



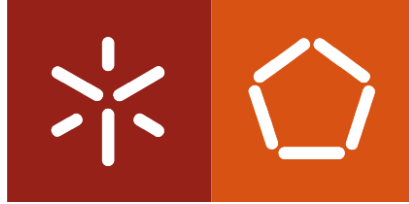
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

José Pedro Ferreira Ribeiro

Implementação de robótica colaborativa num  
laboratório para teste de peças de marroquinaria

dezembro de 2021



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

José Pedro Ferreira Ribeiro

Implementação de robótica colaborativa num  
laboratório para teste de peças de marroquinaria

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor José Mendes Machado**

dezembro de 2021

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição-NãoComercial-Compartilhagual CC BY-NC-SA**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação.

À Atepeli, por acreditar em mim com uma oportunidade em desenvolver a dissertação num ambiente industrial. Tenho muito por estar grato em todo o apoio, orientação e disponibilidade que deram no período de 6 meses que trabalhei convosco. Jamais esquecerei o fantástico ambiente de trabalho que proporcionaram, desde o momento de integração na empresa, às atividades recreativas, aos momentos de companheirismo do dia-a-dia e às pessoas que fizeram parte destas ocasiões. Queria deixar um especial obrigado aos meus companheiros de Guimarães com quem partilhei tantos momentos, dentro e fora da empresa, em especial à Elisa Maio, Patrícia Peixoto e Tiago Teixeira.

Ao Ângelo Sousa e à Stéphanie Soares, por todo o conhecimento e orientação que me proporcionaram durante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Agostinho Pacheco, que me viu a crescer, acompanhou o meu percurso académico e esteve à altura nos momentos que mais necessitei de ajuda.

Ao Prof. Dr. José Machado, o meu orientador, pela guiamento e orientação no decorrer do desenvolvimento da dissertação.

À minha família, por todo o esforço que fizeram ao longo do meu percurso académico. Sempre acreditaram em mim, apoiaram os meus sonhos e aspirações, chamaram à atenção quando necessário, mas nunca negaram um ombro amigo quando mais precisei.

À minha namorada, Sofia Machado, pelo apoio incondicional no desenvolvimento da dissertação.

Sem vocês tenho a certeza de que nada disto seria possível. O meu maior obrigado!

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

O mercado de luxo de bens de marroquinaria é muito competitivo, no qual a satisfação do cliente é a prioridade número um para qualquer empresa. Para garantir que o cliente fica satisfeito é necessário aplicar técnicas e métodos desenvolvidos para aumentar a qualidade dos produtos fabricados. Uma destas atividades envolve a identificação de defeitos, visíveis ou não, nos bens produzidos. Este processo deve ser realizado o mais cedo possível no ciclo de vida do produto, caso contrário poderá ser o cliente a identificar os defeitos no produto final. Este tipo de problemas acarreta um grande impacto para a empresa, não só devido a custos diretos, mas também a custos indiretos. Na presente dissertação analisa-se um exemplo de um problema desta natureza e desenvolve-se um método para o identificar atempadamente, possibilitando o desenvolvimento de soluções.

O problema analisado nesta dissertação é o aparecimento de um rasgão em porta-cartões, após um número de anos de utilização. Esta falha é recorrente, não controlável nem identificável, e constitui o maior motivo de reclamação por parte dos clientes em produtos da mesma família. Para recriar esta falha foi necessário desenvolver um sistema de testagem que permitisse simular o gesto humano de inserir e retirar um cartão. O sistema teria que repetir estes movimentos durante vinte mil ciclos (equivalente a cerca de vinte anos de uso normal de um utilizador) de forma precisa e intuitiva. Este foi constituído por um braço robótico colaborativo articulado de 6 DOF, um *end-effector* na sua extremidade com dois cartões afixados e um suporte para imobilizar uma peça enquanto esta é testada. O suporte foi desenvolvido para albergar peças de formatos variáveis graças a três paredes móveis, ajustáveis com o auxílio de três fusos roscados.

Assim que foi concluída a montagem do sistema físico e se programou o braço robótico, procedeu-se à seleção das peças a testar. Foram submetidas um total de sete amostras ao teste desenvolvido, sendo três de um modelo A, três de um modelo B e uma de um modelo C. Após um período de tempo de 17 horas para testar cada peça, obtiveram-se resultados de desgaste que comprovaram o sucesso no desenvolvimento do teste. Constatou-se que todos os exemplares apresentavam sinais de um rasgão na área estudada, com uma aparência comum e muito semelhantes a um caso real por parte de um cliente. A semelhança entre as peças testadas e as peças danificadas de clientes e a baixa variabilidade entre os resultados permitiu ainda a validação do procedimento para aplicar em projetos similares futuros.

**Palavras-Chave:** Qualidade; Simulação do Gesto Humano; Falha Recorrente; Testagem; Robótica Colaborativa.

## ABSTRACT

The luxury leather goods market is seriously competitive, in which customer satisfaction is the number one priority for any company. To ensure customer satisfaction it is necessary to apply certain techniques and methods to increase the quality of the products produced. One of these activities involves identifying defects, visible or not, in the leather goods. This process must be carried out as soon as possible in a product's life cycle, otherwise it may be the customer who identifies these defects in the final product. This type of problem has a greater impact on the company, not only because of its direct costs, but also because of its indirect costs. In this dissertation it is analyzed an example of this problem and it is developed a method for carefully identifying the problem, in a timely manner, and therefore enabling the creation of possible solutions.

The problem analyzed in this dissertation is the creation of a tear in card holders, after several years of use. This failure is recurrent, not controllable, or identifiable, and constitutes the biggest reason for complaints by customers on products of the same family. To recreate this flaw, it was necessary to develop a testing system that would allow simulating the human gesture of inserting and removing a card. The system would have to repeat these movements for twenty thousand cycles (equivalent to about twenty years of normal use of a user) in a precise and intuitive way. This was made up of an articulated collaborative robotic arm of 6 DOF, an end-effector with two fixed cards and a support to immobilize a piece while it is being tested. The support was developed to accommodate pieces of variable shapes thanks to three movable walls, adjustable with the aid of three threaded spindles.

Once the assembly of the physical system was completed and the robotic arm was programmed, it was time to select the parts to be tested. A total of seven samples were submitted to the test, from which three of a model A, three of a model B and one of a model C. After a period of 17 hours to test each part, wear and tear results were obtained and proved that the development of the test proved was successful. It was found that all specimens showed signs of a tear in the studied area, with a common appearance and very similar to a real case of a client. The similarity between the tested parts and damaged customer parts and the low variability between the results also allowed for the validation of the procedure in order to be applied in similar future projects.

**Keywords:** Quality; Simulation of Human Gesture; Recurrent failure; Testing; Collaborative Robotics.

# ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	2
1.2 A empresa.....	2
1.2.1 Identificação e localização.....	2
1.2.2 Matéria-prima e Fornecedores.....	3
1.2.3 Produtos comercializados.....	4
1.2.4 Processos Produtivos.....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Estrutura da Dissertação.....	7
2. Revisão de bibliografia.....	8
2.1 Robótica.....	9
2.1.1 Braços robóticos articulados.....	11
2.1.2 Cinemática e geração de trajetória em braços robóticos articulados.....	12
2.2 Robótica colaborativa.....	13
2.2.1 Mercado e implementação.....	14
2.2.2 HRC.....	16
2.2.3 Desafios.....	17
2.2.4 Segurança.....	18
2.2.5 Aplicações.....	19
2.3 Qualidade.....	21



2.3.1	Definição e importância .....	21
2.3.2	Manage for quality .....	23
2.4	Projeto Mecânico .....	25
2.4.1	Modelos descritivos .....	25
2.4.2	Modelos prescritivos .....	26
2.4.3	Modelos sistemáticos.....	28
3.	Sistema robótico num laboratório de teste de matéria .....	29
3.1	Definição do problema .....	30
3.2	Estabelecimento de objetivos .....	30
3.2.1	Lista de objetivos .....	31
3.2.2	Ordenação da lista de objetivos.....	31
3.2.3	Método da árvore de objetivos.....	32
3.3	Método de análise de funções .....	33
3.3.1	Função Global .....	33
3.3.2	Subfunções .....	34
3.4	Projeto conceptual .....	35
3.4.1	Requisitos de funcionamento .....	35
3.4.2	Especificações técnicas .....	35
3.4.3	Mapa morfológico .....	36
3.4.4	Método de DATUM .....	38
3.5	Projeto de detalhe.....	39
3.5.1	Manipulador .....	39
3.5.2	Suporte de fixação .....	43
3.5.3	End-Effector.....	48
4.	Testes e análise e discussão de resultados.....	54
4.1	Testes realizados .....	55
4.1.1	Amostragem.....	55
4.1.2	Programação.....	56
4.1.3	Análise e discussão de resultados .....	59

5. Considerações finais .....	65
5.1 Conclusões.....	66
5.2 Trabalhos futuros.....	67
Referências Bibliográficas .....	68
Anexo A – Layout e fluxo de material.....	71
Anexo B – Especificações técnicas braço robótico UR10 .....	72
Anexo C – Manual para a utilização do robô UR10 .....	73
Lista de abreviaturas, siglas, termos e acrónimos.....	74
Anexo D – Desenho técnico das correções do suporte .....	92
Anexo E – Desenho técnico do <i>end-effector</i> .....	93

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Unidade da ATEPELI em Santa Marta, Penafiel.....	3
Figura 2 - Componentes de pequena marroquinaria produzidos na ATEPELI.....	4
Figura 3 - Componentes de marroquinaria produzidos na ATEPELI.....	4
Figura 4 - Exemplo de poignée produzido que requer costura automática e manual.....	6
Figura 5 - Sistemas de eixos coordenados do manipulador e de objetos circundantes.....	11
Figura 6 - Análise da cinemática direta de um manipulador.....	12
Figura 7 - Análise da cinemática indireta de um manipulador.....	12
Figura 8 - Exemplo de aplicação de um manipulador tradicional, enjaulado por motivos de segurança. [12].....	13
Figura 9 - Diagrama de transição entre vários níveis de automação em relação ao custo unitário e volume de produção.....	15
Figura 10 – Modelo hierárquico de níveis de interação entre um operador e um robô colaborativo.....	16
Figura 11 - Vários níveis de interação entre o trabalhador e o robô colaborativo.....	17
Figura 12 - End-effectors comumente usados para aplicações do tipo Pick & Place:.....	20
Figura 13 - Cobot a desempenhar uma tarefa de paletização com o auxílio de um tapete rolante.....	20
Figura 14 - Gráfico "Break-Even". Adaptado de [34].....	22
Figura 15 - Modelo ilustrativo da subida dos custos após as várias fases de controlo de qualidade. Adaptado de [35].....	23
Figura 16 - Estrutura típica de um modelo descritivo. Adaptado de [38].....	25
Figura 17 - Estrutura da diretiva VDI 2221. [40].....	27
Figura 18 - Modelo ilustrativo das relações comutativas entre (sub)problemas e (sub)soluções. [38] ..	27
Figura 19 - As etapas do design inseridas no modelo problema/sub-problemas e solução/sub-soluções. .....	28
Figura 20 - Exemplo de poche-cc (porta-cartões) da empresa.....	30
Figura 21 - Árvore de objetivos para o teste de laboratório criado.....	32
Figura 22 - Estrutura da função global para o teste de laboratório desenvolvido.....	34
Figura 23 - Esquema das subfunções do teste de laboratório desenvolvido.....	34
Figura 24 – Ilustração dos vários postos constituintes do robô Silva.....	39
Figura 25 - Identificação e nomenclatura dada às seis juntas do braço robótico e do TCP.....	40

Figura 26 - Espaço de trabalho (assinalado a verde) do UR10. [41] .....	41
Figura 27 - Singularidade do pulso 4 e pulso 6 .....	42
Figura 28 - Suporte ajustável desenvolvido. ....	43
Figura 29 - Vista explodida e legenda do suporte ajustável desenvolvido. ....	44
Figura 30 - Sistema para imobilizar a posição das modas de fixação. ....	44
Figura 31 - Mecanismo de ajuste de posição das paredes laterais e inferior. ....	45
Figura 32 - Sistema de correções criado para restringir o movimento das paredes. ....	46
Figura 33 - Vista explodida da base do suporte (a cinzento e vermelho) e das paredes móveis (a azul). .....	46
Figura 34 - End-effector desenvolvido com dois cartões afixados. ....	48
Figura 35 - Degrau nas extremidades do end-effector para efeitos de alinhamento e resistência. ....	48
Figura 36 - Cenário de embate entre o end-effector e o suporte universal. ....	49
Figura 37 - Diagrama de corpo-livre do end-effector. ....	49
Figura 38 - Diagrama de esforços transversos e de momentos fletores. ....	52
Figura 39 - Zonas suscetíveis a maior desgaste no poche-cc. ....	55
Figura 40 - Três modelos de amostras escolhidas para submeter ao teste. ....	56
Figura 41 - Constituição final completa do sistema de testagem. ....	56
Figura 42 - Diagrama do funcionamento do programa criado. ....	57
Figura 43 - Programação usada para a realização do teste. ....	58
Figura 44 - Resultados do teste no exemplar 1 do modelo A. ....	60
Figura 45 - Resultados do teste no exemplar 2 do modelo A. ....	60
Figura 46 - Resultados do teste no exemplar 3 do modelo A. ....	60
Figura 47 - Resultados do teste no exemplar 1 do modelo B. ....	61
Figura 48 - Resultados do teste no exemplar 2 do modelo B. ....	61
Figura 49 - Resultados do teste no exemplar 3 do modelo B. ....	61
Figura 50 - Resultados do teste no exemplar 1 do modelo C. ....	62
Figura 51 - Desgaste de uma peça: A) Danos provocados por teste de laboratório; B) Danos provocados por uso real de um cliente. ....	63
Figura 52 - Falha de resistência mais severa numa peça de poche-cc. ....	64
Figura 53 - Layout do Atelier de Penafiel. ....	71
Figura 54 - Posição e designação das 6 juntas rotacionais do manipulador. ....	75
Figura 55 – Exemplos de end-effector usados para aplicações do tipo Pick & Place: .....	76

Figura 56 - Sistema sensorial usado, associado a dois tapetes rolantes, para automatizar uma aplicação "Pick & Place" .....	77
Figura 57 – Três exemplos de periféricos desenvolvidos.....	78
Figura 58 - Ferramenta desenvolvida para suportar cartões de crédito: a) Vista de cima; b) Vista de baixo. ....	79
Figura 59 - Ecrã de iniciação do manipulador.....	79
Figura 60 - Calibração da posição da ponta da ferramenta do robô.....	80
Figura 61 - Calibração da orientação da ponta da ferramenta do robô. ....	81
Figura 62 - Processo de calibração da orientação da ferramenta do robô e exemplo de resultados esperados .....	81
Figura 63 - Localização do TCP e do centro de massa.....	82
Figura 64 - Ilustração de como guardar a instalação criada. ....	82
Figura 65 - Comandos para a criação de um novo programa.....	83
Figura 66 - Criação de um movimento na programação do manipulador.....	83
Figura 67 - Processo de definição de um waypoint. ....	84
Figura 68 - Identificação e localização do botão "FreeDrive" no ecrã tátil. ....	84
Figura 69 - Diferentes variações/tipos da função "Move". ....	85
Figura 70 - Exemplo de um programa responsável pela movimentação de um manipulador.....	86
Figura 71 - Sequência esperada para a sequência de movimentos apresentada.....	86
Figura 72 - Instruções sobre a introdução e controlo da função "Wait".....	87
Figura 73 - Exemplo prático para a utilização da função "Wait".....	87
Figura 74 - Instruções sobre a introdução e controlo da função "Set". ....	88
Figura 75 - Instruções sobre a introdução e controlo da função "Loop".....	89
Figura 76 - Instruções sobre a introdução e controlo da função "Pop-up".....	89
Figura 77 - A) Previsualização de uma mensagem; B) Previsualização de um aviso; C) Previsualização de um erro.....	90
Figura 78 - Instruções sobre a introdução e controlo da função "If...else". ....	90
Figura 79 - Exemplo de um programa "Pick & Place" .....	91

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação e contextualização dos marcos históricos mais importantes na área da robótica. .....	10
Tabela 2 - Benefícios esperados para uma empresa quando aumentam a qualidade dos produtos. [33] .....	24
Tabela 3 - Lista de objetivos para o teste de laboratório desenvolvido. ....	31
Tabela 4 - Lista de objetivos e sub-objetivos ordenados por níveis de importância e por objetivos de nível superior.....	32
Tabela 5 - Listagem das especificações técnicas requeridas ao teste de laboratório. ....	36
Tabela 6 - Mapa morfológico para o teste de laboratório.....	37
Tabela 7 - Método de DATUM. ....	38
Tabela 8 - Especificações técnicas do braço articulado UR10. ....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

**CAPA** – *Corrective and Preventive Actions* (Ações corretivas e preventivas)

**CNC** – *Computerized Numeric Control* (Controlo numérico por computador)

**DOF** – *Degree of Freedom* (Grau de Liberdade)

**HRC** – *Human-Robot Collaboration* (Colaboração humano-robô)

**PSO** – *Particle Swarm Optimization* (Optimização de enxame de partículas)

**PVC** – *Polyvinyl Chloride* (Cloro de polivinila)

**TCP** – *Tool Center Point* (Ponto de centro da ferramenta)

**VDI** – *Verein Deutscher Ingenieure* (Associação de engenheiros alemães)

# 1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação desenvolveu-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na Universidade do Minho, e foi realizada em contexto empresarial, numa empresa de produção de componentes de marroquinaria. Neste capítulo é apresentado um enquadramento e motivação, uma descrição dos aspetos operatórios da empresa em questão, os objetivos previstos para o desenrolar do projeto assim como a organização do documento.



## 1.1 Enquadramento e motivação

O mercado de produção e comercialização de bens de luxo é regido por padrões de qualidade extremamente exigentes. O elevado custo dos produtos finais cria, de forma subconsciente, elevadas expectativas para o cliente, de tal forma que não é tolerado qualquer tipo de defeito. Ao garantir que fica satisfeito com a sua última compra dá-se um passo no sentido de uma próxima compra com a mesma marca, criando-se assim uma fidelidade aos seus produtos.

O cliente não só espera um produto livre de qualquer defeito como também que a peça adquirida aguente o uso normal, sem qualquer falha e sinais óbvios de desgaste, durante muitos anos. O problema que daqui surge é que certos problemas de qualidade apenas poderão ser detetados após o produto ter sofrido quatro ou cinco anos de uso por parte de um cliente, por exemplo, não sendo possível identificá-los previamente ao produto ser vendido. Por vezes estas falhas resultam numa reclamação por parte do cliente e possivelmente num pedido de reembolso ou de um produto de substituição. Isto poderá trazer consequências económicas severas, não só a curto prazo como a longo prazo também.

Devido à natureza volátil do mercado de moda de luxo existe uma necessidade constante de se desenvolver e produzir novos produtos, para atrair novos clientes ou simplesmente para manter os clientes habituais interessados na marca. A rápida introdução de novos produtos cria a necessidade de se desenvolver novos materiais e testar novos meios de produção. Este fenómeno, associado ao problema já mencionado, obriga à criação de um método para validar a durabilidade de um produto e, assim, poder garantir com confiança que este irá manter-se livre de qualquer defeito visual e/ou funcional durante um determinado número de anos.

## 1.2 A empresa

A dissertação de mestrado foi realizada em contexto empresarial, sob a forma de um estágio curricular com a duração de 6 meses. No presente capítulo será descrita a ATEPELI – Ateliers de Ponte de Lima, no qual se falará um pouco sobre a sua história, os produtos que comercializa e o processo produtivo utilizado.

### 1.2.1 Identificação e localização

A empresa a ATEPELI – Ateliers de Ponte de Lima, com ateliers em Ponte de Lima, Penafiel e Santa Maria da Feira, compromete-se a produzir componentes de pequena, média e grande marroquinaria para o setor de moda de luxo.

Cada atelier é especializado em determinados produtos, podendo estes ser alças, pegas de bolsas ou, mais recentemente, componentes para calçado. A ATEPELI – Ateliers de Ponte de Lima encontra-se integrada num dos maiores grupos multinacionais de produtos de luxo, presente em 60 países, fundado em 1987 e que conta com mais de 75 marcas de setores de moda, bebidas, perfumaria, entre outros. O primeiro atelier do grupo em Portugal foi inaugurado em 2011, em Ponte de Lima, já sob o nome “ATEPELI” e, atualmente, constitui o centro de operações da empresa. A empresa tem vindo a expandir e atualmente é constituída por três ateliers e duas empresas subcontratadas. Mais recentemente foi criada a unidade de Penafiel, visível na Figura 1, local no qual foi se desenvolveu o projeto de dissertação.



*Figura 1 - Unidade da ATEPELI em Santa Marta, Penafiel.*

### 1.2.2 Matéria-prima e Fornecedores

A ATEPELI produz exclusivamente para uma marca do grupo, querendo isto dizer que todo o seu volume de vendas é totalmente interno ao grupo. A empresa não produz os produtos finais comercializados para o público geral, mas sim os componentes que os integram. A ATEPELI procura assim responder às exigências e desejos do seu cliente, estando este composto por vários ateliers de produto acabado internos ao grupo, sendo que a produção apenas arranca com uma encomenda dos mesmos.

Quando uma encomenda é processada é então possível criar uma ordem de fabrico, na qual constam os processos/etapas e a sua ordem cronológica, as matérias, componentes e o tempo necessário para o fabrico de determinado produto. Tratando-se de produtos de marroquinaria a ATEPELI lida diariamente com pele e materiais sintéticos criados para a mesma finalidade. A nível de componentes a empresa utiliza, na grande maioria dos produtos, peças metálicas ou fechos. Deve-se referir que tanto os componentes como as matérias-primas podem ter duas origens distintas. O cliente pode fornecer as matérias, já cortadas, e os componentes (fechos, molas, entre outros) ou a própria empresa recorre aos seus fornecedores locais para a aquisição dos mesmos.

### 1.2.3 Produtos comercializados

A empresa produz peças de pequena marroquinaria e de marroquinaria. Relativamente ao primeiro grupo, as peças produzidas constituem o interior do produto acabado, isto é, os pequenos foles de carteiras, *poche-cc* (organizador de cartões) ou *poche-monnaie* (porta-moedas), identificados na Figura 2.



Figura 2 - Componentes de pequena marroquinaria produzidos na ATEPELI.

Dentro da marroquinaria produzem-se, maioritariamente, componentes para o exterior do produto vendido ao consumidor final, podendo estes ser *bandoulières* (alças de ombro), *poignées* (pegas), *tirettes* (puxadores de fechos) ou *porte-adresse* (identificador de morada), visíveis na Figura 3.



Figura 3 - Componentes de marroquinaria produzidos na ATEPELI.

### 1.2.4 Processos Produtivos

O fluxo de material na zona de produção é altamente variável, não só pela quantidade de produtos diferentes, mas pelas implicações que a sua introdução traz nas linhas. Todavia, é possível delinear um fluxo típico dos produtos pelas várias linhas e definir qual é a função dos processos desempenhados em cada uma.

## Armazém e corte

O processo produtivo tem o seu início e o seu fim no armazém. O armazém é o responsável por receber todas as matérias-primas, mais concretamente compras de pele e reforços, sendo que o próprio armazém abastece posteriormente os restantes ateliers. Adicionalmente, o armazém também é a entidade responsável por rececionar os componentes e os consumíveis (tinta, cola, fio, entre outros).

Caso o produto que se encontra em produção requeira a utilização da matéria-prima adquirida, esta será transportada do armazém para as máquinas de análise, seleção e corte automático e posteriormente transportadas para uma das linhas de preparação. Caso o cliente forneça os *kits* com todos os recursos materiais necessários para o fabrico da peça, que toma o nome de “*pré-coupes*”, estes serão diretamente abastecidos aos postos da preparação por um elemento do armazém.

## Preparação

Como o próprio nome indica, as linhas de preparação têm o objetivo de preparar os componentes para a montagem, envolvendo normalmente processos como:

- Igualizar a matéria-prima: Esta etapa assegura que todas as peças saem da preparação com uma espessura igual por toda a sua área e igual em todo o lote;
- Colagem: A vasta maioria dos produtos produzidos exigem pelo menos um processo de colagem, como por exemplo colar dois pedaços de pele de forma que os lados visíveis sejam as “frentes” das respetivas peles. Outro exemplo é a colagem de um reforço entre dois pedaços de pele
- Pintura: A pintura das bordas expostas de pele tem uma enorme importância no acabamento do produto, tanto num ponto de vista estético como também funcional. Normalmente é realizado na preparação, porém existe a possibilidade de se observar uma etapa de pintura na montagem.

## Montagem

As peças produzidas pela linha de preparação são alimentadas à de montagem, sob a forma de pequenos lotes de unidades (normalmente 30 unidades) inseridas numa caixa. A linha de montagem contém três processos principais:

- Costura: Esta etapa tem uma enorme influência no desempenho do produto acabado. Pode ser realizada de forma automática, manual ou uma junção de ambos, como é o caso na linha do *torron* com um produto do tipo *poignée*, como se pode observar na Figura 4.



Figura 4 - Exemplo de poignée produzido que requiere costura automática e manual.

- Acabamento: Este procedimento pode tomar diversas formas, mas é normalmente realizado após a costura. A título de exemplo, como o que acontece com o *poignée* apresentado na Figura 4, a borda resultante da união de dois materiais deve passar por uma lixa antes de ser pintada.
- Pintura: Assim como se observa na preparação, a pintura é considerada um processo crítico na produção da peça.
- Cravação/colagem: Na montagem faz-se a fixação entre as peças metálicas e as peças de marroquinaria. Este processo pode ser feito por cravação ou, no caso do *poignée* visível na Figura 4, por colagem em torno de uma peça metálica.

### Controlo e Embalamento

Dada a montagem como finalizada, antes que a peça passe para o embalamento é necessário realizar um rigoroso controlo de qualidade de todos os produtos produzidos. O controlo é feito no “muro da qualidade” e recorre maioritariamente a uma análise visual dos artesões. Dito isto, são também realizados testes de resistência, funcionalidade e avaliados os acabamentos segundo padrões de qualidade estabelecidos, sob a forma de um *master* de qualidade.

Por fim, após serem aprovados, os componentes produzidos regressam ao armazém, onde são cuidadosamente embalados, rotulados e processados a tempo da próxima expedição de produtos. O Anexo A contém uma análise mais detalhada do fluxo de material no *atelier*.

### 1.3 Objetivos

Este projeto origina-se a partir de um conjunto de necessidades da empresa, no que diz respeito à qualidade e à consistência do produto final. Sentiu-se grande interesse, por parte da empresa, em criar um teste que permitisse validar a durabilidade das peças, podendo-se identificar peças conformes de não-conformes e averiguar se a peça aguenta o equivalente a vinte anos de uso normal sem falhas aparentes.

Para isso este teste tem que simular o gesto humano no movimento de inserir e retirar o cartão da peça, de uma forma repetível e com elevada exatidão. A partir destas necessidades foi possível delinear os objetivos principais para este projeto:

- Definir os parâmetros do teste (nº de ciclos, movimentos, formas de fixar a peça, entre outros);
- Projetar e construir os componentes necessários para desempenhar o teste;
- Integrar os componentes desenvolvidos com um programa para o teste;
- Testar peças de formatos variáveis;
- Analisar os resultados obtidos e avaliar o sucesso do teste;
- Validar o teste para usos futuros;

#### 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada de uma forma lógica e simples. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tópico a explorar, seguida de uma breve apresentação da empresa e dos objetivos a cumprir. No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de contextualizar e explicar certos assuntos que serão tratados numa fase posterior. O terceiro capítulo trata do desenvolvimento das soluções mecânicas necessárias para o presente trabalho, desde a fase de clarificação do problema, ao projeto conceptual e, por fim, ao projeto de detalhe. O quarto capítulo aborda a integração dos componentes desenvolvidos anteriormente com a programação do manipulador. Neste capítulo são apresentadas as peças a testar, os resultados obtidos dos testes e a análise e discussão dos mesmos. Por fim, no capítulo cinco, avalia-se o sucesso do trabalho desenvolvido e contemplam-se conclusões adicionais e possíveis trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

No presente capítulo será realizada uma revisão de bibliografia acerca das áreas abordadas na dissertação. É abordado o tópico da robótica, no qual se aprofunda a vertente da robótica colaborativa e a colaboração homem-robô (HRC). Posteriormente são discutidos conceitos de qualidade, os custos da qualidade e o impacto da mesma numa empresa. Por fim são ainda abordados os fundamentos teóricos sobre projeto mecânico.

## 2.1 Robótica

A robótica é uma área interdisciplinar que combina conhecimentos de sistemas eletrônicos, mecânicos e os devidos desenvolvimentos de *software* necessários para combinar ambos. Esta ciência é responsável por projetar, fabricar e mediar o uso de robôs nas mais diversas áreas do cotidiano, desde a aplicações industriais como a aplicações de serviços.

A aplicação da robótica em ambientes industriais constitui a esmagadora maioria dos cenários de utilização, devido às vantagens que apresenta tanto para o empregador como para os operários no chão de fábrica. O aumento da eficiência e da qualidade na produção, a substituição de humanos em tarefas perigosas/repetitivas e a possibilidade de trabalhar dois ou três turnos sem pausas previstas são apenas alguns exemplos das vantagens inerentes à aplicação de robôs industriais. [1] As vantagens mencionadas ganham maior relevância quando são enquadradas com a definição original da palavra “robô”. Derivada do termo de origem checa “*robota*”, que tem uma tradução literal de “trabalho forçado”, um robô é definido por um dispositivo eletrônico/mecânico reprogramável capaz de várias tarefas de forma automática ou semiautomática. Todavia a cultura japonesa define o termo “robô” como sendo “qualquer dispositivo que substitua o trabalho humano”. [2]

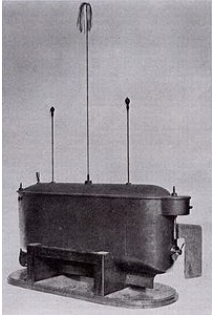
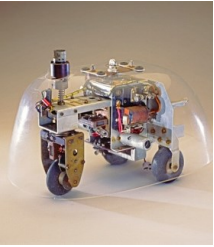

O ritmo acelerado do avanço tecnológico nas últimas décadas, nomeadamente na área da informática e da eletrônica, proporcionou a desenrolar de uma grande evolução na área da robótica. Contudo este ramo tecnológico teve os primeiros avanços há mais de um século atrás. Em 1950 Isaac Asimov definiu as três leis que qualquer robô deverá seguir:

- Lei 1: Um robô nunca deve ferir um ser humano ou deixar que o mesmo seja ferido.
- Lei 2: Um robô deve obedecer às ordens dadas por seres humanos, exceto quando estas ordens entrarem em conflito com a primeira lei.
- Lei 3: Um robô deve proteger-se a si próprio, desde que tal proteção não entre em conflito com a primeira ou segunda lei. [3]

Construiu-se a Tabela 1, que apresenta sucintamente a evolução de sistemas robóticos relevantes para o presente trabalho, na qual são descritos os sistemas bem como as suas inovações, acompanhadas de uma ilustração.



Tabela 1 - Identificação e contextualização dos marcos históricos mais importantes na área da robótica.

Autor	Denominação	Inovação	Descrição	Ilustração
Nikola Tesla	“Remote Control Boat” (1898)	Permitiu o controlo de posição e velocidade de um objeto sem qualquer ligação física [4]	Tratava-se de um barco telecomandado com cerca de 2 metros, dispondo de uma série de antenas uma caixa de receção de sinais, um propulsor e leme acionados por um motor elétrico e uma pequena bateria [4]	
William Grey Walter	“Elmer & Elsie” (1948/1949)	Com a introdução do computador na década de 1940 foi criado o primeiro robô eletrônico autônomo com movimentos complexos [5]	O robô apresentava uma estrutura com três rodas. Era constituído por um sensor de luz, ligado à locomoção e direção, e um sensor de contacto, que era capaz de redirecionar a estrutura [5]	
George Devol	“Unimate” (1961)	Introdução da robótica controlada de forma digital e com memória reprogramável [6]	O primeiro robô industrial possuía seis graus de liberdade programáveis. Este continha também um controlador extremamente simples, ligado a uma memória de tambor. [6]	

Na atualidade os robôs industriais são capazes de desempenhar operações de soldadura, aplicação de tinta ou cola, de montagem e de inspeção ou manuseio de matéria/objetos. Dois fatores comuns entre as tarefas mencionadas são a repetibilidade e as condições de trabalho por vezes imprópria para humanos. Assim, os robôs industriais foram criados com o principal objetivo de substituir a mão-de-obra tradicional em atividades denominadas “3D’s” (*dirty, dangerous e dull*). [7]

Por forma a ser possível responder às necessidades de indústrias como a automóvel, aeroespacial ou de componentes eletrónicos, desenvolveram-se robôs altamente precisos e flexíveis.

Normalmente sob a forma de um braço robótico, estas estruturas são equipadas com 6 ou 7 juntas rotacionais, o que lhes fornece mobilidade semelhante àquela de um braço humano. Juntamente que ferramentas de simulação e módulos de controlo é possível controlar a posição, orientação, velocidade e aceleração com um rigor outrora impensável. [8]

### 2.1.1 Braços robóticos articulados

Um braço robótico articulado consiste numa série de elos interligados por juntas de rotação, que em conjunto estabelecem a ligação entre a ferramenta do robô (último elo) à sua base (primeiro elo). No caso de um manipulador industrial típico, como apresenta uma cadeia cinemática aberta, e como cada junta é normalmente representada por apenas uma variável, é possível afirmar que cada junta rotativa equivale a 1 DOF e por isso um manipulador de 6 DOF irá possuir seis juntas.

A localização de um corpo rígido num espaço tridimensional pode ser descrita pela sua posição e pela sua orientação. Para que se possa quantificar estes indicadores é necessário que, primeiramente, seja atribuído um sistema de eixos coordenados ao objeto em questão e, em seguida, se faça a comparação entre este e um sistema referência de eixos coordenados. Na Figura 5 é possível visualizar este mesmo raciocínio, na qual se observa vários exemplos da atribuição de um sistema de eixos a múltiplos objetos e de que forma é que estes se relacionam com aqueles presentes na ferramenta e na base de um braço articulado. [9]

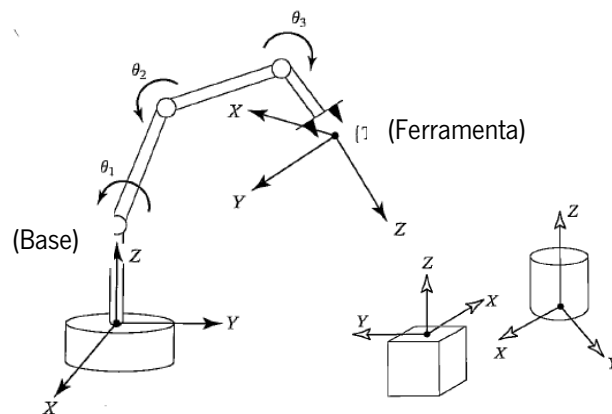


Figura 5 - Sistemas de eixos coordenados do manipulador e de objetos circundantes.

Adaptado de [9]

Tanto a posição como a orientação de um corpo necessitam de pelo menos três coordenadas, respetivamente, para serem totalmente definidas. Isto significa que um manipulador desta configuração deverá possuir pelo menos 6 DOF para que seja possível posicionar a sua ferramenta em relação a uma peça/superfície, independentemente da posição e orientação que possua.

### 2.1.2 Cinemática e geração de trajetória em braços robóticos articulados

A cinemática é a ciência que estuda as várias componentes de um movimento, isto é, a posição, a velocidade, a aceleração, sem qualquer consideração pelas forças que o iniciaram. [10] O estudo da cinemática aplicada a manipuladores diz assim respeito às propriedades, no tempo, da movimentação dos mesmos.

O estudo da cinemática de um manipulador pode ser dividido em 2 problemas: a cinemática direta e a cinemática inversa. O primeiro tipo é o mais simples e diz respeito ao cálculo da orientação e posição do *end-effector* do manipulador para um dado conjunto de deslocações angulares para as respectivas juntas. Observando novamente a Figura 5, a cinemática direta irá computar, com base nos valores  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  a orientação e posição do referencial da ferramenta em relação ao referencial da base do manipulador.

O segundo e mais complicado tipo de problema de cinemática refere-se à determinação dos deslocamentos angulares para as múltiplas juntas de modo que o *end-effector* fique corretamente orientado e posicionado. A complexidade deste cálculo advém da existência de múltiplas soluções, ou por vezes nenhuma, para um valor de posição e orientação, bem como da existência de múltiplas abordagens para o problema, nomeadamente a geométrica e a algébrica. A impossibilidade de obter uma solução para determinadas configurações pretendidas é aquilo que define o espaço de trabalho do manipulador. Atualmente, devido à recorrente necessidade de se determinar o exato deslocamento angular das várias juntas para um movimento suave e contínuo são utilizados algoritmos de otimização inteligentes, como redes neurais artificiais ou PSO's. [10]

De forma a resumir o funcionamento dos problemas de cinemática num manipulador foram criados os esquemas presentes na Figura 6 e Figura 7, que analisam o modelo da cinemática direta e inversa, respetivamente.

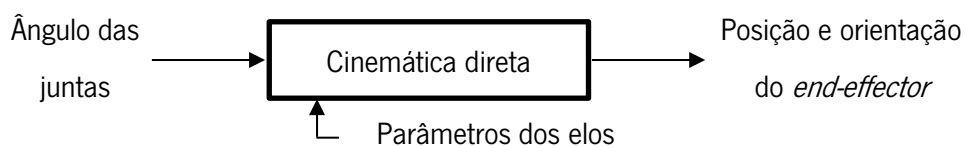


Figura 6 - Análise da cinemática direta de um manipulador.

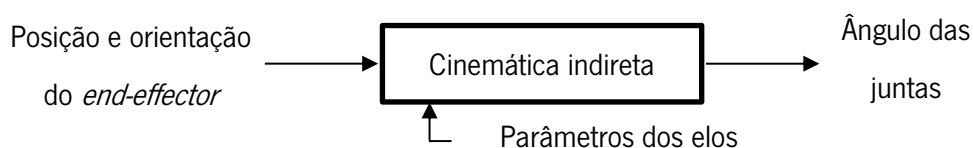


Figura 7 - Análise da cinemática indireta de um manipulador.

De forma que o manipulador tenha uma movimentação suave e controlada é necessária uma função que controle as posições angulares, no tempo, de cada uma das juntas. Estas funções dizem respeito ao problema de geração de trajetórias. Normalmente recorrendo a funções do tipo *spline*, é definida uma trajetória otimizada que passa por uma série de pontos pré-definidos e é convertida numa série de movimentos nas juntas.

## 2.2 Robótica colaborativa

O paradigma tecnológico da Indústria 4.0 representa um enorme desafio para empresas que pretendem atualizar os seus métodos de fabrico mais tradicionais e convertê-los segundo uma ideologia de fábrica inteligente. A ambição de melhorar a eficiência e produtividade dos processos levaram à criação de tecnologias como simulação de processos, robótica colaborativa, manufatura aditiva e computação em nuvem. [11]

A utilização da robótica em processos produtivos não é algo inovador por si só. Na verdade, trata-se de uma característica inerente da revolução industrial predecessora, a Indústria 3.0, a qual ficou marcada pela introdução da manufatura automatizada. Os robôs que surgiram são, na grande maioria dos casos, braços articulados com 6 DOF, capazes de substituir a mão-de-obra tradicional em aplicações de baixo valor acrescentado ou que deixem a saúde do operador em risco. Devido à sua enorme escala e ausência de qualquer mecanismo de reconhecimento de objetos ou pessoas, um robô industrial comum estará sempre inserido numa jaula de proteção, como se pode observar na Figura 8.



*Figura 8 - Exemplo de aplicação de um manipulador tradicional, enjaulado por motivos de segurança. [12]*

Independentemente do ramo da indústria em questão existe uma grande dificuldade em automatizar, por completo, certos processos produtivos. Aquilo que se verifica na grande maioria da carga de trabalho de um operador é que apenas uma pequena percentagem é de natureza repetitiva e, por isso, fácil de automatizar.

Isto leva a concluir que a configuração ótima de trabalho seria de alocar o operário para tarefas de alta variabilidade e recorrer a um robô para agilizar as tarefas mais repetitivas e aborrecidas. Esta estratégia não só irá aumentar a eficiência global do processo como irá aliviar o operador de tarefas entediantes e, por vezes, pouco ergonômicas, valorizando assim as suas capacidades cognitivas. Complementarmente a produtividade de uma solução automatizada é mais facilmente monitorizada, sendo que informações como contagem ou duração de ciclos podem ser facilmente extraídas de um robô. [13] [14]

O segmento da robótica industrial que procura desenvolver um sistema com o funcionamento semelhante ao descrito designa-se por “robótica colaborativa”. Este setor foca-se em transformar um robô industrial tradicional num exemplar mais inteligente, capaz de aprender e de colaborar com um operador. Esta integração permite, como já foi mencionado, em combinar a força e a tenacidade de um robô com a flexibilidade e capacidade de tomar decisões de um humano. [8]

Adicionalmente, no contexto da introdução da Indústria 4.0, a robótica colaborativa ganhou maior interesse pela possibilidade de integrar este tipo de robôs com outras tecnologias deste paradigma tecnológico, como a ciber-segurança e o *Industrial Internet of Things*. [15] Na sua essência um robô colaborativo, também conhecido como “*cobot*”, é um robô capaz de trabalhar, de forma segura, lado-a-lado com um operador humano com o objetivo conjunto de concluir uma tarefa.

É relevante referir que este tipo de robôs foi concebido com o intuito único de complementar o trabalhador humano. [8] Desta forma, manipulador desta natureza também deverá ser fácil de instalar, de programar, flexível no que diz respeito à sua aplicação e acessível em termos monetários. [13]

Este tipo de manipuladores tem recebido especial interesse por parte de pequenas e médias empresas um pouco por todo o mundo. A razão por esta súbita atração atribui-se, paralelamente àquilo que foi expresso, à reduzida área de trabalho, ao funcionamento intuitivo e ao diminuto investimento em medidas de segurança adicionais, já que os mecanismos pré-instalados são mais do que capazes de assegurar o bem-estar do operador. [16] Tudo isto é conseguido com a utilização de algoritmos de controlo especializados, interfaces homem-máquina inovadoras e sensores embebidos que detetam colisões e outros possíveis riscos de segurança. [8]

### 2.2.1 Mercado e implementação

Atualmente esta é a área da robótica que apresenta um maior nível de crescimento no que toca a casos de implementação. Em 2018 o mercado da robótica colaborativa foi avaliado em 649.1M \$ e, somente em 2019, este mesmo mercado gerou cerca de 669.9M \$. [17]

Os setores da indústria que mais contribuíram para este valor foram a indústria automotiva e eletrônica. Devido às múltiplas vantagens mencionadas previamente, estima-se que a venda de robôs colaborativos atinja os 1.94 B \$ até ao ano de 2028, com uma percentagem de 15.7% do mercado da robótica. [18]

A integração de um *cobot* na indústria segue quatro passos:

- Passo 1: Determinação da tarefa a realizar (na qual se deve referir qual deverá ser o papel do operador, do robô e de que forma irão colaborar para atingir o objetivo comum entre ambos);
- Passo 2: Processo de aceitação, por parte dos operadores, da nova tecnologia implementada;
- Passo 3: Montagem da célula de trabalho com o robô colaborativo;
- Passo 4: Otimização das operações;

O elevado interesse nesta tecnologia potenciou a implementação de robôs colaborativos nas mais variadas aplicações e indústrias. Aquilo que se verifica é que, apesar da adaptação à fábrica parecer relativamente simples, esta apresenta alguns desafios a serem analisados. O primeiro desafio advém da designação de uma tarefa para uma célula que contém um robô colaborativo. Apesar da capacidade de trabalhar lado a lado com um operador ser umas das suas maiores vantagens, só se estará a tirar proveito do robô caso a tarefa esteja bem delineada e otimizada para este tipo de fabrico. Adicionalmente, este tipo de automação apresenta um nível de produtividade máximo para um tamanho de *lot* baixo, como se pode observar na Figura 9.

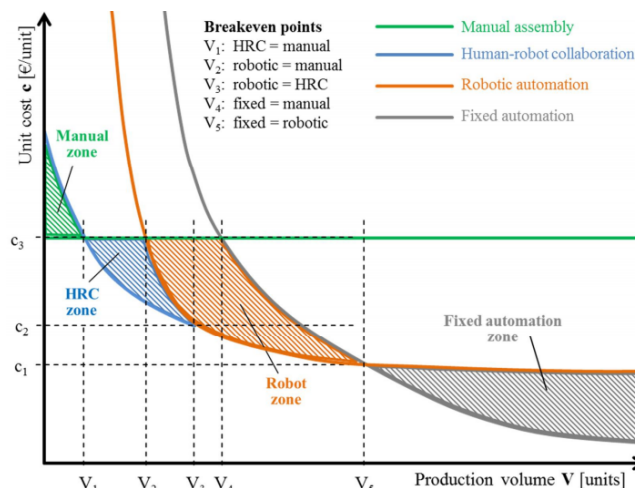


Figura 9 - Diagrama de transição entre vários níveis de automação em relação ao custo unitário e volume de produção.

Adaptado de [19]

Através da Figura 9 pode concluir-se que a robótica colaborativa é responsável por fazer a transição entre a produção puramente manual e a produção totalmente automatizada. Além disso, se o objetivo final for extrair o maior nível de produtividade e eficiência da célula robotizada, a tarefa global deve ser dividida corretamente entre o operador e o robô.

Sub-tarefas que requeiram alta flexibilidade e criatividade são designadas ao operador e tarefas repetitivas são designadas ao robô, para que ambas as entendidas trabalhem, de forma sinérgica, no sentido do objetivo final.

### 2.2.2 HRC

A colaboração entre o operador e o robô (*Human Robot Colaboration*) pode ser classificada em várias categorias, nomeadamente no tipo de tarefa, na morfologia do manipulador, no papel de cada elemento na tarefa, entre outros. De forma a simplificar a classificação do HRC foram desenvolvidos alguns modelos, como aquele presente na Figura 10. [20]

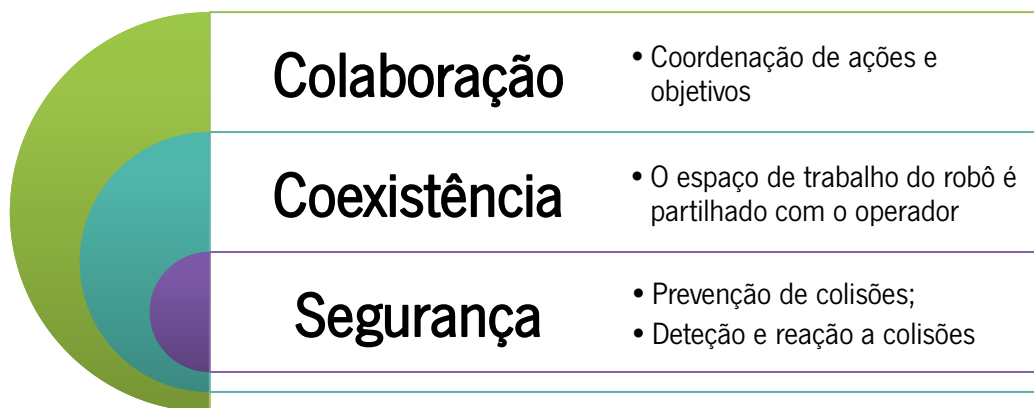


Figura 10 – Modelo hierárquico de níveis de interação entre um operador e um robô colaborativo.

Adaptado de [20]

Com a Figura 10 é possível concluir que uma subida do nível de interação entre o operador e a solução colaborativa requer que o nível do qual se parte tenha sido satisfeito. O que isto significa, no caso da segurança por exemplo, é que é necessário garantir que os sistemas internos de prevenção e reação a colisões se encontrem em funcionamento para admitir que a segurança do manipulador está conforme com as normas.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado caso seja pretendido passar de uma interação de coexistência para uma de colaboração, por exemplo. Neste caso, para atingir um estado de colaboração numa tarefa complexa, na qual existe interação direta e uma certa coordenação de movimentos, é necessário assegurar, em primeiro lugar, que ambas os elementos conseguem trabalhar separadamente no mesmo espaço de trabalho. [21]

É importante referir que existem níveis de colaboração adicionais àqueles mencionados até ao momento, níveis estes que se encontram entre o nível mínimo de interação da coexistência e o nível máximo de interação sob a forma da colaboração, como se pode observar na Figura 11.

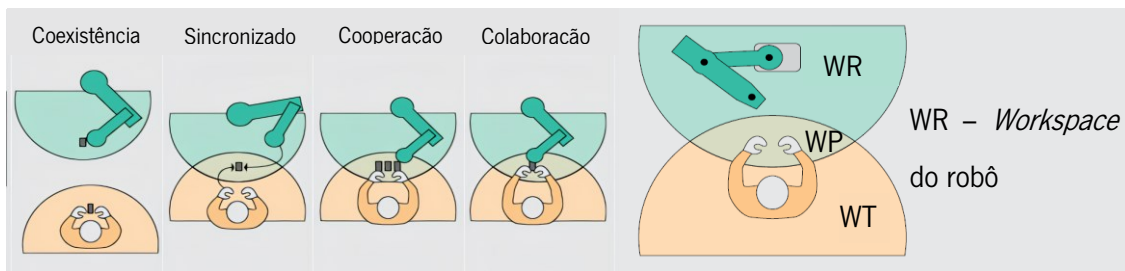


Figura 11 - Vários níveis de interação entre o trabalhador e o robô colaborativo.

Adaptado de [22]

Adicionalmente aos níveis apresentados previamente encontram-se os níveis “Sincronizado” e “Cooperação”. O primeiro diz respeito ao cenário em que ambos os elementos partilham um espaço de trabalho, mas nunca trabalham lá simultâneo, já o segundo refere-se a uma situação em que ambos estão a trabalhar no mesmo espaço de trabalho, mas nunca estão no mesmo produto ao mesmo tempo. [22]

### 2.2.3 Desafios

As maiores dificuldades pretendem-se na movimentação do manipulador numa área muito congestionada e na apreensão, por parte dos colaboradores, de integrar o robô na sua equipa. Esta apreensão deve-se a múltiplas razões, como falta de conhecimento da robótica em geral e de potenciais aplicações para o robô, ceticismo quanto aos níveis e protocolos de segurança usados e receio de perder o trabalho para a solução robotizada. [23]

Estudos demonstram que existem alguns casos de trabalhadores capazes de reconhecer as vantagens desta área da robótica. [16] No entanto aquilo que se verifica mais frequentemente é uma relutância difícil de ultrapassar, devido não exclusivamente, mas principalmente à segurança na operação do manipulador. Não só deve ser seguro de usar, mas também parecer seguro, pois é importante assegurar uma boa experiência de utilização ao operador. Algumas funções de segurança que deve possuir incluem:

- Sistemas de deteção de proximidade: O robô possui a capacidade de deteção de pessoas e objetos e ajustar o seu comportamento caso algo seja detetado;
- Sistemas de deteção de colisão: Uma colisão deverá ser detetada através da monitorização de uma força ou de um momento de torsão anormalmente elevado nas juntas do manipulador;
- Atuadores com rigidez variável: A possibilidade em obter uma determinada rigidez para uma junta consoante a programação utilizada permite rapidamente fazer a transição entre um robô totalmente rígido para um capaz de ceder facilmente, o que poderá ser útil no caso de uma colisão. [24]



O outro fator que impede a adoção generalizada de robótica colaborativa e, por isso, que merece ser mencionado é a falta de conhecimento e dúvidas acerca das vantagens desta tecnologia, pela simples razão de ser uma novidade na indústria. Existe alguma incerteza acerca da eficiência operacional de um robô colaborativo, já que esta normalmente é medida sem ter em conta paragens ou ritmos de trabalho mais lentos por ter colidido ou quase colidido com o colaborador. Uma outra dúvida questiona os impactos, a curto, médio e longo prazo, que esta tecnologia terá nos empregos dos operadores e se realmente funciona apenas como uma ferramenta e não como uma solução que os substitua. Por último é importante mencionar que ainda existe muita ambiguidade na implementação dos *standards* inerentes ao robô, sejam estes de segurança, da aplicação em questão, entre outros. [22]

#### 2.2.4 Segurança

A segurança é um pré-requisito na projeção de qualquer produto, mas ganha uma importância redobrada quando se trata de um espaço de trabalho partilhado por um colaborador e por um robô colaborativo. Com o intuito de simplificar o desenvolvimento de novos sistemas foram criados vários *standards* de segurança, os quais reúnem num só documento todos os requerimentos funcionais e diretrizes para o desenho dos componentes. [21]

Os standards de segurança podem ser divididos em três tipos:

- Tipo A: Diz respeito ao conjunto dos padrões de segurança mais básicos, aplicados a todo o tipo de maquinaria. Exemplos de normas deste tipo são a ISO 12100 e a IEC 61508.
- Tipo B: Refere-se aos padrões de segurança genéricos. Caso seja do grupo de padrões B1, identificam-se normas como a ISO 13849-1 e IEC 62061 que especificam a conceção de sistemas de segurança de baixa complexidade. Caso se trate do grupo B2 já se encontrarão normas como a ISO 13850 e ISO 13851, que descrevem os aspetos funcionais de um botão de emergência e dispositivos de controlo que requerem duas mãos para funcionar, respetivamente.
- Tipo C: Coleção de normas que especificam as medidas de segurança para maquinaria específica. Um exemplo de particular relevância é a norma ISO 10218, que regula a segurança de robôs industriais.

A norma ISO 10218 é dividida na ISO-10218-1 (ISO 10218-1:2006 “*Industrial Robots - Safety Requirements - Part 1: Robots*”) [25], que diz respeito aos requerimentos de segurança no fabrico dos robôs, e na ISO-10218-2 (ISO 10218-1:2008 “*Industrial Robots - Safety Requirements - Part 2: Robotic Systems and Integration*”) [26], que é destinada para a pessoa que integrar o sistema na determinada aplicação. Adicionalmente foi criado a norma ISSO TS 15066 [27] que fornece alguma informação extra no que toca ao funcionamento normal do robô.

### 2.2.5 Aplicações

Um robô colaborativo oferece imenso potencial no que toca à variedade de tarefas que pode automatizar.

A sua implementação trará vantagens como:

- Aumento da produtividade que advém da automatização das tarefas mais repetitivas;
- Aumento da qualidade através da utilização de sistemas de inspeção automáticos;
- Reduzidos custos de aquisição, de montagem e de uma eventual mudança de tarefa;
- Permitem alocar os operários a tarefas mais desafiantes e recompensadoras;
- Melhora drasticamente a saúde dos trabalhadores visto que os está a poupar de tarefas por vezes pouco ergonómicos ou, em alguns casos, de elevado risco de lesão;
- Elevada flexibilidade de aplicação, o que permite mudar a tarefa do robô muito facilmente devido às suas reduzidas dimensões, programação intuitiva e vasta gama de acessórios; [13]

Este último ponto é realmente uma das principais razões pela qual este tipo de robótica tem vindo a crescer a um ritmo tão acelerado. Ao contrário de uma solução robótica tradicional, que seria construída e implementada para uma aplicação muito específica, qualquer robô colaborativo foi projetado para conseguir desempenhar o maior número de aplicações possível.

A aplicação talvez mais facilmente associada com um robô deste tipo é numa tarefa de *Pick & Place*. Esta tarefa consiste no transporte de uma peça de um ponto A para um ponto B, com uma mudança ou não da sua orientação. Na sua forma mais simples as peças são apresentadas ao robô através de um tapete rolante, numa posição e orientação previsível e estável ao longo do tempo. Este tipo de aplicação é um dos mais usados por todo o mundo, não só pela sua simplicidade de implementação, mas também por estar a substituir um trabalhador numa das tarefas mais mundanas, repetitivas e exaustivas num ambiente produtivo. A instalação de uma tarefa deste tipo requer um *end-effector* próprio para pegar na peça em questão. Atualmente existem várias soluções *off-the-shelf*, como dedos manipuladores e ventosas, cujos exemplares ser observados na Figura 12a) e Figura 12b), respetivamente. [13]

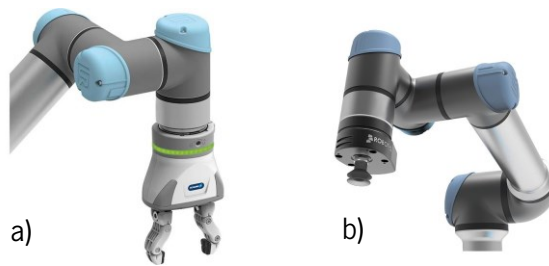


Figura 12 - End-effectors comumente usados para aplicações do tipo *Pick & Place*:

a) Dedos manipuladores; [28] b) Ventosa com sistema de vácuo. [29]

Uma outra aplicação, que se baseia nos princípios base de uma tarefa *Pick & Place*, é o embalagem e a paletização. Na grande maioria das empresas existe a necessidade de embalar e/ou colocar os produtos embalados numa palete, pronta para ser transportada. Neste processo surge a oportunidade de implementar um robô colaborativo para fazer estas mesmas tarefas, ou seja, colocar o produto acabado em caixas e, posteriormente, organizar estas caixas sob a forma de uma paleta. Ademais estas tarefas envolvem cargas não muito elevadas para um manipulador deste tipo, são extremamente repetitivas e previsíveis. Para automatizar um processo de embalagem ou paletização é necessário um *end-effector* apropriado e um sistema de monitorização de tapes de rolantes. O *end-effector* terá uma configuração algo semelhante àquela vista na Figura 12b), já o sistema de monitorização deverá recorrer a sensores, por exemplo sensores por infravermelhos, para informar o controlador do robô acerca da chegada de uma caixa à posição predefinida. Um esquema de um processo típico de paletização pode ser observado na Figura 13. [13]



Figura 13 - Cobot a desempenhar uma tarefa de paletização com o auxílio de um tapete rolante.

[30]

As aplicações supramencionadas e pequenas variações são consideradas aplicações de manuseio de peças e constituem a maioria dos casos de implementação da robótica. Os últimos dados registados estimam que 71.9% dos robôs colaborativos instalados desempenham funções de montagem e de manuseio de peças. [18]

Neste último o robô tem apenas o papel de manipular o objeto em questão para o processo seguinte na cadeia de produção. O robô, neste caso, é usado como uma ferramenta apenas, de forma a aliviar a carga no trabalhador. [21]

Existem, no entanto, uma série de outras aplicações para a robótica colaborativa. Alguns exemplos são:

- Tarefas de processo, podendo ser soldadura, aplicação de cola e outros produtos;
- Tarefas de acabamento, como polir ou rebarbar;
- Processos de inspeção de qualidade;
- Aplicação à indústria automóvel. [13]

## 2.3 Qualidade

O termo qualidade é muito abrangente e não existe consenso sobre o seu real significado. Este termo representa diferentes conceitos dependendo se é analisado com a perspectiva de um produtor ou de um cliente, sendo que o último será o único tratado em diante.

### 2.3.1 Definição e importância

Uma das primeiras propostas para o termo indicava que “qualidade” se refere a “conformidade com os requerimentos”. [31] O escritor e professor *Peter F. Drucker* apresentava um ponto de vista complementar a este, defendendo que “qualidade” significava “aquilo que o cliente recebe em troca e está disposto a pagar”. [32] Talvez a definição mais comumente usado é a de *Joseph M. Juran*, que define o termo “qualidade” como sendo “aptidão para um uso”. [33]

Contudo o mesmo autor fez uma reformulação na definição, querendo isto dizer que o termo agora significa “aptidão para um propósito”, isto é, deve-se satisfazer as necessidades do cliente com ausência de falhas e garantir bom atendimento ao cliente caso surja uma. Esta definição também refere que o produto deve não só ser eficiente na forma como responde às necessidades do cliente, mas, em simultâneo, deve haver a preocupação de ser eficiente no sentido de melhorar o desempenho do negócio. [34] Para esta dissertação será usada a última definição apresentada, isto é, “qualidade significa aptidão para um propósito”.

A procura contínua por qualidade traz benefícios culturais e, naturalmente, económicos. O último ponto é de partir relevância pois o aumento da qualidade não era visto como um método para melhorar receitas, mas sim como um contratempo para a maioria das empresas. [32] Os efeitos financeiros da qualidade podem ser agrupados em dois grupos: receitas e custos da qualidade.

O aumento da qualidade, segundo a definição de *Joseph M. Juran*, indica que o produto irá responder melhor às necessidades do cliente. Daqui resulta um produto mais desejado, um aumento do setor no mercado, a possibilidade de cobrar um preço maior e, por fim, um maior volume de vendas. Este último fator tem um valor redobrado pois um aumento de 20% no volume de vendas pode traduzir-se num aumento de 50% de lucro, visto que o custo fixo se mantém constantes (é possível ver este fenómeno representado sob a forma de um gráfico na Figura 14). [34]

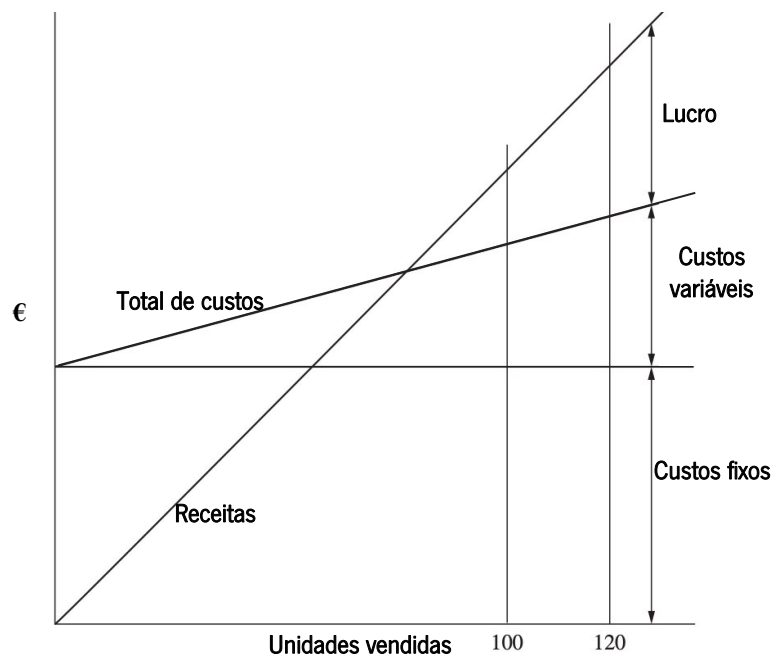


Figura 14 - Gráfico "Break-Even". Adaptado de [34]

O outro tipo de custos que afeta o lucro de uma empresa são os custos de qualidade, podendo estes ser custos de boa ou de má qualidade. Os custos de má qualidade devem-se a:

- Erros internos: Estes custos devem-se a falhas internas, isto é, são detetadas antes do produto ser comercializado. Podem ter a forma de avarias, refazer produtos, horas extra, sucata, entre outros.
- Erros externos: Estes custos devem-se a falhas externas e, por isso, apenas são detetadas após o produto ser comercializado. Alguns exemplos deste tipo de falhas incluem reclamações e possíveis devoluções, pedidos de garantia, entre outros.

O total de custos de má qualidade (COPQ) mostra às empresas a dura realidade sobre o quanto os seus lucros foram afetados. Ao fazer cálculos detalhados do COPQ é criado um guia de como eliminar esses custos, removendo sistematicamente a má qualidade que os criou. É ainda de notar que os custos sobem exponencialmente à medida que o produto ultrapassa uma etapa no seu ciclo produtivo.

Isto significa que será menos dispendioso detetar uma falha ao inspecionar os materiais em bruto do que detetar uma falha na verificação final do produto. A Figura 15 procura ilustrar a subida de preços após várias etapas de controlo da qualidade do produto. [35]

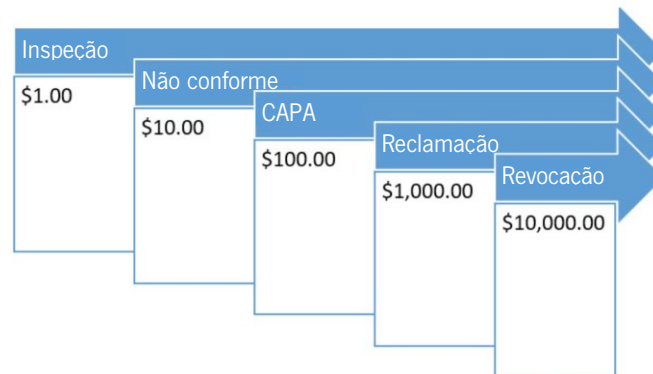


Figura 15 - Modelo ilustrativo da subida dos custos após as várias fases de controlo de qualidade. Adaptado de [35]

Como já foi referido anteriormente existem custos de boa qualidade, podendo originar-se por:

- Custos de prevenção: Custos atribuídos a práticas para detetar problemas/não conformidades antes que estes aconteçam. Pode identificar-se, como exemplos, sessões de formação, planeamento da produção, controlo de qualidade fora da linha, entre outros.
- Custos de avaliação: Custos atribuídos a atividades que permitam avaliar produtos/serviços antes que estes sejam comercializados. Alguns exemplos destas atividades incluem testes de laboratório, inspeções, certificação, entre outros

### 2.3.2 Manage for quality

Esta expressão diz respeito ao conjunto de passos e cuidados a ter para garantir a produção de um produto de alta qualidade. Dependendo da época e da definição que se usa para “qualidade” esta filosofia também sofre algumas alterações. Durante a maioria do século passado como um produto de qualidade era aquele que funcionava de acordo com as expectativas do cliente, o importante era conhecer os seus requerimentos, sendo que “*manage for quality*” significava apenas “produto que cumpre com os requerimentos”.

Com o passar do tempo o conceito de “qualidade” abrangia outros serviços relacionados com o produto, como embalagem, atendimento ao cliente e *design*. Com esta mudança a filosofia “*manage for quality*” também sofreu uma reformulação, referindo-se agora ao “conjunto de métodos que qualquer empresa ou negócio pode usar para obter resultados superiores, ao desenvolver, melhorar continuamente e garantir que todos os produtos, serviços e processos satisfazem as necessidades dos clientes e dos *stakeholders*”. [34]

O uso generalizado destas técnicas levou à criação de vários modelos, alguns usados até ao dia de hoje. O exemplo mais notório é o modelo para melhoria da qualidade *Six Sigma*, atualmente adotado por empresas como *Samsung* e *Oracle*. [36] As empresas expandiram o uso das ferramentas mais básicas deste modelo para toda a cadeia produtiva e com isto descentralizaram a responsabilidade de obter qualidade. Para demonstrar a importância da qualidade para uma empresa foi elaborada a Tabela 2, que apresenta os benefícios para os dois fatores chave de “qualidade”.

*Tabela 2 - Benefícios esperados para uma empresa quando aumentam a qualidade dos produtos. [33]*

<b>Corresponder com as necessidades e expectativas do cliente</b>	<b>Ausência de falhas no produto final</b>
<p><b>Permite às empresas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar a satisfação do cliente;</li> <li>• Servir as necessidades de uma sociedade;</li> <li>• Tornar produtos e serviços vendáveis;</li> <li>• Ganhar margem no mercado;</li> <li>• Ultrapassar a competição;</li> <li>• Melhorar as receitas;</li> <li>• Cobrar preços mais elevados;</li> </ul>	<p><b>Permite às empresas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuir a taxa de ocorrência de erros;</li> <li>• Reduzir necessidade de refazer produtos;</li> <li>• Reduzir falhas e custos associados a garantias do produto;</li> <li>• Reduzir a insatisfação do cliente;</li> <li>• Reduzir número de inspeções, testes e auditorias;</li> <li>• Reduzir o tempo de desenvolvimento de um novo produto;</li> <li>• Melhorar a capacidade da empresa;</li> <li>• Melhorar o desempenho de entrega;</li> </ul>
<p><b>O maior efeito está nas receitas</b> Neste caso qualidade superior é mais cara</p>	<p><b>O maior efeito está nos custos internos</b> Neste caso qualidade superior é mais barata</p>

## 2.4 Projeto Mecânico

A principal responsabilidade de qualquer projetista é de aplicar os seus conhecimentos técnicos na resolução de problemas técnicos o otimizar a solução tendo em conta restrições específicas do projeto, em termos de materiais, custos, entre outros. O seu objetivo consiste em responder da melhor forma aos requerimentos e exigências do cliente. [37]

Esta atividade de engenharia é altamente complexa e exige uma conjugação de conhecimentos específicos de diferentes áreas. Associado ao facto que a etapa de projeto terá um enorme impacto no desempenho técnico e/ou económico do produto em questão, torna-se necessária a criação de métodos sistemáticos que possam clarificar os passos a seguir para o projetista. [37]

### 2.4.1 Modelos descritivos

Os modelos descritivos procuram descrever a sequencia típica de atividades que um projetista deve seguir. Este tipo de modelos está orientado para soluções, defendendo que deve ser feito um esforço para gerar soluções conceptuais o mais cedo possível no projeto. Tipicamente uma solução conceptual é analisada, avaliada, refinada e preparada para produção. Em casos em que uma dada solução não passe da fase de análise ou avaliação é gerada uma nova solução conceptual e o ciclo é reiniciado, como pode ser observado na Figura 16. [38]

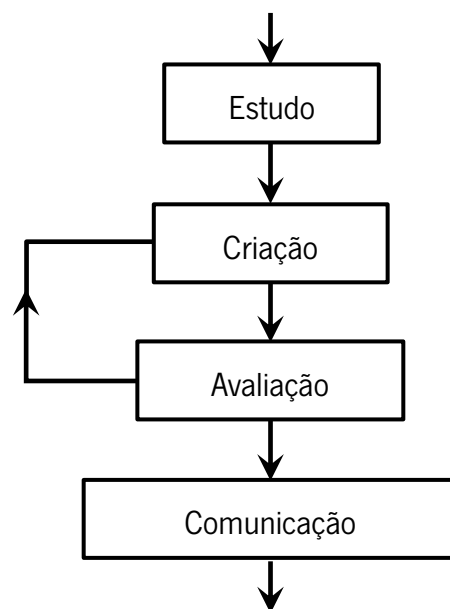


Figura 16 - Estrutura típica de um modelo descritivo. Adaptado de [38]

Após a proposta de solução ter sido avaliada tendo em conta os requisitos, os objetivos e as restrições levantadas, o ponto final do processo será a comunicação da solução criada, pronta para produção.



## 2.4.2 Modelos prescritivos

Para além de fornecer um guia convencional sobre os passos a seguir no projeto (à semelhança do que acontece com os modelos descritivos), os modelos prescritivos ambicionam motivar e convencer o projetista a adotar melhores hábitos de trabalho. Pode-se mesmo afirmar que estes modelos oferecem uma metodologia de projeto sob a forma de um procedimento sistemático, com a mesma filosofia de um algoritmo.

Todos os modelos prescritivos põem um maior foco no trabalho analítico feito antes da geração de soluções. Com isto pretende-se garantir que o problema do projeto foi bem compreendido e que nenhum elemento constituinte do mesmo é ignorado.

Os modelos prescritivos seguem uma estrutura básica, sugerida por John Jones em 1963, composta por:

- Análise: Identificação dos requerimentos de *design* e conversão dos mesmos numa lista de especificações de desempenho;
  - Síntese: Criação de possíveis soluções para cada especificação de desempenho e geração de *designs* completos;
  - Avaliação: Avaliar a forma como as propostas de solução correspondem com os requerimentos de desempenho no que toca à utilização, produção e eventual venda do produto em questão;
- [39]

Apesar de, à primeira vista, este modelo parecer simples e convencional, na verdade são bem mais complexos que um modelo descritivo, por exemplo. Neste caso as especificações de desempenho derivam diretamente dos problemas identificados, e através da geração e combinação de possíveis sub-soluções é possível determinar qual será o *design* mais apropriado. [38]

Ao longo do tempo foram criados vários modelos que seguem os princípios mencionados. Um caso de particular relevância foi criado pela associação profissional de engenheiros na Alemanha, também conhecida por “VDI” (*Verein Deutscher Ingenieure*). Esta associação criou uma série de procedimentos, incluindo a “*VDI 2221: Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products*”. Como o próprio nome indica este é um método sistemático, no qual o processo do projeto é dividido em etapas de trabalho mais genéricas, tornando-o um método racional e aplicável a qualquer indústria. Na Figura 17 é possível observar a estrutura da diretiva *VDI 2221*, não só as etapas que a constituem, mas também a forma como se relacionam e os resultados esperados após a conclusão de cada etapa.

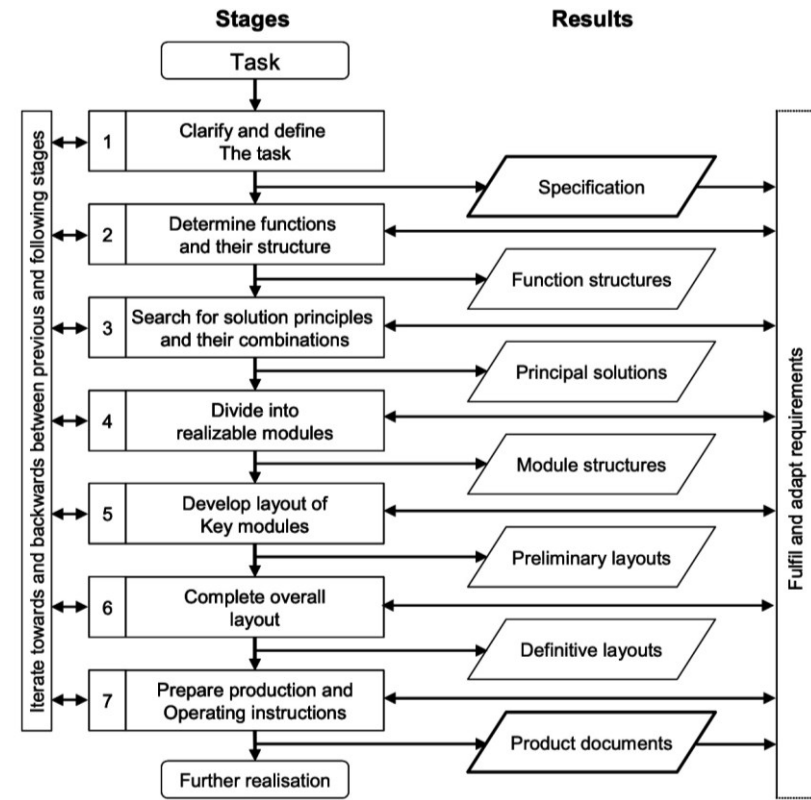


Figura 17 - Estrutura da diretiva VDI 2221. [40]

Uma estrutura típica para uma VDI defende que, primeiramente, o problema deve ser analisado exhaustivamente, deve ser depois quebrado em sub-problemas, arranjar sub-soluções adequadas para os mesmos e agrupar as sub-soluções numa solução final. Uma falha nesta abordagem é que apoiam que a análise do problema deve ser feita sem considerar qualquer possível solução, quando na realidade o problema e a solução são desenvolvidos em simultâneo, havendo uma relação simétrica entre ambos. Desta forma desenvolveu-se um modelo que integra os dois, no qual se mantém uma relação interativa entre o problema geral e a solução final, e entre os sub-problemas e as sub-soluções, como se pode observar na Figura 18.

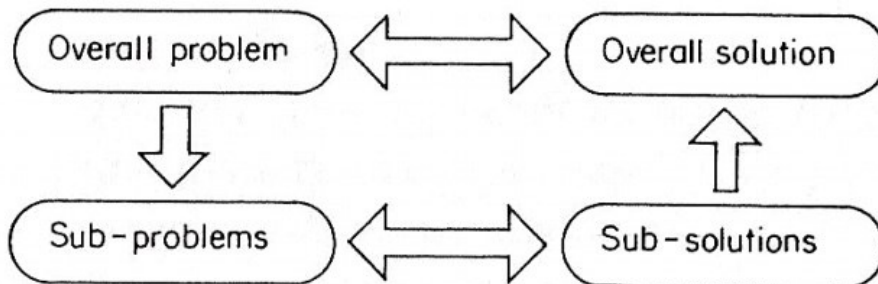


Figura 18 - Modelo ilustrativo das relações comutativas entre (sub)problemas e (sub)soluções. [38]

### 2.4.3 Modelos sistemáticos

Fatores como a maior complexidade de *designs* modernos, o aparecimento de novos materiais e a revolução de certos componentes eletrônicos criaram novos desafios para um projetista. A experiência passada em nada os irá ajudar a criar um produto com as novas exigências mencionadas, o que exige um novo método de projeto. Este método não só deverá auxiliar o projetista ultrapassar estes novos obstáculos como também ajudar a coordenar uma equipa de trabalho, para que se trabalhe da forma mais organizada e eficiente possível. Outros objetivos a cumprir com a introdução destes novos métodos incluem a redução do tempo necessário para o projeto e a ausência de erros detetáveis apenas na fase de produção. [38]

A necessidade de se criar novos métodos de projeto culminou na criação de dois tipos: métodos criativos e métodos racionais. Apesar de serem complementares e serem ambos necessários num projeto estes dois tipos apresentam diferenças notórias. Os métodos criativos foram criados para incentivar a criatividade dos projetistas e a geração de ideias, fazendo por remover qualquer bloqueio mental ou, se necessário, desafiar o projetista a tomar outro ponto de vista. Os métodos racionais, para além de partilharem alguns valores com os métodos criativos, tomam uma abordagem mais sistemática, nos quais se dá uma formalização de certos procedimentos de forma a prevenir erros e distrações. [38]

Existe uma grande variedade de métodos racionais utilizados em projeto mecânico. A Figura 19 mostra a relação entre sete dos métodos mais relevantes, desde a identificação e clarificação do problema até ao *design* detalhado.

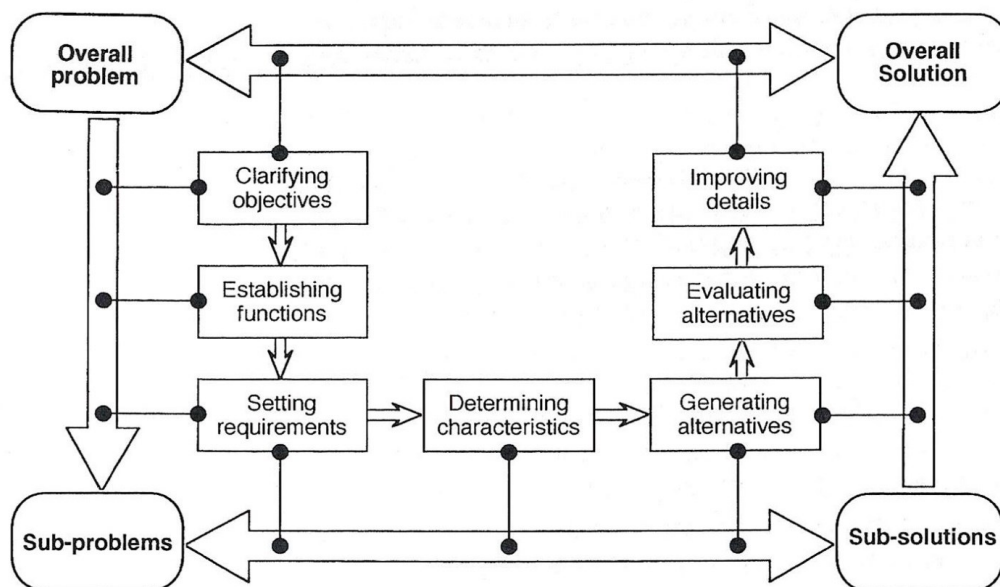


Figura 19 - As etapas do design inseridas no modelo problema/sub-problemas e solução/sub-soluções.

### 3. SISTEMA ROBÓTICO NUM LABORATÓRIO DE TESTE DE MATÉRIA

Neste capítulo é explicado o processo de conceção da componente física do teste. Começando por analisar o problema, o desenvolvimento passa por definir os objetivos e as funções a cumprir pelo teste e posteriormente trata do projeto conceptual e projeto de detalhe de um suporte, do *end-effector* e do manipulador.

### 3.1 Definição do problema

Este projeto surgiu da necessidade de garantir a durabilidade de determinados produtos ao cliente final. A particularidade deste problema prende-se no facto de, em certos produtos, não são imediatamente visíveis problemas de qualidade e/ou sinais de um possível falha, em nenhum momento da produção. Um exemplo representativo deste tipo de problema é o rasgão do *pocche-cc*, nas zonas destacadas na Figura 20.



*Figura 20 - Exemplo de pocche-cc (porta-cartões) da empresa.*

Atualmente a empresa não tem a capacidade de garantir, com exatidão, que este tipo de produto dure um determinado número de anos. Isto acontece, pois, o rasgão que possa surgir nas zonas destacadas na Figura 20 são o resultado do desgaste equivalente a anos a inserir e retirar cartões. Esta falha constitui um erro externo e é o principal motivo de reclamação de produtos de pequena marroquinaria e consequente retorno à loja. Pode-se assim admitir que o rasgão dos *pocche-cc* é um fenómeno recorrente, não controlável e um dos maiores motivos de reclamação de entre todos os produtos. Este último ponto não só tem um impacto económico direto, mas também indireto, porque está-se a prejudicar a imagem da marca no processo e a diminuir a chance de reter o cliente. Por forma a poder garantir, com confiança, que o produto aguente um uso normal durante um determinado número de anos, a solução passará por simular o uso do cliente por esse mesmo período. Por outras palavras será necessário criar um teste de laboratório que simule o comportamento e movimento de um cliente, de forma a testar a resistência da peça, após um determinado número de ciclos.

### 3.2 Estabelecimento de objetivos

O passo seguinte na conceção deste teste foi a definição dos objetivos que o mesmo deveria satisfazer. Esta etapa é fulcral e constituiu o ponto de partida para se estabelecerem os requisitos e especificações associadas ao teste desenvolvido.

O método da árvore de objetivos possibilita uma exposição mais clara da lista dos objetivos, realçando ainda os meios por os conquistar e as relações hierárquicas entre os mesmos. Adicionalmente esta metodologia permite obter uma melhor percepção sobre o problema em questão. Este método é sequenciado e envolve três etapas distintas: preparar a lista de objetivos, agrupar elementos da lista em conjuntos e por fim representar esquematicamente a árvore de objetivos.

### 3.2.1 Lista de objetivos

A lista de objetivos consiste num conjunto de intenções e objetivos, concretos e abstratos, que se espera atingir com este projeto. A sua definição é por vezes vaga, muitas vezes para não limitar o projeto ao excluir possíveis objetivos. Após os objetivos estarem todos descritos, sob a forma da Tabela 3, foi possível observar que que alguns têm um nível de importância superior a outros.

Tabela 3 - Lista de objetivos para o teste de laboratório desenvolvido.

Objetivos	Importância relativa
Fiável e repetível	10
Movimentação precisa	10
Teste desenhado para receber múltiplas peças	8
Flexível	7
Movimento previsível e seguro	9
Apresentar componentes de produção simples	7
Facilidade de programar	6
Optar preferencialmente por componentes <i>off-the-shelf</i>	6
Mecanicamente robusto	8
Apresentar um funcionamento intuitivo	6
Segurança do próprio equipamento	7
Permitir a elaboração de testes diferentes no futuro	8
Apresentar capacidade de carga suficiente	7
Conter sistemas de proteção ao utilizador	9
Custo reduzido	6

### 3.2.2 Ordenação da lista de objetivos

Sendo este o caso foi elaborada uma nova lista, expressa na Tabela 4. Esta nova lista permite estabelecer os níveis de importância, isto é, os sub-objetivos foram agrupados em conjuntos, cada um relacionado com um objetivo de nível superior e, posteriormente, estes foram ordenados por grau de importância.

Tabela 4 - Lista de objetivos e sub-objetivos ordenados por níveis de importância e por objetivos de nível superior.

Objetivos		Importância relativa
Fiabilidade	Fiável e repetível	10
	Movimentação precisa	10
	Mecanicamente robusto	8
	Apresentar capacidade de carga suficiente	7
Facilidade de utilização	Facilidade de programar	9
	Apresentar um funcionamento intuitivo	8
Segurança	Movimento previsível e seguro	9
	Segurança do próprio equipamento	9
	Conter sistemas de proteção ao utilizador	7
Rentabilidade	Teste desenhado para receber múltiplas peças	8
	Apresentar componentes de produção simples	7
	Optar preferencialmente por componentes <i>off-the-shelf</i>	6
Atratividade	Permitir a elaboração de testes diferentes no futuro	8
	Flexível	7
	Custo reduzido	6

### 3.2.3 Método da árvore de objetivos

Depois de ordenada a lista de objetivos procedeu-se à esquematização desses mesmos objetivos e sub-objetivos num diagrama (Figura 21) onde foram representadas as relações hierárquicas de ordem de importância.



Figura 21 - Árvore de objetivos para o teste de laboratório criado.

Neste diagrama tem-se objetivos de nível superior (os que se localizam acima) e objetivos de mais baixo nível (os que se encontram na parte inferior do diagrama). As ligações no sentido descendente indicam como é que se pode alcançar um objetivo de nível superior ao passo que as ligações no sentido ascendente indicam o porquê da inclusão de um objetivo de mais baixo nível.

### 3.3 Método de análise de funções

Após a realização da árvore de objetivos foi possível observar níveis de generalidade muito diferentes. Nesta fase do projeto é muito importante questionar o nível de generalidade adequado, pois poderá ser necessário um elevado nível para a proposta de soluções inovadoras ou um baixo nível para uma análise mais focada e detalhada ao problema proposto.

Por forma a averiguar qual é o nível do problema foi delineado, primeiramente, as funções essenciais que um tipo de solução deveria necessariamente satisfazer. Foi, por isso, necessário criar uma estrutura de funções para auxiliar e explicitar os intervalos de liberdade que se teve para desenvolver propostas que satisfaziam os requisitos funcionais.

A estrutura de funções foi dividida em dois diagramas: um para a função global, onde se observa a conversão de entradas em saídas através de um “caixa negra”; um segundo diagrama no qual a “caixa negra” se transforma numa caixa transparente, sendo desta forma visíveis todas as sub-funções que permitem a execução uma função de nível superior, isto é, a função global.

#### 3.3.1 Função Global

Para definir a função global foi necessário pensar no que devia ser alcançado pelo teste, mas não como devia ser alcançado. Assim, olhando para o teste de laboratório, foi identificada a sua função global: testar a resistência das peças. Deve ainda garantir-se que todas as entradas e saídas estão listadas e classificadas convenientemente de acordo com três grandes conjuntos, isto é, materiais, energia e informação/sinal.

Pela observação da Figura 22 é notório que as entradas estão convenientemente definidas, sendo que a matéria corresponde às peças a serem testadas, a energia diz respeito à energia elétrica e a informação corresponde à programação criada para desempenhar o teste. Como saídas tem-se as peças sujeitas ao teste e os dados fornecidos pelo robô para uma análise posterior.



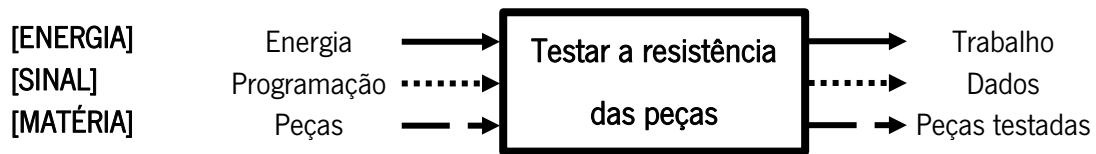


Figura 22 - Estrutura da função global para o teste de laboratório desenvolvido.

### 3.3.2 Subfunções

De modo a possibilitar a iniciação do teste é necessário fixar a peça ao suporte, com um pedaço de borracha na interface entre os dois componentes. Após ter-se garantido que a peça está bem fixa, o próximo passo será selecionar o programa correspondente á peça a ser testada. Os dois passos mencionados constituem as subfunções fora dos limites do sistema, como se pode verificar na Figura 23.

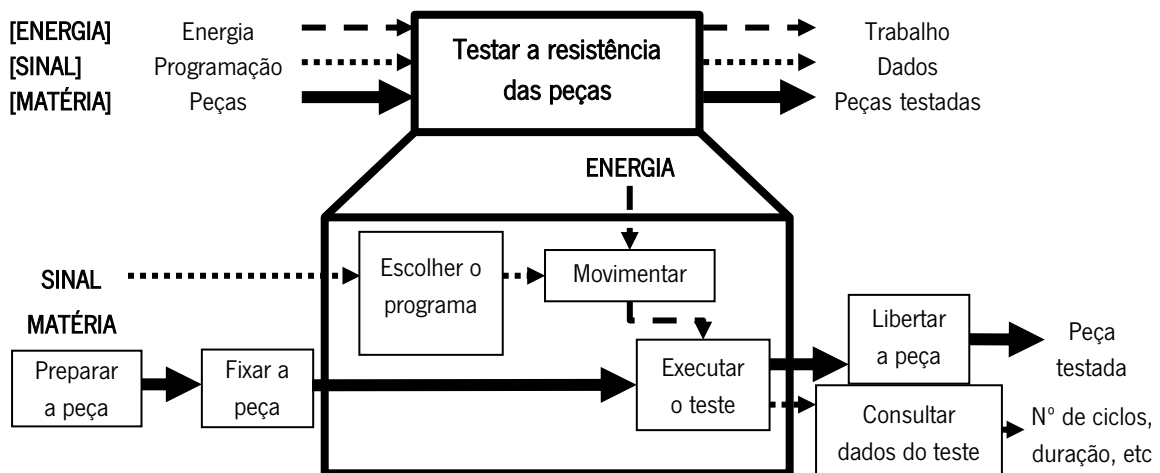


Figura 23 - Esquema das subfunções do teste de laboratório desenvolvido.

Além das subfunções mencionadas dever-se-á escolher o programa designado para a peça em teste de entre uma biblioteca já criada, permitindo assim a entrada de “Energia” e conseqüentemente o “Movimentar” do robô. De seguida a função global, “Testar a resistência das peças” é cumprida na forma da subfunção “Executar o teste”, concluindo assim o mesmo.

Dado como concluído o teste deve proceder-se à retirada da peça testada, obtendo assim a saída pretendida, e à retenção de alguns dados relevantes sobre a execução do teste, como por exemplo o número de ciclos até se observar um rasgão na peça, o tempo necessário para cada ciclo, entre outros.

### 3.4 Projeto conceptual

#### 3.4.1 Requisitos de funcionamento

Tendo em conta a estrutura de funções e a árvore de objetivos, previamente realizados, foi possível estabelecer quais são os atributos de desempenho necessários para o correto funcionamento do teste.

Assim, concluiu-se que o mesmo devia garantir:

- Funcionamento intuitivo;
- Reduzido custo;
- Elevada segurança;
- Grande robustez;
- Elevada fiabilidade;
- Flexibilidade e polivalência;
- Elevada capacidade de carga;

Dos atributos seleccionados, é importante ainda identificar quais são aqueles que são exigidos e aqueles desejados. Como atributos exigidos foram identificados a segurança, elevada fiabilidade de movimentação e execução do teste e elevada capacidade de carga. A segurança, tanto do utilizador como para o próprio equipamento, é sempre o ponto de partida para qualquer projeto, ganhando particular importância por se tratar de um cenário onde há uma interação homem-máquina. É ainda exigido que o teste apresente uma elevada robustez, em todos os componentes que o constituem, não só por uma questão de segurança e custo, mas mais uma vez para evitar comprometer a precisão na movimentação do manipulador.

Como atributos desejados podem ser indicados um sistema de funcionamento intuitivo para o utilizador, um reduzido custo, flexibilidade e polivalência do teste. Os últimos pontos referidos não são necessários para a execução do sistema final, mas são estes os responsáveis por tornar a experiência de utilização do produto mais cómoda e confortável.

#### 3.4.2 Especificações técnicas

O estabelecimento dos requisitos de um produto serve como ponto de partida para se definirem as especificações do mesmo. As especificações técnicas são, essencialmente, as características quantificadas capazes de satisfazer os atributos escolhidos. Desta forma criou-se a seguinte tabela (Tabela 5), com todas as especificações discretizadas. Cada especificação foi classificada como desejada ("W") ou exigida ("D"), com base no requisito a que correspondem.


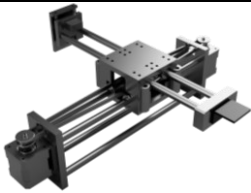
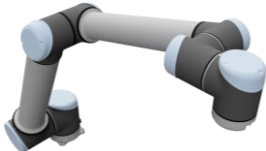
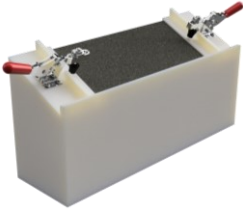
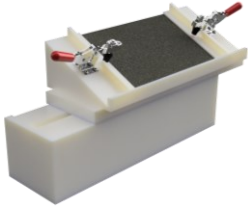
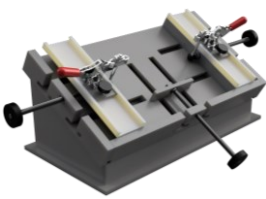

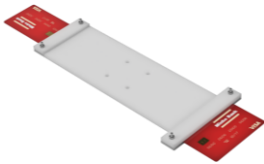

Tabela 5 - Listagem das especificações técnicas requeridas ao teste de laboratório.

		<i>Especificações técnicas</i> para Teste de Laboratório	Pág.1
Mudanças	D ou W	<i>Requerimentos</i>	Responsável
	W	Ambiente gráfico de programação	
	W	Programação simples e programação por demonstração	
	D	Sistemas de segurança individual	
	D	Sistemas de segurança para o próprio equipamento	
	D	Segurança segundo norma EN ISO 10218-1:2011	
	D	Movimentação com repetibilidade de +/- 0.5 mm	
	D	Movimentação com 6 DOF	
	D	Força máxima aplicável > 100 N	
	D	Velocidade máxima de movimentação > 2000 mm/s	
	W	Suporte de fixação ajustável	
	W	Uso de materiais com custo médio < 2€/kg	
	D	Materiais com $\sigma_y > 50$ MPa	
	D	Ausência de arestas vivas	

### 3.4.3 Mapa morfológico

O método do Mapa morfológico permite organizar as diferentes opções para cada uma das áreas a desenvolver e fazer a melhor junção entre elas de modo a obter um melhor princípio de solução. Deste modo foi elaborada uma tabela de dupla entrada (Tabela 6), onde na vertical surgem as sub-funções desenvolvidas para o teste e na horizontal surgem as diferentes sub-soluções para os respetivos tópicos. Posteriormente foram também feitas novas combinações de elementos, isso é, foram agrupadas diferentes sub-soluções de diferentes sub-funções.

Tabela 6 - Mapa morfológico para o teste de laboratório.

Soluções Sub-funções	1	2	3
Manipulador A			
Suporte B			
End-effector C			

Assim que mapa morfológico foi concluído, todas as soluções teoricamente possíveis para o produto foram apresentadas. No entanto, como o número de combinações é exatamente 27, não é possível analisar todas essas combinações. Assim, optou-se por limitar o conjunto de sub-soluções em cada linha e apenas considerar as que cumprem determinados critérios, nomeadamente a simplicidade, eficiência e baixo custo. A peça-chave neste teste é o manipulador/mecanismo que faz a inserção e retirada do cartão na própria peça. Apesar de se poder utilizar um manipulador linear de apenas um DOF, para que o teste se aproxime do movimento real de uma pessoa é necessária uma maior dexteridade por parte do mesmo. Neste caso a solução ideal passa por recorrer a um braço articulado de 6 DOF, não só porque permite obter movimentos muito próximos aos de um humano, mas também porque possui a capacidade de automatizar outras etapas do teste.

Tendo isto em conta elaboraram-se 4 princípios de solução:

- 1ª solução: A3 – B2 – C1;
- 2ª solução: A3 – B2 – C3;
- 3ª solução: A3 – B3 – C1;
- 4ª solução: A3 – B3 – C3;

### 3.4.4 Método de DATUM

O método DATUM é um método para avaliar e selecionar a melhor proposta de solução para ser desenvolvida posteriormente. Desta forma, as soluções criadas e apresentadas no mapa morfológico são comparadas com uma referência (DATUM). Para fazer essa comparação, foi criada uma tabela de dupla entrada na qual os objetivos são apresentados verticalmente e as soluções apresentadas horizontalmente.

As células que intercetam um objetivo com um conjunto de solução devem ser preenchidas com um “+”, “-” ou “s”, no caso de a solução em questão ser melhor, pior ou semelhante. Depois de surgirem 4 soluções do mapa morfológico foram avaliadas, por comparação direta, com uma solução de referência constituída pelos elementos A3, B1 E C1 da Tabela 6, usando o método DATUM. A importância relativa de cada objetivo permanece igual àquela atribuída previamente no subcapítulo 3.2.1, resultando na seguinte Tabela 7.

Tabela 7 - Método de DATUM.

	IR	S1	S2	S3	S4	Referência
Fiável e repetível	10	s	s	s	s	D
Movimentação precisa	10	s	s	s	s	A
Mecanicamente robusto	8	s	s	-	-	T
Apresentar capacidade de carga suficiente	7	s	s	s	s	U
Facilidade de programar	9	s	s	s	s	M
Apresentar um funcionamento intuitivo	8	s	s	s	s	
Movimento previsível e seguro	9	s	s	s	s	
Segurança do próprio equipamento	9	s	s	s	s	
Conter sistemas de proteção ao utilizador	7	s	s	s	s	
Teste desenhado para receber múltiplas peças	8	+	+	+	+	
Apresentar componentes de produção simples	7	-	-	+	-	
Optar preferencialmente por componentes <i>off-the-shelf</i>	6	-	-	+	-	
Permitir a elaboração de testes diferentes no futuro	8	s	+	s	+	
Flexível	7	+	+	+	+	
Custo reduzido	6	s	-	s	-	
<b>Total +</b>		2	3	4	3	0
<b>Total -</b>		2	3	1	4	0
<b>Soma total</b>		0	0	3	-1	0
<b>Peso total</b>		2	4	20	-4	0

Ao analisar a Tabela 7 é possível concluir que a solução 3 é a mais indicada para o presente projeto e, por isso, foi desenvolvida nos subcapítulos seguintes.

### 3.5 Projeto de detalhe

#### 3.5.1 Manipulador

Para o presente projeto a empresa disponibilizou um braço articulado com 6 DOF. O braço robótico em questão constitui um importante elemento daquilo que era conhecido como “robô Silva”. O robô Silva tratava-se de um sistema embebido, no qual se encontra um já mencionado braço robótico articulado no centro da estrutura e uma série de periféricos que o auxiliavam e que permitia desempenhar processos de pintura automatizada. Na Figura 24 é possível encontrar a constituição exterior do robô Silva, com a respetiva legenda.

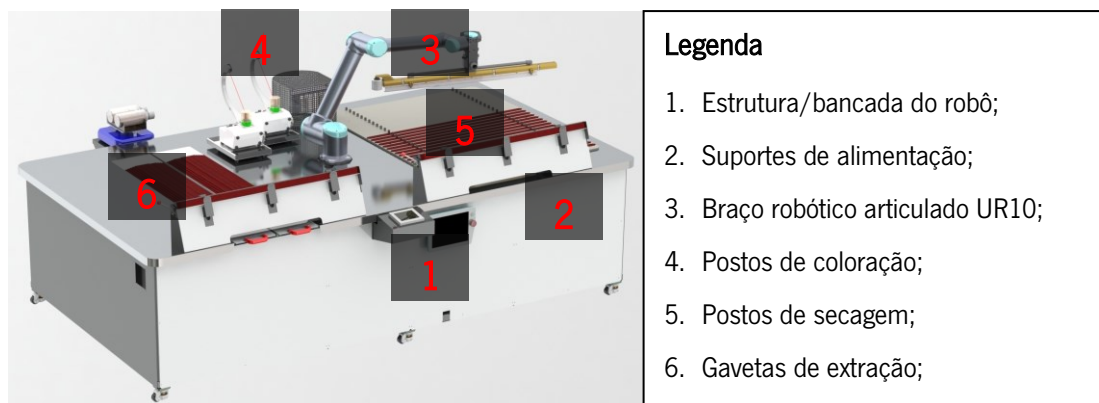


Figura 24 – Ilustração dos vários postos constituintes do robô Silva.

O braço em questão é um Universal Robot UR10, um braço robótico colaborativo de 6 DOF, com uma capacidade de carga útil de 10 kg e um alcance de trabalho de 1300 mm. O UR10 tem uma repetibilidade de 0,1 mm, o que o torna ideal para processos que exigem uma elevada precisão de movimentação, e uma velocidade máxima da ferramenta de 1 m/s (outras características e especificações técnicas foram expressas no Anexo B). Os robôs colaborativos da Universal Robots são conhecidos pela sua facilidade de programação, podendo usar-se programação por demonstração para indicar o movimento desejado. O UR10 pode trazer muitas vantagens, como:

- Programação fácil e intuitiva usando o ecrã incorporado e o *software* próprio *Polyscope*;
- Muito flexível devido a possuir 6 DOF;
- Disponibilidade de vários acessórios compatíveis, como *end-effectors*, no mercado;
- Permite trabalhar ao lado de colaboradores sem barreiras de segurança.

Na Figura 25 é possível observar a localização e denominação normalmente dada a cada uma das seis juntas de rotação do braço em estudo, bem como a posição do TCP. Após observar o nome das juntas é possível aferir que estas foram atribuídas com base numa comparação feita com o braço humano visto existirem múltiplas semelhanças.

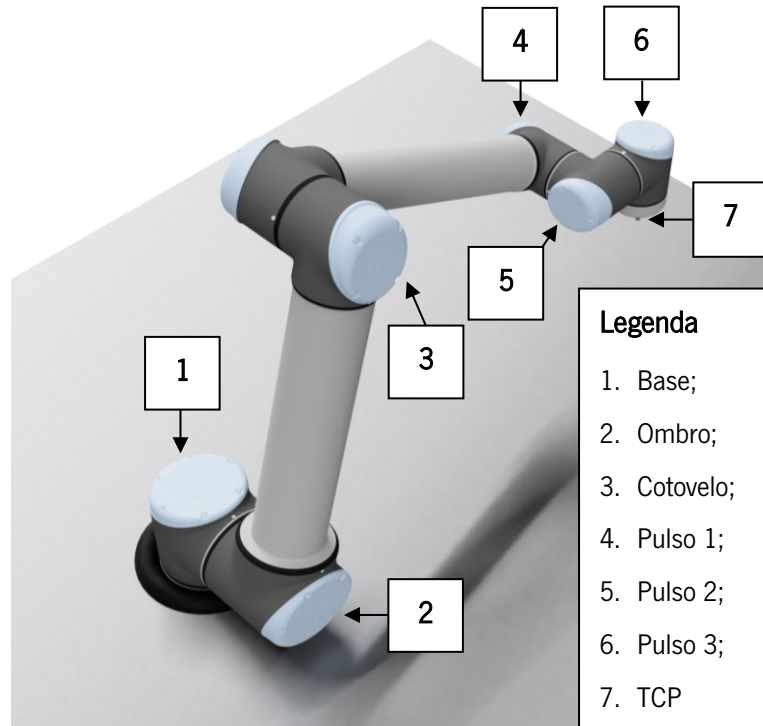


Figura 25 - Identificação e nomenclatura dada às seis juntas do braço robótico e do TCP.

No eixo de rotação de cada junta encontra-se montado um motor sem escovas de ímãs permanentes com uma nova tecnologia denominada “*integrated harmonic drive*”. Esta tecnologia reduz o número de peças necessárias, resultando num braço de menor tamanho, maior fiabilidade e menor peso. Como são os motores a lidar diretamente com a carga aplicada obtém-se uma excelente precisão de movimento e controlo de força. Todos estes fatores associados à sua elevada capacidade de carga tornam este tipo de motores a opção ideal para braços articulados de massa reduzida.

O movimento do robô consegue-se através da conjugação entre as seis juntas, sendo esta feita automaticamente pelo seu controlador. Para se iniciar um movimento é necessário indicar dois pontos no espaço e o robô fará uma trajetória que intercepe esses pontos, sem qualquer intervenção adicional. Para se selecionar estes dois pontos poderá usar-se um controlo do estilo *joystick* no ambiente de programação ou, alternativamente, poderá mover-se manualmente o braço para as duas ou mais posições pretendidas. Naturalmente o movimento criado terá tanta mais complexidade quanto maior for o número de pontos selecionados.

O robô também possui vários tipos de movimento, nomeadamente:

- *Move J* – Movimentação rápida não-linear, utilizada em situações em que se pretende rapidamente mover o TCP entre dois pontos e nas quais o caminho escolhido não é relevante (não pode possuir nenhum obstáculo ou restrição). Ex: Movimentações de aproximação;
- *Move L* – Movimentação linear, utilizada em situações em que se pretende mover o TCP entre dois pontos e nas quais é imperativo que o percurso seja linear. Ex: Inserir e/ou retirar uma peça de um orifício;
- *Move P* – Movimentação de processo, utilizada em situações em que se pretende mover o TCP entre dois pontos e nas quais é pretendido que se mantenha uma velocidade constante. Ex: Aplicação de cola e movimentos circulares.

Como já foi discutido anteriormente para que o robô se desloque segundo os eixos cartesianos X, Y e Z o robô terá que converter a posição desejada no espaço em deslocações angulares em cada uma das juntas. A este cálculo dá-se o nome de cinemática inversa e, ao contrário da cinemática direta, este cálculo pode ter múltiplas soluções, soluções únicas, soluções indeterminadas ou mesmo soluções impossíveis. Para os casos em que o cálculo para as deslocações angulares é impossível significa que o robô não consegue fisicamente mover-se para aquele ponto em específico. A única explicação para estes casos é que o ponto escolhido está fora do espaço de trabalho do robô (assinalado a cinzento na Figura 26).

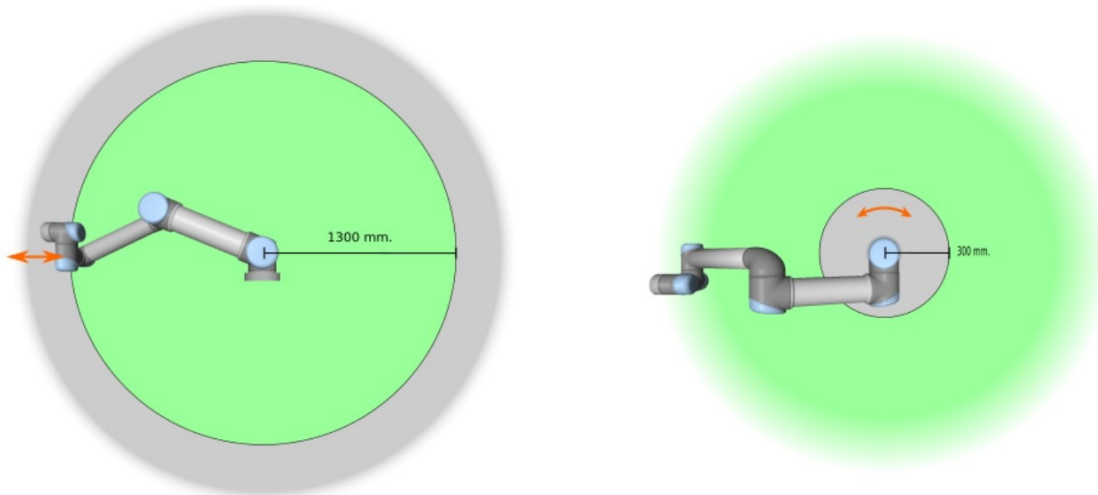


Figura 26 - Espaço de trabalho (assinalado a verde) do UR10. [41]

Em termos teóricos uma singularidade ocorre quando se perde um ou mais eixos de liberdade, o que torna impossível a movimentação do TCP numa determinada orientação. Em termos práticos espera-se uma singularidade quando o cálculo para as deslocações das juntas é indeterminado, isto é, o cálculo degenera e seriam necessários valores de velocidade de valor infinito ou excessivamente altos nas juntas para deslocar o TCP para aquele ponto.



Apesar do robô conseguir deslocar-se para todos os pontos no espaço esférico assinalado a verde na Figura 26 as singularidades ocorrem, na verdade, mais frequentemente nessa zona. Verificam-se frequentemente nos pontos próximos do limite de espaço de trabalho, tanto exterior como interior, devido à forma como se encontram montadas as juntas.

Movimentos lineares que passem próximo do limite interior do espaço de trabalho, mesmo que lentos, exigem um movimento muito rápido por parte da junta na base do robô, o que pode constituir um risco tanto para o manipulador como para o utilizador. Adicionalmente, também poderão verificar-se singularidades para casos em que existam dois ou mais eixos de rotação das juntas alinhados entre si, como se pode observar no exemplo presente na Figura 27.

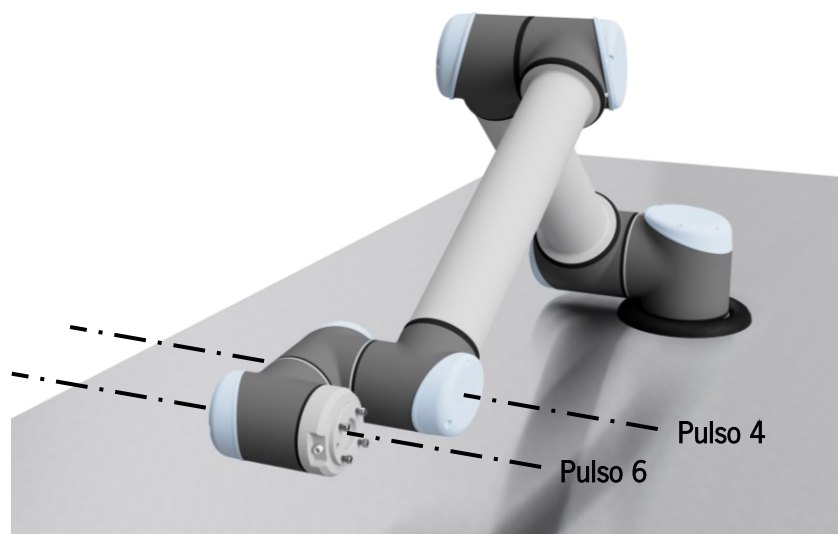


Figura 27 - Singularidade do pulso 4 e pulso 6

Quando se está muito próximo de se atingir uma singularidade o robô automaticamente adapta-se para salvaguardar os componentes que o constituem. Em casos extremos em que se verifique uma situação que possa realmente danificar o manipulador, como um embate em si mesmo, será dada uma paragem de emergência.

As funções de movimentação mostram ser as mais relevantes na programação do robô visto que, independentemente da aplicação, será sempre necessário algum tipo de movimento por parte do robô. Todavia existe uma enorme variedade de funções extra que permitem suportar o movimento do robô e obter aplicações mais complexas e autónomas. Alguns exemplos incluem:

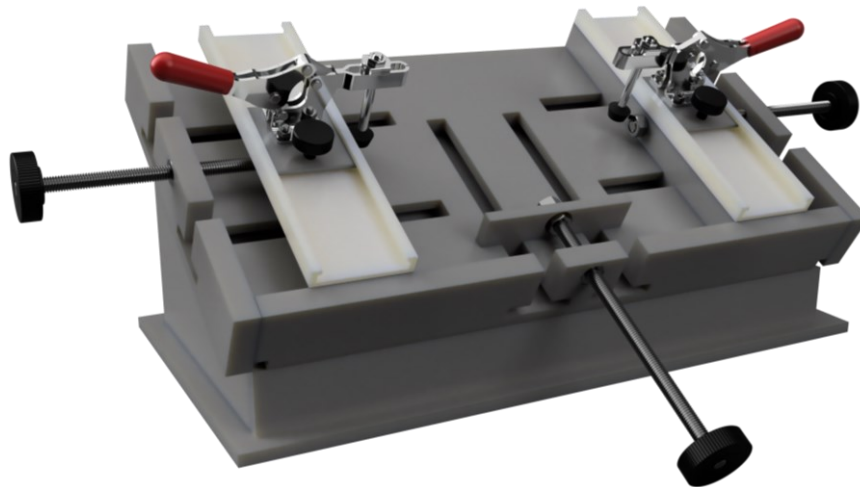
- Função “*Wait!*”: Permite que o manipulador espere por um determinado período de tempo ou de um *input* externo para continuar com o seu funcionamento (ex: aguardar a chegada de uma peça para pegar na mesma);

- Função “*Set*”: Possibilita o envio de sinais, analógicos ou digitais, para dispositivos ligados ao controlador do robô (ex: ligar ou desligar uma *gripper*);
- Função “*If...Else*”: Esta função cria uma condição, e uma alternativa, o que permite dar um novo nível de complexidade e flexibilidade ao programa criado (ex: criar uma paragem caso detete uma força no TCP acima de um valor pré-definido).

De forma a apoiar projetos futuros desenvolveu-se um manual com instruções acerca de como iniciar e programar o robô, no qual são explicados os procedimentos de iniciação e demonstradas outras funções de programação (encontra-se inserido no Anexo C).

### 3.5.2 Suporte de fixação

O requisito de maior relevância para este sistema foi a habilidade de fixar peças de múltiplos tamanhos e formatos de forma precisa e cómoda. Por motivos de validação do teste o suporte também deveria afixar a peça numa superfície com declive acentuado. Com esta informação por base, e depois de dar como concluído o projeto conceptual, chegou-se à solução apresentada na Figura 28.



*Figura 28 - Suporte ajustável desenvolvido.*

Apesar de se ter ponderado um suporte com a parte superior removível, no qual cada modelo a testar teria a respetiva parte, esta solução iria recorrer a demasiado material e a um espaço considerável para armazenar o inventário de suportes. A solução final apresentada na Figura 28 foi a escolhida pela sua flexibilidade de utilização, pela precisão que oferece no ajuste do tamanho e pela reduzido custo e tempo de produção. Todas estas características devem-se à utilização de três paredes móveis, as quais são ajustadas com a rotação dos respetivos fusos, o que oferece uma infinidade de ajustes de posição de uma maneira conveniente para o utilizador. Como o suporte foi projetado para testar peças de formatos variáveis foi também necessário pensar numa solução para ajustar o ponto de fixação das peças.

Este sistema foi projetado para que, quando necessário, se consiga imobilizar a mola de uma forma rápida e intuitiva. As paredes móveis e os respetivos fusos, o sistema móvel das molas de fixação e todos os outros componentes não referidos podem ser observados na vista explodida presente na Figura 29 com a devida legenda.

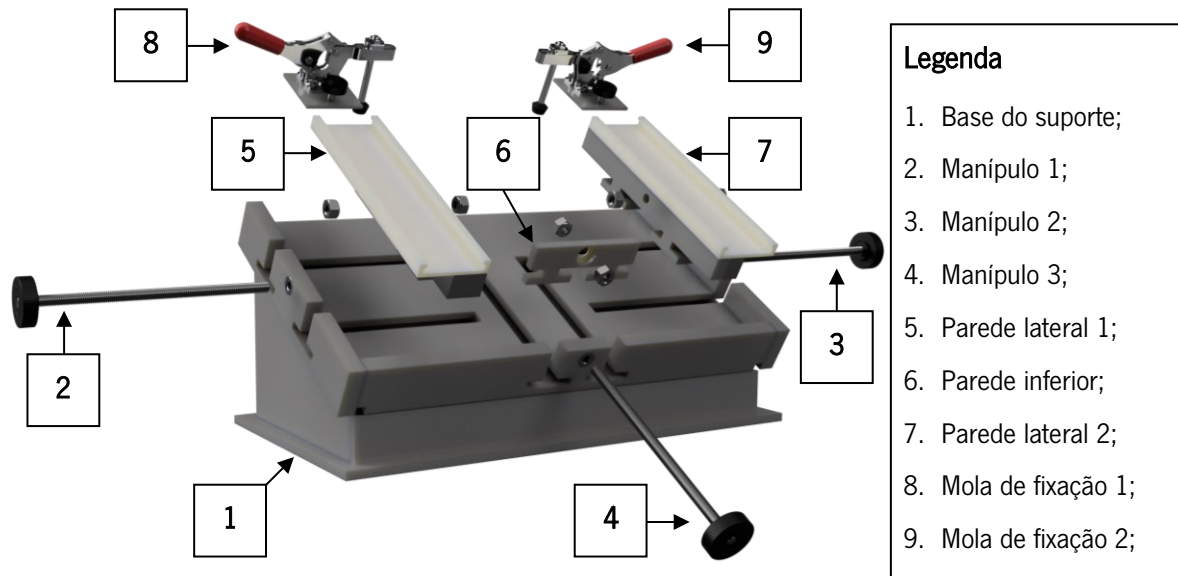


Figura 29 - Vista explodida e legenda do suporte ajustável desenvolvido.

Como se pode perceber da Figura 29 o manipululo 1 ajusta o deslocamento da parede lateral 1 sobre a base do suporte, o manipululo 2 ajusta a posição da parede lateral 2 e o manipululo 3 ajusta a posição da parede inferior. Na Figura 29 também é possível verificar um sistema para a regulação da posição das molas de fixação. Este é constituído por 2 calhas afixadas à parte superior das paredes laterais 1 e 2 bem como por uma placa e por um manipululo de aperto (com um veio roscado M4), ambos montados na base das molas de fixação 1 e 2. Na Figura 30 será mais perceptível o conceito de funcionamento deste sistema.

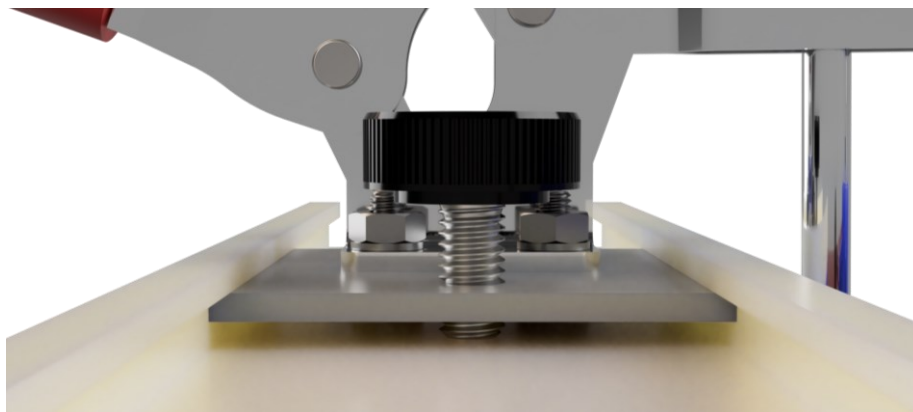
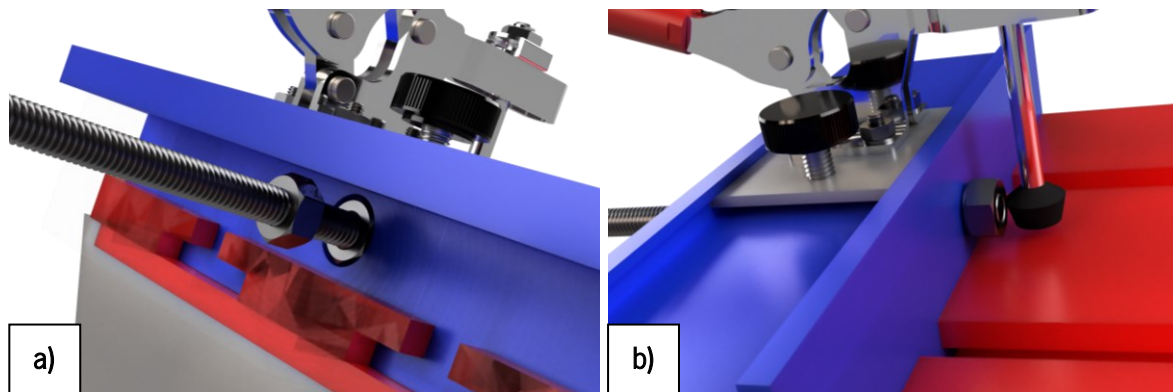


Figura 30 - Sistema para imobilizar a posição das molas de fixação.

Na Figura 30 pode-se constatar que a mola de fixação é presa à placa através de um conjunto de parafusos e porcas. Deve referir-se ainda que o manipulador destacado na Figura 30 encontra-se roscado à placa, querendo isto dizer que ao rodar o manipulador fará com que este suba ou desça em relação à mesma. Se o manipulador for enroscado ao ponto que a sua extremidade inferior toque na calha a placa irá começar a fletir e, desta forma, irá garantir a imobilização de todo o conjunto. Neste projeto teve-se especial cuidado para garantir uma elevada resistência estrutural do sistema durante o intervalo de tempo no qual a mola é fechada, quando já foi imobilizada.

A movimentação das paredes laterais e inferior foi assegurada com um princípio de funcionamento semelhante ao do manipulador referido anteriormente. O sistema para cada parede é constituído por um fuso roscado, uma porca sextavada cravada na base do suporte (à esquerda na Figura 31a) e duas outras porcas autoblocantes presas ao fuso (à direita na Figura 31a) e na Figura 31b), com os fusos com 120 mm de comprimento e todos os elementos de medida M6.



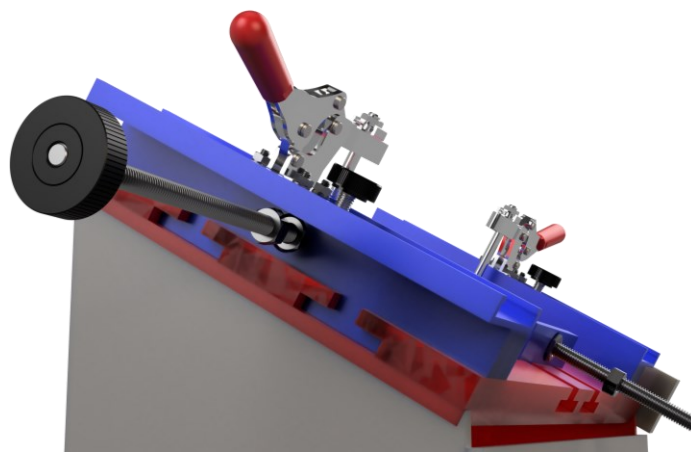
*Figura 31 - Mecanismo de ajuste de posição das paredes laterais e inferior.*

Como o fuso apenas está roscado na porca fixa ao suporte (as duas restantes rodam em conformidade), a sua rotação provocará o avanço ou o recuo do conjunto da parede visível na Figura 31. Neste caso irá deslocar-se 1 mm após cada rotação (esta medida corresponde ao passo e terá de ter o mesmo valor entre o fuso e a porca para que os mesmos sejam compatíveis).

Cada par de porcas autoblocantes têm o papel de conter a parede, isto é, minimizar as folgas e garantir que o movimento da mesma apenas é proporcionado pela rotação do manipulador. Como as porcas são autoblocantes espera-se que rodem sempre em conformidade com o fuso, eliminando assim o risco de desenroscarem. Com o intuito de evitar um desgaste excessivo e esforços desnecessários nos órgãos mecânicos estas porcas foram montadas de forma que haja uma pequena folga com a parede (a folga total é inferior a 1 mm).

A necessidade de obter uma movimentação precisa e linear das paredes laterais e inferior obrigou ao desenho de uma corredeira. Esta corredeira não só tem o papel de restringir o movimento no plano coincidente com a superfície inclinada do suporte como também de impedir quaisquer deslocamentos verticais.

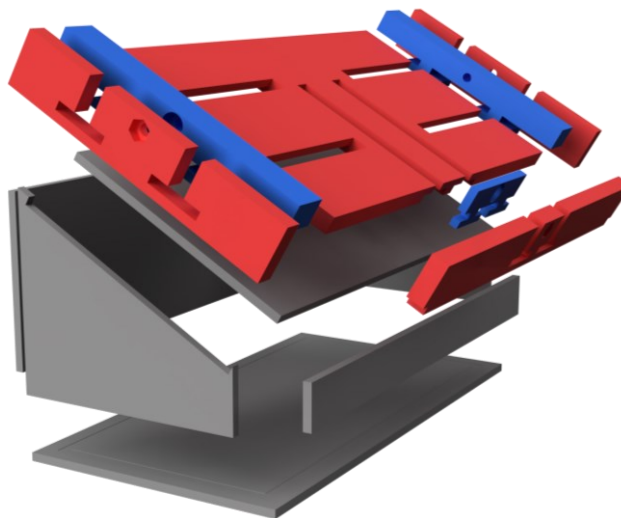
A força que provoca este tipo de deslocamentos tem origem na ação de fechar a mola. Como se pretende que a peça a testar fique totalmente presa ao suporte a força da mola é considerável, e por isso foi necessário desenvolver um mecanismo que contrariasse esta força e garantisse que as paredes se mantivessem juntas à superfície do suporte. Na Figura 32 é possível ver o perfil escolhido para as corredeiras (a vermelho) e, conseqüentemente, para as paredes (a azul).



*Figura 32 - Sistema de corredeiras criado para restringir o movimento das paredes.*

A construção da base do suporte pode ser subdividida em dois grupos:

- Parte superior (assinalado a vermelho na Figura 33);
- Parte inferior (assinalado a cinzento na Figura 33).



*Figura 33 - Vista explodida da base do suporte (a cinzento e vermelho) e das paredes móveis (a azul).*

A parte superior é constituída por quatro peças, todas produzidas por corte CNC de uma placa de PVC de 10 mm de espessura. Uma dessas peças incorpora as corrediças e, devido ao papel que desempenham e à relevância que o seu desenho tem na flexibilidade do teste, criou-se um desenho técnico para a mesma, que consta no Anexo D . A partir das dimensões deste componente, e sabendo que as paredes laterais (representadas a azul na Figura 33) são também feitas a partir de duas placas de PVC de 10 mm cortadas em CNC, é possível afirmar que:

- Comprimento máximo admitido: 239 mm;
- Comprimento mínimo admitido: 80 mm;

Sabendo que a parede inferior (representada, à direita, a azul na Figura 33) foi produzida por corte CNC de uma placa de 5 mm de PVC, também é seguro admitir que:

- Largura máxima admitida: 143 mm;
- Largura mínima admitida: 48.5 mm;

A parte inferior da base do suporte é constituída por um total de seis peças, todas estas fabricadas por meio de corte CNC de placas de PVC de 5 mm. Depois de alinhadas, com o auxílio de rebaixos feitos por fresagem, as peças foram coladas entre si de forma a formar a parte inferior da base do suporte. A parte de cima foi também construída com o mesmo princípio, tendo-se colocado as paredes móveis nas corrediças antes de colar as paredes fixas (assinaladas a vermelho na Figura 33). Assim que foram concluídas as etapas de montagem de ambas as partes procedeu-se à colagem das duas e obteve-se a base do suporte.

Nos passos que se sucederam utilizaram-se quase exclusivamente elementos *off-the-shelf*. Nas paredes laterais foi adaptada uma calha, que serviria um importante componente para o sistema de ajuste das molas de fixação mencionado anteriormente. Este sistema requereu ainda o fabrico à medida de uma placa para cada mola, feita novamente por corte CNC de uma placa de PVC de 2 mm. Os restantes componentes incluem manipuladores, parafusos e porcas normalizadas.

Para se acabar o sistema foi necessário cravar três porcas sextavadas M6 nos respetivos orifícios das paredes da parte superior da base do suporte. Dado como concluído este passo procedeu-se à montagem dos manipuladores responsáveis pela movimentação das paredes móveis. Os fusos foram enroscados nas porcas mencionadas, foi-lhes inserida uma porca autoblocante (a cerca de 20 mm da extremidade), foram introduzidos nos respetivos orifícios das paredes móveis e, para concluir, foi enroscada uma segunda porca autoblocante alinhada com a ponta do fuso.

### 3.5.3 End-Effector

Para o presente projeto houve a necessidade de adquirir ou produzir um *end-effector* para o braço robótico. Este componente tem como principal função de suportar um cartão (idealmente dois) e, simultaneamente, apresentar uma estrutura robusta. Adicionalmente pretendia-se que o *end-effector* fosse economicamente viável para a empresa e que contasse com uma baixa massa. Apesar de que *gripper* seja a solução mais polivalente para a escolha do *end-effector*, o custo não é justificado para o presente teste.

Para este componente optou-se pela opção mais simples, mas capaz de cumprir com os requisitos impostos. A solução escolhida consiste numa peça de PVC de 5 mm de espessura, obtida por corte por CNC, com um cartão colado em cada extremidade, como se pode verificar na Figura 34.

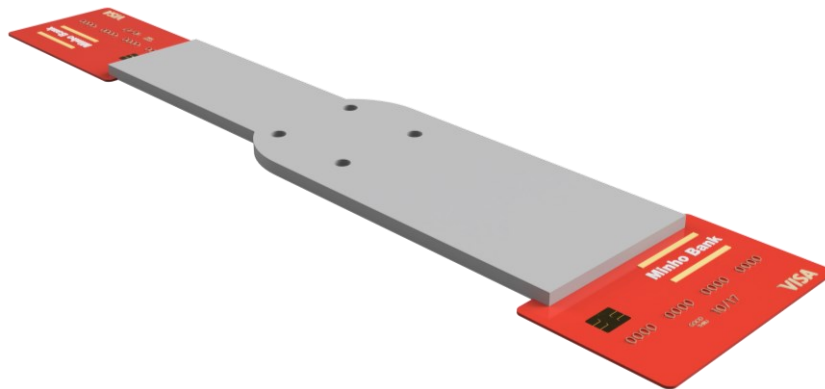


Figura 34 - End-effector desenvolvido com dois cartões afixados.

A opção de colar os cartões mostrou ser a única opção viável para os fixar à peça, tendo-se também considerado aparafusar ou usar um sistema de molas. Todas as alternativas à colagem adicionam um elemento abaixo da superfície inferior do cartão, o que pode criar contactos indesejados com a peça a testar ou mesmo com o suporte desenvolvido no momento do teste. De forma a obter uma maior resistência nas zonas de colagem desenharam-se uns pequenos degraus a 6 mm das extremidades da peça polimérica. Esta geometria foi produzida por uma fresagem de 0,5 mm de profundidade e foi desenhada para eliminar tensões de corte na colagem entre os cartões e a peça. Na Figura 35 pode observar-se este desnível.



Figura 35 - Degrau nas extremidades do end-effector para efeitos de alinhamento e resistência.

Na Figura 34 é possível identificar um padrão de furos no centro da peça polimérica. Este padrão foi criado para que esta peça pudesse ser montada diretamente na ponta do robô nos respectivos furos roscados. Com este sistema basta alinhar os furos do *end-effector* com os furos do robô e, através de quatro parafusos M5, com 0,5 mm de passo e norma ISO 21269, é possível fixar a peça ao robô. De forma a garantir o correto dimensionamento do *end-effector* realizou-se um estudo estrutural para o mesmo. Este estudo pretende determinar a largura mínima do *end-effector* para que este seja capaz de suportar uma carga de 100 N numa extremidade enquanto se encontra imobilizada pela outra extremidade. O cenário descrito pode ser visualizado mais facilmente na Figura 36.

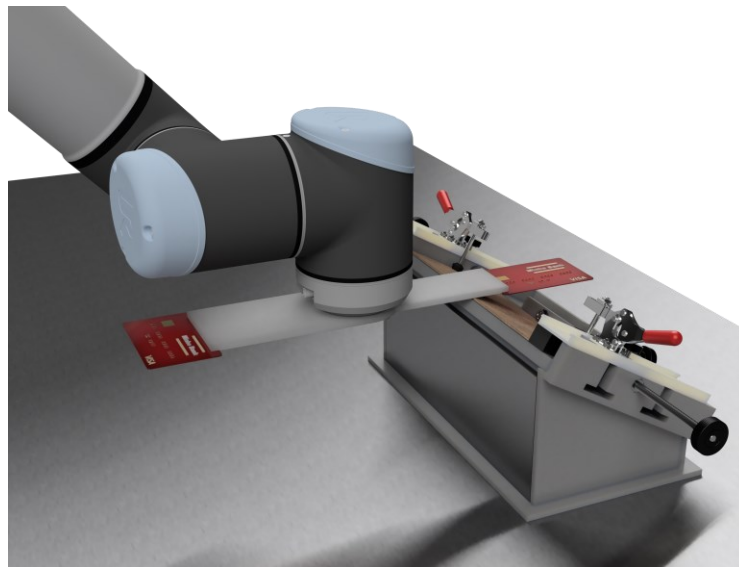


Figura 36 - Cenário de embate entre o end-effector e o suporte universal.

Para este estudo considerou-se o cenário mais extremo, no qual o manipulador está a movimentar-se verticalmente, de cima para baixo, e embate no suporte com a máxima intensidade, isto é, com  $F = 100$  N. Nesta análise o *end-effector* foi seccionado e apenas se examinou o lado de menor largura (à direita na Figura 36) visto ser representativo para o presente estudo. Considerou-se ainda que a peça se encontrava encastrada (à direita) e que a força do manipulador era distribuída pela distância entre dois dos parafusos que o prende ao *end-effector*. Tendo esta informação por base, e com as dimensões expressas no Anexo E, construiu-se o diagrama de corpo-livre presente na Figura 37.

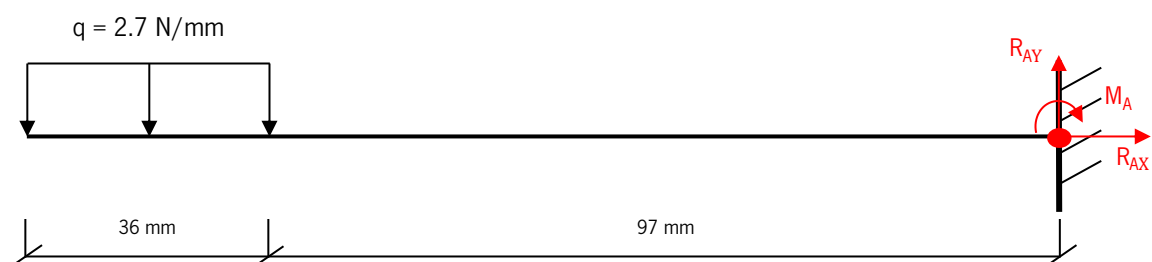


Figura 37 - Diagrama de corpo-livre do end-effector.



O primeiro passo a fazer é calcular as reações na barra. Sabendo que o corpo da barra está em equilíbrio o somatório de forças e momentos em qualquer ponto é nulo:

$$\sum_{i=1}^n F_{ix} = 0, \quad \sum_{i=1}^n F_{iy} = 0, \quad \sum_{i=1}^n M_A = 0 \quad ( 1 )$$

Pode então afirmar-se que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n F_{ix} = 0 \rightarrow R_{AX} = 0 \\ \sum_{i=1}^n F_{iy} = 0 \rightarrow -q_1 \times 36 + R_{AY} = 0 \\ \sum_{i=1}^n M_A = 0 \rightarrow q_1 \times 36 \times \left( \frac{97+36}{2} \right) - M_A = 0 \end{array} \right. \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_{AX} = 0 \text{ N} \\ R_{AY} = q_1 \times 36 = 2.7 \times 36 = 97.20 \text{ N} \\ M_A = 2.7 \times 36 \times \left( \frac{97 + 36}{2} \right) = 11178.00 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{array} \right.$$

O passo seguinte compreende a realização do diagrama de esforços transversos e o resultante diagrama de momentos fletores. Para isto usa-se a prática de subdividir a barra em segmentos e estudar cada segmento individualmente, utilizando os pontos que os unem para definir as condições de fronteira. Pode-se dividir a barra em dois segmentos:

- Correspondente a  $0 \leq x < 36$  (mm);
- Correspondente a  $36 \leq x < 133$  (mm).

Para a secção entre 0 e 36 mm, sabendo que o valor para os esforços transversos é dado por:

$$T = - \int w dx \quad ( 2 )$$

Tem-se:

$$T = - \int 2.7 dx = -2.7x + c \quad ( 3 )$$

Para  $x = 0$ :

$$T = 0 \rightarrow 0 = -2.7 \times 0 + c \rightarrow c = 0 \quad ( 4 )$$

Para  $x = 36$ :

$$T = -2.7 \times 36 \rightarrow T = -97.2 \text{ N} \quad ( 5 )$$

O momento fletor, em qualquer ponto, pode ser calculado pela integração do esforço transversal:

$$M = \int T dx \quad ( 6 )$$

Desta forma, para esta secção, a equação para o momento fletor é dada por:

$$M = \int (-2.7x) dx \rightarrow M = -\frac{2.7}{2} x^2 + c \quad ( 7 )$$

Para  $x = 0$ :

$$M = 0 \rightarrow M = -\frac{2.7}{2} 0^2 + c \rightarrow c = 0 \quad ( 8 )$$

Para  $x = 36$ :

$$M = -\frac{2.7}{2} 36^2 \rightarrow M = -1749.6 \text{ N}\cdot\text{mm} \quad ( 9 )$$

Para o segmento entre 36 e 133 mm deve repetir-se o procedimento. Neste caso, como não existem cargas externas aplicadas nesta secção (apenas conta com a reação  $R_{AY}$ ), pode-se concluir que para  $x = 133$ :

$$T = -R_{AY} = -97.2 \text{ N} \quad ( 10 )$$

Os momentos fletores, para esta secção, são dados pela expressão:

$$M = \int (-97.2) dx \rightarrow M = -97.2x + c \quad ( 11 )$$

Para  $x = 36$ :

$$-1749.6 = -97.2 \times 36 + c \rightarrow c = 1749.6 \quad ( 12 )$$

Para  $x = 133$ :

$$M = -97.2 \times 133 + 1749.6 = -11178 \text{ N}\cdot\text{mm} \quad ( 13 )$$

Pela convenção de sinais admite-se que  $M_A = -11178 \text{ N}\cdot\text{mm}$ . É-se levado a concluir que os valores coincidem e que, por isso, os cálculos estão corretos.

É então possível desenhar os diagramas de esforços transversos e de momentos fletores para o presente problema, como se pode observar na Figura 38.

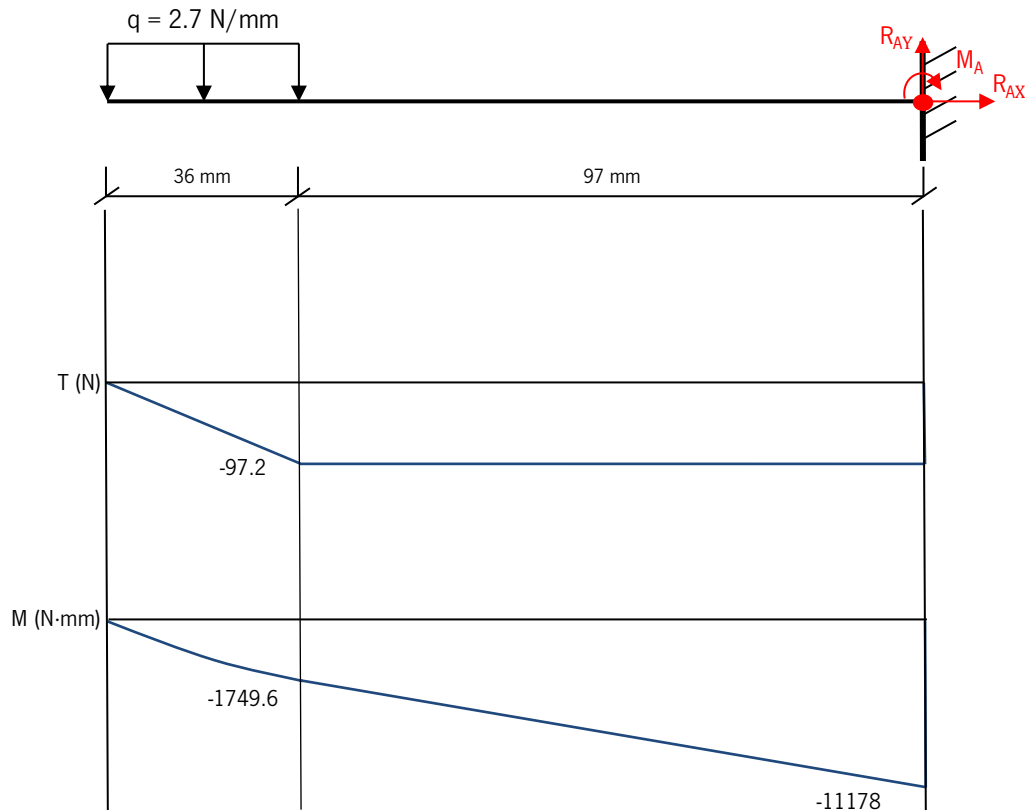


Figura 38 - Diagrama de esforços transversos e de momentos fletores.

O dimensionamento do *end-effector* é feito de acordo com a condição:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \quad ( 14 )$$

Em que:

- $\sigma$  – Valor numérico de tensão de flexão (MPa);
- $M_{\max}$  – Valor máximo do momento fletor observado no diagrama de momentos (N·m);
- $W_x$  – Módulo da secção transversal (cm<sup>3</sup>);
- $[\sigma]$  – Máxima tensão de flexão admitida (MPa);

O módulo da secção transversal  $W_x$  é dado pela equação 15:

$$W_x = \frac{b \times h^2}{6} \quad ( 15 )$$

Para o dimensionamento do *end-effector* é necessário selecionar uma das duas medidas para a secção transversal, isto é, fixar o valor de b e calcular o valor de h (na equação 15) ou vice-versa. Para o presente caso, ao usar uma placa de PVC de 5mm de espessura, significa que b = 5 mm e que é necessário calcular o valor h. Considerando que o momento máximo  $M_{MAX}$  no diagrama da Figura 38 é 11.178 N·m e que a tensão admissível à flexão  $[\sigma]$  é de 70 MPa, afere-se que o módulo de secção mínimo  $W_{min}$  capaz de suporte os esforços neste cenário obtém-se por:

$$W_{min} = \frac{M_{max}}{[\sigma]} = \frac{11.178(N \cdot m)}{[70(MPa)]} = 0.16 \text{ cm}^3 \quad ( 16 )$$

Através da fórmula apresentada na equação 15 é possível calcular o valor mínimo para b, isto é:

$$b = \frac{6 \times W}{h^2} = \frac{6 \times 0.16(\text{cm}^3)}{(0.5(\text{cm}))^2} = 3.83246 \text{ cm} = 38.3 \text{ mm} \quad ( 17 )$$

Visto que o valor escolhido para b na peça final foi 45 mm, pode-se concluir que se respeitou o valor mínimo obtido para esta dimensão expresso na equação 17, não estando muito afastado do mesmo. Permite assim afirmar que a peça foi corretamente dimensionada.

## 4. TESTES E ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo é explicada a programação desenvolvida para o teste, com uma descrição detalhada dos comandos utilizados. Adicionalmente, são apresentadas as peças usadas no estudo bem como os resultados obtidos após serem submetidas ao teste de resistência. Por fim faz-se uma análise e uma discussão crítica acerca dos resultados obtidos.

## 4.1 Testes realizados

O teste criado tem o principal objetivo de recriar, da forma mais realista possível, o desgaste numa peça *poche-cc* equivalente ao uso normal da peça num período de vinte anos. Por outras palavras pretende-se criar um teste que consiga espelhar os movimentos e hábitos de um humano ao inserir um cartão no designado espaço da carteira e repetir este ciclo o número de vezes necessário para equivaler a vinte anos.

O teste foi idealizado para testar a resistência ao desgaste da peça, mais especificamente estudar a tendência de cedência das zonas destacadas na Figura 39.



Figura 39 - Zonas suscetíveis a maior desgaste no poche-cc.

O procedimento consiste na inserção repetida (vinte mil repetições) de um cartão numa das aberturas, repetindo-se este procedimento para os restantes *poche-cc* a serem testados. A abertura escolhida é, por norma, na primeira fila (em modelos com duas filas) ou na segunda fila (em modelos com três filas) e na primeira coluna. Considera-se que esta abertura consegue realisticamente representar as restantes e, por isso, o seu comportamento durante e após o teste pode ser extrapolado para todas as aberturas.

### 4.1.1 Amostragem

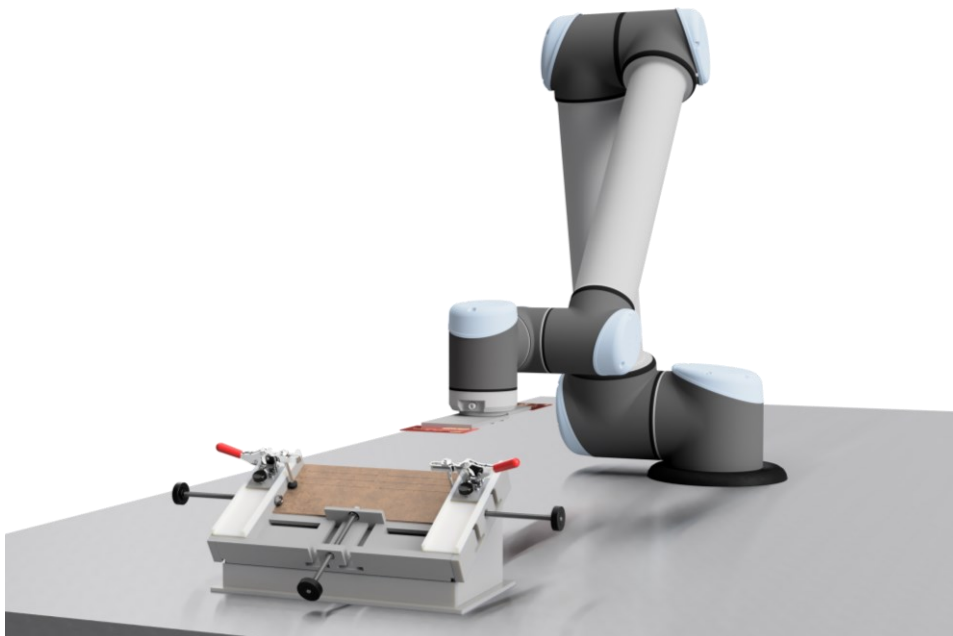
Para o presente trabalho foram usados três modelos distintos de *poche-cc*, os quais se encontram na Figura 40. Cada modelo possui um total de três unidades, à exceção daquele representado na Figura 40C), o que equivale a um total de sete amostras. O processo de amostragem focou-se em selecionar modelos com diferenças em termos de dimensões, cores e até materiais e não tanto no tamanho da amostra em si. Todavia considera-se que este será suficiente para permitir discutir o sucesso do teste desenvolvido.



*Figura 40 - Três modelos de amostras escolhidas para submeter ao teste.*

#### 4.1.2 Programação

A etapa da programação é a última e por isso procede ao fabrico do suporte de fixação e do *end-effector* e à organização de um grupo de amostragem. Quando estes foram concluídos o sistema completo encontrava-se como aparenta na Figura 41. É de destacar, na Figura 41, que o suporte foi ajustado para a peça exemplo, as molas de fixação encontram-se fechadas e o manipulador, com o *end-effector* já montado, mostra estar na pose inicial do programa.



*Figura 41 - Constituição final completa do sistema de testagem.*

A etapa da programação foi realizada exclusivamente no ecrã que acompanha o robô, utilizando o *software* próprio da *Universal Robots*. A realização da programação seguiu quatro etapas:

- Fazer um esquema sobre o procedimento desejado para o teste;
- Traduzir o esquema criado em funções, mais especificamente funções *Move*, *If...Else*, *Loop*, *Assignment* (com a qual se definiu o contador interno de ciclos);
- Identificação dos pontos no espaço que definem as funções de movimento;
- Ajuste das funções de movimento e resolução de problemas;

O programa criado foi evoluindo através de um ciclo iterativo de resolução de problemas e adição de comandos e de complexidade. Pretendia-se que, após ser dada a ordem para iniciar o programa, o robô partisse da posição inicial (semelhante àquela vista na Figura 41) e começasse a testar uma abertura da peça de forma totalmente automática. Após se terem completado vinte mil ciclos (um contador interno era incrementado sempre que se completava uma inserção), o robô retirava-se e esperava que lhe fosse dado ordem para começar a testar uma nova peça. Deve-se mencionar que a primeira inserção apresentava uma trajetória mais lenta e mais complexa que todos os restantes ciclos, que utilizam uma trajetória abreviada da primeira. Este comportamento foi incutido ao robô para poder garantir que o primeiro ciclo não danificava uma peça que outrora se encontrava nova e, por isso, opunha-se à inserção rápida de um cartão. Por outro lado, a utilização de uma trajetória cuidada e lenta, como no primeiro ciclo, para os restantes ciclos iria resultar numa duração excessiva para o teste completo, daí adotar-se um movimento mais rápido e com menos cautela. Com o intuito de demonstrar a programação desenvolvida foi criado o esquema presente na Figura 42.

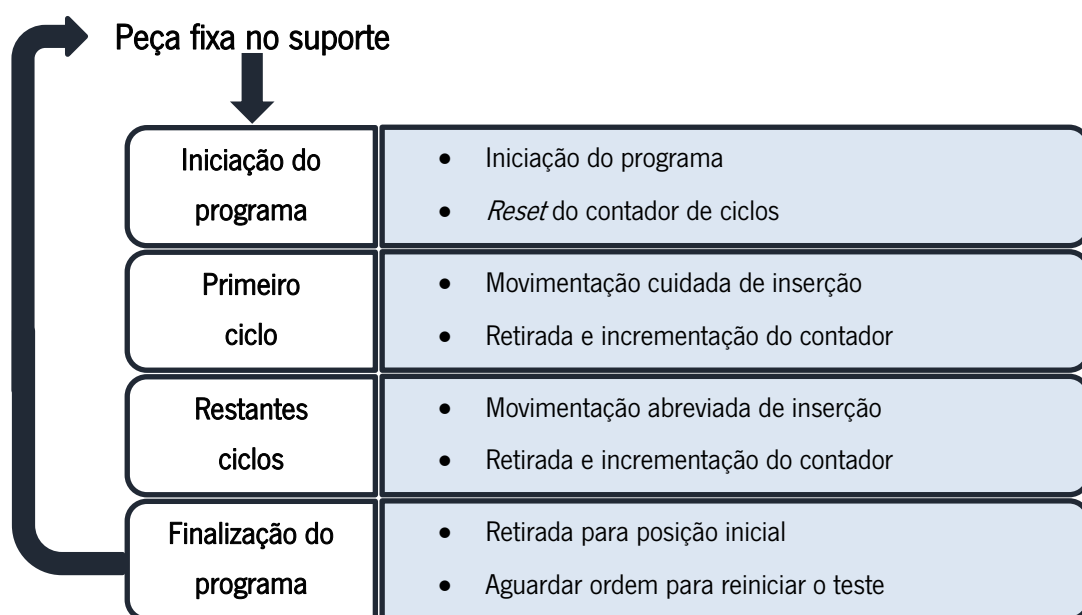


Figura 42 - Diagrama do funcionamento do programa criado.



O algoritmo do programa criado encontra-se expresso na Figura 43. É de notar que o bloco à direita é a continuação do bloco da esquerda.

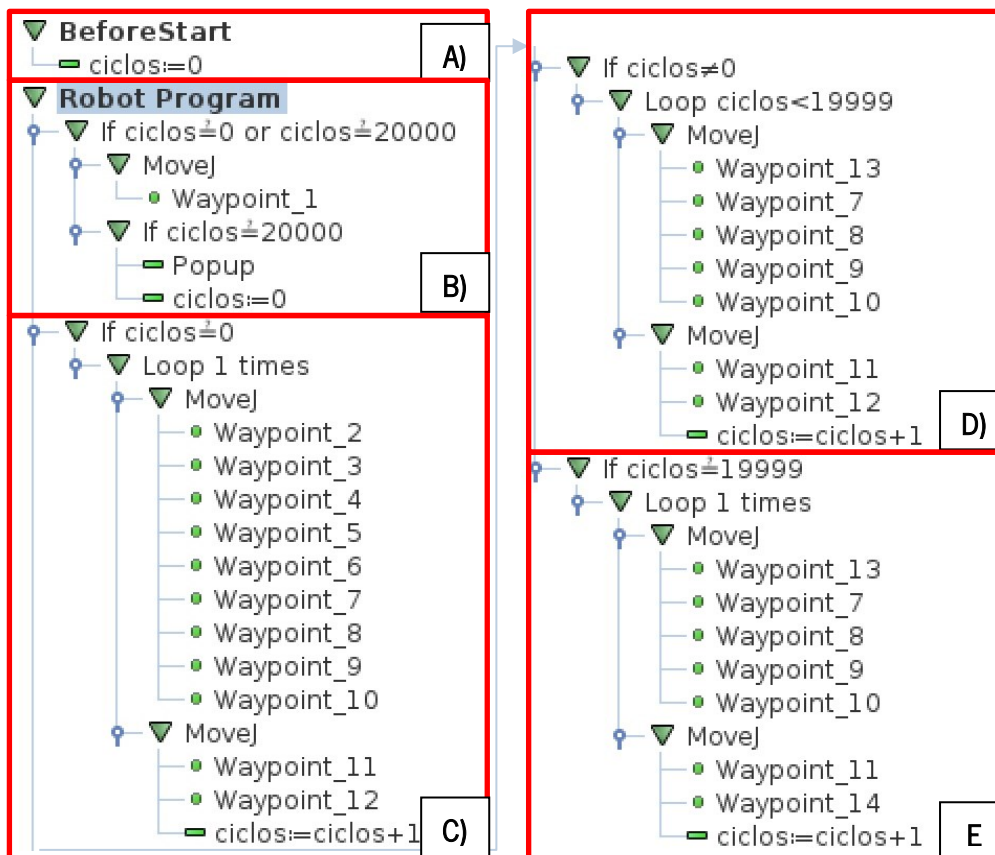


Figura 43 - Programação usada para a realização do teste.

Na Figura 43 pode observar-se todo o funcionamento mencionado anteriormente. O bloco A é referente à iniciação do programa, no qual se dá a ordem de reiniciar o contador “ciclos” e, por isso, deve atribuir-se o valor de “0”. O bloco B corresponde ao início e ao fim do programa, isto é, indica ao robô que se deve movimentar para o *Waypoint\_1* na condição de se estar a iniciar o programa (“ciclos=0”) ou na conclusão do mesmo (“ciclos=20000”). Para este último cenário o programa emite uma mensagem *popup* a perguntar se é pretendido reiniciar o teste e, se for o caso, dá-se o *reset* do contador “ciclos”. O bloco C corresponde ao primeiro ciclo, no qual é feita a primeira inserção do cartão na peça. O movimento de inserção contém nove *waypoints* por forma a obter-se uma trajetória precisa e fiável. Cada ponto permite definir a velocidade e aceleração das juntas no movimento para esse ponto. Para estes *waypoints* foram atribuídas velocidades nas juntas mais reduzidas que o predefinido (em certos casos reduziu-se de 80 °/s para 40 °/s) com o intuito de evitar estragos na peça e facilitar uma paragem de emergência em casos mais extremos. Depois do movimento “*MoveJ*” para a inserção dá-se a retirada do mesmo com o movimento por os *waypoints* 11 e 12 e, por fim, é feito um incremento unitário do contador “ciclos”.

O bloco D é o responsável por desempenhar 19998 dos 20000 ciclos totais (o primeiro e o último ciclo são atribuídos ao bloco C e bloco E, respetivamente). Este bloco de programação partilha o mesmo funcionamento e a grande maioria dos *waypoints* do bloco C. Todavia podem identificar-se algumas diferenças, nomeadamente a condição de entrada no bloco (o contador “ciclos” não poderá ser nulo) e a condição de paragem do *Loop* interno. A função “*Loop*” é usada, como o próprio nome indica, para situações que se pretenda repetir uma série de comandos até se verificar a condição de finalização. Para este caso pretendia-se realizar a movimentação de inserção e retirada do cartão até ao penúltimo ciclo, isto é, até que o contador “ciclos” tome o valor “19998”. Deve ainda referir-se que o movimento de inserção (a primeira função “*MoveJ*” do bloco D) contém apenas quatro pontos comuns com o mesmo movimento do bloco C, apresentando apenas cinco *waypoints* no total (com a criação do *Waypoint\_13*). A utilização de menos pontos nas funções de movimento devem-se, como foi mencionado anteriormente, à necessidade de criar trajetórias mais rápidas e simples.

Responsável pelo ciclo final do teste (“ciclos=19999”), o bloco E partilha as mesmas funções de movimento com o bloco D. No entanto podem apontar-se duas diferenças, nomeadamente na condição de encerramento da função “*Loop*” (apenas realiza uma iteração) e no movimento de retirada do cartão. Neste caso o manipulador move-se para o *Waypoint\_14*, que corresponde a um ponto intermédio entre a posição anterior (*Waypoint\_11*) e a posição inicial do programa (*Waypoint\_1* no bloco B).

#### 4.1.3 Análise e discussão de resultados

Assim como foi mencionado anteriormente possuíam-se sete exemplares, no total, para testar, podendo-se identificar três modelos distintos (modelo A, modelo B e modelo C identificados na Figura 40). Os exemplares foram testados consoante o seu modelo, isto é, testaram-se consecutivamente os três exemplares do modelo A, seguidos dos três do modelo B e, por fim, a amostra do modelo C. Isto foi feito para evitar ajustar o suporte de fixação desnecessariamente, necessitando assim de apenas três ajustes para testar os três modelos das amostras.

Dado que o procedimento do teste inclui vinte mil ciclos de inserir e retirar um cartão na peça era de esperar uma longa duração para a testagem de exemplar. Apesar de existirem pequenas variações entre os modelos no que toca aos movimentos necessários ao teste estima-se que, em média, cada exemplar levou 17 horas a ser testado. É de notar que este teste usou cartões com a norma ISO/IEC 7810:2003 do tamanho ID-1 (tamanho mais comum para cartões bancários, de supermercados, entre outros), com as dimensões de 85,6 mm de comprimento, 53,98 mm de largura e 0,76 mm de espessura.

Por forma a simplificar a análise de resultados do teste foi feita uma análise apenas em uma das duas zonas de cedência da abertura testada. Na Figura 44, Figura 45 e Figura 46 podem ser observados os resultados do teste nos três exemplares do modelo A.



*Figura 44 - Resultados do teste no exemplar 1 do modelo A.*



*Figura 45 - Resultados do teste no exemplar 2 do modelo A.*



*Figura 46 - Resultados do teste no exemplar 3 do modelo A.*

Na Figura 47, Figura 48 e Figura 49 é possível reparar no desgaste provocado pelo teste nas zonas destacadas nos exemplares do modelo B.

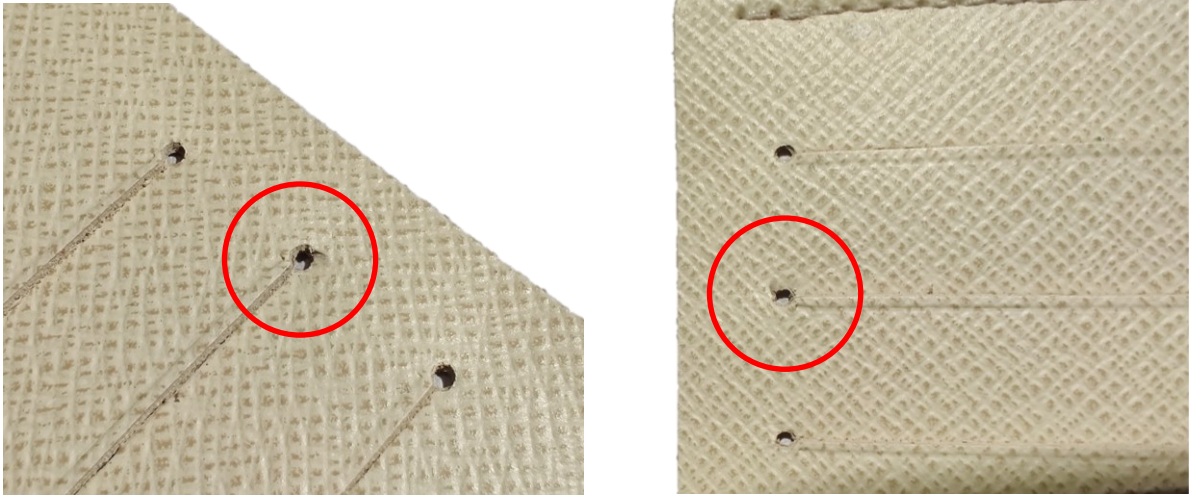


Figura 47 - Resultados do teste no exemplar 1 do modelo B.

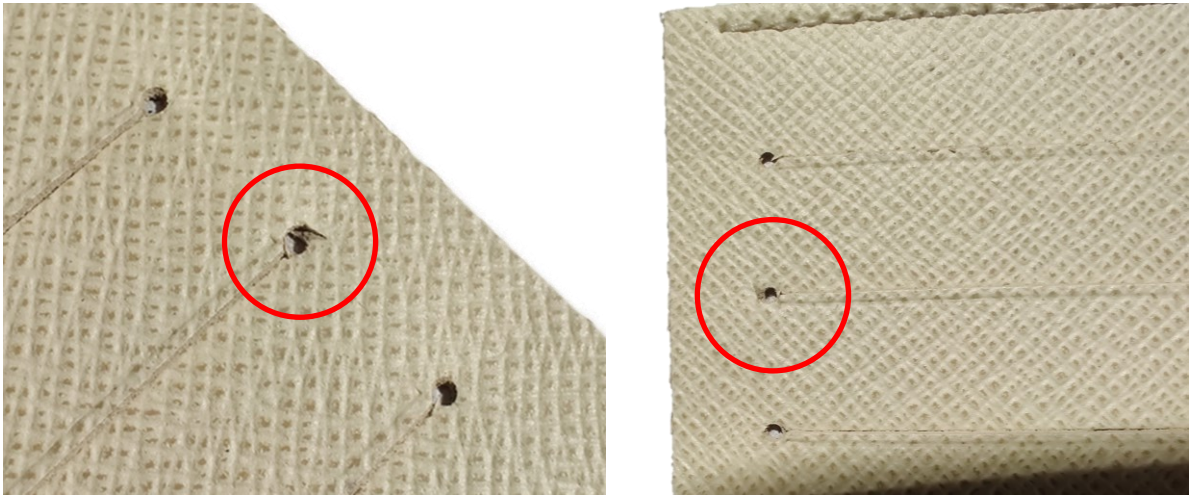


Figura 48 - Resultados do teste no exemplar 2 do modelo B.

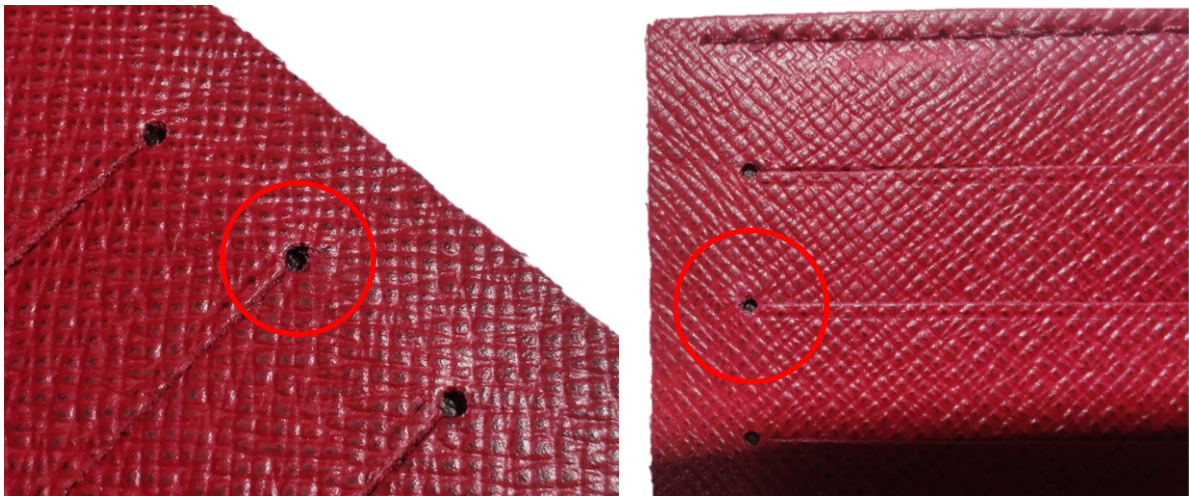
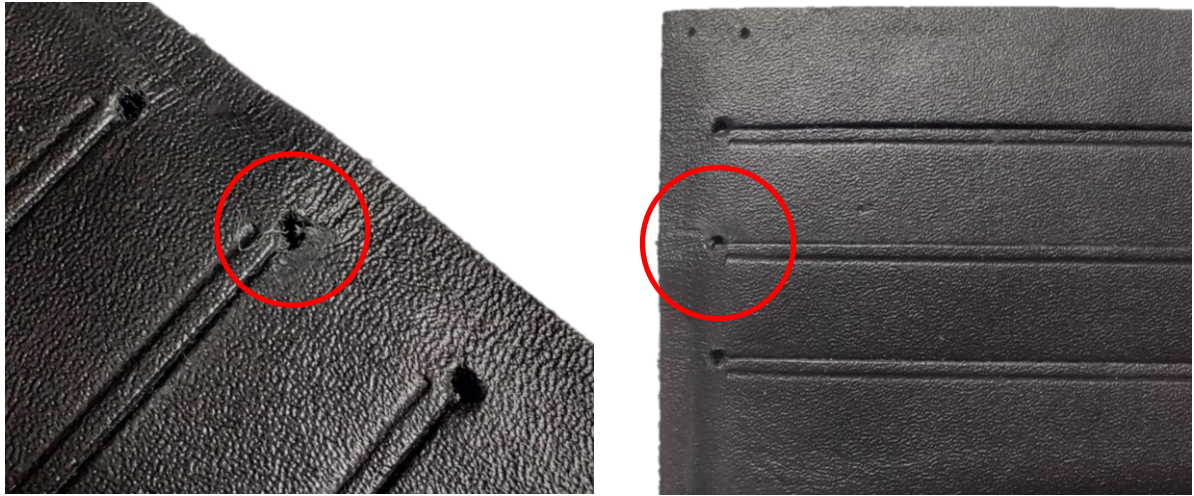


Figura 49 - Resultados do teste no exemplar 3 do modelo B.

Por fim podem ser analisados os estragos provocados no exemplar do modelo C, na zona destacada a vermelho na Figura 50.



*Figura 50 - Resultados do teste no exemplar 1 do modelo C.*

É possível constatar que, após analisar as imagens correspondes aos resultados do teste nas sete amostras, todas estas apresentam um desgaste notório e visível, mesmo observando a uma maior distância. A análise feita aos sinais de desgaste nas figuras mencionadas permite ainda concluir que os padrões de desgaste e a severidade dos danos é semelhante entre todos os exemplares, mesmo com diferentes modelos, cores e materiais. Admite-se assim que o teste:

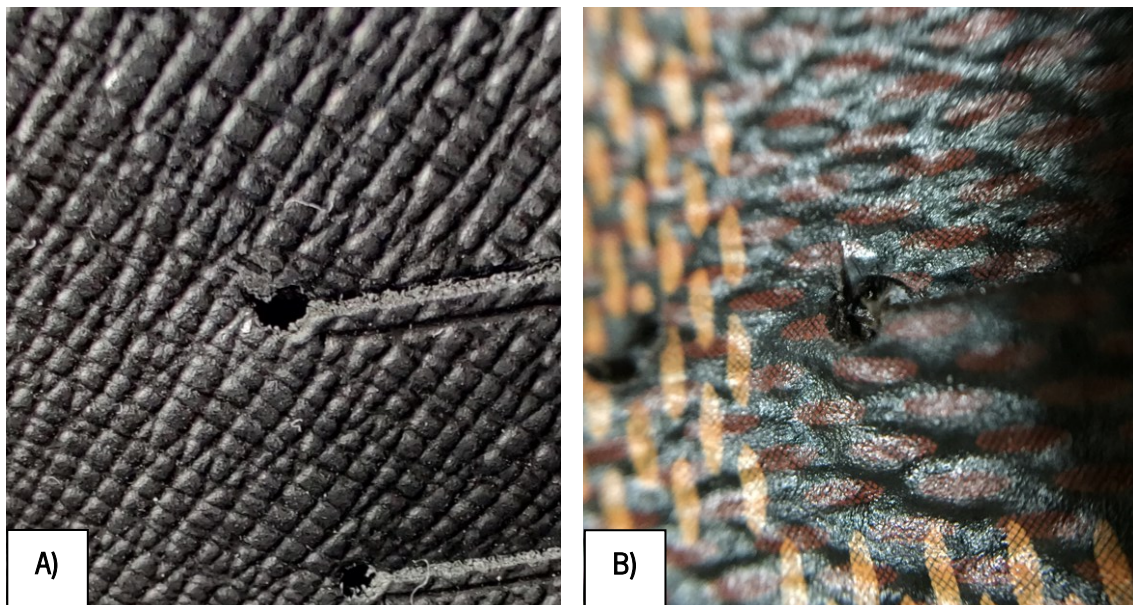
- Apresenta grande flexibilidade no que toca ao modelo e tipo de material usado na construção da peça, visto que consegue sempre despoletar uma falha;
- Mostra uma baixa variabilidade nos resultados, o que é sinal de um teste com uma elevada precisão e fiabilidade;

Apesar do modelo A apresentar um padrão e um nível de desgaste bastante semelhante entre os três exemplares, deve notar-se que no modelo B observou-se um comportamento diferente. O desgaste do exemplar três do modelo B (amostra rosa visível na Figura 49) sofreu uma falha menos severa que os restantes exemplares do mesmo modelo (presentes na Figura 47 e Figura 48). Para explicar esta discrepância é importante, primeiramente, excluir possíveis causas, de forma a clarificar o problema e chegar mais facilmente a uma justificação para o mesmo. O suporte de fixação e a programação utilizada no teste são ambos fatores que não tiveram qualquer influência neste problema visto que se mantiveram inalterados entre a execução dos três testes. Sabendo isto a explicação para este resultado inesperado com o terceiro exemplar do modelo B deve-se a:

- Variabilidade na pele;
- Zonas das quais a pele foi originalmente cortada;
- Processos de coloração da pele (peças de tonalidade mais clara exigem processos de coloração mais agressivos para a pele, o que torna a peça mais frágil).

Os fatores identificados são incontrolláveis e recorrentes visto que a pele é um material natural e com uma constituição variável por natureza. Esta variabilidade tem origem não só na obtenção do material bruto como no tratamento que lhe é feito posteriormente. Tendo em conta que o material de qual as peças são feitas é um fator incontrollável, é importante garantir que os fatores que se podem controlar, nomeadamente o suporte, a programação e o desempenho do manipulador, não criam variabilidade no teste.

Até ao momento averiguou-se que o teste possui uma baixa variabilidade nos resultados obtidos. Todavia o propósito do teste era, originalmente, de simular o uso de um cliente com recurso a um sistema em laboratório. Torna-se assim importante averiguar a exatidão do teste, isto é, a proximidade entre o desgaste numa peça testada e o desgaste de uma peça defeituosa de um cliente. Na Figura 51 pode ser vista uma comparação entre a falha criada no exemplar um do modelo A e uma falha proveniente de uso normal por parte de um utilizador numa peça defeituosa.



*Figura 51 - Desgaste de uma peça: A) Danos provocados por teste de laboratório; B) Danos provocados por uso real de um cliente.*

Ao analisar a Figura 51 é se levado a admitir que as falhas partilham o mesmo formato, o mesmo local e o mesmo grau de desgaste. É correto afirmar que o teste criado conseguiu recriar o uso normal por parte de um cliente num curto espaço de tempo, com um procedimento fiável e repetível.

Podem ser levantadas questões acerca da utilidade e veracidade dos resultados obtidos dado que se recriou uma situação que decorre num período de vinte anos num espaço de tempo inferior a um dia. É compreensível algum ceticismo no que toca à capacidade do robô em simular o uso de uma pessoa, visto que cada indivíduo possui maneirismos únicos. Existem pessoas que aplicam mais ou menos força nas zonas analisadas, pessoas que solicitam uma área não estudada, podem até inserir dois ou três cartões numa abertura. Todavia é importante perceber que o estudo realizado foi feito de acordo com as falhas mais recorrentes. Considerou-se um período de vinte anos (equivalente a vinte mil ciclos) devido aos elevados padrões de qualidade que a empresa possui e devido às expectativas que o cliente tem ao comprar o produto.

A solução implementada possui a flexibilidade para testar e simular novas falhas, incorporar mais ou menos ciclos, adicionar mais comandos, entre outros. O programa, o gesto de inserção e a retirada do cartão já foi validado por um técnico de laboratório com experiência na área. Esta validação torna-se no ponto de partida para analisar casos menos recorrentes, e de maior gravidade, como aquele expresso na Figura 52.



*Figura 52 - Falha de resistência mais severa numa peça de pocche-cc.*

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo tiram-se algumas conclusões relativamente ao trabalho desenvolvido e são dadas sugestões para trabalhos futuros.



## 5.1 Conclusões

O primeiro capítulo deste trabalho teve o propósito de introduzir a empresa e o setor de luxo no qual se enquadra. Esta secção permitiu ainda apresentar os produtos produzidos, de entre os quais se incluía as peças analisadas neste trabalho, isto é, os *poche-cc* (porta cartões). Por fim foram identificados os objetivos a cumprir e a estruturação do trabalho desenvolvido. O capítulo dois, à semelhança do primeiro, teve o papel de contextualizar o trabalho desenvolvido nos seguintes capítulos. Serviu, essencialmente, para explorar tópicos de forma a simplificar a sua compreensão em diante.

O problema que se encontra na base deste trabalho foi primeiramente exposto no primeiro capítulo e foi analisado mais rigorosamente no início do terceiro capítulo. O problema identificado prende-se na ocorrência de falhas nos produtos comercializados que não são visíveis nem identificáveis em nenhum momento antes de abandonar o *atelier*. Este problema é a origem do maior número de reclamações por parte de clientes. A empresa tem a qualidade dos seus produtos no topo da sua lista de prioridades e, como tal, surgiu o presente projeto. No capítulo três foi desenvolvido, desde uma fase puramente conceptual a uma fase de detalhe, um sistema de testagem que fosse capaz de simular o equivalente a vinte anos de uso normal de um *poche-cc*.

O sistema criado, formado por um suporte universal, um braço articulado colaborativo com 6 DOF e um *end-effector* com dois cartões, desempenhou um teste com vinte mil ciclos de inserir e retirar um cartão de uma das aberturas de sete exemplares de *poche-cc*. Foi imperativo o uso de um robô colaborativo pois a tarefa exigia um sistema de reduzidas dimensões, de baixo custo, com programação intuitiva e com presença de sistemas de segurança embutidos. Ao analisar os resultados obtidos dos testes das sete amostras pôde-se concluir que o teste demonstrou uma elevada precisão e uma variância reduzida nos resultados de desgaste entre as amostras. Adicionalmente, após traçar comparações entre as peças testadas e um exemplo de uma falha real de um utilizador, concluiu-se que o teste cumpriu com o seu principal objetivo de recriar os movimentos de um utilizador e de recriar a falha de uso mais comum.

Apesar de demorado, com uma duração de dezassete horas para cada peça, este teste mostrou-se uma ferramenta muito importante para a empresa devido à frequência de ocorrências deste tipo de falha. A capacidade de recriar, com enorme precisão e fidelidade, uma falha comum nestas peças permite à empresa idealizar e pôr à prova possíveis soluções para este problema de uma forma rápida e cómoda para toda a equipa. A enorme flexibilidade de operações oferecida pelo sistema permite ainda simular diferentes falhas no futuro, mediante as necessidades do cliente ou o processo de melhoria continua implementado na empresa. Considera-se que todos os objetivos previamente estabelecidos foram atingidos, dando-se assim o projeto como bem sucedido.

## 5.2 Trabalhos futuros

Com o lançamento de novos produtos é possível que se criem novos materiais e novos processos de fabrico. À medida que os clientes vão usando estes produtos é expectável que surjam problemas de qualidade nunca antes vistos. Por forma a solucionar esta questão são dadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Validar o teste para uma maior variedade de peças;
- Validar o teste para diferentes problemas;
- Integrar um *gripper* no manipulador para uma maior polivalência de operações;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. (Universidade do M. Ribeiro, “Robôs de Serviços,” *Rev. da UNAGUI - 3/06*, pp. 75–78, 1998.
- [2] J. Cook, “Origin of the word ‘robot,’” *Robotics Business Review*, 2016.
- [3] R. R. Murphy and D. D. Woods, “Beyond asimov: The three laws of responsible robotics,” *IEEE Intell. Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 14–20, 2009, doi: 10.1109/MIS.2009.69.
- [4] G. Blazeski, “In 1898 Nikola Tesla tricked an entire crowd into believing they could control a boat by shouting commands,” *The vintage news*, 2016.
- [5] A. E. LeBouthillier, “W. Grey Walter and his Turtle Robots,” *Robot Build.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–3, 1999.
- [6] L. Kelly, “Unimate: the First Industrial Robot and Why it Failed,” *History 101*, 2019.
- [7] J. Bloem, M. Van Doorn, S. Duivestein, D. Excoffier, R. Maas, and E. Ommeren, “The Fourth Industrial Revolution,” 2014.
- [8] A. M. Djuric, J. L. Rickli, and R. J. Urbanic, “A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems,” *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 9, no. 2, pp. 457–464, 2016, doi: 10.4271/2016-01-0337.
- [9] A. Renfrew, “Book Review: Introduction to Robotics: Mechanics and Control,” *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 41, no. 4, pp. 388–388, 2004, doi: 10.7227/ijeee.41.4.11.
- [10] M. T. Nguyen, C. Yuan, and J. H. Huang, “Kinematic Analysis of A 6-DOF Robotic Arm,” *Mech. Mach. Sci.*, vol. 73, no. 100, pp. 2965–2974, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-20131-9\_292.
- [11] M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, and M. Hernisch, “Industry 4.0,” 2015.
- [12] L. Sanneman, C. Fourie, and J. A. Shah, “The State of Industrial Robotics: Emerging Technologies, Challenges, and Key Research Directions,” *State Ind. Robot. Emerg. Technol. Challenges, Key Res. Dir.*, 2021, doi: 10.1561/9781680838015.
- [13] Universal Robots, “An introduction to common collaborative robot applications,” *White Pap.*, p. 18, 2018.
- [14] M. A. Peshkin, J. Edward Colgate, W. Wannasuphoprasit, C. A. Moore, R. Brent Gillespie, and P. Akella, “Cobot architecture,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 17, no. 4, pp. 377–390, 2001, doi: 10.1109/70.954751.

- [15] P. Brizzi *et al.*, “Bringing the Internet of Things along the manufacturing line: A case study in controlling industrial robot and monitoring energy consumption remotely,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, 2013, doi: 10.1109/ETFA.2013.6647947.
- [16] I. El Makrini *et al.*, “Working with Walt: How a Cobot Was Developed and Inserted on an Auto Assembly Line,” *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 25, no. 2, pp. 51–58, 2018, doi: 10.1109/MRA.2018.2815947.
- [17] G. V. Research, “Collaborative Robots Market Size,” 2019. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/collaborative-robots-market>.
- [18] M. Xiao, “The Collaborative Robot Market – 2019 - Interact Analysis,” 2021.
- [19] M. Bjorn and ABB Corporate Research, “Industrial Safety Requirements for Collaborative Robots and Applications,” *ERF 2014 – Work. Work. Saf. Ind. Robot. trends, Integr. Stand.*, 2014.
- [20] A. De Luca and F. Flacco, “Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration,” *Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics*, pp. 288–295, 2012, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290917.
- [21] V. Villani, F. Pini, F. Leali, and C. Secchi, “Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications,” *Mechatronics*, vol. 55, no. February, pp. 248–266, 2018, doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
- [22] W. Bauer, M. Bender, M. Braun, P. Rally, and O. Scholtz, “Lightweight robots in manual assembly – best to start simply !,” p. 40.
- [23] I. Aaltonen and T. Salmi, “Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: Barriers and development needs,” *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. 2019, pp. 1151–1158, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.204.
- [24] J. Kildal, A. Tellaeché, I. Fernández, and I. Maurtua, “Potential users’ key concerns and expectations for the adoption of cobots,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 21–26, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.104.
- [25] BSI, “Robots for industrial environments. Safety requirements. Robot,” 2011.
- [26] BSI, “Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Robot systems and integration,” 2011.
- [27] BSI, “Robots and robotic devices. Collaborative robots,” 2016.
- [28] SCHUNK, “EGH,” *EGH*, 2021. [http://schunk.com/es\\_es/sistemas-de-agarre/series/egh/](http://schunk.com/es_es/sistemas-de-agarre/series/egh/) (accessed Jun. 01, 2021).

- [29] Robotiq, "Vacuum Grippers," *Vacuum Grippers*, 2021. <https://robotiq.com/products/vacuum-grippers> (accessed Jun. 01, 2021).
- [30] Vention, "Cobot Palletizer," *Cobot Palletizing*, 2021. <https://vention.io/cobot-palletizer> (accessed Jun. 01, 2021).
- [31] P. B. Crosby, *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain*. McGraw-Hill, 1979.
- [32] P. F. Drucker, *Innovation and Entrepreneurship*. 1984.
- [33] J. M. Juran, A. B. Godfrey, R. E. Hoogstoel, and E. G. Schilling, *Juran ' S Quality Handbook*, 5th ed., vol. 1, no. 3. 1999.
- [34] J. M. Juran and J. A. De Feo, *Juran ' S Quality Handbook*, 6th ed., vol. 1, no. 3. 2010.
- [35] K. Lee, "Uncovering the Real Cost of Quality," *Uncovering the Real Cost of Quality: 1-10-100-1,000-10,000*, 2016. <https://www.pilgrimquality.com/blog/uncovering-real-cost-quality/> (accessed Jun. 23, 2021).
- [36] J.-Y. Yun and R. Chua, "Samsung Uses Six Sigma To Change Its Image," 2002.
- [37] W. Beitz and G. Pahl, *Engineering Design - A Systematic Approach*. Springer-Verlag, 1988.
- [38] N. Cross, *Engineering design methods: Strategies for product design*, vol. 16, no. 2. JOHN WILEY & SONS, LTD, 2008.
- [39] J. C. Jones, "A Method of Systematic Design," 1963.
- [40] J. Ja\_nsch and H. Birkhofer, "THE DEVELOPMENT OF THE GUIDELINE VDI 2221 - THE CHANGE OF DIRECTION," 2006.
- [41] Universal Robots, "Universal Robots User Manual," 2018. <https://www.universal-robots.com/download/manuals-cb-series/service/service-manual-ur10-cb3-english/> (accessed Mar. 10, 2021).

## ANEXO A – LAYOUT E FLUXO DE MATERIAL

A produção começa e acaba no armazém. A partir do armazém, um determinado produto pode iniciar o processo produtivo na linha P1, P2, P3 ou P4 ou, em casos específicos, pode alimentar diretamente as linhas de montagem. Após ter passado pela preparação a peça será concluída numa das sete linhas de montagem (M1, M2, M3, M4, M5, M6 ou M7). Dada como concluída a montagem o componente pode ou não passar pelo muro da qualidade e, posteriormente, dirige-se para o embalamento, é transportado de volta para o armazém e preparado para expedição.

Na

Figura 53 é possível observar o *layout* do *Atelier* de Penafiel, tendo em conta tudo aquilo que foi referenciado anteriormente. Adicionalmente procurou-se demonstrar, na Figura 53, várias possibilidades para o fluxo na produção.

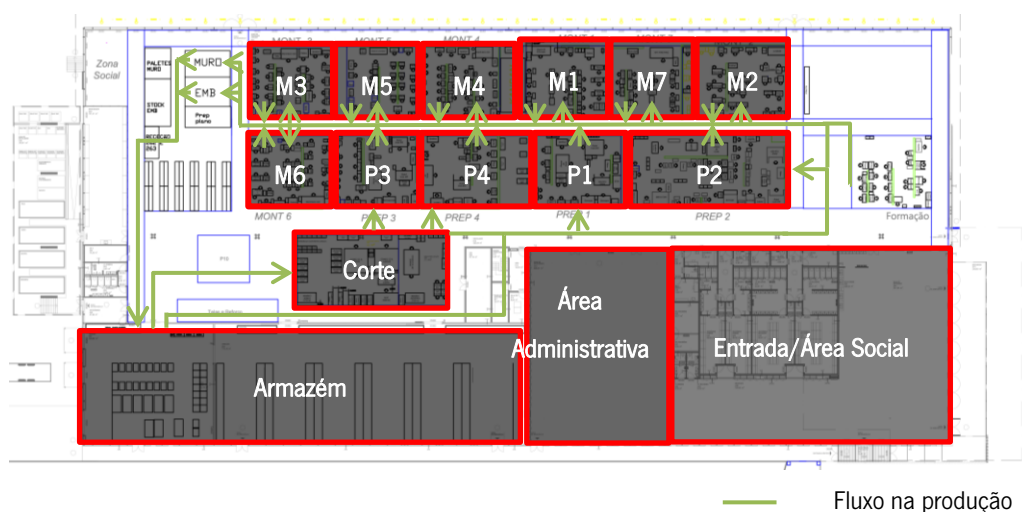


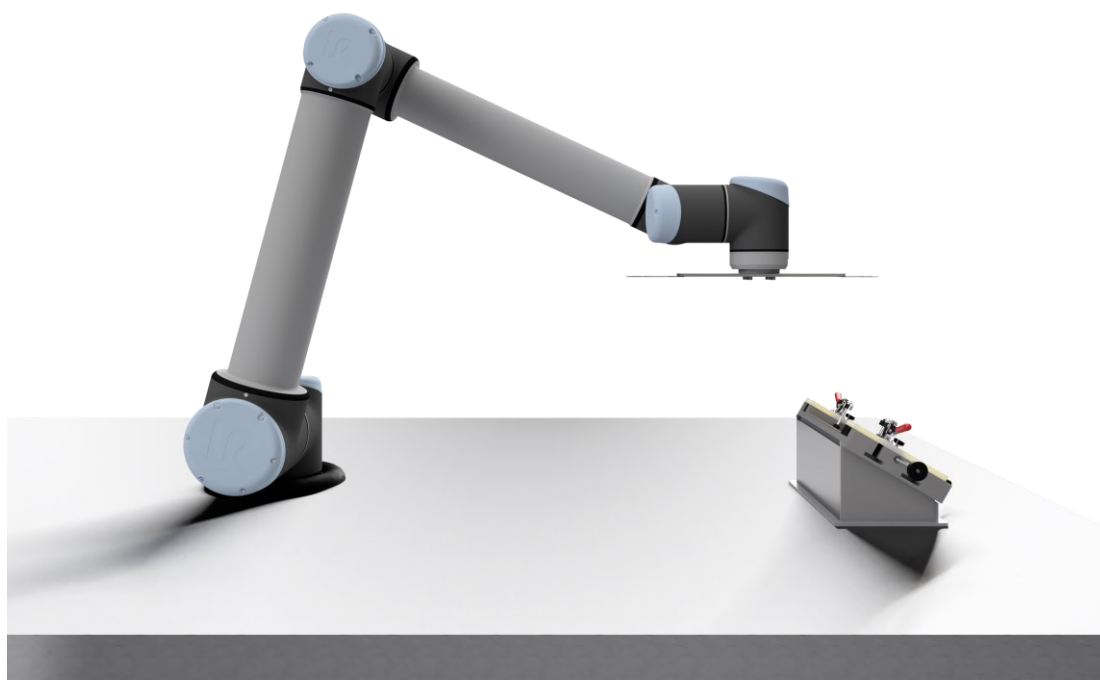
Figura 53 - Layout do Atelier de Penafiel.

## ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS BRAÇO ROBÓTICO UR10

Tabela 8 - Especificações técnicas do braço articulado UR10.

Peso (braço)	28,9 kg		
Carga	10 kg		
Alcance	1300 mm		
Intervalos de articulação	+/- 360° em todos os eixos		
Velocidade	Base e ombro: 120°/s Cotovelo e punhos: 180°/s Ferramenta ≈ 1m/s		
Repetibilidade	+/- 0,1 mm		
Secção	Ø118 mm		
Níveis de liberdade	6 eixos		
Dimensões do controlador (CxAxP)	475 mm x 423 mm x 268 mm		
E/S disponíveis	Entradas digitais	Controlador	Punho
	Saídas digitais	16	2
	Entradas analógicas	16	2
	Saídas analógicas	2	2 -
		2	
Alimentação E/S	24 V - 2 A no controlador e 12/24 V - 600 mA na ferramenta		
Comunicação	TCP/IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Entrada ethernet e Modbus TCP		
Programação	Interface gráfica de utilizador Polyscope num ecrã tátil de 12 polegadas		
Emissão de ruído	Relativamente silencioso		
Classificação IP	IP54		
Consumo elétrico	Cerca de 350 W utilizando um programa corrente		
Funcionamento colaborativo	15 funções de segurança		Conformidade com as normas: EN ISO 13849:2008 PL d EN ISO 10218-1:2011, Ponto 5.4.3
Materiais utilizados	Alumínio, plástico PP		
Temperatura de trabalho	0-50 °C		
Alimentação	100-240 V CA, 50-60 Hz		
Ligações	Cabo entre o robô e o controlador (6 m) Cabo entre o ecrã tátil e o controlador (4,5 m)		

# Manual Robô Silva



## UR10 CB3

Introdução ao robô e criação de um programa



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, TERMOS E ACRÓNIMOS

**End-Effector** – Consiste no mecanismo/ferramenta, afixado à extremidade do robô, que será responsável por interagir com o ambiente circundante. A sua constituição e o seu modo de operação dependem, naturalmente, da aplicação para a qual foi concebido. Cada aplicação para o manipulador exige um determinado tipo de *end-effector*, podendo este ser: camaras, ferramentas de corte, engenhos de furar, máquinas para polir, para soldar, *grippers*, entre outros.

**Gripper** – Termo com origem no verbo “*Grip*” (que se traduz em “agarrar”), é uma designação comum para uma ferramenta que tenha a capacidade de pegar num objeto. Normalmente denominado de “amarra”, este sistema é montado na extremidade do manipulador, pode ter vários meios de acionamento (elétrica, pneumática, etc) e várias configurações (dois dedos, ventosas, etc).

**TCP** – Abreviatura de “*Tool Center Point*”, este ponto é definido como o ponto de referência pela qual a programação para a movimentação do robô será criada. Situado no centro da extremidade do *end-effector*, este ponto extra foi criado para que a movimentação do robô seja controlada por um sistema de eixos coordenados que conte com a presença de uma ferramenta. Caso o manipulador não conte com nenhum *end-effector*, o TCP irá coincidir com o centro da extremidade do último elo do braço articulado.

**Input/Output** – Um *input* (entrada) refere-se a um fluxo de informação, qualquer que seja a sua forma, entre o exterior e o interior do robô e um *output* (saída) refere-se a um fluxo de informação entre o interior do robô e o exterior. A título de exemplo um *input* pode consistir no sinal emitido por um botão que controla uma função do robô, ou mesmo aquele proveniente do ecrã tátil que é usado para o movimentar e controlar. Um *output* pode tomar a forma de um sinal sonoro ou luminoso de emergência e o controlo de tapete rolante ou de um *end-effector*.

**Payload** – Este termo refere-se ao total de massa que o robô está a transportar/manipular. Neste somatório está incluído o peso do elemento metálico na extremidade do braço, o *end-effector* e o objeto que possa estar a ser carregado. A palavra *payload* muitas vezes refere-se também à carga máxima que o robô consegue levantar.

**Waypoint** – Termo dado para um ponto, no espaço, que pertence à trajetória do movimento do robô. Um *Waypoint* é o elemento mais importante da programação do robô pois indica, de forma concreta, as posições e as poses que o braço deve tomar no decorrer da aplicação.

Este manual serve como uma ferramenta introdutória para se programar o robô. Inicialmente será feita uma breve apresentação do robô, seguida de possíveis acessórios/aplicações e, por fim, de como criar um programa básico de *Pick & Place*.

Este manual deve ser usado como um complemento ao curso online da *UR*, disponível em: <https://academy.universal-robots.com/free-e-learning/cb3-e-learning/>

## 1. INTRODUÇÃO AO ROBÔ

O robô em questão trata-se de um UR10 da Universal Robots, da geração CB3. O Universal Robot UR10 é um braço robótico colaborativo de 6 eixos, com uma capacidade de carga útil de 10 kg, um alcance de trabalho de 1300 mm e uma repetibilidade de 0,1 mm. As 6 juntas rotacionais estão identificadas, a roxo, na Figura 54.

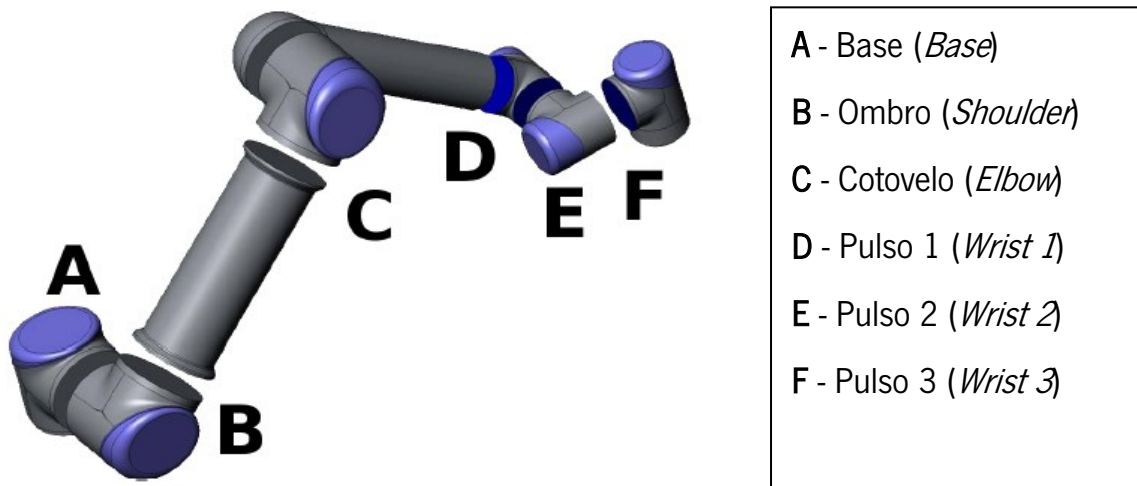


Figura 54 - Posição e designação das 6 juntas rotacionais do manipulador.

O robô é usualmente controlado exclusivamente pelo seu tablet *touchscreen*. O seu ambiente gráfico, designado "*Polyscope*", permite integrar imediatamente sensores ou acessórios adicionais de forma nativa. Mais de 80% dos robôs colaborativos UR10 Universal podem trabalhar sem o uso de barreiras de segurança. Recursos de segurança aprimorados como sensores de força que evitam colisões com trabalhadores e paredes virtuais que restringem a sua movimentação possibilitam uma interação mais próxima entre um operador e o robô. As características técnicas encontram-se expressas no Anexo A. Este robô é do tipo colaborativo e, como tal, oferece vantagens como o aumento da produtividade, o aumento da qualidade através da utilização de sistemas de inspeção automáticos, reduzidos custos de aquisição e de montagem, substituir os trabalhadores em trabalhos de fraca ergonomia e, por fim, a elevada flexibilidade de aplicação.

Tudo isto permite mudar a tarefa do robô muito facilmente devido à gama de braços robóticos de diferentes dimensões, programação intuitiva e à quantidade de acessórios disponíveis no mercado.

## 2. APLICAÇÕES

Após uma revisão bibliográfica sobre o tema pode-se afirmar que a aplicação mais habitual para um robô deste tipo é uma tarefa de *Pick & Place*. Esta tarefa consiste, essencialmente, no transporte de uma peça de um ponto A para um ponto B, com uma mudança ou não da sua orientação. Esta aplicação e as suas variantes são consideradas aplicações de manuseio de peças e constituem a maioria dos casos de implementação desta área de robótica.

A instalação de uma tarefa deste tipo requer um *gripper* na ponta do pulso 3 (Figura 54), como ventosas ou dedos manipuladores, cujos exemplares podem ser observados na Figura 55a) e Figura 55b), respetivamente.

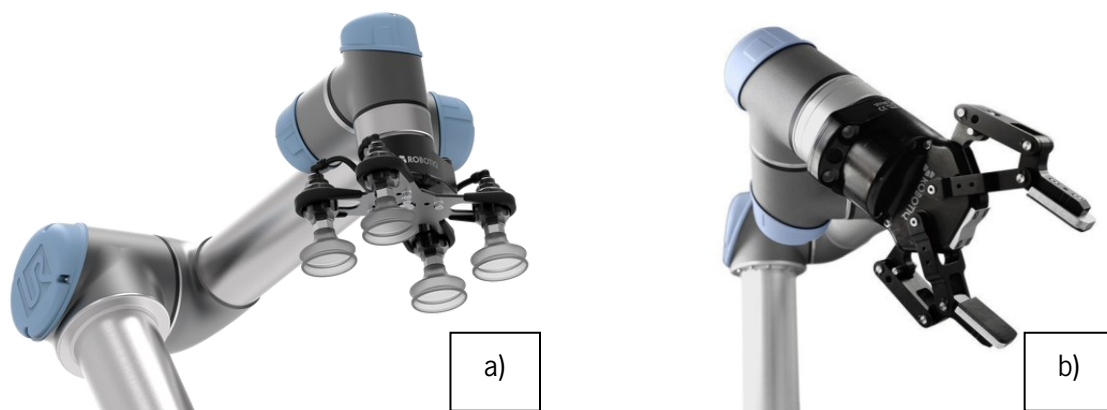
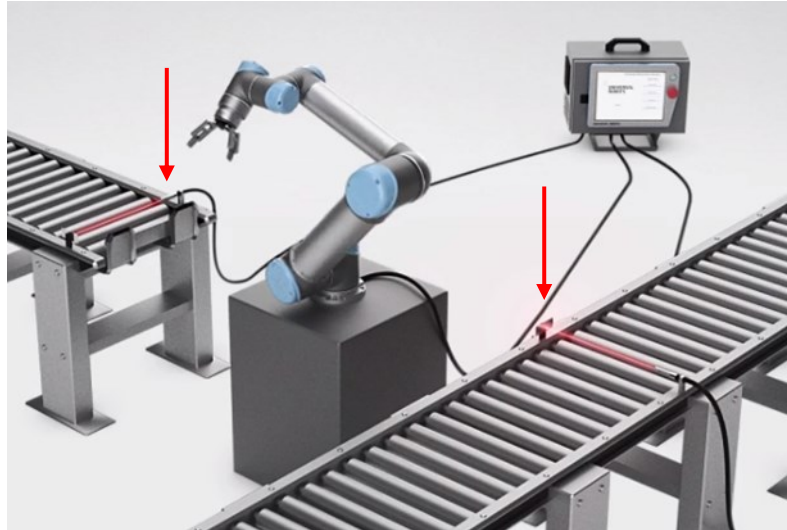


Figura 55 – Exemplos de end-effector usados para aplicações do tipo *Pick & Place*:

a) Ventosas com sistema de vácuo; b) Dedos manipuladores.

Outra aplicação bastante comum é o embalamento e a paletização. A tarefa consiste em colocar um produto em caixas e, posteriormente, organizar estas caixas sob a forma de uma paleta. O *end-effector* terá uma configuração algo semelhante àquela vista na Figura 12a, já o sistema de monitorização deverá recorrer a sensores para informar o controlador do robô acerca da chegada de uma caixa à posição predefinida (é possível observar um sistema deste tipo na Figura 56).



*Figura 56 - Sistema sensorial usado, associado a dois tapetes rolantes, para automatizar uma aplicação "Pick & Place"*

Outras aplicações incluem tarefas de soldadura, aplicação de cola, tarefas de acabamento (como polir ou rebarbar), processos de inspeção de qualidade, pintura por pulverização e, por fim, uso num laboratório.

### 3. INICIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO

Este capítulo irá explicar o processo de criar uma aplicação, começando por uma etapa de preparação do robô seguida de quatro etapas de programação: iniciação, *setup*, comandos básicos e a apresentação de um programa completo.

#### 3.1 Ferramenta para o end-effector/periféricos

Existem aplicações nas quais é necessário/desejado projetar periféricos para o correto funcionamento da mesma. Os periféricos normalmente não são estritamente necessários para a aplicação, mas facilitam ou auxiliam o trabalho do robô. Podem ser um local para apanhar/depositar peças, em casos mais simples, ou desempenhar processos de pintura unitária por exemplo, em casos mais complexos. Na Figura 57 é possível observar vários exemplos de periféricos desenvolvidos.

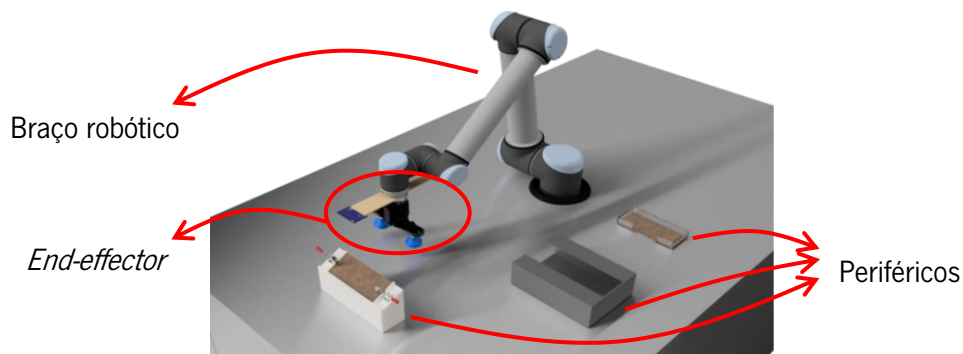


Figura 57 – Três exemplos de periféricos desenvolvidos.

A escolha de uma nova aplicação também obriga, num ponto inicial, o utilizador a pensar sobre qual o *end-effector* que necessita. A programação será a última etapa, e esta deve sempre partir do *end-effector* escolhido para o robô. Caso exista disponibilidade de um *gripper* semelhante aos exemplares da Figura 12 não existe necessidade de desenvolver nenhuma ferramenta (na maioria dos casos), apenas necessita de alguma atenção no momento de programar o próprio *gripper*. Nessa etapa deve-se configurar a posição do TCP, a orientação do *end-effector*, o seu centro de gravidade e a sua massa (estes pontos serão abordados posteriormente neste documento).

Todavia existirão casos em que será da responsabilidade do utilizador de projetar uma ferramenta, específica para uma ou mais aplicações, como é o caso do porta cartões presente na Figura 58.

**Nota:** O *end-effector* e os periféricos devem estar corretamente fixos ao robô e à bancada de trabalho, respetivamente, caso contrário poderão comprometer a precisão e exatidão de movimento do robô.

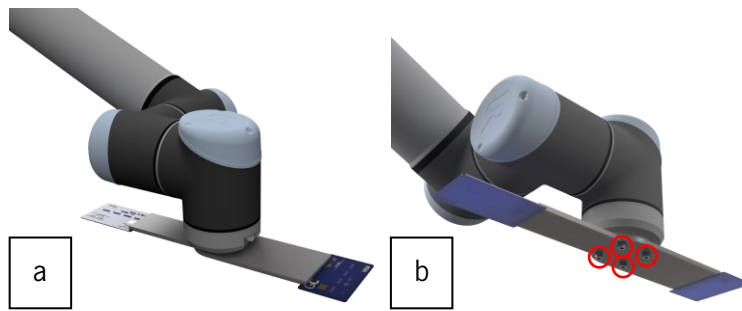


Figura 58 - Ferramenta desenvolvida para suportar cartões de crédito: a) Vista de cima; b) Vista de baixo.

Para os casos nos quais se desenvolve ferramentas que funcionam como o *end-effector* do robô a forma mais cómoda e usual de assegurar a ligação com o robô é através de parafusos, visto que já existem roscas alocadas para este mesmo efeito (destacadas a vermelho, na Figura 58b).

### 3.2 Start-up

Estes procedimentos irão explicar como se deve iniciar o robô e que cuidados se devem ter na calibração do mesmo, anterior a qualquer tipo de programação.

#### 3.2.1 Ligar o robô

Após ligar a alimentação elétrica e o ecrã tátil, através do botão que se encontra na sua face, é possível iniciar o manipulador. Para isto deve clicar-se em “Go to initialization screen” na mensagem *pop-up*, seleccionar o botão “ON” e, posteriormente, clicar no botão “START” (assinalado a vermelho na Figura 59).

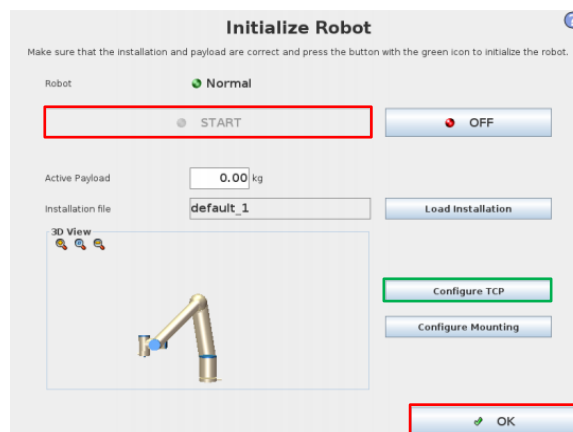


Figura 59 - Ecrã de iniciação do manipulador.

**Nota:** A luz vermelha indica que o robô se encontra parado; a luz amarela indica que o robô se encontra ligado, mas ainda não está em funcionamento normal; a luz verde indica que o robô se encontra em funcionamento normal.

### 3.2.2 Setup

O *setup* consiste no conjunto dos procedimentos a fazer previamente à programação do robô. Estas etapas podem fazer toda a diferença no desempenho do robô, tanto em termos de precisão e exatidão de movimentação do mesmo como na sua vida útil. As etapas de *setup* irão informar o manipulador sobre a posição, orientação, massa e centro de massa do *end-effector*. Para se aceder a este menu deve-se clicar em “*Configure TCP*” (assinalado a verde, na Figura 59) e, em seguida, clicar em “*New*”.

A Figura 60 diz respeito à calibração do TCP. Este processo é feito de forma semiautomática, no qual cabe ao utilizador em clicar no botão “*Position*” (assinalado a vermelho na Figura 60a) e em seleccionar quatro pontos no espaço com o TCP nas mesmas coordenadas mas com poses diferentes (assinalado a vermelho na Figura 60b). Para a seleção dos 4 pontos é recomendado usar um objeto fixo como referência, de forma a garantir que todos os pontos partilham a mesma posição final. Caso a seleção dos quatro pontos tenha sido realizada com sucesso estes aparecerão com a cor verde e poder-se-á avançar para o próximo passo. Para isso é apenas necessário clicar no botão “*Set*”, imediatamente abaixo.

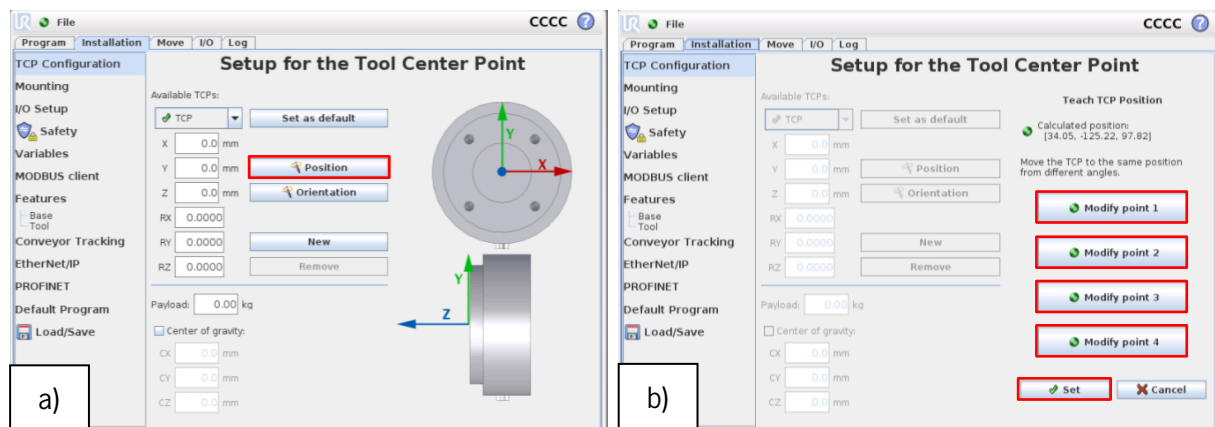


Figura 60 - Calibração da posição da ponta da ferramenta do robô.

O *software* do robô não só tem a capacidade de calcular a posição do TCP como também a orientação do *end-effector*. Para que este cálculo possa ser feito será necessário seguir uma série de passos semelhantes ao que foi descrito previamente.

Será necessário, primeiramente, clicar no botão “*Orientation*” (assinalado a vermelho na Figura 61a) e, posteriormente, seleccionar a *Feature* “*Base*” e clicar no botão “*Set Point*” (como é possível observar, a vermelho, na Figura 61b).

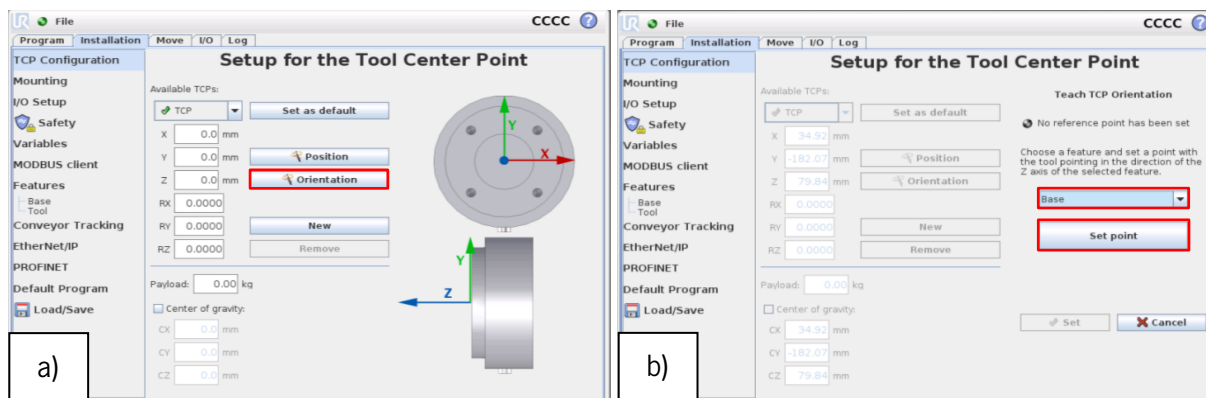


Figura 61 - Calibração da orientação da ponta da ferramenta do robô.

De seguida o *software* irá levar o utilizador para um menu no qual será possível controlar a posição e orientação do *end-effector*. Nesta etapa o utilizador deverá colocar o braço robótico numa posição semelhante àquela observada na Figura 62a), no qual se pode destacar que a ponta da ferramenta do manipulador tem os seus eixos coordenados paralelos, segundo o eixo z, em relação aos da *feature* “Base” do robô. Depois de clicar “Ok”, as caixas correspondentes à posição (X, Y e Z) e à orientação (RX, RY e RZ) do *end-effector* serão preenchidas automaticamente, como se pode observar, a vermelho, na Figura 62b).

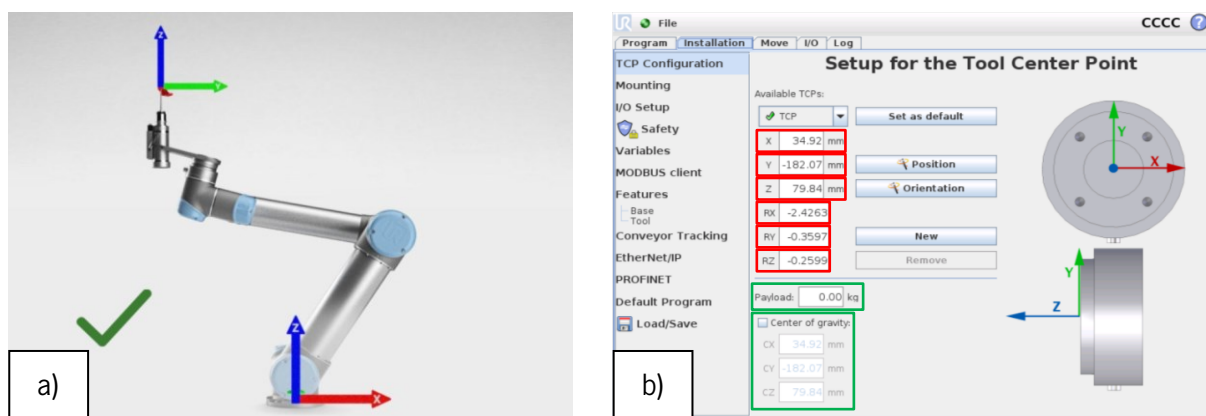


Figura 62 - Processo de calibração da orientação da ferramenta do robô e exemplo de resultados esperados

Dada esta etapa como concluída é também recomendado que sejam preenchidos os restantes campos presentes na Figura 62b (assinalados a verde), isto é, a massa da ferramenta e o seu centro de gravidade. Na grande maioria dos casos basta pesar a ferramenta e estimar o seu centro de gravidade no eixo de z (caso a ferramenta seja uniforme ao longo deste eixo, o valor a inserir no campo CZ seria metade da sua altura).

A localização do TCP e do centro de massa pode ser vista na Figura 63a) e a forma como medir a distância entre o TCP e o ponto de referência encontra-se expressa na Figura 63b).



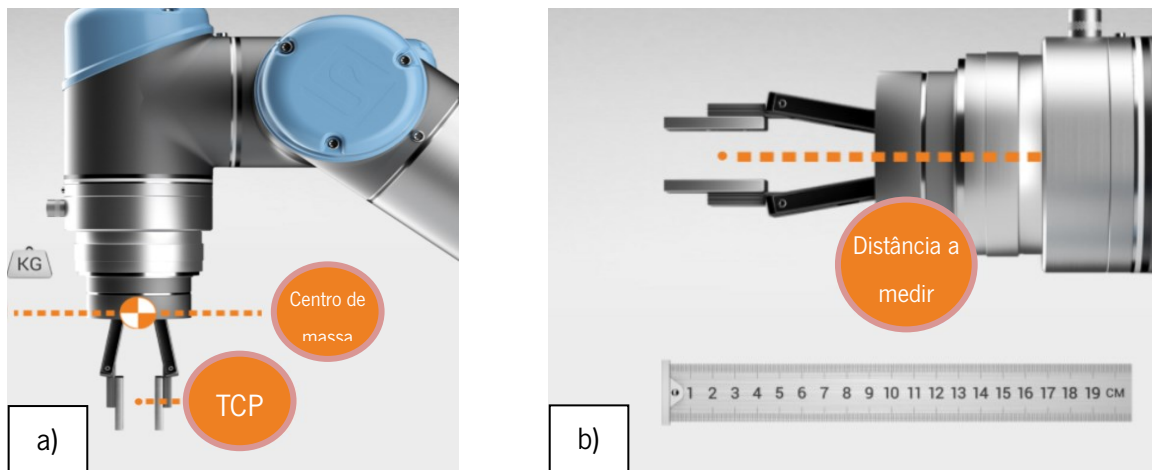


Figura 63 - Localização do TCP e do centro de massa.

Assim que todos os campos se encontrem preenchidos deve-se clicar na aba “Load/Save” à esquerda (destacado a vermelho na Figura 64), dar um nome à instalação e clicar no botão “Save” ou “Save As...” (assinalado a verde na Figura 64), sendo que neste último caso poderemos mudar o nome.

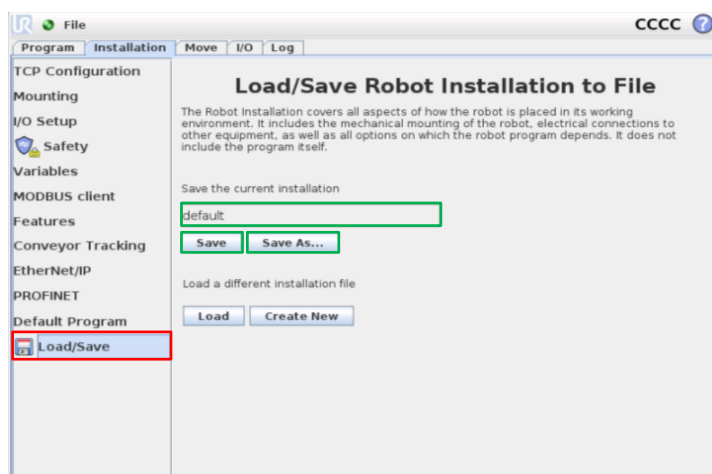


Figura 64 - Ilustração de como guardar a instalação criada.

### 3.3 Comandos Básicos

Agora que o *end-effector* está montado e/ou configurado e o *setup* está concluído é possível criar-se um programa. Para isto deve clicar-se no botão “Program Robot” e, de seguida, no botão “Empty Program” (no caso em que se pretenda criar um novo programa), assinalados a vermelho na Figura 65a) e na Figura 65b), respetivamente.

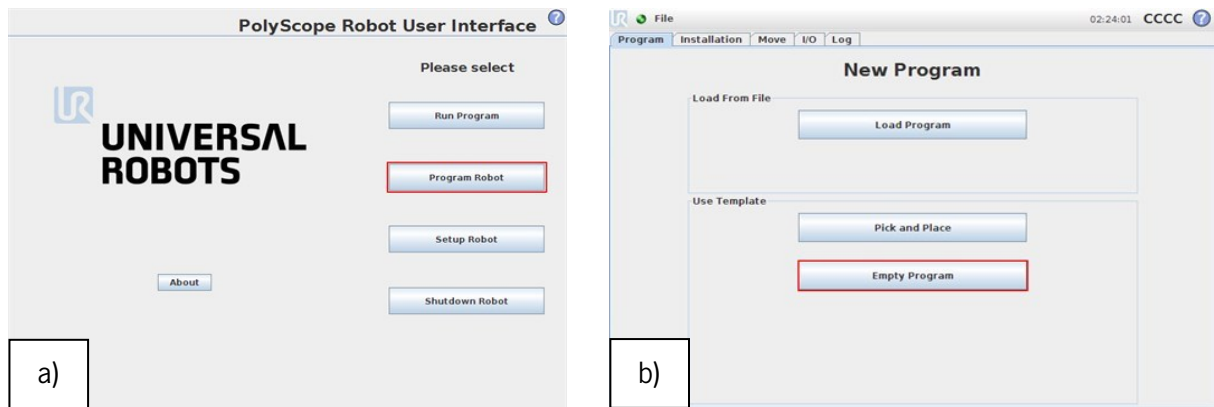


Figura 65 - Comandos para a criação de um novo programa.

### 3.3.1 Função “Move”

A função “Move” é a função mais essencial para a operação do robô. Para se criar uma função deste tipo, dentro do programa, deve-se clicar em “Robot Program” (que se encontra na caixa azul na Figura 66a), em seguida em “Structure” (assinalado a vermelho, na mesma figura) e, por fim, no botão “Move” (assinalado a vermelho na Figura 66b).

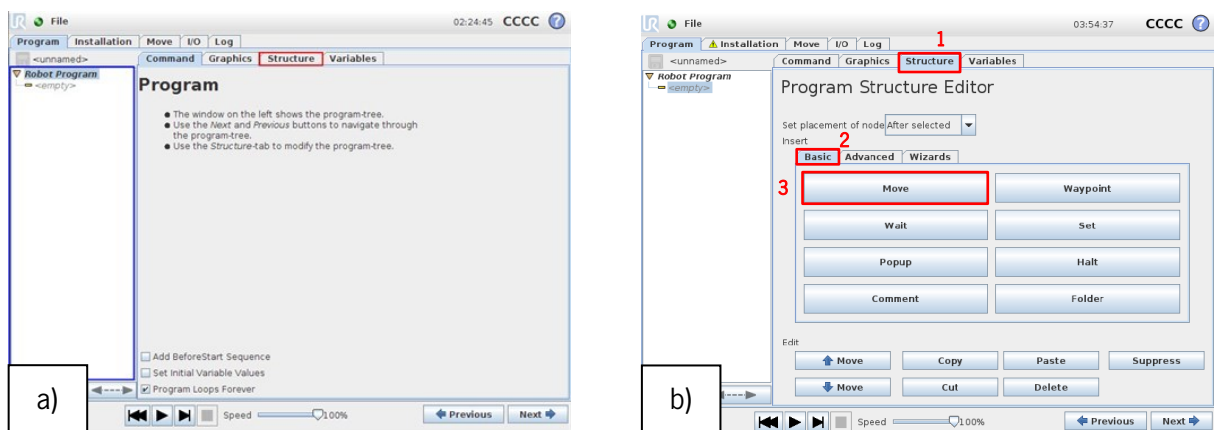


Figura 66 - Criação de um movimento na programação do manipulador.

Uma função “Move” cria um movimento, uma trajetória, quando são definidos pelo menos dois pontos, ou seja, o ponto de partida e o ponto de chegada.

Caso exista a necessidade/interesse que o TCP do robô passe por um determinado ponto entre a partida e a chegada já definidos, ou que tenha de contornar um obstáculo pelo caminho, é necessário adicionar mais um ponto, pelo menos, ficando assim com três *Waypoints*.

Ao inserir uma função “Move” será criado, por definição, um *Waypoint*, que aparecerá com a cor de amarelo (significa “não definido”). Para definir este ponto deve-se seguir a sequência assinalada a vermelho na Figura 67a), ou seja, carregar na aba “Command”, em seguida carregar em “Waypoint” na árvore do programa e, por fim, selecionar “Set this waipoint”.

Caso se pretenda adicionar um *Waypoint* antes ou depois do original deve usar-se os botões “*Add waypoint before*” ou “*Add waypoint after*”, respetivamente, assinalados a verde na Figura 67<sup>a</sup>).

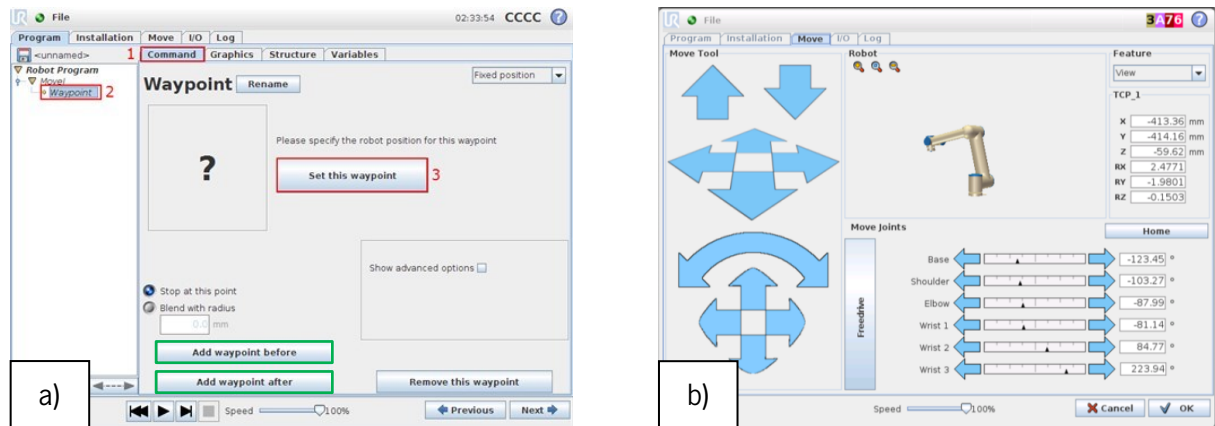


Figura 67 - Processo de definição de um waypoint.

Ao seleccionar o botão “*Set this waypoint*” irá aparecer um ambiente gráfico semelhante aquilo visto na Figura 67b). Nesta página é possível mover o braço robótico segundo quatro meios:

- 1) Utilizando as setas, segundo a *Feature* seleccionada;
- 2) Definindo uma posição ou orientação específica para o TCP nos campos X, Y, Z, RX, RY e RZ, segundo a *Feature* seleccionada;
- 3) Ajustando manualmente o ângulo de cada junta, independentemente da *Feature* seleccionada;
- 4) Movendo manualmente o TCP do manipulador, carregando no botão “*FreeDrive*”, um botão preto que se encontra na parte traseira do ecrã tátil (cuja localização é visível na Figura 68);

Botão “FreeDrive”



Figura 68 - Identificação e localização do botão “FreeDrive” no ecrã tátil.

**Nota:** Uma *Feature* é um sistema de eixos coordenados  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Por definição o manipulador já conta com duas, isto é, a *Base* (na base) e a *Tool* (no TCP). Pode ser criada uma *Feature* pelo utilizador, de forma a simplificar a programação, ao seleccionar: “*Installation*” – “*Features*” – “*Plane*” e definir os três pontos necessários.

Após se ter definido o *Waypoint 1*, para dar continuidade ao movimento, deve-se adicionar *Waypoints* dentro do mesmo movimento, como foi explicado anteriormente. Adicionalmente também é possível adicionar uma nova função “*Move*”, consecutiva àquela que se possuía. Por vezes esta última opção será a única que consegue satisfazer os requisitos da aplicação em questão. Isto acontece porque, como se pode constatar na Figura 69, assinalado a vermelho, existem 3 tipos de movimentação, cada um com o seu propósito:

- **Move J** – Movimentação rápida não-linear, utilizada em situações em que se pretende rapidamente mover o TCP entre dois pontos e nas quais o caminho escolhido não é relevante (não pode possuir nenhum obstáculo ou restrição). Ex: Movimentações de aproximação;
- **Move L** – Movimentação linear, utilizada em situações em que se pretende mover o TCP entre dois pontos e nas quais é imperativo que o percurso seja linear. Ex: Inserir e/ou retirar uma peça de um orifício;
- **Move P** – Movimentação de processo, utilizada em situações em que se pretende mover o TCP entre dois pontos e nas quais é pretendido que se mantenha uma velocidade constante. Com este movimento, o TCP não irá parar nos *Waypoints* definidos, mas sim movimentar-se sobre um arco concêntrico com o *Waypoint* definido ao aproximar-se deste. Ex: Utilização em processos de soldadura, aplicação de cola e movimentos circulares.

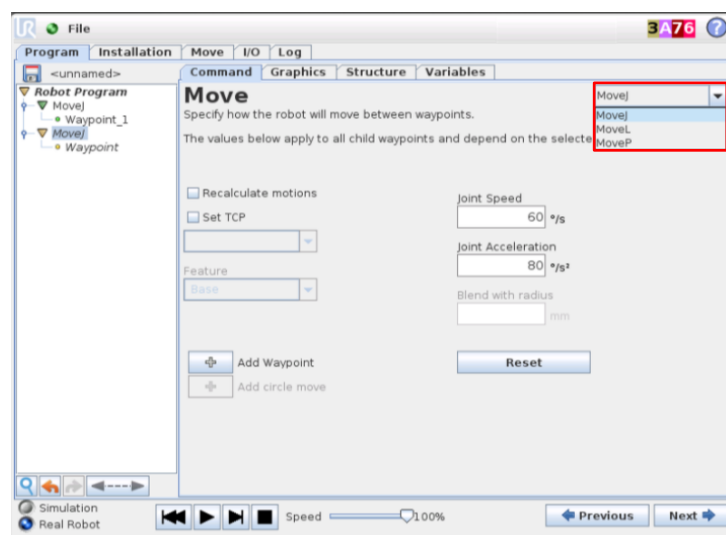


Figura 69 - Diferentes variações/tipos da função “*Move*”.

Será da responsabilidade do utilizador em decidir qual deverá ser o tipo de movimentação para cada instância. Adicionalmente poderá ser necessário ajustar a velocidade do movimento entre dois *Waypoints*. Para isto deve ativar-se a opção “*Show advanced options*” e ajustar os valores de acordo com o pretendido (destacados na caixa verde da Figura 70).

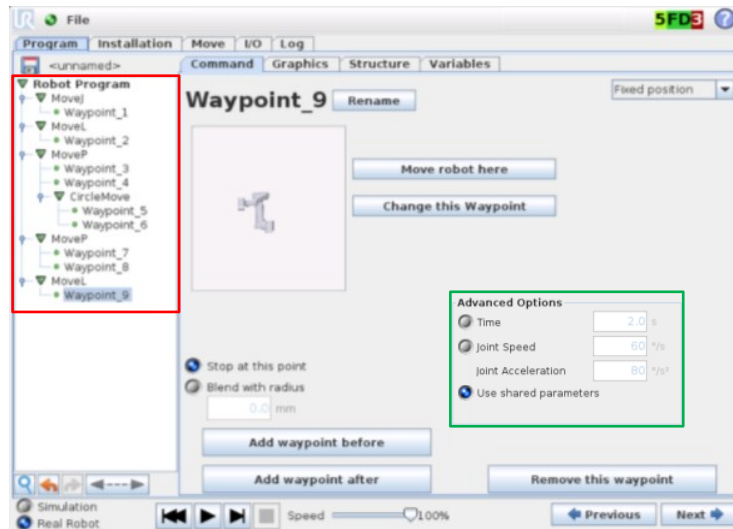


Figura 70 - Exemplo de um programa responsável pela movimentação de um manipulador.

Assinalado a vermelho na Figura 70 é possível observar uma serie de funções de movimentação, interligadas entre si. Ao observar a sequência, sem conhecer o propósito do movimento, é possível assumir que será algo como o que foi expresso na Figura 71:



Figura 71 - Sequência esperada para a sequência de movimentos apresentada.

### 3.3.2 Função "Wait"

Esta função, como o próprio nome indica, serve para imobilizar o manipulador durante um determinado período de tempo. A função "Wait" tem relevância em alguns casos, como por exemplo:

- Aguardar (0.5 –1) s, após dar a ordem para apanhar uma peça, de forma a garantir que o *gripper* a agarrou;
- Aguardar que uma caixa chegue ao fim de um tapete rolante para ser colocada numa palete;
- Aguardar que um contador interno atinja um determinado valor;

Para inserir uma função deste tipo deve seguir-se a sequência, assinalada a vermelho, na Figura 72a. Desta forma, deve-se clicar em "Program", "Structure" e "Wait". Posteriormente, carregando em "Command", serão apresentadas as várias opções que controlam a função (visíveis na Figura 72b). Poderá ser regida por tempo (assinalado a "A"), esperar por um *input* (digital assinalado a "B" e analógico a "C") ou aguardar para que uma determinada expressão se torne verdade (assinalado a "D").

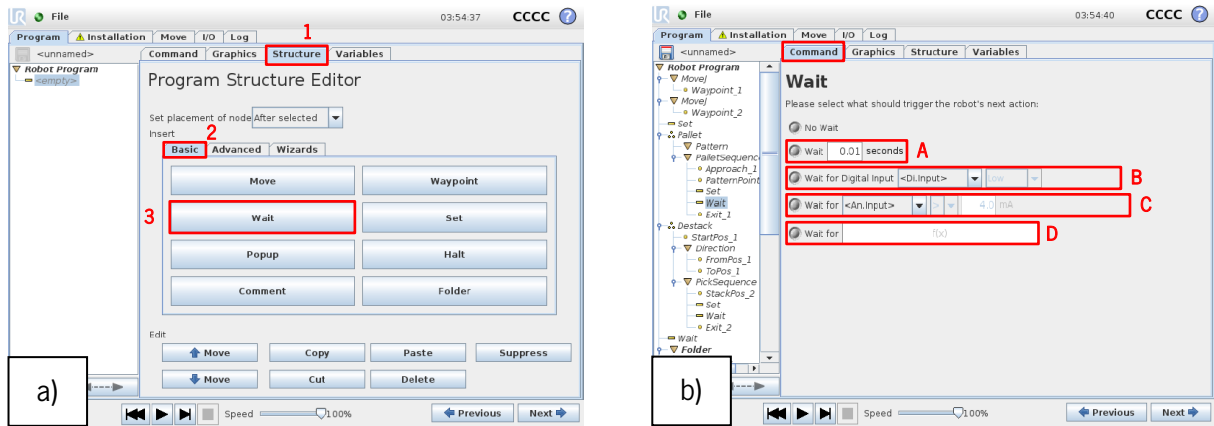


Figura 72 - Instruções sobre a introdução e controlo da função "Wait".

De forma a explicar a importância da função "Wait" deve observar-se a Figura 73. Neste exemplo é pretendido que o robô apenas inicie a movimentação, desde a posição atual até à posição 2, quando a caixa se encontrar na presente posição. Este sincronismo é assegurado pelos sensores identificados na Figura 73, os quais ligam ou desligam mediante a presença, ou ausência, da caixa e comunicam essa informação ao controlador do robô. Posteriormente deve ser criada a respetiva função "Wait", selecionando a opção B da Figura 72b) e, por fim, escolher o sensor pretendido na caixa "<Di.input>".

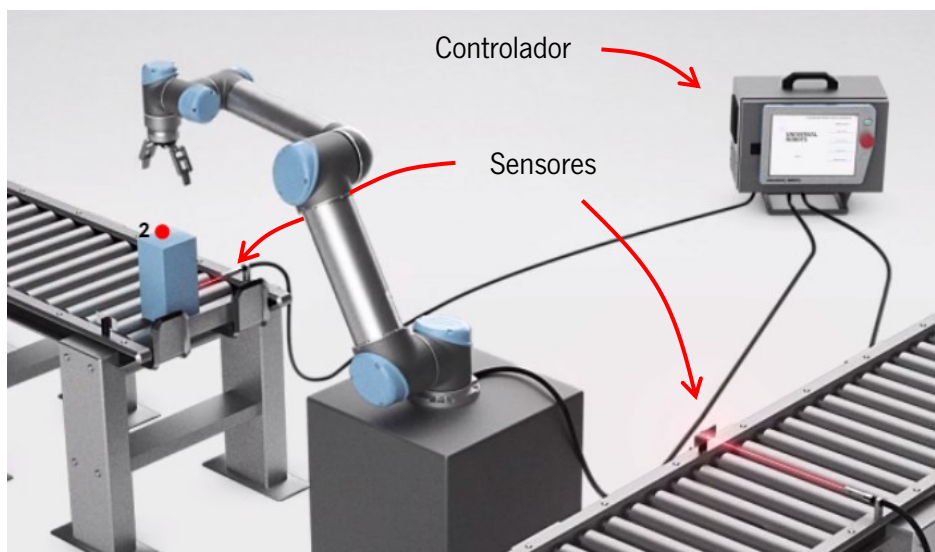


Figura 73 - Exemplo prático para a utilização da função "Wait".

### 3.3.3 Função "Set"

Esta função serve, essencialmente, para criar *outputs* para aparelhos/sistemas externos ou para incrementar valores de variáveis internas. A primeira funcionalidade tem particular relevância pois é com este mecanismo que será possível interagir com um *end-effector* quando o mesmo não vem acompanhado com um *software* do fabricante.

Por outras palavras, é possível ligar um atuador de natureza pneumática ou elétrica (por exemplo um *gripper* por vácuo) manualmente ao controlador do robô, nas entradas especificadas como “*outputs*”, e usar a função “*Set*” para enviar um sinal analógico ou, neste exemplo, digital para alimentar ou desligar esse mesmo atuador.

A Figura 74a) diz respeito aos passos a serem tomados para inserir esta função na programação. Deve-se, por isso, pressionar em “*Structure*”, “*Basic*” e “*Set*”.

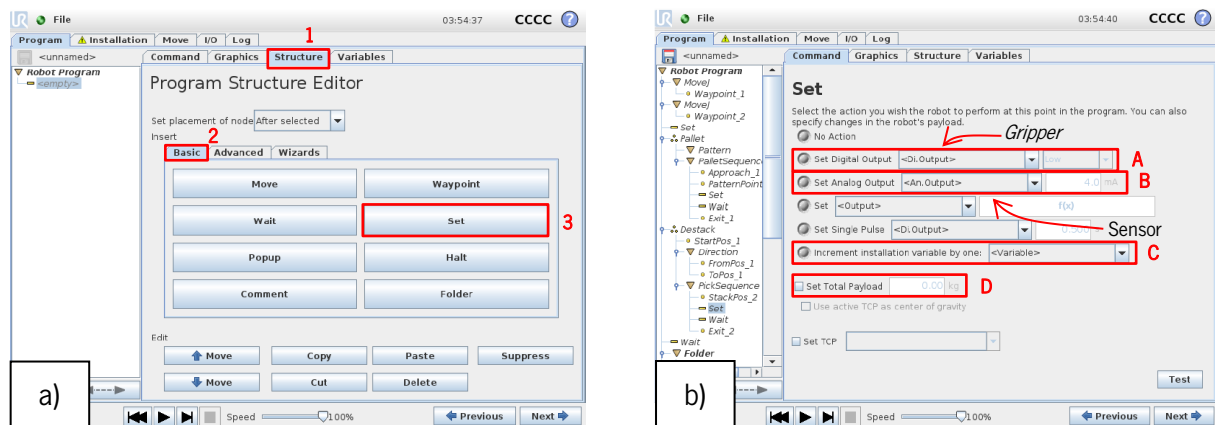


Figura 74 - Instruções sobre a introdução e controlo da função “*Set*”.

Como é possível observar pela Figura 74b), a função “*Set*” oferece uma variedade de ferramentas e, segundo o contexto deste documento, é importante realçar as de maior importância. Após ter inserido a função e pressionado a aba “*Command*”, são oferecidos sete comandos no total. Existe a possibilidade de criar um *output* digital, isto é, selecionar um *output* reconhecido pelo controlador e mudar o seu estado de 0 (desligado) para 1 (ligado) ou vice-versa (assinalado com “A”). Adicionalmente poderá alterar-se o valor de um *output* analógico (assinalado com “B”), incrementar, de forma unitária, uma variável interna (assinalado a “C”) ou mudar o *payload* do manipulador (assinalado a “D”).

### 3.3.4 Função “*Loop*”

Esta função tem a capacidade de simplificar a programação pois permite repetir uma sequência de funções de forma rápida e intuitiva. Ao inserir uma função *Loop* na árvore de programação é criado um ciclo no qual se podem inserir outras funções, como a função “*Move*”, a “*Wait*”, a “*Set*”, a “*Pop-up*”, entre outras. Na Figura 75a) é possível ver o método para inserir esta função, e na Figura 75b) pode-se observar as várias opções para definir condição que controla o ciclo “*Loop*”.

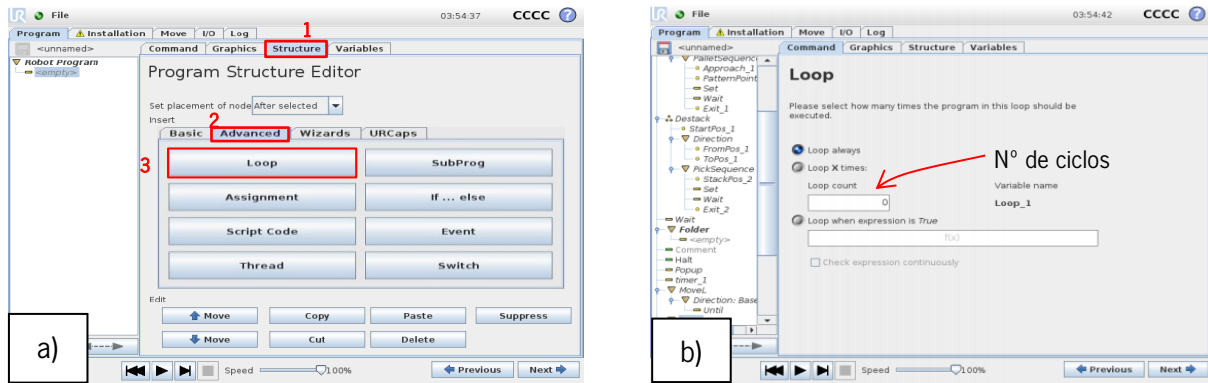


Figura 75 - Instruções sobre a introdução e controle da função "Loop".

Para esta função existe a opção de deixá-la infinitamente em *Loop*, atribuir um número finito de ciclos ou esperar que uma determinada expressão se torne verdade para finalizar o decorrer da função.

### 3.3.5 Função "Pop-up"

A utilização desta função reserva-se, normalmente, para casos de emergência ou anomalia, nos quais o operador é avisado que aconteceu um erro. Assim que a mensagem é lançada, sob a forma de um *pop-up*, o programa é pausado e só irá retomar o seu funcionamento quando o utilizador der a devida ordem, ao clicar no botão "OK". Para se adicionar esta função deve-se seguir os passos de ambas as imagens da Figura 76.

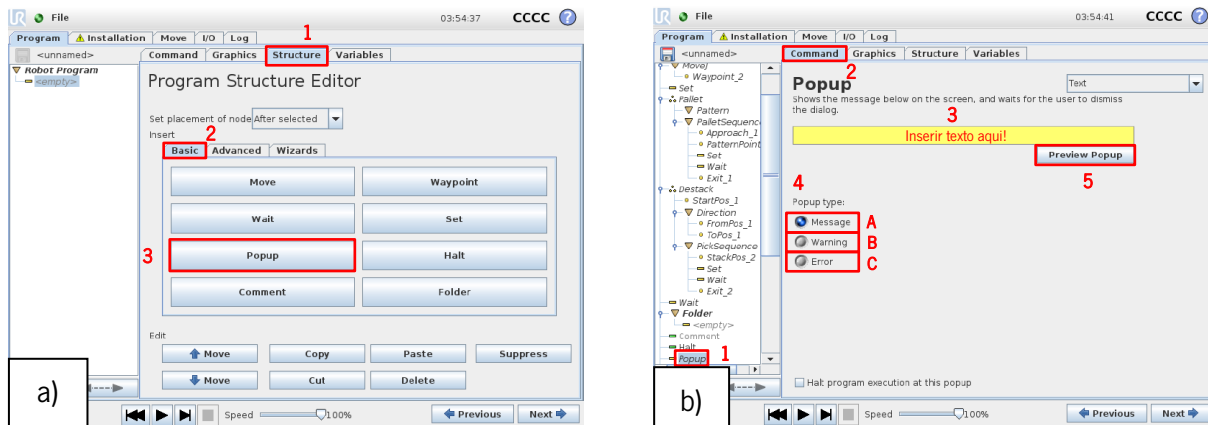


Figura 76 - Instruções sobre a introdução e controle da função "Pop-up".

Cabe ao utilizador em escolher o tipo de *pop-up* (assinalado com A, B e C na Figura 76b) que desejaria que aparecesse. Após escolher um dos três tipos é recomendado que se pressione o botão "Preview Popup" para verificar se corresponde com aquilo que se tinha idealizado.

A Figura 77 apresenta um *preview* dos três tipos de *pop-up*.



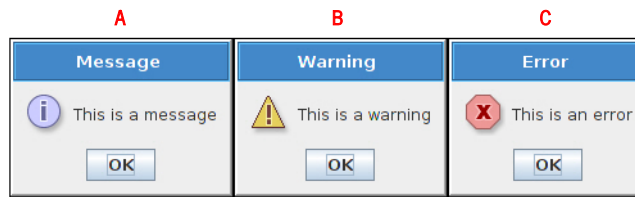


Figura 77 - A) Previsualização de uma mensagem; B) Previsualização de um aviso; C) Previsualização de um erro.

### 3.3.6 Função “If...Else”

À semelhança daquilo que acontecia com a função “Loop”, esta também permite que se insiram funções no seu interior, podendo criar-se um subprograma no programa principal. A entrada neste subprograma, como o próprio nome da função indica, é regido por uma condição.

O programa principal, ao ser executado, irá passar por cada linha de programação, por ordem e no sentido descendente. Ao chegar a uma função “If...else”, caso respeite a condição “If” irá executar as funções que se encontram no seu interior, caso contrário irá procurar por uma contra condição, isto é, aquilo a que se chama “Else”. A condição “Else” será, logicamente, um complemento à condição “If” ou o completo oposto desta (no caso de só haver dois cenários possíveis).

É uma boa prática garantir que, independentemente do desenrolar do programa, as condições “If” e “Else” criadas devem ser capazes de o cobrir, isto é, uma condição tem de se verificar. Todavia também deve mencionar-se que não se deve criar condições “If” e “Else” que se possam verificar em simultâneo.

A Figura 78 diz respeito às instruções sobre inserir e modificar uma função “If...else”.

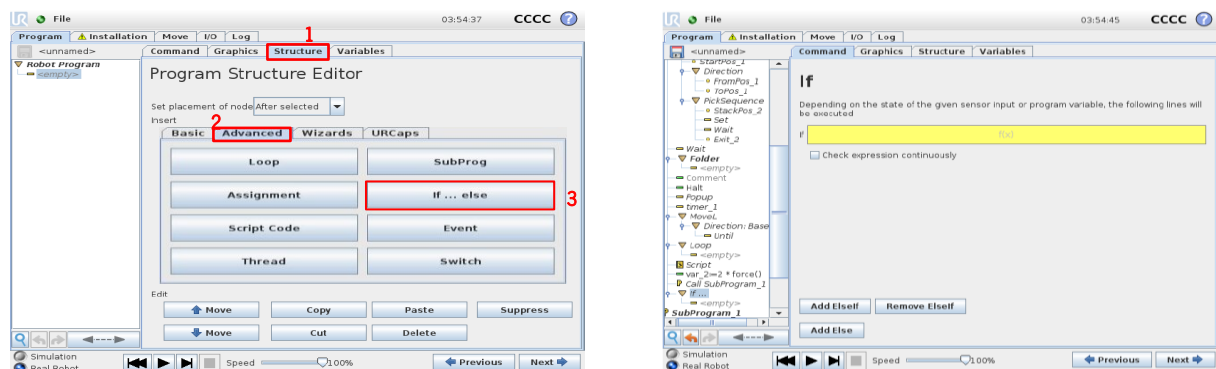


Figura 78 - Instruções sobre a introdução e controlo da função “If...else”.

## 3.4 Apresentação de um programa completo

Agora que já foram mencionadas as principais funções é importante aplicá-las e organizá-las sob a forma de um programa completo. Desta forma vai-se usar o programa presente na Figura 79 como um exemplo a analisar.

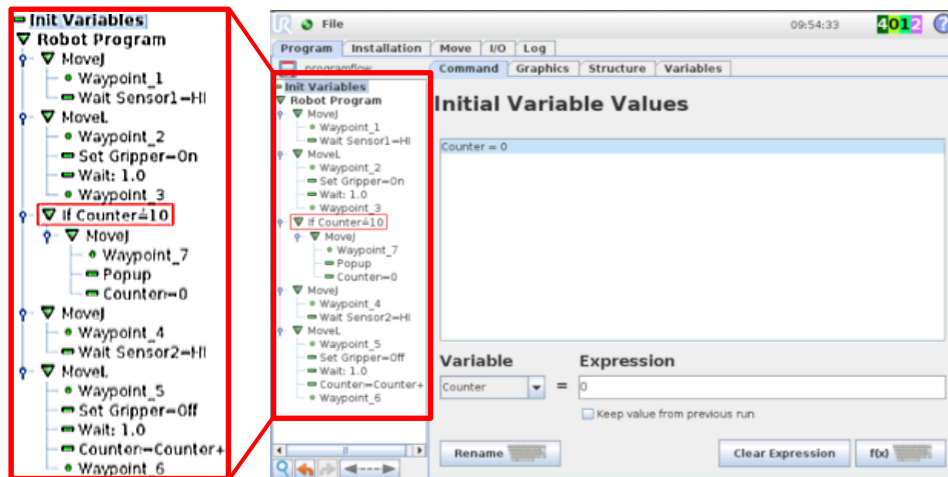
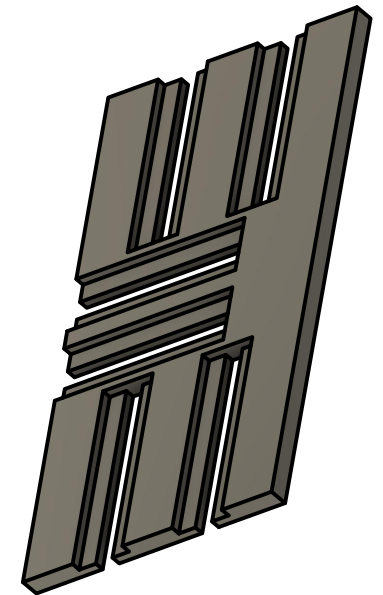
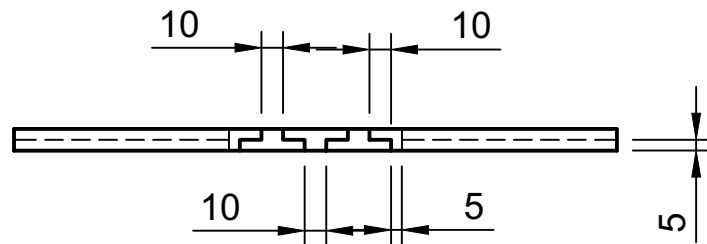
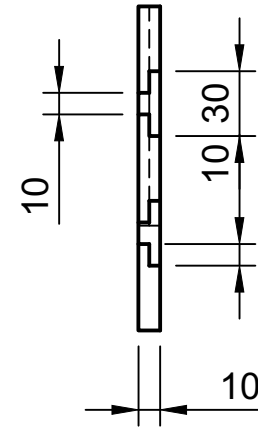
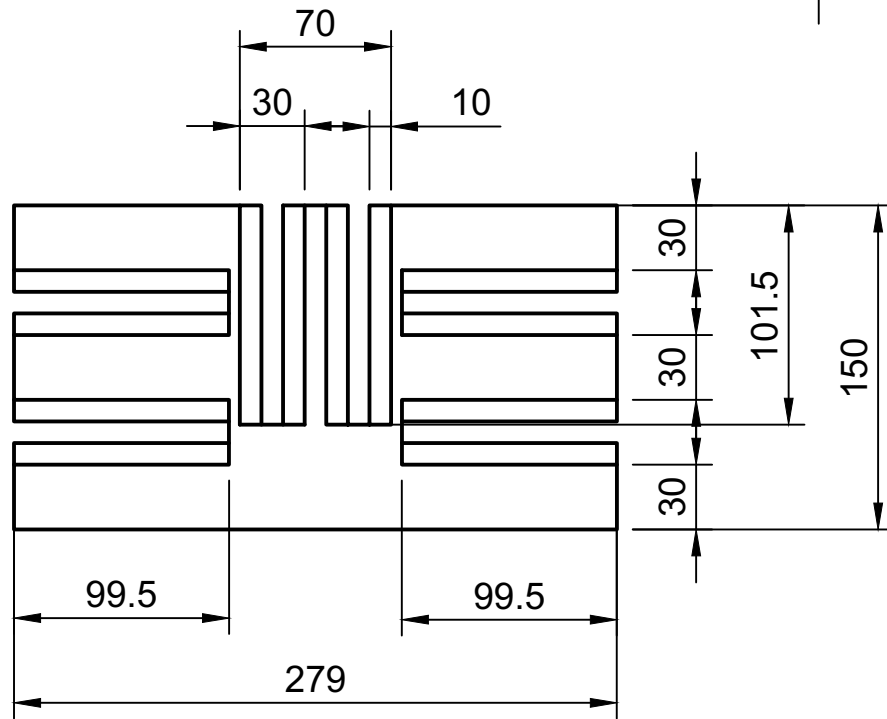


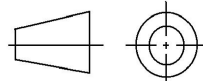
Figura 79 - Exemplo de um programa "Pick & Place"

Por forma a simplificar a análise esta será feita por blocos, isto é, uma função de cada vez em formato sequencial. O programa pode ser dividido em:

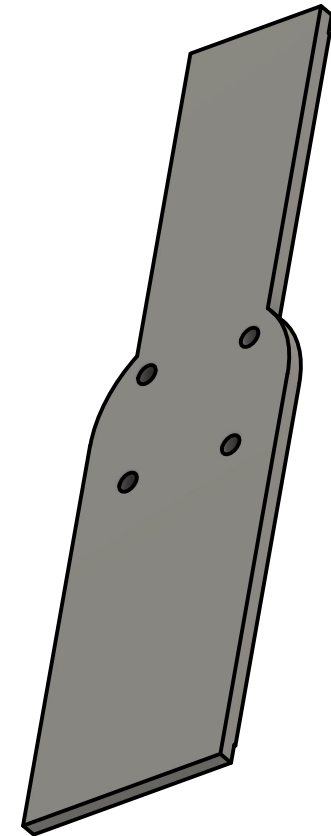
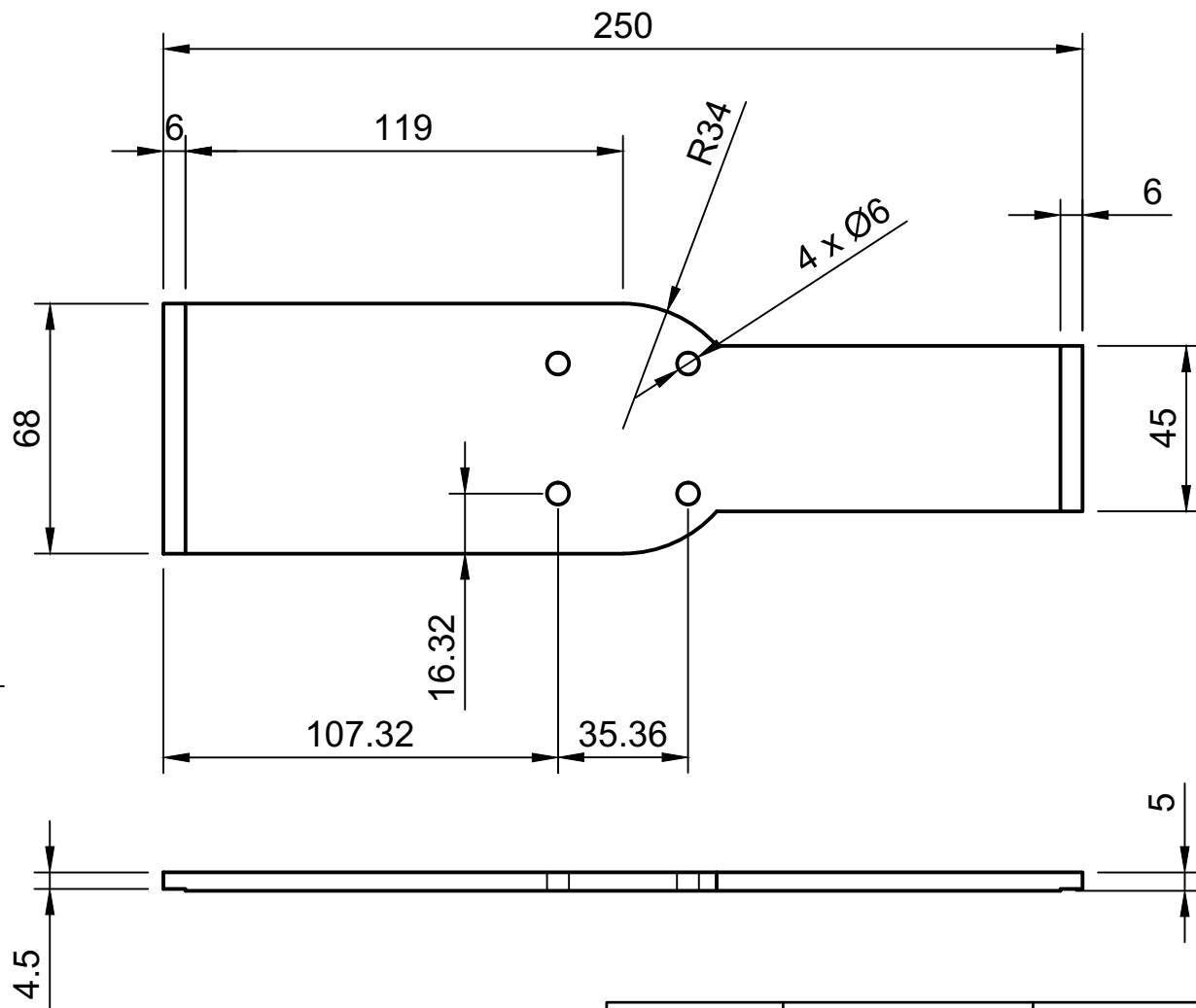
- **"Move J"** – Nesta função de movimento o manipulador move-se, de forma rápida, para o *Waypoint 1*, no qual espera até que o *Sensor1* seja acionado;
- **"Move L"** – Nesta função de movimento o robô dirige-se para o *Waypoint 2*, de forma linear, no qual aciona o *grripper* e espera 1 s para garantir que a peça se encontra fixa ao manipulador. Posteriormente, novamente de forma linear, move-se até ao *Waypoint 3*, já com a peça presa;
- **"If Counter = 10"** – Nesta função condicional foi criada uma movimentação extra para o caso em que o contador interno "*Counter*" atinge 10 unidades. Neste caso, quando esta condição for verificada o programa irá percorrer os comandos que se encontram dentro da função "*If..else*". Existirá, assim, uma movimentação rápida para o *Waypoint 7*, seguida de uma mensagem *Popup* (de forma a interromper o programa até ordem em contrário) e, por fim, será dado um *reset* no contador interno "*Counter*";
- **"Move J"** – Nesta função de movimento o manipulador move-se, de forma rápida, para o *Waypoint 4*, no qual espera até que o *Sensor2* seja acionado;
- **"Move L"** – Nesta função de movimento o robô dirige-se para o *Waypoint 5*, de forma linear, no qual desliga o *grripper* e espera 1 s para garantir que a peça seja libertada do manipulador.
- Dado um ciclo como completo o programa realça este feito ao incrementar, com uma unidade, o contador interno "*Counter*". Posteriormente, novamente de forma linear, move-se até ao *Waypoint 6*.

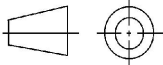
## ANEXO D – DESENHO TÉCNICO DAS CORREDIÇAS DO SUPORTE



Scale <b>1:3.5</b>	Technical reference	Created by <b>José Ribeiro</b>	General Tolerance <b>ISO 2768-mH</b>
		13/09/2021	Document status
		Document type	Projection
		Title <b>Corrediças</b>	
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/1</b>

## ANEXO E – DESENHO TÉCNICO DO *END-EFECTOR*



Scale 1:2	Technical reference	Created by José Ribeiro 15/09/2021	General Tolerance ISO 2768-mH
		Document type	Document status
		Title End-effector	Projection 
Rev.	Date of issue	Sheet 1/1	