



João Pedro  
Vieira Vicente

**DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA  
AUTOMATIZAÇÃO DE POLIMENTO MECÂNICO  
COM CONTROLO EM MALHA FECHADA**

**DEVELOPMENT OF AUTOMATION SOLUTIONS  
FOR MECHANICAL POLISHING WITH CLOSE  
LOOP CONTROL**





João Pedro  
Vieira Vicente

**DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA  
AUTOMATIZAÇÃO DE POLIMENTO MECÂNICO  
COM CONTROLO EM MALHA FECHADA**

**DEVELOPMENT OF AUTOMATION SOLUTIONS  
FOR MECHANICAL POLISHING WITH CLOSE  
LOOP CONTROL**

*“It does not matter how slowly you go, as long as you do not stop.”*

— Confucius





João Pedro  
Vieira Vicente

## **DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA AUTOMATIZAÇÃO DE POLIMENTO MECÂNICO COM CONTROLO EM MALHA FECHADA**

## **DEVELOPMENT OF AUTOMATION SOLUTIONS FOR MECHANICAL POLISHING WITH CLOSE LOOP CONTROL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob a orientação científica do Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e do Doutor Daniel Gil Afonso, Professor Adjunto em Regime Laboral da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro.

Este projeto teve o apoio financeiro dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 -Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

CENTRO-01-0145-FEDER-022083  
- Centro Portugal Regional Operational Programme(Centro2020), sob o acordo de parceria PORTUGAL 2020, através do Fundo Regional Europeu.



**o júri / the jury**

presidente / president

Professor Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professor Doutor Hélder de Jesus Fernandes Puga  
Professor Auxiliar, Universidade do Minho

Professor Doutor Daniel Gil Afonso  
Professor Adjunto em Regime Laboral, Universidade de Aveiro





**agradecimentos /  
acknowledgements**

Aos meus orientadores, Professor Jorge Ferreira e Professor Daniel Afonso, o meu sincero agradecimento pelo auxílio prestado, e pela disponibilidade apresentada sempre que necessário.

A toda a comunidade da ESAN, tanto pessoal docente como não docente, que me auxiliaram ao longo do projeto, cedendo material e as instalações para que não me faltasse nada.

Aos meus pais, por permitirem que eu pudesse dedicar-me aos estudos a tempo inteiro, sem nunca me faltar nada.

Aos meus amigos, namorada e irmão, pela amizade e apoio incondicional ao longo deste trajeto.

A todos vocês, o meu muito obrigado!



## Palavras Chave

Polimento; Automação; Parâmetros de polimento; Sensores; Aquisição de dados; Visão Industrial.

## Resumo

Na presente dissertação, pretende-se relacionar o consumo de corrente de um *spindle* com uma escova acoplada, utilizada para o polimento mecânico de peças metálicas, com a força aplicada pela mesma escova na superfície da peça polida, durante o processo de polimento. São também estudados alguns parâmetros do processo de polimento, bem como a utilização de visão industrial para avaliar a qualidade da superfície polida. O trabalho realizado iniciou-se por uma pesquisa sobre os métodos de polimento e métodos de avaliação da qualidade de uma superfície. De seguida pesquisaram-se formas de instrumentar as grandezas que se pretendem controlar num processo deste género, seleccionaram-se os sensores necessários e prepararam-se os respetivos circuitos. Estes circuitos foram posteriormente instalados num robô, assim como um *spindle* com a ferramenta selecionada para o polimento. Realizaram-se os vários testes que haviam sido previamente definidos utilizando um PLC para adquirir os dados lidos em tempo real pelos sensores. Após todos os testes realizados, utilizou-se uma câmara para retirar imagens aproximadas das superfícies dos blocos polidos, de modo a que fosse possível avaliar o estado superficial de cada bloco de forma mais aprofundada.



**Keywords**

Polishing; Automation; Polishing parameters; Sensores; Data acquisition; Machine Vision.

**Abstract**

The purpose of this thesis, is to find the relation between the current consumption of a spindle with a polishing brush linked to it, with the force that that same brush applies on the surface of a metal piece, during the polishing process. Some polishing parameters are also studied, as well as the usage of machine vision to evaluate the polished surface quality. The work carried out started with a research on polishing methods and methods of evaluating the quality of a surface. Then, ways of instrumenting the quantities that intend to control in a process of this kind were studied, the necessary sensors were selected and the respective circuits were prepared. These circuits were later installed on a robot, as well as a spindle with the tool selected to the polishing process. The various tests that had been previously defined were carried out using a PLC to acquire the data read in real time by the sensors. After all tests performed, a camera was used to take zoomed in images of the surfaces of the polished blocks, making it easier to evaluate the surface quality of each block.



# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>2</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>7</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>9</b>
1.1 Motivação e enquadramento . . . . .	9
1.2 Objetivos . . . . .	10
1.3 Estrutura do documento . . . . .	10
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>12</b>
2.1 Polimento e Estado de Superfície . . . . .	12
2.1.1 Estado de superfície e qualidade de superfície . . . . .	13
2.1.2 Medição de estado de superfície . . . . .	16
2.1.3 Processos de acabamento de superfície . . . . .	20
2.2 Instrumentação e controlo . . . . .	31
2.2.1 Instrumentação . . . . .	32
2.2.2 Modelos de controlo . . . . .	34
2.3 Automatização de polimento mecânico . . . . .	39
2.3.1 Processos de polimento em massa . . . . .	40
2.3.2 Polimento de peças únicas . . . . .	41
<b>3 Metodologia</b>	<b>44</b>
3.1 Problemática do controlo de força . . . . .	44
3.2 Seleção de hardware . . . . .	47
3.3 Desenvolvimento do hardware . . . . .	49
3.3.1 Transdutor de corrente . . . . .	50
3.3.2 Sensor indutivo . . . . .	55
3.3.3 PLC S7-1200 . . . . .	55
3.3.4 Câmara . . . . .	60
3.4 Testes preliminares . . . . .	62
3.4.1 Polimento de uma superfície instrumentando corrente e de- formação da ferramenta . . . . .	62
3.4.2 Análise da superfície da peça polida, com o auxílio da câmara	65
3.5 Instalação do hardware . . . . .	68
3.6 Planeamento de experiências . . . . .	71

<b>4</b>	<b>Trabalho experimental</b>	<b>74</b>
4.1	Definição do <i>Workobject</i> . . . . .	74
4.2	Programação robô . . . . .	75
4.2.1	Calibração do transdutor de corrente . . . . .	77
4.3	Ensaio experimentais . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Discussão de Resultados</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>92</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>95</b>
<b>A</b>	<b>Programa PLC</b>	<b>101</b>
<b>B</b>	<b>Desenhos técnicos das peças fabricadas</b>	<b>112</b>
<b>C</b>	<b>Tabela obtida com o DesignExpert</b>	<b>117</b>





# Lista de Figuras

2.1	Rugosidade média de uma superfície ( $R_a$ ). Adaptado de [1]. . . . .	13
2.2	Coefficiente de simetria ( $R_{sk}$ ) . . . . .	14
2.3	Curtose ( $R_{ku}$ ) . . . . .	15
2.4	Altura máxima da rugosidade $R_t$ . . . . .	15
2.5	Obtenção dos dez valores para o cálculo de ( $R_z$ ). Imagem retirada de [1] . . . . .	16
2.6	Obtenção de dados relativos ao perfil de uma superfície através de um perfilômetro mecânico. Imagem adaptada de [2] . . . . .	17
2.7	Resumo gráfico do funcionamento de um interferômetro. Adaptado de [3] . . . . .	18
2.8	Estratégias de polimento adotadas na SA, com pedra e lixa . . . . .	25
2.9	Exemplo de teste de qualidade superficial com silicone . . . . .	26
2.10	Peça com superfície espelhada . . . . .	27
2.11	Controlo do funcionamento de um motor DC . . . . .	31
2.12	Elementos de um sistema de instrumentação . . . . .	32
2.13	Elementos para o controlo da temperatura de uma resistência . . . . .	33
2.14	Controlo Proporcional . . . . .	36
2.15	Comparação da resposta do controlo derivativo com o controlo PD, a um erro com variação constante ao longo do tempo . . . . .	37
2.16	Resposta do método de controlo integral e do método PI a um dado erro . . . . .	38
3.1	Sensores de forças . . . . .	44
3.2	<i>ABB integrated force control</i> . . . . .	45
3.3	Sensor <i>OnRobot Hex 6 axis force torque sensor</i> . . . . .	46
3.4	<i>Spindle</i> Elte TMPE1 6.5/2 . . . . .	46
3.5	Abrasivos disponíveis para acoplar ao <i>spindle</i> . . . . .	46
3.6	Relação entre o consumo de corrente do <i>spindle</i> e a força exercida pela ferramenta . . . . .	47
3.7	Robô ABB IRB1600, com o <i>spindle</i> Elte TMPE1 6.5/2 acoplado . . . . .	48
3.8	Circuito do transdutor de corrente, presente no respetivo manual . . . . .	50
3.9	Circuito do conversor LD1117v33, retirado do respetivo manual . . . . .	50
3.10	Gráfico para seleção do valor de referência, retirado do respetivo manual . . . . .	51
3.11	Amplificador diferencial padrão . . . . .	52
3.12	Amplificador diferencial . . . . .	53
3.13	Placa PCB obtida . . . . .	53

3.14	Projeto placa PCB vista de topo . . . . .	54
3.15	Projeto placa PCB vista de baixo . . . . .	54
3.16	Esquema do sensor indutivo, retirado do respectivo manual . . . . .	55
3.17	Ativação do HSC1 . . . . .	56
3.18	Configuração da função do HSC1 . . . . .	57
3.19	Configuração da entrada correspondente ao HSC1 . . . . .	57
3.20	Alteração do valor do filtro de entrada da entrada <i>I0.0</i> . . . . .	58
3.21	Valores que a <i>WORD</i> da entrada analógica assume, consoante a tensão de entrada . . . . .	59
3.22	Função que calcula o valor da corrente consumida pelo <i>spindle</i> , com base na tensão lida na entrada digital . . . . .	60
3.23	Parte de trás da <i>BOA 1280×960 Mono SH Vision System</i> . . . . .	60
3.24	Ligações entre o conector I/O PWR da câmara, e os respetivos pinos no módulo <i>A-BVS-PL-100</i> . . . . .	61
3.25	Interligação de todos os componentes necessário ao bom funcionamento da câmara . . . . .	62
3.26	Localização dos pontos definidos para o primeiro teste de polimento . . . . .	63
3.27	Primeiros testes de polimento . . . . .	64
3.28	Gráfico da relação da deformação da escova-corrente . . . . .	65
3.29	Obtenção das primeiras imagens do estado de superfície . . . . .	66
3.30	Imagens obtidas durante o primeiro teste . . . . .	67
3.31	Suporte do sensor indutivo . . . . .	68
3.32	Instalação do sensor indutivo . . . . .	69
3.33	Peças de suporte da câmara e iluminação . . . . .	69
3.34	Instalação da câmara e da iluminação . . . . .	70
3.35	Instalação da câmara e da iluminação . . . . .	70
3.36	Robô com todo o hardware instalado . . . . .	71
4.1	Posicionamento do bloco . . . . .	74
4.2	Ponteira utilizada para obtenção das coordenadas do referencial do bloco . . . . .	75
4.3	CAD da ferramenta . . . . .	76
4.4	Trajectoria da ferramenta . . . . .	77
4.5	Expressão que relaciona o valor lido na entrada analógica do PLC com o consumo de corrente do <i>spindle</i> . . . . .	78
4.6	Escova utilizada nos 13 primeiros ensaios . . . . .	79
4.7	Trajectoria da ferramenta nos 13 primeiros ensaios . . . . .	80
4.8	Blocos após todos os ensaios . . . . .	81
4.9	Largura das imagens obtidas através do sistema de visão . . . . .	81
4.10	Iluminação para a obtenção das imagens . . . . .	82
5.1	Tabela obtida no excel, com os dados dos testes realizados . . . . .	84
5.2	Polimento com passo lateral de 6 mm e 10 mm . . . . .	85
5.3	Gráficos representativos dos resultados obtidos na primeira passagem no bloco 1 . . . . .	87
5.4	Relação calculada entre força aplicada e corrente consumida . . . . .	89
5.5	Imagens retiradas com a câmara dos Blocos 1 e 2 . . . . .	90
5.6	Imagens retiradas com a câmara de diferentes zonas do bloco 5 . . . . .	91

# Lista de Tabelas

2.1	Características de dois diferentes métodos de perfilometria [4] . . . .	19
2.2	Caracterização da rugosidade de uma superfície de acordo com a norma ISO 1302 [5]. . . . .	21
2.3	Alguns metais, reagentes e respectivas características para polimento químico [6] . . . . .	29
3.1	Resultado das primeiras medições de rugosidade realizadas . . . . .	68
3.2	Parâmetros a controlar durante o polimento . . . . .	72
5.1	Diminuição média da rugosidade dos blocos, obtida por cada diferente parâmetro de polimento . . . . .	86
5.2	Diminuição média da rugosidade dos blocos, obtida por cada diferente parâmetro de polimento . . . . .	88



# Capítulo 1

## Introdução

*Introdução do projeto, onde são apresentadas as motivações, os objetivos a cumprir e a estrutura deste documento*

### 1.1 Motivação e enquadramento

O desenvolvimento de métodos e técnicas de acabamento superficial, com o intuito de melhorar a qualidade da superfície da peça, tem uma grande importância na qualidade final da mesma. No caso dos moldes para injeção, uma superfície sem defeitos permite um melhor contacto em montagens proporcionando a moldação de peças com mais qualidade, redução do risco de corrosão e facilidade de ejeção dos materiais moldados, beneficiando a durabilidade dos moldes. Por este motivo, o fabrico de moldes implica muitas operações de polimento. Este processo é lento e requer mão-de-obra especializada, o que faz com que a formação de operadores especializados seja também demorada. Além disso, a qualidade da superfície vai sempre depender da habilidade do operador, sendo assim difícil de garantir que todas as peças possuem um acabamento superficial de igual qualidade. Outro problema detetado, é que as operações de polimento têm algumas consequências para a saúde dos operadores. Considera-se assim, que existe uma necessidade em automatizar este processo, de modo a obter superfícies com mais qualidade, de forma mais eficiente e uniforme, e melhorando as condições de trabalho dos operadores. O controlo deste processo deve ser rigoroso, considerando as exigências impostas pela indústria, relativamente à qualidade que a superfície deve apresentar. O controlo da força de polimento feito com base na medição da força realizada pelo *spindle* na peça, através de células de carga, é um dos métodos mais estudados, e apresenta resultados satisfatórios, no entanto, implica hardware com um custo significativo, o que limita a implementação industrial em média escala. Procura-se assim idealizar uma solução que permita a utilização de robôs já existentes em operações de polimento, com o mínimo de hardware adicional possível, sem

comprometer a qualidade final do produto.

## 1.2 Objetivos

Face ao apresentado no Enquadramento, o objetivo principal desta dissertação consiste no desenvolvimento e validação de uma solução de polimento automatizado, que permita um controlo em malha fechada. De modo a cumprir com o proposto, o projeto será dividido em pequenas metas:

- Estudo dos parâmetros e estratégias de polimento, e a sua influência no estado da superfície;
- Investigação de métodos que permitam enriquecer a informação enviada para o controlador, em alternativa à força de contacto realizada pela ferramenta de polimento;
- Investigação de métodos que permitam avaliar o estado da superfície automaticamente, intercalando esta avaliação com o processo de polimento;
- Seleção de sensores e desenvolvimento de soluções de instrumentação;
- Instrumentação de grandezas que forneçam informações relevantes durante o processo de polimento;
- Seleção dos parâmetros ideais de polimento, com base nas informações recolhidas através de testes realizados sobre o assunto;
- Análise da relação entre o consumo de corrente do *spindle* e a força de contacto na superfície;
- Proposta de alternativa ao controlo do polimento com base na força aplicada pela ferramenta, fundamentada pelos dados adquiridos ao longo do trabalho;

## 1.3 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos. No primeiro, é realizada uma breve introdução ao projeto, onde é realizado um enquadramento inicial e enumerados os objetivos a cumprir.

O Capítulo 2 é o estado da arte, e dota o leitor de informações relativamente ao estado atual de algumas tecnologias associadas ao tema do projeto.

No Capítulo 3 são enunciados, de forma detalhada, todos os passos tomados antes da realização dos ensaios experimentais.

O Capítulo 4 apresenta como foram realizados os ensaios experimentais.

No Capítulo 5 são apresentados todos os resultados obtidos através da realização deste trabalho, bem como o significado dos mesmos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do projeto, bem como propostas de melhoramento para trabalhos futuros.

Este documento tem ainda a Bibliografia, que enumera todos os documentos consultados para a realização deste trabalho.



## Capítulo 2

# Estado da Arte

*Para a realização deste projeto, foram estudadas diversas áreas da engenharia, que incidiram essencialmente no polimento mecânico e no controlo em malha fechada de um sistema. Neste capítulo, é apresentada a pesquisa realizada acerca do estado atual dos processos e tecnologias utilizados neste projeto.*

### 2.1 Polimento e Estado de Superfície

A superfície mecânica de uma peça é definida pelo conjunto de características que a separam do seu meio envolvente [7]. A qualidade da superfície é um atributo de extrema importância, pois caso possua defeitos, o desempenho da peça pode ser afetado negativamente [4]. Assim, o desenvolvimento de técnicas e métodos que permitam melhorar a qualidade de uma superfície tem um papel crucial na produção de determinados componentes, por diversos motivos: prevenção de falha mecânica das peças devido a defeitos superficiais [4, 7]; melhoria do contacto em montagens; redução do risco de corrosão [4]; performance do componente (por exemplo na reflexão e refração de luz, aderência de outros materiais, ejeção de materiais moldados, condução de calor e corrente elétrica) [1, 4]; motivos estéticos.

A crescente melhoria da qualidade dos processos de fabrico, nomeadamente os de fabrico aditivo e subtrativo, aumentou a capacidade de obter superfícies com características cada vez mais próximas das desejadas para o produto final. Para além disso, tecnologias de revestimento, também chamadas de operações de acabamento aditivas ou positivas, também estão a melhorar, com potencial para substituir algumas operações de acabamento subtrativo ou negativo. Apesar de tudo, a necessidade de realizar operações mecânicas de acabamento superficial, ainda é, e será, essencial para garantir a cada vez mais exigente qualidade e desempenho da peça [8].

Um dos métodos mais utilizados para a obtenção de superfícies capazes de cumprir com os requisitos de qualidade exigidos por cada peça é o

polimento mecânico [8], que remove os defeitos da superfície da peça por contacto do material abrasivo com a sua superfície [9]. O polimento mecânico é o método mais eficiente para a eliminação de rebarbas e rugosidades não desejadas, permitindo a obtenção de uma superfície suave. No entanto, para casos mais específicos, além deste método, é também necessário realizar outros tipos de tratamentos para que a peça fabricada seja capaz de cumprir com a sua função.

### 2.1.1 Estado de superfície e qualidade de superfície

Após a leitura da informação presente no Subcapítulo 2.1, é possível perceber os motivos pelos quais o estado de superfície tem sido um tópico bastante estudado há já várias décadas [1]. Este tema chega a ser tão complicado que, segundo Gadelmawla *et. al.* [1], a geometria de superfície é tão complexa que um número finito de parâmetros não será suficiente para a caracterizar. Porém, mesmo sendo teoricamente impossível obter uma descrição 100% exata do estado de uma superfície, é necessário obter uma caracterização da mesma, o mais completa possível. Para tal, Gadelmawla *et. al.* [1] sugerem um conjunto de 59 parâmetros que permitem obter uma representação bastante detalhada do estado de uma superfície. No entanto, Marko Sedlaček, Bojan Podgornik e Jože Vižintin [10], referem que na prática, existem 4 principais parâmetros utilizados para caracterizar a geometria 2D de uma superfície, sendo eles  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$ .

A rugosidade média ( $R_a$ , medido em  $\mu\text{m}$ ), é o parâmetro de caracterização da geometria de uma superfície mais usado universalmente para o controlo geral da qualidade da superfície [1]. Descreve as variações de altura detetadas ao longo de uma determinada distância, em relação a um valor médio [1, 10], como exemplificado no gráfico da Figura 2.1, onde  $l$  representa a distância da medição efetuada. Este parâmetro é fácil de definir e de medir, permitindo obter uma descrição geral acerca das variações de altura da superfície, no entanto não oferece informações relativamente à sua ondulação e é pouco sensível a pequenas alterações [1, 10].

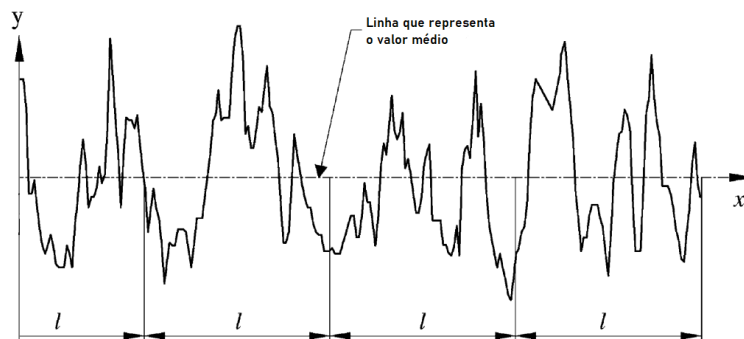


Figura 2.1: Rugosidade média de uma superfície ( $R_a$ ). Adaptado de [1].

A raiz quadrada da rugosidade média ( $R_q$ , medido em  $\mu\text{m}$ ; também aparece na literatura como RMS, sigla para *Root Mean Square*), tal como o  $R_a$ , mede a rugosidade média de uma superfície, através da variação dos valores de altura, relativamente a um valor médio [1]. No entanto, o parâmetro  $R_q$  tem maior sensibilidade que o  $R_a$ , em desvios mais acentuados do valor médio [10].

O coeficiente de simetria ( $R_{sk}$ ), permite perceber que tipo de irregularidades a superfície apresenta [11]. Um coeficiente  $R_{sk}=0$ , significa que existe uma distribuição simétrica de altura, ou seja, quando a profundidade das cavidades e a altura dos picos é igual,  $R_{sk}=0$  [10]. Superfícies que apresentem cavidades profundas, ou que tiveram os seus picos removidos (ou seja, cavidades  $>$  picos), apresentam um  $R_{sk}<0$  [1]. Superfícies com as cavidades preenchidas e/ou com picos elevados, possuem um  $R_{sk}>0$  [1]. A Figura 2.2, permite observar exemplos dos significados dos diferentes valores que  $R_{sk}$  pode tomar.

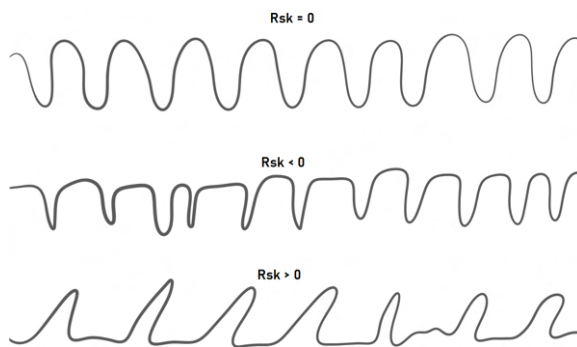


Figura 2.2: Coeficiente de simetria ( $R_{sk}$ )

Curtose ( $R_{ku}$ ) é um parâmetro que, tal como o  $R_{sk}$ , permite caracterizar as irregularidades superficiais [11], no entanto, enquanto o coeficiente  $R_{sk}$  caracteriza essas irregularidades através da magnitude dos picos e das cavidades, o  $R_{ku}$  faz essa caracterização a partir do seu número. Por outras palavras, este parâmetro indica o quão "pontaguda" é a superfície (se tem muitos picos ou não), ao longo de uma determinada distância [12]. Valores elevados de  $R_{ku}$  significam que a superfície apresenta vários picos elevados, enquanto que valores mais baixos representam picos menos acentuados [1] (valor intermédio de  $R_{ku}$  considera-se 3, logo para  $R_{ku}>3$  consideram-se valores elevados, e para  $R_{ku}<3$  consideram-se valores baixos). A Figura 2.3, permite observar exemplos dos significados dos diferentes valores que  $R_{ku}$  pode tomar.

Ainda na caracterização de uma superfície 2D, existem outros 2 parâmetros bastante utilizados, sendo eles  $R_t$  e  $R_z$  [13].

O parâmetro  $R_t$ , também denominado como  $R_{max}$ , corresponde à altura máxima da rugosidade de uma superfície, ou seja, a partir deste, é possível

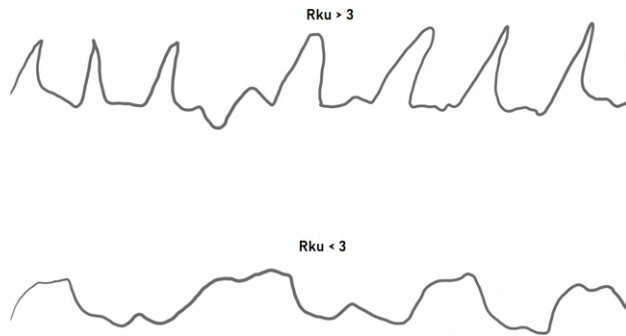


Figura 2.3: Curtose ( $R_{ku}$ )

calcular a medida correspondente à variação entre a cavidade mais profunda e o pico mais alto da superfície, ao longo de uma determinada distância [14]. A Figura 2.4 exemplifica graficamente como obter  $R_t$  ao longo de uma superfície com comprimento  $l$ .

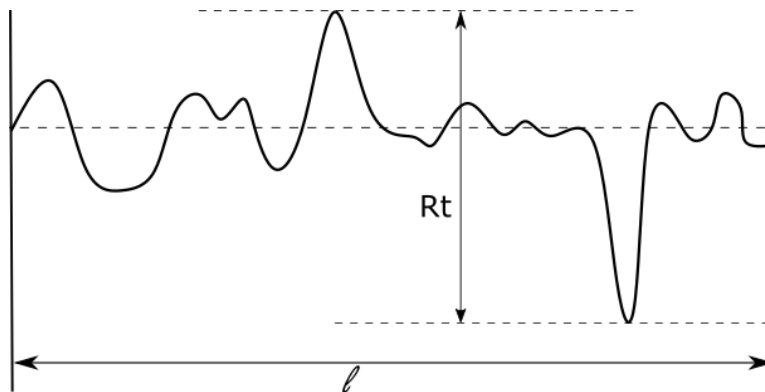


Figura 2.4: Altura máxima da rugosidade  $R_t$

A altura a dez pontos,  $R_z$ , caracteriza a geometria de uma superfície com base nas cavidades mais profundas e nos picos mais altos. O sistema internacional ISO, define  $R_z$  como a diferença entre a média de altura dos 5 picos mais altos, e a média de profundidade das 5 cavidades mais profundas ao longo de uma determinada distância da superfície. Na Figura 2.5, é possível observar um exemplo de como são definidos os 10 pontos para o cálculo de  $R_z$ , em que  $P_1$  a  $P_5$  representam as dimensões dos 5 picos mais elevados, e  $V_1$  a  $V_5$  dos 5 vales mais profundos

Além da caracterização da geometria de uma superfície a 2D, existem também parâmetros capazes de o fazer a 3D. A análise a 2D foi o método mais eficaz de caracterizar o estado de uma superfície ao longo de mais de 50 anos [1], no entanto, a crescente necessidade de obter produtos com o melhor desempenho possível, originou que a qualidade das superfícies das

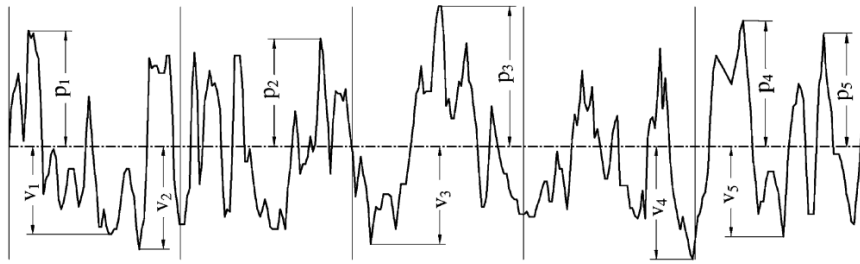


Figura 2.5: Obtenção dos dez valores para o cálculo de  $(R_z)$ . Imagem retirada de [1]

peças fabricadas sejam cada vez melhores [8]. Assim, para avaliar superfícies que exijam uma caracterização o mais precisa possível, é necessário recorrer a parâmetros que o façam a 3 dimensões. Em [15], o autor dá um exemplo em que refere que numa montagem hidráulica de alta precisão, em que o líquido tem de fluir por um espaço extremamente pequeno, a caracterização da geometria da superfície das peças utilizando parâmetros 3D, permite prever o quão a funcionalidade do produto final irá ser afetada pela rugosidade dos componentes. O estudo detalhado deste exemplo, é feito por P. Saravanakumar *et. al.* [16], que reforça a importância de superfícies com padrões de qualidade bastante elevados para os componentes de um sistema hidráulico.

Para a caracterização da geometria de uma superfície, Raphael Deltombe *et. al.* [17] sugerem 60 parâmetros distintos. No mesmo artigo é ainda possível perceber em que situações é vantajoso usar os diferentes tipos de parâmetros, no entanto, à semelhança da caracterização 2D, na engenharia os mais utilizados são os parâmetros que caracterizam a amplitude, nomeadamente  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_t$  e  $S_z$ . Estes parâmetros medem a  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_t$  e  $R_z$ , respetivamente, alterando apenas o facto de estes permitirem uma caracterização 3D. A obtenção destes parâmetros, depende assim do instrumento de medição que será utilizado para realizar a avaliação da rugosidade da superfície, como será explicado em 2.1.2.

### 2.1.2 Medição de estado de superfície

Os instrumentos de medição mais utilizados para obter estes parâmetros, são os perfilómetros, que podem ser mecânicos ou óticos. Dentro destes, existem vários tipos de instrumentos, que possuem diferentes características, sendo a seleção dos mesmos realizada com base em alguns fatores, nomeadamente a precisão da medição, a área da superfície a ser medida, tempo disponível para a medição, entre outros.

Os perfilómetros mecânicos possuem um apalpador em forma de cone extremamente fino (denominado por *stylus* na literatura), que desliza hori-

zontalmente ao longo do comprimento da peça, aplicando uma determinada carga [18], que força a que o apalpador esteja sempre em contacto com a superfície da peça, acompanhando assim a rugosidade da mesma, provocando oscilações verticais do apalpador. Estas oscilações são convertidas em sinais elétricos por um transdutor, e através da amplitude do sinal obtido, é possível adquirir valores em unidades de comprimento (tipicamente em  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, através do processamento destes valores, é possível obter parâmetros que caracterizam a superfície medida. Normalmente os perfilómetros mecânicos são utilizados para obter os valores de  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_z$  [4].

Este é o método mais utilizado na indústria, no entanto, este tipo de medição pode trazer alguns problemas. Por exemplo, em materiais com baixa dureza, a passagem do apalpador ao longo da sua superfície pode causar danos [18], o que é extremamente indesejável. Outro problema detetado neste tipo de medição é que nem sempre é 100% fiável. Quando se trata de rugosidades estão em causa dimensões bastante pequenas, tipicamente na ordem dos  $\mu\text{m}$ . Por este motivo, mesmo que o apalpador seja extremamente fino, o perfil medido pelo perfilómetro, pode não corresponder ao perfil real da superfície da peça, como é possível observar na figura 2.6 [2].

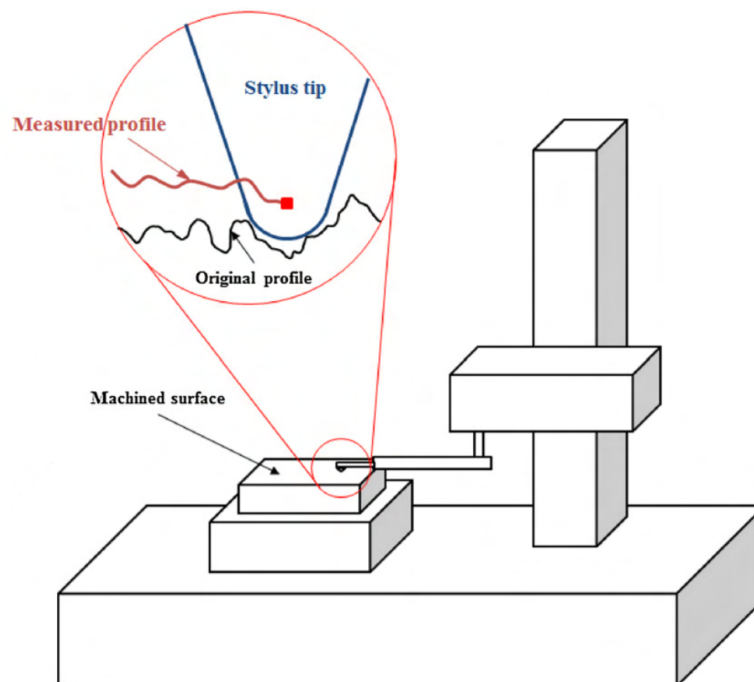


Figura 2.6: Obtenção de dados relativos ao perfil de uma superfície através de um perfilómetro mecânico. Imagem adaptada de [2]

A perfilometria ótica é realizada sem a existência de contacto com a peça,

recorrendo, por norma, à utilização de interferómetros. Estes dispositivos emitem um feixe de luz, que posteriormente é dividido em dois caminhos diferentes. Quando atingem uma superfície, são refletidos e combinados de novo num só feixe, que será analisado por um recetor [19]. A Figura 2.7, apresenta de uma forma simplificada o funcionamento destes instrumentos.

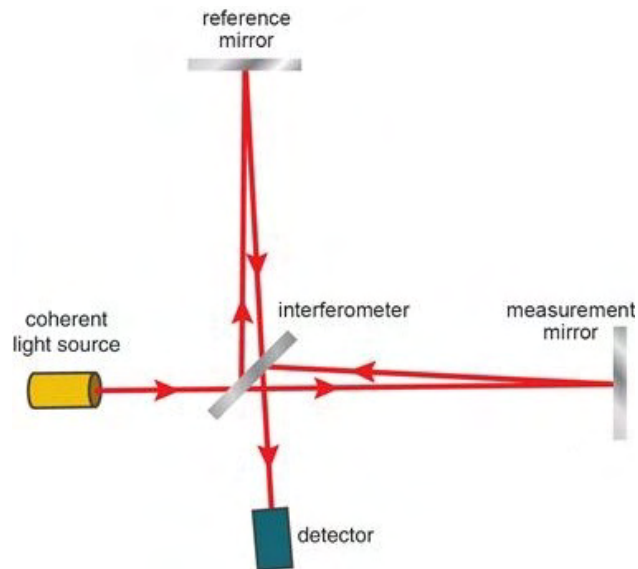


Figura 2.7: Resumo gráfico do funcionamento de um interferómetro. Adaptado de [3]

Dependendo do tipo de superfície em que os dois feixes de luz são refletidos, cria-se um desfasamento na onda que o recetor deteta [19]. Por outras palavras, e recorrendo ao auxílio da Figura 2.7, no caso de o *measurement mirror* ser igual ao *reference mirror*, a combinação dos dois feixes refletidos nos espelhos, será igual ao feixe emitido pela fonte luminosa. Caso o *reference mirror* seja perfeitamente plano e o *measurement mirror* seja ligeiramente côncavo ou convexo, a onda que representa a combinação dos feixes luminosas refletidos pelos espelhos, será diferente da onda do feixe emitido pela fonte luminosa.

É assim possível realizar o mapeamento 3D de uma superfície recorrendo a este método, fazendo com que o feixe que incide na superfície que está a ser avaliada percorra toda a sua área [20]. O desfasamento detetado na onda permite assim perceber se a luz está a passar por uma subida na geometria da superfície, ou uma descida, com precisões na ordem dos  $\mu\text{m}$  na resolução espacial, e conseguindo detetar variações na ordem dos sub-nm em altura [4]. Tipicamente este método de perfilometria ótica é usado para obter parâmetros como o  $S_a$  e  $S_t$ , mas tem também a capacidade de medir outros tipos não tão conhecidos, nomeadamente parâmetros funcionais e volumétricos [4].

Apesar de algumas vantagens relativamente à perfilometria mecânica, a parametrização da geometria de uma superfície com um interferómetro tem também alguns problemas, nomeadamente a dificuldade de calibração do dispositivo e uma extrema sensibilidade às vibrações [4, 19].

A tabela 2.1, permite realizar uma comparação entre os dois métodos de perfilometria abordados neste capítulo.

Tabela 2.1: Características de dois diferentes métodos de perfilometria [4]

	Stylus	Interferómetro
Resolução	xy: $10^{-6}$ z: $10^{-9}$	xy: $10^{-6}$ z: $10^{-10}$
Área de Medição	$\mu\text{m-cm}$	$\mu\text{m}$
2D/3D	2D	3D
Dificuldade Utilização	Fácil	Médio
Tempo de Medição	Longo	Curto
Tamanho da peça	Qualquer	Depende do dispositivo (normalmente 2-10kg)

Além destes métodos mais tradicionais, existem também outras formas de obter os parâmetros que caracterizam a geometria de uma superfície, como por exemplo através de sistemas de visão [21]. A principal vantagem deste método é a rapidez com que permite caracterizar a superfície avaliada [22]. Existem várias formas de, através de sistemas baseados em visão, obter os parâmetros que caracterizam a geometria de uma superfície, no entanto o mais comum consiste na utilização de uma câmara com alta distância focal, para obter uma imagem da superfície. Posteriormente, recorrendo a um software de processamento de imagem, é possível tratar a imagem obtida de modo a detetar as imperfeições presentes na sua superfície [23]. Isto é possível, porque a luz que incide na superfície da peça que está a ser avaliada é refletida de forma diferente pelas cavidades e picos presentes. Convertendo a imagem para níveis de cinzento é possível calcular a magnitude das imperfeições presentes na superfície [24], ou, num sistema mais simples, recorrer à binarização da imagem para detetar em que zonas existe mais discrepância entre as cavidades e picos. A precisão desta forma de medição é ligeiramente menor relativamente aos métodos tradicionais, no entanto o erro é inferior a 15% [25], podendo até estar compreendido entre 0.35% e 6% para a maioria



dos parâmetros [25, 26], valores que são compatíveis com a utilização deste método em contexto industrial, especialmente tendo em conta a poupança de tempo de ciclo que permitem obter.

Este método, porém, tem ainda muitas desvantagens, sendo a principal a dificuldade de calibração de um sistema deste tipo [25], que está ainda dependente de perfilómetros mecânicos e exige alterações no software de processamento de imagem. Além disso, após o trabalhoso processo de calibração, uma pequena alteração na luminosidade pode obrigar à repetição deste processo, visto que a luminosidade a que a peça está sujeita tem um papel fulcral neste tipo de medição [23]. Diferentes materiais refletem a luz de forma diferente, e por isso quando a superfície a ser avaliada for de um material diferente que o material da superfície para a qual o sistema foi calibrado, é necessário realizar o processo de novo. Apesar de tudo, este é um método em evolução, com potencialidade para no futuro se tornar no principal método de medição do estado de superfície, tanto em sistemas dedicados exclusivamente ao polimento, como em fresadoras CNC [27], pois mesmo que a precisão seja inferior às outras alternativas, este método é o mais adequado para implementar num sistema de medição automatizado.

Quando a rugosidade de uma superfície atinge os níveis pretendidos, torna-se em alguns casos necessário medir o brilho. Para tal, recorre-se a um medidor de brilho, também conhecido como *glossmeter* que, através da incidência de um feixe de luz com um determinado ângulo e intensidade na superfície da peça, é possível quantificar o brilho da superfície medida, com base no feixe refletido.

Com a utilização destes instrumentos, para medir os parâmetros já enunciados no subcapítulo 2.1.1, é possível obter uma caracterização detalhada da superfície, que determinará assim a qualidade da mesma. A qualidade de uma superfície, serve então para avaliar a quantidade de acabamento necessário, para que a textura da superfície da peça fabricada, seja coincidente com as especificações técnicas definidas [4, 28]. Pode-se assim afirmar que a qualidade de uma superfície é relativa, e que não existem valores absolutos para os parâmetros que a caracterizam ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$ ), sendo os valores ideais, dependentes das características da superfície que se pretende obter.

Ainda assim, a norma ISO 1302, sugere um intervalo de valores padrão de rugosidade, correspondente a cada classificação qualitativa do estado de superfície, como demonstrado na Tabela 2.2 [5].

### 2.1.3 Processos de acabamento de superfície

O acabamento superficial, corresponde a uma variedade de diferentes processos que permitem que o produto final obtenha uma superfície esteticamente apelativa, mais resistente, e que possua todas as características que uma superfície com qualidade exige [29]. A seleção do processo, ou do conjunto de processos, de acabamento superficial que a peça vai sofrer, vai

Tabela 2.2: Caracterização da rugosidade de uma superfície de acordo com a norma ISO 1302 [5].

ISO 1302	Rugosidade $R_a, \mu\text{m}$	Rugosidade $R_t, \mu\text{m}$	Rugosidade $R_z, \mu\text{m}$	Rugosidade $R_q, \mu\text{m}$	Qualidade Superfície
N1	0.025	0.1 - 0.3	0.1	0.025	Lente/Espelho
N2	0.05	0.3 - 0.7	0.2	0.05	Polimento elevado
N3	0.1	0.75 - 1.25	0.4	0.1	Polimento elevado
N4	0.2	1.5 - 2.5	0.8	0.2	Polimento médio
N5	0.4	2 - 6	1.6	0.4	Polimento médio
N6	0.8	6 - 10	3.2	0.8	Polimento médio/baixo
N7	1.6	10 - 20	6.3	1.6	Polimento baixo
N8	3.2	20 - 60	12.5	3.2	Polimento baixo
N9	6.3	$\approx 60$	25	6.3	Polimento baixo
N10	12.5	$\approx 125$	50	12.5	Pré-polimento
N11	25	$\approx 250$	100	25	Pré-acabamento
N12	50	$\approx 500$	200	50	Pré-acabamento

dependem do resultado final que se pretende obter e do estado inicial da peça [30, 31]. Existem inúmeras técnicas de acabamento superficial, que de um modo geral podem ser divididas em dois grandes grupos, os processos aditivos e subtrativos [32].

### 2.1.3.1 Processos de acabamento aditivos

A maioria dos processos aditivos consiste no revestimento da superfície da peça com um determinado material, através de técnicas como a galvanização, anodização e pintura.

#### 2.1.3.1.1 Galvanização

A galvanização é o processo de aplicação de um revestimento metálico a uma peça composta por um outro metal, melhorando a sua aparência e a resistência à corrosão [33]. Este processo pode ser feito recorrendo à eletrólise [33], que é uma técnica eletroquímica que permite que o metal de revestimento adira à superfície que se pretende revestir, com o auxílio de uma corrente elétrica [34]. A galvanização a quente é outro método bastante utilizado neste tipo de tratamento, e consiste na imersão da peça que se pretende revestir, num tanque com o metal fundido, que servirá de revestimento [33].

Este último método de galvanização é o mais utilizado, essencialmente pelos bons resultados e pela sua simplicidade [35]. Este método inicia-se por norma com a realização de um desengorduramento da peça a ser tratada, através de um banho numa solução ácida, seguido de uma lavagem com água. Posteriormente é realizada uma decapagem química banhando a peça em ácido clorídrico comercial, com o intuito de remover qualquer oxidação que possa existir na superfície. A peça é de novo lavada com água, e depois disto está pronta para a fluxagem, que é basicamente o revestimento da

superfície da peça com um primário (solução de cloreto de zinco e cloreto de amónio). De seguida, a peça passa por um processo de secagem, numa estufa a 60°C. Após a secagem, a peça passa para a próxima fase do processo, que consiste na imersão da mesma num banho de zinco fundido, a temperaturas entre os 440°C e os 465°C. Esta transição deve ser imediata, pois o facto de a peça vir ainda quente da estufa ajuda a reduzir o choque térmico que esta sofre ao ser mergulhada no zinco. Por fim realiza-se a passivação, que assegura a resistência e durabilidade do componente [35].

Existem no entanto outras formas de realizar a galvanização da superfície de uma peça, bem como outros metais que podem ser utilizados como revestimento, como o estanho, magnésio, ouro e prata [33]. Ao seleccionar qual o metal indicado para determinado componente, devem-se ter em conta factores como o preço e a função que o componente terá de desempenhar, visto que diferentes metais de revestimento, conferem diferentes propriedades aos metais galvanizados, como variação da condutividade térmica e eléctrica, e maior ou menor resistência a temperaturas extremas [33].

#### **2.1.3.1.2 Anodização**

A anodização é um processo que, como grande parte dos processos de acabamento superficial aditivos, reveste a superfície de uma peça com uma camada protetora, com o objetivo de evitar a sua corrosão e melhorar a sua aparência, permitindo ainda dar cor à peça, através da pigmentação.

Este tratamento permite que a superfície da peça anodizada seja protegida por um fina camada de óxido [36], geralmente com espessuras que variam entre os 10µm e 25µm, dependendo do tipo de ambiente a que a peça estará sujeita [37, 38].

A anodização é um processo eletrolítico, capaz de fornecer esta camada protetora a diferentes metais, como o alumínio, titânio e tungsténio, através da imersão da peça em vários banhos, que promovem a formação de um revestimento de óxido, através da corrosão do metal tratado de uma forma controlada [38]. Algumas etapas deste processo, bem como os elementos em que as peças serão imergidas, variam dependendo do material que compõe a peça sujeita a este tratamento.

#### **2.1.3.1.3 Pintura**

A pintura é talvez o método de acabamento aditivo mais conhecido, tendo como principal objetivo melhorar a aparência da peça e dar-lhe cor (em alguns casos a cor pode ser bastante importante, por exemplo, servindo como sinalização). No entanto, existem também já tintas, que têm a capacidade de, à semelhança dos processos já referidos, proteger as superfícies metálicas dos problemas que o contacto direto com o meio ambiente causam, nomeadamente a corrosão [39].

Existem diferentes tipos de tintas, como por exemplo o primário, que

tem uma boa aderência à superfície metálica na qual será aplicada, bem como características anti corrosivas, conferindo proteção à superfície da peça [40]. Por norma, após a aplicação do primário aplica-se a tinta de acabamento, que concede à peça um aspeto mais apelativo, permitindo também que esta adquira cor. A tinta de acabamento deve ser compatível com o primário, e selecionada tendo em conta as condições ambientais à qual a peça que está a ser pintada estará sujeita [40].

### **2.1.3.2 Processos de acabamento subtrativos**

Nos processos subtrativos, um abrasivo entra em contacto com a superfície que se pretende polir, retirando o excesso de material que esta possui, até que se obtenha a rugosidade pretendida [41]. O polimento mecânico e químico são alguns dos processos mais utilizados na indústria, e englobam um vasto número de técnicas que têm como objetivo a obtenção da superfície final pretendida. Dependendo do resultado final que se pretende, a técnica a ser utilizada é selecionada, e em alguns casos pode até ser necessário combinar diferentes técnicas de polimento.

#### **2.1.3.2.1 Polimento mecânico**

O polimento mecânico desempenha um papel extremamente importante na qualidade final da superfície da peça [42], e pode incluir diferentes técnicas desde rebarbar, esmerilhar, lixar e polir, até à inspeção final da peça [43]. Por definição, o polimento mecânico consiste no aperfeiçoamento da superfície polida, através da remoção de uma fina camada de material, utilizando um disco/escova de polimento, cinto abrasivo, ou outro abrasivo com características semelhantes, reduzindo a rugosidade da superfície até que esta atinja os níveis desejados [42, 43]. Este processo é geralmente realizado na fase final do processo de produção de um componente, e em algumas indústrias pode consumir cerca de um terço do seu tempo total de produção [43]. Exemplo disto é a indústria dos moldes e matrizes onde, segundo Liang Liao e Fengfeng (Jeff) Xi [44], 37% do seu tempo de produção é dedicado ao acabamento superficial das suas cavidades. Nesta indústria, como o fabrico dos moldes é realizado em máquinas CNC que, em comparação a outros métodos, permitem obter produtos com uma qualidade superficial mais próxima da desejada, a utilização de técnicas de polimento mecânico mais grosseiras, que consistem na utilização de abrasivos com granulometria média/elevada, é quase sempre desprezada, iniciando-se o processo com lixas e pedras de granulometria mais fina, o que por si só já ajuda a diminuir o tempo despendido no acabamento superficial da peça.

Apesar da grande evolução tecnológica observada nos últimos anos, que se tem traduzido no crescente aumento da automatização de grande parte dos processos industriais, o polimento mecânico é ainda predominantemente manual, realizado por trabalhadores especializados na área [45]. O operador

deve ser capaz de avaliar o estado da superfície a olho nu e com o auxílio do toque, e a partir daí selecionar o tipo de abrasivo indicado para o polimento [43]. No caso da indústria dos moldes, o primeiro abrasivo selecionado vai depender do estado da superfície que o molde apresentar, assim que sair da máquina CNC. Após a seleção da granulometria do abrasivo escolhido, o operador vai diminuindo-a gradualmente, podendo até selecionar escovas compostas por diversos materiais como nylon, carboreto de silício e fibra de vidro, até que a superfície obtenha a rugosidade desejada. A qualidade final da superfície do molde é extremamente dependente da habilidade do operador, pois fatores como a força aplicada no contacto entre o abrasivo e a superfície, o número de passagens, granulometria do abrasivo e a precisão da avaliação do estado atual da superfície feita pela inspeção visual e da sensibilidade tátil do operador têm um papel de extrema importância no resultado final, num processo em que não existe nenhum tipo de automação, e as diretrizes do procedimento não estão bem definidas, o "próximo passo" é sempre feito com base na aptidão que o operador tem, para realizar a leitura correta destes fatores e, a partir daí, tomar decisões corretas (por exemplo, se deve ou não continuar a polir, que tipo de abrasivo deve utilizar etc.) [43].

O grupo Simoldes, fundado em 1959 e sediado em Portugal, é uma referência nacional na produção de moldes. Na Simoldes Aços SA, realizam-se os processos de produção de moldes, incluindo o acabamento superficial dos mesmos. Aqui, tal como na maioria das fábricas de moldes, o acabamento superficial dos moldes é realizado recorrendo a técnicas de polimento mecânico manuais. Assim que o molde sai da CNC, um operador especializado realiza a medição 3D do mesmo, de modo a avaliar se as medidas respeitam o toleranciamento definido. Caso o resultado desta análise seja positiva, o molde segue para a zona de polimento, onde o responsável avalia a qualidade da superfície das cavidades, obtida na maquinação. Caso este considere que a superfície não apresenta a qualidade esperada, o molde é enviado de volta para a zona de maquinação, para que a qualidade da superfície seja melhorada. Segundo o próprio responsável, estes casos são raros, e geralmente os moldes vêm prontos para se dar início ao processo de polimento. O primeiro passo deste processo é a limpeza de todos os resíduos presentes na superfície a ser polida. De seguida, aplica-se um óleo de polimento, seguido de uma primeira passagem com uma pedra de polir de grão 240. Esta deve ser esfregada na superfície sempre na mesma direção, perpendicularmente à direção das marcas de maquinação. Assim que as marcas de maquinação desaparecerem, ficam apenas os riscos originados pela pedra, o que exige assim uma passagem com uma lixa de grão igual à pedra utilizada (240), de modo a remover estes riscos, pois entre uma lixa e uma pedra de grão idêntico, a lixa é sempre mais macia. Antes de realizar a passagem com a lixa, o óleo de polimento deve ser removido com o auxílio de álcool etílico, pois a lixa deve ser friccionada contra a superfície a seco. O polimento utilizando lixa e pedra, pode ser realizado pegando diretamente no respetivo abrasivo

e friccionando-o na superfície do molde, ou colocando o abrasivo selecionado na ponta de uma máquina vibratória. Na Figura 2.8, é possível observar as diferentes opções que o operador dispõe para polir. De um modo geral, esfregar o abrasivo manualmente, ou recorrer ao auxílio da máquina vibratória, apresenta os mesmos resultados práticos, ficando a escolha do método ao critério do operador. No entanto, os polidores da SA afirmam que para superfícies pequenas ou de difícil acesso, pegar no abrasivo diretamente com a mão facilita o processo, e que para zonas de maiores dimensões com poucos obstáculos, a preferência recai sobre a colocação do abrasivo na ponta da máquina vibratória. Outro fator importante é o cansaço, por exemplo, quando o operador já está a friccionar o abrasivo manualmente contra a superfície há demasiado tempo, começa a sentir desconforto nos dedos, passando assim a utilizar a máquina vibratória para descansar. A máquina vibratória, porém, ao fim de demasiado tempo de utilização, começa a causar dormência na mão devido às vibrações e, quando isto acontece, o operador prefere trocar de técnica.

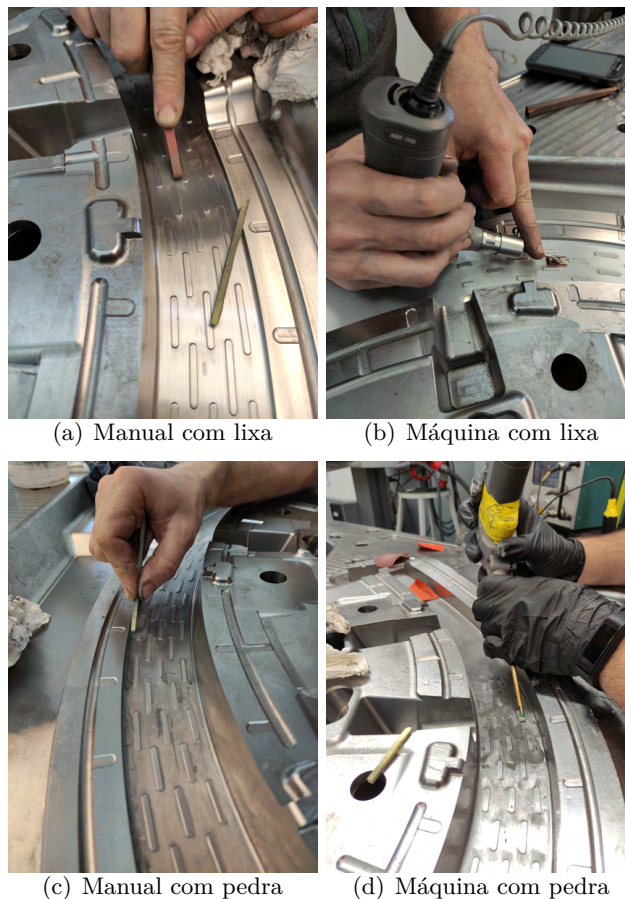
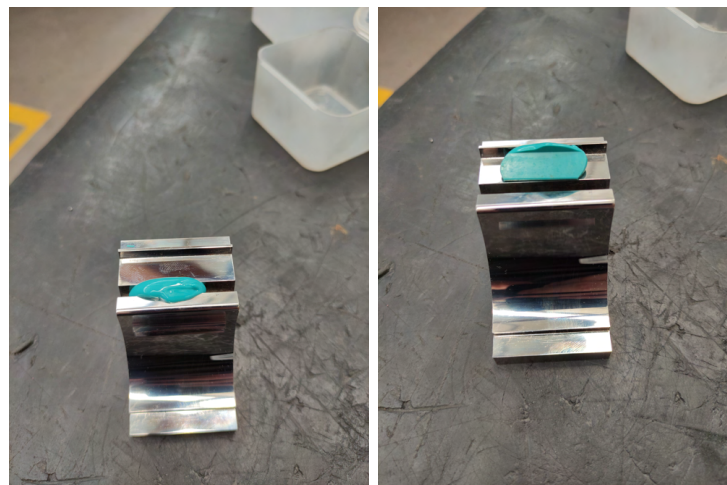


Figura 2.8: Estratégias de polimento adotadas na SA, com pedra e lixa

Após a passagem da lixa de 240, o processo é então repetido, recorrendo desta vez a pedra e lixa com grão 320. Até este passo, independentemente do molde que se está a polir, o processo é sempre igual. A partir daqui, dependendo da qualidade superficial que se pretende que o molde possua, é que o processo sofre alterações. No caso de se pretender um molde, com os requisitos mínimos para a obtenção de uma boa peça, após a passagem da lixa 320, utiliza-se um esfregão de polimento para acabamento, de modo a uniformizar as marcas da lixa, obtendo assim uma superfície suave. O operador faz uma última avaliação, bastante atenta, de modo a perceber se a qualidade superficial da peça se encontra dentro dos parâmetros exigidos. Caso o operador considere que ainda não se encontra dentro dos níveis pretendidos, volta a polir com a lixa 320, ou pedra 320 seguida pela lixa 320 (dependendo do quão longe do pretendido se encontra o nível de qualidade), finalizando de novo com o esfregão de polimento para acabamento. Quando uma superfície está a gerar dúvidas, e não se consegue perceber se um determinado nível de acabamento é suficiente, injeta-se uma pequena dose de silicone na zona que está a suscitar as dúvidas, aguarda-se alguns segundos para que seque, e o pedaço de silicone irá replicar a qualidade superficial da peça obtida a partir daquele molde, como é possível observar na Figura 2.9.



(a) Injeção do silicone na superfície a ser testada

(b) Resultado

Figura 2.9: Exemplo de teste de qualidade superficial com silicone

Quando a área que se pretende avaliar é demasiado grande para utilizar silicone, recorre-se a uma resina própria, que tem o mesmo efeito. Caso a avaliação do operador seja positiva, o molde é avaliado por um técnico especializado, que faz uma medição 3D do mesmo, de modo a certificar-se que não houve perda de tolerâncias durante o processo de polimento. Se tudo tiver corrido bem, o molde segue para bancada, onde será fechado e efetuados alguns testes antes de ser enviado para o cliente. Caso o molde

seja para fabricar uma peça que posteriormente terá de ser pintada, após a passagem da lixa de 320, recorre-se a uma pedra de grão 400, seguida de uma lixa de 400, sendo depois disso o processo igual ao já explicado para o exemplo anterior (esfregão de polimento para acabamento e avaliação da peça para seguir para a bancada). Quando se pretende um molde com uma superfície espelhada, correspondente ao melhor acabamento possível, os passos até à passagem da lixa de grão 400 enumerados anteriormente são iguais. A partir daqui, o operador avalia a qualidade superficial e vai aumentando gradualmente a densidade do grão, seguindo sempre a ordem pedra-lixas, como anteriormente explicado, até atingir um grão mínimo de 600, e o máximo de 800, dependendo do quão espelhada tem de estar a superfície. Assim que tiver passado a última lixa selecionada, utiliza-se uma pasta diamantada, que é friccionada contra a superfície a ser polida com o auxílio de uma escova própria para o efeito. Inicia-se com pasta de 6 $\mu$ m, seguida por uma pasta de 3 $\mu$ m, e finalizando com pasta de 1 $\mu$ m. Segue-se então a medição 3D do molde, e o posterior envio para a bancada. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de uma peça obtida a partir deste método.



Figura 2.10: Peça com superfície espelhada



### 2.1.3.2.2 Polimento químico

O polimento químico é um tipo de acabamento superficial subtrativo, que através da reação controlada entre uma substância química (ou combinação de substâncias químicas) e a superfície de uma peça, permite melhorar o estado superficial da mesma [46]. A primeira etapa deste processo consiste numa limpeza ultrassônica da superfície da peça que se pretende polir, utilizando por exemplo água destilada ou etanol, seguido de uma secagem a vácuo [47]. Esta etapa pode ser considerada assim a preparação da peça para o polimento químico propriamente dito, e tem como objetivo a remoção de poeiras e todo o tipo de partículas que possam interferir na reação química que terá lugar imediatamente a seguir [47]. Com a superfície da peça limpa, a próxima etapa do processo é o mergulho da peça num banho composto por um ou mais reagentes químicos, durante um período controlado de tempo [6,47], ou friccionando levemente a substância química contra a superfície da peça, com o auxílio de uma escova/pano (ou semelhante), de material não abrasivo, e resistente à substância química que está a ser utilizada para o polimento [6]. Assim que o tempo de contacto entre o reagente químico e a superfície da peça chegar ao fim, esta deve ser imediatamente lavada utilizando etanol, de modo a remover qualquer vestígio da substância química utilizada no polimento [47]. Posteriormente, a peça passa por um processo de secagem, e está pronta para ser avaliada, onde o operador analisa se as características da superfície da peça coincidem com o que se pretende, ou se ainda não atingiu o nível de qualidade necessário, e necessita de ser polida de novo.

A tabela 2.3 apresenta alguns dos metais mais comuns em que se utiliza este processo para obter um melhor acabamento superficial, bem como a combinação de reagentes que deve ser utilizada, tempo de polimento, temperatura e algumas notas importantes. Os valores apresentados são valores padrão, que podem ter ligeiras variações, consoante a rugosidade da superfície a ser tratada.

Em termos de qualidade superficial final, o polimento químico apresenta resultados, significativamente inferiores quando comparado ao polimento mecânico. Apesar desta desvantagem, o polimento químico é um processo bastante mais rápido que o polimento mecânico, sendo por isso o método preferido, quando as exigências relativamente à qualidade superficial não são tão rigorosas [6]. Além disso, existem também outras vantagens, como em casos de peças que apresentem cavidades de difícil acesso para as ferramentas tipicamente utilizadas no polimento mecânico, a utilização do polimento químico permite aceder a estas zonas, assim como em peças muito finas ou compostas por metais moles, em que ao realizar o polimento mecânico facilmente se deforma a superfície da peça, com o polimento químico a sua estrutura mantém-se intacta, visto que não existem forças associadas a esta técnica que possam deformar a sua superfície [6]. A aplicação deste processo implica também que a peça polida possua um estado de superfície uniforme

prévio, pelo que muitas vezes é utilizado como complemento do polimento mecânico, e não como substituto.

Um exemplo em que ambos os processos são utilizado é quando a peça é composta por um metal refratário, que exige uma superfície com elevada qualidade, recorre-se ao polimento mecânico de modo a obter os valores de rugosidade pretendidos, e posteriormente realiza-se o polimento químico, com o intuito de melhorar as suas características refratárias, melhorando assim a performance da peça.

Tabela 2.3: Alguns metais, reagentes e respetivas características para polimento químico [6]

Metal	Reagente	Tempo	Temp	Notas
Alumínio e ligas	Ácido Sulfúrico (1.84) 25ml Ácido Fosfórico 70ml Ácido Nítrico 5ml	30s-2min	85°C	-
Berílio	Ácido Sulfúrico (1.84) 1ml Ácido Fosfórico 14ml Ácido Crómico 20g Água 100ml	Vários min	50°C	Remove material a aprox $1\mu\text{m min}^{-1}$
Cobre	Ácido Nítrico 33ml Ácido Fosfórico 33ml Ácido Acético 33ml	1-2min	65°C	Melhor acabamento se a superfície não estiver oxidada
Ferro	Ácido Nítrico 3ml Ácido Fluorídrico (40%) 7ml Água 30ml	2-3min	65°C	-
Aço	Água Destilada 80ml Ácido Oxálico 28ml Peróxido Hidrogénio 4ml	15min	35°C	Solução deve ser preparada imediatamente antes do uso. Obrigatório lavar a peça cuidadosamente antes de polir
Magnésio	Ácido Nítrico (Fum) 75ml Água 25ml	3 em 3s	20°C	Ao fim de 1min, a reação torna-se violenta, mas se for possível continuar, ao fim de alguns minutos acalma e obtém-se um bom resultado. Lavar imediatamente após o tratamento
Titânio	Ácido Fluorídrico (40%) 10ml Peróxido Hidrogénio 60ml Água 30ml	30-60s	-	-
Zinco	Ácido Nítrico (Fum) 75ml Água 25ml	5-10s	20°C	Mergulhar durante poucos segundos e lavar em água corrente. Repetir até obter superfície desejada

### 2.1.3.3 Impacto do acabamento na higiene e segurança no trabalho

Como já discutido nos pontos anteriores deste capítulo, todos os métodos de acabamento têm os seus prós e contras, nenhum é perfeito, e a seleção do processo, ou conjunto de processos ideias, deve ser feita de forma informada, de acordo com o resultado final que se pretende para a superfície da peça.

No entanto, além dos problemas já referidos, é ainda importante esclarecer que estes processos acarretam riscos para os operadores. Nos processos de acabamento aditivos referidos, e no polimento químico, o uso dos respetivos equipamentos de proteção individual (EPI) é imperativo, bem como o respeito pelas regras definidas para cada processo, pois os trabalhadores estão em contacto com substâncias nocivas para a sua saúde. Assim, nestas operações, caso o trabalhador seja rigoroso no cumprimento de todas as diretrizes definidas, a probabilidade de ter complicações durante o exercício das suas funções ou no futuro, é bastante minimizada.

O polimento mecânico é um processo que também pode ter consequências negativas para a saúde dos operadores. À semelhança dos outros processos já abordados, existem EPI que o trabalhador deve usar quando se encontra na zona de polimento, que é uma área em que o ambiente é pouco saudável, devido ao excesso de poeiras (que podem causar complicações respiratórias), barulho e vibrações [43,48]. Assim, alguns dos EPI exigidos aos trabalhadores são por exemplo óculos de proteção, equipamento de proteção respiratória e fones de proteção [43]. No entanto, a utilização destes equipamentos por vezes não é respeitada, pois como o polimento mecânico é um trabalho que em algumas fases do processo exige um esforço físico considerável, a utilização destes equipamentos aumenta o cansaço do operador, e por vezes a solução que o próprio encontra, é retirar o equipamento. Esta componente física do trabalho, em que o esforço recai sempre sobre os mesmos músculos e articulações devido à repetibilidade do processo, aliada à elevada duração do processo de polimento e às vibrações que o caracterizam, origina problemas musculoesqueléticos como a síndrome de Raynaud [43]. Existem regulamentos que definem que os operadores devem realizar pausas recorrentes ao longo do dia de trabalho, como forma de prevenir estas complicações [43], no entanto, estes regulamentos nem sempre são respeitados, devido aos prazos que as empresas têm que cumprir, e essencialmente devido ao facto de a maioria das empresas não ter um número suficiente de trabalhadores qualificados para este posto, pois o processo de formação é demasiado moroso [43]. Por estes motivos, a automação deste processo seria a forma de melhor proteger os operadores [43–45]. Esta solução tem sido bastante estudada ao longo dos anos, no entanto ainda não se obtiveram resultados suficientemente bons para que possa ser amplamente aplicada na indústria, em particular no acabamento de peças únicas.

## 2.2 Instrumentação e controlo

O termo automação é utilizado para descrever uma operação automática, ou o controlo de um processo [49]. Este conceito já está bem enraizado na sociedade moderna, sendo este um dos principais responsáveis pelo estilo de vida atualmente experienciado [50]. As máquinas automáticas são, hoje em dia, utilizadas essencialmente para aumentar a produtividade [50], a qualidade dos produtos, e melhorar as condições de trabalho dos operadores, substituindo-os em trabalhos que possam ser prejudiciais à sua saúde. De um modo resumido, pode-se afirmar que o funcionamento destas máquinas consiste na realização de operações, numa determinada sequência, controlando os valores das saídas de acordo com o pretendido [49]. Em muitos casos, o valor presente à saída do controlador vai depender de um valor lido à entrada do mesmo. Para tal são utilizados instrumentos, que têm a capacidade de ler a grandeza que se pretende medir, e posteriormente enviar um sinal elétrico correspondente ao valor medido, para a entrada do controlador. A Figura 2.11, apresenta o exemplo de um sistema com a capacidade de manter a velocidade de um motor constante.

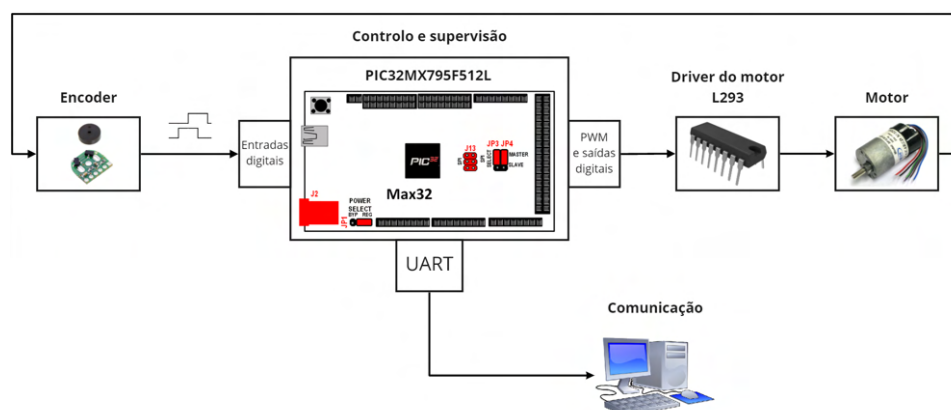


Figura 2.11: Controlo do funcionamento de um motor DC

Neste sistema, o utilizador insere os valores de direção e velocidade de rotação pretendidos através do computador, e o controlador envia os sinais necessários para que a vontade do utilizador seja cumprida. Simultaneamente, o encoder lê a velocidade de rotação do motor e a sua direção, e em caso de estes não corresponderem ao pretendido, corrige-os enviando os respetivos sinais para o controlador. Este exemplo será de novo abordado no subcapítulo 2.2.2, com uma explicação mais aprofundada do seu funcionamento.

Deste modo, pode-se afirmar que a instrumentação e o controlo têm uma relação bastante próxima, sendo ambos os conceitos imprescindíveis para a automação.

### 2.2.1 Instrumentação

Um sistema de instrumentação para realizar medições é tipicamente constituído por três elementos funcionais, cada um com a sua respetiva função [49], nomeadamente:

- **Sensor** - É o elemento do sistema que tem a capacidade de medir a grandeza pretendida, produzindo uma sinal à saída, geralmente elétrico (em tensão, corrente ou resistência), que de alguma forma pode ser relacionado com a grandeza medida [49]. Um exemplo de um sensor é o PT100, um RTD (*Resistor temperature detector*, conhecido em Portugal como sensor de resistência) muito utilizado na indústria, que varia a sua resistência elétrica com a variação da temperatura.
- **Condicionamento de sinal** - Este elemento do sistema recebe o sinal de saída do sensor, e converte-o para um sinal que um mostrador de dados consiga reconhecer [49]. Um exemplo simples de um circuito de condicionamento de sinal, utilizando ainda o exemplo do PT100, consiste na utilização de uma fonte de corrente de valor conhecido e constante  $i$ . Ao injetar esta corrente no RTD, é possível observar uma queda de tensão  $v$  nos terminais do sensor [51]. Como  $i$  é constante,  $v$  vai oscilar com a variação da resistência interna da PT100  $R_{RTD}$  (que por sua vez é dependente da temperatura do ambiente em que o sensor está inserido), segundo a fórmula  $v = R_{RTD} \times i$ . Geralmente a diferença de potencial medida é relativamente baixa, o que faz com que seja necessário recorrer a um amplificador operacional para amplificar o sinal obtido, de modo a obter um sinal dentro do intervalo de valores que o mostrador de dados consiga ler.
- **Mostrador de dados** - Apresenta o valor medido num formato que permite a um observador percebê-lo, tipicamente num *display* digital, ou numa escala analógica com ponteiro [49]. É programável, tendo a capacidade de receber o sinal proveniente do circuito de condicionamento de sinal, e convertê-lo na grandeza que se pretende medir, no caso do exemplo usado anteriormente, em temperatura.

A figura 2.12, demonstra como estes três elementos funcionais se agrupam, de modo a originar um sistema de instrumentação [49].



Figura 2.12: Elementos de um sistema de instrumentação

Existem vários tipos de sistemas de instrumentação com a capacidade de medir as mais diversas grandezas físicas. Estes dispositivos são atualmente bastante utilizados tanto na indústria, como no dia-a-dia de grande parte das pessoas. Alguns exemplos são o voltímetro, termómetro, tacómetro, amperímetro, entre muitos outros. Estes aparelhos têm a vantagem de medir a grandeza que se pretende medir, de forma rápida, simples e consideravelmente precisa, apresentando o resultado num mostrador que pode ser imediatamente consultado pelo utilizador. No entanto, essencialmente na indústria, de acordo com os resultados obtidos a partir de determinadas medições, muitas das vezes pretende-se que exista uma resposta imediata e automática. Assim, a utilização exclusiva de sistemas de instrumentação torna-se pouco prática e nalguns casos até impossível, visto que exigiria que um operador realizasse as medições necessárias manualmente, e tomasse as respetivas decisões com base nessa leitura. Por exemplo, numa linha de produção que exigisse que um forno estivesse obrigatoriamente entre os 380°C e os 390°C, seria impensável colocar um operador o dia todo com um termómetro a medir a temperatura do forno, e a ligar ou desligar as resistências de aquecimento sempre que a temperatura se aproximava de um dos extremos. Numa situação deste género, seria muito mais útil enviar o sinal de saída do circuito de condicionamento de sinal para um controlador, ao invés de o fazer para um mostrador de dados. A figura 2.13, mostra um exemplo onde este conceito pode ser aplicado, num sistema em que o objetivo é controlar a temperatura de uma resistência.

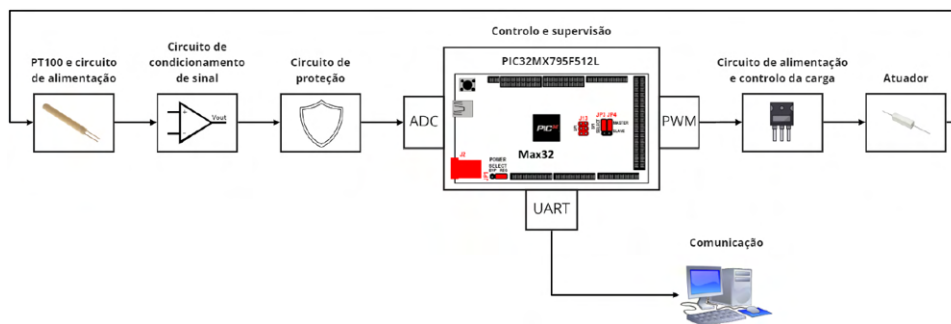


Figura 2.13: Elementos para o controlo da temperatura de uma resistência

Observando a figura 2.13 é possível constatar que os primeiros elementos deste sistema coincidem com os dois primeiros elementos de um sistema de instrumentação, o sensor e o condicionamento de sinal. No entanto, neste caso, o sinal proveniente do condicionamento de sinal é enviado para a entrada de um controlador (passando antes por um circuito de proteção, que neste caso serve apenas para ter a certeza que a tensão proveniente do circuito de condicionamento de sinal não excede a tensão máxima suportada pela entrada analógica do controlador). O controlador informa assim o utili-

zador da temperatura do ambiente em que está inserido o sensor (que neste caso prático está colocado o mais próximo possível da resistência que está a ser controlada), ao mesmo tempo que recebe a informação relativamente à temperatura a que a resistência se deve encontrar. Esta comunicação, é feita com o auxílio de um computador, e permite ao controlador comparar a temperatura real (temperatura lida pelo sensor em cada instante), com a temperatura desejada, modificando o sinal de saída de modo a manter a temperatura da resistência o mais próximo do valor pretendido possível.

Deste modo, dependendo do propósito das medições realizadas, os elementos de instrumentação podem ser agrupados num sistema de instrumentação, ou incorporados num sistema de controlo.

### 2.2.2 Modelos de controlo

Um sistema de controlo consiste num conjunto de componentes interligados entre si numa determinada configuração, com a capacidade de originar uma resposta por parte do sistema [50]. De uma forma mais simples, um sistema de controlo pode ser visto como um sistema que, através de um valor de uma determinada entrada (ou entradas), origina uma resposta de saída [49]. Um sistema de controlo é tipicamente constituído por 3 elementos básicos, sensor, controlador e atuador. O sensor, geralmente embutido num sistema de instrumentação, lê o valor da variável que se pretende controlar e envia o resultado para o controlador, que compara o valor da variável obtido a partir da medição realizada pelo sensor, com o valor que se pretende que a variável assuma [49]. Com base na diferença detetada entre o valor real e o valor pretendido, envia um sinal para o atuador de modo a que este corrija o erro.

De um modo geral, pode-se afirmar que existem 2 tipos de sistemas de controlo, sendo eles o sistema de controlo em malha aberta e o sistema de controlo em malha fechada. A grande diferença entre estes 2 tipos de sistemas reside no facto de o primeiro não possuir *feedback*, ao passo que o segundo possui. Isto quer dizer que, num sistema em malha aberta, não existe uma leitura relativamente ao estado atual da variável que se pretende controlar, portanto, este tipo de sistemas não têm a capacidade de detetar perturbações que possam existir. Um exemplo bastante intuitivo do comportamento destes 2 tipos de sistema pode ser o controlo de temperatura de uma sala. Regulando a temperatura da sala para 20°C, se o sistema de controlo for em malha aberta, este é capaz de manter a temperatura no valor pretendido, desde que não existam perturbações, como por exemplo, a abertura de uma janela para o exterior, em que a temperatura ambiente é diferente de 20°C. Como o sistema não tem a capacidade de detetar variações, independentemente do facto de a janela estar aberta ou fechada, a quantidade de energia fornecida ao atuador é exatamente a mesma, o que iria originar que, quando uma janela fosse aberta (caso a temperatura exterior

fosse inferior a 20°C), a temperatura da sala iria descer. Caso este sistema fosse em malha fechada, teria a capacidade de detetar uma diminuição da temperatura assim que a janela fosse aberta, e aumentaria a potência fornecida ao atuador, de modo estabilizar a temperatura da sala nos 20°C. Caso a janela fosse fechada, o sistema iria detetar uma subida de temperatura, e diminuiria a potência fornecida ao mesmo, de modo a que a temperatura voltasse ao valor pretendido.

Apesar de apresentar muitas desvantagens relativamente ao controlo em malha fechada, o controlo em malha aberta tem uma grande vantagem, que é o facto de necessitar de uma quantidade significativamente menor de hardware, que se traduz na obtenção de sistemas consideravelmente mais baratos. Atentando de novo na figura 2.11, é possível observar que o sistema apresentado é controlado em malha fechada. O controlador recebe a informação relativamente à velocidade e direção de rotação que o motor DC deve assumir, ativando posteriormente as saídas necessárias para executar esta ordem. Um encoder lê estes dois parâmetros, e envia a informação para o controlador, que compara o valor pretendido de rotação, com o valor real. Neste exemplo imagine-se que o motor tem uma determinada carga acoplada ao seu veio. Ao aumentar o valor desta carga, a velocidade de rotação irá diminuir momentaneamente, alteração que será prontamente detetada pelo encoder. O controlador recebe então a informação que a velocidade diminuiu, e que a potência fornecida ao motor DC tem de aumentar, para que a rotação volte a atingir o valor pretendido. Retirando a malha de realimentação do sistema da figura 2.11 e o encoder, obtém-se um sistema com controlo em malha aberta. Este sistema ficaria mais barato, pois o encoder não seria necessário, e se a carga do motor não variar, não deixa de ser um sistema válido. A escolha do tipo de controlo é assim dependente do que se pretende do sistema em que será implementado, no entanto, de um modo geral, na indústria a escolha recai maioritariamente sobre sistemas de controlo em malha fechada.

Deste modo, sabendo que num sistema de controlo em malha fechada o controlador tem a capacidade de comparar o valor real da variável controlada com o valor pretendido, importa agora perceber como é que o resultado desta comparação afeta o sinal de saída. A forma como o controlador reage ao resultado da comparação depende do método de controlo aplicado [49]. O método de controlo mais simples, é o método *on-off device*, que consiste em ativar um determinado atuador quando um erro é detetado, e desativá-lo quando o erro deixa de existir [49]. No entanto, este método apresenta bastantes limitações, tendo uma aplicabilidade prática muito baixa. Existem vários métodos de controlo, projetados para reagir de diferentes formas consoante a intensidade do erro detetado, sendo o que apresenta melhores resultados na maioria das situações o controlo PID (proporcional integral derivativo) [49], que é uma junção de 3 métodos básicos de controlo, nomeadamente o controlo proporcional, controlo integral e controlo derivativo.



- **Controlo Proporcional** - O sinal de saída é proporcional à dimensão do erro. Deste modo, quanto maior for o erro detetado, maior será a influência do elemento corretivo do sistema (figura 2.14) [49]. Obtém-

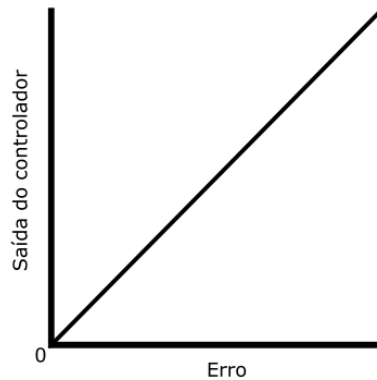


Figura 2.14: Controlo Proporcional

se então a relação entre o erro e o valor da saída através da fórmula  $Output = K_p \times Erro$ , em que  $K_p$  é uma constante de ganho, que deve ser ajustada de acordo com a resposta que se pretende obter do sistema. Um exemplo onde o controlo proporcional pode ser útil, é no caso de se querer aquecer uma resistência por efeito de Joule. Inicialmente, considerando que a resistência se encontra à temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ), e o objetivo é que esta atinja os  $70^{\circ}\text{C}$ , o erro detetado é de  $50^{\circ}\text{C}$ . O controlador aplica então uma determinada corrente na resistência, para que esta comece a aquecer. À medida que esta vai aquecendo, o erro vai diminuindo, o que faz com que o controlador diminua proporcionalmente a corrente aplicada. Assim que atingir os  $70^{\circ}\text{C}$  o controlador deixa de aquecer a resistência, e mal esta desça para os  $69^{\circ}\text{C}$ , volta a aquecer, injetando uma corrente proporcional ao erro (que neste caso é baixo). Se para este mesmo exemplo fosse utilizado um método de controlo mais simples como o *on-off*, a corrente fornecida à resistência seria constante, independentemente do erro, sendo esta igual para quando a temperatura da resistência fosse  $20^{\circ}\text{C}$  ou  $69^{\circ}\text{C}$ . Ao chegar aos  $70^{\circ}\text{C}$  o fornecimento de corrente seria cortado, mas mesmo assim este método iria gerar um *overshoot* bastante elevado, ou seja, mesmo depois de deixar de fornecer corrente à resistência, esta iria continuar a aquecer para além do *setpoint* definido. Ao utilizar um controlo proporcional, com o ganho ajustado às necessidades do sistema, o *overshoot* diminui consideravelmente, não sendo no entanto totalmente evitado.

- **Controlo Derivativo** - Com o controlo derivativo, a variação do sinal de saída do controlador é proporcional à taxa de variação do

erro ao longo do tempo, e calcula-se através da fórmula  $Output = K_D \times \frac{dErro}{dt}$  [49], em que  $K_D$  é o ganho derivativo. O controlo derivativo reage à variação do erro ao longo do tempo, portanto, quando o erro é constante, não existe variação e o controlo derivativo não tem qualquer efeito sobre o sinal de saída. Por este motivo, o controlo derivativo nunca é aplicado isoladamente, sendo sempre combinado com o controlo proporcional (controlo PD) ou com o proporcional e integral (controlo PID). Atentando na figura 2.15, é possível observar a resposta de saída dada pelo controlo derivativo e pelo controlo PD ao longo do tempo. Com o controlo derivativo, assim que o erro começa

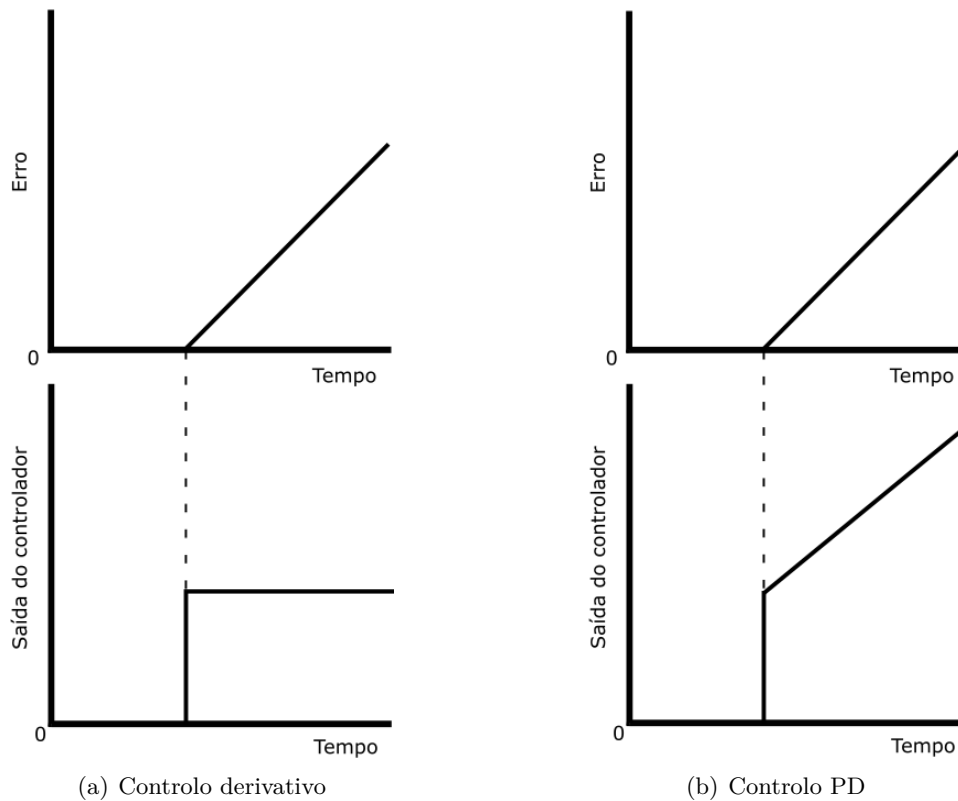


Figura 2.15: Comparação da resposta do controlo derivativo com o controlo PD, a um erro com variação constante ao longo do tempo

a aparecer, a resposta é imediata, e a alteração no valor de saída pode aumentar rapidamente, visto que está a reagir à alteração do erro, e não à sua magnitude [49]. Aliado ao controlo proporcional, que varia o valor da saída gradualmente de acordo com o valor absoluto do erro, obtém-se um método de controlo capaz de lidar com alterações repentinas do erro, melhor que o controlo proporcional por si só [49].

- **Controlo Integral** - É o método de controlo em que a o sinal de saída do controlador é proporcional ao integral do erro em ordem ao tempo, sendo representado através da fórmula  $Output = K_I \times \int_0^t e(t)dt$  [52]. O controlo integral, tipicamente, não é aplicado sozinho, sendo geralmente combinado com o controlo proporcional para a obtenção do controlo PI [49]. A figura 2.16 [49] demonstra forma como o controlo integral e o controlo PI respondem a um erro de valor constante ao longo do tempo. À medida que o tempo aumenta, o valor da integral

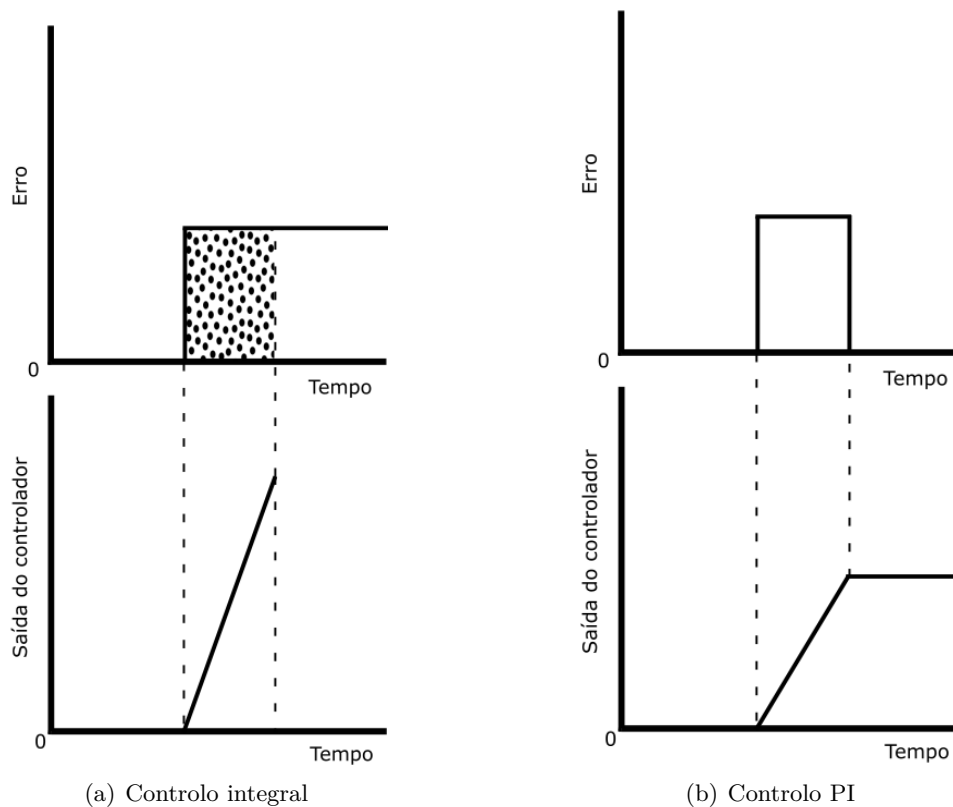


Figura 2.16: Resposta do método de controlo integral e do método PI a um dado erro

do erro aumenta também, o que vai gerar um aumento gradual do sinal de saída. A grande vantagem da utilização do método de controlo PI, relativamente ao controlo proporcional reside no facto de este ter maior sensibilidade ao erro, visto que a integral do erro é calculada desde  $t = 0$ , ou seja, mesmo quando o erro for nulo, o controlador irá enviar um sinal de saída com base no valor da integral calculada, que depende dos erros anteriores [49].

Combinando estes 3 modelos de controlo, obtém-se o controlo PID, des-

crito pela equação  $Output = K_p \times Erro + K_D \times \frac{dErro}{dt} + K_I \times \int_0^t Erro(t) dt$  [49]. De modo a que este método de controlo possa ser aplicado num determinado sistema, é necessário ajustar os parâmetros  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  de modo a que se possa obter a melhor resposta possível por parte desse mesmo sistema. É possível realizar o ajuste destes três parâmetros recorrendo à função de transferência do sistema, no entanto, quando esta é desconhecida, existem outras formas de determinar os parâmetros do controlador, nomeadamente o método de Ziegler–Nichols, método de Cohen–Coon ou realizando um ajuste iterativo dos parâmetros utilizando um osciloscópio [53].

Outro método de controlo que também é bastante aplicado na indústria, é o controlo por lógica difusa [54]. A lógica difusa difere da lógica clássica (também conhecida por lógica binária), no facto de não possuir proposições unicamente verdadeiras (1) ou falsas (0), considerando a existência de valores intermédios entre o absolutamente falso (0) e o absolutamente verdadeiro (1) [55]. Com base neste tipo de lógica, criou-se assim o controlo por lógica difusa. Este método de controlo, à semelhança do controlo PID, assume uma grande importância na indústria moderna, e apesar de ainda não ser tão utilizado como este último [56], apresenta algumas vantagens, como o facto de o ajuste das constantes  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  necessárias realizar no PID, ser altamente dependente dos parâmetros do sistema, ou seja, alterações no sistema exigem um reajuste dos valores destas três constantes, enquanto que o controlo por lógica difusa é baseado no facto de que um operador com experiência, consegue controlar um processo sem conhecer as suas dinâmicas [57]. Em sistemas em que o modelo matemático do processo é altamente não linear, os resultados obtidos com um controlador PID não são tão satisfatórios como quando se recorre a um controlador por lógica difusa [56]. No entanto, na maior parte dos controladores em malha fechada, o método preferido é ainda o controlador PID, devido ao facto de ser facilmente projetado e apresentar resultados bastante satisfatórios a um preço relativamente baixo [56].

## 2.3 Automatização de polimento mecânico

Devido ao importante papel que o polimento mecânico assume na indústria contemporânea, e a necessidade que existe em automatizar este processo, vários estudos foram realizados no sentido de se atingir uma solução válida. Existem vários equipamentos que têm a capacidade de trabalhar com ferramentas de polimento, como robôs e máquinas CNC, no entanto, devido à complexidade inerente a este processo, não existe ainda nenhuma solução 100% válida que permita controlar estes equipamentos, de modo a que consigam polir superfícies com a qualidade de um operador especializado. Apesar de os sistemas referidos utilizarem sistemas de controlo em malha fechada, estes são baseados na posição da ferramenta. Por este motivo são

pouco compatíveis com trabalho de acabamento devido à imprecisão das peças, ou erros de posicionamento. O controle com base na força aplicada pela ferramenta de polimento na superfície da peça foi o método estudado para o controle do polimento, que até ao momento permitiu obter melhores resultados. Baseia-se num sistema em malha fechada, em que o controlador recebe dados provenientes de um sensor capaz de medir forças e momentos, e com base nesta informação, controlar a velocidade e posição da ferramenta de polimento. Estes sensores são por norma sistemas de medição de força e binário de 6 eixos, 3 dos quais têm a capacidade de medir forças de translação, e os outros 3 momentos angulares, através da utilização de células de carga [58].

As pesquisas realizadas sobre este assunto, podem ser, de uma forma geral, divididas em 2 grupos, nomeadamente o estudo de métodos que permitam a realização de polimento em massa, idealizando um sistema capaz de realizar o polimento de uma única geometria várias vezes seguidas, e o polimento de peças únicas, que consiste no estudo de técnicas de polimento automatizado para geometrias que serão produzidas em pequena escala, ou mesmo apenas uma vez.

### 2.3.1 Processos de polimento em massa

Atualmente, existem alguns sistemas de polimento em massa automatizados, que trabalham sobretudo com geometrias pouco complexas. As suas trajetórias são programadas recorrendo a uma programação ponto a ponto, que para linhas de polimento em massa acaba por ser vantajoso, pois é necessário programar apenas uma vez, para que o robô (ou a máquina automática que realiza o polimento), repita a trajetória várias vezes. Este processo implica geralmente o desenvolvimento de ferramentas específicas para o posicionamento da peça, quer numa abordagem de peça fixa e ferramenta no robô, quer com ferramenta fixa e peça no robô.

Stoica *et. al.* [59] investigaram a possibilidade de utilizar um algoritmo de aprendizagem por reforço, em sistemas que aprendem por demonstração, com o intuito de aumentar a flexibilidade às variações das condições de trabalho a que o sistema está exposto. A aprendizagem por reforço é baseada em "recompensar" o sistema após este realizar uma ação, que é vista pelo algoritmo como sendo melhor que qualquer outra concluída até ao momento, tendo como objetivo atingir o máximo de recompensas possíveis num determinado espaço de tempo [59]. Este sistema funciona assim através da experiência, usando essa experiência para perceber quais as próximas ações a realizar. O algoritmo desenvolvido neste projeto foi testado para selecionar moedas numa passadeira rolante, e apresentou resultados satisfatórios, levando até os autores a afirmar que pode ser utilizado para outras aplicações, como pintura e maquinação de superfícies, nomeadamente soldadura e polimento. Neste estudo o sistema não chegou a ser testado nestas aplicações,

no entanto, para pesquisa futura, os autores afirmam que serão realizados testes neste sentido, o que pode significar um avanço significativo na área do polimento automatizado.

Kalt *et. al.* [43], numa abordagem um pouco diferente, estudaram os movimentos realizados pelos operadores de polimento ao longo do processo, de modo a tentar replicar estes movimentos num robô. Para tal, desenvolveram uma ferramenta com a capacidade de medir forças em três eixos, binários em três eixos, trajetórias dos movimentos realizados, aceleração, velocidade, vibração e orientação, com um abrasivo na ponta, de modo a que o operador conseguisse realizar o seu trabalho normalmente, enquanto todas estas grandezas eram medidas. Foi possível assim identificar três diferentes técnicas com base nas medições. A adaptabilidade que um operador humano consegue ter, variando rapidamente as diferentes grandezas medidas com base nas necessidades detetadas em cada instante, foi o que mais se sobressaiu, e o que torna a replicação destes movimentos mais difícil, exigindo para tal um controlo em malha fechada bastante complexo. Outro ponto importante que os autores detetaram neste estudo, foi que os operadores trabalham com base na observação direta, ou seja, ajustam os seus movimentos com base na informação que recolhem visualmente em tempo real. Para tal, um sistema de visão poderia ser aplicado, no entanto, muito provavelmente, seria extremamente difícil obter uma velocidade de resposta semelhante à do olho humano. Por outro lado, um robô consegue manter todas estas grandezas constantes, o que pode levar a que o número de vezes que os seus valores são readaptados seja menor do que no polimento manual. Neste estudo, foi possível perceber as alterações realizadas nos movimentos quando o operador pretende variar a taxa de remoção de material, a importância que cada grandeza medida tem no processo, bem como o modo como as suas variações afetam o resultado final.

### 2.3.2 Polimento de peças únicas

Para o polimento de peças únicas, a geração de trajetórias através de uma programação ponto a ponto não é viável, existindo assim a necessidade de recorrer ao CAM. No entanto, esta estratégia tem também as suas restrições, como limitações de acessibilidade da ferramenta à superfície a tratar, possíveis dificuldades em garantir que não existem colisões, problemas com singularidades e respetivas complicações com trajetórias, que a resolução destes dois últimos problemas podem causar. Rososhansky *et. al.* [60], estudaram diferentes estratégias de planeamento de trajetórias da ferramenta associados ao CAM, de modo a perceber quais as mais indicadas para o polimento, com base na área de contacto ao longo do polimento. Concluiu-se que independentemente da estratégia utilizada, apenas com o CAM é muito difícil manter a área de contacto da ferramenta com a superfície da peça constante ao longo de todo o processo, quando a geometria da mesma

apresenta uma ligeira complexidade, havendo a necessidade de recorrer à adaptação da trajetória da ferramenta relativamente à peça, de modo a que a área de contacto seja o mais uniforme possível.

Márquez *et. al.* [61], desenvolveram uma célula robótica de polimento para aplicar na indústria dos moldes. Neste projeto, a ferramenta está acoplada na *flange* do robô, e a peça a ser polida fixa numa bancada de trabalho. O controlo do processo é feito com base na força aplicada pela ferramenta na superfície da peça, medida através de um sensor piezoelétrico de 3 eixos, e de informações recebidas através da medição manual periódica do estado da superfície (controlou-se apenas o parâmetro  $R_a$  neste estudo). O sistema tem a capacidade de gerar trajetórias através do CAD da peça, exigindo ao utilizador que defina as superfícies que devem ser polidas, selecione as ferramentas, abrasivos e respetivo grão, força de contacto e velocidades, para as diferentes fases do polimento. Os resultados deste estudo foram, segundo os autores, bastante satisfatórios, provando que um sistema com controlo baseado na força de contacto entre a ferramenta e a superfície da peça é um método válido para ajustar a trajetória da ferramenta à geometria da peça ao longo do processo. Este sistema foi no entanto testado apenas em superfícies com geometrias relativamente simples, e, de acordo com os autores, tem como principal defeito o facto de necessitar de informações relativamente ao estado da superfície, que neste caso é medido manualmente por um operador, o que acaba por aumentar o tempo de ciclo do processo e diminuir a sua autonomia.

Tian *et. al.* [62], estudaram a utilização de um robô para realizar o processo de polimento de forma automática em superfícies curvas. A ferramenta de polimento é aplicada de modo a que o seu eixo Z, coincida com o da *flange* do robô. Na ponta, existe um mandril, onde se coloca um disco de esponja, onde posteriormente se pode adicionar papel abrasivo. Esta estratégia permite que a troca do papel abrasivo se realize facilmente, quer seja pelo facto de este estar gasto, ou caso se considere que é necessário alterar a granulometria do mesmo. Um software de planeamento de trajetória é utilizado para definir o caminho que a ferramenta deve percorrer, recorrendo ao CAD/CAM da peça a ser polida. Um sensor de força é utilizado para medir a força exercida pela ferramenta na peça, enviando informações para um controlador, que posteriormente ajustará a posição da ferramenta de modo a que a força exercida seja constante ao longo de todo o processo. Os resultados deste estudo foram bastante satisfatórios, tendo-se obtido experimentalmente superfícies curvas com acabamentos espelhados, mais rapidamente do que o polimento manual.

### 2.3.2.1 Adaptação de trajetórias

A adaptação de trajetórias, apesar de ser mais importante para o polimento de peças únicas, é também bastante utilizada nos processos de

polimento em massa. É um dos pontos mais relevantes do polimento automatizado, pois permite variar a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça a ser polida, mimizando o comportamento observado em Kalt *et. al.* [43]. Esta adaptação realiza-se através da instrumentação de determinadas grandezas, como as forças aplicadas pela ferramenta na peça, as velocidades associadas ao processo (como velocidade de avanço e velocidade de rotação da ferramenta quando aplicável), acelerações entre outros. Ao instrumentar estas grandezas é possível observar as suas variações ao longo do tempo, e com base nestes valores, ajustar a trajetória da ferramenta. O exemplo mais intuitivo da adaptação de trajetórias, consiste em preservar a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça. Ao saber a força aplicada num determinado instante, é possível corrigir a trajetória da ferramenta para que o valor desta força seja ajustado, de acordo com o pretendido. O mesmo se aplica às restantes grandezas que podem ser instrumentadas, e, quanto maior o número de grandezas controladas, maior a precisão do sistema. Porém, existem limitações como a velocidade de leitura e resposta do controlador, limitações físicas existentes, e principalmente o elevado custo do hardware associado à instrumentação de determinadas grandezas, nomeadamente da força. Para além disso, a maioria das soluções de CAM e controladores de robôs não está preparada para a adaptação de trajetórias em tempo real, limitando a sua aplicabilidade na indústria, particularmente no polimento de peças únicas.



## Capítulo 3

# Metodologia

*Este capítulo apresenta um pequeno enquadramento à problemática detetada, explicando posteriormente todas as etapas realizadas para que se pudesse dar ao início aos ensaios experimentais*

### 3.1 Problemática do controlo de força

Como já discutido no estado da arte, a instrumentação de algumas grandezas associadas ao processo de polimento é uma etapa bastante importante para a obtenção de um sistema de polimento automatizado. A força aplicada no polimento é, sem dúvida, a grandeza que mais informações fornece relativamente ao estado atual do processo. Assim, a sua monitorização é de extrema importância, sendo por norma utilizados sensores de forças, como por exemplo o Kistler 9257A (figura 3.1), utilizado por Márquez *et. al.* [61], no desenvolvimento de um célula robótica de polimento automático, ou o Kistler 9139AA (figura 3.1), disponível na ESAN.



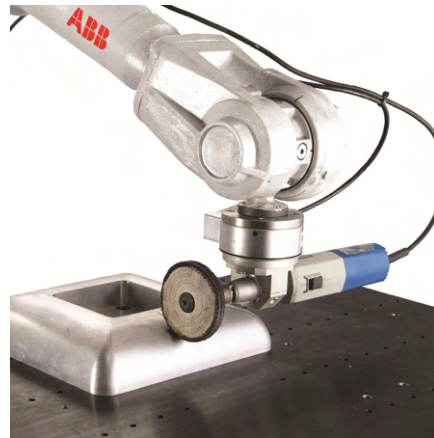
Figura 3.1: Sensores de forças

Estes sensores são bastante precisos, sendo por isso muito utilizados quando se necessita estudar qualquer processo que inclua o controlo de forças, como é o caso do polimento automatizado. Porém, apesar da impor-

tância que este tipo de sensor tem em laboratório, o seu preço de aquisição pode atingir os vários milhares de euros, limitando assim a sua implementação em média/grande escala. Além disso, as suas dimensões também variam consoante o tipo de peça que se pretende avaliar. Assim, quanto maior a peça, maior terá de ser o sensor, visto que a peça necessita de ser colocada em cima do sensor. Sensores de maiores dimensões, são geralmente menos precisos e igualmente caros, o que torna esta solução pouco interessante para o polimento de moldes de grandes dimensões. Outro sensor que pode ser utilizado neste processo é, por exemplo, o *ABB integrated force control*, como mostra a figura 3.2. Este tipo de sensor mede a força na ferramenta, e não na peça, motivo pelo qual apresenta uma sensibilidade independente do tamanho da peça. No entanto, à semelhança dos sensores apresentados anteriormente, o seu preço de aquisição é bastante elevado, para além de implicar um *upgrade* às configurações básicas do controlador.



(a) Sensor *ABB integrated force control*



(b) Sensor instalado numa ferramenta

Figura 3.2: *ABB integrated force control*

Uma alternativa mais económica a este sensor da *ABB*, é o *Hex 6 axis force torque sensor* da *OnRobot* (figura 3.3). Ao contrário do *ABB force control*, que utiliza células de carga para medir a força aplicada no sensor, este possui no seu interior um material elastomérico, e com base na sua deformação, consegue calcular a força aplicada. Mede também a força na ferramenta, não causando assim problemas com as dimensões das peças avaliadas, nem com variações de sensibilidades. A sensibilidade deste sensor é, no entanto, ligeiramente inferior ao da *ABB*, mas em contrapartida o seu preço é consideravelmente inferior, rondando os 2000€. Este preço não impede a aplicação deste sensor em média/grande escala, no entanto, o estudo de outros métodos com a mesma funcionalidade, mas com um preço de aquisição bastante inferior, seria uma mais-valia para este ramo da indústria. Posto isto, pretende-se idealizar uma forma eficaz e de baixo custo de

instrumentar a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça durante o polimento.



Figura 3.3: Sensor *OnRobot Hex 6 axis force torque sensor*

Neste projeto, a ferramenta utilizada para polir será o *spindle* Elte TMPE1 6.5/2, como mostra a figura 3.4. Este equipamento é alimentado a 230VAC, tem uma potência máxima de 0.41kW, com velocidade regulável através de um potenciômetro, podendo atingir um máximo de 18000 RPM. Na ponta deste *spindle* podem ser acoplados diferentes abrasivos, como escovas de polimento, lixas de lamelas ou pedras montadas, como mostra a figura 3.5.



Figura 3.4: *Spindle* Elte TMPE1 6.5/2



Figura 3.5: Abrasivos disponíveis para acoplar ao *spindle*

Como qualquer motor AC, este *spindle* consome um determinado valor de corrente quando trabalha "em vazio" (ou seja, sem carga), que cresce gradualmente à medida que a carga que tem de mover aumenta. Com base neste pressuposto, é possível especular que quando o abrasivo não está em contacto com a superfície que se pretende polir, o consumo de corrente será mínimo, e que, quanto menor a distância entre o centro da ferramenta e a superfície da peça, maior o consumo de corrente do *spindle*. A figura 3.6 ilustra esta relação entre as duas referidas grandezas.

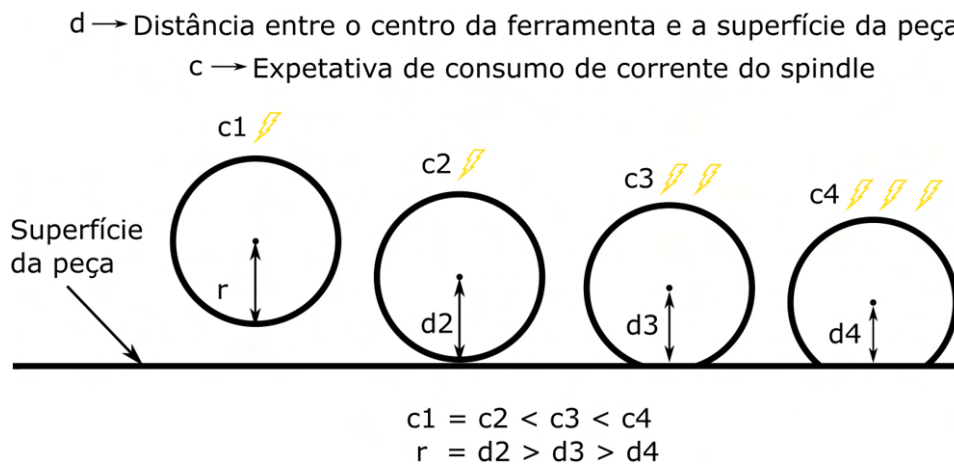


Figura 3.6: Relação entre o consumo de corrente do *spindle* e a força exercida pela ferramenta

É possível também refletir que, quanto menor a distância "d" apresentada na figura 3.6, maior a força exercida pela ferramenta na superfície da peça. Com base na suposição apresentada, pode-se afirmar então que o aumento do consumo de corrente do *spindle*, significará um aumento da força exercida pela ferramenta. Instrumentando assim o consumo de corrente do *spindle*, e medindo a força exercida pela ferramenta recorrendo a um sensor de forças, é possível calcular a relação entre o consumo de corrente e a força, e através do gráfico obtido a partir do cálculo dessa relação, controlar a força que a ferramenta exerce na superfície da peça, sem recorrer a um sensor de forças.

### 3.2 Seleção de hardware

De modo a cumprir com os objetivos propostos selecionou-se o hardware necessário. O *spindle* descrito em 3.1, será acoplado a um robô ABB IRB1600, disponível na ESAN, apresentado na figura 3.7.

Para calcular a relação entre o consumo de corrente e a força exercida pela ferramenta foi necessário selecionar um transdutor de corrente e um sensor de forças. O sensor de forças escolhido foi o Kistler 9139AA, e o

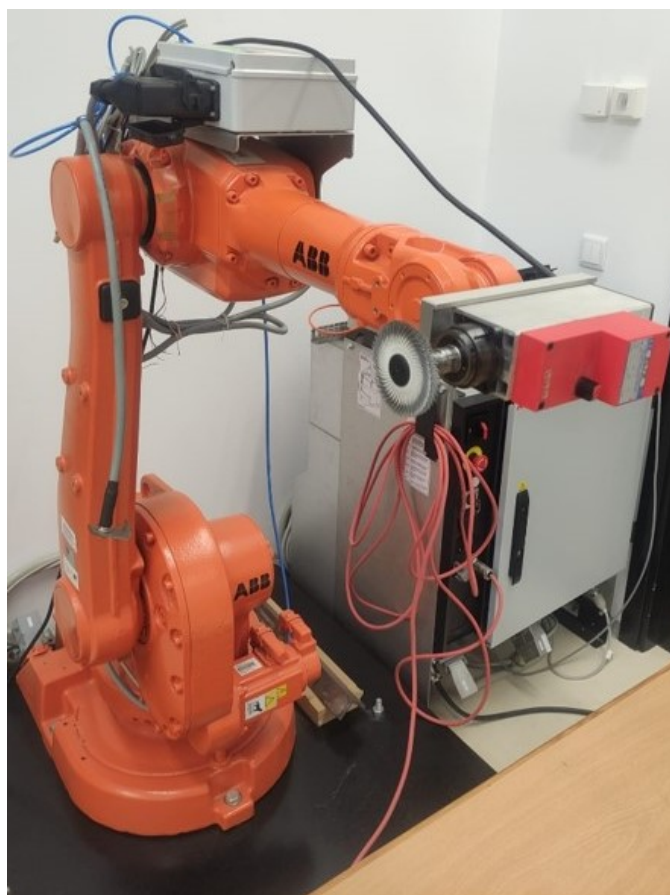


Figura 3.7: Robô ABB IRB1600, com o *spindle* Elte TMPE1 6.5/2 acoplado

transdutor de corrente o LEM HO 10-P SP33. Este componente foi selecionado devido a algumas vantagens que apresentava relativamente a outros que foram analisados, como a capacidade de ler correntes AC e DC, enviando sempre o sinal de saída em tensão DC, e a boa sensibilidade que apresenta. Considerando que neste projeto serão analisadas variações de correntes relativamente baixas, a sensibilidade do sensor de corrente foi um dos fatores mais importantes para a escolha do mesmo.

De modo a enriquecer a informação enviada para o controlador, relativamente ao estado do processo, decidiu-se controlar também a velocidade de rotação do *spindle* ao longo do polimento. A primeira escolha recaiu sobre o encoder incremental HEDL-5560B13. Como o *spindle* selecionado não permitia que fosse acoplado um encoder, fabricou-se uma peça para este efeito. No entanto, após uma melhor reflexão sobre o assunto, concluiu-se que o ideal seria projetar uma solução mais "universal". Assim, optou-se pela utilização de um sensor indutivo. Este sensor tem de detetar no mínimo 18000

variações de sinal por minuto. Para tal, selecionou-se o NJK-5002C, um sensor indutivo com uma frequência de 100kHz.

Outra informação que se considerou relevante obter, foi o estado da superfície da peça. A utilização de um rugosímetro foi a primeira opção a ser considerada, no entanto, num sistema automatizado, ter de recorrer a um processo manual deste género, e posteriormente enviar esta informação manualmente para o controlador, seria um processo lento. Assim foram estudados outros métodos para que fosse possível avaliar o estado da superfície sem se recorrer a um processo manual, e optou-se pelo desenvolvimento de um sistema de visão, que deve ser capaz de informar o controlador se a qualidade superficial da peça avaliada é suficiente ou não, e a partir desta informação decidir se é necessário realizar mais uma passagem ou não. Para tal utilizou-se uma câmara *Teledyne Dalsa BOA 1280×960 Mono SH Vision System*. Esta câmara já estava disponível na ESAN, e além de apresentar um boa resolução, vem ainda com um módulo de entradas e saídas e com o software *Sherlock* embutido, facilitando assim a elaboração de um programa capaz de avaliar o estado da superfície. A lente selecionada foi a *35mm 1:2 C 2/3" M25.5*, que foi escolhida essencialmente pelo seu valor de distância focal, que permite obter uma imagem bastante detalhada da superfície da peça avaliada

Para controlar o processo optou-se pela utilização de um PLC (*programmable logic controller*, controlador lógico programável em português) S7-1200 1214C DC/DC/DC da Siemens. Este PLC possui 6 HSC (*High Speed Counter*) que permitem contar pulsos de elevada frequência, característica imprescindível para a leitura do sinal proveniente do sensor indutivo. Possui ainda 2 entradas analógicas, que é também um atributo fundamental, para que seja possível calcular o valor da corrente, através do sinal analógico enviado pelo respetivo transdutor.

Por fim, foram selecionadas duas fontes de tensão, a HDR-30-24, capaz de converter 230VAC em 24VDC, e a DDR-15G-5, que permite converter 24VDC em 5VDC. A fonte de 24VDC terá a função de alimentar o PLC e o sensor indutivo, ao passo que a fonte de 5VDC irá servir para alimentar os circuitos eletrónicos que sejam necessários realizar. Além disso, como o sensor de corrente deve ser alimentado a 3.3VDC, recorreu-se ao conversor de tensão LD1117v33, que converte 5VDC em 3.3VDC.

### 3.3 Desenvolvimento do hardware

Após a seleção do hardware necessário à realização do projeto, foi necessário interligar todos os componentes, recorrendo a alguns circuitos, para que tudo funcione como desejado.

### 3.3.1 Transdutor de corrente

Em primeiro lugar preparou-se o circuito do transdutor de corrente, tal como indicado no respetivo manual. O circuito pode ser observado na figura 3.8.

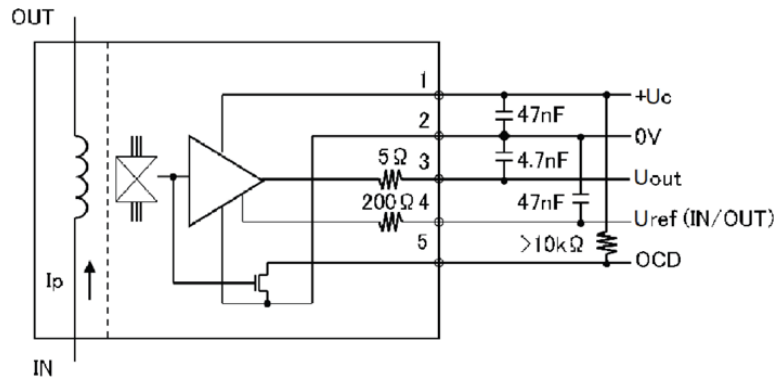


Figura 3.8: Circuito do transdutor de corrente, presente no respetivo manual

Para o bom funcionamento deste transdutor, recorreu-se ao conversor LD1117v33 para converter os 5VDC da fonte de tensão DDR-15G-5, nos 3.3VDC exigidos pela entrada do transdutor. O respetivo circuito está apresentado na figura 3.9. Foi também necessário aplicar uma tensão de referência no respetivo pino. O valor desta tensão, deve ser calculado com base na informação apresentada na figura 3.10. Para este caso, considerando o intervalo de valores que se espera medir, o valor da tensão de referência é praticamente irrelevante, desde que se encontre dentro dos intervalos estipulados. De qualquer das formas, optou-se por um valor intermédio, através de um divisor resistivo aplicado nos 3.3V, com uma resistência de 150Ω e outra de 120Ω, resultando assim numa tensão de referência  $\approx 1.4V$ .

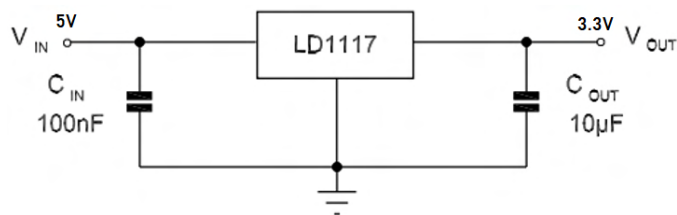


Figura 3.9: Circuito do conversor LD1117v33, retirado do respetivo manual

Observando ainda o manual do sensor de corrente, é possível constatar que a sensibilidade do sensor corresponde a 46mV/A, ou seja, a tensão de saída do sensor pode ser descrita pela equação 3.1, em que  $U_{out}$  corresponde ao sinal de saída do sensor,  $U_{ref}$  é a tensão de referência do sensor, e  $I$  a corrente consumida pelo *spindle*.

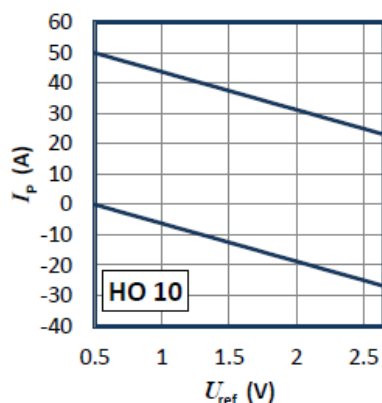


Figura 3.10: Gráfico para seleção do valor de referência, retirado do respectivo manual

$$U_{out} = U_{ref} + 46mV \times I \quad (3.1)$$

Posto isto, foi relevante perceber que consumo de corrente se pode esperar por parte do *spindle*, de modo a identificar o intervalo de valores esperado à saída do sensor de corrente. Assim, realizaram-se alguns testes preliminares, recorrendo a um amperímetro, de modo a perceber o consumo de corrente do *spindle* em vazio, e o seu consumo com a carga máxima expectável. Concluiu-se que o intervalo de valores previsto para o consumo de corrente do *spindle* se encontra entre 0.35A e 4A. Atentando a este intervalo de valores, considera-se que a variação é relativamente pequena, tendo em conta que a sensibilidade é de apenas 46mV/A, e que 4A é um valor máximo, que raramente será atingido, sendo que o intervalo de valores mais prováveis do processo, se deve encontrar entre 0.35A e 2A. Assim, considera-se necessário recorrer a um circuito de amplificação, de modo a que pequenas variações de corrente possam ser mais facilmente detetadas pela entrada analógica do PLC. O circuito de amplificação mais indicado para esta aplicação, é um amplificador de diferenças, pois para o cálculo de  $I$ , interessa saber a diferença entre  $U_{out}$  e  $U_{ref}$ . A figura 3.11 apresenta um circuito padrão de um amplificador diferencial.

A tensão de saída ( $V_o$ ) neste tipo de circuitos calcula-se através da fórmula apresentada na equação 3.2.

$$V_o = (V_2 - V_1) \times \text{ganho} \quad (3.2)$$

O ganho deste circuito é calculado através da fórmula apresentada na equação 3.3.

$$\text{ganho} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.3)$$



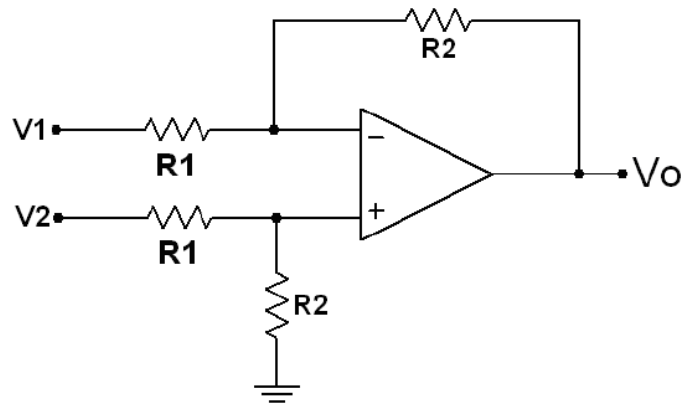


Figura 3.11: Amplificador diferencial padrão

O opamp selecionado para este circuito, foi o OPA337PA. Alimentou-se este componente com 5VDC, e sabendo que a tensão de saída da maioria dos opamps não atinge a respetiva tensão de alimentação, testou-se que valor máximo era possível obter à saída, sendo este 4.5V. Este passo é importante para que seja possível perceber o ganho ideal para este circuito. Sabendo que a corrente máxima que o *spindle* pode consumir corresponde a 4A, o ganho deve ser calculado através da equação 3.4.

$$ganho = \frac{V_{out_{max}}}{46mV \times I_{max}} \quad (3.4)$$

Sabendo então que  $V_{out_{max}} = 4.5V$  e  $I_{out_{max}} = 4A$ , é possível calcular o ganho, sendo

$$ganho = \frac{4500mV}{46mV \times 4} \Leftrightarrow ganho \approx 24.5$$

Colocando um ligeiro fator de segurança, pretende-se então obter um ganho com valor de aproximadamente 20. Recorrendo às resistências disponíveis na ESAN, e com o auxílio da equação 3.3, selecionou-se para R1 um valor de  $220\Omega$  e para R2  $4.7K\Omega$ , o que se traduz num ganho de  $\approx 21.4$ . O circuito de amplificação, ficou então como demonstra a figura 3.12.

Com este valor de ganho, a sensibilidade deste circuito passa a ser  $46mV/A \times 21.4 \approx 984.5mV/A$ . A relação entre o consumo de corrente do *spindle* ( $I$ ), e a tensão de saída do circuito de amplificação ( $V_{out}$ ) apresentado na figura 3.12, pode ser representada pela equação 3.5.

$$I = \frac{V_{out}}{0.9845} \quad (3.5)$$

Estes circuitos foram então articulados numa placa de ensaio, de modo a simular e testar o seu funcionamento. Como tudo funcionava como pretendido, decidiu-se então montar o circuito numa placa PCB, de modo a

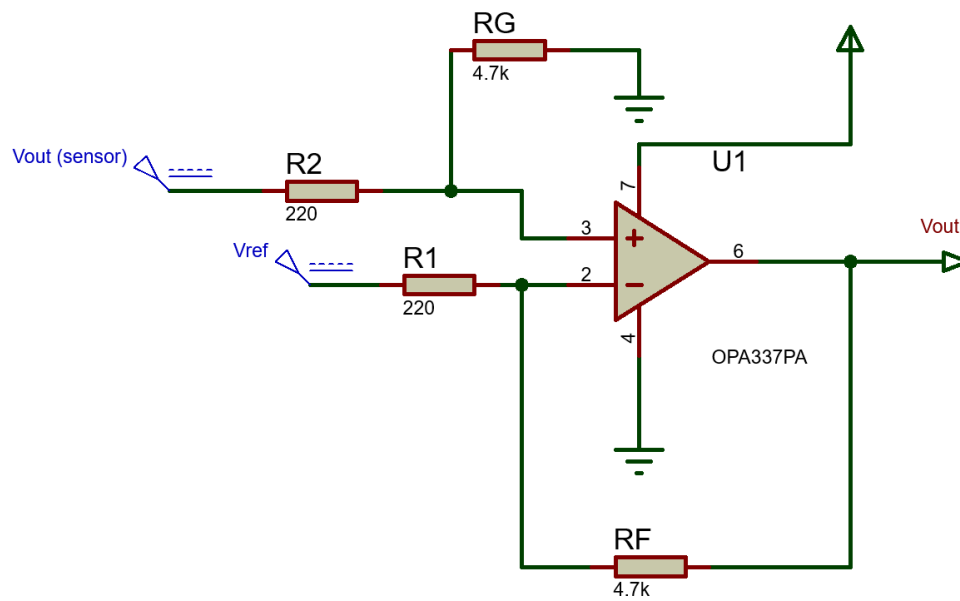


Figura 3.12: Amplificador diferencial

aumentar a robustez do circuito, e a diminuir o espaço ocupado pelo mesmo. Recorreu-se ao software *Eagle* para projetar a organização dos componentes, e posteriormente procedeu-se à montagem da placa. Nas figuras 3.14 e 3.15 é possível ver o projeto, e a placa obtida está apresentada na figura 3.13.

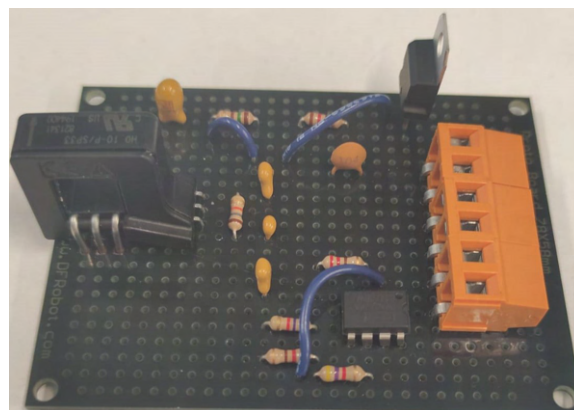


Figura 3.13: Placa PCB obtida

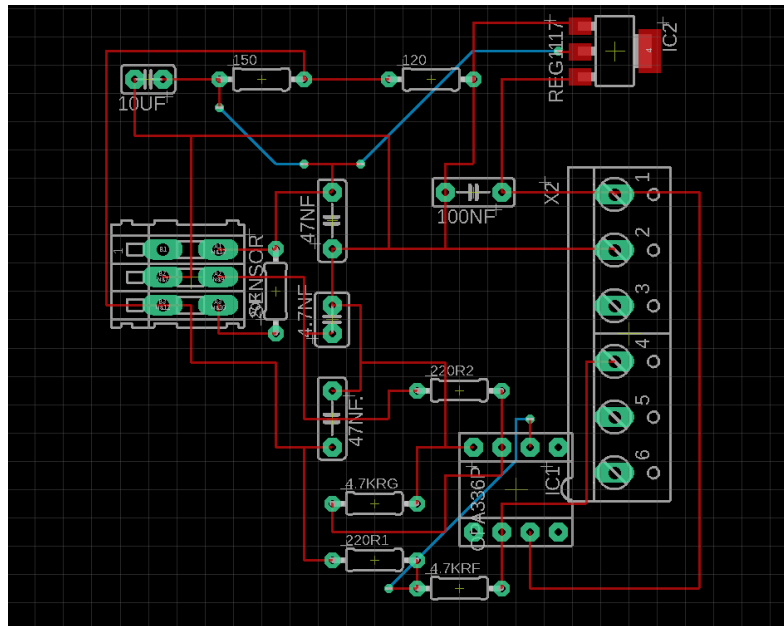


Figura 3.14: Projeto placa PCB vista de topo

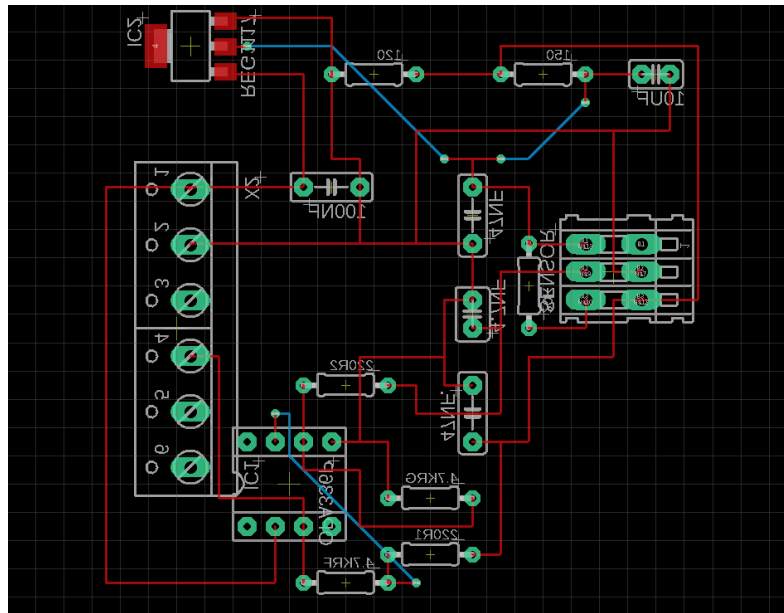


Figura 3.15: Projeto placa PCB vista de baixo

### 3.3.2 Sensor indutivo

O sensor indutivo foi bastante menos complexo que o sensor de corrente. Com o auxílio do manual, percebeu-se que era apenas necessário ligar o fio castanho aos 24VDC da fonte de alimentação, o fio azul ao *ground*, e o fio preto a uma entrada com HSC do PLC, que para este caso selecionou-se a entrada *I0.0*. O esquema de ligação sugerido no manual, está representado na figura 3.16. Foi necessário também ter em atenção que o sensor indutivo deve estar posicionado a uma distância inferior a 12mm relativamente ao íman que este deve detetar.

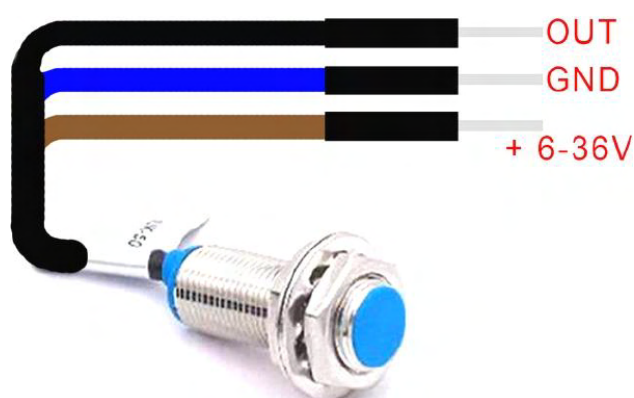


Figura 3.16: Esquema do sensor indutivo, retirado do respetivo manual

### 3.3.3 PLC S7-1200

O PLC selecionado, teve como objetivo a recolha de dados provenientes do transdutor de corrente e do sensor indutivo, e posteriormente fazer os cálculos necessários de modo a obter dados nas unidades desejadas, nomeadamente amperes (A) e rotações por minuto (RPM). As ligações elétricas que são necessárias fazer, consistem na alimentação do PLC com 24VDC nos respetivos pinos, a ligação do cabo de sinal de saída do sensor indutivo à entrada digital *I0.0*, e ligação do pino de saída do amplificador operacional presente no circuito desenvolvido para o transdutor de corrente, ao pino 0 da entrada analógica.

#### 3.3.3.1 Obtenção do valor da velocidade de rotação

Com base na informação fornecida pelo fabricante do *spindle* sabe-se que a velocidade máxima que este pode atingir são 18000 RPM. Este sensor enviará um sinal por cada volta que o veio do *spindle* realize, ou seja, poderá enviar até 300 sinais por segundo, o que se traduz num sinal a cada 3.33ms. Os contadores tradicionalmente utilizados no TIA Portal(CTU,

CTD e CTUD), funcionam apenas caso o período entre cada sinal, seja superior ao período de ciclo do respetivo *OB* (*Organization Block*) [63], que tem um valor predefinido de 150ms. Como o período do sinal enviado pelo sensor indutivo será bastante inferior ao período de ciclo do OB, é necessário recorrer a um HSC, que permite a contagem de sinais que tenham um período inferior ao período de ciclo do OB [63].

De modo a realizar a ativação e configuração de um HSC, recorreu-se ao auxílio do manual do PLC. No TIA Portal, já após se ter selecionado o PLC para este projeto, clicando em *Device Configuration*, e posteriormente abrindo a janela de propriedades do PLC, aparece o ponto correspondente aos HSC. Selecionou-se o HSC1, e seleciona-se a caixa que ativa o HSC, *Enable this High Speed Counter* (figura 3.17).

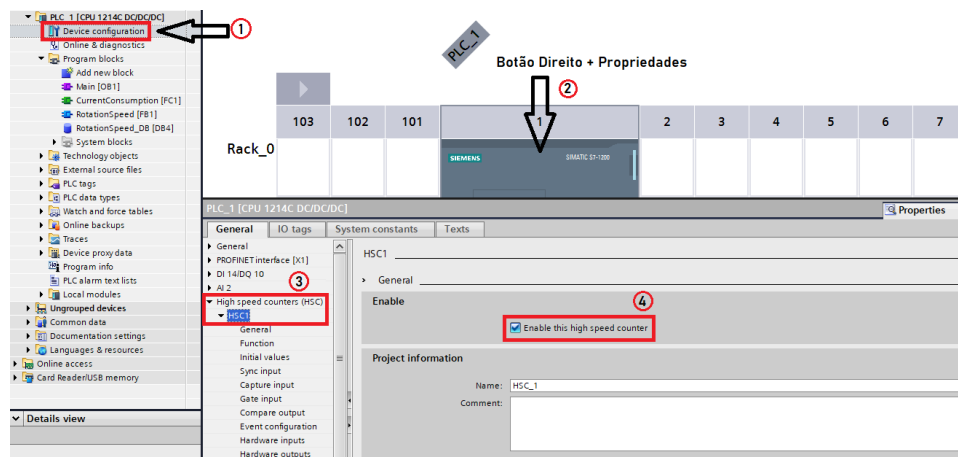


Figura 3.17: Ativação do HSC1

Com o HSC1 ativo, este foi configurado, sendo neste caso em particular apenas necessário recorrer às janelas *Function* e *Hardware Input*, preenchendo de acordo com o que está apresentado nas figuras 3.18 e 3.19.

O passo final desta configuração, consiste em alterar os filtros de entrada da entrada digital do PLC, que se pretende usar como HSC. Para tal, ainda nas propriedades do PLC, deve-se clicar em *DI 14/DQ 10*, selecionar *Digital Inputs*, e posteriormente selecionar o canal que foi definido no passo anterior, neste caso o *Channel 0*, que corresponde à entrada digital *I0.0*, como demonstrado na figura 3.20. Por fim, seleciona-se o valor do filtro de entrada em *Input filters*. A seleção deste valor não necessita de ser extremamente minuciosa, diferentes valores podem obter os resultados pretendidos, no entanto este valor deve ser obrigatoriamente menor que o período mínimo do sinal lido. Por outro lado, é necessário ter atenção para que este valor não seja extremamente inferior ao período mínimo do sinal, caso contrário a precisão da medição pode ficar comprometida, devido ao excesso de ruído. Para este caso selecionou-se 0.8ms, um valor ligeiramente inferior aos 3.33ms.

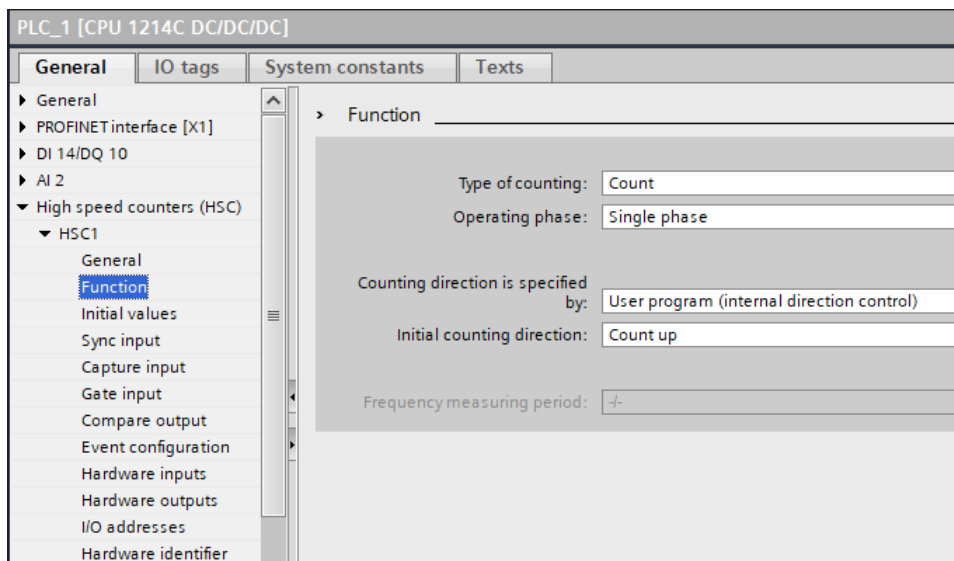


Figura 3.18: Configuração da função do HSC1

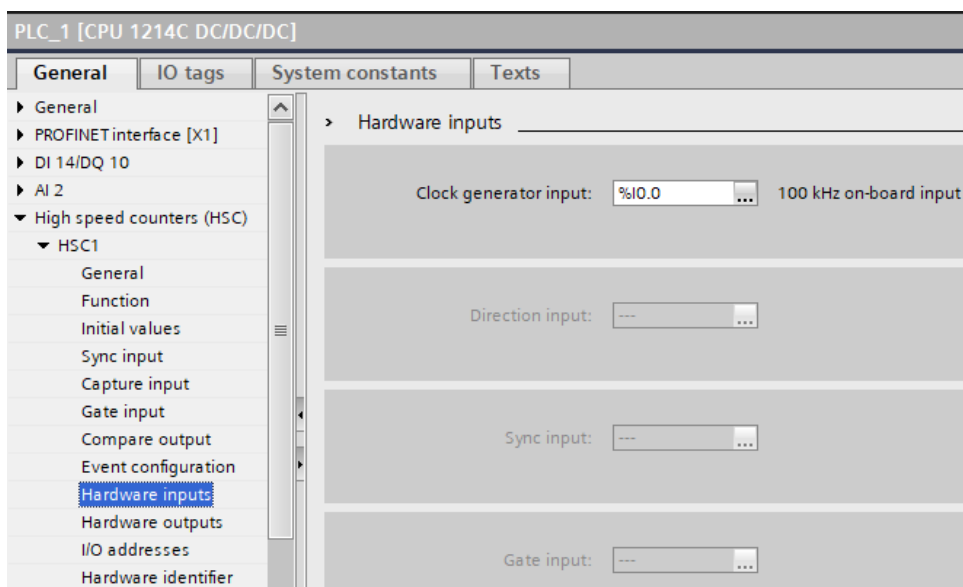


Figura 3.19: Configuração da entrada correspondente ao HSC1

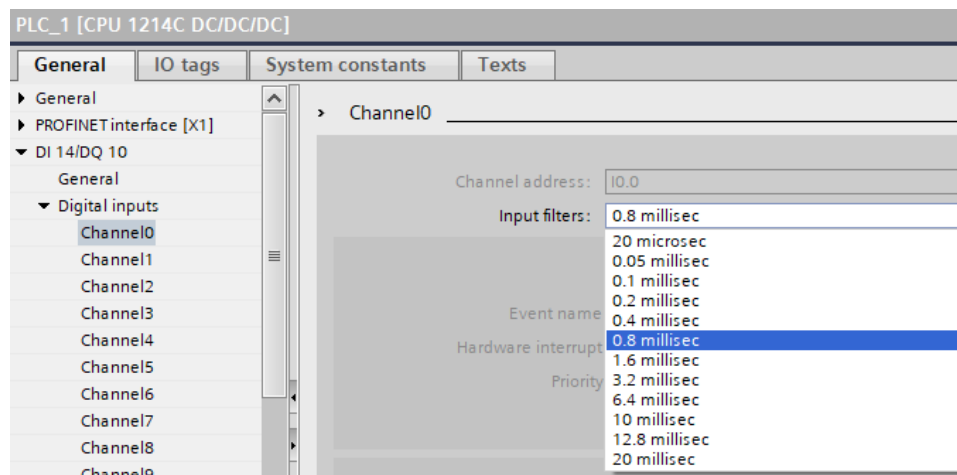


Figura 3.20: Alteração do valor do filtro de entrada da entrada *I0.0*

Com o HSC configurado, foi necessário perceber se este estava a funcionar como pretendido. Para tal, ainda nas propriedades do PLC, na janela HSC1, selecionou-se *I/O addresses*, que permite visualizar a memória onde os dados da contagem dos pulsos realizados pela HSC1 são armazenados. No caso da entrada *I0.0*, a memória é a *%ID1000*. Colocando o spindle a rodar, foi possível então perceber que com o *spindle* a rodar, o valor de *%ID1000* subia, confirmando assim que estava a funcionar como pretendido. Para saber o valor em RPM do *spindle*, foi necessário ver qual o valor presente na memória *%ID1000* ao fim de 1 segundo (obtendo-se assim o valor em rotações por segundo), e posteriormente multiplicar este valor por 60, o que permite assim a obtenção do valor em RPM. Posteriormente recolocou-se o valor de *%ID1000* a 0, utilizando a função *CTRL\_HSC* (não é possível utilizar a função *Move* para dar um novo valor à memória *%ID1000*), e repete-se o ciclo, lendo de novo o número de rotações num segundo, e multiplicando este valor por 60. Obtém-se assim um programa capaz de ler o número de rotações por minuto com um *refresh rate* de 1 segundo. Este valor pode ser facilmente alterado, sendo apenas necessário alterar o tempo de leitura, e o respetivo multiplicador, caso se pretenda obter um *refresh rate* mais rápido ou mais lento. Este programa está apresentado de forma completa no apêndice A deste documento.

### 3.3.3.2 Obtenção do valor do consumo de corrente do *spindle*

Consultando o manual do PLC é possível ver que as duas entradas analógicas que este possui leem valores entre 0V e 10V, em que aos 0V corresponde o valor decimal de 0, e aos 10V corresponde o valor decimal de 27648, como é possível ver na tabela apresentada na figura 3.21, retirada do manual do PLC.

System		Voltage Measuring Range	
Decimal	Hexadecimal	0 to 10 V	
32767	7FFF	11.852 V	Overflow
32512	7F00		
32511	7EFF	11.759 V	Overshoot range
27649	6C01		
27648	6C00	10 V	Rated range
20736	5100	7.5 V	
34	22	12 mV	
0	0	0 V	
Negative values		Negative values are not supported	

Figura 3.21: Valores que a *WORD* da entrada analógica assume, consoante a tensão de entrada

Com base nesta informação, é possível perceber que a cada incremento unitário na *WORD* da entrada analógica, corresponde uma subida de 0.36mV na tensão aplicada nesta mesma entrada analógica (equação 3.6).

$$\frac{10000mV}{27648} \approx 0,36mV \quad (3.6)$$

É assim possível afirmar que a variação mínima de corrente que o PLC pode detetar, corresponde a 0.37mA, através da remodelação da equação 3.5 na equação 3.7.

$$\frac{0,36mV}{0.9845} \approx 0,37mA \quad (3.7)$$

Por fim, sabendo que a tensão máxima admissível pela entrada analógica é de 10V, é necessário perceber a quantos amperes corresponderia esta tensão máxima, de modo a que fosse possível definir a escala no TIA Portal. Assim, recorrendo de novo à equação 3.5, obtém-se o resultado apresentado em 3.8.

$$\frac{10V}{0.9845} \approx 10.15744A \quad (3.8)$$

Deste modo, é possível então programar uma função que permita ao utilizador saber a corrente consumida pelo *spindle*, recorrendo às operações *NORM\_X* e *SCALE\_X* do TIA Portal, como mostra a figura 3.22.



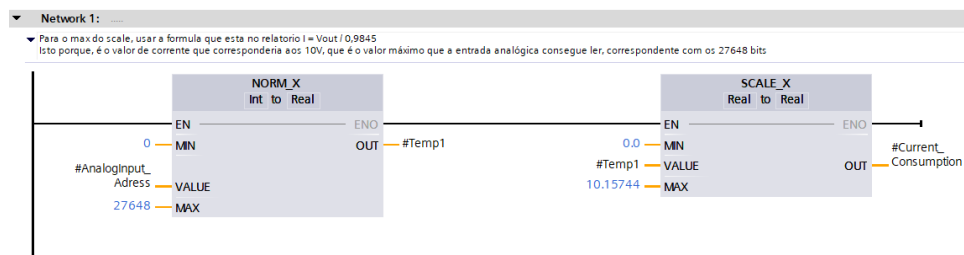


Figura 3.22: Função que calcula o valor da corrente consumida pelo *spindle*, com base na tensão lida na entrada digital

### 3.3.3.3 Registo dos valores das grandezas medidas

Para guardar os valores lidos pelo PLC das grandezas controladas ao longo do processo recorreu-se ao *DataLogging* da Siemens. Esta funcionalidade permite ler o valor de várias variáveis ao mesmo tempo ao longo de um processo, com uma determinada frequência, guardando estes valores num ficheiro *.csv*. O *download* deste ficheiro pode ser posteriormente realizado através do servidor web do PLC, que pode ser acessado inserindo o IP correspondente ao PLC que está a realizar as leituras, no *browser*.

### 3.3.4 Câmara

A câmara *BOA 1280×960 Mono SH Vision System* selecionada para obter imagens relativamente ao estado da superfície foi adquirida em conjunto com o módulo *A-BVS-PL-100*, do mesmo fabricante, que permite armazenar e executar programas programados em *Sherlock*, software que veio incluído com a câmara e o módulo, possuindo ainda duas saídas e uma entrada. A câmara, possui na parte de trás 3 conectores, como mostra a figura 3.23.



Figura 3.23: Parte de trás da *BOA 1280×960 Mono SH Vision System*

O conector LAN, serve para que a câmara e o módulo *A-BVS-PL-100*,

possam comunicar. Para realizar esta ligação, veio com a câmara um cabo que numa ponta tem um conector macho M12 de 8 pinos, que deve encaixar no conector LAN, e na outra ponta um conector macho RJ45, que liga ao módulo *A-BVS-PL-100*. O conector I/O PWR, que à semelhança do LAN é um conector fêmea M12 de 8 pinos, deve ser ligado a um cabo que possui o respetivo conector macho de 8 pinos de um dos lados, e no outro possui 8 fios soltos de cores diferentes. Estes fios devem ser ligados ao módulo, de acordo com as indicações apresentadas na figura 3.24, retirada do manual de instalação da câmara.

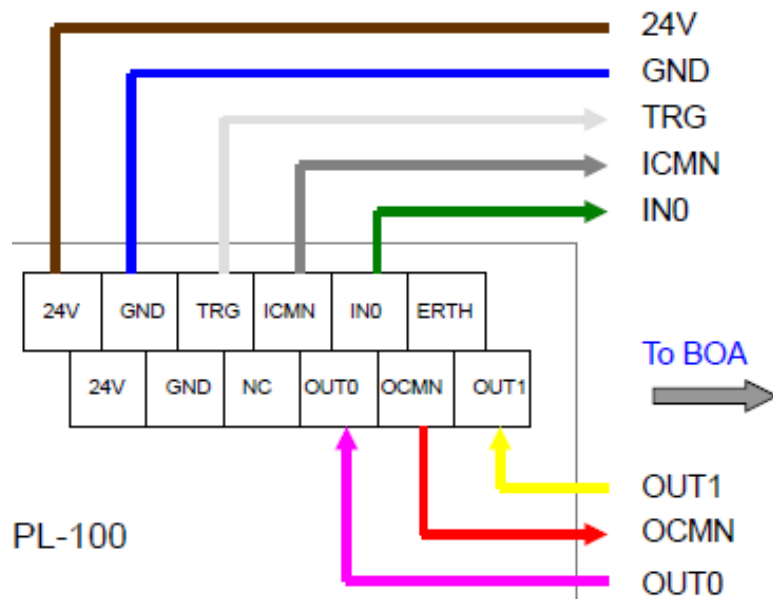


Figura 3.24: Ligações entre o conector I/O PWR da câmara, e os respetivos pinos no módulo *A-BVS-PL-100*

O conector LAMP, permite ligar a câmara a uma fonte luminosa, e controlar a sua luminosidade. Como para este projeto o controlo de luminosidade não será um fator relevante, este conector serve apenas para alimentar a lâmpada. Para tal, utilizou-se então o cabo que numa das pontas possuía um conector macho de 5 pinos, e na outra 5 fios soltos. Para alimentar a câmara, foram apenas necessários os 2 fios de alimentação, o castanho, que se conectou ao pino 24V da lâmpada, e o azul, que se ligou ao pino GND da câmara. Os 3 restantes fios foram isolados devidamente.

Por fim, o módulo *A-BVS-PL-100* deve ser conectado ao computador onde se pretende realizar a programação do *software* e visualizar as imagens obtidas pela câmara, através de um cabo com um conector RJ45 macho em cada ponta.

Na figura 3.25, retirada do manual de instalação da câmara, é possível perceber de uma forma geral, como ficaram interligados os componentes.

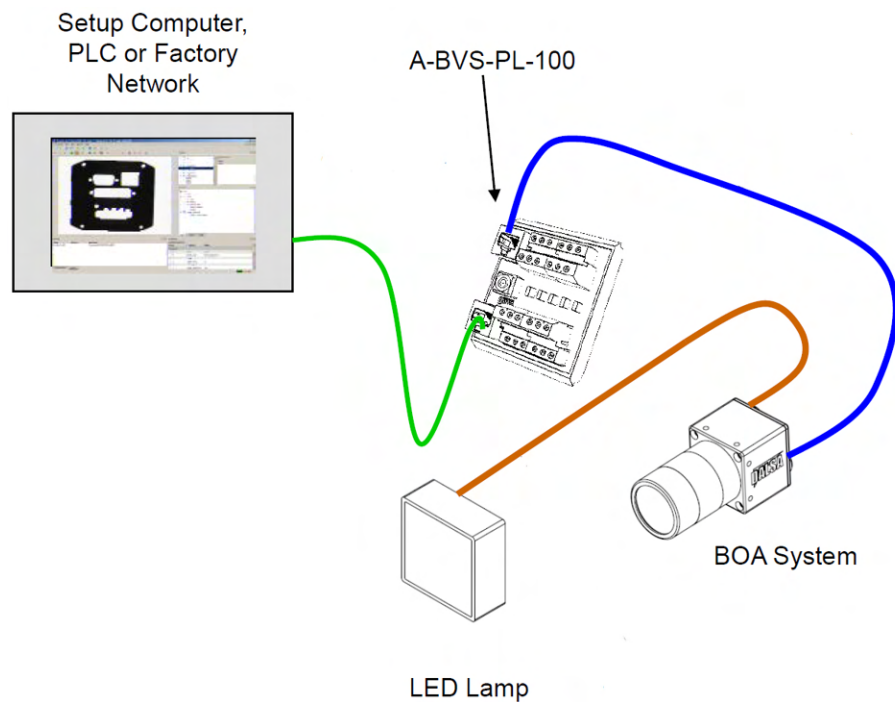


Figura 3.25: Interligação de todos os componentes necessário ao bom funcionamento da câmara

### 3.4 Testes preliminares

Após finalizar a preparação do hardware, antes de instalar tudo no respectivo local, considerou-se que a realização de alguns testes preliminares seriam uma mais valia, pois permitiam desde início obter uma ideia aproximada relativamente à relação entre o consumo de corrente do *spindle*, e a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça polida, e validar a utilização de um sistema de visão para avaliar o estado da superfície da peça.

#### 3.4.1 Polimento de uma superfície instrumentando corrente e deformação da ferramenta

O primeiro teste realizado, foi então o polimento de uma superfície, medindo a corrente consumida pelo *spindle* com o auxílio de um amperímetro ao longo do processo, e controlando a deformação da ferramenta ao contactar com a superfície polida. A primeira etapa deste teste consistiu em programar o trajeto que a ferramenta teria de percorrer ponto a ponto. Para tal, recorreu-se à consola do robô, visto que para a realização deste trajeto foram apenas necessários marcar alguns pontos, nomeadamente um ponto de aproximação da ferramenta à peça (1), localizado alguns centímetros acima

da superfície a ser polida, o ponto correspondente ao local onde se inicia o polimento (2), com a ferramenta tangente à superfície da peça, o ponto correspondente ao local final do polimento (3), correspondente a uma linha reta a longo do eixo X da peça, e com altura igual ao ponto anterior, e um ponto de afastamento da superfície da peça (4). A figura 3.26 representa a localização destes 4 pontos na peça.

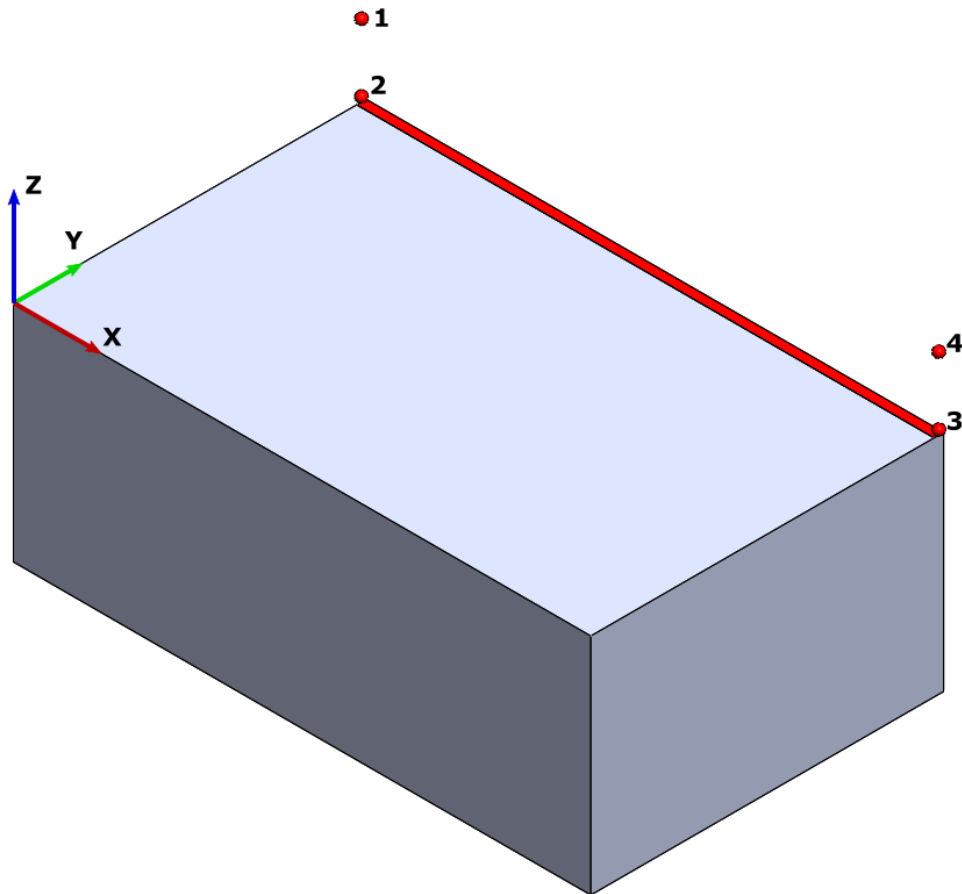


Figura 3.26: Localização dos pontos definidos para o primeiro teste de polimento

Foi determinado que se iriam realizar 6 testes, com diferentes deformações da ferramenta, nomeadamente um primeiro teste com a ferramenta tangente à superfície, sendo este considerado a deformação 0mm, seguido de um segundo teste com a ferramenta a deformar 1mm, e continuando a incrementar 1mm de deformação até ao sexto teste, ao qual corresponde um valor de deformação de 5mm. Para tal, foi necessário subtrair ao valor do eixo Z dos pontos 2 e 3, o valor correspondente à deformação do número do teste que se estava a realizar. O ângulo da ferramenta foi igual para os

6 testes, e é possível visualizá-lo na figura 3.27, assim como o ambiente em que foram realizados.



Figura 3.27: Primeiros testes de polimento

Recorrendo a um amperímetro para medir o consumo de corrente do *spindle* ao longo do processo de polimento, registaram-se os valores médios de corrente consumida correspondentes a cada passagem. Ao colocar os valores do consumo de corrente medidos num gráfico juntamente com a deformação da ferramenta, obteve-se o gráfico apresentado na figura 3.28.

Nestes testes preliminares não foi medida a força, no entanto sabe-se que quanto maior a deformação da ferramenta, maior a força aplicada. Com base nesta informação, e atentando no gráfico apresentado na figura 3.28, é possível concluir que a curva obtida valida o pressuposto inicial, de que a corrente consumida pelo *spindle*, é tanto maior quanto maior for a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça.

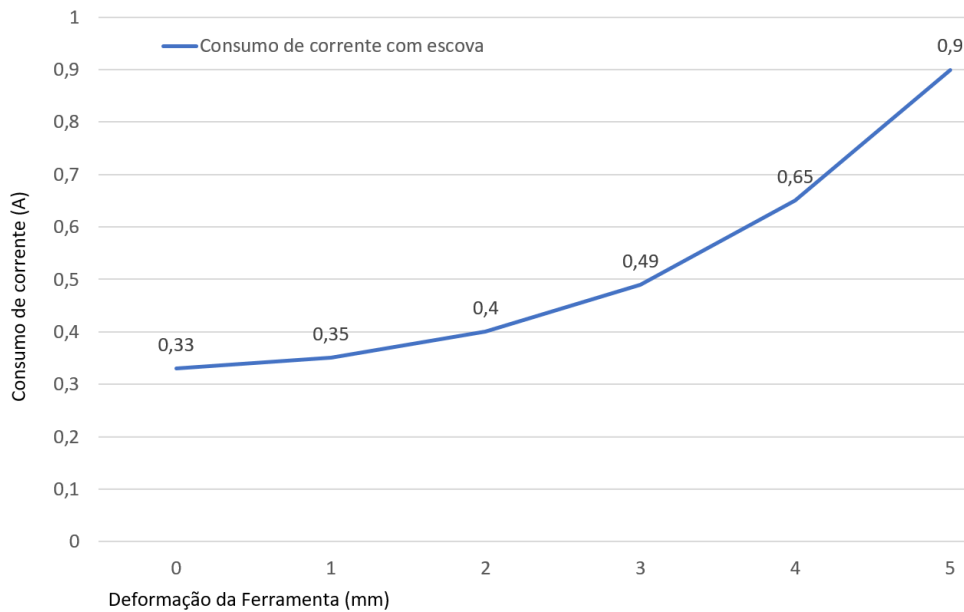


Figura 3.28: Gráfico da relação da deformação da escova-corrente

### 3.4.2 Análise da superfície da peça polida, com o auxílio da câmara

Após estes primeiros testes de polimento, considerou-se relevante avaliar o estado da superfície do bloco polido. Para tal, recorreu-se à câmara selecionada. Para uma imagem o mais detalhada possível, é necessário calibrar a lente para que amplie o máximo permitido. De seguida, a distância ideal para que a imagem tenha qualidade suficiente para detetar todos os pormenores, deve ser calibrada experimentalmente. Colocou-se então o bloco que havia acabado de ser polido em frente à câmara, e ajustou-se a distância até que a imagem exibida no ecrã tivesse a qualidade pretendida. Medindo a distância entre a câmara e a superfície do bloco, conclui-se que a distância ideal deve ser aproximadamente 16cm. A figura 3.29, demonstra como foram obtidas as primeiras imagens da superfície do bloco utilizado nestes testes.

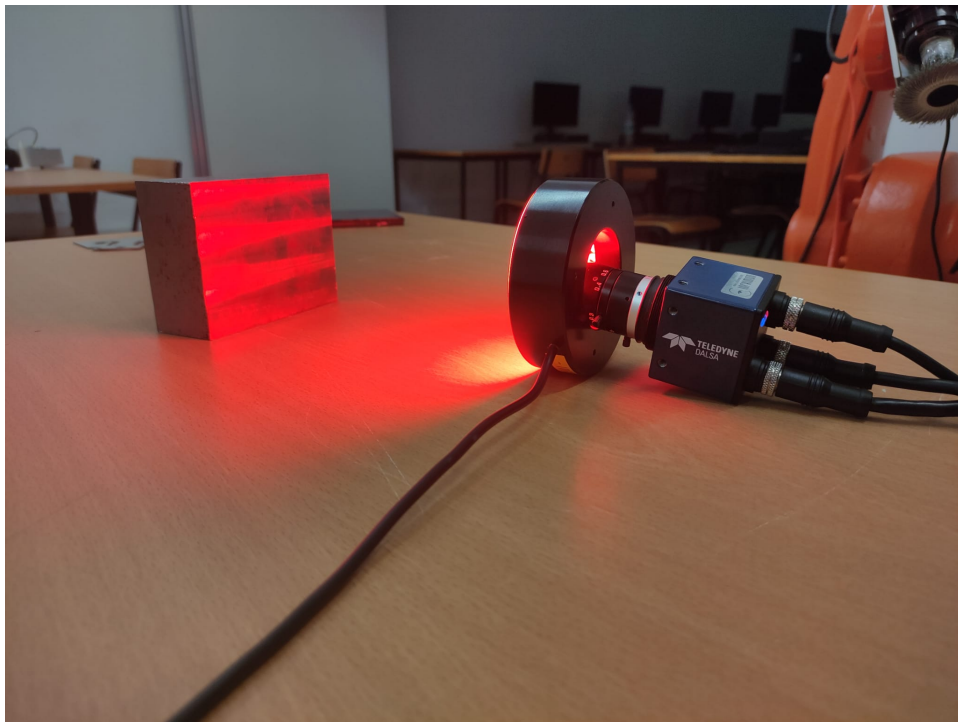


Figura 3.29: Obtenção das primeiras imagens do estado de superfície

Após esta calibração, retiraram-se algumas imagens da superfície do bloco, apresentadas na figura 3.30. O lado 2, é referente ao lado em que foi realizado o polimento, e onde a maquinação do bloco foi uma maquinação mais cuidada, e com um acabamento superficial bastante bom. O lado 1 refere-se à parte de trás do bloco, onde não se chegou a realizar nenhum teste de polimento, e em que a maquinação consistiu apenas no facejamento da superfície, dando origem a uma superfície com uma qualidade inferior à do lado 2.

Como é possível observar na figura 3.30, retiraram-se imagens com e sem iluminação. Deste modo foi possível perceber a importância que este fator tem na qualidade das imagens obtidas. Na imagem (a) é possível observar todos os defeitos provenientes da maquinação com bastante detalhe. Na obtenção desta imagem, um outro fator que se revelou de extrema importância foi o ângulo com que a luz incide na superfície da peça. A iluminação deve ser o mais perpendicular possível à peça, para que a imagem obtida seja de qualidade. Na imagem (b), é também possível detetar os defeitos na superfície do bloco, no entanto o detalhe é bastante inferior comparativamente à imagem (a). Conclui-se assim que uma boa iluminação, afeta positivamente o resultado final da imagem obtida. A mesma conclusão pode ser retirada ao observar o lado 2 do bloco, que tem como imagens correspondentes a (c) e (d). Como este lado do bloco possui uma superfície com um acabamento



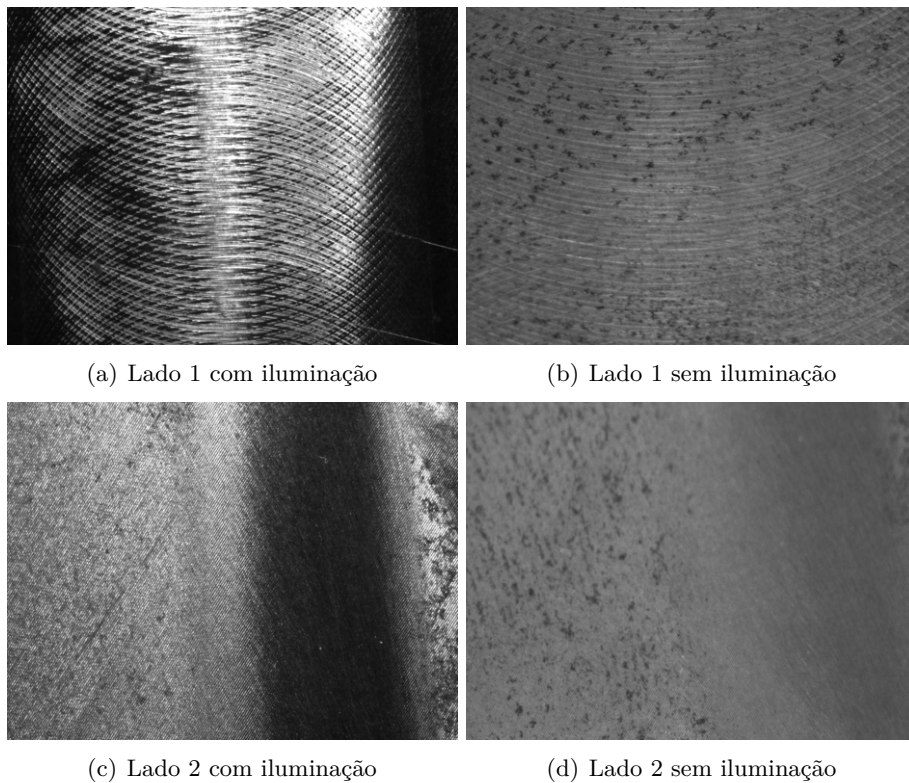


Figura 3.30: Imagens obtidas durante o primeiro teste

bastante superior à superfície do lado 1, os defeitos são mais difíceis de detectar, no entanto, a zona que foi polida é claramente notória. De modo a perceber o quanto o polimento afetou a rugosidade da superfície, utilizou-se o rugosímetro para medir o valores de alguns dos parâmetros que caracterizam a sua qualidade. Os valores obtido são apresentados na tabela 3.1.

Observando a tabela 3.1, é possível verificar uma clara melhoria no estado da superfície, após as passagens realizadas pela ferramenta na superfície da peça, confirmando as observações recolhidas com o auxílio da câmara.

A alteração da rugosidade da superfície, no entanto, não explica por si só a grande diferença de luminosidade entre a zona polida e a zona não polida. O bloco utilizado para este teste, estava ligeiramente oxidado, logo, a escova ao passar sobre a superfície retirou alguma dessa oxidação, conferindo uma cor diferente à superfície do bloco.

Com este teste, concluiu-se que a utilização da câmara pode ser uma mais valia para avaliar a superfície polida. Mesmo que não seja possível criar um algoritmo que consiga perceber se a qualidade superficial da peça polida é ou não suficiente, a transmissão de algumas imagens através um *display* para que o operador possa avaliar a superfície de perto podem ser uma boa alternativa ao tradicional uso de um rugosímetro.



Tabela 3.1: Resultado das primeiras medições de rugosidade realizadas

Parâmetro	Pré polimento	Pós polimento
$R_a$	1.209 $\mu\text{m}$	0.308 $\mu\text{m}$
$R_q$	1.481 $\mu\text{m}$	0.377 $\mu\text{m}$
$R_z$	6.507 $\mu\text{m}$	1.703 $\mu\text{m}$
$R_t$	8.398 $\mu\text{m}$	2.285 $\mu\text{m}$

### 3.5 Instalação do hardware

Após a realização dos testes preliminares, o hardware previamente preparado foi instalado no respectivo local. Começou-se pela fixação do sensor indutivo, acoplando o íman que este deve detetar no veio do *spindle* utilizando fita-cola, para que não seja projetado quando o motor começar a rodar. O sensor deve então ser posicionado a uma distância inferior a 12mm do íman. Para tal fabricou-se uma peça, apresentada na figura 3.31, com o intuito de fixar o sensor ao *spindle*.

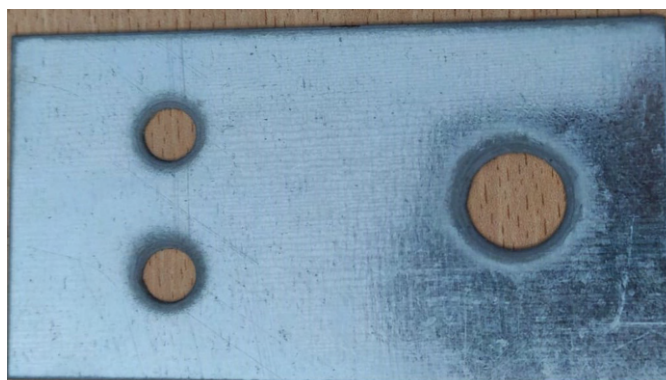


Figura 3.31: Suporte do sensor indutivo

A figura 3.32 apresenta a forma como o sensor indutivo ficou instalado.

Posteriormente fixou-se a câmara e a respetiva luz na lateral do *spindle*, com o auxílio das peças representadas na figura 3.33.



Figura 3.32: Instalação do sensor indutivo



Figura 3.33: Peças de suporte da câmara e iluminação

A peça maior da figura 3.33, foi fabricada com o intuito de substituir a proteção traseira do *spindle*, para que não se danificasse a peça original com furos para fixar a câmara. Por esse motivo, apresenta algumas aberturas, que servem para ajudar no arrefecimento do motor. As duas peças mais pequenas unem a câmara e a luz à peça maior, e têm um design que permite que a distância entre a luz e a câmara, seja calibrada mecanicamente. As figuras 3.34 e 3.35 demonstram como é que a câmara e a luz ficaram fixadas.

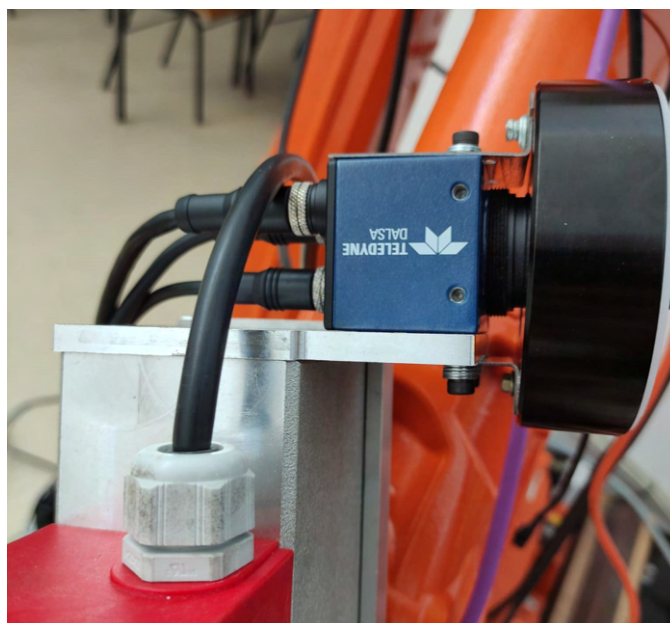


Figura 3.34: Instalação da câmara e da iluminação

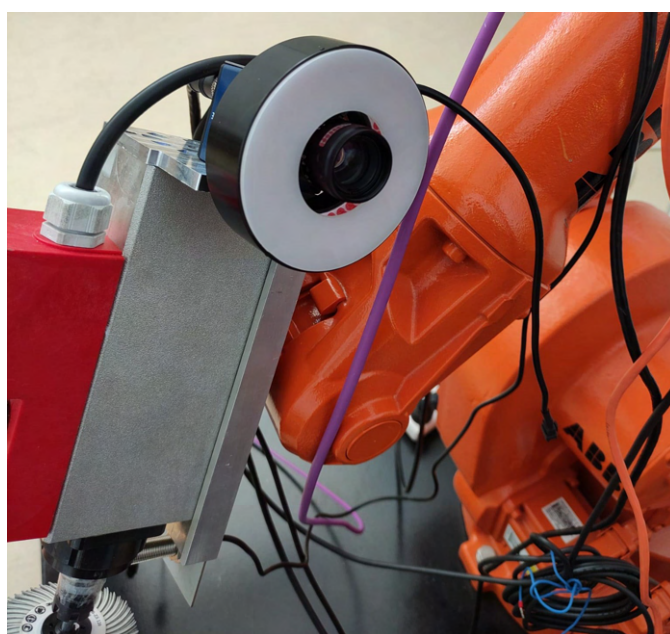
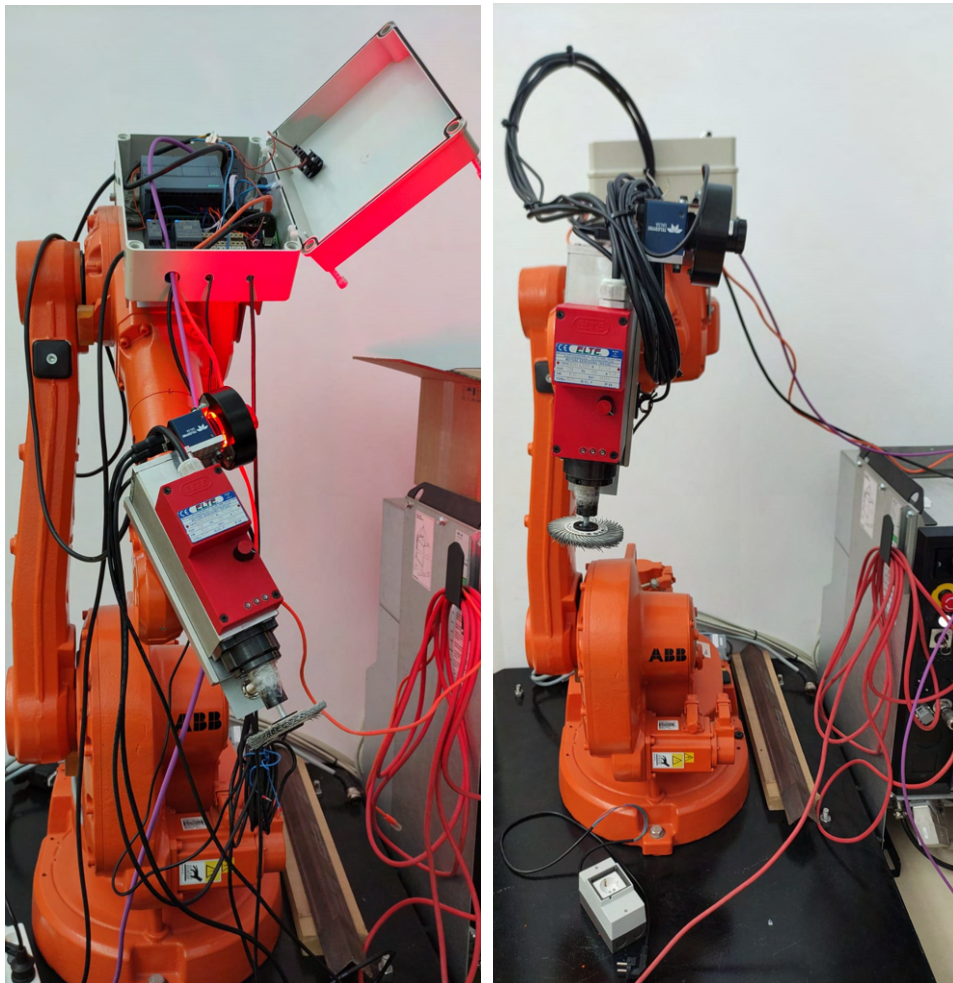


Figura 3.35: Instalação da câmara e da iluminação

A documentação relativa a todas as peças fabricadas para a fixação do sensor indutivo, da câmara e da luz, está apresentada no apêndice B.

Por fim, todos os restantes componentes eletrônicos foram posicionados

num quadro elétrico no topo do robô. Depois de tudo pronto, os cabos que ficaram soltos foram devidamente fixados ao braço do robô com o auxílio de abraçadeiras de fixação para cabos com trança e adesivo, e abraçadeiras de plástico. A figura 3.36 demonstra como ficou o robô, após todo o hardware ser instalado.



(a) Quadro aberto e cabos soltos

(b) Quadro fechado e cabos organizados

Figura 3.36: Robô com todo o hardware instalado

### 3.6 Planeamento de experiências

Com base nas informações já apresentadas, percebe-se que a variação dos vários fatores do processo de polimento podem gerar resultados finais diferentes. Para a obtenção dos resultados experimentais deste projeto, os fatores controlados vão ser o passo lateral, a deformação da ferramenta, a



velocidade de rotação da ferramenta em vazio e a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça, e serão analisadas as respostas dadas pelo sistema, nomeadamente o consumo de corrente do *spindle*, a força aplicada pelo *spindle* na superfície do bloco, a velocidade de rotação durante o processo de polimento, a rugosidade da superfície (antes e após o polimento) e as imagens obtidas pela câmara.

Posto isto, decidiu-se que cada parâmetro poderia assumir 3 valores diferentes, como mostra a tabela 3.2

Tabela 3.2: Parâmetros a controlar durante o polimento

Parâmetro	Valor -1	Valor 0	Valor 1
Deformação da escova	-1mm	-3mm	-5mm
Passo lateral	2mm	6mm	10mm
Velocidade rotação s/ carga	8000rpm	9000rpm	10000rpm
Número de passagens	1 passagem	2 passagens	3 passagens

De modo a diminuir o número de testes, em vez de relacionar todos os valores de cada parâmetro uns com os outros, optou-se por uma abordagem mais prática, que consistiu na utilização do *software Design Expert* para elaborar um projeto experimental do tipo *Box Behnken Design*, que fornece ao utilizador uma tabela com as experiências a realizar, ordenadas de acordo com a metodologia estatística *Box Behnken*. A tabela obtida através deste software está apresentado no apêndice C.

Concluiu-se assim que existe a necessidade de realizar 51 diferentes experiências organizadas por 3 conjuntos de 17 experiências para 1, 2 e 3 passagens. De modo a reduzir o número de blocos produzidos é possível fazer todos estes testes com apenas 17 blocos, pois depois dos primeiros 17 testes (uma passagem em cada bloco), repetem-se os testes nos mesmos blocos com mais uma passagem, obtendo assim todos os testes relativamente às duas passagens, e repetindo o processo para obter os valores relativos às três passagens. Para que isto funcione, é necessário numerar os blocos corretamente, para que cada bloco esteja sempre sujeito aos mesmos valores de cada fator.

Como a organização da metodologia *Box Behnken*, obtida através do *software Design Expert* não permite obter este formato, foi necessário recorrer ao *Excel*. Obteve-se assim uma tabela com a ordem pela qual as experiências devem ser realizadas, que acabou por ser ligeiramente diferente da obtida através da metodologia *Box Behnken* pelos motivos já referidos,

no entanto tentou-se ao máximo minimizar o número de alterações, para que ficasse o mais coerente possível com a metodologia estatística escolhida.

Importa ainda referir que o atual controlador do robô limita a leitura de entradas a cerca de 2Hz, não permitindo o controlo ativo de força em tempo real.

## Capítulo 4

# Trabalho experimental

*Este capítulo apresenta uma explicação detalhada da rotina dos ensaios experimentais realizados, dando a conhecer todos os passos executados para a obtenção dos resultados finais*

### 4.1 Definição do *Workobject*

O primeiro passo do trabalho experimental, consistiu na calibração da ferramenta utilizada, seguida pela obtenção das coordenadas do referencial do bloco a ser polido, relativamente ao referencial do robô. Para tal, fixou-se o bloco no sensor Kistler 9139AA, que por sua vez estava posicionado convenientemente (dentro do alcance do robô) na mesa de trabalho, como apresentado na figura 4.1.



Figura 4.1: Posicionamento do bloco

De seguida, acoplado uma ponteira de tamanho conhecido ao *spindle* (figura 4.2), foi possível obter as coordenadas do vértice que se pretende utilizar como origem do referencial do bloco, e as direções deste mesmo referencial, relativamente ao referencial do robô. Criou-se então um *Workobject* com estes valores, que foram guardados para que posteriormente possa ser possível simular a posição real do bloco no *RobotStudio*.

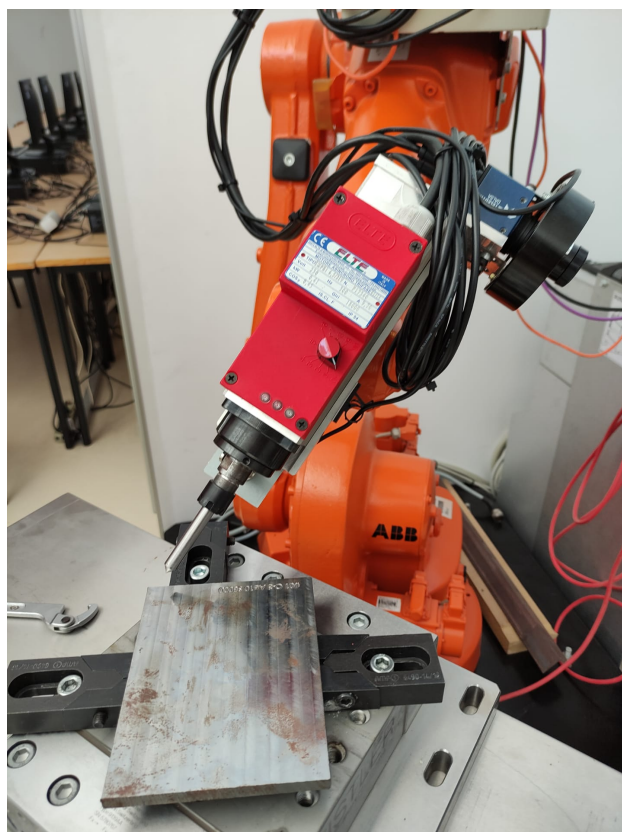


Figura 4.2: Ponteira utilizada para obtenção das coordenadas do referencial do bloco

## 4.2 Programação robô

Com as coordenadas do referencial do bloco calculadas iniciou-se a programação do robô com o objetivo de obter a trajetória que este terá de realizar para polir a superfície dos blocos de teste. O *software* selecionado para esta tarefa foi o *RobotStudio*, com o *add-in Machining Powerpack*. A utilização deste *add-in* facilita a criação de trajetórias para aplicações como polimento, maquinação, soldadura, entre outros, permitindo assim obter melhores trajetórias de forma mais simples e rápida.



No entanto, este *add-in* era ainda desconhecido, o que fez com que fosse necessário dedicar algum tempo para aprender a tirar melhor partido das suas funcionalidades. Para tal, seguiu-se o tutorial disponibilizado pela ABB para a aprendizagem do *Machining Powerpack* [64].

Após a conclusão do tutorial, procedeu-se à programação da trajetória da ferramenta. Para que isto fosse possível, primeiramente foi necessário obter o CAD da ferramenta. Recorreu-se ao *SolidWorks*, para elaborar um CAD meramente volumétrico, sem muito detalhe, mas com todas as dimensões reais, para que o comportamento da ferramenta possa ser simulado de forma precisa no *RobotStudio*. O CAD obtido, apresentado na figura 4.3, foi posteriormente exportado para um ficheiro *.SAT*, para que pudesse ser importado no *RobotStudio*.

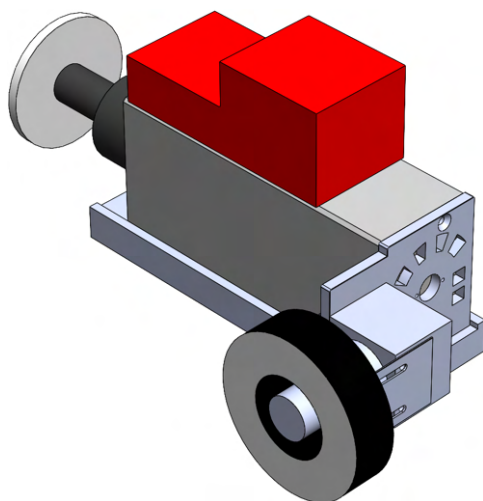


Figura 4.3: CAD da ferramenta

De seguida, criou-se uma ferramenta no *RobotStudio*, importando o ficheiro *.SAT* já obtido, e associou-se a ferramenta criada ao robô ABB IRB1600 no programa. Posteriormente, foi necessário criar o bloco a ser polido com as respetivas dimensões, e posicioná-lo no respetivo local, relativamente ao referencial do robô. Com a ferramenta e o bloco devidamente posicionados, iniciou-se o trabalho a realizar no *MachiningPowerpack*, começando pela definição da zona da peça na qual se pretende realizar o polimento, seguido pela definição dos parâmetros da trajetória, nomeadamente o seu padrão e o passo lateral. Foram ainda inseridas algumas informações relativamente à ferramenta, como direção de rotação, dimensões e o tipo de ferramenta, e por fim selecionados alguns parâmetros do processo, como a posição inicial do robô, o ângulo de trabalho da ferramenta, o tipo de entradas e saídas na peça, bem como os respetivos ângulos e a velocidade de avanço da ferramenta. A trajetória obtida está apresentada na figura 4.4.

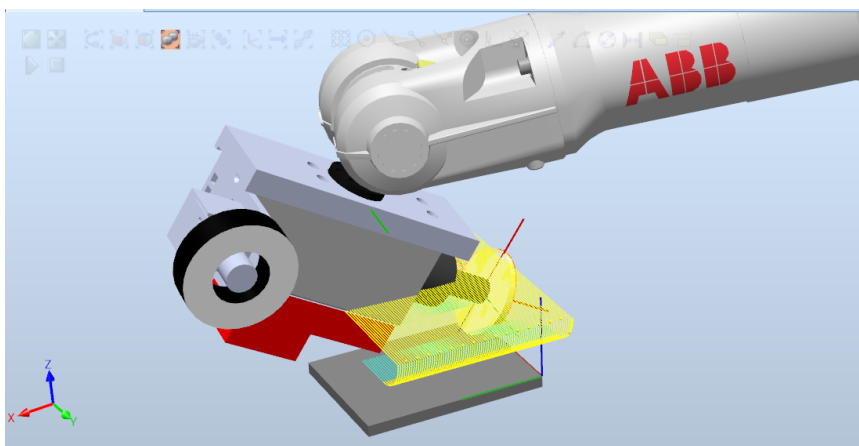


Figura 4.4: Trajetória da ferramenta

A trajetória que se pode observar na figura 4.4, tem um passo lateral de 2mm. Este fator não pode ser alterado manualmente na consola do robô, apenas através do *RobotStudio* no computador. Este motivo cria então a necessidade de realizar 3 trajetórias com diferentes valores do passo lateral (2mm, 6mm e 10mm). Assim, do mesmo programa exportaram-se 3 diferentes *Rapid Files*, cada um correspondendo ao respetivo valor de passo lateral. Guardando estes 3 ficheiros na consola do robô, é assim possível seleccionar o passo lateral correspondente a cada ensaio, sem recorrer constantemente ao *RobotStudio*.

#### 4.2.1 Calibração do transdutor de corrente

Antes de realizar os primeiros ensaios, foram feitos alguns testes rápidos para testar o funcionamento do transdutor de corrente e do sensor indutivo, e concluiu-se que os valores lidos pelo transdutor de corrente não correspondiam ao consumo de corrente real do *spindle*, existindo a necessidade de o calibrar. Para tal, recorrendo ao auxílio de dois amperímetros diferentes, realizaram-se 4 medições, com a velocidade de rotação fixa, e encostando um bloco de metal à escova com diferentes intensidades. Destas medições registaram-se os valores lidos pela entrada analógica do PLC, e o respetivo consumo de corrente, obtido através da média aritmética dos resultados calculados pelos diferentes amperímetros. Foi assim possível perceber que valor de corrente real corresponde a cada determinado valor lido pela entrada analógica do PLC. Realizou-se então um gráfico no excel, de modo a obter a expressão matemática que caracteriza esta relação (figura 4.5).

Substitui-se então no programa a linha de código apresentada na figura 3.22, por uma função com a expressão matemática obtida anteriormente. Esta função pode ser consultada no apêndice A.

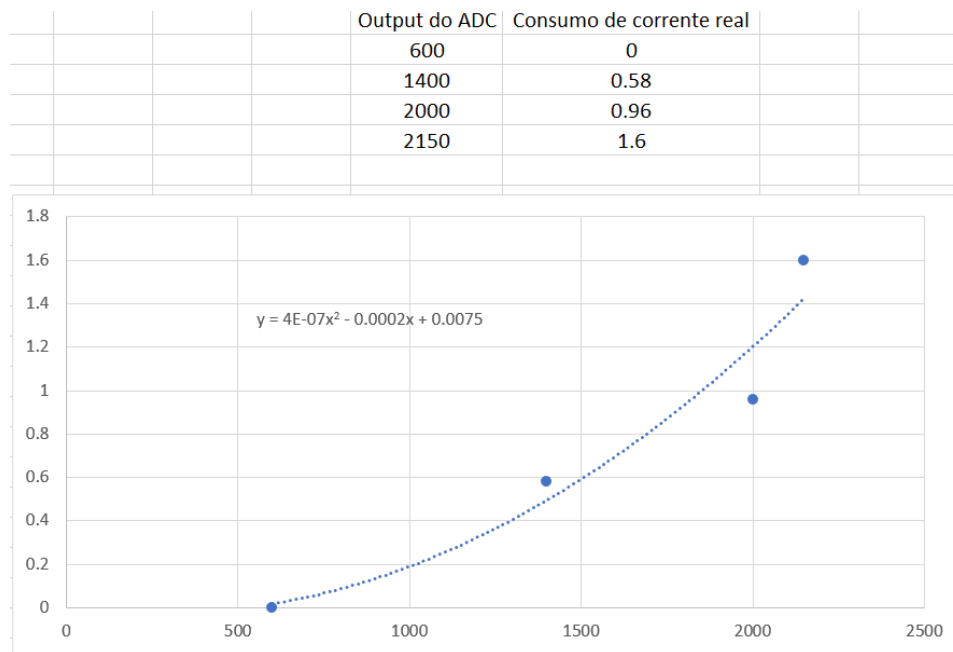


Figura 4.5: Expressão que relaciona o valor lido na entrada analógica do PLC com o consumo de corrente do *spindle*

### 4.3 Ensaios experimentais

Para fabricar os blocos utilizados nestes ensaios recorreu-se à maquinação CNC, de modo a replicar o estado de pré acabamento tipicamente obtido na indústria dos moldes. No entanto, o período prolongado da realização dos ensaios permitiu a oxidação da superfície dos blocos prejudicando a qualidade dos resultados.

Com os *Rapid Files* carregados no controlador, o hardware pronto e o *setup* experimental montado, deu-se início aos ensaios experimentais. A rotina destes ensaios consistia em fixar o bloco a ser polido no sensor de forças, medir a rugosidade da sua superfície com o rugosímetro, efetuando 3 medições em locais diferentes da peça, obtendo posteriormente a média aritmética destes 3 resultados, inserindo de seguida os valores obtidos no respetivo local da folha excel. Após esta medição, o *DataLogging* era ativado, para que o PLC pudesse iniciar a recolha dos dados relativamente às grandezas controladas, o *spindle* ligado, o programa de recolha de dados do sensor de forças iniciado, e por fim era dada a ordem ao robô para executar a trajetória correspondente ao bloco que estava a ser acabado. Com o polimento terminado, o *spindle*, o *DataLogging* e o programa do sensor de forças eram desligados, o *download* dos ficheiros obtidos a partir destes 2 últimos era realizado, e a superfície da peça era avaliada com o rugosímetro, recor-

rendo ao mesmo método previamente utilizado para medir a rugosidade da superfície antes do polimento. Os valores obtidos eram então inseridos no respetivo local da folha excel, e reiniciava-se o processo descrito, até todos os testes serem realizados.

Ao fim dos 13 primeiros testes observou-se que a escova de polimento estava a sofrer um desgaste demasiado grande, o que se traduziu numa redução bastante significativa no seu diâmetro e perda de eficiência. Na figura 4.6 é possível observar o estado da escova, antes de realizar qualquer teste, e após os 13 ensaios feitos.

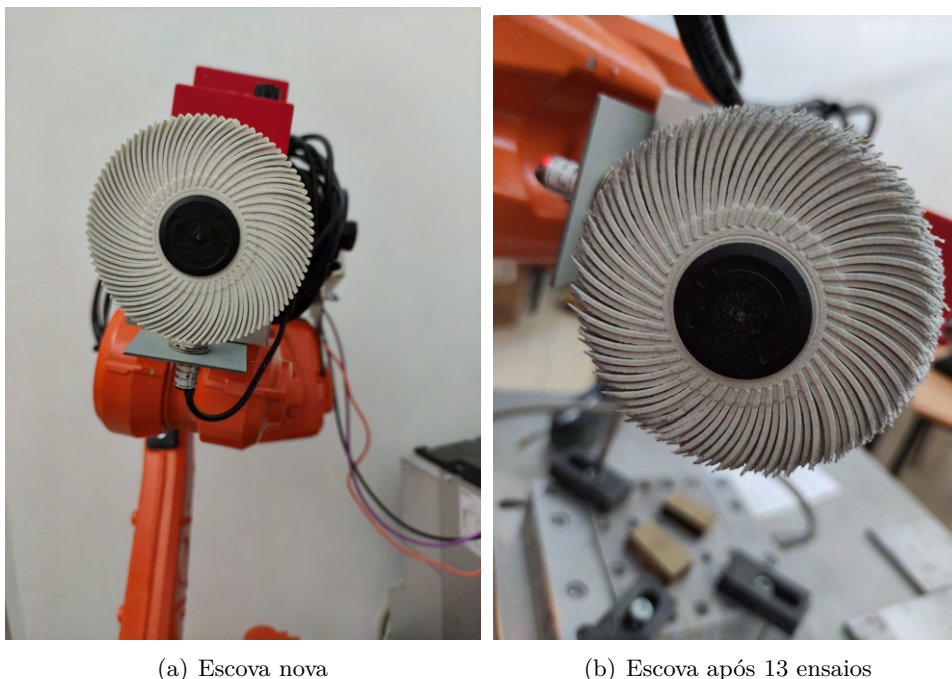


Figura 4.6: Escova utilizada nos 13 primeiros ensaios

Percebeu-se que este desgaste se deveu ao contacto com a aresta do bloco, provocado pela entrada com extensão linear. A ferramenta atingia o valor desejado no eixo Z (relativamente ao referencial da peça) para o polimento, antes de tocar na peça (com o valor do eixo X ainda negativo), como demonstra a figura 4.7. Por este motivo, a ferramenta iniciava o polimento de forma bastante abrupta, promovendo um desgaste demasiado acentuado na escova devido ao corte provocado pela aresta. Este desgaste tornou-se bastante evidente quando se realizou um ensaio com o valor de deformação da escova de 3mm, e a velocidade a 10000 rpm. Constatou-se que após estes primeiros ensaios, a escova perdeu aproximadamente 4mm do seu diâmetro inicial, fator que põe em causa a qualidade dos resultados finais. Por este motivo, concluiu-se que seria necessário delinear uma estratégia

para que o desgaste da ferramenta fosse atenuado, caso contrário implicaria que existisse uma troca de escovas regular. Como o momento em que havia maior desgaste da ferramenta era no momento em que esta entrava na peça, optou-se pela mudança da estratégia de entrada, evitando o contacto com a aresta, e conseqüentemente aumentando a durabilidade da escova. Esta alteração na trajetória não permite que a peça fique totalmente polida, pois a escova não chega a polir a extremidade do bloco, no entanto, como o objetivo destes ensaios consiste essencialmente na obtenção de dados relativamente à forma como diferentes parâmetros de polimento afetam a qualidade final da superfície, este problema pode ser contornado ao analisar apenas a zona do bloco polida, e ignorando as zonas que a escova não foi capaz de atingir.

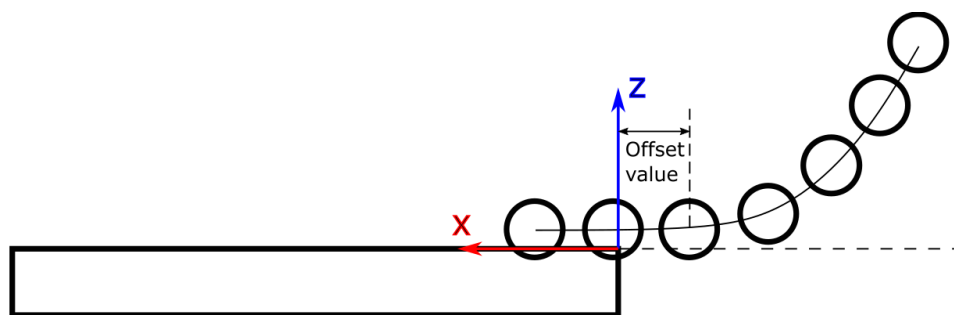


Figura 4.7: Trajetória da ferramenta nos 13 primeiros ensaios

Após esta alteração concluíram-se os ensaios previstos. A nova trajetória trouxe melhorias significativas na durabilidade da escova. No final dos 38 ensaios realizados com a nova escova (ensaio 14 até ao 51), observou-se uma redução no seu diâmetro de aproximadamente 2.5mm, valor bastante inferior ao desgaste verificado na primeira escova. Apesar de o desgaste ser consideravelmente menor, é ainda significativo o suficiente para poder afetar negativamente a qualidade dos dados recolhidos. O desgaste começou a ser notado por volta do 30º ensaio, e ficou mais evidente no 39º. Neste último, realizou-se uma medição do diâmetro da escova, e este era de cerca de 2mm inferior ao diâmetro inicial. Optou-se então por reduzir o valor da coordenada Z do referencial da peça em 1mm, de modo a corrigir o erro causado pela redução do diâmetro da escova.

A figura 4.8 apresenta os 17 blocos, após a realização de todos os ensaios.

Após o polimento de todos os blocos retiraram-se algumas imagens ampliadas das superfícies de alguns deles. Este processo realizou-se, fixando as coordenadas do eixo Z relativamente ao referencial do robô no valor ideal, para que a distância entre a câmara e o bloco permitisse obter imagens o mais ampliadas possível, com uma boa qualidade de imagem. Encontrando o valor ideal da coordenada Z, navegou-se com a câmara ao longo de diferentes valores das coordenadas X e Y, retirando-se algumas imagens. Simultaneamente, em algumas imagens, mediram-se os valores de rugosidade dos locais



Figura 4.8: Blocos após todos os ensaios

ampliados, de modo a relacionar cada imagem com o respectivo valor de rugosidade. Todas as imagens retiradas apresentam uma dimensão real de aproximadamente 25mm de lado, como é possível observar na figura 4.9.

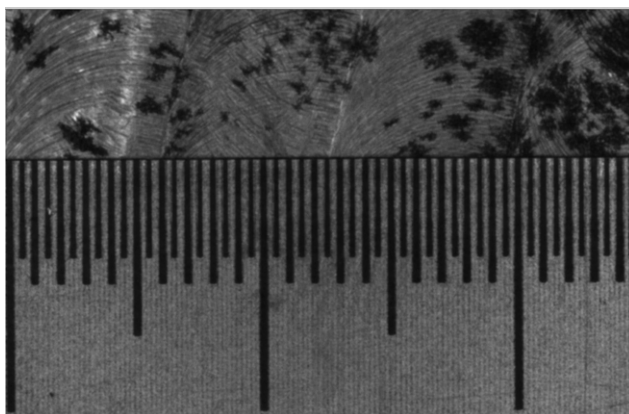


Figura 4.9: Largura das imagens obtidas através do sistema de visão

Para a realização deste processo, tentou-se reduzir a luminosidade da sala ao máximo, para que a iluminação incidente no bloco fosse apenas a proveniente da luz acoplada no robô para esse efeito. Na figura 4.10, é possível observar o ambiente em que foram retiradas as imagens.



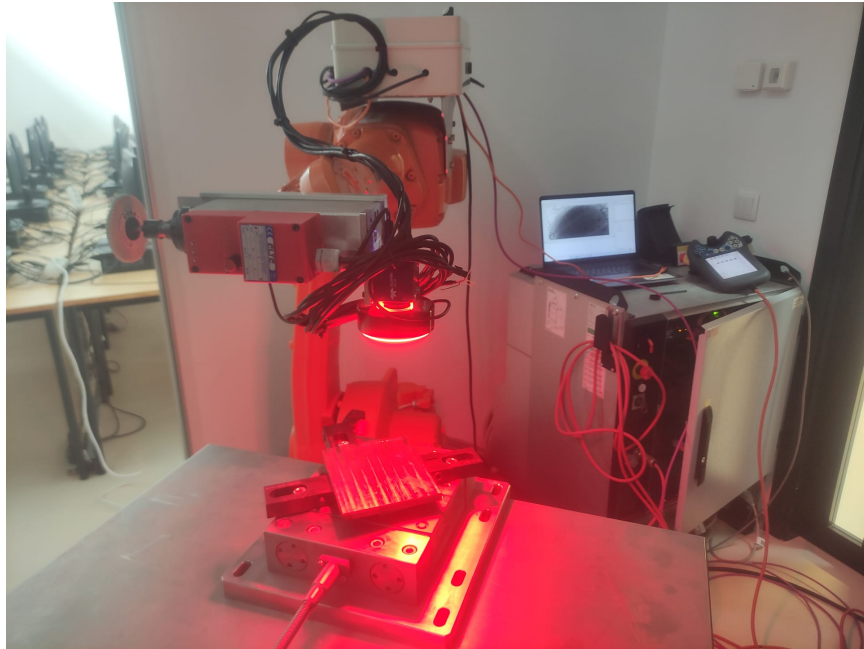


Figura 4.10: Iluminação para a obtenção das imagens

## Capítulo 5

# Discussão de Resultados

*Apresentação e discussão dos resultados obtidos após os ensaios experimentais, descritos no capítulo anterior*

Os resultados obtidos através dos ensaios realizados, foram inseridos na folha excel já referida anteriormente, apresentada na figura 5.1. Atentando nos dados adquiridos, existem alguns resultados que não se esperavam no início do trabalho, nomeadamente o facto de, após o polimento, existirem alguns blocos em que a rugosidade antes do polimento, é inferior à rugosidade apresentada após o polimento. Outro resultado que também se desviou do pretendido, foi nos casos dos blocos 2, 3, 4 e 13, em que se registou um aumento da rugosidade da superfície após a segunda e terceira passagem. Por exemplo, no caso particular do bloco 13, na primeira passagem registou-se uma melhoria no parâmetro de rugosidade  $R_a$  de 11% relativamente ao estado inicial, enquanto que na segunda passagem, esta foi de apenas 7% (aumento da rugosidade relativamente ao anterior de 4%), e na última passagem foi registada uma superfície em que o parâmetro  $R_a$  era 4% superior ao medido inicialmente (aumento da rugosidade relativamente ao anterior de 12%). Assim, após uma primeira passagem que melhorou a qualidade da superfície, seguiram-se 2 que a deterioraram.

Durante os ensaios, observou-se também que os valores de passo lateral seleccionados para os ensaios, não têm grande utilidade para este estudo, visto que um passo lateral de 6 mm ou 10 mm, apresenta resultados práticos iguais, pois tanto num como noutro a escova nunca se sobrepõe à passagem anterior, como é possível ver na figura 5.2. Assim, o bloco não fica uniformemente polido, e optou-se por se realizar apenas medições nas zonas por onde a escova passou. Por este motivo, os parâmetros de polimento avaliados serão apenas a deformação da escova, o número de passagens e a velocidade de rotação do *spindle*.



Specimen	#	Offset (mm)	Cut width (mm)	Speed (RPM)	Number of passages	Current (A)	Polishing Speed (RPM)	Force (N)	Pre-pol Roughness Ra (um)	Pre-pol Roughness Rz (um)	Pos-pol Roughness Ra (um)	Pos-pol Roughness Rz (um)	Variação Ra	Variação Rz	Variação Ra anterior	Variação Rz anterior
#01 O-3 Ae10 S8000	1	3	10	8000	Level 1	0.618	7227	6.328	0.438	3.865	0.257	1.890	-41%	-51%		
#02 O-3 Ae10 S10000	2	3	10	10000	Level 1	1.395	8410	11.401	1.090	6.312	0.509	3.172	-53%	-50%		
#03 O-3 Ae06 S9000	3	3	06	9000	Level 1	0.802	7803	8.412	0.631	3.300	0.465	2.150	-26%	-35%		
#04 O-1 Ae02 S9000	4	1	02	9000	Level 1	0.672	8551	5.813	0.734	2.476	0.503	2.804	-31%	13%		
#05 O-3 Ae02 S10000	5	3	02	10000	Level 1	1.170	9402	6.940	0.537	3.585	0.416	1.998	-23%	-44%		
#06 O-3 Ae02 S8000	6	3	02	8000	Level 1	0.963	7546	4.975	0.598	3.501	0.650	3.544	9%	1%		
#07 O-1 Ae06 S8000	7	1	06	8000	Level 1	0.452	7926	3.718	1.062	5.573	0.598	2.436	-44%	-56%		
#08 O-3 Ae06 S9000	8	3	06	9000	Level 1	1.505	8468	5.975	0.753	3.798	0.483	2.530	-36%	-33%		
#09 O-1 Ae10 S9000	9	1	10	9000	Level 1	0.506	8918	4.100	0.989	5.408	0.706	3.102	-29%	-43%		
#10 O-5 Ae10 S9000	10	5	10	9000	Level 1	0.934	8247	9.505	1.153	6.677	0.868	3.865	-25%	-42%		
#11 O-5 Ae06 S10000	11	5	06	10000	Level 1	1.588	8950	8.735	1.213	6.508	0.753	3.201	-38%	-51%		
#12 O-5 Ae06 S8000	12	5	06	8000	Level 1	0.830	7528	5.570	0.707	4.345	0.815	2.342	-15%	-46%		
#13 O-3 Ae06 S9000	13	3	06	9000	Level 1	0.514	8784	5.748	0.778	4.789	0.692	3.572	-11%	-25%		
#14 O-5 Ae02 S9000	14	5	02	9000	Level 1	1.098	8772	5.514	0.953	5.235	0.694	2.157	-27%	-59%		
#15 O-3 Ae06 S9000	15	3	06	9000	Level 1	1.022	8319	7.583	1.084	5.860	0.783	2.648	-28%	-55%		
#16 O-1 Ae06 S10000	16	1	06	10000	Level 1	0.870	9771	5.365	0.738	3.609	0.787	3.753	7%	4%		
#17 O-3 Ae06 S9000	17	3	06	9000	Level 1	0.836	8408	8.010	1.210	5.693	0.681	2.463	-44%	-57%		
#16 O-1 Ae06 S10000	16	1	6	10000	Level 2	0.650	9826	4.550	0.738	3.609	0.576	2.967	-22%	-18%	-27%	-21%
#11 O-5 Ae06 S10000	11	5	6	10000	Level 2	1.569	9106	11.994	1.213	6.508	0.963	3.997	-21%	-39%	28%	25%
#03 O-3 Ae06 S9000	3	3	6	9000	Level 2	0.890	7818	8.140	0.631	3.300	0.339	2.171	-46%	-34%	-27%	1%
#05 O-3 Ae02 S10000	5	3	2	10000	Level 2				0.537	3.585						
#02 O-3 Ae10 S10000	2	3	10	10000	Level 2	1.166	8697	9.721	1.090	6.312	0.541	2.532	-50%	-60%	6%	-20%
#01 O-3 Ae10 S8000	1	3	10	8000	Level 2	0.584	7240	6.223	0.438	3.865	0.253	1.519	-42%	-61%	-2%	-20%
#08 O-3 Ae06 S9000	8	3	6	9000	Level 2	0.708	8430	5.735	0.753	3.798	0.570	2.307	-24%	-39%	18%	-9%
#13 O-3 Ae06 S9000	13	3	6	9000	Level 2	0.655	8813	5.238	0.778	4.789	0.722	3.067	-7%	-36%	4%	-14%
#04 O-1 Ae02 S9000	4	1	2	9000	Level 2	1.108	8575	5.770	0.734	2.476	0.596	2.898	-19%	17%	18%	3%
#12 O-5 Ae06 S8000	12	5	6	8000	Level 2	0.900	7593	6.212	0.707	4.345	0.799	1.654	13%	-62%	-2%	-29%
#09 O-1 Ae10 S9000	9	1	10	9000	Level 2	0.758	8918	3.414	0.989	5.408	0.612	2.358	-38%	-56%	-13%	-24%
#15 O-3 Ae06 S9000	15	3	6	9000	Level 2	1.064	8440	8.062	1.084	5.860	0.728	3.644	-33%	-38%	-7%	38%
#17 O-3 Ae06 S9000	17	3	6	9000	Level 2	0.877	8619	5.899	1.210	5.693	0.585	2.453	-52%	-57%	-14%	0%
#06 O-3 Ae02 S8000	6	3	2	8000	Level 2	0.642	7574	5.226	0.598	3.501	0.557	3.198	-7%	-9%	-14%	-10%
#10 O-5 Ae10 S9000	10	5	10	9000	Level 2	1.449	8100	9.661	1.153	6.677	0.830	3.109	-28%	-53%	-4%	-20%
#07 O-1 Ae06 S8000	7	1	6	8000	Level 2	0.305	7918	4.082	1.062	5.573	0.505	2.442	-52%	-56%	-16%	0%
#14 O-5 Ae02 S9000	14	5	2	9000	Level 2	0.500	8764	5.981	0.953	5.235	0.686	3.056	-28%	-42%	-1%	42%
#06 O-3 Ae02 S8000	6	3	2	8000	Level 3	0.964	7635	5.078	0.598	3.501	0.514	2.298	-14%	-34%	-8%	-28%
#03 O-3 Ae06 S9000	3	3	6	9000	Level 3	0.874	7826	7.716	0.631	3.300	0.470	2.906	-26%	-12%	39%	34%
#08 O-3 Ae06 S9000	8	3	6	9000	Level 3	0.798	8416	6.592	0.753	3.798	0.452	1.990	-40%	-48%	-21%	-14%
#12 O-5 Ae06 S8000	12	5	6	8000	Level 3	0.799	7506	6.799	0.707	4.345	0.660	2.484	-7%	-43%	-17%	50%
#16 O-1 Ae06 S10000	16	1	6	10000	Level 3	0.810	9826	3.457	0.738	3.609	0.733	2.213	-1%	-39%	27%	-25%
#04 O-1 Ae02 S9000	4	1	2	9000	Level 3	0.946	8588	5.740	0.734	2.476	0.636	2.883	-13%	16%	7%	-1%
#10 O-5 Ae10 S9000	10	5	10	9000	Level 3	1.588	8224	9.882	1.153	6.677	0.551	2.766	-52%	-59%	-34%	-11%
#05 O-3 Ae02 S10000	5	3	2	10000	Level 3				0.537	3.585						
#13 O-3 Ae06 S9000	13	3	6	9000	Level 3	0.686	8740	4.647	0.778	4.789	0.806	3.078	4%	-36%	12%	0%
#14 O-5 Ae02 S9000	14	5	2	9000	Level 3	0.804	8769	5.958	0.953	5.235	0.647	2.264	-32%	-57%	-6%	-26%
#15 O-3 Ae06 S9000	15	3	6	9000	Level 3	1.244	8484	8.293	1.084	5.860	0.421	2.160	-61%	-63%	-42%	-41%
#17 O-3 Ae06 S9000	17	3	6	9000	Level 3	1.026	8533	7.090	1.210	5.693	0.600	2.002	-50%	-65%	3%	-18%
#07 O-1 Ae06 S8000	7	1	6	8000	Level 3	0.337	7906	5.355	1.062	5.573	0.580	2.483	-45%	-55%	15%	2%
#09 O-1 Ae10 S9000	9	1	10	9000	Level 3	0.928	8918	3.307	0.989	5.408	0.611	2.974	-38%	-45%	0%	26%
#02 O-3 Ae10 S10000	2	3	10	10000	Level 3	1.268	8597	9.705	1.090	6.312	0.544	2.019	-50%	-68%	1%	-20%
#01 O-3 Ae10 S8000	1	3	10	8000	Level 3	0.771	7263	6.726	0.438	3.865	0.238	1.379	-46%	-64%	-6%	-9%
#11 O-5 Ae06 S10000	11	5	6	10000	Level 3	0.821	9174	10.648	1.213	6.508	0.637	3.041	-47%	-53%	-34%	-24%

Figura 5.1: Tabela obtida no excel, com os dados dos testes realizados

Avaliando as rugosidades medidas antes do polimento, é possível observar uma grande discrepância entre os valores obtidos. Este fator prejudica a qualidade dos resultados finais, pois os diferentes parâmetros vão estar a ser testados em blocos com diferentes rugosidades. Por este motivo, não serão considerados os valores de rugosidade absoluta, mas sim a percentagem de melhoramento de cada bloco. Observando superficialmente a folha de excel apresentada na figura 5.1, percebe-se que os blocos que apresentaram melhores resultados, sofreram 3 passagens. Para o parâmetro  $R_a$  a



Figura 5.2: Polimento com passo lateral de 6 mm e 10 mm

experiência com melhor resultado foi a número 15 (redução da rugosidade de 61%), e para o parâmetro  $R_z$  o bloco número 2 (redução da rugosidade de 68%). Estes blocos foram polidos com velocidades de 9000 rpm e 10000 rpm, respetivamente, e ambos deformando a escova 3 mm. De modo a melhor compreender como a variação dos parâmetro de polimento afetavam a rugosidade final de cada bloco, realizou-se uma média dos resultados obtidos de cada parâmetro, recorrendo ao auxílio do excel. Os números obtidos, estão apresentados na tabela 5.1.

Atentado na tabela 5.1, é possível observar que um maior número de passagens, permite diminuir a rugosidade da superfície polida, melhorando tanto o parâmetro  $R_a$  como o  $R_z$ . Relativamente à velocidade e à deformação da ferramenta, os resultados obtidos são menos claros, sendo apenas possível afirmar que a deformação que obteve melhores resultados gerais foi a de 3 mm.

Para cada ensaio individual, foi criada uma folha excel, onde foram inseridos os dados obtidos através do programa de aquisição de dados do sensor de forças, e do *DataLogging* do PLC. Em cada folha, foram calculados os valores médios das grandezas medidas em cada ensaio, que posteriormente foram inseridos na folha excel principal, que permitiu obter os resultados apresentados neste capítulo. Em cada folha individual foram também traçados gráficos correspondentes a cada ensaio, que podem ser consultados num repositório online (<https://bit.ly/3r1qSCC>). Nestes gráficos é possível comparar a força exercida pela ferramenta na peça, com a velocidade de rotação e o consumo de corrente do *spindle*. Estes gráficos apresentam no

Tabela 5.1: Diminuição média da rugosidade dos blocos, obtida por cada diferente parâmetro de polimento

	$R_a$	$R_z$
<b>1 passagem</b>	-25%	-37%
<b>2 passagens</b>	-29%	-40%
<b>3 passagens</b>	-32%	-45%
<b>V = 8000 rpm</b>	-22%	-45%
<b>V = 9000 rpm</b>	-31%	-39%
<b>V = 10000 rpm</b>	-30%	-42%
<b>Deformação 1 mm</b>	-27%	-26%
<b>Deformação 3 mm</b>	-33%	-44%
<b>Deformação 5 mm</b>	-23%	-50%

entanto alguns erros, devido à dificuldade que existiu em posicionar corretamente as linhas que caracterizam a corrente e a velocidade, relativamente à força exercida. Esta dificuldade deveu-se ao facto de os dados da velocidade e da corrente terem sido adquiridos com uma taxa de amostragem demasiado baixa, e num dispositivo diferente do que adquiriu os dados da força exercida. Porém, apesar desta dificuldade, os gráficos são uma excelente ajuda visual para perceber o que se passou durante os ensaios, validando os resultados obtidos. A figura 5.3 apresenta os gráficos obtidos relativamente à primeira passagem com a escova realizada no bloco 1. Nestes gráficos é possível observar um aumento da corrente consumida nos momentos em que o valor da força aumenta e uma diminuição da velocidade nesses mesmos instantes.

Com as rugosidades avaliadas, interessa agora perceber como é que os diferentes parâmetros de polimento afetam as grandezas instrumentadas, nomeadamente a força, a corrente consumida e a velocidade de rotação. Para tal, recorrendo de novo à folha excel realizaram-se as médias dos resultados obtidos de cada parâmetro, para chegar aos valores apresentados na tabela 5.2. Os dados utilizados para o cálculo destas médias foram os valores obtidos durante o polimento. Para tal realizou-se uma filtragem dos valores, para que os que foram lidos durante movimentos no vazio não fossem tidos em conta.

Observando os dados expostos na tabela 5.2 verifica-se que como esperado, o número de passagens não afeta os valores das grandezas medidas. Com base na informação obtida anteriormente da tabela 5.1, de que um

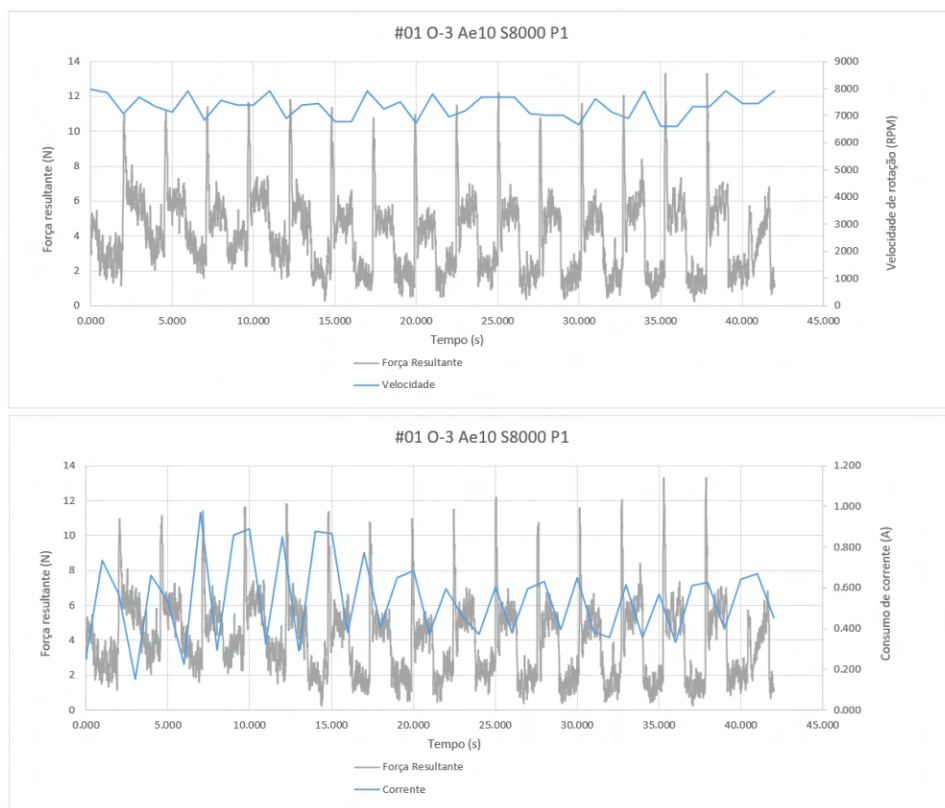


Figura 5.3: Gráficos representativos dos resultados obtidos na primeira passagem no bloco 1

maior número de passagens se traduz numa redução da rugosidade da superfície, é possível então concluir que nenhuma das grandezas varia (pelo menos de forma óbvia), com a variação da rugosidade da superfície da peça polida.

Relativamente à velocidade, tal como esperado, quanto maior a rotação, maior o consumo de corrente por parte do *spindle*. Quanto maior a velocidade de rotação inicial, também maior é a redução da velocidade durante o polimento, correspondendo às 8000 rpm uma redução de 5.35%, às 9000 rpm uma redução de 5.66% e por fim às 10000 rpm, a redução de velocidade registada é de 8.24%. A força aplicada na peça é também maior, quanto maior a rotação. Isto é explicado pelo aumento do atrito e do esforço de corte com o aumento da velocidade de rotação.

Variando a deformação da escova, é possível observar que quanto maior esta for, maior será a força aplicada na superfície da peça. Maiores valores de deformação da ferramenta, originam também maiores consumos de corrente por parte do *spindle*. Deste modo, é possível afirmar que quanto maior for a força aplicada pela ferramenta na superfície da peça, maior será

Tabela 5.2: Diminuição média da rugosidade dos blocos, obtida por cada diferente parâmetro de polimento

	Corrente A	V rotação rpm	Força N
<b>1 passagem</b>	0.93	8413	6.69
<b>2 passagens</b>	0.86	8402	6.62
<b>3 passagens</b>	0.92	8400	6.69
<b>V = 8000 rpm</b>	0.68	7572	5.52
<b>V = 9000 rpm</b>	0.92	8491	6.58
<b>V = 10000 rpm</b>	1.13	9176	8.25
<b>Deformação 1 mm</b>	0.70	8803	4.56
<b>Deformação 3 mm</b>	0.93	8238	7.12
<b>Deformação 5 mm</b>	1.07	8394	8.04

a corrente consumida pelo *spindle*. A redução da velocidade de rotação está também diretamente relacionada com o valor de deformação da escova. O valor médio da velocidade de rotação nos ensaios realizados para cada valor de deformação, foi igual para todos, nomeadamente 9000 rpm. Percebe-se assim que para o valor de deformação da escova de 1 mm, a velocidade de rotação média foi de 8803 rpm, o que se traduz numa redução de 2.19%, relativamente ao valor médio de rotação inicial. Já para a deformação de 3 mm e 5 mm, a redução da velocidade é contra intuitiva, correspondendo a 8.47% e 6.73% respetivamente. No entanto, estes resultados podem ser explicados por um facto enunciado na secção 4.3, nomeadamente o tipo de entrada da ferramenta nos 13 primeiros ensaios, que ao entrar em contacto com a aresta da peça, a força exercida nesse momento era maior que durante o processo normal de polimento, e conseqüentemente a redução da velocidade mais notória. Este facto afeta diretamente a relação do parâmetro deformação da ferramenta com as grandezas instrumentadas, pois destes 13 ensaios, 10 deles foram realizados com uma deformação da ferramenta de 3 mm, 3 com deformação de 1 mm, e nenhum com deformação de 5 mm. Presume-se então que, à semelhança da redução de velocidade de rotação, os valores das outras duas grandezas assumam valores nesta tabela ligeiramente mais elevados que o que deveriam assumir na realidade.

Recorrendo ainda à folha excel apresentada na figura 5.1, foi possível calcular uma equação que relaciona o consumo de corrente do *spindle*, com a força aplicada pelo mesmo, por regressão linear a partir de todos os resultados. Com esta fórmula é possível prever a força que a escova aplica na superfície do bloco polido com base no consumo de corrente registado. Na figura 5.4, é possível observar esta fórmula, e o respetivo gráfico que a

originou. O valor de ( $R^2$ ) baixo, entre outros fatores que serão explicados no próximo capítulo, justifica-se pela realização de ensaios com diferentes velocidades.

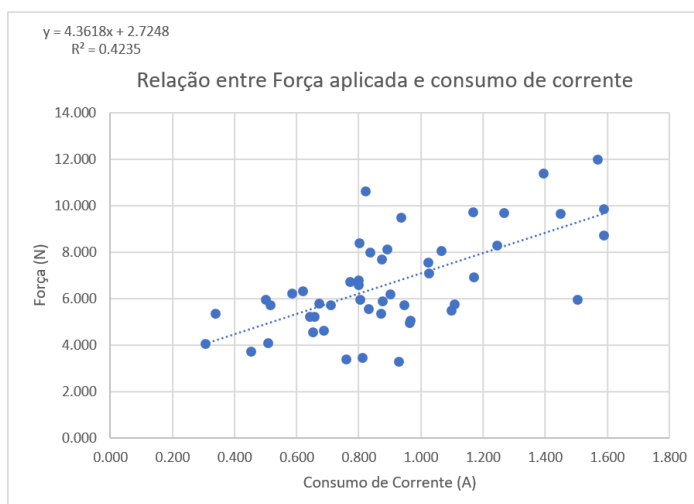


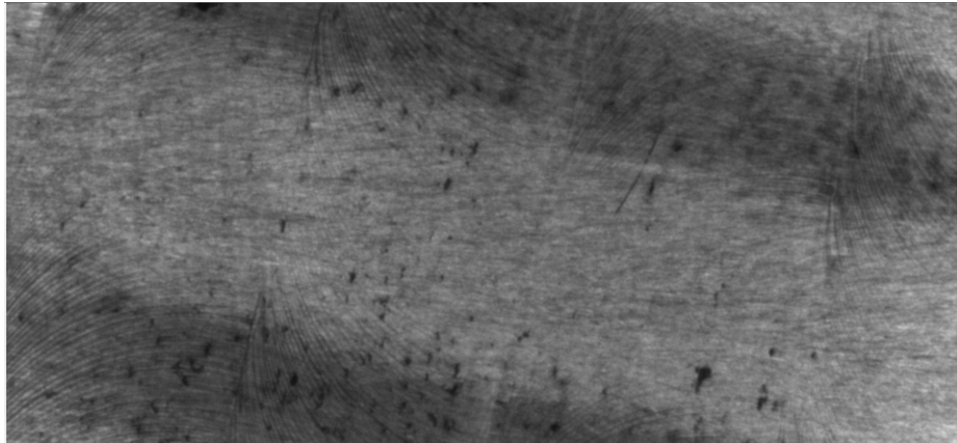
Figura 5.4: Relação calculada entre força aplicada e corrente consumida

Avaliando agora as imagens retiradas com a câmara, a figura 5.5 apresenta uma comparação entre a superfície do bloco 1 com a do bloco 2.

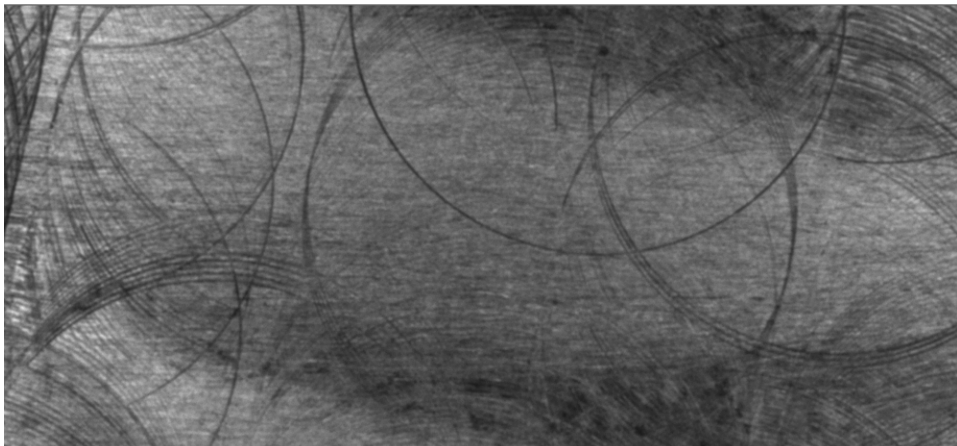
Como é possível ver na figura 5.2, que também apresenta os blocos 1 e 2 (bloco 1 à esquerda, e 2 à direita), o passo lateral de 10 mm utilizado em ambos, proporciona a que existam locais do bloco que a escova não alcança. Esta zona é fácil de detetar na imagem por ser mais escura, e no bloco 1 é possível ainda observar uma redução no número de riscos com perfil circular presente na zona polida, relativamente aos riscos encontrados na zona não polida. Já no bloco 2, os riscos são tão profundos que, além da cor, não é possível detetar diferenças entre a zona polida e não polida. Estes riscos são tão evidentes, que são até detetáveis na figura 5.2, tornando notória a discrepância na rugosidade dos blocos, ainda antes do polimento.

O bloco 5, representado por duas imagens retiradas de diferentes locais na figura 5.6, é também um bom exemplo das irregularidades da maquinação.

A zona 2, à vista desarmada, apresenta uma qualidade superficial superior à zona 1, afirmação que é validada pelas medições realizadas com o rugosímetro. No entanto, é notória a diferença de rugosidade registada entre zonas da mesma peça, que foram expostas aos mesmos parâmetros de acabamento. Por outro lado, a figura 5.6 permite provar que a análise de imagens ampliadas da superfície das peças, proporciona informação relevante, relativamente à qualidade superficial das mesmas.

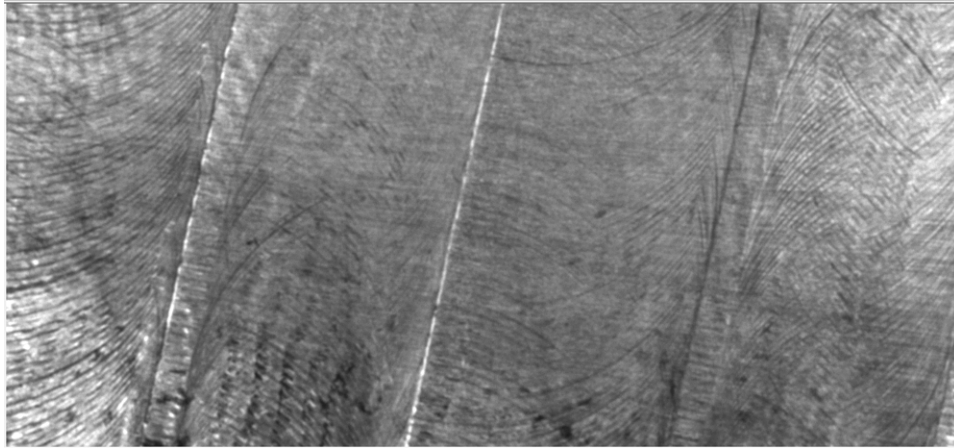


(a) Bloco 1



(b) Bloco 2

Figura 5.5: Imagens retiradas com a câmara dos Blocos 1 e 2



(a) Bloco 5 polido zona 1 ( $R_a=0.636$  e  $R_z=3.687$ )



(b) Bloco 5 polido zona 2 ( $R_a=0.442$  e  $R_z=2.188$ )

Figura 5.6: Imagens retiradas com a câmara de diferentes zonas do bloco 5



## Capítulo 6

# Conclusões

*Considerações finais, onde são realizados comentários ao trabalho desenvolvido e apresentadas as conclusões retiradas. Este capítulo possui ainda propostas de trabalhos futuros.*

O trabalho desenvolvido ao longo deste projeto culminou nos resultados apresentados no capítulo anterior. Este trabalho permitiu:

- Identificar sensores de baixo custo e desenvolver uma solução de instrumentação do consumo de corrente e velocidade de rotação do *spindle*;
- Obter um programa de PLC capaz de ler as grandezas físicas medidas pelos sensores instalados e guardar os dados adquiridos num *web server*;
- Relacionar a corrente consumida com a força de polimento;
- Avaliar a resposta do polimento com diferentes parâmetros de trabalho, possibilitando a otimização de parâmetros;
- Validar a utilização de um sistema de visão para controlo de qualidade

Os resultados não foram totalmente ao encontro do esperado, devido a alguns problemas detetados ao longo do desenvolvimento do trabalho, nomeadamente a pouca precisão apresentada pelo sensor de corrente, e a grande discrepância detetada na rugosidade dos blocos preparados para o ensaio, não só devido à maquinação, mas também devido ao facto de a produção destes blocos ter sido realizada algumas semanas antes dos primeiros ensaios, o que originou que as suas superfícies sofressem uma oxidação bastante evidente. Outro problema que também afetou a qualidade dos dados adquiridos relativamente ao consumo de corrente do *spindle*, e à velocidade de rotação da escova durante o polimento, foi o facto da taxa de atualização escolhida

ter sido de 1 segundo. Este fator não permitiu assim a obtenção de informações mais completas, relativamente ao controlo destas grandezas durante o polimento.

Na escolha dos parâmetros de polimento, a seleção dos valores de passo lateral não foi a melhor, considerando-se que talvez, existissem outros parâmetros a controlar que pudessem eventualmente vir a ser mais interessantes de avaliar do que o passo lateral, nomeadamente a velocidade de avanço da ferramenta. A velocidade de rotação, apesar de ser um parâmetro de extrema importância no polimento, poderia ter tido mais impacto no resultado final, se o intervalo de valores selecionado fosse mais abrangente. No entanto, devido às limitações do *spindle* (velocidade de rotação mínima 8000 RPM) e da escova (velocidade de rotação máxima sugerida pelo fabricante 10000 RPM), não foi possível aumentar a diferença entre a velocidade mínima e máxima.

O desgaste da ferramenta foi também um fator relevante para o resultado final do projeto. A solução encontrada para diminuir este desgaste, apesar de ser vantajosa em contexto laboratorial, não é uma alternativa viável em contexto real. Uma boa alternativa seria a realização de um estudo prévio da geometria da superfície, para que ao gerar trajetórias com o *RobotStudio* fosse possível aumentar o tempo de vida da ferramenta ao reduzir o seu contacto com as arestas, gerando uma trajetória em que a ferramenta realizasse as entradas na peça em superfícies planas e as saídas pelas arestas.

Apesar de todos os problemas detetados, foi possível relacionar a corrente consumida com a força aplicada pela ferramenta na superfície dos blocos de ensaio, representando esta relação numa fórmula, obtida através de todos os ensaios realizados. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é relativamente baixo, mas corrigindo os problemas identificados anteriormente, considera-se que pode atingir um coeficiente de determinação significativo.

Relativamente à utilização de uma câmara para observar a qualidade da superfície dos blocos, durante este projeto esse tema acabou por não ser a prioridade principal, tendo sido as imagens obtidas utilizadas apenas para visualização do estado da superfície pelo olho humano. No entanto, com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados sobre este tema, considera-se que a ideia tem potencial, e pode ser desenvolvida de modo a que o computador seja capaz de avaliar a qualidade superficial da superfície polida, com base nas imagens obtidas por uma câmara semelhante à utilizada.

Para trabalhos futuros relacionados com este projeto, a prioridade passa por solucionar os problemas enunciados neste capítulo, recorrendo a um sensor de corrente mais preciso e reduzindo as taxas de atualização no programa do PLC para no mínimo 10 leituras por segundo. Corrigindo estes detalhes, o coeficiente de determinação da função obtida será com certeza bastante melhor. A obtenção de uma função que relacione o consumo de corrente com a força aplicada pela ferramenta com um coeficiente de determinação elevado, permitiria assim que os dispendiosos sensores de forças presentes

nas células de polimento automatizado fossem substituídos por um controle baseado nesta função. Relativamente à seleção dos parâmetros ideais de polimento, especificamente para o *spindle* utilizado neste projeto, o controle da velocidade de avanço, ao invés do passo lateral, e a utilização de blocos de ensaio com valores de rugosidade uniformes ao longo de todo o bloco e semelhantes entre si, permitiria perceber os parâmetros ideais de forma mais fácil. A utilização de outras ferramentas além da escova, seria também bastante proveitosa. Por fim, um projeto apenas focado na utilização de visão industrial para a caracterização da superfície de uma peça, poderia também trazer grandes avanços tecnológicos a este tema. Estas 3 tarefas permitiriam melhorar os resultados obtidos neste projeto, e seriam sem dúvida uma mais-valia para o estudo da automatização do polimento mecânico.

# Bibliografia

- [1] E. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. Maksoud, I. M. Elewa, and H. Soliman, “Roughness parameters,” *Journal of materials processing Technology*, vol. 123, no. 1, pp. 133–145, 2002.
- [2] D.-H. Lee and N.-G. Cho, “Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer,” *Measurement science and technology*, vol. 23, no. 10, p. 105601, 2012.
- [3] “Como funciona a interferometria?” <https://www.renishaw.com.br/pt/como-funcionam-os-sistemas-interferometricos-38612>. Accessed: 2022-01-21.
- [4] *Polishing Of UDDEHOLM Mould Steel*. UDDEHOLMS AB, 6 ed., 2016.
- [5] International-Standards-Organization, “Geometrical product specifications (gps) — indication of surface texture in technical product documentation,” 2002.
- [6] E. A. Brandes and G. Brook, *Smithells metals reference book*. Elsevier, 2013.
- [7] L. Blunt, “Introduction: the history and current state of 3d surface characterisation,” in *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards* “Surfstand”, Elsevier Inc., 2003.
- [8] T. Kenton, “The future of mechanical surface finishing,” *Metal Finishing*, vol. 107, no. 5, pp. 22–24, 2009.
- [9] R. Yi, Y. Zhang, X. Zhang, F. Fang, and H. Deng, “A generic approach of polishing metals via isotropic electrochemical etching,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 150, p. 103517, 2020.
- [10] M. Sedlaček, B. Podgornik, and J. Vižintin, “Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear,” *Wear*, vol. 266, no. 3-4, pp. 482–487, 2009.

- [11] E. d. S. R. Freitas, *Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2006.
- [12] A. Ghosh and F. Sadeghi, “A novel approach to model effects of surface roughness parameters on wear,” *Wear*, vol. 338, pp. 73–94, 2015.
- [13] I. N. Bobrovskij, “How to select the most relevant roughness parameters of a surface: Methodology research strategy,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 302, p. 012066, jan 2018.
- [14] M. Sedlaček, B. Podgornik, and J. Vižintin, “Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear,” *Wear*, vol. 266, no. 3-4, pp. 482–487, 2009.
- [15] K. Manesh, B. Ramamoorthy, and M. Singaperumal, “Numerical generation of anisotropic 3d non-gaussian engineering surfaces with specified 3d surface roughness parameters,” *Wear*, vol. 268, no. 11-12, pp. 1371–1379, 2010.
- [16] P. Saravanakumar, K. Manesh, M. Singaperumal, and B. Ramamoorthy, “Modelling of fluid continuum considering 3d surface parameters in hydraulic assemblies,” *Precision engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 99–106, 2009.
- [17] R. Deltombe, K. Kubiak, and M. Bigerelle, “How to select the most relevant 3d roughness parameters of a surface,” *Scanning: The Journal of Scanning Microscopies*, vol. 36, no. 1, pp. 150–160, 2014.
- [18] T. Enomae and P. LePoutre, “Stylus profilometry: marking by the stylus,” *TAPPI J*, vol. 78, pp. 173–176, 1995.
- [19] S. Vicenzi, “Laboratório caseiro: Interferômetro de michelson,” *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 18, no. 1, pp. 108–116, 2001.
- [20] J. C. Wyant, “White light interferometry,” in *Holography: A Tribute to Yuri Denisyuk and Emmett Leith*, vol. 4737, pp. 98–107, International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [21] G. D. Babu, K. S. Babu, and B. U. M. Gowd, “Evaluation of surface roughness using machine vision,” in *INTERACT-2010*, pp. 220–223, IEEE, 2010.
- [22] G. A. Al-Kindi and B. Shirinzadeh, “Feasibility assessment of vision-based surface roughness parameters acquisition for different types of machined specimens,” *Image and Vision Computing*, vol. 27, no. 4, pp. 444–458, 2009.

- [23] B. Cuka, M. Cho, and D.-W. Kim, "Vision-based surface roughness evaluation system for end milling," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 31, no. 8, pp. 727–738, 2018.
- [24] S. I. Chang and J. S. Ravathur, "Computer vision based non-contact surface roughness assessment using wavelet transform and response surface methodology," *Quality Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 435–451, 2005.
- [25] G. A. Al-Kindi and B. Shirinzadeh, "An evaluation of surface roughness parameters measurement using vision-based data," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3-4, pp. 697–708, 2007.
- [26] H. Shahabi and M. Ratnam, "Noncontact roughness measurement of turned parts using machine vision," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 1-4, pp. 275–284, 2010.
- [27] G. Al-Kindi and H. Zughaer, "An approach to improved cnc machining using vision-based system," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 7, pp. 765–774, 2012.
- [28] P. Benardos and G.-C. Vosniakos, "Predicting surface roughness in machining: a review," *International journal of machine tools and manufacture*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.
- [29] "Surface finishing: The essential guide for busy people." <https://blog.robotiq.com/surface-finishing-the-essential-guide-for-busy-people>. Accessed: 2022-03-16.
- [30] "Surface finishing basics." [https://fractory.com/surface-finishing-basics/What\\_Is\\_a\\_Surface\\_Finish](https://fractory.com/surface-finishing-basics/What_Is_a_Surface_Finish). Accessed : 2022 – 03 – 16.
- [31] "4 types of surface finishes and when to use them." <https://www.designnews.com/automation/4-types-surface-finishes-and-when-use-them>. Accessed: 2022-03-16.
- [32] J.-Y. Lee, A. P. Nagalingam, and S. Yeo, "A review on the state-of-the-art of surface finishing processes and related iso/astm standards for metal additive manufactured components," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 16, no. 1, pp. 68–96, 2021.
- [33] "Galvanização." <https://www.infoescola.com/quimica/galvanizacao/>. Accessed: 2022-03-17.
- [34] "Galvanização eletrolítica: o que é e como é feita?." <https://www.aparecidatubos.com.br/blog/galvanizacao-eletrolitica-o-que-e-e-como-e-feita/>. Accessed: 2022-03-17.

- [35] “Processo de galvanização testado e comprovado.” <https://galvaza.pt/processo-galvanizacao/>. Accessed: 2022-03-17.
- [36] “Electrochemistry encyclopedia.” <https://web.archive.org/web/20080712222411/http://electrochem.cwru.edu/ed/encycl/index.html>. Accessed: 2022-03-22.
- [37] “Anodização.” <https://www.grupososoaes.pt/pt/caixilharia/servico/anodizacao-sosoaes>. Accessed: 2022-03-22.
- [38] “Anodização “o processo de anodização permite uma combinação perfeita entre acabamento de qualidade, proteção à corrosão e durabilidade dos materiais.” <https://www.termolaca.pt/servicos/anodizacao/>. Accessed: 2022-03-22.
- [39] S. MOCHNACZ, “Autor,”
- [40] C. Gnecco, R. Mariano, and F. Fernandes, *Tratamento de Superfície e Pintura*. 2003.
- [41] “How does polishing surface finish work?.” <https://www.rapidirect.com/blog/polishing-surface-finish/>. Accessed: 2022-03-17.
- [42] A. Dickman Jr, “The science of scratches—polishing and buffing mechanical surface preparation,” *Metal Finishing*, vol. 105, no. 10, pp. 13–29, 2007.
- [43] E. Kalt, R. Monfared, and M. Jackson, “Towards an automated polishing system: Capturing manual polishing operations,” 2016.
- [44] L. Liao and F. Xi, “A linearized model for control of automated polishing process,” in *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005.*, pp. 986–991, IEEE, 2005.
- [45] E. Kalt, R. Monfared, and M. Jackson, “Development of an intelligent automated polishing system,” 2016.
- [46] A. Karmakar, S. Chakraborty, U. Mandal, and S. Das, “An experimental investigation on chemical deburring to remove drilling burr,” *strategies*, vol. 1, p. 12, 2013.
- [47] E. Łyczkowska, P. Szymczyk, B. Dybała, and E. Chlebus, “Chemical polishing of scaffolds made of ti-6al-7nb alloy by additive manufacturing,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 586–594, 2014.

- [48] Health and S. Executive, “Safety in the use of abrasive wheels,” *HSE Books*, 2000.
- [49] W. Bolton, *Instrumentation and Control Systems*. Elsevier, 2004.
- [50] R. H. B. Richard C. Dorf, *Modern Control Systems*. Pearson, 30th ed.
- [51] P. Fonseca, *Sistemas de Instrumentação Eletrónica*. Editado com a contribuição do Ramo Estudantil da Universidade de Aveiro do IEEE, 2020/21.
- [52] R. C. Sá, “Construção, modelagem dinâmica e controle pid para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero,” 2012.
- [53] M. A. Haidekker, *Linear feedback controls: the essentials*. Elsevier, 2020.
- [54] Y. Bai, H. Zhuang, and D. Wang, *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*. Springer, 2006.
- [55] F. Gomide, R. R. Gudwin, and R. Tanscheit, “Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações,” in *Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials*, vol. 59, pp. 1–38, 1995.
- [56] R.-E. Precup and H. Hellendoorn, “A survey on industrial applications of fuzzy control,” *Computers in industry*, vol. 62, no. 3, pp. 213–226, 2011.
- [57] M. Gouda, S. Danaher, and C. Underwood, “Fuzzy logic control versus conventional pid control for controlling indoor temperature of a building space,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 33, no. 24, pp. 249–254, 2000.
- [58] ATI Industrial Automation, *Six-Axis Force/Torque Sensor System - Installation and Operation Manual*.
- [59] M. Stoica, F. Sisak, and A. Morosan, “Reinforcement learning algorithm for industrial robot programming by demonstration,” in *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 1517–1524, IEEE, 2012.
- [60] M. Rososhansky, F. Xi, and Y. Li, “Coverage based tool path planning for automated polishing using contact stress theory,” in *2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 592–597, IEEE, 2010.
- [61] J. Márquez, J. Pérez, J. Rios, and A. Vizán, “Process modeling for robotic polishing,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, no. 1, pp. 69–82, 2005.



- [62] F. Tian, C. Lv, Z. Li, and G. Liu, “Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 14, pp. 55–64, 2016.
- [63] “Simatic s7 s7-1200 programmable controller - operation of the high-speed counter.” <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/107623221?c=72229930763lc=el-GR>. Accessed: 2022-07-11.
- [64] ABB, *Directions for use Machining Powerpack*. ABB.

Apêndice A

Programa PLC

## HSC\_V15\_V15 / PLC\_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### Main [OB1]

#### Main Properties

##### General

Name	Main	Number	1	Type	OB
Language	LAD	Numbering	Automatic		

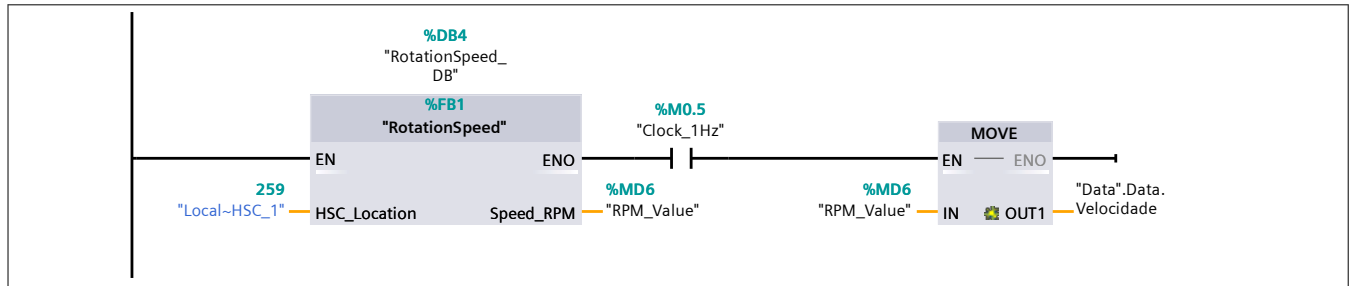
##### Information

Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

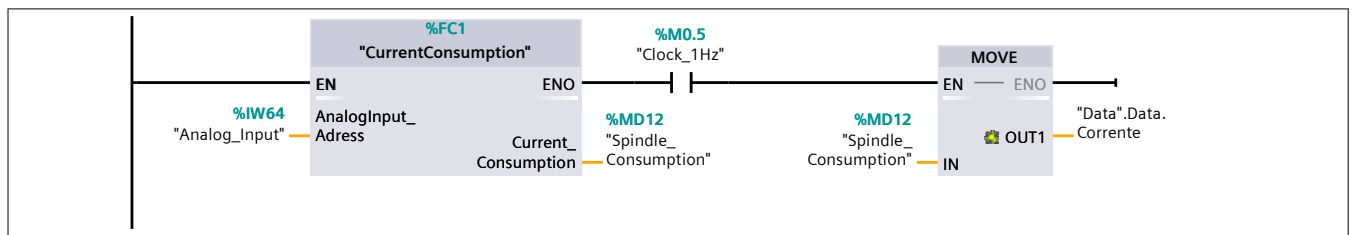
#### Main

Name	Data type	Default value	Comment
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Remanence	Bool		=True, if remanent data are available
Temp			
Constant			

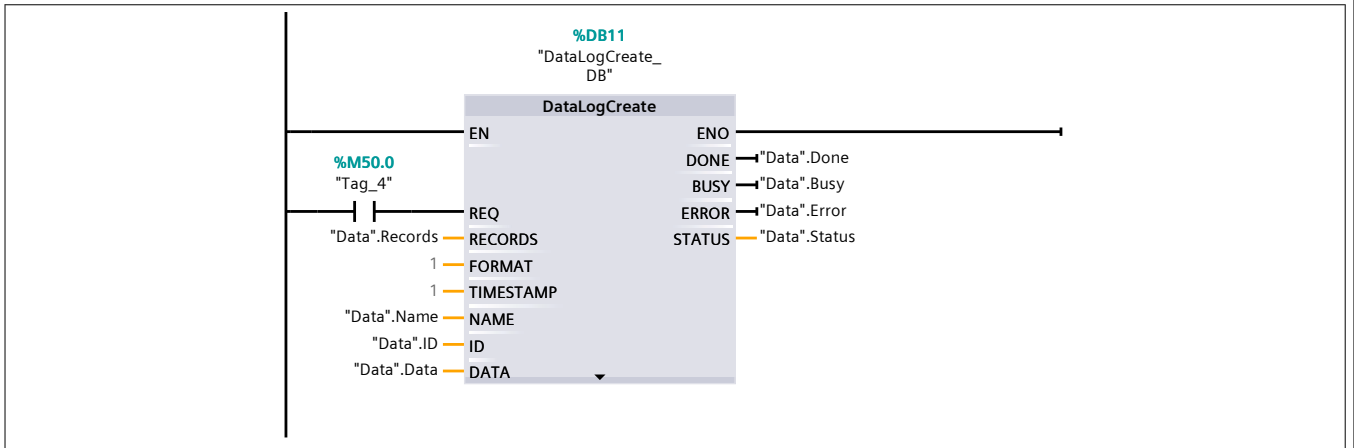
#### Network 1:



#### Network 2:



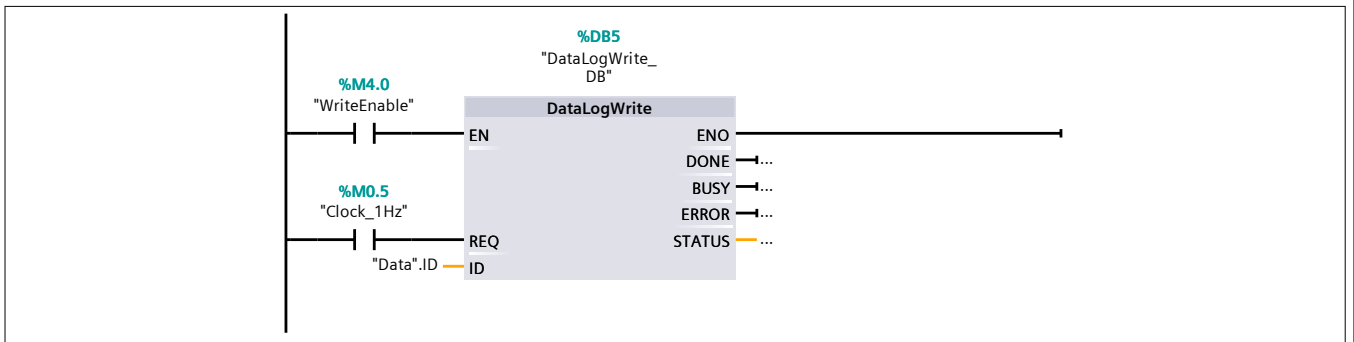
#### Network 3:



**Network 4:**



**Network 5:**



## HSC\_V15\_V15 / PLC\_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### CurrentConsumption [FC1]

#### CurrentConsumption Properties

##### General

Name	CurrentConsumption	Number	1	Type	FC
Language	LAD	Numbering	Automatic		

##### Information

Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

#### CurrentConsumption

Name	Data type	Default value	Comment
▼ Input			
AnalogInput_Adress	Int		
▼ Output			
Current_Consumption	Real		
InOut			
▼ Temp			
Temp1	Real		
Temp1^2	Real		
4E-07x^2	Real		
0,0002x	Real		
Temp2	Real		
Constant			
▼ Return			
CurrentConsumption	Void		

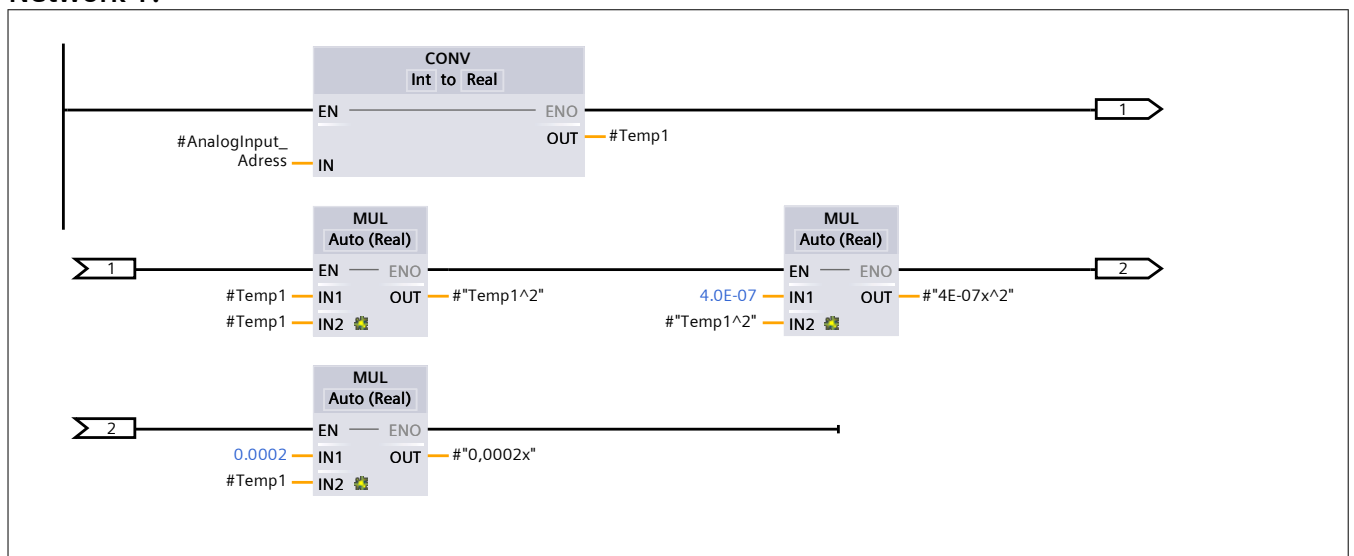
#### Network 1:

Para o max do scale, usar a formula que esta no relatorio  $I = Vout / 0,9845$

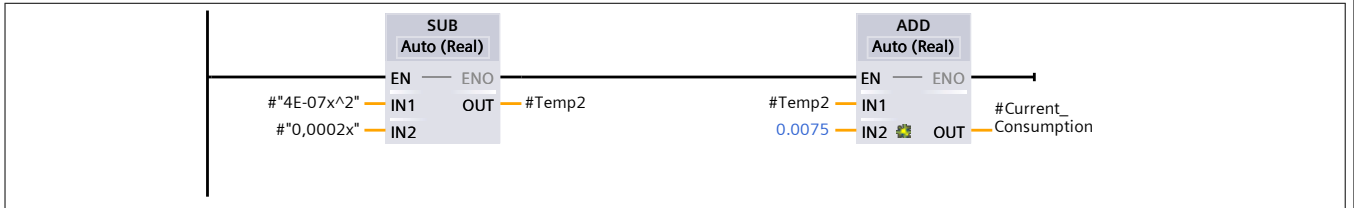
Isto porque, é o valor de corrente que corresponderia aos 10V, que é o valor máximo que a entrada analógica consegue ler, correspondente com os 27648 bits

Usa-se a expressão obtida no excel para calibrar o sensor

#### Network 1:



**Network 2:**



## HSC\_V15\_V15 / PLC\_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### RotationSpeed [FB1]

#### RotationSpeed Properties

##### General

Name	RotationSpeed	Number	1	Type	FB
Language	LAD	Numbering	Automatic		

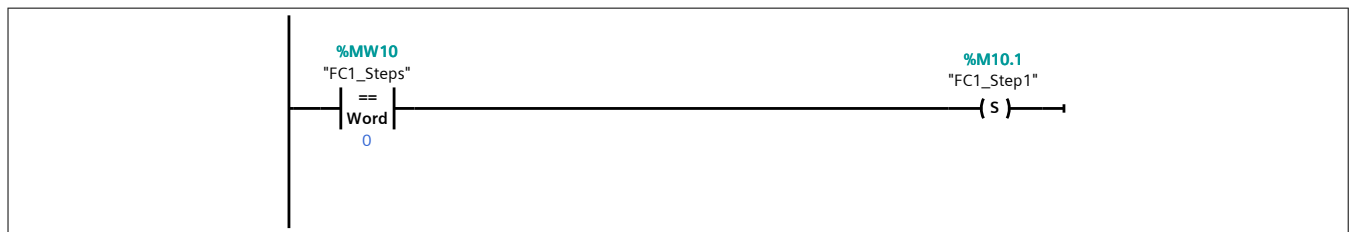
##### Information

Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

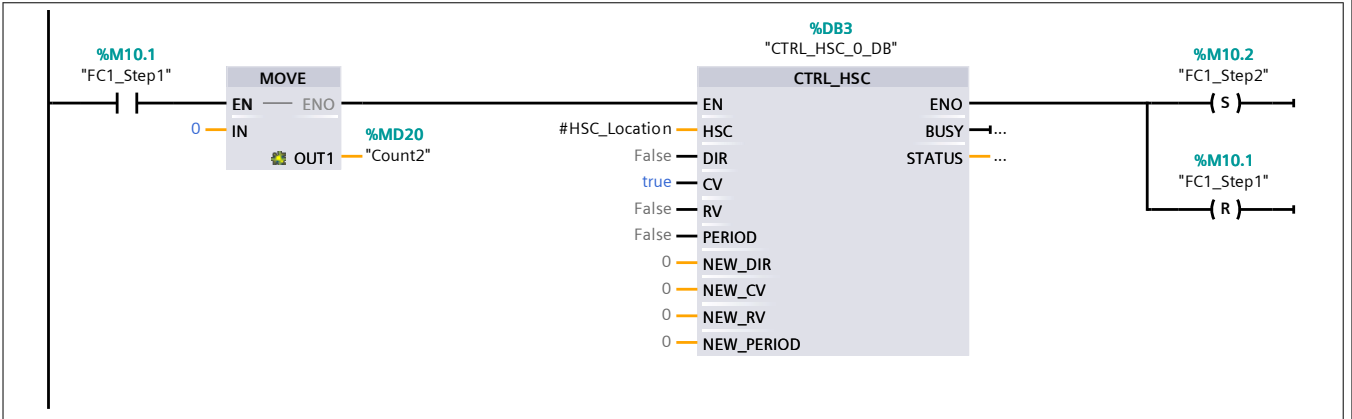
#### RotationSpeed

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writable from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Set-point	Supervision	Comment
▼ Input									
HSC_Location	HW_HSC	0	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
Speed_RPM	DWord	16#0	Retain	True	True	True	False		
InOut									
Static									
Temp									
Constant									

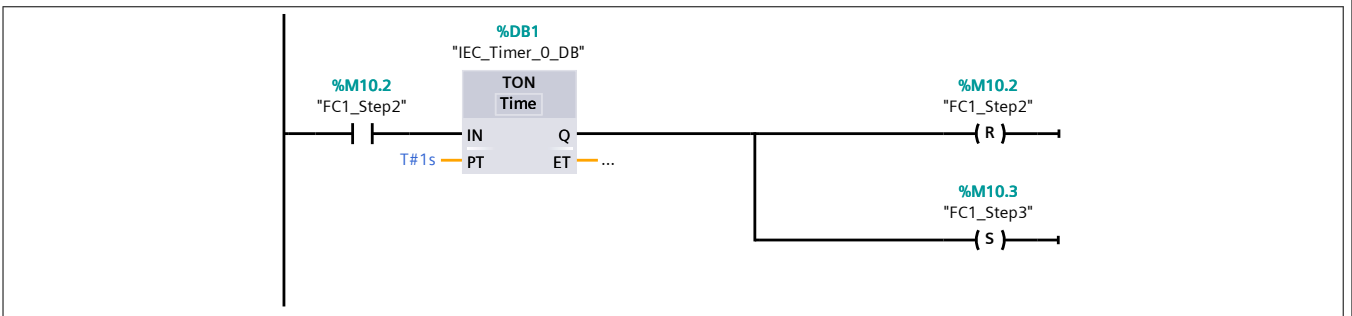
#### Network 1:



#### Network 2:



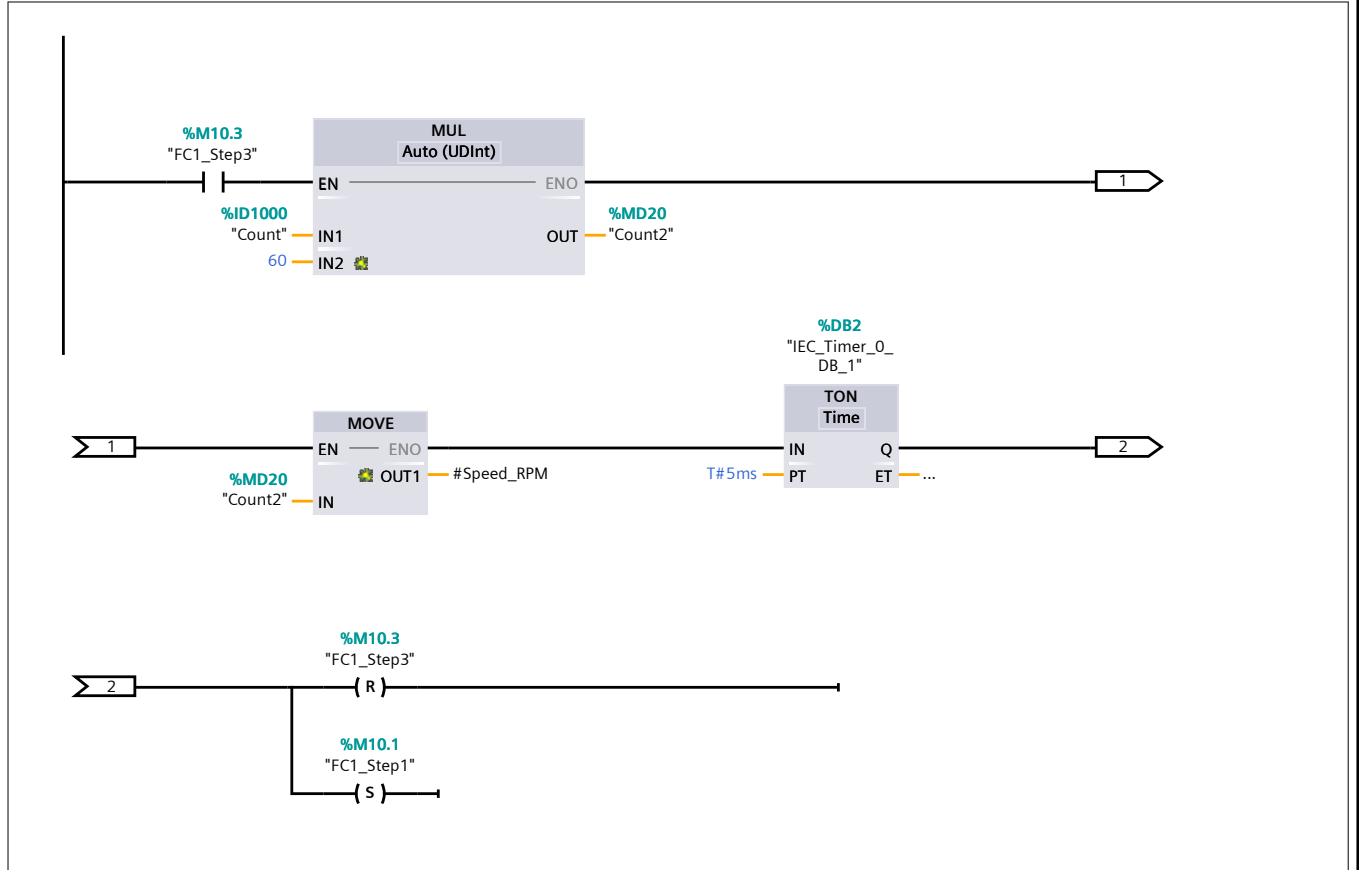
**Network 3:**



**Network 4:**



Network 4:



## HSC\_V15\_V15 / PLC\_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### Data [DB9]

#### Data Properties

##### General

Name	Data	Number	9	Type	DB
Language	DB	Numbering	Automatic		

##### Information

Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	



































#### Data

Name	Data type	Start value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writable from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Set-point	Supervision	Comment
▼ Static									
Records	UDInt	2000	False	True	True	True	False		
Name	String	'Test1'	False	True	True	True	False		
ID	DWord	1	False	True	True	True	False		
Headers	String	'Corrente, Velocidade'	False	True	True	True	False		
▼ Data	Struct		False	True	True	True	False		
Corrente	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Velocidade	DWord	16#0	False	True	True	True	False		
Done	Bool	false	False	True	True	True	False		
Busy	Bool	false	False	True	True	True	False		
Error	Bool	false	False	True	True	True	False		
Status	Word	16#0	False	True	True	True	False		
RPM	DWord	16#0	False	True	True	True	False		
Current	Real	0.0	False	True	True	True	False		



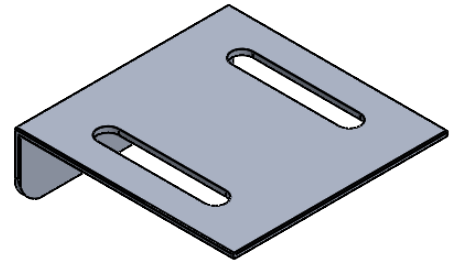
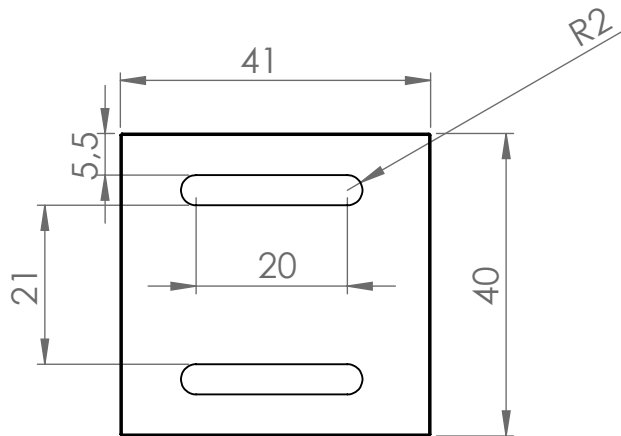
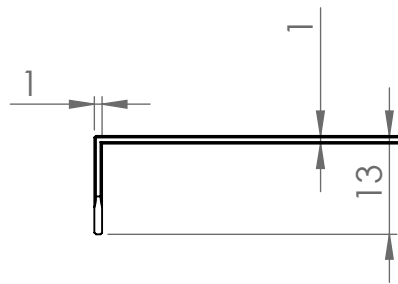
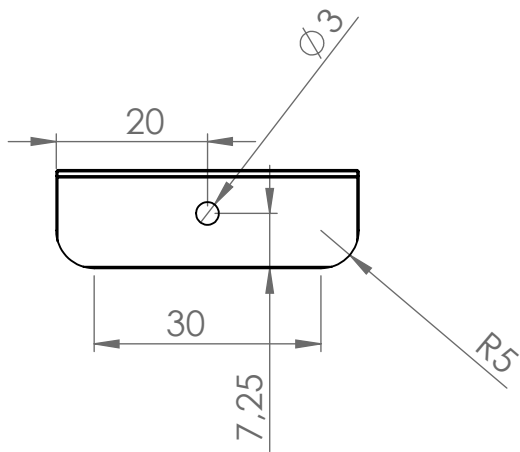
## HSC\_V15\_V15 / PLC\_1 [CPU 1214C DC/DC/DC]

### PLC tags

Name	Data type	Address	Retain	Access- ible from HMI/O PC UA	Writa- ble from HMI/O PC UA	Visi- ble in HMI engi- neer- ing	Supervision	Comment
 Count	DWord	%ID1000	False	True	True	True		
 Count2	DWord	%MD20	False	True	True	True		
 FC1_Step1	Bool	%M10.1	False	True	True	True		
 FC1_Step2	Bool	%M10.2	False	True	True	True		
 FC1_Step3	Bool	%M10.3	False	True	True	True		
 RPM_Value	DWord	%MD6	False	True	True	True		
 FC1_Steps	Word	%MW10	False	True	True	True		
 Analog_Input	Word	%IW64	False	True	True	True		
 Spindle_Consump- tion	Real	%MD12	False	True	True	True		
 TCON_Req	Bool	%M16.0	False	True	True	True		
 TDISC_Req	Bool	%M16.1	False	True	True	True		
 TSEND_Req	Bool	%M16.2	False	True	True	True		
 Tag_1	Bool	%Q0.5	False	True	True	True		
 Tag_2	Bool	%Q0.6	False	True	True	True		
 Tag_3	Bool	%I0.1	False	True	True	True		
 System_Byte	Byte	%MB1	False	True	True	True		
 FirstScan	Bool	%M1.0	False	True	True	True		
 DiagStatusUpdate	Bool	%M1.1	False	True	True	True		
 AlwaysTRUE	Bool	%M1.2	False	True	True	True		
 AlwaysFALSE	Bool	%M1.3	False	True	True	True		
 WriteEnable	Bool	%M4.0	False	True	True	True		
 Clock_Byte	Byte	%MB0	False	True	True	True		
 Clock_10Hz	Bool	%M0.0	False	True	True	True		
 Clock_5Hz	Bool	%M0.1	False	True	True	True		
 Clock_2.5Hz	Bool	%M0.2	False	True	True	True		
 Clock_2Hz	Bool	%M0.3	False	True	True	True		
 Clock_1.25Hz	Bool	%M0.4	False	True	True	True		
 Clock_1Hz	Bool	%M0.5	False	True	True	True		
 Clock_0.625Hz	Bool	%M0.6	False	True	True	True		
 Clock_0.5Hz	Bool	%M0.7	False	True	True	True		
 Tag_4	Bool	%M50.0	False	True	True	True		
 Tag_5	DWord	%MD60	False	True	True	True		
 Tag_6	Bool	%I0.0	False	True	True	True		
 Tag_7	Bool	%Q0.0	False	True	True	True		

## Apêndice B

# Desenhos técnicos das peças fabricadas



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

Quantity

1

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Universidade de Aveiro

TITLE:

SuporteLuz1

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	João Vicente		19/08/22
CHK'D	João Vicente		19/08/22
APPV'D			
MFG			
Q.A			

MATERIAL:

DWG NO.

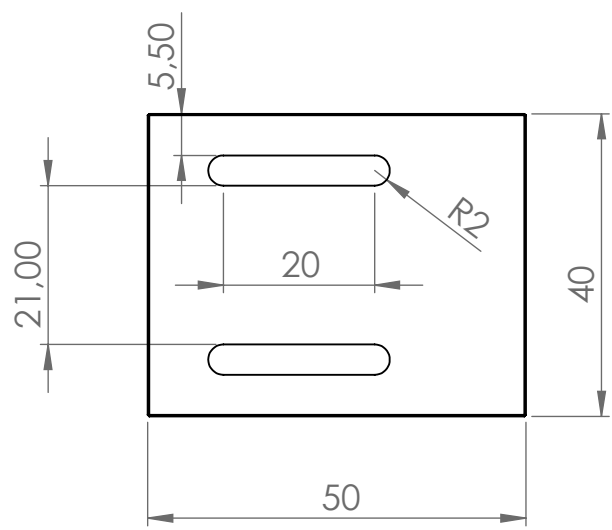
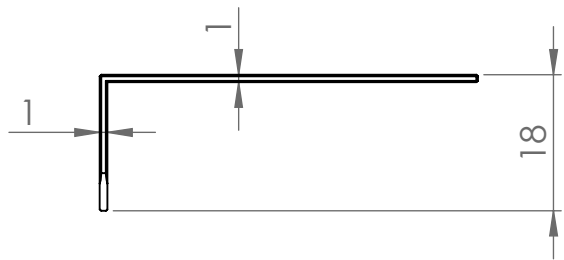
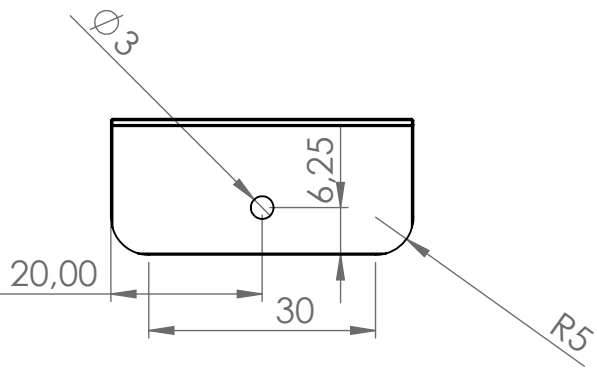
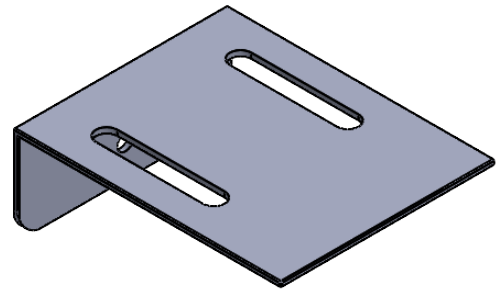
001

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

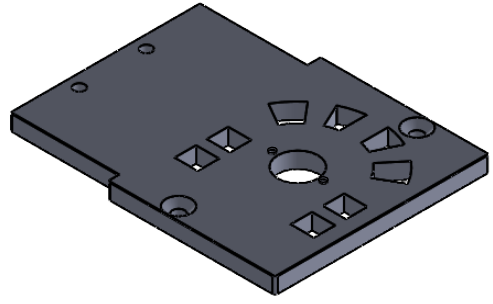


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			Quantity  1		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
							<b>Universidade de Aveiro</b>				
							<b>SuporteLuz2</b>				
							TITLE:				
							DWG NO. <b>002</b>				
							SCALE:1:1				
							SHEET 1 OF 1				
							A4				

4 3 2 1

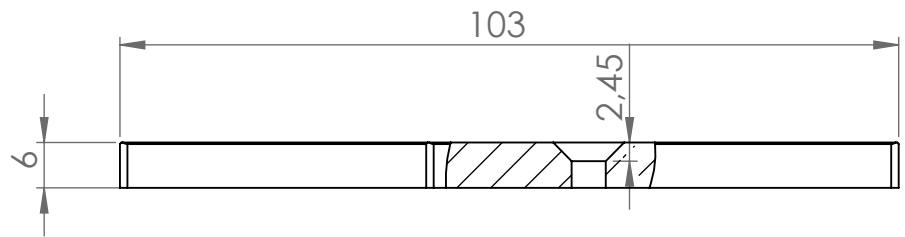
F

F



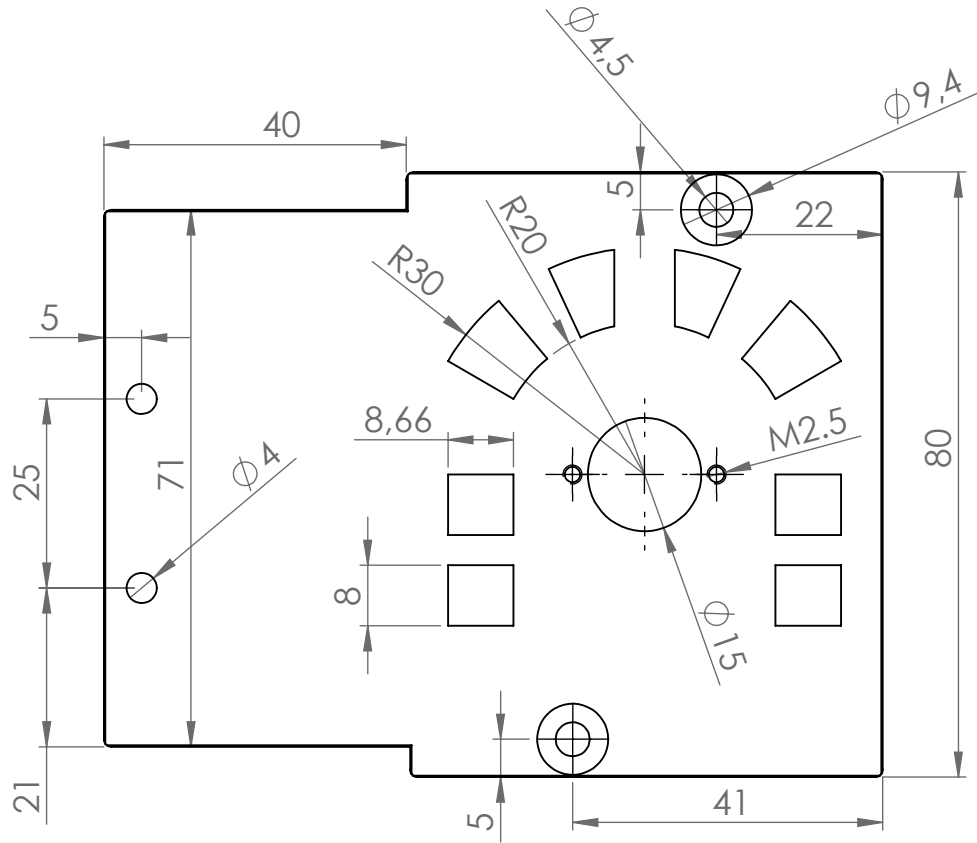
E

E



D

D



C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

Quantity

1

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

Universidade de Aveiro

TITLE:

Tamba\_Spindle

A

A

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	João Vicente		19/08/22
CHK'D	João Vicente		19/08/22
APPV'D			
MFG			
Q.A			

MATERIAL:

DWG NO.

003

A4

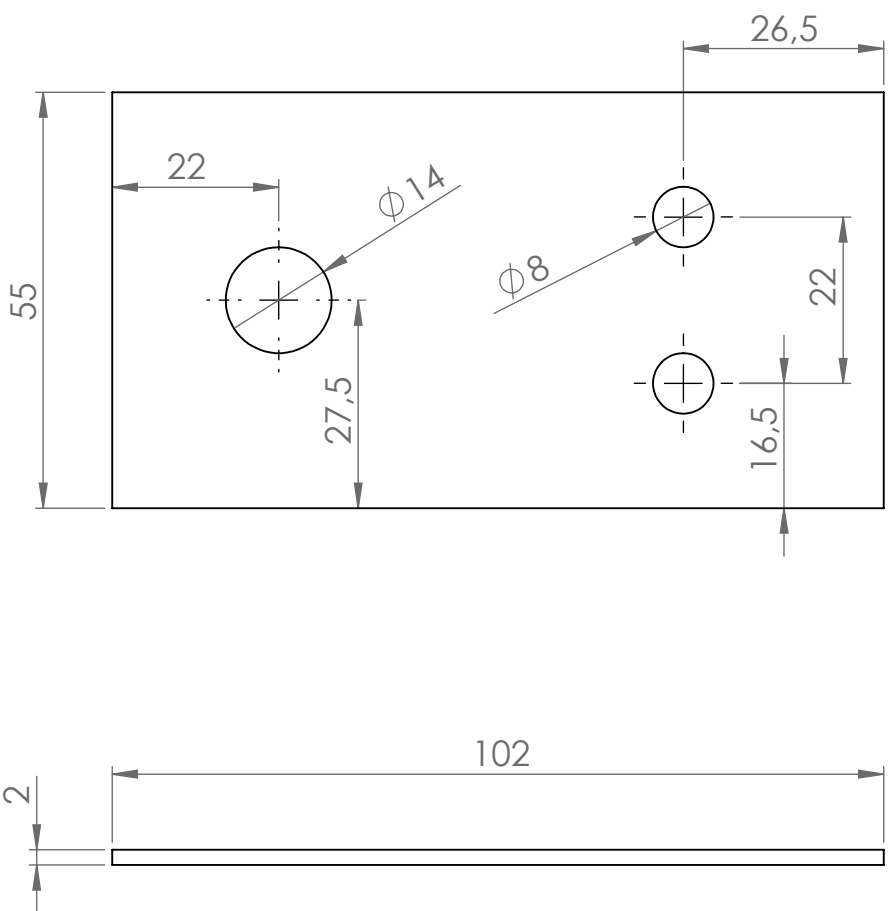
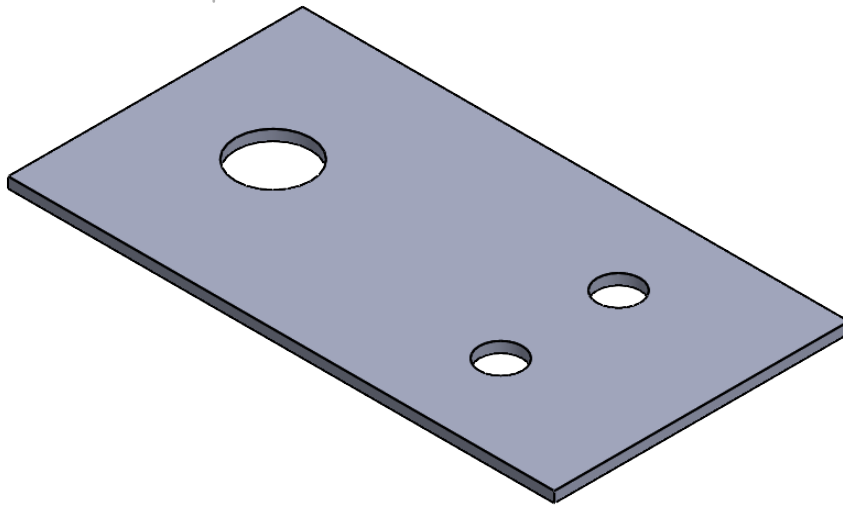
WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	Quantity	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	1		Universidade de Aveiro	

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	João Vicente		19/08/22
CHK'D	João Vicente		19/08/22
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:	Suporte_Sensor	
DWG NO.	004	A4
WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1

## Apêndice C

### Tabela obtida com o DesignExpert

	Std	Run	Factor 1 A:Deformação... mm	Factor 2 B:Passo lateral mm	Factor 3 C:Rotação se... rpm	Factor 4 D:Numero Pas...	Response 1 Corrente A	Response 2 Rotação Real Rpm	Response 3 Força N	Response 4 Rugosidade (... um
	18	1	1.00	2.00	9000.00	2 Passagens				
	5	2	1.00	6.00	8000.00	1 Passagem				
	43	3	3.00	2.00	8000.00	3 Passagens				
	10	4	3.00	10.00	8000.00	1 Passagem				
	17	5	3.00	6.00	9000.00	1 Passagem				
	34	6	3.00	6.00	9000.00	2 Passagens				
	28	7	3.00	2.00	10000.00	2 Passagens				
	29	8	3.00	10.00	10000.00	2 Passagens				
	15	9	3.00	6.00	9000.00	1 Passagem				
	37	10	1.00	10.00	9000.00	3 Passagens				
	25	11	5.00	6.00	10000.00	2 Passagens				
	13	12	3.00	6.00	9000.00	1 Passagem				
	2	13	5.00	2.00	9000.00	1 Passagem				
	36	14	5.00	2.00	9000.00	3 Passagens				
	39	15	1.00	6.00	8000.00	3 Passagens				
	27	16	3.00	10.00	8000.00	2 Passagens				
	42	17	5.00	6.00	10000.00	3 Passagens				
	38	18	5.00	10.00	9000.00	3 Passagens				
	14	19	3.00	6.00	9000.00	1 Passagem				
	51	20	3.00	6.00	9000.00	3 Passagens				
	1	21	1.00	2.00	9000.00	1 Passagem				
	24	22	1.00	6.00	10000.00	2 Passagens				
	6	23	5.00	6.00	8000.00	1 Passagem				
	4	24	5.00	10.00	9000.00	1 Passagem				
	16	25	3.00	6.00	9000.00	1 Passagem				
	45	26	3.00	2.00	10000.00	3 Passagens				
	22	27	1.00	6.00	8000.00	2 Passagens				
	50	28	3.00	6.00	9000.00	3 Passagens				
	31	29	3.00	6.00	9000.00	2 Passagens				
	9	30	3.00	2.00	8000.00	1 Passagem				
	30	31	3.00	6.00	9000.00	2 Passagens				
	21	32	5.00	10.00	9000.00	2 Passagens				
	48	33	3.00	6.00	9000.00	3 Passagens				
	3	34	1.00	10.00	9000.00	1 Passagem				
	40	35	5.00	6.00	8000.00	3 Passagens				
	26	36	3.00	2.00	8000.00	2 Passagens				
	7	37	1.00	6.00	10000.00	1 Passagem				
	33	38	3.00	6.00	9000.00	2 Passagens				
	32	39	3.00	6.00	9000.00	2 Passagens				
	35	40	1.00	2.00	9000.00	3 Passagens				
	20	41	1.00	10.00	9000.00	2 Passagens				
	23	42	5.00	6.00	8000.00	2 Passagens				
	11	43	3.00	2.00	10000.00	1 Passagem				
	12	44	3.00	10.00	10000.00	1 Passagem				
	19	45	5.00	2.00	9000.00	2 Passagens				
	44	46	3.00	10.00	8000.00	3 Passagens				
	49	47	3.00	6.00	9000.00	3 Passagens				
	41	48	1.00	6.00	10000.00	3 Passagens				
	46	49	3.00	10.00	10000.00	3 Passagens				
	47	50	3.00	6.00	9000.00	3 Passagens				
	8	51	5.00	6.00	10000.00	1 Passagem				