

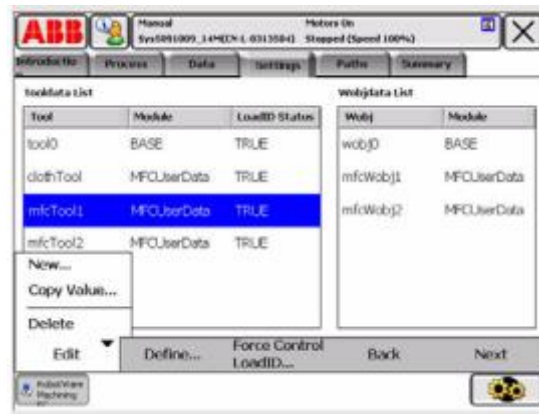


Figura 42: Settings do RobotWare Machining FC do FlexPendant

iv. Path

No *Path* (Figura 43) é onde vai ser criado o trajeto do robô, este é o passo mais importante, porque tem uma série de parâmetros para definir que podem ser bastante relevantes. Estes parâmetros são apresentados mais a frente, neste capítulo. O *Path* também possui uma sequência de passos a seguir:

- *Add Paths* (Adicionar Trajetos)
- *Teach Paths* (Ensinar o trajeto)
- *Automatic Learn* (Aprendizagem automática)
- *Export to RAPID* (Onde é gerado o código RAPID do trajeto)
- *TEST* (testagem)

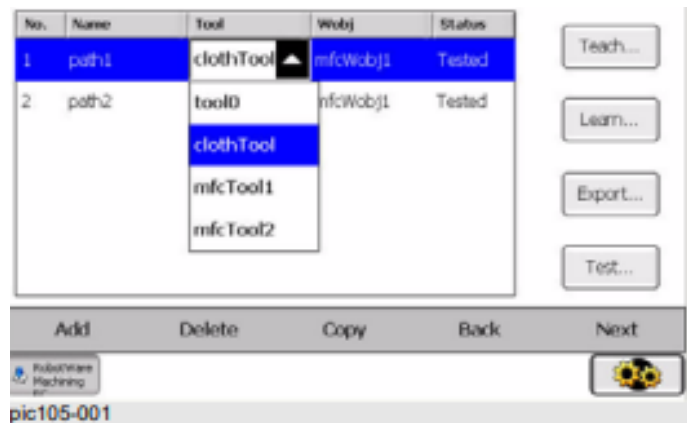


Figura 43: Paths do RobotWare Machining FC do FlexPendant.

v. Summary

No *Summary* pode-se visualizar o estado do projeto e guardá-lo. Na Figura 44 pode-se visualizar um exemplo da janela *summary*, onde o projeto ainda não foi ensinado (*Untaught*). Se o projeto já estivesse concluído, já tinha passado por todos os passos sequenciais do *Path* e apareceria *Tested* em vez de *Untaught*.



Figura 44: Summary no FlexPendant do RobotWare Machining FC

4.2.4 - Caracterização dos parâmetros mais relevantes na programação do FCPressure

No menu *Path*, existe uma série de parâmetros relevantes no momento da programação, nomeadamente na interface do *Teach* e na interface do *Learn*. Antes de realizar qualquer ensaio, todos estes parâmetros foram estudados com recurso a informação dada pelos manuais de utilização da força de controlo, disponibilizados pela ABB, [12] e [16], e através da experimentação.

i. Teach

No *Teach* é onde é ensinado ao robô o trajeto pretendido (é possível adicionar mais do que um trajeto), através da identificação de alguns targets. Na escolha dos targets existem algumas regras importantes a cumprir para garantir um bom funcionamento do controlo de força. Primeiro de tudo, vão existir 3 tipos de *targets*: os de aproximação, os de contacto e os de saída.

Na Figura 45, observa-se a interface do *Teach*. Por defeito são dados 7 targets para definir. Caso seja necessário adicionar mais algum basta seleccionar um target, e clicar no botão *insert before* (inserir antes do target seleccionado) ou no botão *insert after* (inserir depois do target seleccionado).

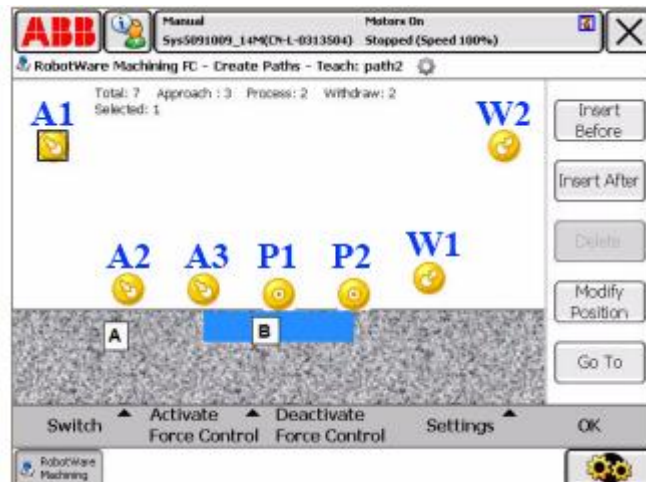


Figura 45: Teach no menu Path do RobotWare Machining FC no FlexPendant

Os três primeiros targets são os de aproximação. Na Figura 46 está representado a disposição recomendada para estes. As regras para essa disposição são:

- O ângulo entre a normal à superfície e a reta que passa pelos *targets* A1 e A2, deve ser inferior a 45°
- A linha que une os *targets* A2 e A3, deve ser o mais paralela possível a superfície.
- O A2 e o A3 devem estar o mais próximo possível da superfície, mas sem existir contacto

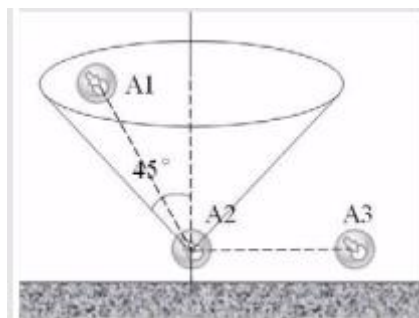


Figura 46: Disposição recomendada dos targets de aproximação.

Os próximos dois targets, P1 e P2, representados na Figura 45, são os de contacto. Tal como o nome indica é nestes targets que o robô vai estar em contacto com a superfície e onde vai ser controlado em força. Esta é a zona onde devem ser adicionados os targets extra caso seja necessário, no mínimo têm de existir dois, para indicar o princípio e o fim da zona de contacto. A escolha da posição destes targets vai depender da superfície em questão e cabe ao utilizador defini-los. No entanto, é importante que a direção da ferramenta nos targets, seja sempre perpendicular à superfície (Figura 47).

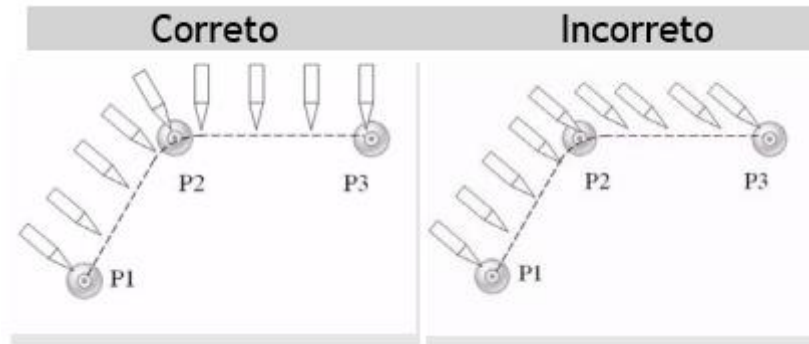


Figura 47: Direção da ferramenta nos targets de contacto.

Por fim, os últimos dois targets que se vê na Figura 45, (W1 e W2) são os de saída, onde o robô deixa de estar em contacto com a superfície. Na escolha destes targets, não há muitas regras, é apenas importante que o primeiro esteja ligeiramente afastado da superfície e que o segundo esteja ainda mais afastado.

No *Teach* para além da definição dos targets, ao clicar em *settings* surge uma interface para definirmos alguns parâmetros para as zonas de contacto. Nomeadamente, o *speed*⁴ (as velocidades), a forma de aproximação a zona⁵ e a força de contacto (N). Estes parâmetros podem ser alterados para cada target do trajeto.

Ao clicar nos *settings* também existe uma outra interface para mudar os parâmetros de aproximação e de saída (Figura 48).

⁴ Speed (SpeedData) é uma variável do código RAPID que representa quatro velocidades: a velocidade do TCP (mm/s), a velocidade de reorientação (°/s), a velocidade dos eixos lineares (mm/s) e a velocidade dos eixos rotacionais (°/s). No entanto, existe uma lista já com valores predefinidos desta variável, para que não seja necessário estar sempre a definir as 4 componentes, quando queremos alterar as velocidades. Elas são representadas por “v” seguido da velocidade do TCP, por exemplo: v5, v10, v20, etc. Estas variáveis predefinidas são as opções disponíveis para escolher na interface do teach.

⁵ Zone (Zonedata) é uma variável que define a precisão com a qual o robô se move para cada target. Isto é o quão próximo o robô deve estar do target antes de começar o movimento para o próximo. Esta variável subdivide-se em 6 componentes: zone do TCP (mm), zone da orientação (mm e °), zone para os eixos lineares (mm), zone para os eixos rotacionais (°) e zone para os eixos exteriores. No entanto, existe uma lista já com valores predefinidos desta variável, para que não seja necessário estar sempre a definir as 6 componentes. Elas são representadas por um “z” seguido da zone do TCP, por exemplo: z1,z5,z10,etc. Também existe uma denominada por “fine” que é quando se pretende precisão máxima. Estas variáveis predefinidas são as opções disponíveis para escolher na interface do teach.



Figura 48: Parâmetros de aproximação (esquerda) e de saída (direita).

Quanto aos parâmetros de aproximação, estes são muito relevantes, porque se trata do momento em que o robô faz o primeiro contacto com a superfície, e geralmente existe sempre um pico de força nesse momento, que se não for bem parametrizado poderá ter uma amplitude muito superior ao valor da força de contacto pretendida. Para definir estes parâmetros, primeiramente preenche-se os valores pretendidos da **força de contacto de aproximação** nos 3 eixos ortogonais, podendo-se também escolher se pretendemos essa força representada no referencial do robô ou no da ferramenta (**ForceFrameRef**). Depois a direita da interface dos parâmetros de aproximação, pode-se ainda ver mais cinco parâmetros para manipular. O primeiro é o **Threshold** que representa a percentagem de força de contacto, que deve ser alcançada, antes do robô começar o seu movimento em direção ao target de contacto (valor predefinido 50%). Assim que a força correspondente a esta percentagem for alcançada o movimento em direção ao target inicia-se. Depois tem-se o **Force Change Rate** que representa a variação de força admitida por segundo (valor predefinido 50 N/s). Depois tem-se o **Damping**, uma percentagem, que representa a relação entre as forças medidas e as forças aplicadas, por defeito o seu valor é 100%. Valores inferiores a este significa que o robô vai ser mais sensível as forças exteriores. A seguir tem-se o **Time Out** em segundos, que é utilizado para se o robô dentro desse intervalo de tempo não conseguir alcançar a força de contacto pretendida para continuar com a próxima instrução (valor predefinido 5s). Por fim tem-se o **FFW**, se este parâmetro não estiver selecionado, na direção da força apenas vai haver controlo de força. Se estiver selecionado, para além do controlo de força também é utilizado o controlo de posição a partir do trajeto ensinado anteriormente. Este parâmetro só deve ser utilizado para superfícies complexas e com um trajeto programada muito semelhante ao trajeto real.

Quanto aos parâmetros de saída, existem apenas dois. Um deles é novamente o **Force Change Rate**, mas neste caso para o movimento de saída. O outro é o **Zero Contact Value**, uma percentagem da força de contacto, que define o momento para qual o controlo

de força é desativado. Ou seja, no movimento de saída assim que a força de contacto seja inferior a esse valor, o controlo de força é desligado.

ii. Learn

O Learn é um processo automático onde o robô vai seguir o trajeto ensinado no teach, com uma força e velocidade especificada pelo utilizador. Durante este trajeto uma série de novos targets vão ser gerados e gravados pelo controlador. No fim é possível visualizar na interface o trajeto gerado em 3D, Figura 49.

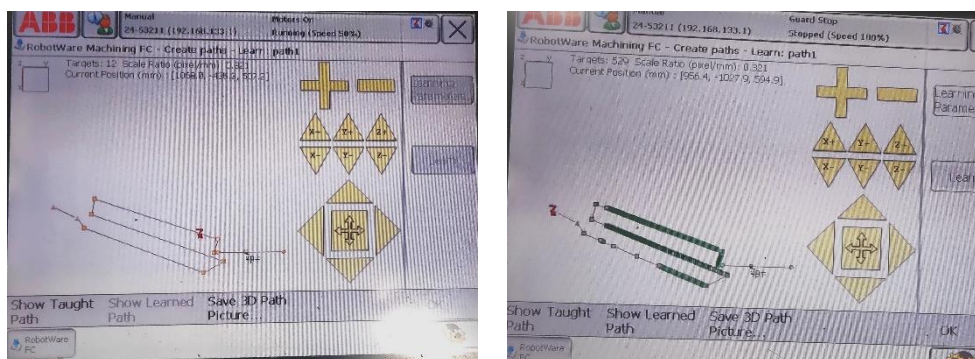


Figura 49: Trajetos visualizados na interface *learn*, para um dos ensaios realizado na prancha. A esquerda o trajeto ensinado no teach. A direita o mesmo trajeto, mas após o *learn*.

4.3 - Programação Offline.

A programação offline é feita com recurso ao software *RobotStudio*, onde se gera um programa que depois é transferido para o controlador do Robô, ou se altera um programa disponível no controlador.

O primeiro passo a fazer no *RobotStudio* é recriar a célula virtual disponível no laboratório do DeMec. Para poder-se simular o percurso em ambiente virtual antes de o testar no ambiente real. Apenas foram utilizados na célula virtual os elementos mais relevantes para a tarefa em questão. Na Figura 50, pode-se ver a célula robótica em questão. Ela é constituída por: o robô *IRB2400*, que foi importado da biblioteca da *ABB*; o *spindle XLC070*, e o punho onde se encontra o transdutor, que foram importados de trabalhos anteriores realizados na FEUP para este robô; e por fim a prancha e o disco de polimento que foram modelados em 3D, especificamente para este trabalho.

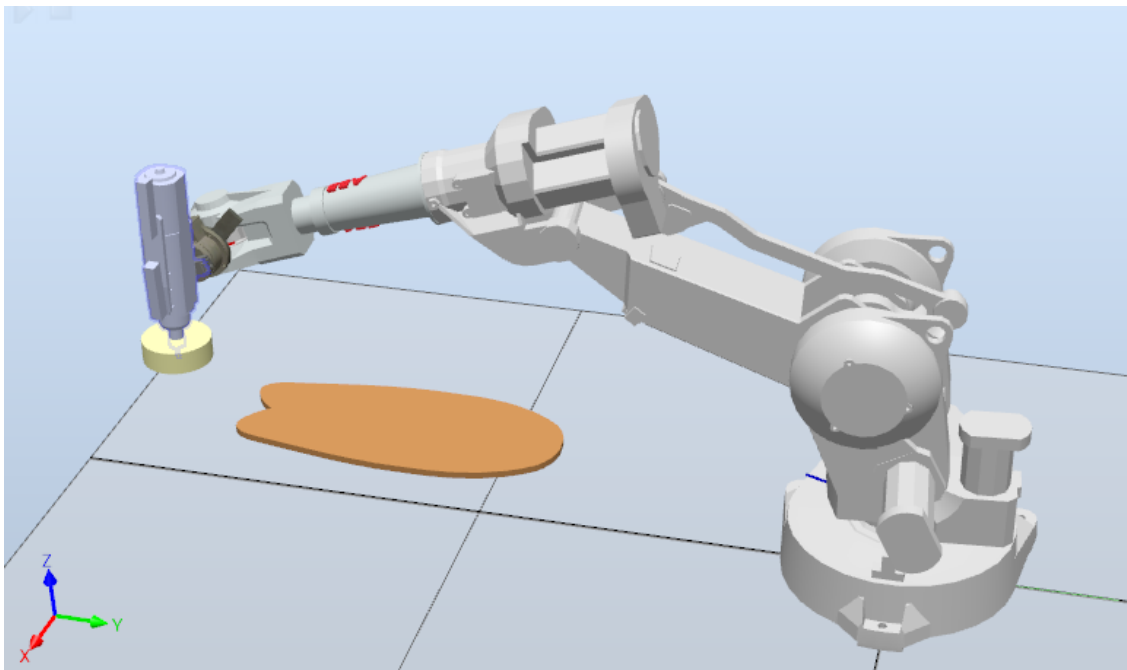


Figura 50: Representação de parte da célula robótica disponível no DeMec, no software *RobotStudio*.

Tal como na programação online, antes de começar a programar, é muito importante definir os referenciais a ser utilizados, bem como, o TCP da ferramenta. O referencial utilizado tem origem na prancha. Esta escolha garante que independentemente da posição da prancha, o percurso feito pelo robô em relação a esta é sempre o mesmo, porque os targets são dependentes de um referencial com posição fixa na prancha. Após definir o referencial no *RobotStudio*, apenas é importante que a localização e orientação, em relação a prancha, sejam iguais para a célula virtual e para a célula real. Com este propósito marcou-se na peça original o referencial pretendido e replicou-se essa localização e orientação, na célula virtual.

O próximo passo é identificar os targets necessários, sem esquecer os parâmetros para a definição dos targets referidos na programação offline. Nomeadamente as regras no posicionamento dos três targets de aproximação, a perpendicularidade à superfície nos targets de contacto e o posicionamento dos targets de saída.

Com a utilização do *RobotStudio* facilmente se caracteriza a direção da ferramenta, como perpendicular a superfície, porque este está dotado de uma função que permite colocar a orientação dos targets com um eixo perpendicular à superfície onde este está inserido. Relembrando que a orientação do target corresponde a orientação da ferramenta, ao escolher o controlo de força para o eixo escolhido como perpendicular, garante-se

facilmente, que a força de contacto vai ser sempre perpendicular a superfície, mesmo para superfície com curvas complexas. Esta tarefa na programação online é mais exigente, porque cabe ao utilizador manusear o manipulador robótico, para escolher a posição e orientação da ferramenta como perpendicular a superfície, para cada target de uma superfície curva. Neste sentido, a programação offline é mais precisa na escolha da orientação da ferramenta, desde que se possua um modelo preciso da peça em 3D. Em contrapartida, não é possível simular o controlo de força em ambiente virtual neste software. No entanto, é possível simular um programa normal com controlo de posição, para os targets referidos anteriormente. Isto pode ser particularmente útil para a escolha da configuração do robô e testar os limites da área de trabalho da célula robótica. Para além disso, também é possível programar em código *RAPID*, um modulo com controlo de força, que depois pode ser lido pelo controlador real. Este é o próximo passo após a definição dos targets.

Na manipulação do código *RAPID*, as funções mais relevantes são novamente as definições dos movimentos de aproximação, de contacto e de saída, que tal como na programação online vão ter uma série de parâmetros específicos. Relembrando que grande parte da programação realizada no *FlexPendant*, é apenas um conjunto de interfaces intuitivo, que no fim gera um código *RAPID*, para que o controlador o possa executar. Ou seja, os mesmos parâmetros explicados anteriormente, vão ser os inputs de certas funções do controlo de força *FCPressure* do código *RAPID*.

Segundo o manual da ABB para o controlo de força [12], para criar um programa *RAPID* em *FCPressure* deve-se seguir as seguintes tarefas sequenciais:

1. Identificar a carga da ferramenta.
2. Mover para um ponto de aproximação à superfície, sem existir contacto.
3. Calibração do sensor.
4. Ativar e parametrizar a força de controlo e começar o movimento.
5. Mover com controlo de força sobre a superfície.
6. Abandonar a superfície.

Para entender melhor estes passos, segue-se um exemplo (Figura 51) de um código básico em *RAPID* para o *FCPressure*, onde A1, A2 e A3 são os targets de aproximação, C1, C2 e C3 são os targets de contacto com a superfície, S1 e S2 são os targets de saída e a verde é dada uma explicação de cada linha de código sobre a forma de comentário.

```

PROC Exemplo1()
! Defenir variavel e identificar a carga, utilizando o sensor
PERS loaddata MytoolLoad:=[0.001,[0,0,0.001],[1,0,0,0],0,0,0];
MytoolLoad:=FCLoadID();
! Movimento de aproximação à superfície
MoveJ A1, v100, z1, Mytool;
MoveL A2, v100, z1, Mytool;
MoveL A3, v100, z1, Mytool;
! Calibrar o sensor de força com a carga da ferramenta
FCCalib MytoolLoad;
! Ativar o contro de força e mover para a zona de contacto em C1
! Passar à próxima instrução assim que forem alcançados 50% (threshold) dos
! 60N de força de contacto no eixo Z.
FCPress1LStart C1, v100, \Fz:=60, 50, z30, myTool;
! Mover linearmente com controlo de força de C1 para C2 com uma força de 50N, !na
! direção do z
FCPress1L C2,v100,50,z30;
! Mover linearmente com controlo de força de C2 para C3 com uma força de 70N, na
! direção do z
FCPress1L C3,v100,70,z30;
! Abandonar a superfície e seguir para o ponto S1
! O controlo de força é desativado após esta função
FCPressLEnd S1, v100 \ForceChange:=50, \ZeroContactValue:=5;
! Mover linearmente para S2, afastar da superfície
MoveL S2, v100, z1, Mytool;

ENDPROC

```

Figura 51: Exemplo de um código básico em *RAPID* para o *FCPressure*.

Observação: a função *FCpress1Start* pode ser escrita numa forma mais extensa, para englobar todos os parâmetros discutidos anteriormente, segue-se um exemplo (Figura 52), com os argumentos todos que a função pode ter [12].

```
! Argumentos utilizados pela função (já conhecidos):  
! FCPress1LStart ToPoint Speed [\Fx] [\Fy] [\Fz] ForceThreshold [\ForceFrameRef]  
! [\ForceChange] [\DampingTune] [\TimeOut] [\UseSpdFFW] Zone Tool [\WObj]  
! exemplo:  
  
FCPress1LStart C1, v50 \Fx:=n1ForceX \Fy:=n1ForceY \Fz:=n1ForceZ ,50  
\ForceFrameRef:=FC_REFFRAME_TOOL \ForceChange:=50 \DampingTune:=100  
\TimeOut:=5, \UseSpdFFW, z1, Mytool \wobj:=workobject_1;
```

Figura 52: Exemplo de código, com os argumentos todos que a função *FcPress1LStart* pode ter.

4.4 - Método de recolha de Dados.

Para recolher os dados de cada ensaio foi criado um código *RAPID*, onde as posições e as forças envolvidas durante o programa vão ser guardadas num ficheiro de texto (.txt). Esse ficheiro depois é transferido do controlador para um computador, onde os dados vão ser tratados com recurso ao Excel. Nas seguintes figuras (Figura 53 e Figura 54), pode-se visualizar esse código, com a sua explicação em forma de comentários

!Definição das variáveis a utilizar para ler os dados

```
VAR intnum time_int;
VAR num i:=0;
VAR pos posdata{100000};
VAR num tempodata{100000};
VAR fcforcevector forcedata;
VAR num tempoval;
VAR clock cloc1;
VAR num testeforce_x{100000};
VAR num testeforce_y{100000};
VAR num testeforce_z{100000};
VAR string filename:="file1";
```

! Entry point (programa de entrada/ primeiro programa a ser lido / programa principal)

```
proc main ( )
  i:=0;
  ClkReset cloc1;  !Reset do temporizador
  ClkStart cloc1;  !Inicio do temporizador
  interopt;        !Programa interopt
  ClkStop cloc1;   !Stop do temporizador
```

Figura 53: Código *RAPID* utilizado para recolha de dados (parte 1).

! ...Continuação

!Rotina para escrita em memoria dos dados lidos a cada interrupt

TRAP write_data_toarray

i:=i+1;

posdata{i}:=CPos(\Tool:=fcSPINDLEpol1\WObj:=wobj0); ! posição do robô no instante atual

tempoval:=ClkRead(Cloc1); !Instante de tempo em que se encontra o robo

tempodata{i}:=tempoval; !Guardar instante na memória

forcedata:=fcGetForce(\Tool:=fcSPINDLEpol1\contactforce); !Força de contacto no instante

!Guardar os valores de força para cada eixo na memória

testeforce_x{i}:=forcedata.xforce;

testeforce_y{i}:=forcedata.yforce;

testeforce_z{i}:=forcedata.zforce;

ENDTRAP

!Criação do ficheiro de texto

PROC write_to_file()

VAR iodev file;

filename:="file1.txt"; !nome do ficheiro

open "home:"\file:=filename,file; !localização do ficheiro no controlador

!Escrita de todos os valores guardados em memoria no ficheiro:

Write file,"Ponto, x, y, z, tempo, Fx, Fy, Fz";

FOR i FROM 1 TO 1000 DO

write file," \"num:=i\\NoNewLine;

Figura 54: Código *RAPID* utilizado para recolha de dados (parte 2).

5. - Apresentação e análise dos dados obtidos.

Ao longo de todo o trabalho foram realizadas várias experiências para perceber todas as potencialidades e limitações do robô, para a realização de polimentos com controlo de força. No entanto, apenas as mais relevantes vão ser aqui apresentados.

A metodologia utilizada na realização das experiências foi decompor o polimento da prancha, em tarefas mais simples, para verificar em isolado, a influência dos parâmetros na capacidade de o robô manter uma força de contacto constante, durante o polimento. Os parâmetros, em que são dados mais ênfase, são os que dependem de vários fatores (que variam dependendo do tipo de aplicação), e geralmente a experimentação é a melhor forma de os definir [4] e [20]. Não obstante a isso, todas as experiências foram realizadas com fundamento teórico, de outros estudos e experiências realizadas no âmbito do polimento robotizado. Esses parâmetros que vão ser analisados são: a velocidade de rotação da ferramenta, a força de contacto, a velocidade de avanço, a configuração da ferramenta face à superfície a polir e a forma de gerar o trajeto robótico (online VS offline). Estes fatores, foram primeiro avaliados em separado, na face plana da prancha, onde a exigência do polimento é menor, e é mais fácil de analisar variações. Depois, toda a informação recolhida nesses ensaios é utilizada para a realização de um ensaio completo à superfície plana da prancha, na melhor configuração encontrada. De seguida, a segunda parte da experimentação, é focada no polimento das bordas da prancha, uma superfície com curvaturas mais complexas. Verifica-se que os mesmos parâmetros escolhidos para a superfície plana, não são compatíveis com a complexidade desta superfície, o que requer uma reconfiguração de alguns destes parâmetros. Para além disso, também foram realizados alguns testes complementares, para a análise dos dados, como a capacidade de medição de forças pelo sensor, e a influência da rotação da ferramenta na leitura de sinais de força.

5.1 - Análise das interferências na leitura das forças envolvidas, com o robô parado e o *spindle* ligado

A primeira preocupação antes de realizar algum polimento foi analisar a possibilidade de interferências nos sinais de força lidos pelo sensor, quando o disco de polimento está em rotação. Existem alguns estudos disponíveis que refletem sobre este problema no polimento robótico, por exemplo, o artigo [18], que afirma que a rotação dos discos de polimento gera vibrações, que geram incertezas na medição da força de contacto, que por sua vez constituem um desafio para o controlo robótico.

Para realizar esta análise, criou-se um programa simples no RAPID, com o robô controlado em posição, com apenas: um target e um temporizador. Com este programa, o robô fica parado na mesma posição durante algum tempo, sem existir qualquer contacto com a superfície. Assim, é possível garantir que forças exteriores desnecessárias (com exceção ao peso da ferramenta) não vão ser analisadas.

Realizou-se no total 10 ensaios. Os dois primeiros foram: um com o *spindle* desligado e outro com o *spindle* ligado, mas sem rotação. Estes ensaios serviram como base de comparação para os próximos ensaios deste grupo. Os restantes, foram analisados com rotação da ferramenta. Os primeiros deste género, foram feitos com a ferramenta de polimento acoplada no *spindle*, onde foi analisado o ruído para diferentes velocidades de rotação. Depois, retirou-se a ferramenta e trocou-se por uma broca e realizou-se exatamente os mesmos testes. Esta troca foi feita, após notar-se ruídos elevados no disco de polimento, então escolheu-se uma ferramenta de menor diâmetro (30x mais pequeno) para verificar a influencia que a geometria da ferramenta poderia ter nos resultados obtidos. As velocidades de rotação testadas foram 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm e 4000 rpm. Não se testou velocidades superiores, porque o disco de polimento utilizado tem como velocidade máxima de rotação 4000 rpm.

Resumindo, os ensaios realizados por ordem foram os seguintes:

- 1.1 - *Spindle* desligado.
- 1.2 - *Spindle* ligado, mas sem rotação.
- 1.3 - *Spindle* ligado a 1000 rpm, com o disco de polimento.
- 1.4 - *Spindle* ligado a 2000 rpm, com o disco de polimento.
- 1.5 - *Spindle* ligado a 3000 rpm, com o disco de polimento.
- 1.6 - *Spindle* ligado a 4000 rpm, com o disco de polimento.
- 1.7 - *Spindle* ligado a 1000 rpm, com a fresa.
- 1.8 - *Spindle* ligado a 2000 rpm, com a fresa.
- 1.9 - *Spindle* ligado a 3000 rpm, com a fresa.
- 1.10 - *Spindle* ligado a 4000 rpm, com a fresa.

A leitura dos sinais foi feita num software da ABB, o *Test Signal Viewer*, que permite visualizar os dados em tempo real que o transdutor lê, no referencial do transdutor, sem calibração do sensor para a carga submetida. Os dados obtidos foram exportados sobre a forma de ficheiro *.txt* e posteriormente foram analisados no *Excell*. Na Tabela 1, pode-se verificar os valores obtidos para cada ensaio, onde é avaliado o desvio padrão (desvio médio em relação á média dos valores) e o desvio absoluto máximo (maior desvio absoluto dos valores em relação á média). Na Figura 55, é possível visualizar os dados obtidos sobre a forma de gráfico, para uma melhor percepção do ruído envolvido em cada ensaio.

Tabela 1: Análise dos ruídos causados pela rotação, experiência 1.

Ensaio	Ferramenta utilizada	Velocidade do <i>spindle</i> (rpm)	Desvio padrão (N)			Desvio absoluto (N)		
			X	Y	Z	X	Y	Z
1.1	-	Desligado	0.06	0.05	0.11	0.32	0.30	0.76
1.2	-	Ligado (0rpm)	0.08	0.11	0.24	0.54	0.59	1.28
1.3	Disco	1000	0.21	0.76	0.34	1.04	1.91	1.85
1.4	Disco	2000	1.31	1.45	1.67	3.68	4.11	4.42
1.5	Disco	3000	1.70	2.06	2.67	4.38	5.79	6.85
1.6	Disco	4000	18.69	5.76	4.09	31.41	16.64	23.87
1.7	Fresa	1000	0.18	0.37	0.34	0.93	1.22	1.73
1.8	Fresa	2000	0.58	0.74	0.66	2.07	2.04	2.72
1.9	Fresa	3000	0.58	0.75	0.65	2.02	2.03	2.75
1.10	Fresa	4000	7.59	1.35	2.17	14.88	6.81	11.25

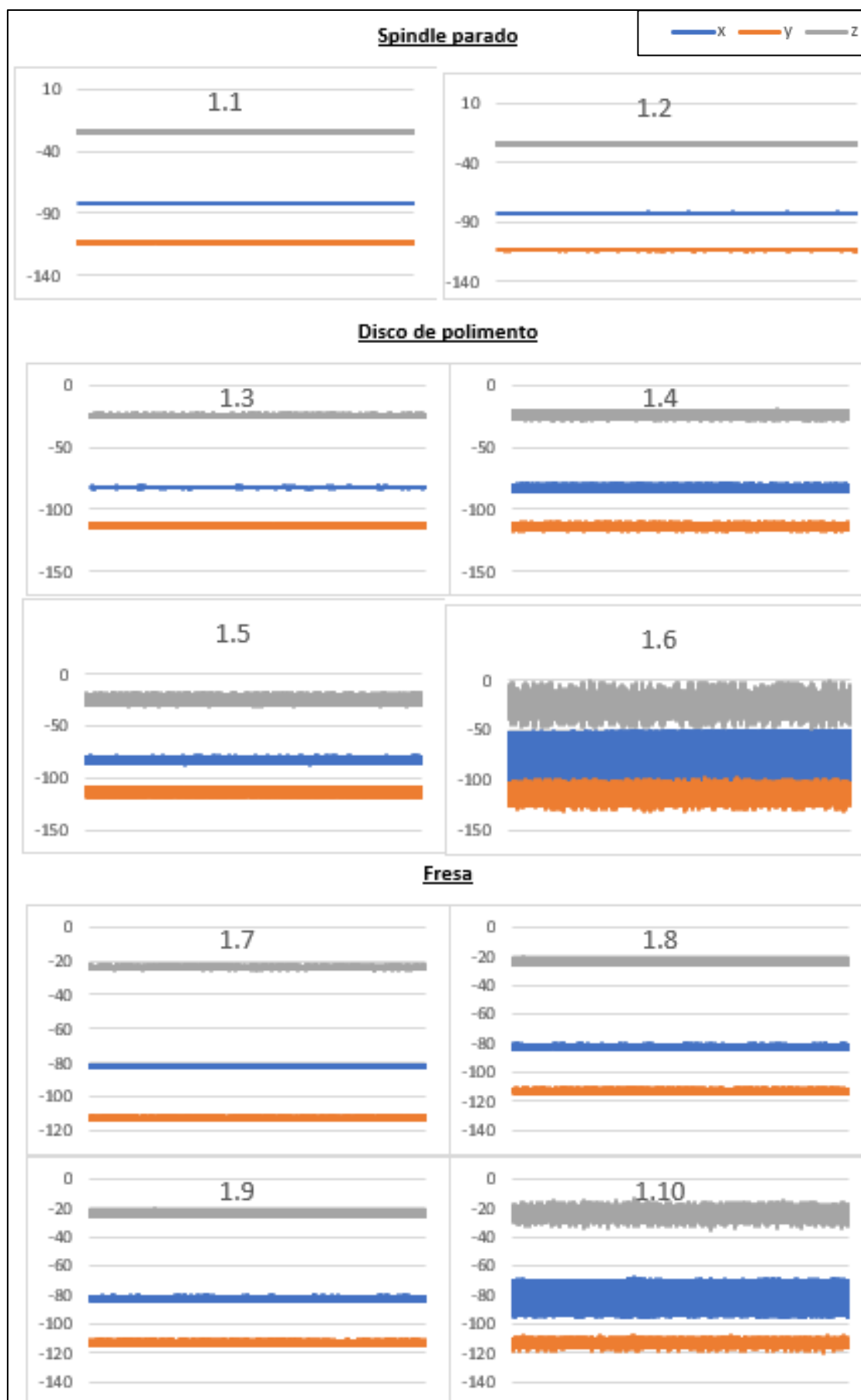


Figura 55: Análise dos ruídos causados pela rotação, experiência 1.

Tal como se pode observar, à medida que se aumenta a velocidade de rotação, o ruído na leitura dos sinais aumenta. Para os ensaios com o *spindle* parado, pode-se ver que os desvios são pouco significantes, apenas se nota um pequeno acréscimo dos desvios, para quando o *spindle* é ligado. Isto pode resultar de pequenos ruídos causados pelo sistema de arrefecimento de ar comprimido do *spindle*, que é ativo quando este é ligado. Para os restantes ensaios, observa-se que o ruído é maior quando se utiliza o disco de polimento. Isto pode resultar da geometria do disco, ou da sua própria construção, que o torna mais suscetível a vibrações para altas velocidades de rotação.

Concluindo, face a estes resultados, o ideal seria utilizar o *spindle* a mínima velocidade de rotação possível. No entanto, a escolha da velocidade certa, vai depender de vários fatores, como da força de contacto exercida ou da velocidade de avanço. Por exemplo, para 3000 rpm e uma força de contacto de 40N, os desvios apresentados na Tabela 1, tornam-se pouco relevantes quando comparados com a força de contacto. Este assunto, vai ser discutido mais à frente. Por fim, também se conclui que a velocidade de 4000 rpm, ou superiores não é adequada para este estudo, porque os desvios são bastante significativos, e também porque a velocidade máxima de rotação recomendada para o disco de polimento utilizado é de 4000 rpm.

5.2 - Análise da capacidade de medição do sensor

Após testar a leitura dos sinais com o robô parado, foi testado novamente a leitura dos sinais, mas desta vez quando é aplicada uma força externa durante, com o intuito de verificar a capacidade de medição de forças do sensor. De acordo, com o manual de instalação e operação do transdutor ATI Delta IP600, [16] a resolução deste equipamento encontra-se entre 1 a 32N, dependendo dos ruídos envolvidos e das cargas envolvidas.

Para conseguir caracterizar a capacidade de leitura de uma força exterior aplicada na ferramenta é necessário saber a magnitude dessa força, para depois a poder comparar com o valor lido. Com esse intuito, utilizou-se uma peça com uma massa de 2.6kg, o que equivale aproximadamente a 25,5N. Esta peça foi colocada no topo da ferramenta no decorrer de cada ensaio, para se poder verificar as diferenças de leitura com e sem a peça. Esta experiência serviu-se do mesmo programa utilizado na experiência anterior, onde o robô fica parado na mesma posição, mas também foi adicionado o código para leitura de dados, referido anteriormente (secção 4.3). Assim, os dados obtidos correspondem a forças para o eixo z da ferramenta, eixo vertical para a disposição escolhida com sentido de cima para baixo, para que esta coincida com a direção da força gravítica. Para além disso, no início do programa o sensor é calibrado, com recurso a função *FCCalib*, para

que o peso da ferramenta seja descontado nos dados obtidos. Por isso seria de esperar que a força lida em z, sem o peso seja de 0 N, e com o peso seja de 25.5 N.

Na Figura 56 pode-se visualizar o primeiro ensaio realizado, onde a força de contacto é representada num gráfico em função do tempo. Onde os valores lidos inicialmente correspondem a uma média de -3,9 N, e a partir dos 9 segundos é adicionada a peça e estes sobem para um valor médio de 16.0 N. Estes valores ficaram longe dos esperados, o valor lido da força externa teve um erro de 9.5 N. No entanto, pode-se verificar que este ensaio indica uma má calibração, pois quando não há peso os valores lidos deveriam ser aproximadamente nulos. Mas mesmo admitindo um erro de calibração, a diferença entre os dois valores dá 19.9 N, o que mesmo assim, corresponde a um erro de 5.6 N em relação à força exercida de 25.5 N.

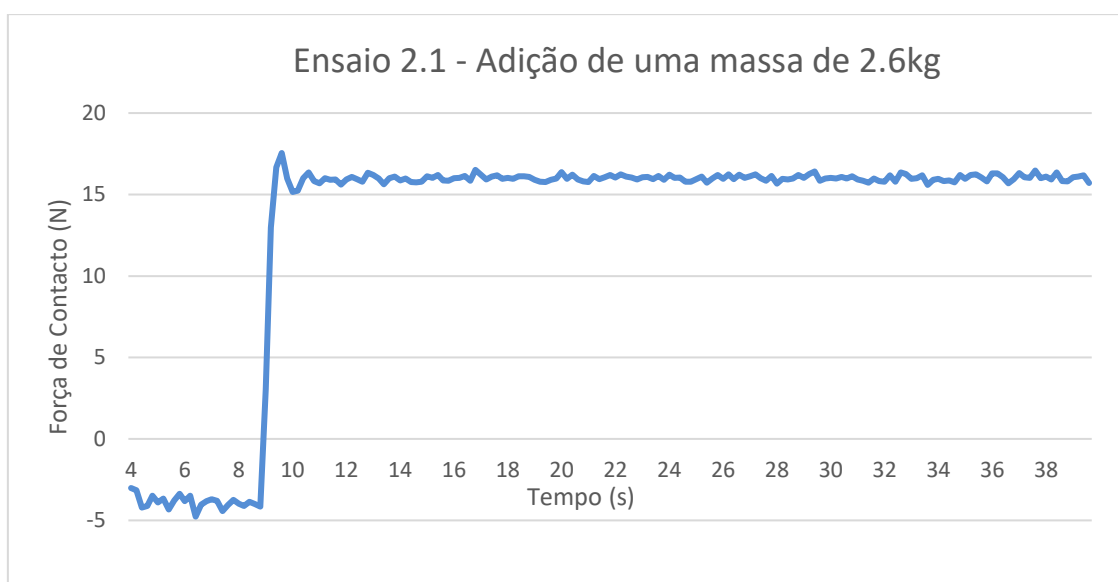


Figura 56: Ensaio 2.1 - Adição de uma massa de 2.6kg.

Para o ensaio em questão (ensaio 2.1) a carga da ferramenta tinha sido determinada com um *LOADID* de 30° de rotação no eixo 5 e 90° no eixo 6, o que segundo o manual da ABB, [12], se encontra dentro dos parâmetros recomendados para esta função.

Posto isto decidiu-se estudar nos próximos ensaios a influência do *loadID* na precisão dos valores lidos. Utilizando os mesmos limites de rotação para o eixo 5 e o eixo 6, fez-se os um novo *loadID* para o segundo ensaio (ensaio 2.2), mas desta vez a 25% da

velocidade⁶. Com esta alteração os valores recolhidos já foram mais próximos do esperado. De seguida, no ensaio 2.3 com o mesmo *loadID* do 2.2 mediu-se os valores para quando o *spindle* está ligado com uma rotação de 3000 rpm, onde a incerteza dos valores foi maior. Por fim, realizou-se um ensaio (ensaio 2.4), onde o *loadID* foi realizado a 25% de velocidade e com o *spindle* ligado a 3000 rpm. Depois durante o ensaio, a força externa é adicionada também com o *spindle* ligado à mesma velocidade. Este ensaio, teve como intuito perceber se o controlador ao determinar a carga com os ruídos causados pela rotação da ferramenta, se conseguiria de alguma forma adaptar e reconhecer esses ruídos, para ler forças quando submetido a mesma rotação.

Resumindo, estas foram estas as condições de cada ensaio:

- 2.1 – LoadID a 100% de velocidade.
- 2.2 – LoadID a 25% de velocidade.
- 2.3 – LoadID a 25% de velocidade e medição da força com o *spindle* ligado a 3000 rpm.
- 2.4 – LoadID a 25% de velocidade com o *spindle* ligado a 3000 rpm e medição da força com o *spindle* ligado a 3000 rpm.

Os resultados obtidos, estão resumidos na Tabela 2. Onde para cada ensaio é calculado: o valor médio da força medida após a adição do peso; o erro desta força em relação aos 25.5 N esperados; o valor da força inicial (antes do peso); a diferença entre o valor inicial e final; o erro dessa diferença em relação ao valor esperado; e por fim, o desvio dos valores quando é adicionado o peso.

⁶ O FlexPendant tem uma funcionalidade que permite reduzir a velocidade do robô em percentagem, para qualquer tarefa. Neste caso, a velocidade de realização do LoadID não é um dos parâmetros a escolha do utilizador, porque esta já está estandardizada, no entanto com o uso desta funcionalidade é possível reduzir ou aumentar a velocidade desta tarefa.

Tabela 2: Análise aos valores obtidos para a experiência 2, capacidade de medição do sensor.

Ensaio	Força medida (N)	Erro (N)	Força inicial (N)	Diferença ($F_{\text{final}} - F_{\text{inicial}}$) (N)	Erro da diferença (N)	Desvio (N)
2.1	16.0	9.5	-3.9	19.9	5.6	0.2
2.2	20.3	5.2	0.3	20.0	5.5	0.4
2.3	22.1	3.4	2.4	19.7	5.8	2.4
2.4	18.6	6.8	-1.4	20.0	5.4	4.3

Observa-se que independentemente da calibração efetuada a diferença dos valores é muito semelhante para todos os casos, com isto pode-se afirmar que o robô teve um erro de aproximadamente 5 N na deteção de uma carga de 25.5 N. Quanto aos métodos de calibração, conclui-se que os melhores resultados são para quando o LoadID é realizado a 25% da velocidade com o *spindle* desligado. Verificou-se que para esta configuração no caso 2.3, em que a força é medida com o *spindle* ligado, os resultados medidos foram os mais próximos. Isto deveu-se aos ruídos da rotação (ver desvios) que incrementaram ligeiramente o valor final, mas também incrementaram o valor inicial. Por fim, também se conclui que a hipótese formulada no ensaio 2.4 não faz sentido.

5.3 - Análise a força de contacto máxima, sem movimento

Esta experiência teve como intuito compreender a força de contacto adequada para o caso de estudo. Existem poucos detalhes sobre as forças recomendadas para as operações de polimento, porque estas podem variar para vários fatores, como o material a polir, o disco de polimento utilizado, a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de avanço da ferramenta, os tipos de acabamento e a quantidade de remoção de material pretendida. No entanto, após a análise de alguns estudos experimentais de polimento robótico, [17],[18],[19], e [20], verificou-se que normalmente a gama de forças de contacto utilizadas, para tarefas de polimento semelhantes, varia entre 5 N a 30 N. Então, essa foi a gama testada. Um outro fator que foi testado nesta experiência foi a força

máxima de contacto em função da velocidade do *spindle*. Ou seja, na experiência 5.1, notamos que a medida que se aumenta as velocidades de rotação da ferramenta o ruído aumenta, por isso poderia ser vantajoso trabalhar com a mínima rotação possível, para reduzir o ruído. Mas para rotações baixas, e forças de contacto elevadas, o binário disponível no *spindle* não é suficiente para fazer o disco rodar, porque o atrito a vencer é de uma grandeza superior. Esta situação, é algo a evitar porque pode danificar o motor do *spindle*. Por isso torna-se necessário saber para as rotações testadas na experiência 5.1 qual a força máxima de contacto que se consegue alcançar sem interferir na rotação do disco.

Para realizar esta experiência foi criado um programa simples de controlo de força, onde é realizada uma aproximação vertical a face plana da prancha até ao contacto e depois o robô fica nessa posição durante 6 segundos sem se movimentar, em contacto com a superfície. A configuração da ferramenta, é paralela a superfície, onde toda a face de baixo do disco está em contacto com a superfície. Os parâmetros que variaram para cada ensaio foram a velocidade de rotação e a força de contacto programada. Assim, são usadas as velocidades de 1000 rpm, 2000 rpm e 3000 rpm e é testada a capacidade de a ferramenta rodar para forças de contacto de 5 N, 10 N, 15 N, 20 N, 25 N e 30 N.

O primeiro ensaio foi realizado para 1000 rpm e 5 N, neste caso a ferramenta não rodou em contacto com a superfície. Então descartou-se de imediato a possibilidade de trabalhar com esta rotação.

De seguida, testou-se para 2000 rpm, onde para 5 N rodou, mas para 10 N já não.

Por fim, testou-se para 3000 rpm, onde a ferramenta rodou até forças de 20 N, para 25 N já não rodava.

A análise destes resultados, com o complemento de outras experiências, os desvios em relação à rotação da ferramenta (experiência 1) e a capacidade de medição de forças do sensor (experiência 2), permitiram concluir que o uso de uma velocidade de rotação da ferramenta de 3000 rpm é a solução mais adequada. Apesar de existir também rotação para o par 2000 rpm e 5 N, este não deve ser utilizado porque apresenta desvios entre 4 N a 5 N, e a precisão de medição de forças é de aproximadamente 5 N (Tabela 1). Ou seja, para uma força tão baixa os desvios causados pelo ruído são de uma grandeza significativa em comparação com a magnitude da força. Para descobrir qual a força mais adequada para uma rotação de 3000 rpm, ainda se realizou mais uma experiência, semelhante a esta, mas com movimento no contacto.

5.4 - Análise a força de contacto máxima, com movimento

Esta experiência complementa a anterior. Aqui o objetivo é perceber se quando há movimento em contacto com a superfície controlado em força, os pares de força de contacto e de velocidade de rotação da ferramenta, testados anteriormente, mantêm o desempenho. Para isso adicionou-se ao percurso do programa anterior, um movimento linear simples de cerca de 20 cm. Para além disso, realizou-se também o mesmo percurso, sem rotação da ferramenta, para se poder avaliar as diferenças de ruído na leitura do sinal quando há controlo de força em movimento (até aqui apenas tinha sido apresentado os desvios para a ferramenta parada sem contacto).

Para 2000 rpm e 5 N, a ferramenta continuou a rodar, mas notou-se que nem sempre ocorria contacto entre a ferramenta e a peça. Como para esta velocidade os valores do ruído na leitura da força são da mesma ordem de grandeza da força programada, o movimento do robô ocorre sem que haja contacto efetivo da ferramenta com a peça.

Para 3000 rpm, o desempenho foi semelhante comparando com a experiência sem movimento, mas não conseguiu manter a rotação para 20N. Isto pode ser justificado pelo facto de o movimento aumentar as forças de atrito no disco, que fazem com que este não consiga rodar para esta força, apesar de o conseguir fazer parado. A hipótese dos 5 N, é descartada pelos mesmos motivos que foi descartada para 2000 rpm (contacto quase nulo). Sobrando as hipóteses dos 10 N e a dos 15 N, para decidir a mais adequada recorreu-se aos dados recolhidos. Na Figura 57 pode-se visualizar os gráficos (do percurso realizado e da força de contacto em função do tempo) obtidos para estas duas hipóteses.

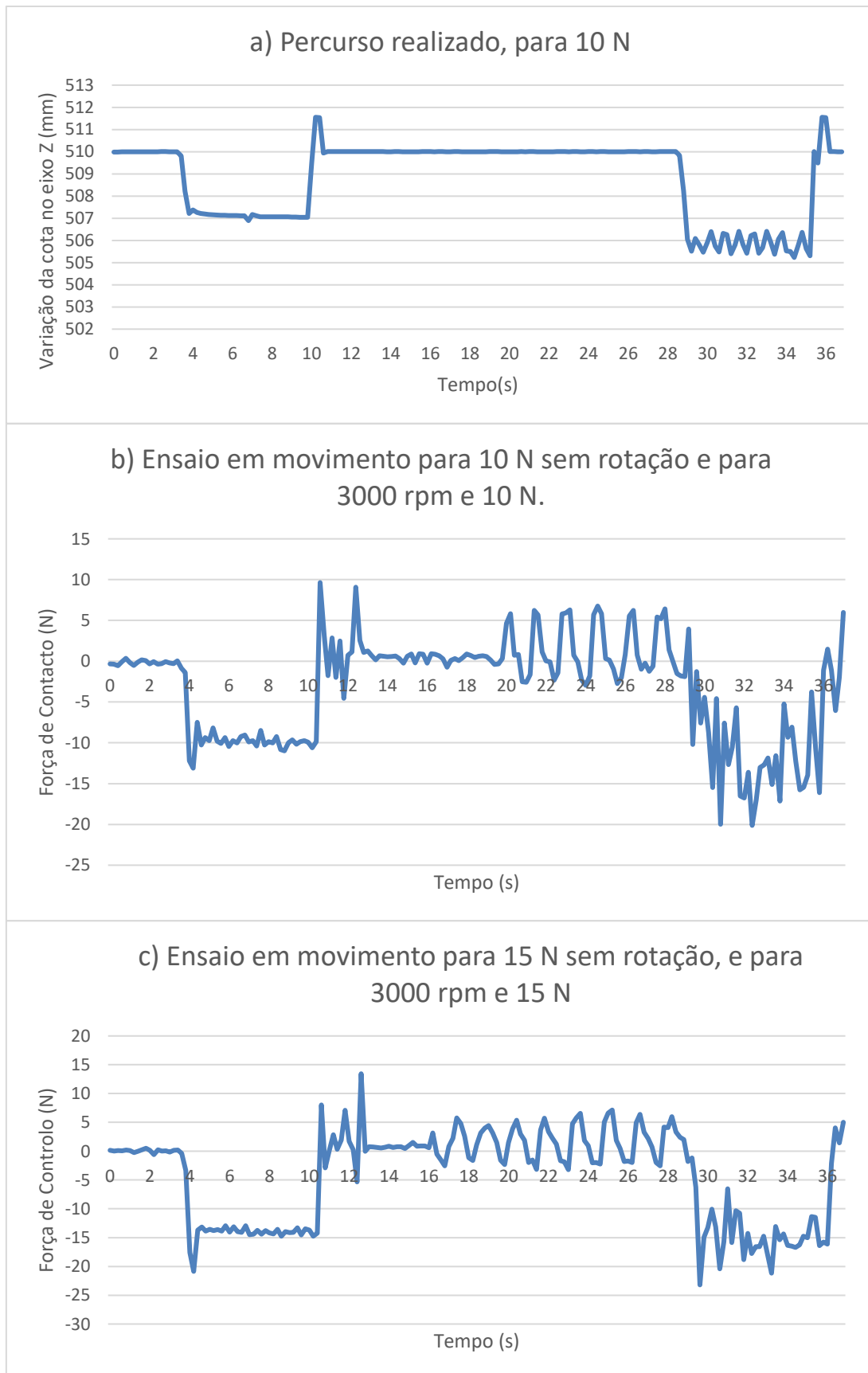


Figura 57: Ensaio as forças de contacto (de 10 N e 15 N) em movimento para 3000 rpm e sem rotação

A Figura 57a) representa a posição da ferramenta, medida no eixo perpendicular ao plano da superfície ao longo do tempo. O referencial utilizado é o wobj0, estando a superfície plana da prancha perpendicular ao eixo z. De notar que o eixo da ferramenta está também alinhado com o eixo z do referencial wobj0. Cada um destes ensaios, pode ser dividido em dois, onde numa primeira fase, de aproximadamente 18s, o contacto é feito com o *spindle* parado (0rpm) e uma 2ª fase também de 18s, onde o *spindle* é ligado (3000 rpm) e repete-se o mesmo percurso. O percurso do robô pode resumir-se ao seguinte:

- *Spindle* desligado (0s até 18s)
 - 0s a 4s - Aproximação à zona de contacto
 - 4s a 10s - Controlo de força com contacto
 - 10s a 12s - Saída da zona de contacto
 - 12s a 18s – Volta ao ponto inicial do percurso (controlado em posição sem contacto)
- *Spindle* ligado a 3000 rpm (18s até 36s)
 - 18s a 29s – Continua a voltar ao ponto inicial do percurso e depois faz a aproximação à zona de contacto
 - 29s a 35s - Controlo de força com contacto
 - 35s a 36s – Saída da zona de contacto

Notas importantes sobre o a Figura 57a):

- O spindle não é ligado exatamente aos 17s, porque o acionamento é feito manualmente. A melhor forma de observar quando este é ligado é através dos gráficos da força de contacto, porque nota-se claramente através do ruído da força quando este é ligado (Na Figura 57b) foi aproximadamente aos 22s, e para a Figura 57 c) foi aproximadamente aos 17s.
- A cota varia para a segunda parte dos ensaios (com rotação) em relação a primeira parte (sem rotação), porque o movimento giratório da ferramenta origina uma compressão da esponja de polimento. Como o movimento é realizado com controlo de força e não controlo de posição, o robô varia sua posição em z para assegurar a força de contacto desejada.
- Na segunda parte do ensaio, é perfeitamente visível a influência do ruído no movimento do robô, que geram oscilações na posição da ferramenta ao longo do seu eixo z.
- Apenas é apresentado o percurso para o caso da força programada para 10 N, porque é bastante semelhante ao caso de 15 N.

Para analisar os gráficos das forças medidas em cada caso, há que referir que o sentido negativo do valor de força corresponde a força exercida contra a superfície. As forças positivas que aparecem nos gráficos devem-se ao movimento do robô quando se afasta da superfície (por exemplo aos 11s onde é realizada a saída da zona de contacto). Um outro tipo de forças positivas que aparece no gráfico é os ruídos causados pela ativação do *spindle* quando este não está em contacto com a superfície e o valor da força

de contacto deveria de ser 0N (por exemplo entre os 22s e os 26s). Posto isto, prosseguiu-se a uma análise dos dados obtidos sobre a força de contacto que pode ser visualizado na Tabela 3, onde para os diferentes pares de força programados com rotação da ferramenta é calculado, a média dos valores obtidos em contacto, o erro da média em relação ao valor configurado em Newtons e em percentagem, o desvio padrão das forças em contacto e o desvio máximo absoluto para as mesmas.

Tabela 3: Análise aos valores obtidos para a experiência 3, força de contacto máxima com movimento.

Força programada (N)	Rotação da ferramenta (rpm)	Média da Força Obtida (N)	Erro(N)	Erro (%)	Desvio padrão (N)	Desvio máximo (N)
10	Parado	-9.8	0.2	2.2	0.5	1.8
10	3000 rpm	-12.0	2.0	20.4	3.8	10.1
15	Parado	-13.9	1.1	7.4	0.4	2.1
15	3000 rpm	-14.9	0.1	0.5	2.3	8.5

Face aos valores calculados, verifica-se que para os 3000 rpm uma força de contacto de 15N apresenta melhores resultados na manutenção de uma força de contacto constante, porque o ruído é menor e menos significativo.

Concluindo assim, que para o polimento da face plana da prancha, uma configuração adequada envolve uma velocidade de rotação da ferramenta de 3000 rpm, para uma força de contacto de 15 N.

5.5 - Ensaio com a ferramenta inclinada.

Após definir os pares ideais de rotação da ferramenta e da força de contacto aplicada para a superfície plana da prancha, com a ferramenta paralela à superfície, decidiu-se testar qual seria o comportamento da ferramenta para uma ligeira inclinação relativamente a superfície. A hipótese gerada para esta experiência, foi que com a ferramenta inclinada a área de superfície de contacto do disco seria menor, e

consequentemente isso poderia diminuir os atritos, o que permitiria a ferramenta trabalhar para forças de contacto superiores sem parar a rotação do disco.

A experiência serviu-se de um programa semelhante ao anterior, onde é realizado um controlo de força na superfície plana da prancha num movimento linear, enquanto são testados diferentes pares de força de contacto e rotação da ferramenta, para este caso. Apenas foi testado para rotações de 3000 rpm, pelos mesmo motivos explicados anteriormente. Quanto a inclinação da ferramenta, os valores mais utilizados industrialmente são de 0°, 6°, 9°, 12° e 16°, [19]. O valor escolhido para esta experiência foi de aproximadamente 12°, o mesmo valor utilizado nas experiências do estudo [19], que estuda a influência do ângulo da ferramenta na realização de polimentos robotizados.

Primeiramente foi testado o comportamento, para uma força de contacto de 5 N, onde devido aos ruídos a ferramenta, esta nem chegou a entrar em contacto com a superfície, tendo realizado todo o percurso sem contacto. De seguida, foi testado para 10 N, onde num primeiro ensaio só tocou na superfície no fim do percurso, o que por si só já permite concluir que os ruídos são de uma grandeza maior para esta configuração. No entanto, este ensaio foi repetido algumas vezes, sendo que em alguns casos, foi possível realizar o percurso com rotação e contacto. Depois, testou-se para uma força de contacto de 15 N, onde inicialmente a ferramenta não rodou com o contacto, repetiu-se o ensaio, e alguns deles a ferramenta rodou. O facto, de se ter de realizar mais ensaios para poder recolher os dados, já revela uma fraqueza em relação a configuração horizontal da ferramenta, onde os resultados eram mais constantes. Por fim, testou-se para uma força de 20 N, onde a ferramenta não rodou, o que permitiu logo excluir esta opção.

Na Tabela 4, são comparados os valores obtidos na experiência anterior (secção 5.4) para a ferramenta sem angulo de inclinação, com os melhores valores obtidos nesta experiência para um angulo de inclinação de 12°.

Tabela 4: Comparação dos valores obtidos para inclinação (12°) da ferramenta, fase aos valores obtidos sem inclinação, todos os ensaios foram realizados para 3000 rpm.

Força configurada (N)	Configuração da ferramenta	Média da Força Obtida (N)	Erro(N)	Erro (%)	Desvio padrão (N)	Desvio máximo (N)
10	inclinado	8.9	1.1	10.6	3.8	9.9
10	horizontal	-12.0	2.0	20.4	3.8	10.1
15	inclinado	13.2	1.9	12.0	4.4	19.8
15	horizontal	-14.9	0.1	0.5	2.3	8.5

Uma nota importante sobre esta experiência é que o eixo utilizado para controlo de força, não foi o da ferramenta, porque quando ela está inclinada não é perpendicular a superfície plana da prancha. Então utilizou-se um referencial, com o eixo z perpendicular à prancha, de sentido ao contrário ao utilizado na experiência anterior, por esse motivo é que as forças medidas na ferramenta inclinada são positivas.

Após analisar os valores calculados verifica-se que para 10 N, estes foram ligeiramente melhores, mas bastante semelhantes aos obtidos para a ferramenta na posição horizontal. Apesar disso, esta hipótese terá de ser descartada, pelos mesmos motivos (desvios máximos) utilizados para descartar esta força na experiência anterior. Para 15 N, observa-se claramente que os valores obtidos com o ângulo de inclinação são piores.

Após estes ensaios, decidiu-se não utilizar a ferramenta inclinada no resto dos ensaios.

O primeiro motivo que levou a esta decisão, foi a dificuldade de determinar corretamente o TCP para esta configuração. Isto pode tornar-se um verdadeiro desafio, para principalmente superfícies mais complexas, onde a área de contacto e a profundidade de contacto da ferramenta podem variar ao longo do percurso, já que o disco se trata de um corpo com comportamento altamente elástico (Figura 58). Métodos de avaliação dos elementos finitos, são utilizados em alguns casos para determinar estes parâmetros. No entanto, estes métodos podem ter custos computacionais elevados, o que os tornam não adequados para parametrizações de polimentos rápidos. Para além disso, mesmo para estes casos, em que se consegue definir corretamente a superfície de contacto do disco de

polimento, a profundidade de contacto da ferramenta e o raio do disco, são mais relevantes para um aumento da força de contacto, do que a inclinação da peça [19].

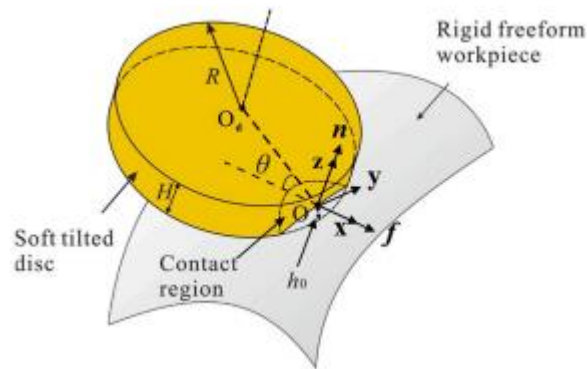


Figura 58 : Contacto entre um disco de polimento e uma superfície de geometria complexa, com a ferramenta inclinada, para um ângulo θ entre a superfície inferior do disco e o plano tangente a superfície da peça [19].

Outro motivo relevante foi o desgaste da ferramenta. Ao utilizar a ferramenta com uma certa inclinação, a sua área de contacto é menor e a profundidade de contacto na ferramenta vai ser maior. Isto faz com que esta, se desgaste mais facilmente nessa zona, reduzindo assim o tempo de vida da ferramenta.

Concluindo, após este ensaio decidiu-se manter a configuração horizontal da ferramenta para 15 N de força de contacto e 3000 rpm de velocidade de rotação.

5.6 - Ensaio às velocidades de avanço

Com os estudos analisados ([18],[20],[21] e [23]), verificou-se uma enorme variedade de velocidades de avanço utilizadas, para diversas aplicações, desde 3mm/s até 80 mm/s. A velocidade de avanço ideal, vai depender de vários fatores. Mais uma vez, o material a polir e o disco de polimento utilizado têm bastante ênfase em cada caso em específico. Não obstante a isso, existem outros fatores a influenciar esta velocidade, tais como: as dimensões das peças (por exemplo, peças mais pequenas vão ser trabalhadas a velocidades inferiores e com ferramentas de dimensões inferiores); a força aplicada e a velocidade de rotação da ferramenta; a rugosidade pretendida na superfície, onde menores rugosidades são alcançadas para velocidades de rotação e de avanço inferiores; a fase do ciclo de polimento, nestes ciclos opta-se por fazer várias passagens de polimento, em que as primeiras têm uma menor velocidade avanço e as últimas passagens têm maior velocidade avanço; Ou seja, esta é uma variável difícil de definir, porque vai depender de múltiplos fatores, sendo a melhor forma de encontrar o valor mais adequado a experimentação. Neste estudo, o que se avalia é a capacidade de o robô manter a força de contacto, por isso a influência das velocidades vai ser avaliada face a esse fator, para a peça em questão com a ferramenta em questão.

Para avaliar a influência da velocidade de avanço recorreu-se novamente a um simples programa de controlo de força, onde o robô realiza um percurso linear sobre a superfície plana da prancha, para uma velocidade de rotação de 3000 rpm, uma força de contacto de 15 N e com a ferramenta paralela a superfície da peça. A força foi controlada sobre o eixo z da ferramenta, com sentido de cima para baixo.

O primeiro ensaio a ser realizado, foi para a velocidade de avanço de 50 mm/s (valor pré-definido). De seguida testou-se para uma velocidade superior, 100 mm/s, onde rapidamente apareceu uma mensagem de erro no ecrã do controlador, a sugerir para reduzir a velocidade de avanço para utilizar o controlo de força. Por fim, testou-se para uma velocidade mais baixa, de 20 mm/s. Para esta velocidade notou-se a olho nu, uma significativa redução da velocidade do *spindle* em alguns instantes. Para velocidades de avanço mais baixas o atrito aumenta. Esta é a razão pela qual o disco quase que para, para uma velocidade de 20mm/s. A melhor solução para este problema seria aumentar a velocidade de rotação da ferramenta, tal como se faz nos ensaios a velocidades de avanço inferiores. Mas como 3000 rpm é a velocidade máxima de rotação do disco de polimento, para a qual o controlo de força é mais eficiente, não é recomendável operar a velocidades superiores. Então a velocidade de avanço de 20m/s não é adequada para este caso.

Como a velocidade do *spindle* é controlada em anel aberto, isto pode ser um problema na análise dos dados obtidos, porque tal como já sabemos velocidades inferiores de rotação da ferramenta significam desvios menores. Então os dados obtidos no ensaio

a 20 mm/s, são inconclusivos, porque apesar do ruído ser menor (porque o disco quase que parou), é bem mais importante garantir que o polimento possua uma velocidade de rotação suficiente para ter um efeito abrasivo.

Mas apesar de os dados obtidos para 20 m/s, não serem conclusivos, existe um outro parâmetro que é possível analisar através destes valores, que é a influencia da velocidade de avanço do robô na aproximação da ferramenta à superfície de contacto. Na Figura 59 pode-se observar os valores obtidos para o ensaio a 50 mm/s e a 20 mm/s, respetivamente. Onde se nota claramente que para uma velocidade menor a força de contacto na aproximação é menor, sendo para este caso de 27 N, enquanto para os 50 mm/s foi de 43 N.

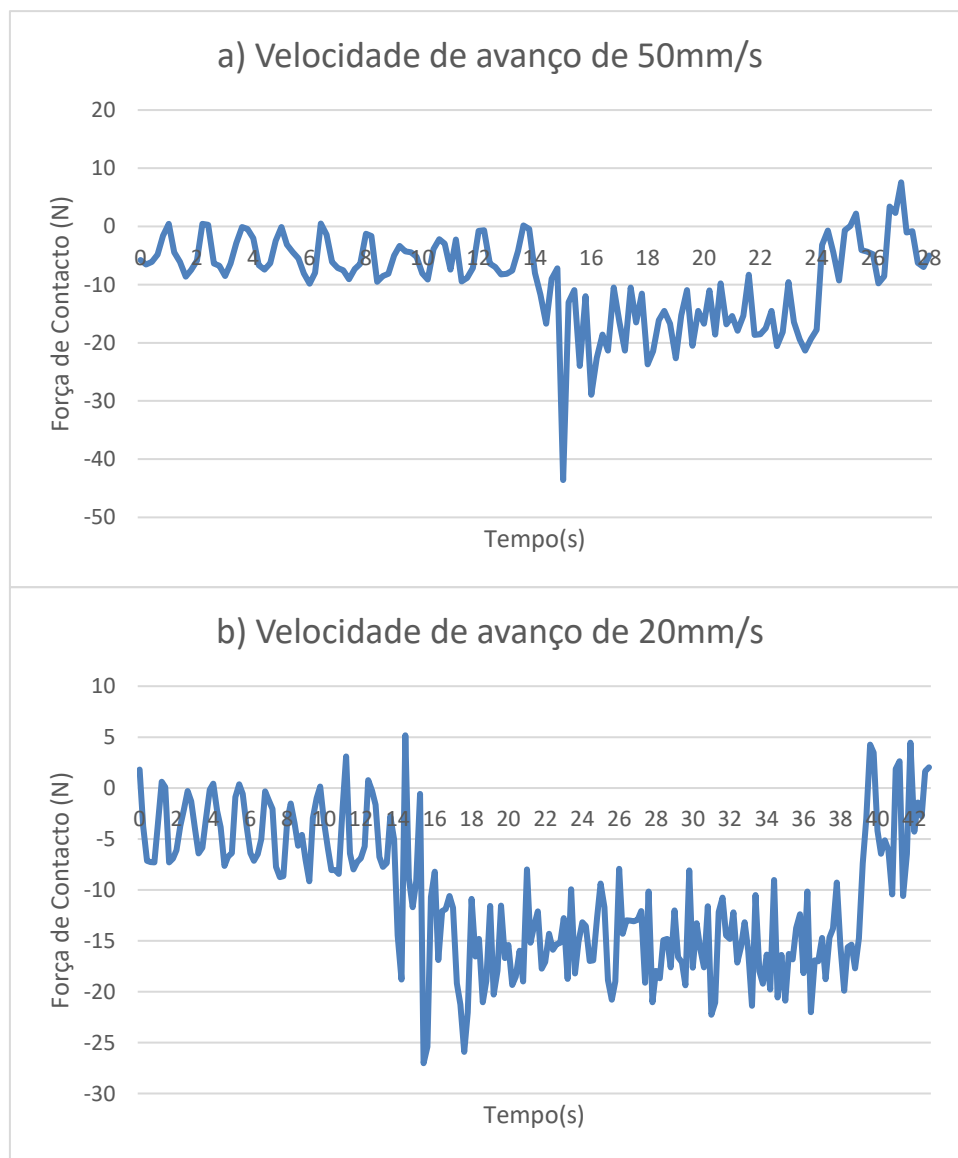


Figura 59: Análise à variação da velocidade de avanço para 3000 rpm de rotação da ferramenta e 15N de força de contacto.

Conclui-se assim, que a velocidade de avanço adequada para este caso de estudo é de 50 mm/s durante o contacto, e de 20 mm/s na aproximação.

5.7 - Método de geração da trajetória para a superfície plana da prancha

Depois de conhecer os parâmetros ideais para o polimento da superfície plana da prancha, prosseguiu-se a geração da trajetória de polimento sobre a prancha.

Na geração da trajetória para o polimento da superfície plana da prancha foram explorados 3 métodos:

- 7.1 -Programação online com o *spindle* ligado.
- 7.2 -Programação online com o *spindle* desligado.
- 7.3 -Programação offline.

Os parâmetros utilizados, igualmente, para todos estes ensaios foram:

- velocidade de contacto de 50 mm/s.
- velocidade de aproximação de 20 mm/s.
- força de contacto de 15 N.
- rotação do disco de polimento de 3000 rpm.
- Eixo de controlo de força Z, perpendicular a superfície.
- Disco de polimento sem inclinação.

Para além disso, o caminho percorrido sobre a superfície para cada trajeto é semelhante para todos os métodos, na Figura 60, pode-se visualizar esse percurso no software de simulação *RobotStudio*. Para a criação deste trajeto, todos os programas partiram da criação de 3 targets de aproximação, 7 targets de contacto e 2 targets de saída, semelhantes aos que se podem visualizar na Figura 60.

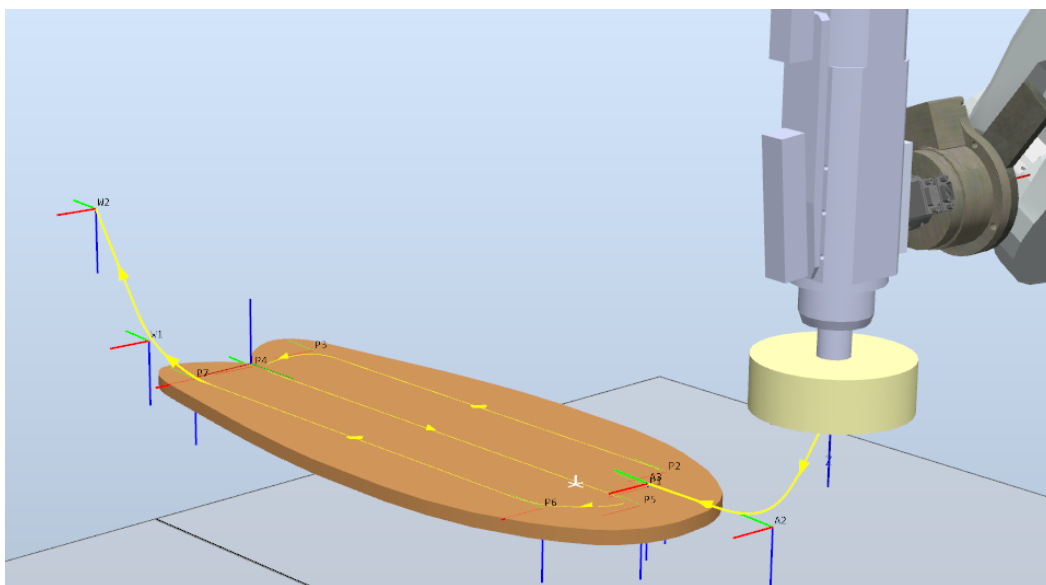


Figura 60: Trajeto percorrido pelo robô na superfície plana. Imagem retirada da simulação realizada no *RobotStudio*.

Primeiramente foi realizada a programação online, onde na fase do *teach* foram ensinados os targets referidos anteriormente. A diferença entre o primeiro ensaio e o segundo, é que no segundo apenas se ligou o *spindle* após o programa ter sido criado, já no primeiro ligou-se o *spindle* na fase do *learn* (fase em que o robô faz o percurso ensinado no *teach* a uma velocidade reduzida e cria targets novos se for necessário). Decidiu-se testar estas duas formas, para perceber se o ruído causado pela rotação, teria um impacto positivo na criação da trajetória, na medida em que o controlador, já adaptaria o percurso para os ruídos envolvidos. Esta pequena diferença fez com que na fase do *learn*, para o primeiro caso, com rotação tenham sido gerados no total 524 targets, enquanto para o segundo caso, sem rotação da ferramenta foram apenas gerados 30 targets. Por fim, realizou-se a programação offline, tal como explicado anteriormente, onde apenas se utilizou os targets que estão representados na Figura 60.

Numa primeira fase de análise, sem recorrer aos dados recolhidos, visualizou-se que o primeiro caso possuía muitas oscilações, a ferramenta constantemente variava a sua cota, tendo realizado todo o trajeto sempre com ressaltos. No segundo caso, os ressaltos diminuíram, mas, continuou a existir muitas vibrações, não eram tão visíveis como para o primeiro caso, mas eram audíveis. No terceiro caso, notou-se claramente uma redução elevada das vibrações, onde a ferramenta realizou todo o percurso de uma forma mais suave.

A análise dos dados obtidos para cada ensaio permitiu tirar outro tipo de conclusões. Na Figura 61, pode-se observar os gráficos da força de contacto de cada

ensaio e na Tabela 5 pode-se observar os cálculos realizados para analisar as forças de contacto de cada ensaio.

Tabela 5: Análise da força de contacto para os ensaios realizados ao polimento da superfície plana da prancha, para 3 métodos de programação da trajetória diferentes

Ensaio	Média da Força Obtida (N)	Erro(N)	Desvio padrão	Desvio máximo
7.1	15.4	0.4	4.0	14.8
7.2	15.2	0.2	5.2	14.9
7.3	13.7	1.3	0.8	5.0

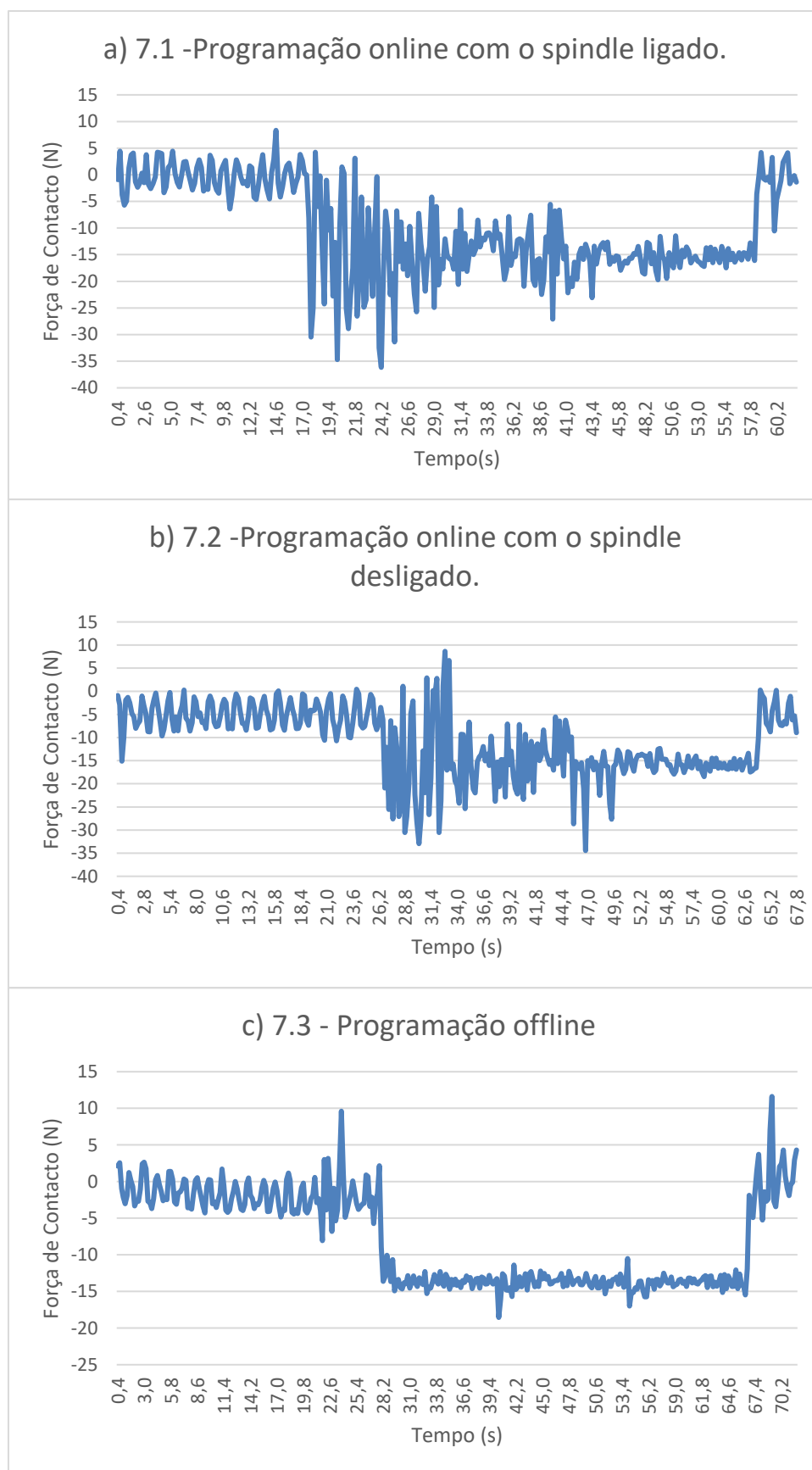


Figura 61: Gráficos para os ensaios realizados ao polimento da superfície plana da prancha, para 3 métodos de programação da trajetória diferentes

Face aos dados obtidos, pode-se afirmar que o melhor método para programar a trajetória de polimento para a superfície plana é o método de programação offline (ensaio 7.3). Para este caso os ruídos foram muito reduzidos em relação aos outros dois métodos, sendo por isso a melhor opção para garantir uma força de contacto constante durante o polimento. Quanto a programação online, os valores são muito semelhantes. Seria de esperar que o ensaio 7.1 tivesse ruídos mais significativos após a observação de várias oscilações no posicionamento da ferramenta durante o polimento, mas não foi o caso quando comparado com o ensaio 7.2. De qualquer das formas apesar de os resultados serem relativamente melhores para o ensaio 7.1, a opção de fazer a programação com o *spindle* desligado continua a parecer uma melhor opção, na medida em que na programação offline a utilização de menos targets, resultou numa melhor performance para o polimento da face plana.

5.8 - Avaliação da capacidade do controlo de força para superfícies complexas

Após analisar o controlo de força para o polimento da superfície plana, vai-se analisar agora o polimento das bordas da prancha, uma superfície com uma curvatura acentuada. Para a realização deste ensaio, apenas se utilizou a programação offline. Tal como foi explicado anteriormente, garantir que o eixo da ferramenta se encontra sempre perpendicular à tangente da superfície para cada target é uma tarefa muito árdua e incerta de se fazer manualmente na programação online. Por outro lado, na programação offline, desde que se tenha um modelo 3D da peça a polir, é bastante simples de garantir essa perpendicularidade do eixo da ferramenta.

A metodologia utilizada para definir os parâmetros de polimento para esta superfície foi diferente da anterior. Na superfície plana, testou-se cada parâmetro em separado e depois realizou-se a trajetória de polimento. Neste caso, como a programação é feita de forma offline e já existe um maior conhecimento dos comportamentos do robô face a cada parâmetro, a metodologia elegida foi de primeiro idealizar a trajetória de polimento, e só depois estudar a variação dos parâmetros de força para esta.

O polimento não foi testado, para a cauda da prancha, porque o raio de curvatura da ferramenta não é compatível com a geometria da peça. Um trabalho futuro, poderia ser testar o polimento dessa secção com um disco de polimento de raio inferior.

Na definição da trajetória uma das tarefas mais difíceis desta experiência, foi a escolha da configuração da ferramenta e o posicionamento da prancha na área de trabalho, que exigiram muitos ensaios, até encontrar uma configuração satisfatória.

Numa primeira fase, foi testado o polimento com o disco na horizontal, tal como foi utilizado para a superfície plana (Figura 62)

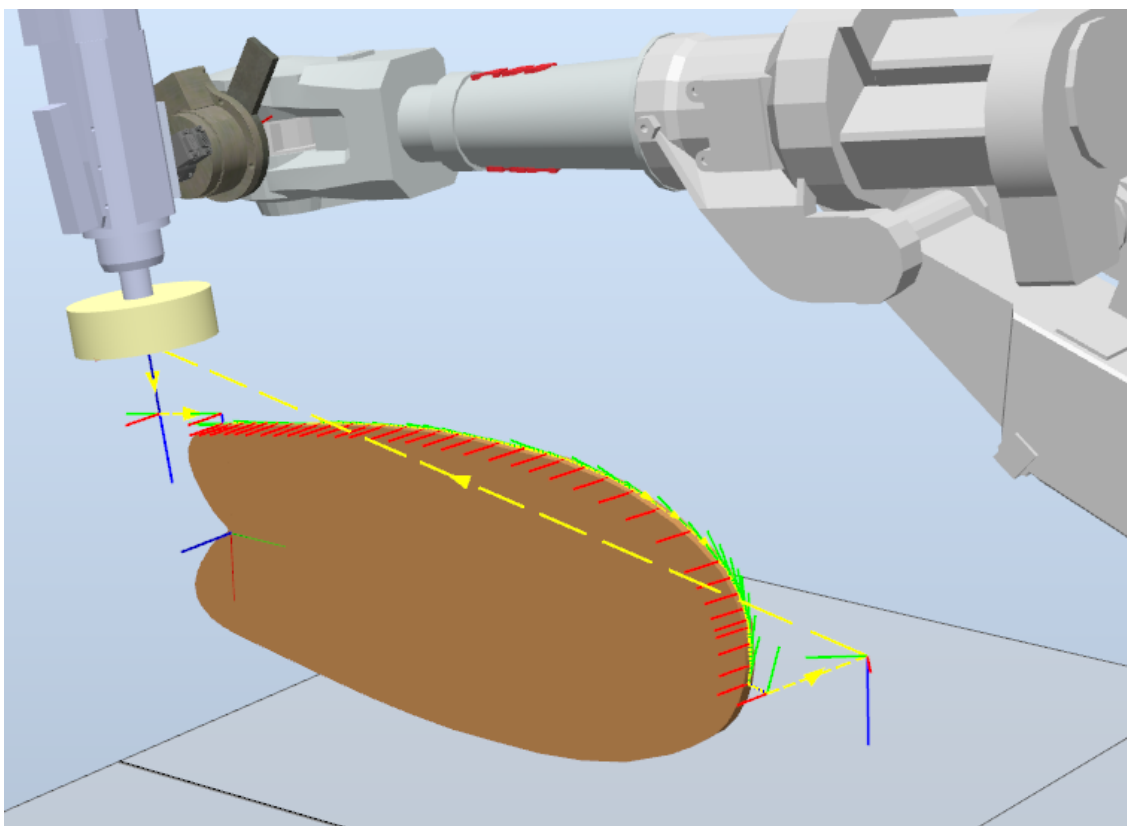


Figura 62: Configuração para o polimento das laterais da prancha, com o disco de polimento horizontal em relação à superfície a polir. Imagem retirada de uma simulação realizada no RobotStudio.

Quando se testou esta configuração, não se conseguiu garantir a rotação da ferramenta, para nenhum par de força de contacto e velocidade de rotação da ferramenta. Como o diâmetro do disco (15 mm) é de uma grandeza 10 vezes superior a grossura da superfície em questão (15 mm), a profundidade de contacto da ferramenta era muito elevada, o que a impedia de rodar. Então, conclui-se que para esta configuração, os atritos que o motor do *spindle* tinha de vencer para rodar a ferramenta, eram para além das capacidades do *spindle*.

Posto isto, decidiu-se testar uma nova configuração para a orientação do disco de polimento. Desta vez, testou-se o uso da lateral do disco, que tem uma dimensão mais próxima da borda a polir (40 mm) (Figura 63).

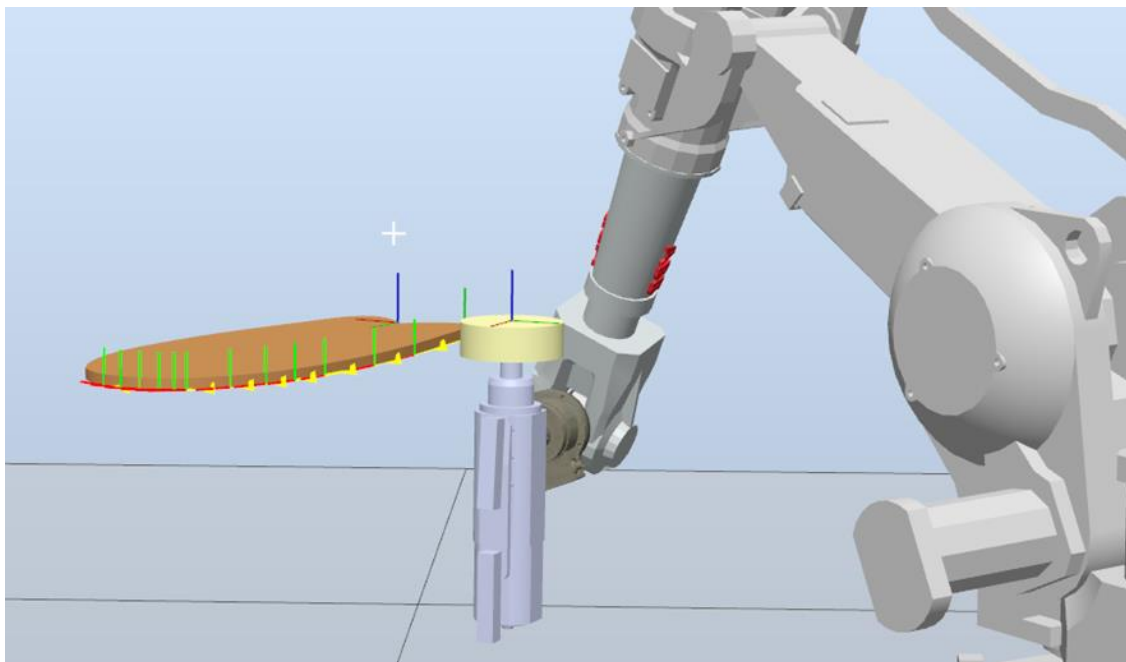


Figura 63: Configuração para o polimento das laterais da prancha, com o disco de polimento vertical em relação à superfície a polir. Imagem retirada de uma simulação realizada no RobotStudio.

Com o disco de polimento nesta orientação, face a superfície da peça, foi necessário definir um novo TCP para a ferramenta. A localização deste, teria de estar contida em qualquer ponto da circunferência, gerada pela interceção do plano que passa pelo meio da face lateral do disco de polimento. A escolha deste ponto, teve de ser testada para várias configurações do robô, até que fosse possível o robô rodar em torno da parte da frente da prancha (zona mais exigente), sem atingir um dos limites de rotação dos seus eixos. A exigência desta tarefa deve-se ao facto, de ser necessário definir um eixo da ferramenta perpendicular a superfície para cada target em questão, para controlar a força de contacto sempre perpendicular a superfície (tal como é aconselhado no manual [16]). Como no controlo de força apenas é possível eleger um TCP para uma ferramenta, a orientação da ferramenta, tinha de estar em constante movimentação para acompanhar a curvatura da prancha. Após várias tentativas tanto na simulação, como na célula real, encontrou-se uma localização e configuração do robô para realizar esta tarefa (semelhante à Figura 63), e prosseguiu-se aos ensaios para a parametrização do controlo de força.

O primeiro ensaio (ensaio 8.1) foi realizado, para uma força de contacto de 5N, rotação da ferramenta de 3000 rpm e velocidade de avanço de 12.5 mm/s (no código RAPID estava parametrizado para 50 mm/s, mas utilizou-se uma velocidade de 25% do robô para este ensaio). Para este conjunto de parâmetros, a ferramenta foi capaz de manter o movimento rotacional durante todo o percurso, sem se notar oscilações. De seguida

(ensaio 8.2), variou-se apenas a força de contacto de 5 N para 10 N. Neste ensaio, o *spindle* não foi capaz de gerar rotação no disco. Concluiu-se que 5 N seria a força de contacto ideal para este ensaio. De seguida voltou-se a realizar um ensaio (ensaio 8.3) para 5N, mas desta vez para uma velocidade de avanço de 20 mm/s. O desempenho deste ensaio foi semelhante ao primeiro, mas no fim do percurso, zona com a curvatura mais acentuada, o disco parou a sua rotação. Por fim, decidiu-se testar mais uma velocidade de avanço (ensaio 8.4), desta vez 50 mm/s, para perceber se um aumento da velocidade poderia ser vantajoso para combater as forças de atrito que impediam o disco de girar. Onde o desempenho, foi muito semelhante ao anterior. Concluiu-se assim, que o melhor desempenho foi o do primeiro ensaio onde a velocidade de avanço era de 12.5 mm/s e a força de contacto de 5 N. Os dados obtidos para este ensaio podem ser visualizados na **Figura 64**.

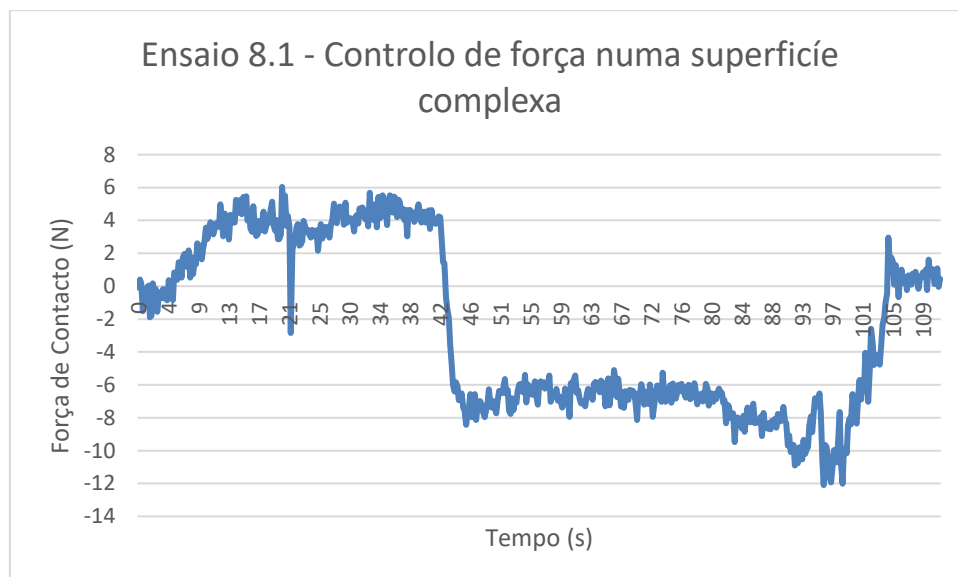


Figura 64: Variação da força de contacto para o controlo em força na superfície lateral da prancha.

Figura 64, pode-se observar que a força de contacto, mais uma vez vai ter valor negativo, porque o referencial escolhido é o referencial da ferramenta. A zona de contacto corresponde aproximadamente ao intervalo de tempo entre os 42s e os 100s. Sendo que a parte final deste intervalo de tempo corresponde ao instante onde a parte da frente da lateral da prancha estava a ser polida, e devido a sua complexidade geométrica nota-se desvios da força de contacto mais acentuados. Os restantes instantes do gráfico com valores positivos, correspondem a movimentações do robô, sem contacto. Posto isto, analisou-se as forças obtidas, para a zona de contacto (Tabela 6)

Tabela 6: Análise da força de contacto para o controlo em força na superfície lateral da prancha.

Ensaio	Média da Força Obtida (N)	Erro(N)	Desvio padrão (N)	Desvio máximo (N)
7.1	7.4	2.4	1.1	7.1

Observa-se um erro de 2.4 N e um desvio máximo de 7.1 N, que é bastante significativo para uma força de 5 N e pode facilmente induzir o controlador em erro. Apesar de se verificar no gráfico, que estes desvios, ocorreram maioritariamente à favor da força de contacto (sentido negativo), e como tal não induziu o controlador a afastar-se da superfície desnecessariamente, apenas aumentou a força de contacto. Por outro lado, o desvio padrão foi baixo, em comparação com outros ensaios de outras experiências. Relembrando que esta foi a melhor configuração encontrada, ainda existem margens para melhorias deste polimento. Um disco de polimento com dimensões mais pequenas, seria o ideal para se poder experimentar outros valores para os parâmetros aqui discutidos.

6. - Conclusões

6.1- Conclusões

O polimento é uma tarefa que merece uma especial atenção na robótica, porque é uma área que ainda recorre muito a mão de obra humana, que por norma é especializada e de custo elevado, para além de que o ambiente de trabalho destes operários é em muitos casos, nocivo para a sua saúde e bem-estar.

O uso do controlo de força em robôs industriais para a realização de polimentos é uma tarefa complexa, porque este é um processo com muitos ruídos inerentes à ferramenta de trabalho, que poderão ser bastante significativos para as baixas forças de contacto características deste processo.

O controlo de força *FCPressure* disponibilizado pela célula robótica *IRB2400*, apresenta um ótimo resultado quando não há rotação da ferramenta. Em contrapartida, para o polimento, com o *spindle* e o disco de polimento utilizado, apresenta dificuldades em manter uma força de contacto (de baixo valor) constante, principalmente para altas rotações e peças com geometrias complexas.

Apesar da *ABB* possuir uma programação online intuitiva, que facilmente pode ser utilizada por qualquer pessoa, o conhecimento sobre robótica e as funcionalidades da *ABB* como o *RobotStudio* e a língua *RAPID*, tornam-se indispensáveis para utilizar a célula robótica *IRB2400* com destreza e segurança no polimento.

6.2 - Trabalhos futuros

Após a conclusão deste projeto, existem algumas sugestões de trabalhos futuros a realizar, nesta célula robótica, que darão continuidade ao trabalho desenvolvido.

Em primeiro lugar, o estudo do comportamento das diferentes ferramentas de polimento, para as mais diversas aplicações, bem como a sua parametrização. Visto existir pouca informação sobre este processo, e recorrer-se muito a experimentação para definir os parâmetros. Para além disso, também seria interessante estudar outras ferramentas, que possam otimizar a interferência com a leitura dos valores do sensor de força.

Por outro lado, a análise da rugosidade da superfície a ser polida juntamente com a análise das forças de contacto, seria um ótimo complemento ao analisar este processo.

Para finalizar, um estudo de uma forma mais eficiente do controlador robótico tratar o sinal de força ruidoso destes processos.

Referências

- [1] Wallén, Johanna. *The History of the Industrial Robot*. Linköping University Electronic Press, 2008.
- [2] NASA, National Aeronautics and Space Administration -. *Nasa Tech Briefs*. 7-12 ed. Vol. 20, 1996.
- [3] Mohammad, Abd El Khalick, and Danwei Wang. "Electrochemical Mechanical Polishing Technology: Recent Developments and Future Research and Industrial Needs." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86, no. 5 (2016/09/01 2016): 1909-24. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8119-6>. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8119-6>.
- [4] Li, J., T. Zhang, X. Liu, Y. Guan, and D. Wang. "A Survey of Robotic Polishing." Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 12-15 Dec. 2018 2018.
- [5] Mohammad, A. El Khalick, and D. Wang. "A Novel Mechatronics Design of an Electrochemical Mechanical End-Effector for Robotic-Based Surface Polishing." Paper presented at the 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 11-13 Dec. 2015 2015.
- [6] Roswell, Avery, Fengfeng Xi, and Guangjun Liu. "Modelling and Analysis of Contact Stress for Automated Polishing." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46, no. 3 (2006/03/01/ 2006): 424-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505001197>.
- [7] Bélanger-Barrette, Mathieu, "How Do Industrial Robots Achieve Compliance," Feb 18, 2014 blog.robotiq.com.
- [8] Fixell, Peter, Tomas Groth, Mats Isaksson, Hui Zhang, Jianjun Wang, Jianmin He, Martin Kohlmaier, Rainer Krappinger, and Jingguo Ge. "A Touching Movement: Force Control Turns Machining Robots into Universal Tools." *ABB Review* 4 (2007): 22-25.
- [9] Edwin A. Erlbacher, Ph.D President PushCorp, Inc., "Force Control Basics - Push Corp."
- [10] (2010) Force Control. In: Robotics. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1_9
- [11] PushCorp, www.pushcorp.com (Leader in Robotic Force Control, Servo Spindles and Automation Equipment).

- [12] Robotics, ABB. "Application Manual; Force Control for Machining; Robotware 5.0." 2005.
- [13] Mihelj M. et al. (2019) Collaborative Robots. In: Robotics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4_12
- [14] Pérez-Ubeda, Rodrigo, Ranko Zotovic-Stanisic, and Santiago C. Gutiérrez. "Force Control Improvement in Collaborative Robots through Theory Analysis and Experimental Endorsement." *Applied Sciences* 10, no. 12 (2020): 4329. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/12/4329>.
- [15] Automation, ATI Industrial. "F/T Data Acquisition (Daq), Six-Axis, Force/Torque Sensor System, Installation and Operation Manual." June 2007.
- [16] Robotics, ABB. "Application Manual, Force Control for Assembly, Robotware 5.0." 2005.
- [17] Krantz, Marthin, and Rikard Andersson. "Robotized Polishing and Deburring with Force Feedback Control." 2010.
- [18] Dong, Yunfei, Tianyu Ren, Kui Hu, Dan Wu, and Ken Chen. "Contact Force Detection and Control for Robotic Polishing Based on Joint Torque Sensors." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107, no. 5 (2020/03/01 2020): 2745-56. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05162-8>.
- [19] Xiao, MuBang, Ye Ding, Zaojun Fang, and Guilin Yang. "Contact Force Modeling and Analysis for Robotic Tilted-Disc Polishing of Freeform Workpieces." *Precision Engineering* 66 (2020): 188-200.
- [20] Jing-Jing, Zhang, Liu Jia, Yang Sheng-Qiang, Qiao Zhi-Jie, and Li Jing-Zheng. "Simulation and Experimental Analysis of Polishing Contact Force of Industrial Robots." Paper presented at the 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2021.
- [21] Mohsin, Imran, Kai He, Zheng Li, and Ruxu Du. "Path Planning under Force Control in Robotic Polishing of the Complex Curved Surfaces." *Applied Sciences* 9, no. 24 (2019): 5489.
- [22] Márquez, JJ, JM Pérez, J Ríos, and A Vizán. "Process Modeling for Robotic Polishing." *Journal of Materials Processing Technology* 159, no. 1 (2005): 69-82.
- [23] Khalick Mohammad, Abd El, Jie Hong, and Danwei Wang. "Polishing of Uneven Surfaces Using Industrial Robots Based on Neural Network and Genetic Algorithm." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93, no. 1 (2017): 1463-71.

Anexos

A: Código *RAPID* desenvolvido para o polimento da face plana da prancha, na programação offline

```

%%
VERSION: 1
LANGUAGE: ENGLISH
%%

MODULE mfcPathpath1

    var robtarget A1:=([-37.89389405,794.456890877,134.808591419],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,-1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget A2:=([-37.893866765,730.695272509,3.669788386],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget A3:=([-37.893882639,570.464984448,3.669815482],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P1:=([-37.893871495,570.465055878,-0.608974047],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P2:=([-84.155107931,551.548906735,-0.608997983],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P3:=([-84.155061858,5.568960828,-0.608976438],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,-1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P4:=([3.88439234,8.971930931,-0.609010123],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,-1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P5:=([3.884418899,603.201660107,-0.609000043],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P6:=([80.443178689,546.968880743,-0.609011206],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget P7:=([80.443052842,3.384921402,-0.609019549],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,-1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget W1:=([80.443028931,-79.338089198,24.591518063],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,-1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);
    var robtarget W2:=([80.443032385,-173.887048298,157.254669439],[0,0.99907859,-
0.04291819,0],[-1,-1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]);

    VAR num n1ForceX:=0;
    VAR num n1ForceY:=0;
    VAR num n1ForceZ:=15;

!MINHAS VARIÁVEIS
    VAR intnum time_int;
    VAR num i:=0;
    VAR pos posdata{100000};
    VAR num tempodata{100000};
    VAR fcfcevector forcedata;

```

```

VAR clock cloc1;
var num tempoval;
VAR num testeforce_x{100000};
VAR num testeforce_y{100000};
VAR num testeforce_z{100000};
var string filename:="file1";

proc RunPathpath1(bool bRecover,bool bSpindleOn)
i:=0;
filename:="polimentoplanooffline.txt";
FCDeact;
FCCalib fcSPINDLEpol1_LD;
ClkReset cloc1;
ClkStart cloc1;
interropt;
ClkStop cloc1;
write_to_file;
ENDproc

PROC interropt()
CONNECT time_int WITH write_data_toarray;
ITimer 0.2,time_int;
ISleep time_int;
IWatch time_int;
move;
IDelete time_int;
ENDPROC

TRAP write_data_toarray
i:=i+1;
posdata{i}:=CPos(\Tool:=fcSPINDLEpol1\WObj:=workobject_1);
tempoval:=ClkRead(Cloc1);
tempodata{i}:=tempoval;
forcedata:=fcGetForce(\Tool:=fcSPINDLEpol1\contactforce);
testeforce_x{i}:=forcedata.xforce;
testeforce_y{i}:=forcedata.yforce;
testeforce_z{i}:=forcedata.zforce;
ENDTRAP

PROC write_to_file()
VAR iodev file;

open "home:"\file:=filename,file;
Write file,"Ponto, x, y, z, tempo, Fx, Fy, Fz";

FOR i FROM 1 TO 1000 DO
write file," "\num:=i\NoNewLine;
Write file," "\Pos:=posdata{i}\NoNewLine;
write file," "\num:=tempodata{i}\NoNewLine;

```

```

        write file, " \num:=testeforce_x{i}\NoNewLine;
        write file, " \num:=testeforce_y{i}\NoNewLine;
        write file, " \num:=testeforce_z{i};
    ENDFOR
    close file;
ENDPROC

PROC move()
    FCDeact;

    Movej A1,v50,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    MoveL A2,v50,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    MoveL A3,v50,fine,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;

    FCPress1LStart
    P1,v50\Fx:=n1ForceX\Fy:=n1ForceY\Fz:=n1ForceZ,50\ForceFrameRef:=FC_REFFRA
    ME_TOOL\ForceChange:=50\DampingTune:=100\TimeOut:=5,\UseSpdFFW,\PosSup
    vDist:=9e9,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;

    FCPressL P2,v50,15,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    FCPressL P3,v50,15,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    FCPressL P4,v50,15,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    FCPressL P5,v50,15,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    FCPressL P6,v50,15,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    FCPressL P7,v50,15,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;
    FCPressLEnd W1,v50,\ForceChange:=50,\ZeroContactValue:=5;
    MoveL W2,v50,z1,fcSPINDLEpol1\wobj:=workobject_1;

ENDPROC

ENDMODULE

```

B: Código *RAPID* desenvolvido para o polimento da face lateral da prancha, na programação offline

%%%

VERSION: 1

LANGUAGE: ENGLISH

%%%

MODULE mfcPathpath1

VAR robtarget A1:=[[-172.804765719,-128.013207818,-
6.806289004],[0.467127847,0.467127925,0.530840303,0.530840512],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget A2:=[[-117.225485569,-58.112239264,-
7.499897864],[0.467127877,0.467127824,0.530840383,0.530840494],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget A3:=[[-123.848744696,-6.45140881,-
7.499999991],[0.467127842,0.467127832,0.530840412,0.530840489],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P1:=[[-112.216666666,-4.960017009,-
7.5],[0.46712783,0.46712783,0.530840457,0.530840457],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P2:=[[-143.991666667,180.010991382,-
7.5],[0.473066861,0.473066861,0.525554702,0.525554702],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P3:=[[-155.775,300.04454933,-
7.5],[0.488656229,0.488656229,0.511092056,0.511092056],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P4:=[[-155,420.168235152,-
7.5],[0.522488502,0.522488502,0.47645122,0.47645122],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P5:=[[-148.541666666,480.100143247,-
7.5],[0.546115191,0.546115192,0.449175019,0.449175019],[-1,-
1,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P6:=[[-135.766666667,529.701480521,-
7.5],[0.579358099,0.579358099,0.405393874,0.405393874],[-
1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P7:=[[-115.533333333,580.157828242,-
7.5],[0.601843451,0.601843451,0.371193292,0.371193292],[-
1,0,1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR robtarget P8:=[[-82.141666667,629.841352496,-
7.5],[0.652815231,0.65281523,0.27172095,0.27172095],[-
1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

VAR robtarget P9:=[[-69.833333336,639.950879009,-
7.5],[0.673452476,0.673452475,0.215549909,0.215549909],[-
1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
VAR robtarget P10:=[[-53.166666669,649.964668193,-
7.5],[0.689305352,0.689305351,0.15766462,0.15766462],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+
09,9E+09,9E+09,9E+09]];
VAR robtarget P11:=[[-28.966666667,658.329904906,-
7.5],[0.702730089,0.702730089,0.078552035,0.078552035],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9
E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
VAR robtarget P12:=[[-0,661.484382075,-
7.5],[0.707106781,0.707106782,0,0],[0,1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+
09]];
VAR robtarget P13:=[[-28.966666666,658.329904906,-
7.5],[0.702730089,0.702730089,-0.078552035,-
0.078552035],[0,1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
VAR robtarget w1:=[[-0.000782492,714.2315153,-
7.500028559],[0.707106809,0.707106753,-0.000000024,0.000000092],[-
1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
VAR robtarget w2:=[[-0.000454444,826.194657426,-
7.500103702],[0.707106821,0.707106741,-
0.000000004,0.000000103],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
VAR robtarget w3:=[[-387.545862367,826.194655829,-
7.500198031],[0.707106927,0.707106636,-
0.000000104,0.000000185],[0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

VAR num n1ForceX:=0;
VAR num n1ForceY:=0;
VAR num n1ForceZ:=05;

```

!MINHAS VARIÁVEIS

```

VAR intnum time_int;
VAR num i:=0;
VAR pos posdata{100000};
VAR num tempodata{100000};
VAR fcfrcvector forcedata;
VAR clock cloc1;
var num tempoval;
VAR num testeforce_x{100000};
VAR num testeforce_y{100000};
VAR num testeforce_z{100000};
var string filename:="file1";

```

```

proc RunPathpath1(bool bRecover,bool bSpindleOn)
i:=0;
filename:="2.3polimentoLATERAL_VERICAL_05N_spindleon.txt";
FCDeact;
FCCalib fcSPINDLEpol1_LD;
ClkReset cloc1;
ClkStart cloc1;

```

```

interropt;
ClkStop cloc1;
write_to_file;
ENDproc

PROC interropt()
CONNECT time_int WITH write_data_toarray;
ITimer 0.2,time_int;
ISleep time_int;
IWatch time_int;
move;
IDelete time_int;
ENDPROC

TRAP write_data_toarray
i:=i+1;
posdata{i}:=CPos(\Tool:=SPINDLE_TCP_2_2\WObj:=mfcwobj3);
tempoval:=ClkRead(Cloc1);
tempodata{i}:=tempoval;
forcedata:=fcGetForce(\Tool:=SPINDLE_TCP_2_2\contactforce);
testeforce_x{i}:=forcedata.xforce;
testeforce_y{i}:=forcedata.yforce;
testeforce_z{i}:=forcedata.zforce;
ENDTRAP

PROC write_to_file()
VAR iodev file;

open "home:"\file:=filename,file;
Write file,"Ponto, x, y, z, tempo, Fx, Fy, Fz";

FOR i FROM 1 TO 1000 DO
write file," \num:=i\NoNewLine;
Write file," \Pos:=posdata{i}\NoNewLine;
write file," \num:=tempodata{i}\NoNewLine;
write file," \num:=testeforce_x{i}\NoNewLine;
write file," \num:=testeforce_y{i}\NoNewLine;
write file," \num:=testeforce_z{i};
ENDFOR
close file;
ENDPROC

PROC move()
FCDeact;

Movej A1,v50,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;
MoveL A2,v50,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;
MoveL A3,v50,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;

```

```

FCPress1LStart
P1,v20\Fx:=n1ForceX\Fy:=n1ForceY\Fz:=n1ForceZ,50\ForceFrameRef:=FC_REFFRAME_TOOL\ForceChange:=50\DampingTune:=100\TimeOut:=5,\UseSpdFFW,\PosSup
vDist:=9e9,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;

```

```

FCPressL P1,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P2,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P3,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P4,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P5,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P6,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P7,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P8,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P9,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P10,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P11,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P12,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;
FCPressL P13,v20,5,z1,SPINDLE_TCP_2_2,\wobj:=mfcwobj3;

```

```

FCPressLEnd W1,v20,\ForceChange:=50,\ZeroContactValue:=05;
MoveL W2,v50,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;
MoveL W3,v50,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;
MoveJ A1,v50,z1,SPINDLE_TCP_2_2\wobj:=mfcwobj3;

```

ENDPROC

ENDMODULE