



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Gabriel Fernandes Rodrigues

Implementação de sistemas robotizados na construção soldada



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Gabriel Fernandes Rodrigues

**Implementação de sistemas robotizados na
construção soldada**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor José Mendes Machado

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.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

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

AGRADECIMENTOS

Devo aproveitar esta secção para me dirigir àqueles cuja contribuição foi fundamental para a realização e término deste ciclo, culminado no desenvolvimento do projeto descrito neste documento.

Antes de mais gostaria de agradecer à minha família, em particular aos meus pai e irmão, pelo apoio e pela ajuda a todos os níveis que tornaram este percurso ao longo dos anos o mais suave possível.

Aos meus professores e orientadores, professor doutor José Mendes Machado e professor Filipe Pereira, por toda a orientação e disponibilidade demonstrada não só durante a realização desta dissertação, mas também ao longo dos anos.

Ao meu supervisor, engenheiro João Braga, pela oportunidade que me concedeu na realização do estágio, pelo acompanhamento ao longo dos meses e pela confiança depositada. Ao engenheiro Francisco Almeida pela ajuda na vertente da soldadura, especialmente pelo apoio numa fase final do estágio.

À empresa bysteel e a toda a equipa do departamento de produção, pela receção e disponibilidade demonstrada durante todo o percurso.

Aos meus amigos e pessoas que, de forma direta ou indireta, foram dando o seu contributo ao longo dos anos.

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

A aplicação de robôs industriais na automação de processos de produção teve início na década de '60. A indústria automóvel foi a primeira a aplicar robôs industriais e representa a vanguarda do uso de robôs, quando comparada aos restantes ramos industriais.

Robôs industriais e equipamento mecanizado tornaram-se indispensáveis para a soldadura industrial, em casos de produção de elevado volume, uma vez que a soldadura manual é cada vez menos relevante em comparação. Isto deve-se às baixas taxas de produtividade que esta apresenta, associadas ao ambiente de trabalho severo e desgastante.

Primeiramente, foi realizado um pequeno estudo sobre os procedimentos da bysteel, desde as normas vigentes aos diferentes processos de soldadura aplicados na empresa.

Em seguida, foi feita uma pesquisa bibliográfica acerca da aplicação de robôs industriais no contexto da soldadura, onde são objetos de estudo as diferentes tipologias de robôs, bem como o seu funcionamento e conceitos associados. Além disso, foram destacadas as vantagens, conveniências e limitações na implementação desta tecnologia.

Posteriormente, foi concretizado um estudo de viabilidade de implementação onde, através de diferentes abordagens, se procurou descobrir e verificar em que aspetos e de que forma a implementação de um robô de soldadura beneficiaria a empresa e a sua produtividade.

Por último, são consideradas algumas propostas de robôs recebidas pela empresa, permitindo definir o tipo de célula de soldadura a adotar.

Finalmente, são tecidas as principais conclusões referentes ao trabalho como um todo.

PALAVRAS-CHAVE

SOLDADURA; ROBÔ INDUSTRIAL; CÉLULA DE SOLDADURA; PRODUTIVIDADE; ANÁLISE DE CUSTOS

ABSTRACT

The first attempt at implementing industrial robots in the automation of manufacturing processes occurred in the 60s. The automotive industry was the first to apply industrial robots and stand at the forefront of industrial robot application, compared to other industrial branches.

Industrial robots and mechanized equipment have become indispensable to industrial welding, namely when it comes to high volume production, since conventional welding has become less relevant in comparison. This is due to the lower productivity rates that it is capable of and due to the harsh work environment.

Firstly, this thesis is focused on a small study about bysteel's procedures, from the standards they use to the different welding processes applied.

Afterwards, the object of study was the application of industrial robots in the welding context. In this research, the focus will be on the different types of robots, as well as in their way of operating and associated concepts. Furthermore, some of their conveniences and limitations will be considered and discussed.

Following that, through different approaches and a viability study, this thesis will look to verify in which aspects the implementation of a welding robot would improve the company's productivity.

The company also received a few proposals concerning welding robots, which will also be taken into consideration and will allow for a more concrete definition of what the company looks for in their welding cell.

Lastly, some conclusions will be discussed referring to this thesis and its study as a whole.

KEYWORDS

WELDING; INDUSTRIAL ROBOT; WELDING CELL; PRODUCTIVITY; COSTS ANALYSIS

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Simbologia	xii
Abreviaturas	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Apresentação da empresa bysteel	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização do documento	2
2. Processos e normas de soldadura na bysteel	4
2.1. Norma EN 1090 e classes de execução	4
2.2. Soldadura na bysteel	5
2.2.1. Juntas de soldadura.....	6
2.2.2. Preparação da junta de soldadura	8
2.3. Processos de soldadura	9
2.3.1. MAG com fio tubular de alma metálica	9
2.3.2. Soldadura por arco submerso (SAS).....	10
2.4. Imperfeições de soldadura	11
2.4.1. Fissuração a frio	12
2.4.2. Falta de fusão	13
2.4.3. Falta de penetração	14

2.4.4.	Porosidades	15
2.4.5.	Inclusões de escória	16
2.4.6.	Excesso de penetração	16
2.5.	Conclusões	17
3.	Estado de arte de robôs de soldadura	18
3.1.	Tipos de robôs industriais.....	19
3.2.	Robôs colaborativos	22
3.3.	Volume de trabalho	24
3.4.	Modos de programação - <i>online</i> e <i>offline</i>	25
3.5.	Sistema de detecção de juntas, sistema de seguimento de junta e sensores.....	27
3.5.1.	Sistema de detecção de juntas	27
3.5.2.	Sistema de seguimento de junta.....	27
3.5.3.	Sensores	28
3.6.	Eixos externos.....	28
3.7.	Conceitos de funcionamento de um robô de soldadura.....	30
3.7.1.	Sistemas de coordenadas.....	30
3.7.2.	Tipos de movimento do robô.....	33
3.7.3.	Modos de operação	34
3.7.4.	Calibração.....	35
3.8.	Conclusões.....	36
4.	Seleção da célula de soldadura	37
4.1.	Exemplos de células de soldadura robotizadas.....	38
4.2.	Documentação das visitas às empresas motofil, roq e utec.....	40
4.2.1.	Visita à roq.....	40
4.2.2.	Demonstração no chão de fábrica pela UTEC.....	41
4.2.3.	Visita à motofil	42

4.3.	Processo MIG/MAG com célula robotizada	45
4.4.	Soluções e propostas	47
4.5.	Manutenção.....	52
4.6.	Conclusões.....	53
5.	Estudo de viabilidade de implementação de uma célula robotizada de soldadura.....	55
5.1.	Custos e tempos de soldadura	55
5.2.	Índices de investimento OEE e ROI	60
5.2.1.	OEE (<i>Overall Equipment Efficiency</i>).....	60
5.2.2.	ROI (<i>Return On Investment</i>)	62
5.3.	Estudo de viabilidade de implementação de um robô convencional	65
5.4.	Conclusões.....	68
6.	Considerações finais.....	69
	Referências bibliográficas	71
	Anexos	74
	Anexo A: Tabelas auxiliares no cálculo do roi	75
	Anexo B: Desenho técnico para uma célula robotizada de soldadura da motofil.....	75
	Anexo C: Proposta de uma célula robotizada de soldadura da motofil	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ponte pedonal da Covilhã [2].....	5
Figura 2.2 - Alguns dos tipos de juntas de soldadura usados na bysteel [4].....	7
Figura 2.3 - Soldadura de canto e soldadura de canto em T [4].....	7
Figura 2.4 - Exemplos de juntas soldadas [4]	8
Figura 2.5 – Ilustração do procedimento do processo MIG/MAG [5]	10
Figura 2.6 - As diferentes variações da soldadura por arco submerso, segundo a norma EN ISO 4063 [3].....	10
Figura 2.7 - Ilustração do processo de soldadura por arco submerso [5]	11
Figura 2.8 - Fissuras nas diferentes zonas do material soldado [6].....	13
Figura 2.9 - Exemplo de falta de fusão do material na parede [6]	13
Figura 2.10 - Exemplos de falta de penetração [6].....	14
Figura 2.11 - Exemplos de porosidades em juntas de soldadura [6].....	15
Figura 2.12 - Exemplo de excesso de penetração [6]	17
Figura 3.1 - Robô de configuração cartesiana [9]	20
Figura 3.2 - Robô de configuração cilíndrica [10]	20
Figura 3.3 - Robô de configuração esférica [11]	21
Figura 3.4 - Robô de braço articulado [12]	21
Figura 3.5 - Robô de configuração SCARA [13]	22
Figura 3.6 - Eixo externo dedicado à translação de um robô [18]	29
Figura 3.7 - Modelo de posicionador rotativo da KUKA [18].....	29
Figura 3.8 - Ilustração das origens dos 5 sistemas de coordenadas de um robô KUKA [20]	31
Figura 3.9 - Ilustração dos modos de movimento dos braços de um robô KUKA [20]...	33
Figura 3.10 - Exemplo de movimento ponto a ponto [20]	33
Figura 3.11 - Exemplo de movimento linear [19]	34
Figura 3.12 - Exemplo de movimento circular [19]	34
Figura 4.1 - KUKA KR 16-2 [23].....	38
Figura 4.2 - FANUC F-200iB [24]	38
Figura 4.3 - A célula ABB e os dois posicionadores, um de cada lado da mesma [25]...	39

Figura 4.4 - Célula ABB FlexArc L-300 com dois posicionadores rotativos e uma guia linear de translação [25].....	39
Figura 4.5- Robô colaborativo UR10 [27]	40
Figura 4.6 - Célula de soldadura do robô FANUC da Motofil	43
Figura 4.7 - Robô FANUC ARC Mate 100iC apresentado na visita à Motofil	44
Figura 4.8 - Provete de soldadura usado na visita à Motofil	44
Figura 4.9 - Cordões de soldadura realizados pelo robô FANUC na Motofil	45
Figura 4.10 - Célula de soldadura inicialmente idealizada	48
Figura 4.11 - Idealização de uma célula de soldadura de um robô colaborativo.....	49
Figura 4.12 - Idealização de uma célula de soldadura de um robô convencional com uma guia de translação e um posicionador rotativo	50
Figura 4.13 - Célula de soldadura robotizada FANUC incluída na proposta da Motofil S.A. [31]	51
Figura 4.14 - Robô colaborativo UR10 da Universal Robots [27]	52
Figura 5.1 - Fatores de marcha dos diferentes métodos de soldadura [33]	56
Figura 5.2 - Eficiência de deposição de alguns processos de soldadura [33]	57
Figura 5.3 - Ciclo de trabalho habitual de diferentes processos de soldadura [34]	59
Figura 5.4 - Valores dos custos associados ao processo de soldadura usados neste estudo	66
Figura 5.5 - Cálculo da diferença anual cumulativa entre a soldadura convencional e robotizada em relação às toneladas soldadas	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens e inconvenientes mais comuns no uso da soldadura por arco submerso na bysteel	11
Tabela 2.2 - Classificação de imperfeições de soldadura segundo a norma ISO 6520 e a norma ISO 5817.....	12
Tabela 3.1 - Comparação de características entre robôs tradicionais e robôs colaborativos [14]	24
Tabela 3.2 - <i>Software</i> de programação <i>offline</i> de alguns dos fabricantes de robôs industriais de soldadura	26
Tabela 3.3 - Diferentes sistemas de coordenadas no controlador de um robô KUKA... 32	
Tabela 5.1 - Mapa comparativo das características da soldadura convencional e soldadura robotizada	60
Tabela 5.2 - Resultados do OEE para a soldadura convencional e robotizada.....	62
Tabela 5.3 - Valor poupado em cada um dos anos entre 2017 e 2021 simulando a implementação de um robô colaborativo	63
Tabela 5.4 - Número de anos a partir do qual a implementação do robô colaborativo fica saldada	63
Tabela 5.5 - Retorno de investimento percentual após 8, 10, 12 e 15 anos de implementação de um robô colaborativo	64
Tabela 5.6 - Número de anos a partir do qual a implementação do robô convencional fica saldada.....	64
Tabela 5.7 - Retorno de investimento percentual após 8, 10, 12 e 15 anos de implementação de um robô convencional	64
Tabela 5.8 - Valor poupado num ano com implementação de um robô convencional. 65	

SIMBOLOGIA

ampere (símbolo: A) – É a unidade de corrente elétrica do Sistema Internacional de Unidades (SI), que representa a intensidade de corrente elétrica.

grama (símbolo: g) – É a unidade básica de massa do Sistema Internacional de Unidades (SI).

hertz (símbolo: Hz) – É a unidade de frequência derivada do Sistema Internacional de Unidades (SI). É expressa em termos de ciclos por segundo, a frequência de um evento periódico.

kg – múltiplo do SI para g e representa 10^3 g.

metro (símbolo: m) – É a unidade de medida derivada do Sistema Internacional de Unidades (SI) para medir comprimentos.

milímetro (símbolo: mm) – Múltiplo do SI para metro e representa 10^{-3} m.

volt (símbolo: V) – É a unidade de tensão elétrica do Sistema Internacional de Unidades (SI), que representa a diferença de potencial elétrico entre dois pontos.

ABREVIATURAS

CAD – *Computer-Aided Design*

MIG – *Metal Inert Gas*

MAG – *Metal Active Gas*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

PLC – *Programmable Logic Controller*

PTP – *Point To Point*

ROI – *Return On Investment*

SCARA – *Selective Compliance Articulated Robot Arm*

TCP – *Tool Center Point*

TIG – *Tungsten Inert Gas*

TOF – Técnico Operacional de Fabrico

ZTA – Zona Termicamente Afetada

1. INTRODUÇÃO

Em anos recentes, no setor da indústria, tem-se dado um aumento na competitividade do mercado. Isto tem resultado na necessidade crescente das empresas desenvolverem e produzirem de forma rápida e eficiente, mantendo os custos baixos e uma qualidade final consistente e elevada. Tudo isto resulta numa evolução constante da indústria, uma vez que cada entidade procura destacar-se dos seus competidores.

O comportamento dinâmico do mercado e a competitividade crescente estão a forçar as empresas a procurar otimizar os seus procedimentos de produção. Um dos investimentos feitos nesse sentido é realizado no mercado dos robôs manipuladores. Estes são bastante versáteis nas tarefas que desempenham graças à sua destreza e garantem uma elevada qualidade de trabalho de forma consistente.

A sua implementação permite poupar custos em mão-de-obra, aumentando a precisão e consistência do trabalho, acelerando o processo de produção e melhorando a qualidade do produto final. Por outro lado, liberta os operadores do desempenho de tarefas repetitivas e exaustivas.

Assim, cada vez mais, as empresas e a indústria como um todo tem vindo a apostar na automatização robotizada de forma a ter acesso aos produtos de forma mais rápida, com uma melhor qualidade final e adquiridos a um baixo custo com menos desperdícios.

1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA BYSTEEL

Esta dissertação foi feita sob a alçada de um estágio curricular na empresa bysteel.

A bysteel é uma empresa que se insere no ramo da construção civil, especializada na conceção, fabrico e montagem de superestruturas em aço.

A bysteel opera atualmente em Portugal, França, Reino Unido, República do Congo e Angola, além de exportar para todo o mundo.

A sede e unidade industrial da bysteel localizam-se em Braga, integrada no complexo industrial sede do grupo dst, do qual faz parte.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo abrangente desta dissertação é o de analisar a aplicabilidade da soldadura robotizada na construção soldada.

Mais concretamente, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar se a empresa trabalha com volume de material considerável o suficiente que justifique a implementação de um robô, uma vez que este representa um investimento inicial bastante significativo;
- Selecionar um tipo e/ou modelo de célula robotizada adequada à tarefa;
- Perceber o efeito da implementação da célula robotizada nos custos de soldadura e na produtividade geral da soldadura da empresa.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta dissertação está estruturada de forma a introduzir o leitor aos temas associados, à medida que são abordados conceitos e tarefas progressivamente mais específicas e complexas, com o objetivo de tornar a compreensão do conteúdo o mais natural possível.

Deste modo, o primeiro capítulo faz uma introdução que apresenta os temas e objetivos, além de contextualizar a realização da tese em si num ambiente empresarial. O segundo capítulo descreve os processos de soldadura utilizados na bysteel, introduzindo algumas noções, classificações e normas associadas aos processos e às preparações de juntas de soldadura. Posteriormente, será abordado o estado da arte relativa a robôs de soldadura, onde são definidos vários conceitos associados aos mesmos, desde a sua programação às marcas que lideram o mercado, e ainda são esclarecidos os benefícios, problemas e condições associados à implementação de uma célula robotizada. Serão também abordados os robôs colaborativos e outros tipos de robôs industriais, sendo feito um levantamento das aplicações principais de cada um.

O quarto capítulo está reservado para um estudo de viabilidade de implementação de um robô de soldadura na bysteel. Esse estudo é constituído por diferentes abordagens e tem em conta os diferentes aspetos que devem ter tido em conta no processo de aplicação de um robô de soldadura, tais como os custos de soldadura, tempos de soldadura e quantidade de material passível de ser soldado. Relativamente ao quinto capítulo, este é dedicado à seleção da célula de soldadura, onde é descrito o processo MIG/MAG com aplicação da célula,

são discutidas as propostas recebidas pela empresa e estão documentadas as visitas realizadas a outras empresas numa fase inicial do estágio e do projeto com a finalidade de introduzir o conceito de robô de soldadura.

Por último, há um capítulo destinado à discussão de alguns pontos chave onde são tecidas as conclusões abrangentes do projeto.

2. PROCESSOS E NORMAS DE SOLDADURA NA BYSTEEL

Este capítulo pretende dar a conhecer o processo abrangente de soldadura na bysteel e algumas noções e conceitos associados ao mesmo. Assim sendo, será primeiramente feita uma referência à norma EN 1090, sob a qual a bysteel se rege.

Posteriormente, serão enumerados e explanados os dois processos de soldadura mais recorrentes na bysteel, bem como as imperfeições de soldadura mais frequentes

2.1. NORMA EN 1090 E CLASSES DE EXECUÇÃO

A norma europeia EN 1090 define classes de execução, cada uma com os seus requerimentos, onde a classificação das classes é determinada em grande parte pela consequência da falha da estrutura e pela complexidade do(s) componente(s).

Esta classificação é constituída por quatro classes (da EXC1 à EXC4), sendo que uma classe de maior número implica maior complexidade estrutural e, conseqüentemente, o rigor exigido no projeto e construção da estrutura aumenta. É, portanto, exigido uma certificação sob a forma de uma classe de execução [1].

Cada fabricante deve ser certificado por uma classe de execução e isto irá decidir que estruturas está apto a construir.

No caso da bysteel, a sua classe de execução é a EXC4, a mais elevada e que exige maior rigor. Esta classe habilita o fabricante a construir estruturas como centros industriais com potenciais perigos para a saúde e pontes em áreas de elevada densidade populacional, como é o caso da ponte pedonal da Covilhã (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Ponte pedonal da Covilhã [2]

2.2. SOLDADURA NA BYSTEEL

Para a produção de construção soldada, são utilizados, na bysteel, os seguintes processos, numerados segundo a norma EN ISO 4063, norma que contém a nomenclatura e números dos diferentes processos de soldadura [3]:

- Soldadura por arco com fio fluxado auto-protegido – 114
- Soldadura por Arco Submerso (SAS) – 121
- Fio sólido com proteção gasosa ativa – 135
- Fio fluxado com proteção gasosa ativa - 136
- Fio fluxado de alma metálica com proteção gasosa ativa – 138
- Soldadura de conectores por arco – 783

No início de cada projeto é feita uma avaliação às soldaduras que irão ser realizadas e normas ou requisitos a serem cumpridas, de forma a perceber a necessidade de novos procedimentos de soldadura, aquisição de novos equipamentos e/ou tecnologias, tempos de execução, formação de soldadores e posterior certificação. Este estudo pode iniciar-se na fase de orçamentação.

Em fase de produção, de forma a executar e obter o nível de qualidade exigido na norma EN 1090 e, conseqüentemente, na norma EN ISO 3834, onde são definidos requisitos de qualidade para soldadura de materiais metálicos, o processo e a sua inspeção foram organizados em três etapas: antes da soldadura, durante a soldadura e após a mesma. Cada etapa se caracteriza por certas tarefas que são divididas pelo técnico operacional de fabrico (TOF) de soldadura, pelo encarregado de soldadura e pelo soldador.

2.2.1. JUNTAS DE SOLDADURA

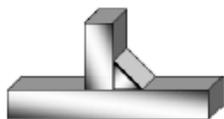
Os tipos de juntas de soldadura soldadas na empresa são (Figura 2.2):

- Topo a topo;
- Topo a topo de um só lado;
- Em T;
- De canto;
- De canto em elementos de ligação;
- Descarnagem da raiz;
- Em aços patináveis;
- Picagens;
- De conectores;
- Por entalhe e bujão (*plug e slots*);

- Soldadura topo a topo de penetração total ou parcial (*butt welds full/partial penetration*)



- Soldadura de canto (*Fillet Weld*)



- Soldadura por pontos/ costura (*spot/seam welds*)



- Soldadura de fenda / de mentiroso (*Plug/slit welds*)



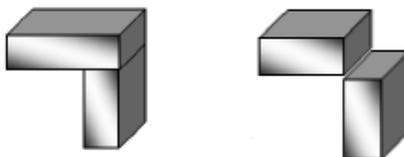
- Soldadura de aresta/rebordo (*edge welds*)



Figura 2.2 - Alguns dos tipos de juntas de soldadura usados na bypeel [4]

As juntas de soldadura podem ser classificadas pela geometria, preparação da junta e pelo tipo de solda (Figura 2.3). Sobre a consequência da geometria e da preparação da junta, a soldadura pode ser de canto “*fillet*”, de penetração parcial ou penetração total.

- Junta de canto



- Junta de canto em T

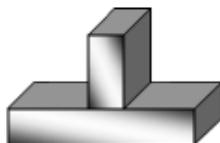


Figura 2.3 - Soldadura de canto e soldadura de canto em T [4]

A penetração da junta é a distância entre a superfície original do metal base até ao ponto em que termina a fusão [4]. A penetração da junta é a distância entre a superfície original do metal base até ao ponto em que termina a fusão. A penetração total ocorre em toda a espessura de um dos componentes da junta. Apresenta um melhor comportamento

mecânico, mas, por outro lado, é mais complexa de executar. Por isso, é mais frequente utilizar a soldadura com penetração parcial (Figura 2.4), reservando-se a soldadura com penetração total para quando o desempenho mecânico é um fator decisivo.

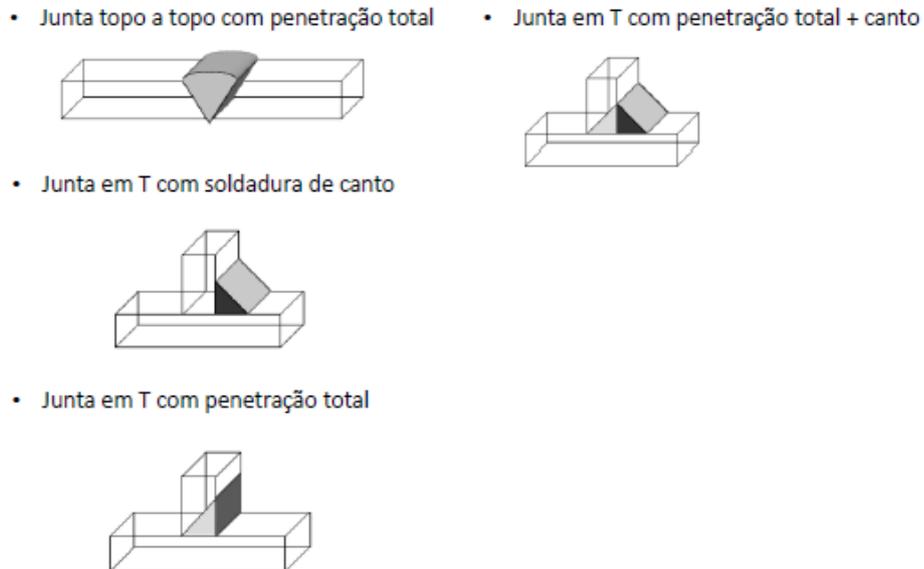


Figura 2.4 - Exemplos de juntas soldadas [4]

2.2.2. PREPARAÇÃO DA JUNTA DE SOLDADURA

Antes de iniciar a soldadura, é importante limpar a junta e remover a oxidação do aço. Em caso de contaminação do cordão, a qualidade da soldadura é comprometida de forma significativa, por via de aparecimento de defeitos no material. Quando isto acontece, é necessário remover o cordão e voltar a realizar o processo. Isto é ineficiente uma vez que vai implicar maior tempo de fabrico e maior gasto de consumíveis, resultando num aumento dos custos de produção.

Deve ainda considerar-se que as peças devem ser colocadas em posição adequada, seja através do uso de grampos para a sua fixação ou através do uso de pingos.

É frequente a realização de uma rebarbagem manual para remover a oxidação do material e tentar obter uma junta uniforme, para que não seja necessário compensar durante a deposição do cordão de soldadura.

O fenómeno da distorção pode ocorrer após a soldadura e refere-se à mudança de forma da peça por resultado das deformações térmicas sofridas pelo material durante o processo. Isto pode ser corrigido ou evitado através do planeamento da sequência de deposição dos cordões de soldadura, realização de desempenho ou através do projeto cuidadoso da peça numa fase inicial.

2.3. PROCESSOS DE SOLDADURA

Neste subcapítulo serão apresentados os processos de soldadura mais usados no chão de fábrica da bysteel: a soldadura MIG/MAG, mais concretamente MAG com fio tubular de alma metálica, e soldadura por arco submerso (SAS).

2.3.1. MAG COM FIO TUBULAR DE ALMA METÁLICA

Este processo usa um arco elétrico com proteção gasosa ativa (MAG – *Metal Active Gas*) (Figura 2.5). Um arco elétrico forma-se entre a peça e o consumível na forma de arame. O arco funde o arame de forma contínua à medida que este é alimentado para a zona de fusão.

O gás usado tem como função remover o ar da atmosfera na região de soldadura e, deste modo, proteger o cordão, o que ajuda a evitar a contaminação. O gás ativo geralmente usado é o dióxido de carbono (CO₂). Também se pode optar por uma mistura de gases.

Este processo é capaz de soldar uma grande variedade de metais, possibilitando ainda uma taxa de deposição de material e uma velocidade de soldadura elevadas, o que o torna um dos mais utilizados na bysteel. Além disso, permite um controlo de penetração razoável e é capaz de soldar em todas as posições. As suas falhas estão associadas ao equipamento de porte considerável, que não permite muita mobilidade. É também um processo que requer um soldador relativamente qualificado e com custos de gases de proteção elevados. É ainda um processo sensível a correntes de ar, uma vez que estas podem perturbar o efeito do gás de proteção.

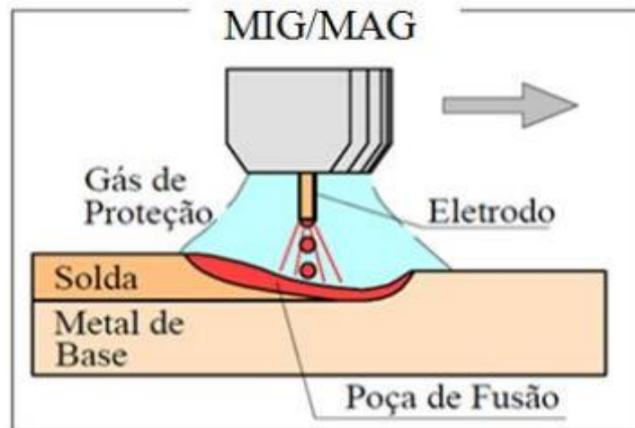


Figura 2.5 – Ilustração do procedimento do processo MIG/MAG [5]

2.3.2. SOLDADURA POR ARCO SUBMERSO (SAS)

Este processo contém múltiplas variações, todas elas numeradas respetivamente na norma EN ISO 4063 (Figura 2.6).

- 121 Soldadura por arco submerso com único fio-eléctrodo
- 122 Soldadura por arco submerso com fita
- 123 Soldadura por arco submerso com fios-eléctrodos múltiplos
- 124 Soldadura por arco submerso com adição de pó de ferro
- 125 Soldadura por arco submerso com fio fluxado

Figura 2.6 - As diferentes variações da soldadura por arco submerso, segundo a norma EN ISO 4063 [3]

Neste processo, o calor necessário para fundir o material resulta de um arco formado pela corrente eléctrica que passa entre o arame de soldadura, denominado consumível, e a peça de trabalho (Tabela 2.1). A ponta do arame, o arco eléctrico e a peça são cobertos por uma camada de um material mineral granulado conhecido por fluxo (Figura 2.7).

Tabela 2.1 - Vantagens e inconvenientes mais comuns no uso da soldadura por arco submerso na bypeel

Vantagens	Inconvenientes
Grande capacidade de penetração;	Acessibilidade e mobilidade;
Elevadas taxas de depósito;	Produção de escória;
Fator de marcha de 100%;	Limitadas posições de soldadura;
Eléctrodo contínuo sólido ou fluxado;	Maus passes de raiz;

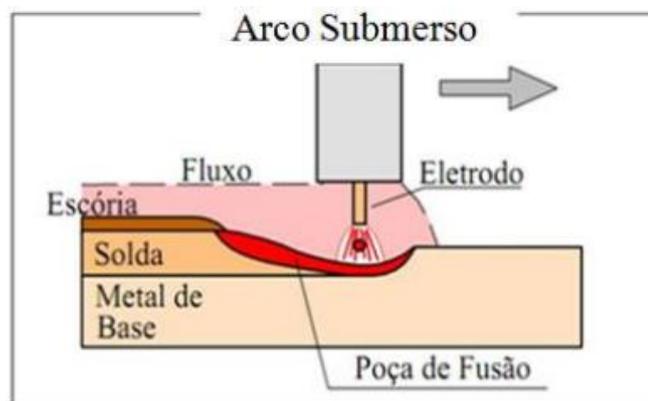


Figura 2.7 - Ilustração do processo de soldadura por arco submerso [5]

2.4. IMPERFEIÇÕES DE SOLDADURA

Uma junta de soldadura de qualidade máxima, quando sujeita a uma força externa, sofre uma distribuição homogénea de tensões ao longo do seu volume.

Para permitir que isto aconteça, a soldadura deve ser sólida em toda a sua secção e o cordão deve ter superfícies com transições suaves.

Um defeito de soldadura tem origem numa descontinuidade que ultrapassa o critério de aceitação estabelecido. Quando a descontinuidade não ultrapassa o critério de aceitação, a soldadura apresenta uma imperfeição.

Uma imperfeição pode definir-se como uma interrupção da estrutura típica de uma junta soldada, podendo não se verificar homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da soldadura.

Assim, pode dizer-se que existem três principais aspetos que afetam as características finais da junta soldada:

- Imperfeições operacionais – relacionadas com as capacidades operacionais do soldador ou do operador de soldadura;
- Imperfeições metalúrgicas – derivadas da metalurgia da junta. Dependem diretamente dos parâmetros de soldadura estipulados;
- Propriedades mecânicas e químicas – a junta deve cumprir certos requisitos tais como resistência mecânica, dureza, tenacidade, composição química, resistência à corrosão, entre outros.

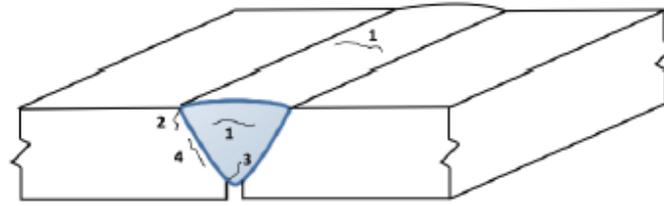
Segundo a norma ISO 6520, que faz a classificação de imperfeições geométricas em materiais metálicos, e a norma ISO 5817, que avalia o nível de qualidade de juntas soldadas, as imperfeições de soldadura podem ser divididas em seis ou em quatro grupos, respetivamente (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Classificação de imperfeições de soldadura segundo a norma ISO 6520 e a norma ISO 5817

ISO 6520	ISO 5817
Fissuras;	Imperfeições superficiais;
Cavidades;	Imperfeições internas;
Inclusões;	Imperfeições na geometria;
Falta de fusão e penetração;	Imperfeições múltiplas;
Imperfeições geométricas e dimensionais;	
Imperfeições diversas;	

2.4.1. FISSURAÇÃO A FRIO

A fissura tem início após a soldadura, à temperatura ambiente ou próxima, e ocorre primariamente na ZTA (zona termicamente afetada) (Figura 2.8) ou na zona fundida, onde se verifica maior combinação de hidrogénio num material frágil, quando exposto a tensões.



- 1- Fissura transversal no cordão
- 2- Fissura na ZTA (zona "toe")
- 3- Fissura na zona da raiz do cordão
- 4- Fissura debaixo no cordão na ZTA (*Underbead crack*)

Figura 2.8 - Fissuras nas diferentes zonas do material soldado [6]

As causas frequentes para a ocorrência de fissuração a frio passam pela formação de zonas frágeis, que são suscetíveis a fissuração por hidrogénio, devido a altas taxas de arrefecimento.

O arrefecimento rápido favorece também a fissuração uma vez que este endurece a estrutura do aço e não permite a difusão do hidrogénio. Outra causa comum são as tensões que resultam de juntas muito constrangidas.

Este tipo de imperfeição reduz a resistência a esforços estáticos da peça, bem como a resistência à fadiga e a impactos [6].

2.4.2. FALTA DE FUSÃO

A falta de fusão (Figura 2.9), como o nome indica, ocorre quando se dá a fusão incompleta entre o metal base e o cordão de soldadura ou até entre cordões de soldadura. Estas imperfeições também são conhecidas como colagens.

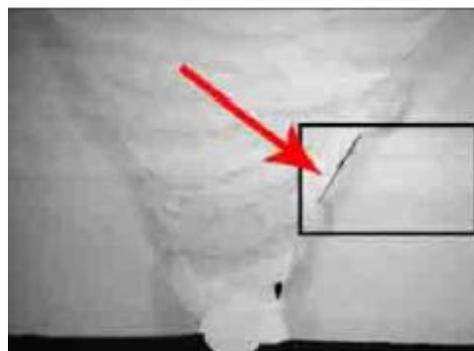


Figura 2.9 - Exemplo de falta de fusão do material na parede [6]

Para a falta de fusão entre o cordão de soldadura e uma parede ou ambas paredes do metal base ocorrer, deve-se gerar, durante a soldadura, calor suficiente na zona da

extremidade da poça de fusão para fundir o material base. As principais causas desta imperfeição por uma baixa entrega térmica, a existência de óxidos e/ou escamas na preparação da junta e pela excessiva indutância no processo MAG.

Quando a falta de fusão ocorre entre os passes de soldadura, produz fissuras entre os cordões e facilita a inclusão de escória. Esta imperfeição pode resultar de alta velocidade de soldadura, má colocação dos cordões e/ou do uso de corrente baixa que resulta em baixa fluidez da poça de fusão.

Por sua vez, a falta de fusão na raiz geralmente deve-se ao uso de uma folga pequena, a um desalinhamento excessivo, a uma baixa entrega térmica ou ao uso de um ângulo de soldadura incorreto e má manipulação do eletrodo.

As imperfeições relacionadas com a falta de fusão reduzem a resistência a esforços estáticos, à fadiga e aos impactos, afetando ainda o comportamento na corrosão [6].

2.4.3. FALTA DE PENETRAÇÃO

Estas imperfeições ocorrem quando a penetração atingida é inferior à especificada (Figura 2.10) e têm frequentemente origem em condições de soldadura incorretas, tais como uso de corrente demasiado baixa, elevada velocidade de soldadura ou escória na frente do eletrodo. Pode ainda resultar de uso de folga insuficiente para a espessura do material ou uso de eletrodo com diâmetro incorreto e posição de soldadura incorreta.

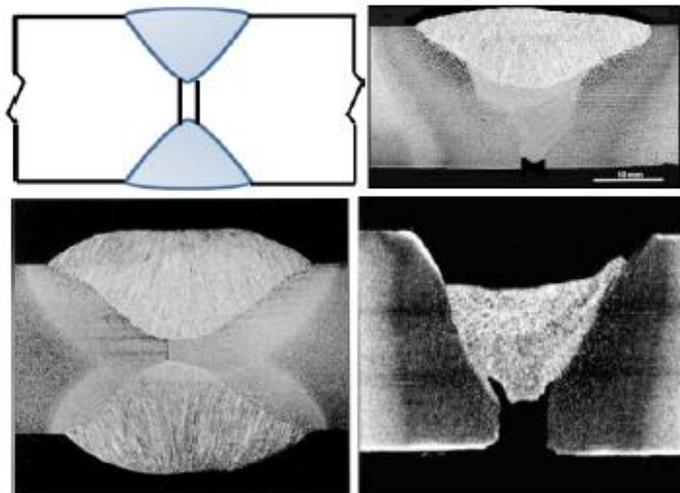


Figura 2.10 - Exemplos de falta de penetração [6]

2.4.4. POROSIDADES

As porosidades podem ser encontradas na zona fundida e assumir várias formas (Figura 2.11). Geralmente descrevem-se pela sua forma e são descritas da seguinte forma:

- Porosidade: Um número de porosidades na zona fundida também referido como porosidade esférica uniformemente distribuída;
- Poro vermicular: cavidade tubular ou alongada;
- Poros alinhados: linha de poros paralela ao eixo da solda;
- Poro localizado: um grupo de poros isolado.

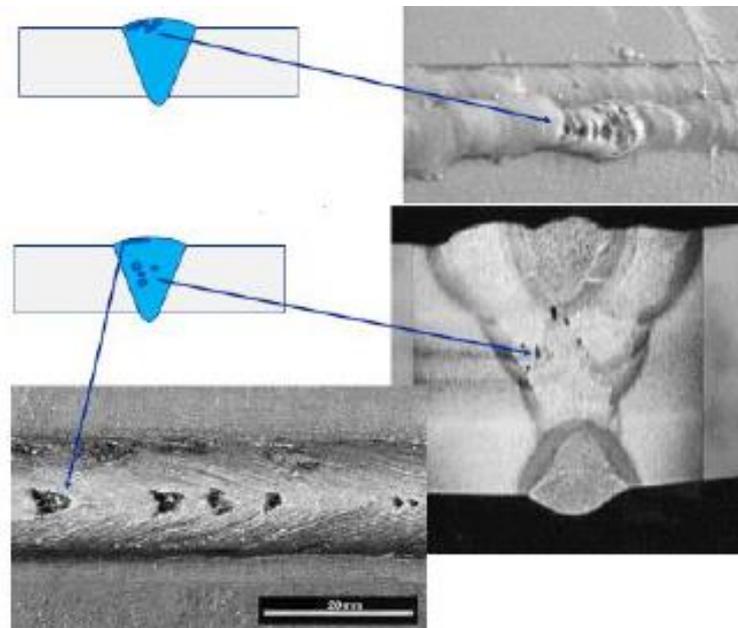


Figura 2.11 - Exemplos de porosidades em juntas de soldadura [6]

As causas mais frequentes para o aparecimento de porosidades são a absorção de gases na poça de fusão (por exemplo oxigénio, azoto, hidrogénio), a falha na proteção gasosa da atmosfera (por exemplo, falha no gás), a soldadura através de superfícies com revestimentos ou ainda a soldadura por cima de cavidades ou fendas, que acabam por aprisionar os gases.

A existência de porosidades reduz a resistência mecânica e o aumento do risco de vazamento ou rotura da junta de soldadura [6].

2.4.5. INCLUSÕES DE ESCÓRIA

A inclusão de escória pertence a um tipo de imperfeições designada por inclusões sólidas, que consiste na retenção de matéria sólida não desejada na solda, normalmente entre os passes de soldadura.

As inclusões de escória são imperfeições que acontecem quando fica retida escória durante a soldadura. Dada a sua forma irregular, difere a sua aparência da dos poros. Pode estar presente finamente dispersa, particularmente no processo SER (Soldadura de Eléctrodo Revestido). Isto torna-se um problema quando uma larga quantidade é produzida.

A inclusão indesejada de escória ocorre, geralmente, devido à remoção incompleta de escória entre passes em processos multipasse, ao facto de a escória viajar em frente ao arco e/ou ao aprisionamento da escória na superfície de trabalho.

Estas imperfeições resultam na redução da resistência mecânica da junta de soldadura, bem como na redução da sua resistência à fadiga, ao impacto e ao vazamento [6].

2.4.6. EXCESSO DE PENETRAÇÃO

As imperfeições associadas ao excesso de penetração geralmente verificam-se em juntas de soldadura onde há excesso de metal saliente na raiz (Figura 2.12). Normalmente é derivado da projecção do passe penetração, que fica além de um dado valor. Pode ser contínuo ou local.

As causas mais frequentes para o aparecimento de este tipo de imperfeição são uma entrega térmica demasiado alta, uma velocidade de soldadura baixa, um tamanho e tipo de eléctrodo incorrectos, uma preparação incorrecta da junta de soldadura (associada a folga excessiva ou irregularidades na junta da soldadura mecanizada de um só lado) ou uma má técnica operatória.

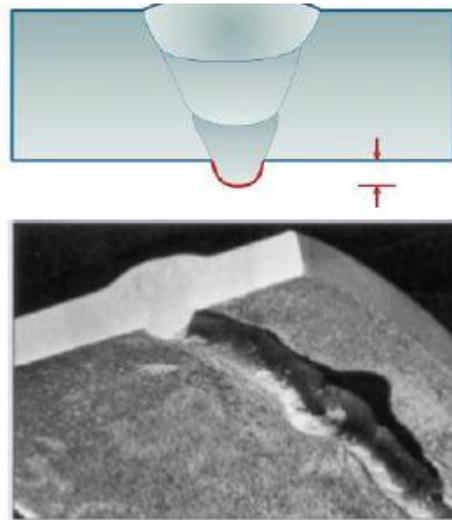


Figura 2.12 - Exemplo de excesso de penetração [6]

2.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, o principal foco foi a bysteel e, em maior detalhe, o processo de soldadura empregue na empresa. Foram abordados os principais processos utilizados pelos soldadores, MIG/MAG (nomeadamente MAG) e arco submerso, incluindo o seu procedimento e um balanço dos benefícios e inconveniências dos mesmos. Foram ainda descritas, de forma mais extensa, as principais imperfeições encontradas nas peças quando sujeitas à soldadura.

Em suma, o estudo inserido neste capítulo foi proveitoso no sentido de melhor entender os processos e o funcionamento da soldadura na bysteel. Isto permitiu também chegar à conclusão que o processo mais adequado a ser adotado numa eventual implementação robotizada seria o processo MAG. A aplicação deste processo em células robotizadas é a mais comum na indústria metalomecânica e seria capaz de colmatar a maioria das suas falhas do processo manual, no que concerne a mobilidade do equipamento associado e a necessidade de vários soldadores qualificados. Além disso, a adoção de robôs neste processo permite atingir maiores velocidades de trabalho o que resulta em maior produtividade e maior consistência de cordão para cordão.

3. ESTADO DE ARTE DE ROBÔS DE SOLDADURA

O investimento crescente em robôs para fins industriais durante o processo de produção deve-se à necessidade de automatizar o sistema produtivo.

O robô industrial rapidamente se adaptou a este molde devido às suas características de flexibilidade de programação e capacidade de adaptação a sistemas integrados de manufatura. Entre os principais fabricantes, podemos encontrar a alemã *KUKA*, a *Fanuc*, que mais recentemente se apresenta como o maior fabricante em termos de quantidade de unidades produzidas, a *ABB* e as japonesas *Kawasaki* e *Yaskawa Motoman*.

O objetivo primário de um sistema de produção é o de conferir valor adicional aos produtos. Isto é, após a entrada de matérias-primas e/ou peças básicas, o sistema de produção executa um qualquer processo de transformação sobre esses materiais resultando em produtos finais, processados, que possuem um valor comercial de mercado superior.

Deste modo, o uso de robôs industriais no chão-de-fábrica surge como uma solução aos objetivos da produção automatizada, que visa, entre outros objetivos, reduzir os custos dos produtos finais através da diminuição do número de pessoas envolvidas no processo produtivo, substituindo-as total ou parcialmente por células robóticas.

Esta implementação resulta ainda numa melhoria das condições de trabalho do ser humano, através da eliminação das atividades perigosas a que estes operadores seriam sujeitos, passando este tipo de tarefas a ser desempenhada por robôs [7].

A qualidade do produto beneficia também com o uso de robôs industriais devido ao maior controlo de parâmetros e repetibilidade de que estes são capazes, ou seja, os robôs são capazes de efetuar o mesmo processo de soldadura repetidamente com variações praticamente nulas de peça para peça.

Outros benefícios da implementação de robôs industriais passam por:

- Maior qualidade e consistência na qualidade, devido à redução do erro humano e das variáveis no processo e à maior precisão;
- Ciclo de produção mais rápido, uma vez que os robôs têm um menor *downtime* dado que não requerem pausas e são mais adequados à produção em massa;

Apesar destas melhorias à produção, há ainda outros fatores a considerar na implementação de robôs industriais. Se calhar o mais flagrante entre eles será o investimento inicial elevado que caracteriza este tipo de equipamento. É importante garantir que há um

elevado número de peças viáveis de ser soldadas pelo robô de modo a justificar o investimento.

Além disso, é relevante considerar que as peças devem ter algum grau de repetibilidade para que o tempo usado na programação do robô seja compensado pelo respetivo ciclo de trabalho.

Outra limitação está na programação que os robôs implicam. Isto significa que a qualidade dos resultados estará sempre dependente da qualidade da programação, que exige algum conhecimento específico e destreza do operador. No plano físico, é necessário ter também em conta a possibilidade de eventuais avarias e a necessidade de manutenção com alguma regularidade. Por fim, pondere-se que é um equipamento que exige bastante espaço para poder operar de forma segura devido não só ao seu porte e volume de trabalho, mas também à grade protetora que estas células costumam exigir ao seu redor.

3.1. TIPOS DE ROBÔS INDUSTRIAIS

Atualmente, no mercado, existem várias soluções com tecnologias versáteis e de diferentes propósitos. Estes robôs podem ser classificados segundo várias categorias. Podem-se dividir em elétrico, pneumático ou hidráulico quando classificados pelo sistema de tração. Subdividem-se ainda pela cadeia cinemática (aberta ou fechada) e ainda pelo tipo de transmissão (direita ou indireta) [8].

No que toca à configuração do braço robótico, sendo o braço o elemento do robô que interage diretamente com o objeto com que trabalha, podem-se dividir em cartesianos, cilíndricos, esféricos, de braço articulado ou SCARA.

Os robôs de configuração cartesiana (Figura 3.1) permitem movimento linear em três direções e o seu controlo é mais simples (devido a um modelo cinemático mais simples). A sua estrutura rígida confere-lhe alto grau de precisão e repetibilidade e elevada capacidade de carga, consistente dentro do volume de trabalho. Pode usar tração pneumática (mais barata) para trabalhos leves.

As suas limitações prendem-se no facto de necessitar de amplo espaço físico para trabalhar. Além disso o volume de trabalho é menor que o tamanho do robô e é suscetível de colidir com objetos dentro do volume de trabalho [8].

É aplicado normalmente em tarefas de *pick and place* e linhas de montagem.



Figura 3.1 - Robô de configuração cartesiana [9]

Os robôs de configuração cilíndrica (Figura 3.2) contêm 2 movimentos lineares e 1 rotacional. O braço do robô está conectado à coluna central para se poder mover radialmente em relação à mesma. As suas vantagens são a economia de espaço que permite uma vez que a sua estrutura vertical ocupa pouco espaço no chão de fábrica. O seu modelo cinemático é simples e permite bom acesso a cavidades. Com tração hidráulica é capaz de grande potência.

As suas limitações passam pela inferior repetibilidade e precisão na direção do movimento de rotação. Além disso, tem um volume de trabalho restrito, isto é, o espaço dentro do qual o robô pode manipular a extremidade do pulso (ferramenta). Por último, a parte traseira do robô pode sobrepor a área de trabalho o que pode ser perigoso. As suas aplicações mais frequentes são em linhas de montagem e manuseio de materiais [8].

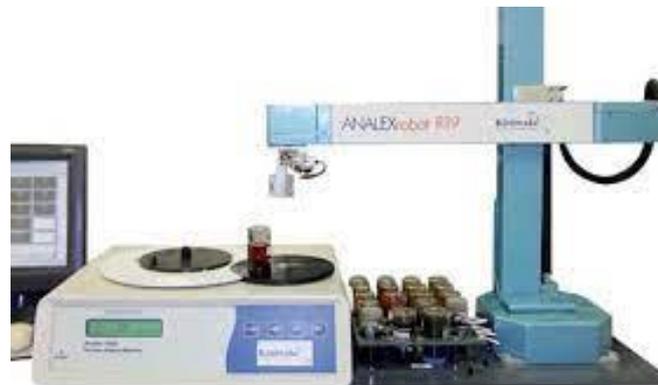


Figura 3.2 - Robô de configuração cilíndrica [10]

Por sua vez, os robôs de configuração esférica (Figura 3.3) possuem 1 movimento linear (extensão do braço) e 2 rotacionais, onde o pivô é montado numa base rotativa que gira em torno de um eixo vertical e de um eixo horizontal. É um tipo de robô capaz de cobrir um largo volume de trabalho a partir de um suporte central e a sua estrutura vertical ocupa menos espaço [8].

No entanto, na direção dos movimentos rotacionais a sua repetibilidade e precisão são menores (semelhante à configuração cilíndrica) e o seu modelo cinemático é complexo. É aplicado, por norma, em fundição, montagem e apoio a máquinas.



Figura 3.3 - Robô de configuração esférica [11]

Os robôs de braço articulado (Figura 3.4) são caracterizados por possuir uma configuração semelhante à de um braço humano, com 3 juntas rotativas. O seu volume de trabalho é comparável à configuração de um braço humano.

Este tipo de robô possui uma coluna vertical que roda sobre a base, uma articulação de ombro no topo dessa mesma coluna e a terceira junta é uma articulação de cotovelo com um pulso no final do antebraço.

Esta configuração é muito popular na indústria uma vez que permite flexibilidade máxima e cobre um volume de trabalho bastante largo relativo ao tamanho do robô. O espaço de chão usado é mínimo e adapta-se com motores elétricos. Apesar disto, o seu modelo cinemático é complexo e a sua estrutura não é muito rígida nos limites extremos de acesso. Requer ainda técnicos especializados. É frequentemente aplicado em soldadura, pintura, montagem e paletização [8].



Figura 3.4 - Robô de braço articulado [12]

A configuração SCARA (*Selective Compliance Automatic Robot Arm*) é um tipo especial de configuração de braço articulado (Figura 3.5). A diferença é o uso de eixos verticais na junta do ombro e do cotovelo para serem compatíveis com a direção horizontal em tarefas de inserção vertical. É extremamente rápido e tem um volume de trabalho principalmente horizontal. A ferramenta no extremo do braço move-se verticalmente para inserção de componentes.

É uma configuração adequada para movimentos de ponto a ponto e para tarefas de montagem com tolerâncias apertadas. Mantém ainda elevada rigidez na direção vertical [8].

Por outro lado, é consideravelmente limitado em alguns movimentos uma vez que é mais especializado em trabalho horizontal. Tem um modelo cinemático complexo e é relativamente caro. É geralmente aplicado em montagem eletrônica e paletização.



Figura 3.5 - Robô de configuração SCARA [13]

3.2. ROBÔS COLABORATIVOS

Ao contrário dos robôs tradicionais, que se movem de forma independente após começarem a operar, os robôs colaborativos, se obstruídos, param devido às suas características de segurança imbuídas.

Isto significa que não requerem uma infraestrutura de proteção extensiva, permitindo ao operador aproximar-se do robô colaborativo quando este está ativo. Isto é conseguido com sensores de proximidade e de pressão.

Os robôs colaborativos dispõem de vários protocolos de segurança, segundo a norma internacional ISO 10218. Entre eles está por exemplo a paragem monitorizada, onde o robô deteta a proximidade do operador e cessa o movimento sem desligar os motores. O protocolo do controlo guiado permite ao operador mover o braço do robô manualmente e guiá-lo entre

as posições. Há ainda a monitorização de velocidade e separação onde o sensor deteta a distância entre o operador e o robô e ajusta a velocidade de acordo com isso. Por último, a limitação de potência e força controlada pode ocorrer quando o operador entra em contacto com o robô e este cessa o trabalho de forma segura [14].

Os benefícios dos robôs colaborativos passam pela sua maior flexibilidade e programação mais simples, quando comparados aos robôs tradicionais (Tabela 3.1). Geralmente constituem também um menor investimento e são mais fáceis de relocar. Requerem ainda menos espaço e são mais seguros de trabalhar conjuntamente com operadores.

As suas limitações principais são a velocidade e capacidade de carga reduzidas. São geralmente aplicados em situações de *pick and place* e montagem, podendo também ser implementados na soldadura.

No que diz respeito à soldadura, a capacidade de carga relativamente reduzida não é um problema uma vez que o equipamento de soldadura que deveria manobrar é leve.

Tipicamente, estes robôs têm um eixo extra no braço para facilitar a manipulação em torno de obstáculos e evitar colisões. O alcance máximo destes robôs é relativamente pequeno devido à sua incapacidade de suportar cargas elevadas.

Tabela 3.1 - Comparação de características entre robôs tradicionais e robôs colaborativos [14]

Caraterística	Robôs <i>tradicionais</i>	Robôs colaborativos
Função	Substituir um operador	Assistir um operador
Interação humana	Comandos e programação atribuindo pontos, movimentos e ações;	Interação inteligente: cessa atividade quando contacto não previsto ocorre
Espaço de trabalho	Espaço de trabalho seguro separado para robô(s) e trabalhador(es); geralmente com grade protetora	Partilham o mesmo espaço de trabalho; sem grade
Reprogramação	Raro	Frequente
Capacidade de carga	Geralmente alta	Reduzida
Capacidade de trabalhar num ambiente dinâmico com possibilidade de entidades em movimento	Não	Sim

3.3. VOLUME DE TRABALHO

A definição mais comum de *workspace*, ou volume de trabalho, considera que este se define pelo conjunto de pontos ao qual o *end-effector*, isto é, o acessório conectado ao pulso do robô que efetivamente interage com objetos, consegue alcançar [15].

Por outras palavras, o volume de trabalho de um robô é o espaço no qual o mecanismo é capaz de realizar o seu trabalho. É o volume total acessível pelo mesmo, considerando a posição extrema do braço em todas as possibilidades máximas alcançadas pelas juntas [16].

Os aspetos mais importantes deste conceito são a sua forma e o seu volume. A forma é importante na definição do ambiente onde o robô irá operar. Por sua vez, o volume é relevante para a determinação do alcance do *end-effector*. Por último, a estrutura do *workspace* é também pertinente para garantir as características cinemáticas do robô em relação às suas interações com o ambiente à sua volta.

A forma do *workspace* varia dependendo da estrutura geométrica do manipulador, seja devido à interferência entre os *links*, isto é, as “barras” do robô ou devido às propriedades dos graus de liberdade. O volume é influenciado pelas dimensões dos *links* do robô e pelas limitações mecânicas das juntas, enquanto a estrutura do *workspace* é definida pela estrutura conjunta do robô e das dimensões dos seus *links*.

A visualização do *workspace* de um robô tem as vantagens de dar uma melhor noção da sua forma e dimensão, permitindo otimizar o mecanismo e as suas interações. No entanto, requer que seja processado um elevado número de pontos para obter uma análise exata. Além disso, há diferentes critérios que devem ser tidos em conta na análise da estrutura do *workspace* [15].

3.4. MODOS DE PROGRAMAÇÃO - ONLINE E OFFLINE

Os robôs industriais de soldadura podem ser programados em modo *online* e *offline*.

No que concerne a programação online, esta pode-se dividir em programação de guia e programação passo-a-passo.

Na programação passo-a-passo, o operador move a tocha de soldadura manualmente através da sequência de movimentos pretendida, que ficam guardados na memória do robô para serem replicados durante a soldadura. Este método é especificamente popular atualmente com robôs colaborativos uma vez que são mais "*user-friendly*", mais leves e compactos e mais seguros de interagir diretamente.

Na programação de guia, o operador consegue manobrar o robô para as posições pretendidas através de um "*teach pendant*", isto é, um *smartPAD* que permite, através de uma interface composta por uma tela e várias teclas e botões, o controlo manual do robô. Mais uma vez, estas posições ficam memorizadas para serem replicadas na soldadura.

A principal desvantagem da programação online é o facto de a fase de programação do robô implicar uma pausa no tempo de produção efetivo do robô.

Além disso, estes métodos de "ensino" e repetição têm flexibilidade limitada, pois o robô não é capaz de se adaptar a vários problemas característicos nos processos de soldadura.

Por exemplo, erros de pré-maquinação ou de fixação da peça não permitem que o robô se adapte assim que der início ao processo de soldadura. Pode ainda acontecer de a peça se

deformar devido à pressão e temperatura inerentes ao processo, algo a que o robô não está preparado para reagir através do uso destes métodos.

Para aplicações mais avançadas de soldadura robotizada é necessário um sistema de controlo automático que consiga adaptar e ajustar os parâmetros de soldadura e o movimento do robô.

A programação *offline* com *software* de simulação permite programar a trajetória da soldadura e a sequência de operações através de um computador, em vez de isto ser feito no próprio robô. Isto traz vantagens tais como o facto de não envolver custos de construção física. No entanto, pode haver fatores internos e/ou externos que não são tidos em conta num ambiente virtual e o desempenho da simulação não coincidir com a realidade [17]. Na tabela seguinte (Tabela 3.2), estão apresentados os nomes das ferramentas de *software* de simulação disponibilizadas por alguns dos principais fabricantes de robôs industriais da atualidade.

Tabela 3.2 - *Software* de programação *offline* de alguns dos fabricantes de robôs industriais de soldadura

Fabricante	Nome do <i>software</i>
ABB	<i>Robotstudio</i>
FANUC	<i>Robotguide</i>
KUKA	<i>KUKA Sim</i>
MOTOMAN	<i>MotoSim</i>

São necessários modelos CAD 3D das peças a soldar, do robô e das fixações da peça. O programa é testado e simulado e só após aprovação é exportado para o controlador do robô através de uma rede de comunicação *Ethernet*.

A investigação atual neste tópico sugere que, usando sensores, seria possível programar por completo a trajetória final apenas com programação *offline*, usando um *software* de programação automática de trajetórias (com os modelos CAD como *input*).

As principais vantagens da programação *offline* são o seu código reutilizável, a sua flexibilidade para alterações e a habilidade de gerar trajetórias complexas, bem como a redução do *downtime* de produção (uma vez que não é necessário imobilizar o robô para o programar diretamente).

Apesar disto, a programação *offline* é normalmente usada para trajetórias complexas em grandes volumes de produção porque o tempo e custo associados à geração do código podem chegar a ser superiores aos da programação *online*. É difícil de justificar economicamente o investimento num pacote de programação *offline*, cujo custo é considerável. Além disso, é preciso ter em conta o tempo de computação necessário para adaptar o *software* a uma dada aplicação específica. Isto é algo que requer conhecimentos específicos e destreza de programação elevada [17].

3.5. SISTEMA DE DETEÇÃO DE JUNTAS, SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA E SENSORES

3.5.1. SISTEMA DE DETEÇÃO DE JUNTAS

O sistema de deteção inicial de junta consiste no equipamento e respetivo controlo que permite ao robô obter um ajuste automático das coordenadas ponto-a-ponto das posições iniciais, intermédias ou finais da execução do cordão de soldadura.

No que toca ao *hardware*, a deteção inicial de junta pode ser realizada de duas formas:

– Através da colocação de sensores de proximidade, sem contacto físico com a peça de base, permitindo ao robô obter a correção à posição inicial da junta;

– A deteção inicial da junta através do contacto elétrico na peça de base, tipicamente utilizando a própria tocha, é uma abordagem onde se notam algumas semelhanças no funcionamento em protótipos de diferentes fabricantes de robôs de soldadura, ao contrário da abordagem anterior;

O detetor de junta através do toque é um sistema que complementa o circuito de comando da fonte de potência e converte a existência de um contacto elétrico entre a tocha e a peça a soldar num sinal digital. Este será tratado pelo robô por *software*. Deve-se considerar que a deteção é realizada antes da definição da trajetória de soldadura, não correndo durante a mesma.

3.5.2. SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA

Um dos problemas comuns da soldadura robotizada é a incapacidade de adaptação ao trabalho em peças de dimensões irregulares e/ou inconsistentes. A adição de sensores seleccionados, montados e configurados adequadamente, permitem, em combinação com o controlo do robô, detetar a junta de soldadura e aproximar o processo robótico à operação realizada por um soldador manual, que ajusta permanentemente a tocha à posição da junta e adapta a velocidade do processo ao enchimento do cordão que observa em tempo real.

Além do ajuste de trajeto e velocidade, um sistema de seguimento automático de junta pode também alterar os parâmetros do processo, como a potência ou velocidade de eléctrodo, dependendo da variação do enchimento necessário à realização de uma junta de soldadura em particular. Se pretender um maior enchimento do cordão, o sistema pode reduzir a velocidade de deslocamento da tocha ou aumentar o depósito de material durante o processo.

Este sistema, por norma, realiza uma primeira passagem de memorização da trajetória e, nas passagens seguintes, repete a trajetória original adicionada de um deslocamento.

Esta abordagem de correção em tempo real do trajeto e/ou dos parâmetros de soldadura através da adição de sensores é tipicamente limitada pelo custo adicional do investimento ou pelas capacidades limitadas de processamento [17].

3.5.3. SENSORES

Atualmente, os robôs de soldadura são predominantemente usados em processos de manufatura automáticos, onde são usados robôs do tipo "ensino" e repetição que requerem tempo considerável para geração de trajetória. Além disso, o "ensino" e a programação devem ser repetidos se as dimensões da peça forem alteradas, pois o robô não é capaz de autonomamente retificar as mesmas durante o processo.

O principal objetivo do uso de sensores na soldadura robotizada é detetar e medir características e parâmetros do processo, tais como a geometria da junta e a geometria e localização do banho de soldadura.

Os sensores podem também ser usados para inspeção de defeitos e avaliação de qualidade da soldadura.

Há sensores capazes de medir o ponto de soldadura (evitando desalinhamento da trajetória) ou de detetar em avanço o ponto de soldadura (encontrando o ponto de início do cordão, reconhecendo cantos e evitando colisões).

Sensores que medem parâmetros geométricos são normalmente usados para permitir ao robô monitorizar o cordão e/ou para permitir que o robô altere a trajetória de acordo com desvios geométricos da trajetória nominal.

A monitorização do cordão permite que a tocha de soldadura siga automaticamente o sulco do cordão e ajuste o manipulador do robô de acordo com isto, para fazer face aos efeitos da variação do cordão causados por transferências de calor desniveladas, distorção térmica, variação da junta, entre outros [17].

3.6. EIXOS EXTERNOS

É comum, em células robotizadas associadas a aplicações de soldadura, o uso de equipamento que, não integrando a estrutura do robô enquanto produto de fabrico em série, é necessário para a soldadura de certas tipologias de peças específicas e é controlado, ou manipulado, pelo mesmo [16].

Um tipo de equipamento que se enquadra neste perfil são os eixos externos (Figura 3.6), isto é, juntas que estão associadas a funções como a movimentação do robô pela sua base, o que permite aumentar o espaço de trabalho da solução conjunta da célula, e a movimentação das peças para facilitar o seu reposicionamento, tornando o trabalho do manipulador mais eficaz.



Figura 3.6 - Eixo externo dedicado à translação de um robô [18]

A designação “externos” não está relacionada com o algoritmo de controlo destes eixos. Estas juntas são servocontroladas pelo robô, mas o seu controlo integra o robô na forma de um grau de liberdade independente dos referentes às juntas do próprio robô.

Ou seja, aos graus de liberdade do robô para posicionamento no espaço é acrescentada uma deslocação que não altera as entradas no modelo cinemático para obtenção da posição e orientação desejada no extremo do braço [16].

Um eixo externo pode ainda ser usado para movimentar outro equipamento de suporte ao trabalho do robô, ou peças, e a sua função pode limitar-se ao reposicionamento, linear ou rotativo, dessas peças (Figura 3.7).

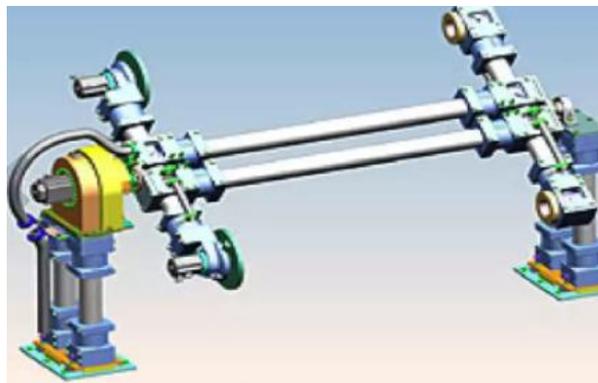


Figura 3.7 - Modelo de posicionador rotativo da KUKA [18]

Os fabricantes de robôs industriais já permitem facilmente a integração de eixos externos no controlador dos robôs e até disponibilizam produtos previamente desenvolvidos para as duas configurações descritas, segundo a forma de células robotizadas.

A colocação de um manipulador sobre um eixo externo (por exemplo de translação) invalida grande parte das suas características dinâmicas, nomeadamente as que se referem ao desempenho dos movimentos, como a precisão e a repetibilidade, no conjunto do sistema montado. Isto acontece porque a base do robô deixa de ser um órgão estático, tornando-se num conjunto de componentes que acrescentam folgas mecânicas, incertezas de fixação, dilatação material, elasticidade, entre outros. O resultado é que os valores de precisão e repetibilidade do conjunto passa a ser o somatório dos correspondentes valores para o manipulador e para o eixo externo [16].

Quando um eixo externo é usado para manipular as peças ou o equipamento de suporte ao trabalho do robô, como é o caso do exemplo do posicionador rotativo da KUKA, a designação mais apropriada para esse mecanismo é a de posicionador.

Dos principais fabricantes de robôs industriais, a ABB e a MOTOMAN aparentam ter a maior gama de posicionadores disponível no mercado como produto de fabrico padronizado. O fabricante KUKA oferece uma gama menos abrangente nas configurações de posicionadores e a FANUC tem maior foco em conjuntos de moto-redutores, ou posicionadores de um eixo, permitindo o seu agrupamento e aplicação específica.

Nas características técnicas destes órgãos encontram-se parâmetros como volume de trabalho, velocidade máxima das juntas, capacidade de carga, precisão e repetibilidade. Ou seja, são caracterizados maioritariamente pelos mesmos atributos que os manipuladores.

3.7. CONCEITOS DE FUNCIONAMENTO DE UM ROBÔ DE SOLDADURA

Através da consulta de um manual da KUKA de um robô fora de serviço presente nas instalações da bysteel, foi possível conhecer alguns detalhes acerca das funcionalidades e parâmetros na consola de um robô de soldadura, neste caso, da KUKA que devem, em grande parte, ser análogos para outras marcas e fornecedores de robôs de soldadura.

3.7.1. SISTEMAS DE COORDENADAS

Começando pelos sistemas de coordenadas, o KUKA tem definidos 5 sistemas de coordenadas distintos no seu controlador (Figura 3.8). O sistema “TOOL” tem a sua origem na

ferramenta de trabalho (que é acoplada ao pulso do braço do robô) e, por natureza, a sua origem é na flange onde a ferramenta é montada. O operador deve, portanto, realizar um “*offset*”, isto é, um desvio para a ferramenta. No entanto, existe também um sistema de coordenadas “FLANGE” com a sua origem na flange do pulso do robô e serve de base para o sistema de coordenadas “TOOL” [19].

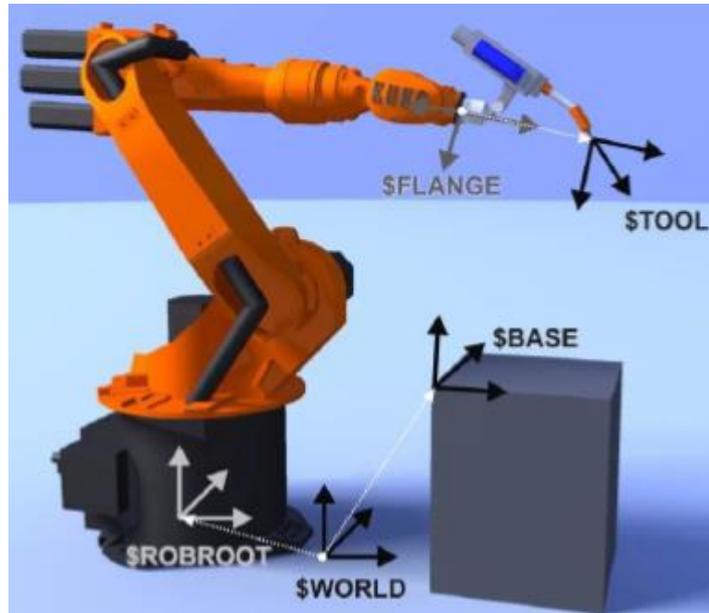


Figura 3.8 - Ilustração das origens dos 5 sistemas de coordenadas de um robô KUKA [20]

O sistema “WORLD” é o sistema universal de coordenadas e é definido livremente, enquanto o sistema “BASE” tem a sua origem na peça a ser soldada (Tabela 3.3). Como esta origem varia de peça para peça ou de série para série, a base deste sistema de coordenadas é o sistema “WORLD”. Assim, o operador deve realizar um “*offset*” desta origem para que corresponda à peça que quer trabalhar. O sistema de coordenadas “ROBROOT” é também um “*offset*” do sistema “WORLD” e a sua origem é o pé do robô [20].

Tabela 3.3 - Diferentes sistemas de coordenadas no controlador de um robô KUKA

Nome	Local	Utilização	Particularidades
WORLD	Livremente definido	Origem para ROBROOT e BASE	Na maioria dos casos situa-se no pé do robô
ROBROOT	Fixo no pé do robô	Origem do robô	Descreve a posição do robô em relação a WORLD
BASE	Livremente definido	Peças, dispositivos	Descreve a posição da base em relação a WORLD
FLANGE	Fixo na flange do robô	Origem para TOOL	A origem é o ponto médio da flange do robô
TOOL	Livremente definido	Ferramentas	A origem do sistema de coordenadas TOOL é designada como "TCP", isto é, "Tool Center Point"

Num sistema de coordenadas, o robô pode mover-se de dois modos distintos. Através de translação linear ao longo das direções de orientação do sistema de coordenadas X, Y, Z e através de rotação em torno das direções de orientação do sistema de coordenadas: ângulos A, B e C (Figura 3.9).

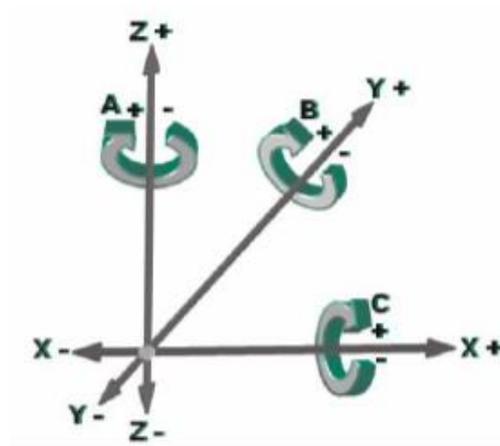


Figura 3.9 - Ilustração dos modos de movimento dos braços de um robô KUKA [20]

3.7.2. TIPOS DE MOVIMENTO DO ROBÔ

Para a programação de comandos de movimento estão à disposição diversos tipos de movimento. Conforme o requisito para o processo de trabalho do robô, os movimentos podem ser programados.

No movimento PTP (ponto a ponto) a ferramenta move-se para o ponto de destino seguindo o trajeto mais rápido (Figura 3.10), ou seja, o robô guia o TCP (ponto médio da ferramenta) segundo a trajetória mais rápida para o ponto de destino. Esta nem sempre é a trajetória mais curta e por isso não é uma linha reta. Uma vez que os movimentos das juntas do robô são rotacionais, trajetórias curvas conseguem ser executadas mais rapidamente que retas. Com paragem exata o robô move-se para o ponto de destino com posicionamento exato. Com posicionamento aproximado: o operador possibilita um ambiente de aproximação à volta do ponto de destino. Quando o ponto de referência é atingido, ele passa para o ponto de destino da próxima instrução [19].

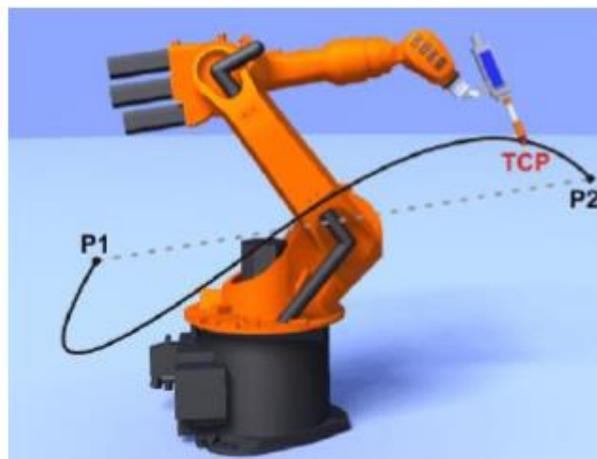


Figura 3.10 - Exemplo de movimento ponto a ponto [20]

O movimento PTP é geralmente usado em casos de transporte e para soldar pontos.

No movimento linear (Figura 3.11), o robô guia o TCP a uma velocidade definida constante e a orientação definida desde o início em linha reta até ao ponto de destino. É normalmente usado para manobrar peças.

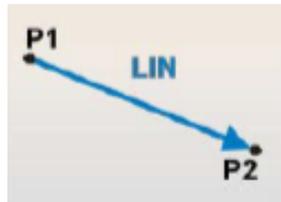


Figura 3.11 - Exemplo de movimento linear [19]

No movimento circular (Figura 3.12), o robô guia o TCP a uma velocidade definida segundo trajetória circular até ao ponto de destino. A trajetória circular é definida por um ponto de início, um ponto auxiliar e um ponto de destino. Mais uma vez, o TCP é conduzido a uma velocidade constante e orientação definida desde o início até ao ponto de destino. Usualmente aplicado em círculos, raios e curvaturas.

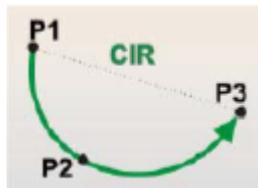


Figura 3.12 - Exemplo de movimento circular [19]

3.7.3. MODOS DE OPERAÇÃO

Um robô KUKA tem três modos de operação. O modo T1 (manual velocidade reduzida) é usado para modo de teste, programação e aprendizagem (quando o operador guia o braço do robô usando a consola) e a velocidade máxima na operação do programa e na operação manual é 250 mm/s.

O modo T2 (manual velocidade alta) é também usado para modo de teste, mas a velocidade na operação do programa corresponde à velocidade programada.

Por fim, o modo AUT EXT (automático externo) é usado em robôs industriais com unidade de comando superior (PLC) e a velocidade na operação do programa corresponde à velocidade programada [20].

3.7.4. CALIBRAÇÃO

Somente se um robô industrial estiver calibrado de modo correto e completo, é que pode ser utilizado de forma otimizada. Apenas com a calibração dos eixos é que ele consegue cumprir a plena exatidão de pontos e trajetórias, ou seja, pode ser movido com movimentos programados.

Um robô deve ser calibrado nos seguintes cenários:

- Na colocação em funcionamento;
- Após medidas de manutenção em componentes que façam parte dos elos;
- Se os elos do robô forem movidos sem unidade de comando por meio de esforço;
- Após a troca de um redutor;
- Após a colisão contra o encosto final com velocidade superior a 250 mm/s;
- Após uma colisão brusca contra objetos externos ao robô;

Durante a calibração de ferramenta, o utilizador atribui um sistema de coordenadas cartesianas à ferramenta montada na flange. Esse sistema de coordenadas tem origem num ponto definido pelo utilizador, o TCP (*Tool Center Point*). A informação guardada durante este processo é a origem do sistema de coordenadas da ferramenta relativa ao sistema de coordenadas da flange.

Este processo implica dois passos: determinar a origem do sistema de coordenadas TOOL e determinar a orientação do mesmo. Para determinar a origem, está disponível o método dos 4 pontos XYZ e o método de referência XYZ.

No método dos 4 pontos XYZ, o TCP da ferramenta a ser calibrada é movido para um ponto de referência segundo 4 direções diferentes. O ponto pode ser selecionado livremente. O controlador do robô calcula o TCP a partir das diferentes posições da flange. Por outro lado, no método de referência XYZ, uma ferramenta nova é calibrada usando uma ferramenta que já tenha sido calibrada. O controlador do robô compara as posições da flange e calcula o TCP da nova ferramenta.

Para determinar a orientação do sistema de coordenadas TOOL estão disponíveis os métodos de 2 pontos ABC e WORLD ABC. No método de 2 pontos, os eixos do sistema de coordenadas "TOOL" são comunicados ao controlador do robô através da movimentação para um ponto no eixo X e um ponto no plano XY. Este método é usado se for necessário definir as direções do eixo com precisão. No método WORLD ABC, os eixos do sistema de coordenadas

"TOOL" são alinhados paralelamente aos eixos do sistema de coordenadas "WORLD". Isto comunica a orientação do sistema de coordenadas "TOOL" ao controlador do robô [19].

3.8. CONCLUSÕES

Num capítulo posterior, serão revistas algumas propostas de células robóticas recebidas pela empresa, onde as ofertas incluirão (ou não) algumas das tecnologias “acessórias” discutidas neste capítulo.

No que diz respeito aos robôs colaborativos, estes são mais “customizáveis” do que os robôs tradicionais, pois são idealizados para funcionar com considerável interação humana. São, no entanto, menos robustos e, portanto, não adequados a todos os trabalhos. Uma opção a considerar será a adoção de um robô colaborativo e um robô tradicional de forma a colmatar as deficiências um do outro e permitir uma maior versatilidade no trabalho que a empresa consegue desempenhar.

Por norma, os robôs são aplicados como elementos constituintes de uma linha de produção ou como uma unidade própria que faz parte do processo de produção, ou seja, não é comum uma empresa passar de 100% soldadura manual para 100% soldadura robotizada.

Alguns fatores que distinguem soldadura robotizada de soldadura manual são:

- Soldadura de arco automatizada envolve longos ciclos de trabalho. Logo o equipamento de soldadura deve ser capaz de operar segundo essas condições;
- Os componentes devem ter as características e controlos para servir de interface com o sistema de controlo;
- As peças geralmente precisam de ajustamento para encaixar ou se as juntas a ser soldadas forem demasiado largas ou de posição variável de peça para peça, automatizar o processo será difícil ou impossível;

A adoção de robôs industriais torna-se também cada vez mais uma necessidade do mercado envolvente, uma vez que as empresas se sentem progressivamente forçadas a reduzir custos e elevar a sua produtividade e qualidade para assegurar a competitividade frente aos concorrentes.

4. SELEÇÃO DA CÉLULA DE SOLDADURA

A soldadura por arco elétrico, quando realizada de forma manual, requer o trabalho de um técnico especializado – soldador – assistido por um outro operador – o preparador – que prepara a peça a soldar. Este é um trabalho cujo ambiente se caracteriza por temperaturas elevadas, faíscas, fumos e emissão de raios ultravioleta, sendo que este último requer a utilização de uma viseira protetora. Como tal, é um processo comum ao considerar a implementação da automação por sistemas dedicados ou sistemas robotizados.

Com a implementação e uso de robôs, surgem problemas técnicos e económicos. Do lado técnico, pode resultar na ocorrência de variações dimensionais e geométricas nos componentes a soldar. Na vertente económica, geralmente a soldadura por arco é usada no fabrico de baixas quantidades de produtos constituídos por vários componentes [21].

A solução mais relevante do lado técnico é garantir que o robô consiga corrigir e compensar erros dimensionais, geométricos e de preparação de juntas de soldadura durante o processo. Esta solução passa pela utilização de tecnologia como sensores, sistema de deteção inicial de junta e um sistema de seguimento de junta. Isto permite ao robô maior autonomia, uma vez que lhe confere a capacidade de corrigir parâmetros de soldadura em tempo real e de detetar a junta de soldadura dependendo da forma como a peça foi fixa [21].

Em 2016, 25% dos robôs industriais usados em todos os processos no mundo foram usados em processos de soldadura. A aplicação de robôs industriais em processos de produção no mundo aumentou de cerca de 60 mil em 2009 para 260 mil em 2016 e, entre esse período, a soldadura por ponto teve maior presença na aplicação de robôs comparado à soldadura por arco. Nos últimos três anos desse período, estima-se que a aplicação de robôs em soldadura por ponto tenha sido muito superior à da sua contraparte. Uma das razões para esta diferença pode o facto de a produção de veículos à escala global aumentar anualmente, onde o processo de soldadura por ponto é bastante usado [22].

Estima-se ainda que, em 2016, das cerca de 65 mil unidades de robôs industriais usados em soldadura no mundo, cerca de 52% seriam de soldadura por ponto, 39% de soldadura por arco e cerca de 1% de soldadura a laser [22].

Conclui-se que a vasta maioria dos robôs aplicados na soldadura são usados para soldadura por ponto, nomeadamente na indústria automóvel) e soldadura por arco.

4.1. EXEMPLOS DE CÉLULAS DE SOLDADURA ROBOTIZADAS

O KUKA KR 16-2 (Figura 4.1), tem uma capacidade de carga de 160 N e uma elevada precisão de soldadura. Além disso, a sua estrutura vertical é ideal para poupar espaço e é frequente na indústria de componentes automóveis [23]. Tem uma boa acessibilidade, mesmo em espaços confinados.

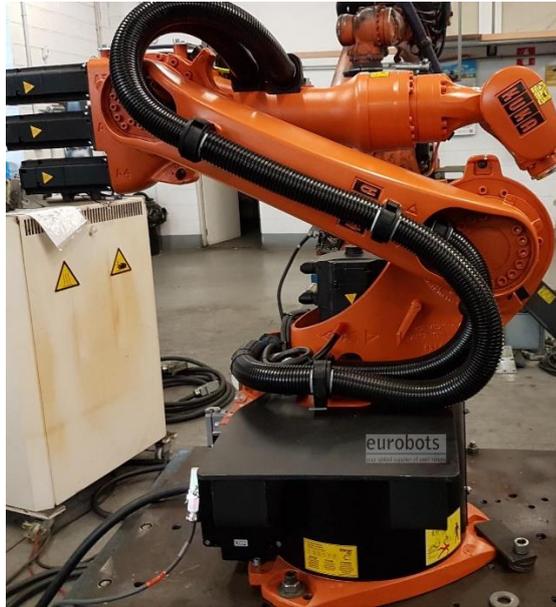


Figura 4.1 - KUKA KR 16-2 [23]

Da FANUC, considere-se o F-200iB (Figura 4.2) que possui 6 graus de liberdade e, particularmente, usa membros paralelos. É principalmente aplicado na manufatura e em montagem na indústria automóvel [24]. É propício a aplicações que exigem rigidez e repetibilidade e a sua estrutura é bastante compacta.



Figura 4.2 - FANUC F-200iB [24]

O ABB FlexArc L-300 (Figura 4.3) possui dois posicionadores rotativos de cada lado do robô além de uma guia linear de translação. Isto torna o trabalho do robô muito mais flexível uma vez que pode trabalhar alternadamente na peça fixa em cada um dos posicionadores enquanto a outra está a ser fixa por um operador, além de uma guia que lhe confere melhor acessibilidade a certos ângulos e peças (Figura 4.4) [25].

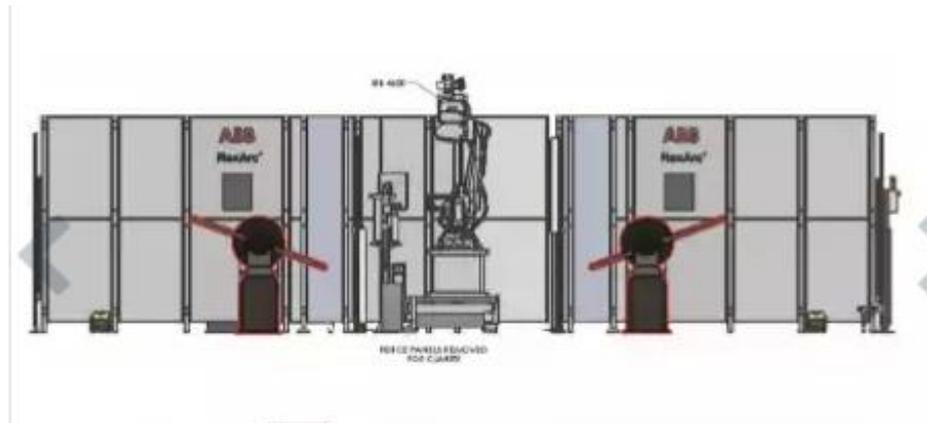


Figura 4.3 - A célula ABB e os dois posicionadores, um de cada lado da mesma [25]

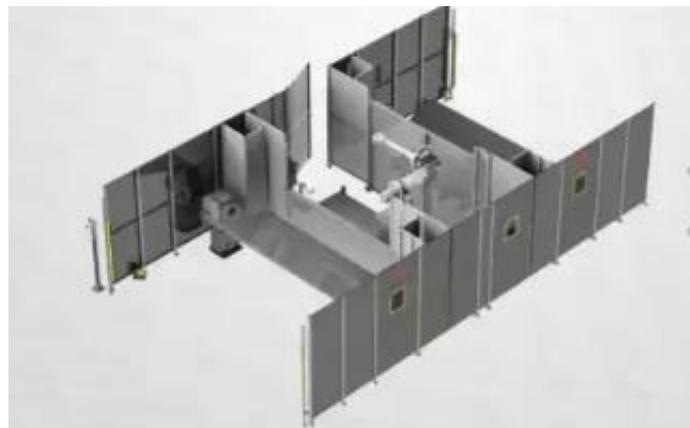


Figura 4.4 - Célula ABB FlexArc L-300 com dois posicionadores rotativos e uma guia linear de translação [25]

Como exemplo de um robô colaborativo (Figura 4.5) e um dos mais populares no mercado é o UR10 da Universal Robots. Com 6 juntas de rotação e uma capacidade de carga de 100 N, pode ser aplicado a tarefas mais pesadas que a maioria dos colaborativos. Conta com um alcance de 1300 mm e elevada precisão, sendo relativamente fácil e intuitivo de programar a soldadura. Os principais apelos passam também por permitir trabalho cooperativo com operadores e definir movimentos de forma manual [26].



Figura 4.5- Robô colaborativo UR10 [27]

4.2. DOCUMENTAÇÃO DAS VISITAS ÀS EMPRESAS MOTOFIL, ROQ E UTEC

Durante este projeto, a bysteel foi convidada a assistir a algumas demonstrações de células robotizadas de soldadura que serão descritas neste capítulo. Foi possível colmatar o conhecimento prévio acerca deste tema com uma perspetiva mais prática e tecer algumas conclusões acerca do assunto. Um aspeto que, infelizmente, não foi possível avaliar foram os tempos de soldadura, de forma a comparar com os tempos da soldadura manual e os tempos previstos. Sendo o foco das demonstrações ver o funcionamento e a programação (neste caso *online*) do robô, a qualidade e rigor da soldadura em si foi posta em segundo plano. Ainda assim, foram visitas que acrescentaram valor ao estudo em questão oferecendo um novo ponto de vista.

4.2.1. VISITA À ROQ

No dia 3 de março de 2022, a empresa decidiu fazer uma visita ao complexo industrial da ROQ, uma empresa que desenvolve a sua atividade desde a conceção, fabrico e comercialização de máquinas para estampa têxtil, impressão digital, secagem, dobragem e embalagem. A ROQ conta com instalações em Portugal, no Brasil e nos Estados Unidos. O que motivou esta visita foi o facto de o complexo da ROQ em Famalicão ter à sua disposição três robôs colaborativos UR10 a realizar soldadura TIG e MIG.

É relevante constatar que os operadores trabalhavam sem quaisquer equipamentos protetivos ao lado do robô, enquanto efetuavam a programação do mesmo. O operador era capaz de premir um botão diretamente na superfície do robô que o “desbloqueava”

permitindo que o operador o manobrasse livremente até à posição desejada de forma manual.

A empresa possuía também uma mesa de fixação com pinos que permitia facilmente fixar peças de geometrias e dimensões variáveis. Foi feita a soldadura de um provete (preparado pela bysteel) e realizados vários cordões.

Os cordões acabaram por ser relativamente pobres em qualidade, o que se pode atribuir a vários fatores:

- Falta de familiaridade do operador com o provete em questão (este foi providenciado pela bysteel no momento);

- Má definição dos parâmetros de soldadura, tais como a intensidade de corrente, novamente associado ao fator anterior;

- O operador procurava explicar o processo de programação do robô para cada tarefa individual ao mesmo tempo que realizava a mesma;

Apesar disto, foi possível observar o potencial da célula robotizada e tirar algumas conclusões acerca da mesma. O UR10 é compacto, leve e perfeitamente apto a trabalhar ao lado do operador, sem as redes protetoras que caracterizam os robôs convencionais de soldadura. A sua programação *online* é simples e intuitiva, tornando-a bastante *user-friendly*. Isto significa que não requer um operador com qualquer tipo de formação em programação tradicional. O tempo de programação é compactado em grande parte pelo facto de o robô permitir que o operador o manobre manualmente. Isto pode comprometer a precisão da operação, mas, se for necessário maior rigor, é possível ajustar as coordenadas das posições através do *smartPAD*. É também possível “bloquear” certos eixos para garantir que o manipulador só se move num determinado plano.

4.2.2. DEMONSTRAÇÃO NO CHÃO DE FÁBRICA PELA UTEC

No dia 29 de março de 2022, foi realizada uma demonstração de um robô colaborativo UR10 no chão de fábrica da bysteel por parte da UTEC – União de Técnicas de Soldadura, uma fornecedora de equipamentos de soldadura e fixação e sistemas de proteção para soldadura.

O programa usado era ainda mais simples e intuitivo que o visto na visita à ROQ. O programa necessitava apenas do ponto de início e de fim de soldadura, bem como os parâmetros da mesma. O robô, além de possuir o botão que permite ao operador movê-lo livremente, possuía ainda outro botão que automaticamente marcava a posição no espaço

em que se encontrava e o guardava na consola, para uso posterior. No que toca à programação *online*, a diferença de programa entre a ROQ e a UTEC deve-se ao facto de existirem diferentes programas possíveis que se podem adaptar à consola (*smartPAD*) associada ao robô, sendo que o programa da UTEC foi desenvolvido pelos próprios.

Foi novamente realizada a soldadura de um provete, mas a precisão e má definição de parâmetros foram novamente as principais críticas a apontar. É, no entanto, importante considerar que estas falhas não foram necessariamente resultado de má execução por parte do robô. Penso que é seguro concluir que, num ambiente de produção em massa com maior rigor (ao contrário da soldadura de provetes quase improvisados), seria importante o ajuste mais preciso dos pontos que definem a trajetória do robô através de outras funcionalidades da consola.

Algo bastante positivo a tirar desta demonstração foi a soldadura multipasse. Com uso das funções “*offset*” e “*loop*”, é possível definir um programa com dois pontos e os parâmetros da soldadura e fazê-lo realizar várias iterações através da função “*loop*”. Isto resulta em vários cordões de soldadura sem ser necessário fazer vários programas e definir vários pontos. Com a função “*offset*” é possível definir desvios nos diferentes eixos que serão aplicados ao ponto inicial dos passes seguintes.

Nesta demonstração, foi possível criar um único programa com apenas dois pontos e parâmetros de soldadura respetivos com duas iterações (função “*loop*”) e com dois desvios distintos (função “*offset*”) em dois eixos diferentes.

Estas funções permitem poupar imenso tempo de programação na soldadura de cordões multipasse.

4.2.3. VISITA À MOTOFIL

No dia 31 de março de 2022, na visita à Motofil S.A., foi apresentado um robô convencional FANUC, do modelo ARC Mate 100iC (Figura 4.6). É um robô de maior porte que os colaborativos e com uma grade de proteção à volta.



Figura 4.6 - Célula de soldadura do robô FANUC da Motofil

Além disso, pode-se constatar a existência de um eixo externo que é capaz de ajustar o ângulo e a posição da peça a ser soldada para mais versatilidade do processo de soldadura.

Uma diferença que se notou rapidamente quando comparado com os UR10 vistos antes foi o facto de todos os cabos relativos à tocha de soldadura se encontrarem dentro do braço do robô (Figura 4.7). Isto melhora o fator de segurança e reduz o tempo de preparação do robô, p que previne interferência dos cabos no trabalho e garantindo integridade dos mesmos. Outra diferença relevante é a velocidade de movimento do manipulador entre pontos, que é bastante elevada neste modelo FANUC.



Figura 4.7 - Robô FANUC ARC Mate 100iC apresentado na visita à Motofil

A criação de programas é relativamente simples, apesar de não tão intuitiva como a dos colaborativos referidos.

No entanto, uma função nova que este robô apresentou foi a de “busca”. É um sistema de detecção inicial de junta de soldadura. Nesta função, o robô toca em quaisquer dois pontos em duas chapas e é capaz de calcular a localização da junta entre essas duas chapas. Esta função permite realizar uma soldadura de elevada precisão reduzindo erros humanos.

Mais uma vez, foi utilizado um provete (Figura 4.8) para entender o funcionamento da programação e a qualidade da soldadura do robô.

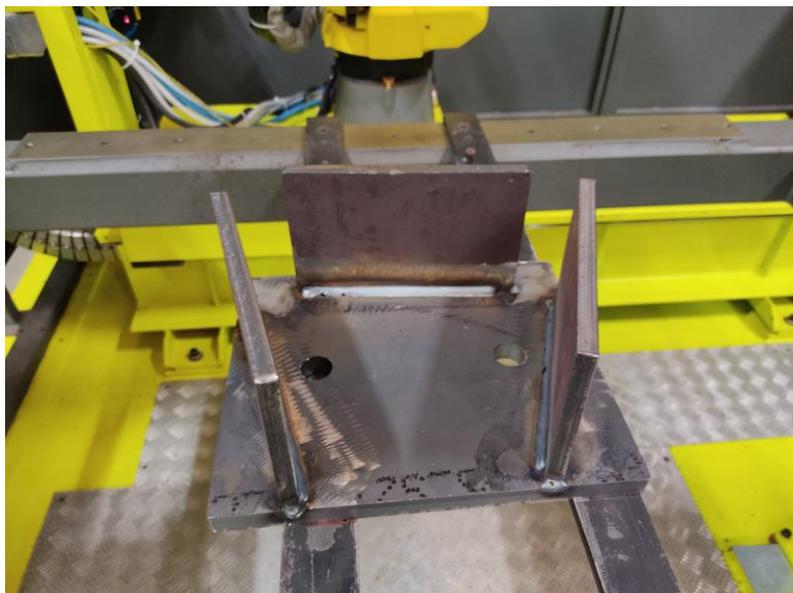


Figura 4.8 - Provette de soldadura usado na visita à Motofil

Os parâmetros de soldadura foram melhor definidos e os cordões realizados (Figura 4.9) foram de qualidade superior aos vistos nos colaborativos.



Figura 4.9 - Cordões de soldadura realizados pelo robô FANUC na Motofil

O robô permite também a geração de programas *offline*, não só porque isto não compromete a integridade dos cabos dado que estes estão salvaguardados dentro do braço do robô, mas também porque o robô está equipado com um par de *software* e sensores para possibilitar a adaptação da trajetória a meio da soldadura.

4.3. PROCESSO MIG/MAG COM CÉLULA ROBOTIZADA

O processo de soldadura a implementar no robô seria o MIG/MAG, mais nomeadamente o processo MAG. O processo MIG utiliza como gás de proteção um gás inerte, isto é, este não reage com o material do cordão de soldadura, sendo por isso recomendado para trabalhos com alumínio, cobre, magnésio ou titânio, enquanto o MAG utiliza um gás ativo (como o CO₂) como gás de proteção, mais propício para soldar aço carbono ou aço inoxidável [28], [29].

O uso de um gás ativo protege totalmente a área de soldadura, o que previne a oxidação de metais. Isto resulta em cordões de soldadura mais duráveis e de maior qualidade. Além disso, é um dos processos de soldadura robotizada mais limpo, uma vez que os robôs de seis eixos conseguem soldar cordões sem quaisquer respingos, o que previne passos extra no processo no que toca a limpar a peça final, mantendo os ciclos de trabalho curtos [30].

Além disso, os gases de proteção usados em MAG são geralmente mais baratos que os usados noutros processos de soldadura.

O eletrodo é substituído por uma bobina de arame que é alimentada continuamente através da tocha. A soldadura pode processar-se de forma contínua durante vários minutos, sendo normalmente limitada pelo tamanho da peça a soldar ou pela necessidade de o soldador mudar de posição.

Além disso, a corrente de soldadura pode ser pulsada a 10-150 Hz entre um baixo nível de intensidade de corrente (50A) e um valor elevado de pico (normalmente 400 a 600A).

A implementação da célula robótica permite obter maiores velocidades de trabalho e maior produtividade. A repetibilidade de cordão para cordão é bastante precisa, levando a uma diminuição de defeitos e peças que têm de ser corrigidas.

A capacidade de trabalho será também naturalmente superior, dado que um operador está limitado por fatores humanos como o cansaço, enquanto o robô consegue manter um rendimento e ritmo de trabalho constantes.

Um fator a ter em atenção é a fixação das peças a soldar. Estas não só devem ser fixas corretamente para evitar acidentes durante o processo de soldadura, mas a fixação de peça para peça deve ter o menor desvio possível, uma vez que o robô não é capaz de se adaptar e compensar, pelo menos não em programação *online*.

Deve-se ainda considerar que os pingos de soldadura de fixação das peças devem ser compactos e realizados com cuidado de modo a não ter dimensões excessivas, pois isto pode resultar num cordão de soldadura irregular. Isto relaciona-se ainda com a limpeza da peça, que deve ser realizada, idealmente, pouco antes da colocação da peça na mesa de trabalho do robô, para evitar impurezas e irregularidades que possam comprometer a qualidade do cordão.

Para realizar a colocação e remoção das peças da mesa da célula robotizada seria necessário um operador que poderá, após garantir a correta fixação da peça iniciar a programação da trajetória de soldadura (programação *online*) ou selecionar o programa específico para a peça (programação *offline*). Em seguida, inicia-se o processo de soldadura. No fim, as peças devem ser removidas para realizar quaisquer acabamentos necessários. Estas operações terão de ser realizadas por um operador dado que o robô não tem capacidade para desempenhar estas funções.

Terminados os acabamentos, as peças deverão ser inspecionadas de forma a verificar a sua qualidade e, na ausência de defeitos, estão prontas a ser expedidas ou acopladas a outros componentes, no caso de subconjuntos.

4.4. SOLUÇÕES E PROPOSTAS

A forma de implementação de um robô industrial depende invariavelmente da função que este irá desempenhar bem como do contexto fabril onde será inserido.

De forma geral, os robôs de soldadura são implementados segundo formato de célula. Nestas células estão contidos os componentes necessários para que o robô, ou múltiplos robôs, desempenhe as suas tarefas. Estes componentes incluem, por exemplo, sensores, *end effector*, ferramentas, barreiras de segurança, controlador do robô, atuadores, fonte de alimentação.

Para tarefas que exigem destreza e precisão, como é o caso da soldadura, os robôs habitualmente empregues são os articulados de seis eixos. Graças a estas qualidades, estes robôs são capazes de soldar peças de várias geometrias, bastando apenas alterar a sua programação.

Numa fase primária, o propósito da empresa com a implementação de uma célula robotizada seria a soldadura de acessórios, isto é, peças de geometria variável que a empresa produz com cada vez mais volume e representação.

Assim, foi idealizado e criado um modelo 3D da célula de soldadura (Figura 4.10), como se pode observar na figura seguinte.

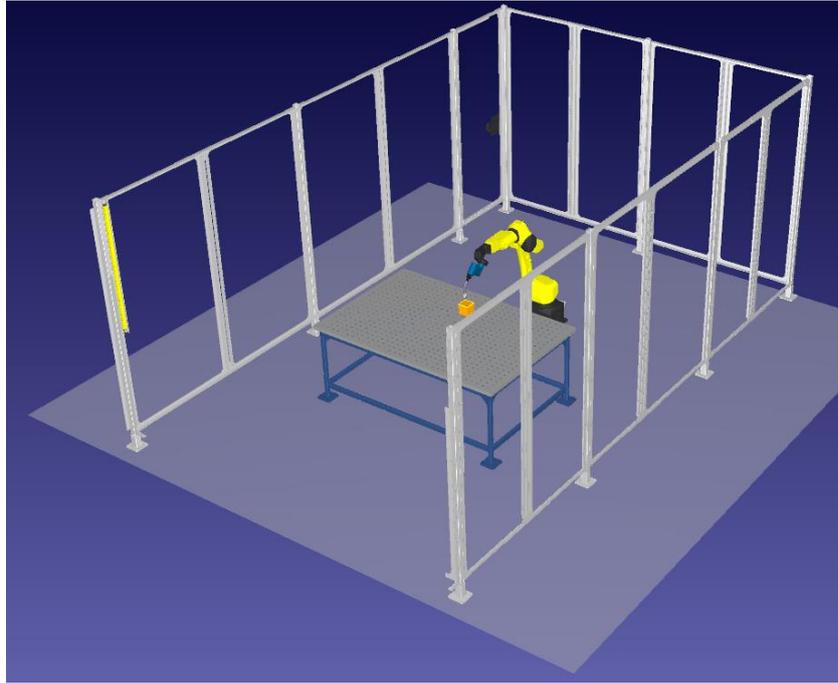


Figura 4.10 - Célula de soldadura inicialmente idealizada

Foi incluída uma grade de proteção que, como mencionado anteriormente, é de implementação obrigatória em células de robôs industriais e limita a mesma. Eventualmente, concluiu-se que uma célula deste tipo seria ineficiente e limitada no tipo de peças que é capaz de trabalhar em termos de comprimentos e geometrias.

Além do robô convencional, foi ainda considerada a vertente de uma célula com robô colaborativo.

A célula do robô colaborativo (Figura 4.11) não tem necessidade de uma grade protetora dado que o propósito destes robôs é o de permitir o trabalho cooperativo entre robô e operador. Foi, portanto, idealizado e criado um modelo 3D do robô colaborativo e da sua célula. No caso do robô colaborativo, este não é normalmente empregue na soldadura de peças com maiores dimensões devido ao seu menor alcance (comparado a um robô industrial convencional) e à sua pouca robustez.

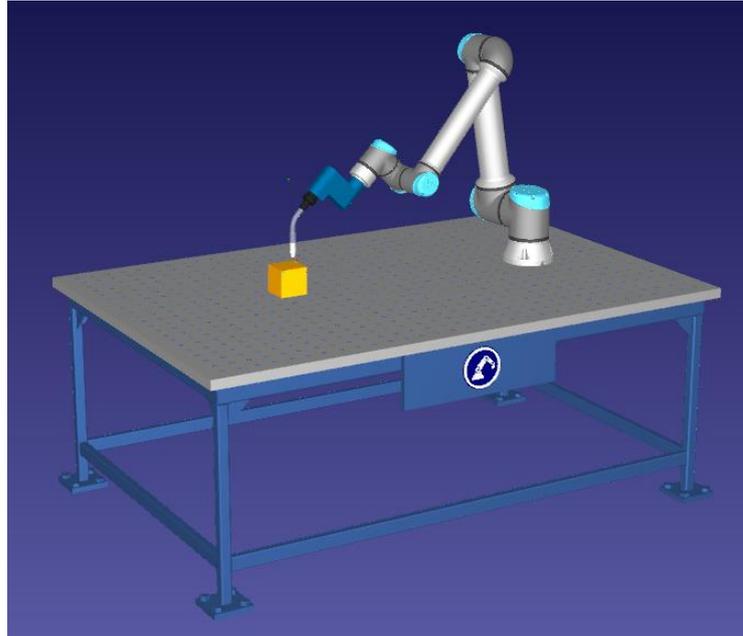


Figura 4.11 - Idealização de uma célula de soldadura de um robô colaborativo

No que concerne a célula de robô convencional, numa fase posterior, esta foi adaptada a uma produção praticamente contínua e à soldadura de peças de maior comprimento. Para esse efeito, foi introduzida uma guia longitudinal de 5 metros que suportaria o robô e, como abordado num capítulo anterior, permite a translação do robô mantendo a precisão da posição linear através do seu motor servo-controlado. A guia é integrada na consola do robô como um eixo adicional do próprio. Este mecanismo permite aumentar a área de trabalho efetiva do robô. Foi ainda introduzido um posicionador rotativo que permite reposicionar e manipular as peças a soldar para um trabalho mais eficiente do robô e maior flexibilidade na tipologia de peças que é capaz de soldar (Figura 4.12).

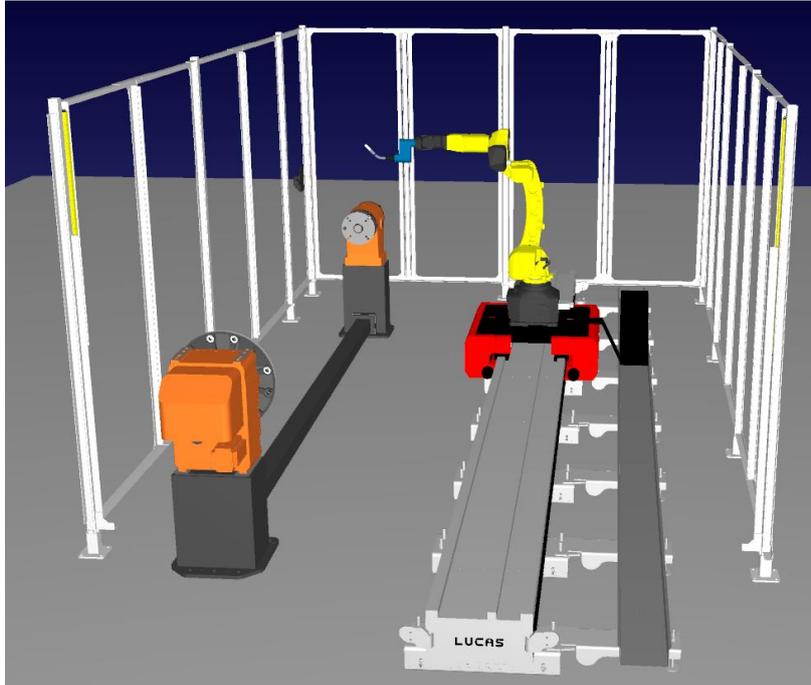


Figura 4.12 - Idealização de uma célula de soldadura de um robô convencional com uma guia de translação e um posicionador rotativo

Nos anexos B e C está contida uma proposta da empresa Motofil S.A. para uma célula robotizada do tipo monobloco onde o robô tem um curso útil de 3 metros numa direção fixa.

A proposta seria constituída por um robô antropomórfico 100 iD/10L articulado de 6 eixos com um alcance sem tocha de 1636 mm e uma capacidade de carga no pulso de 100 N (Figura 4.13). Esta proposta incluía ainda um controlador FANUC R-30iB e dois eixos externos sob a forma de dois posicionadores rotativos servo-controlados, sendo que cada um tem uma capacidade de carga de 10000 N e representa um único eixo externo independente. O robô, os eixos externos e a própria guia de translação do robô eram suportadas e contidas num sistema monobloco.

Está também contemplado na proposta um sistema de seguimento de junta TAST que permite a correção da trajetória via parâmetros de soldadura e, conseqüentemente, soldas de alta qualidade. É um sistema de soldadura multipassada, programada através da consola. Na primeira passagem é apenas feita uma memorização da trajetória e, nas passagens seguintes, é efetuada uma repetição da trajetória original adicionada de um deslocamento. Por último, foi incluído na proposta um sistema de localização de peça "Touch Sensing" que consiste num sensor de toque por contacto elétrico para deteção de posição de peça. Este sistema já foi abordado e presenciado na visita à Motofil S.A. feita anteriormente e permite procurar uma peça em 1, 2 ou 3 dimensões com ou sem rotação.



Figura 4.13 - Célula de soldadura robotizada FANUC incluída na proposta da Motofil S.A. [31]

Foi também feito um orçamento para uma célula robotizada do tipo monobloco com as mesmas características e componentes em que o curso útil do robô seria de 5 metros ao invés de 3 metros, o que permitiria soldar peças de maiores dimensões relativamente à opção anterior, semelhante à da idealização feita anteriormente.

A principal distinção entre o sistema monobloco e o sistema idealizado anteriormente é que uma vez que todos os componentes integram uma única estrutura, compacta e de grande estabilidade, este tipo de célula em sistema monobloco apresenta grande flexibilidade e rentabilidade. O facto de integrar uma única estrutura significa que a sua possível relocação seria relativamente fácil, na instância de uma mudança de *layout* do chão de fábrica, enquanto na solução idealizada, todos os componentes são fixos independentemente. Além disso, as propostas recebidas pela empresa incluíam dois posicionadores rotativos, o que permitiria ao robô, após efetuar a soldadura da peça numa das mesas, rodar e realizar a soldadura da peça na segunda mesa rotativa, podendo as peças ser distintas ou não. Bastaria apenas a correta programação do robô de antemão. Isto aumenta a eficiência do trabalho do robô consideravelmente.

A empresa recebeu ainda duas propostas de fornecedores distintos de robôs colaborativos (Figura 4.14). Ambas são referentes a um robô UR10e, de 6 eixos controlados com um alcance de 1300 mm.



Figura 4.14 - Robô colaborativo UR10 da Universal Robots [27]

A primeira proposta incluía uma base fixa de 28 mm e uma base magnética de 2 pontos, enquanto a segunda incluía um tampo de trabalho com furos, portanto, ambas as propostas iam de encontro ao idealizado anteriormente.

4.5. MANUTENÇÃO

A manutenção de equipamentos industriais tem como objetivo permite reduzir a degradação e conseqüente perda de valor do equipamento ao longo do tempo, resultando na maximização do proveito que se pode tirar do mesmo ao longo do seu período de vida útil.

A manutenção a nível industrial pode ser dividida em preventiva, sistemática ou condicionada, e curativa.

Como o nome indica, a manutenção preventiva sistemática é realizada em intervalos fixos de tempo e são programadas em antecipação. As vantagens deste método são a predeterminação dos custos de operação de manutenção, simplificando a gestão financeira. As operações e paragens são programadas segundo a produção.

No entanto, o custo total acaba por ser elevado, devido à periodicidade.

A manutenção preventiva condicionada, por sua vez, realiza-se em função do estado dos componentes do equipamento. É uma manutenção subordinada a um tipo de acontecimento predeterminado (autodiagnóstico), a informação de um sensor, a uma medida de desgaste ou outro indicador que possa revelar o estado de degradação do equipamento.

Este tipo de manutenção não é tão caro como a sistemática e consegue melhorar a produtividade e a longevidade dos equipamentos.

A manutenção curativa é geralmente aplicada em equipamentos cuja indisponibilidade não afete de grande modo a produção e cujos custos anuais de reparação e avarias sejam aceitáveis.

Não é uma solução ideal, é implementada como recurso e visa reduzir custos e garantir que a produção esteja o menos tempo possível parada uma vez que esta apenas é interrompida se a máquina falhar.

No caso da célula robótica a implementar, seria mais adequado implementar uma manutenção preventiva sistemática que seria realizada por um técnico com formação coerente e pelo próprio operador da máquina. Além disso, seria importante o operador do equipamento limpar de soldadura e a área de trabalho do robô com regularidade.

É importante adotar este tipo de manutenção mais extremo pois trata-se de um investimento inicial bastante elevado, logo pretende-se maximizar o período de vida útil do equipamento e retardar o máximo possível a sua perda de valor e degradação.

No caso da deteção de uma anomalia, o operador deve parar o funcionamento do equipamento e reportar o mesmo ao responsável do centro de manutenção de forma que se tomem as medidas necessárias para resolver a avaria.

Hipoteticamente, é possível vender este tipo de equipamento após vários anos de uso, logo seria importante que este retivesse o máximo de valor possível [32].

4.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi realizada uma descrição do processo de soldadura efetuado pela célula de soldadura robotizada e foram idealizadas algumas soluções e, posteriormente, comparadas com as existentes no mercado para o tipo de equipamento em questão.

As ofertas caracterizadas também durante este capítulo vão de encontro ao que é a aplicação moderna de uma célula robotizada no processo de soldadura MIG/MAG e estão equipadas com a tecnologia acessória adequada ao trabalho para o qual o equipamento será utilizado. A solução ideal seria, portanto, uma célula robotizada com um robô articulado de 6 eixos.

No caso de um robô convencional, a célula deveria conter também uma guia longitudinal, no caso de ser incumbida da soldadura de peças com maior comprimento e de um (ou dois) posicionador(es) rotativo(s). No caso de se justificar economicamente, a solução

ideal seria uma estrutura monobloco que permita economizar espaço, sustentar todo o equipamento além do robô e fácil relocação (se necessário), para melhor gestão do espaço de chão de fábrica. Isto permitiria à célula integrar-se mais facilmente no sistema de postos/células de trabalho empregue na empresa.

Por fim, falta perceber concretamente o impacto da implementação desta tecnologia na produtividade da empresa, o que será analisado no capítulo seguinte, e permitirá tomar uma decisão mais informada acerca da solução selecionada.

5. ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA CÉLULA ROBOTIZADA DE SOLDADURA

O objetivo com este capítulo é perceber, através de algumas abordagens distintas, até que ponto é benéfico a implementação de uma célula robotizada (se for o caso) e em que aspetos. Além disso, será importante perceber se se adequaria à quantidade e ao tipo de material para soldadura com que a bysteel normalmente trabalha.

Um dos aspetos que será analisado são os custos de soldadura associados e comparados com os da soldadura tradicional. Será ainda feito o cálculo de alguns índices de investimento como o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) e o retorno de investimento que a implementação de uma célula robotizada de soldadura geraria e potenciais lucros ao longo dos anos.

5.1. CUSTOS E TEMPOS DE SOLDADURA

Os custos referentes ao processo de soldadura podem ser divididos em custos diretos e indiretos e podem ser calculados se forem conhecidos os fatores que envolvem o processo. Os custos diretos incluem custo de mão-de-obra e de matérias-primas.

Os custos indiretos englobam manutenção, seguros, fonte de energia, equipamentos de segurança, entre outros. Estes são calculados através de uma percentagem (assume-se cerca de 30%) dos custos diretos, ou seja, variam proporcionalmente aos custos diretos. Foram, por isso, excluídos desta análise.

Neste estudo, foram calculados e comparados os custos diretos da soldadura MIG/MAG manual com a soldadura MIG/MAG robotizada.

Assumindo um custo conjunto de 11,82 €/h para o salário de um soldador e respetivos equipamentos de proteção individual (denominados EPI), um custo de 1,39 €/h da amortização da máquina de soldar, uma velocidade de soldadura para o processo convencional de 140 mm/min, ou seja 8,4 m/h e um fator de marcha de 25%.

O fator de marcha refere-se à percentagem de tempo que uma máquina está a operar dentro de um determinado período, para uma dada amperagem.

Por exemplo, se uma certa máquina tem um fator de marcha de 30% a 200 amperes, significa que irá trabalhar a 200A durante 3 minutos num período de 10 minutos. Nos

restantes 7 minutos irá ficar em modo *standby*, de forma a arrefecer. Isto é feito para evitar que a máquina sobreaqueça e prevenir danos resultantes. Para maior amperagem, menor será o fator de marcha, pois a máquina corre o risco de sobreaquecer mais rapidamente. Para menor amperagem, maior será o fator de marcha.

Na seguinte figura (Figura 5.1) podem-se verificar os fatores de marcha dos diferentes métodos de soldadura.

Modo de operação	ϕ (%)
Manual	05-30
Semi-automático	10-60
Mecanizado	40-90
Automático	50-100

Figura 5.1 - Fatores de marcha dos diferentes métodos de soldadura [33]

Usando uma das peças estudadas na comparação de tempos de soldadura teórico e práticos como exemplo, arbitra-se um comprimento de cordão a soldar de 2090 mm. Assim, pode-se calcular que o custo da mão-de-obra da soldadura manual é:

$$C = \frac{C_h}{V_s + DC} \times d_{\text{cordão}} = 13,15 \text{ €/cordão}$$

Em que:

C - Custos de mão-de-obra (€/m);

C_h - Custo horário (€/h);

V_s - Velocidade de soldadura (m/h);

DC - *Duty cycle* - fator de marcha;

O custo do material de adição será o mesmo para o processo robotizado e para o processo manual.

Para o calcular, é necessário primeiro averiguar o material depositado por unidade de comprimento.

Uma vez que, para esta peça em específico, os catetos de soldadura tinham 6 mm de comprimento, $A = 36 \text{ mm}^2$.

$$M_d = A \times \rho \times d_{\text{cordão}} = 0,59 \text{ kg/cordão}$$

Em que:

M_d - Metal depositado (kg/m);

A - Secção transversal do cordão (m^2);

ρ – Massa volúmica do metal depositado (kg/m^2);

O consumo de material depositado será:

$$C_c = \frac{M_d}{E_d} = 0,66 \text{ kg/cordão}$$

Em que:

C_c – Consumo de consumível (kg/m);

M_d – Metal depositado (kg/m);

E_d – Eficiência do depósito (%);

No que toca aos custos associados às matérias-primas, são tidos em conta todos os materiais consumidos. Isto engloba a quantidade de material depositado, o custo do material de adição, do fluxo e do gás de proteção.

Estes custos irão refletir a eficiência da deposição, isto é, a razão entre a quantidade de consumível depositado e a quantidade de consumível utilizado. Na figura seguinte (Figura 5.2) pode-se ver a eficiência de deposição (por intervalo percentual) de alguns processos de soldadura.

Processo	φ (%)
Eletrodos Revestidos:	
Comprimento: 350mm	55-65
450mm	60-70
Arames:	
SAW	95-100
ESW	95-100
GMAW	90-95
Arames tubulares: FCAW	80-85

Figura 5.2 - Eficiência de deposição de alguns processos de soldadura [33]

Com estes valores, pode-se calcular o custo do material de adição:

$$C_{ma} = \frac{P_c \times C_c}{E_d} \times d_{\text{cordão}} = 2,76 \text{ €/cordão}$$

Em que:

C_{ma} – Custo do material de adição (€/m);

P_c – Preço do combustível (€/kg);

C_c – Consumo do consumível (kg/m);

E_d – Eficiência do depósito;

Para calcular o custo do gás de proteção, uma vez que o processo em foco é o MIG/MAG, foram assumidos os valores utilizados na empresa de $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$ para o caudal do gás e $1,68 \text{ €/m}^3$ para o custo a que este costuma ser adquirido. Posto isto, pode-se calcular o seguinte valor para o custo do gás de proteção:

$$C_{gás} = P_{gás} \times Q \times t_{arc} = 2,33 \text{ €/cordão}$$

Em que:

C_g – Custo do gás de proteção (€/m);

P_g – Preço do gás (€/m³);

Q – Caudal (m³/h);

t_{arc} – Tempo efetivo de soldadura, no qual o arco se encontra aberto (h);

Os custos diretos são o somatório do custo de mão-de-obra, do metal de adição e do gás de proteção de soldadura. Assim, tem-se que os custos diretos relativos à soldadura manual são:

$$C_{diretos\ manual} = 18,24 \text{ €/cordão}$$

Para o processo robotizado, assumindo um custo de $6,8 \text{ €/h}$ para o salário de um operacional de soldadura e respetivos EPI's e um custo de $6,4 \text{ €/h}$ para a amortização do robô. Assume-se ainda uma velocidade de soldadura de $21,15 \text{ m/h}$ (correspondente a $352,5 \text{ mm/min}$) e um fator de marcha de 90%. Determinando o custo da mão-de-obra do processo, obtém-se:

$$C = \frac{C_h}{V_s + DC} \times d_{cordão} = 1,45 \text{ €/cordão}$$

Como referido anteriormente, o custo de material de adição é o mesmo para ambos os métodos.

No que concerne o custo do gás de proteção, o seu preço assume-se $1,68 \text{ €/m}^3$ e o caudal $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Neste caso, o tempo necessário de funcionamento do arco é de $0,7$ horas. Estes valores resultam no seguinte custo do gás de proteção para a soldadura robotizada:

$$C_{gás} = P_{gás} \times Q \times t_{arc} = 0,24 \text{ €/cordão}$$

Assim, os custos diretos relativos à soldadura robotizada são:

$$C_{diretos\ robotizado} = 4,45 \text{ €/cordão}$$

Como se pode verificar, a diferença de custos diretos entre o processo manual e robotizado é de 13,79 €/peça. Para cada 2090 mm de material soldado, o processo manual é cerca de 4,1 vezes mais caro que o processo robotizado.

Os dois principais fatores que contribuem para esta diferença considerável são a velocidade de soldadura do processo robotizado ser bastante superior e o facto de, na aplicação do processo robotizado, bastar a supervisão e controlo de um operador de soldadura, ao invés do processo manual onde é necessário ter em conta o trabalho e o salário de um soldador, o que inflaciona bastante o custo do processo.

Tipicamente, apenas 30% do tempo de trabalho se refere a tempo com arco elétrico em funcionamento, ou seja, tempo produtivo (Figura 5.3). Os restantes 70%, ou tempo não produtivo, dizem respeito a acabamentos posteriores que é necessário realizar nas peças e a tarefas de transporte e fixação das juntas de soldadura e preparação do material de soldadura.

Processo	Ciclo de Trabalho (%)
Eletrodo revestido	10 – 30
GMAW/FCAW	20 – 40
SAW	40 – 70

Figura 5.3 - Ciclo de trabalho habitual de diferentes processos de soldadura [34]

O valor nominal de velocidade de soldadura para o processo manual usado na empresa é de 140 mm/min.

Para obter um valor de comparação, usou-se a peça referida anteriormente, para um comprimento de cordão de 2090 mm.

$$t_{soldadura\ manual} = \frac{\text{comprimento}_{soldadura}}{\text{velocidade}_{soldadura}} \times 1,7 = 25,38 \text{ minutos/peça}$$

No caso da soldadura robotizada, será considerada uma velocidade de 352,5 mm/min, como anteriormente mencionado.

$$t_{soldadura\ robô} = \frac{\text{comprimento}_{soldadura}}{\text{velocidade}_{soldadura}} \times 1,7 = 10,08 \text{ minutos/peça}$$

Para a peça em questão usada como referência, esta demoraria cerca de 2,5 vezes mais tempo a ser soldada manualmente do que se aplicada a soldadura robotizada (Tabela 5.1).

Para cada metro de cordão de soldadura, os valores seriam:

$$t_{soldadura\ manual} = \frac{\text{comprimento}_{soldadura}}{\text{velocidade}_{soldadura}} \times 1,7 = 12,14 \text{ minutos/m}$$

$$t_{soldadura\ robô} = \frac{\text{comprimento}_{soldadura}}{\text{velocidade}_{soldadura}} \times 1,7 = 4,82 \text{ minutos/m}$$

Tabela 5.1 - Mapa comparativo das características da soldadura convencional e soldadura robotizada

Mapa comparativo	Soldadura convencional	Soldadura robotizada
Velocidade de soldadura (mm/min)	140	352
Custo de soldadura (€/kg)	0,62	0,26
Tempo de soldadura por metro (min/m)	12,14	4,82
Custo de soldadura por cordão padrão (€/cordão)	18,24	4,45

5.2. ÍNDICES DE INVESTIMENTO OEE E ROI

5.2.1. OEE (OVERALL EQUIPMENT EFFICIENCY)

O OEE (*Overall Equipment Efficiency*) é a relação entre o tempo de produção efetivo e o tempo de produção planeado. Deve-se considerar que o tempo de produção efetivo representa o tempo despendido na manufatura de peças com qualidade aceitável, sem ter em atenção possíveis pausas e/ou *downtimte*.

O cálculo do OEE torna-se mais completo se também forem calculados os três índices que o constituem: disponibilidade, performance e qualidade.

A disponibilidade indica o tempo efetivo de trabalho relativo ao tempo de trabalho planeado. A performance permite avaliar tudo o que possa impedir o processo de ser executado à máxima velocidade possível. A qualidade indica a percentagem de peças com qualidade aceitável produzidas em relação ao total de peças produzidas [35].

Com estes três índices que constituem o OEE é possível tirar conclusões mais informadas devido à sua separação de três fatores importantes na produção. Isto permite a uma empresa a flexibilidade de conseguir perceber qual dos três fatores considera mais importante de forma a estabelecer uma ordem de prioridade entre as três categorias [35].

No cálculo do OEE foram considerados turnos de 8 horas (480 minutos) com pausas de 1 hora para almoço e duas pausas de 15 minutos (uma de manhã e outra de tarde) para os operadores. Estas são as pausas e horário habitualmente empregues na bysteel.

Foi ainda considerado que, durante todo o *uptime* do turno (tempo em que efetivamente se pode realizar trabalho, ou seja, exclui pausas e tempos de preparação de junta e de material de soldadura), estaria a ser realizado trabalho.

Isto resulta num índice de performance 100%, que poderá não ser realista em alguns casos, no entanto, como o volume de trabalho é algo que varia bastante, optou-se por este compromisso de forma a poder avaliar ambas as vertentes de soldadura de forma equivalente e à sua capacidade máxima.

Para calcular o *downtime* relativo à preparação do material de soldadura e preparação de junta de soldadura, foram considerados dois valores de referência usados na bysteel de 70% de tempo não produtivo e 30% de tempo produtivo. Os 30% de tempo produtivo dizem respeito ao tempo em que existe arco elétrico efetivamente em funcionamento, enquanto os 70% representam as tarefas de transporte e movimentação das peças e os acabamentos necessários realizar.

Para a soldadura por célula robótica foi realizada uma estimativa inicial de 30% de tempo não produtivo uma vez que o operador pode movimentar as peças enquanto o robô corre o programa de soldadura. Além disso, não é necessário preparar o equipamento de soldadura uma vez que este já está fixo numa célula própria.

Para a taxa de peças aprovadas foram realizadas estimativas educadas de 90% para a soldadura convencional e de 95% para a soldadura por célula robótica devido às funções de *seam tracking* da mesma. Os resultados desta análise constam na seguinte tabela (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Resultados do OEE para a soldadura convencional e robotizada

Tipo de soldadura	Disponibilidade	Performance	Qualidade	OEE
Convencional	14%	100%	90%	13%
Robotizada	63%	100%	95%	60%

Estes resultados indicam um valor de OEE quase 5 vezes superior para a soldadura robotizada relativamente à soldadura convencional. De acordo com os restantes dados, isto deve-se maioritariamente às disparidades no índice da disponibilidade, onde a soldadura robotizada é muito mais eficiente devido, principalmente, ao facto de o robô ser capaz de realizar cordões de soldadura enquanto o operador prepara a peça seguinte.

O fator da *performance*, realisticamente, será superior na soldadura robotizada uma vez que esta não está sujeita a fatores como fadiga, cansaço e desconcentração, como é o caso de um soldador humano. Além disso, é importante perceber que um robô de soldadura mantém o nível de qualidade durante todos os processos que faz, ou seja, a sua qualidade é consistente. Por último, estando associado a tecnologias como sensores, sistema de seguimento de junta e sistema de deteção de junta, este é capaz de um trabalho bastante preciso e rigoroso.

5.2.2. ROI (*RETURN ON INVESTMENT*)

O ROI (*Return On Investment*) é um índice baseado em *performance* onde se avalia a eficiência e o lucro possível associado a um dado investimento. Este índice tenta medir o retorno específico de um investimento, relativo ao seu custo.

O resultado é uma percentagem ou uma relação. É particularmente útil também para comparar investimentos, permitindo avaliar quanto tempo demoraria a saldar o mesmo.

A partir de dados internos de anos anteriores recentes e, considerando um aumento de rendimento de 30% de um robô colaborativo comparativamente à soldadura convencional, foi calculado o valor poupado, em euros, para os últimos 5 anos (2017 a 2021) caso fosse empregue um robô colaborativo ao invés da soldadura convencional.

Para esta abordagem, foram considerados os valores relativos apenas aos acessórios soldados na empresa nos últimos 5 anos (entre 2017 e 2021). É importante considerar que os acessórios constituem uma pequena fração do material soldado na empresa.

Tabela 5.3 - Valor poupado em cada um dos anos entre 2017 e 2021 simulando a implementação de um robô colaborativo

Anos	Valor poupado (euros)
2017	12328,45
2018	31709,36
2019	15225,08
2020	11616,81
2021	7563,12
Média	15688,564

Com a média destes valores (Tabela 5.3), foi estimado quanto valor a aquisição e implementação de um robô (convencional ou colaborativo) pouparia à empresa por ano durante os 15 anos após adquirir o robô (vida útil estimada do equipamento).

Isto permitiu calcular quantos anos demoraria até o valor poupado pela empresa ser igual ou superior ao valor do investimento inicial do robô (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Número de anos a partir do qual a implementação do robô colaborativo fica saldada

			Anos até estar pago	Anos arredondados
Propostas	UR10 nº1	70 950,00 €	4,522402433	5
	UR10 nº2	72 100,00 €	4,595704234	5

De acordo com estes valores, o investimento inicial num UR10 ficaria saldado durante o quinto ano da sua implementação.

Além disso, ainda foi calculado o retorno de investimento a certos pontos no tempo para ter uma melhor ideia do investimento total e de como ele poderia evoluir ao longo dos anos (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Retorno de investimento percentual após 8, 10, 12 e 15 anos de implementação de um robô colaborativo

Anos	UR10 nº1	ROI (%)	UR10 nº2	ROI (%)
8		76,89712755		74,0756061
10		121,1214094		117,5945076
12		165,3456913		161,1134092
15		231,6821142		226,3917614

Os valores da tabela acima indicam o lucro em forma de percentagem relativa ao valor do investimento que a implementação do robô gera. Por exemplo, para a primeira proposta do UR10, após 8 anos de implementação do robô, a empresa gerou cerca de 77% do valor do preço inicial do robô como lucro (ou seja, 3 anos depois de saldar o investimento inicial).

Foram realizados os mesmos cálculos para o caso da implementação de um robô convencional de soldadura (Tabela 5.6), onde se estimou um aumento de rendimento de 40%.

Tabela 5.6 - Número de anos a partir do qual a implementação do robô convencional fica saldada

Propostas			Anos até estar pago	Anos arredondados
FANUC Convenc 3m	142 800,00 €		8,613748653	9
FANUC Convenc 5m	168 000,00 €		10,13382194	10

No caso dos robôs FANUC, dependendo do comprimento do mesmo, levariam entre 9 e 10 anos de implementação para o seu uso saldar a sua compra. Apesar do rendimento simulado para estes robôs ser 10% superior ao colaborativo, o preço base de um destes modelos é muito superior a um colaborativo.

Tabela 5.7 - Retorno de investimento percentual após 8, 10, 12 e 15 anos de implementação de um robô convencional

Anos	FANUC 3m	ROI (%)	FANUC 5m	ROI (%)
8		-7,125221289		-21,0564381
10		16,09347339		-1,320547619
12		39,31216807		18,41534286
15		74,14021008		48,01917857

Esta tabela (Tabela 5.7) é análoga à anterior relativa aos UR10. Neste caso, por exemplo, para o FANUC de 5 metros de comprimento, após 8 anos da sua implementação, apenas gerou

cerca de 79% do valor pelo qual foi adquirido. Por outro lado, após 15 anos, terá gerado cerca de 48% em lucro. Ou seja, além de ter gerado 100% do seu valor inicial, ficando o seu investimento saldado nesse momento (no início do décimo primeiro ano da sua implementação de acordo com a tabela anterior), gerou ainda 48% do investimento em lucro nos seus anos restantes de vida útil estimada.

Como se pode verificar, o robô convencional é um investimento consideravelmente superior ao robô colaborativo, sendo que demoraria quase o dobro do número de anos a soldar. Desse modo, a sua aquisição apenas faria sentido se fosse aplicado à soldadura de grandes séries de material, o que não é o caso dos acessórios, que constituem uma fração menor do trabalho da bysteel.

Apesar dos UR10 ficarem saldados muito mais rapidamente que os FANUC, os robôs colaborativos não são tão adequados a grandes séries de peças devido à maior velocidade de trabalho e robustez dos robôs convencionais.

O robô colaborativo pode, no entanto, ser um bom investimento uma vez que é mais facilmente saldado e permite mais versatilidade de abordagem na soldadura, além de ser uma tecnologia mais intuitiva de interagir do que um robô convencional.

5.3. ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ CONVENCIONAL

No seguimento deste estudo, foi ainda realizada outra abordagem, desta vez com o objetivo de perceber se haveria quantidade de material na empresa que justificasse a aquisição e implementação de um robô convencional.

Para este efeito, foram considerados os pilares, vigas e contraventamentos com menos de 5 metros de comprimento soldados no ano de 2021.

Além disso, foi estimado um aumento de rendimento conservativo de 25% do robô relativamente ao processo convencional, derivado das opiniões de fornecedores e informações provenientes de catálogos.

Tabela 5.8 - Valor poupado num ano com implementação de um robô convencional

		Peso V, P e CV soldados (Ton)	Horas despendidas	Horas Poupadas/Ano	Rend. (Ton/h)	Custo*	Valor Poupado/Ano
2021	Soldadura Manual	1814,6	11635	2327,0	0,156	137 525,70 €	74 231,30 €
	Robot		9308,0		0,195	63 294,40 €	

Através desta tabela (Tabela 5.8), pode-se verificar que, apenas em custos da operação (salários e custos materiais), é possível poupar cerca de 74 mil euros com a aplicação de um robô convencional, através de uma redução considerável nas horas despendidas.

Numa abordagem mais incisiva, considerou-se o robô FANUC de 5 metros de comprimento (foi usado o mais caro de forma a obter uma perspetiva mais segura e conservativa). Nesta análise, o objeto de estudo seriam as toneladas de material soldado e a evolução da diferença de custos (entre soldadura convencional e robotizada). Os valores relativos a custos de equipamento e salários de operadores usados como base deste estudo constam na tabela da seguinte figura (Figura 5.4).

Variáveis	
Custo equipamento	168 000,00 €
Anos de investimento	8
Meses trabalhados	11
Dias por mês	21
Horas por dia	6
Horas produtivas ano	1386
Custo equip. por h	15,15 €
Homenhora / ton_Man	11,31
Homenhora / ton_Robot	7,917
Custo operador	6,80 €
Custo soldador	11,82 €
Custo Operador + Amort Rob	21,95 €
Custo soldador + Maq	13,21 €

Figura 5.4 - Valores dos custos associados ao processo de soldadura usados neste estudo

Usando as cerca de 1814 toneladas de pilares, vigas e contraventamentos com menos de 5 metros de comprimento soldados em 2021, calculou-se a diferença cumulativa entre os custos associados à soldadura convencional e os custos da soldadura robotizada em relação às toneladas soldadas (Figura 5.5). Isto significa que, por exemplo, após soldar 500 toneladas do material referido, ter-se-ia poupado cerca de 62 mil euros com a implementação de um robô convencional de soldadura.

Implementação de sistemas robotizados na construção soldada

Ton	Sold. Robotizada			Sold. Convencional			Diferença Anual	Diferença anual cumulativa
	Custo amortização	Custo hora	Custo Total	Custo amortização	Custo hora	Custo * Total		
50	5 997,73 €	2 691,78 €	8 689,51 €	-	6 684,21 €	6 684,21 €	2 005,30 €	2 005,30 €
100	11995,45455	5 383,56 €	17 379,01 €	-	13 368,42 €	13 368,42 €	4 010,59 €	6 015,89 €
200	23 990,91 €	10 767,12 €	34 758,03 €	-	26 736,84 €	26 736,84 €	8 021,19 €	14 037,08 €
300	35 986,36 €	16 150,68 €	52 137,04 €	-	40 105,26 €	40 105,26 €	12 031,78 €	26 068,86 €
400	47 981,82 €	21 534,24 €	69 516,06 €	-	53 473,68 €	53 473,68 €	16 042,38 €	42 111,24 €
500	59 977,27 €	26 917,80 €	86 895,07 €	-	66 842,10 €	66 842,10 €	20 052,97 €	62 164,22 €
600	71 972,73 €	32 301,36 €	104 274,09 €	-	80 210,52 €	80 210,52 €	24 063,57 €	86 227,78 €
700	83 968,18 €	37 684,92 €	121 653,10 €	-	93 578,94 €	93 578,94 €	28 074,16 €	114 301,94 €
800	95 963,64 €	43 068,48 €	139 032,12 €	-	106 947,36 €	106 947,36 €	32 084,76 €	146 386,70 €
1000	119 954,55 €	53 835,60 €	173 790,15 €	-	133 684,20 €	133 684,20 €	40 105,95 €	186 492,65 €
1200	143 945,45 €	64 602,72 €	208 548,17 €	-	160 421,04 €	160 421,04 €	48 127,13 €	234 619,78 €
1500	179 931,82 €	80 753,40 €	260 685,22 €	-	200 526,30 €	200 526,30 €	60 158,92 €	294 778,70 €
1815	217 717,50 €	97 711,61 €	315 429,11 €	-	242 636,82 €	242 636,82 €	72 792,29 €	367 570,99 €

Figura 5.5 - Cálculo da diferença anual cumulativa entre a soldadura convencional e robotizada em relação às toneladas soldadas

Consequentemente, este tipo de análise permite calcular após quantas toneladas de material soldado se terá poupado um valor equivalente ao investimento inicial, neste caso de 168 mil euros. Isto pode ser feito através de uma interpolação linear, uma vez que o valor se encontra entre as 800 e as 1000 toneladas soldadas.

$$\frac{1000 + \frac{(186492,65 - 168000)}{(168000 - 146386,70)} * 800}{\frac{(186492,65 - 168000)}{(168000 - 146386,70)} + 1} = 907,78 \text{ ton}$$

Concluindo, e assumindo que os valores de toneladas soldadas em 2021 estão próximos da média anual, após cerca de 908 toneladas soldadas, o investimento do robô ficaria saldado. Ou seja, após um ano da implementação do robô, a empresa teria feito um lucro equivalente ao investimento inicial do robô.

Considerando um tempo de vida médio entre os 12 e os 15 anos para um robô de soldadura convencional, este é um retorno que indica que a bysteel trabalha com quantidades de material que justificam a aquisição deste tipo de equipamento.

Apesar disto, deve-se considerar, como referido anteriormente, que a implementação de uma célula robotizada não irá substituir todas as estações de soldadura na empresa. No entanto, os resultados extremamente positivos permitem confirmar que, existindo uma quantidade de material adequada, ou seja, se aplicado a séries de peças como vigas, pilares e contraventamentos, a aplicação de uma célula robotizada é, sem dúvida, rentável e representaria um aumento de produtividade para a empresa.

5.4. CONCLUSÕES

O atual capítulo apresenta várias abordagens de um estudo que visa entender de que modo a implementação de um robô de soldadura pode beneficiar a empresa e a sua produtividade. Foram primeiramente abordados os custos associados à soldadura manual e como se comparam aos da soldadura robotizada. Também se procurou efetuar uma comparação a partir da perspectiva dos tempos de soldadura entre os dois processos.

Além disso, foi ponderado de que forma a aplicação do robô influenciaria a produtividade da empresa relativamente ao seu estado atual com o uso predominante de soldadura manual.

Por fim, e em jeito de síntese, foi vital analisar e perceber a quantidade relativa de peças que são passíveis de ser soldadas pelo robô para entender a rentabilidade extra que este confere à soldadura da empresa, sendo que o estudo permitiu averiguar que o volume de trabalho em questão é tão significativo que o robô ficaria saldado com a sua própria produção em menos de um ano, em média, caso todo o trabalho de soldadura manual na empresa fosse robotizado (o que não é completamente realista, mas é um cenário que ilustra a influência bastante positiva da implementação de uma célula robotizada).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No final de cada capítulo, ao longo da dissertação, foi realizado um sumário com as noções mais importantes a reter dos respetivos capítulos. No entanto, é importante interligar os temas abordados para finalizar com conclusões coesas.

O objetivo abrangente deste projeto passa por analisar a aplicabilidade de soldadura robotizada na construção soldada da bysteel. Isto implicou, numa fase embrionária, entender o lado da soldadura até agora praticada na empresa, mas também o lado da soldadura robotizada no mercado.

Foi, conseqüentemente, possível definir o processo de soldadura mais pertinente de ser implementado numa célula robotizada, neste caso o MIG/MAG (nomeadamente MAG). Este é o processo mais comum na indústria metalomecânica no que concerne a aplicação de soldadura robotizada e, deste modo, seria possível ultrapassar a sua falta de mobilidade (uma vez que integraria uma estação própria de fácil relocação). Além disso, a sua implementação através de uma célula robotizada resultaria num aumento dramático da sua produtividade e consistência de trabalho.

Do lado da soldadura robotizada no mercado, o estudo realizado foi focado, numa fase inicial, no funcionamento do mesmo, através dos manuais de funcionamento de um antigo modelo da KUKA (atualmente fora de serviço) presente na bysteel. A partir daí, foram também analisadas outras tecnologias associadas às células de soldadura, tanto a nível de *software* (por exemplo o sistema de seguimento de junta) como de *hardware* (por exemplo os eixos externos). Este conhecimento foi colmatado com as visitas e demonstrações às quais a bysteel foi convidada a assistir. Foram idealizadas diferentes soluções possíveis para a célula robotizada, tanto com robô industrial convencional como robô colaborativo e comparadas com as propostas recebidas pela empresa.

No entanto, os aspetos mais relevantes na tomada de decisões foram as comparações de custos e tempos de soldadura entre a soldadura manual a robotizada, bem como o estudo realizado acerca da rentabilidade da soldadura robotizada relativamente à manual. A implementação de uma célula robotizada implica um investimento inicial elevado, especialmente no caso de um robô convencional. Portanto, não será de interesse dedicar a sua aplicação à soldadura de acessórios, uma vez que o volume de trabalho deste tipo de peça é relativamente reduzido e não tiraria proveito máximo das capacidades de uma célula de

soldadura robotizada convencional. No entanto, a soldadura de acessórios poderia fazer sentido para um robô colaborativo, dada a natureza mais customizável da programação do mesmo e este ficaria saldado em menos de 5 anos, estimadamente. Calcula-se ainda que, após os 15 anos de tempo de vida médio, teria gerado lucros equivalentes a 226% do investimento inicial, ou seja, mais de 162 000 euros.

Por outro lado, a implementação de um robô convencional seria definitivamente melhor empregue na soldadura de peças mais representativas do volume de trabalho da empresa, como é o caso das vigas, pilares e contraventamentos. Como se averiguou, quando aplicado à soldadura de acessórios, levaria cerca de 9 a 10 anos de uso para saldar o investimento inicial. Quando aplicado à soldadura de vigas, pilares e contraventamentos, o seu investimento ficaria saldado dentro do primeiro ano de uso. Isto representa uma diferença bastante considerável, apesar de existir uma ressalva. O estudo foi feito assumindo que toda a soldadura na empresa seria robotizada, o que não seria o caso. Ainda assim, é possível concluir que a implementação de uma célula de soldadura robotizada constituída por um robô convencional, apesar de representar um investimento bem superior ao colaborativo, seria vantajoso e aumentaria a produtividade do sector de soldadura da empresa de forma considerável, devido a melhorias nos tempos e custos de soldadura, na qualidade de peças e na mão de obra necessária.

Concluindo, a solução mais adequada à soldadura de vigas, pilares e contraventamentos seria a de um sistema monobloco com um robô articulado de 6 eixos convencional, uma guia longitudinal e dois posicionadores rotativos (um de cada lado do robô), como a célula da FANUC abordada. Para a soldadura de acessórios, poderia ainda ser vantajosa e mais adequada a implementação de um robô colaborativo, como é o caso do UR10 que foi mencionado e analisado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Norma EN 1090,” *The Linde Group*, 2014.
- [2] bysteel, “Portfólio pontes e viadutos,” *bysteel.pt*, 2022.
- [3] Comité Europeu de Normalização, “Norma EN ISO 4063,” *Instituto Português da Qualidade*, 2004.
- [4] IPCA and bysteel, “Introdução à tecnologia de soldadura,” *Tecnologia da Soldadura 2ª Edição*, 2022.
- [5] A. Silva and A. Q. Bracarense, “Soldagem com Arco Submerso Utilizando Fluxo Aglomerado com Polímero (Submerged Arc Welding Using Flux with Polymer Binder),” 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303836534>
- [6] IPCA and bysteel, “Fundamentos de soldadura Imperfeições de soldadura,” *TWI WIS 5 COURSE Welding inspection of steel*, 2022.
- [7] I. Felizardo, “Processos de soldagem: manual, mecanizados e automatizados,” 2022. [Online]. Available: www.ivanilzafelizardo.com
- [8] F. Ribeiro, “Configuração de robôs,” 2022.
- [9] “Cartesian robot configuration,” *Yamaha Motor Cartesian Robots XY-X Series*, 2022. <https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/xyx/> (accessed Oct. 21, 2022).
- [10] “Cylindrical robot configuration,” *Oel Check*, 2011. https://en.oelcheck.com/fileadmin/user_upload/pdf/oelchecker/en/2011/oelchecker_spring_2011_EN.pdf (accessed Oct. 21, 2022).
- [11] “Industrial One-Arm Bandit,” *British Pathé*, 2014.
- [12] “Que robô industrial escolher?,” *DirectIndustry*, 2022.
- [13] “ABB Robotics Selective Compliance Articulated Robot Arm SCARA,” *ABB Robotics*, 2015.
- [14] Y. Cohen, S. Shoval, M. Faccio, and R. Minto, “Deploying cobots in collaborative systems: major considerations and productivity analysis,” *Int J Prod Res*, vol. 60, no. 6, pp. 1815–1831, 2022, doi: 10.1080/00207543.2020.1870758.
- [15] Y. Cao, K. Lu, X. Li, and Y. Zang, “Accurate Numerical Methods for Computing 2D and 3D Robot Workspace Regular Paper,” 2011. [Online]. Available: www.intechweb.org

- [16] A. Ricardo and M. Leal De Oliveira, "Projeto e desenvolvimento de células robotizadas para soldadura e cladding," 2015.
- [17] P. Kah, M. Shrestha, E. Hiltunen, and J. Martikainen, "Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1. Springer, Dec. 30, 2015. doi: 10.1186/s40712-015-0042-y.
- [18] "Robôs industriais da KUKA," *KUKA*, 2022.
- [19] K. Roboter GmbH, "KUKA System Software Operating and Programming Instructions for End Users," 2013.
- [20] J. Lopes, "Automação, Mecanização e Robotização da Soldadura," 2021.
- [21] P. Abreu, "Aplicações industriais de robôs," 2001.
- [22] I. Karabegović, "Application of Industrial Robots in the Automation of the Welding Process," *Robotics & Automation Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.19080/raej.2018.04.555628.
- [23] "KUKA KR 16-2 S," *Eurobots*, 2022.
- [24] "FANUC F-200iB," 2022. [Online]. Available: www.fanucrobotics.com
- [25] "ABB FlexArc L-300 Workcell," *RobotWorx*, 2022.
- [26] "UR10 Technical specifications," *Universal Robots*, 2016.
- [27] "UR10 Service Manual," 2009.
- [28] "Quais as diferenças entre soldadura MIG/MAG e soldadura TIG?," *Motofil*, 2021.
- [29] "MAG Welding Robots," *RobotWorx*, 2022.
- [30] "MAG Welding Robots," *RobotsDoneRight*, 2022.
- [31] "Monobloc," *AGT Robotics*, 2022.
- [32] M. Brito, "Manual Pedagógico PRONACI Manutenção," 2003.
- [33] P. J. Modenesi, "Estimativa de Custos em Soldagem," 2001.
- [34] "Como maximizar a produtividade na soldagem," *ESAB*, 2022.
- [35] "Calculate OEE," *What is OEE?*, 2022.

- [36] Antonelli, D., & Astanin, S. (2015). Qualification of a collaborative human-robot welding cell.

- [37] Dávila-Ríos, I., & Torres-Trevino, L. (2008). On the Implementation of a Robotic Welding Process.
- [38] Ghobakhloo, M., & Khaksar, W. (2014). Robotic Welding Technology.
- [39] Heimig, T., Kerber, E., & Stumm, S. (2020). Towards robotic steel construction through adaptive incremental.
- [40] Kuss, A., Dietz, T., Spenrath, F., & Verl, A. (2016). Automated planning of robotic MAG welding based on adaptive gap model.
- [41] Lendiel, I., & Maksimov, S. (2017). Automation of welding processes with use of mechanical welding equipment.
- [42] Pires, J. N., & Loureiro, A. (2006). Welding robots: Technology, system issues and applications.
- [43] Pires, J. N., Loureiro, A., & Morgado, J. (s.d.). Welding robots. 2003.

ANEXOS

Nesta secção estão presentes os anexos que, não sendo fundamentais ao corpo principal do documento, consistem em informação fundamental e única.

ANEXO A: TABELAS AUXILIARES NO CÁLCULO DO ROI

Anos	Valor poupado (euros)	Anos	Valor poupado acumulado
2017	13027,51	1	16578,148
2018	33507,36	2	33156,296
2019	16088,38	3	49734,444
2020	12275,52	4	66312,592
2021	7991,97	5	82890,74
Média	16578,148	6	99468,888
		7	116047,036
		8	132625,184
		9	149203,332
		10	165781,48
		11	182359,628
		12	198937,776
		13	215515,924
		14	232094,072
		15	248672,22

Anos	Valor poupado (euros)	Anos	Valor poupado acumulado
2017	12328,45	1	15688,564
2018	31709,36	2	31377,128
2019	15225,08	3	47065,692
2020	11616,81	4	62754,256
2021	7563,12	5	78442,82
Média	15688,564	6	94131,384
		7	109819,948
		8	125508,512
		9	141197,076
		10	156885,64
		11	172574,204
		12	188262,768
		13	203951,332
		14	219639,896
		15	235328,46

Anexo B: Desenho técnico para uma célula robotizada de soldadura da motofil

ANEXO C: PROPOSTA DE UMA CÉLULA ROBOTIZADA DE SOLDADURA DA MOTOFIL

Neste anexo estarão apenas contidas algumas das páginas do documento, por natureza de relevância de conteúdo.



Célula de soldadura tipo Monobloco - 4000 ; 1200 ; 1000 - robot c/ track

Prop. 220345-PT-Bysteel, SA
Oport. 371-2022-Bysteel, SA

Empresa: Bysteel, SA

Endereço:

- Rua de Pintacinhos, Apartado 208 - Palmeira
- 4711-911, Braga
- Braga Portugal

Att: Eng. Ricardo Portela

Email: ricardo.portela@bysteel.pt

Contactos: |

Responsável Comercial: Paulo Silva

E-mail Comercial: psilva@motofil.com

Contacto Comercial: +351 916 999 707

Data: 07-04-2022

MOTOFIL, S.A. (HQ)
Rua Tomé Barros Queirós, 135
Zona Ind. Das Ervosas
3830 - 252 Ílhavo | Portugal

T.: +351 234 320 900
Email: offers@motofil.com

www.motofil.com

Prop. 220345-PT-Bysteel, SA

motofil

1. Fornecimento

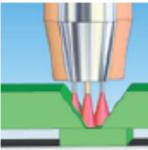
O presente documento tem por objetivo explicar e definir o fornecimento proposto pela MOTOFIL S.A.

Sistema	Célula de soldadura tipo Monobloco - 4000 ; 1200 ; 1000 - robot c/ track
Layout	A032-90-910-0

Quantidade	Elementos
1	Robot 100iD/10L
1	Controlador Fanuc R-30iB - Cabinet A
1	Sistema de seguimento de junta TAST
1	Sistema de localização de peça Touch Sensing
1	Kit Motofil SuperMIG 500
1	Tocha de soldadura Binzel ABIROB W500, 22º, refrigerada
1	Kit Manutenção Tocha BINZEL
1	Sistema Monobloco 4000x1200x1000 Kg
2	Aro de Indexação
2	Conjunto de Barreiras Foto-Eléctricas
1	Conjunto de Proteções Metálicas
1	Software iWeld Light

Serviços
Curso Básico Programação Robot Fanuc
Formação de Operação e Manutenção da Instalação
Receção Técnica na Motofil (FAT)
Instalação no Cliente
Serviço Programação e Arranque Robótica
Aceitação Final e Testes Funcionais de Aceitação (SAT)
Garantia Motofil

2. Características dos Elementos

Elementos	Descrição Elementos
<p data-bbox="379 501 549 521">Robot 100iD/10L</p> 	<p data-bbox="719 501 1323 584">Robot antropomórfico de 6 eixos, com punho "oco", para uma integração da tocha com menos volume e melhores acessos de soldadura.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="719 595 1043 616">- Número de eixos controlados: 6 <li data-bbox="719 624 1023 645">- Alcance sem tocha: 1636 mm <li data-bbox="719 654 1190 674">- Capacidade de carga máxima no 6º eixo: 10 Kg <li data-bbox="719 683 1019 703">- Repetitividade: (+/-) 0,03 mm
<p data-bbox="379 781 651 837">Controlador Fanuc R-30iB - Cabinet A</p> 	<p data-bbox="719 781 1265 837">Consola Fanuc i-Pendant (LCD tátil) Software completo de soldadura arco "FANUC Arc Tool"</p>
<p data-bbox="379 1019 699 1075">Sistema de seguimento de junta TAST</p> 	<p data-bbox="719 1019 1323 1232">Sistema que permite a correção de trajetória via parâmetros de soldadura, permitindo assim soldas de alta qualidade. Sistema de soldadura multipassada, programada através da consola Teach Pendant. Na 1º passagem ele faz a memorização da trajetória, e para as passagens seguintes é efetuada uma repetição da trajetória original adicionada de um deslocamento.</p>
<p data-bbox="379 1332 692 1388">Sistema de localização de peça Touch Sensing</p> 	<p data-bbox="719 1332 1251 1388">Sensor de toque por contacto elétrico para deteção de posição da peça.</p> <p data-bbox="719 1397 1323 1453">Este sistema permite ainda a procura de uma peça em 1, 2 ou 3 dimensões com ou sem rotação.</p> <p data-bbox="719 1462 1066 1482">Os circuitos de deteção podem ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="719 1491 1251 1512">- Por curto-circuito mediante o equipamento de solda; <li data-bbox="719 1520 1219 1541">- Mediante um circuito próprio isolando a potência.

	<ul style="list-style-type: none"> - Ciclo trabalho 60% (40°C): 430A; - Tensão Rede (50/60 Hz): 400V; - Voltagem em circuito aberto: 76V - 83V. <p>Desbobinador:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Montado sobre o braço robot J3; - 2 Motores e 4 roletes de arrasto; - Velocidade de arrasto de 1 a 25m/min; - Diâmetro de fio admissíveis: 0,6mm a 1,6mm. <p>Refrigerador com circulação de água em circuito fechado.</p>
<p>Tocha de soldadura Binzel ABIROB W500, 22°, refrigerada</p> 	<p>Refrigeração: Água Capacidade: 500 A, 100 % ciclo de trabalho Arame – Ø: 0,8 – 1,6 mm Sistema Anti-colisão</p>
<p>Kit Manutenção Tocha BINZEL</p> 	<p>Sistema automático de limpeza da tocha Binzel por fresa com unidade de pulverização:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sistema que atua internamente no bocal da tocha, limpando com fresa os depósitos acumulados no mesmo, aplicando também líquido anti-aderente a projeções através de um bico pneumático. <p>Guilhotina de corte de fio:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acessório que controla o comprimento livre de arame, proporcionando o mesmo "stick-out" a cada início de ciclo de trabalho, resultando numa localização de junta mais precisa.

Prop. 220345-PT-Bysteel, SA

motofil

<p>Sistema Monobloco 4000x1200x1000 Kg</p> 	<p>Estrutura única mecano-soldada para integração de todo o sistema robotizado, composto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2x Posicionadores rotativos tipo torno; servo-controlados, com as seguintes características cada um: <ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de carga: 1000 Kg - Número de eixos: 1, independentes - Distância entre pontos: 4000 mm - Diâmetro máx. soldadura: 1200 mm - 1x Track para translação do robot, com as seguintes características: <ul style="list-style-type: none"> - Curso útil: 3000 mm - Acionamento: Servo-Controlado - 2x Barreiras metálicas centrais de proteção com acionamento automático pneumático vertical. - Suporte para Bobine de Arame de 15 Kg na base do robot - Alimentação: 3 x 400 VAC + PE // 50/60Hz - Ar Comprimido: 6 bar
<p>Aro de Indexação</p>	<p>Suporte para indexação de gabaritos em estrutura mecano-soldada e mecanizada</p>
<p>Conjunto de Barreiras Foto-Eléctricas</p> 	<p>Barreiras para proteção do operador, impedindo-o de invadir a área interior da célula durante o ciclo de trabalho.</p> <p>Aprovação CE</p>

Prop. 220345-PT-Bysteel, SA

motofil

<p>Software iWeld Light</p> 	<p>Interface Homem-Máquina (HMI) desenhado pela MOTOFIL S.A., incorporado no iPendant, desenhado para melhorar e simplificar a experiência de utilização da célula robotizada.</p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Painel controlo: Na página inicial, é possível pausar e parar o programa e seleccionar a substituição do programa que o robot está a executar. - Página de controlo manual: Consiste num conjunto de comandos que permite ao utilizador iniciar funções nas aplicações (Por exemplo: Voltar para a página inicial). - Estatísticas: Contém informação relevante sobre o programa. Contagens, tempos, entre outras informações.
--	---

3. Características dos Serviços

Serviços	Descrição Serviços
Curso Básico Programação Robot Fanuc	<p>A formação é realizada nas instalações do cliente após instalação dos equipamentos e posteriormente nas nossas instalações sempre que o cliente necessitar, desde que agendada com 15 dias de antecedência e dentro da disponibilidade dos cursos disponíveis.</p> <p>O curso contempla:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Iniciação à robótica; - Descrição da unidade mecânica e controlador; - Movimentos e sistemas de coordenadas; - Programação TP-Fanuc.
Formação de Operação e Manutenção da Instalação	<p>Nas instalações do cliente, com o objetivo de operar e manter a instalação fornecida de forma independente para máximo de 3 pessoas.</p>
Receção Técnica na Motofil (FAT)	<p>MOTOFIL S.A. certifica as suas máquinas (CE), o que significa que todos os equipamentos são sujeitos a:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Testes Elétricos; - Lista de verificação de riscos de segurança, dispositivos de comando, arranque, entre outros; - Procedimento de aprovação interna e de análise funcional para facilitar o acesso ao SAT no local do cliente.
Instalação no Cliente	<p>Os serviços de instalação representam todos os trabalhos a serem realizados na montagem do equipamento nas instalações do cliente. Para o efeito:</p> <ul style="list-style-type: none"> - O cliente deve disponibilizar uma ou mais pessoas para ajudar o(s) técnico(s) da MOTOFIL S.A. - A MOTOFIL S.A. considera como disponíveis no local, sob a responsabilidade e custo do cliente, equipamentos de elevação e descarga como, por exemplo, ponte grua e empilhadores; - As horas de trabalho serão das 8 a.m. às 6 p.m., de segunda-feira a sexta-feira, com pausa de uma hora para almoço.

<p>Serviço Programação e Arranque Robótica</p>	<p>Serviço de programação e calibração de trajetórias do robot. Este serviço inclui kit de consumíveis de arranque (conjunto de 3 bicos) e a presença de um técnico especializado durante o período de tempo acordado entre ambas as partes.</p> <p>Definição do processo de soldadura é da responsabilidade do cliente.</p>
<p>Aceitação Final e Testes Funcionais de Aceitação (SAT)</p>	<p>Os testes funcionais de aceitação são executados nas instalações do cliente para verificar se as especificações do equipamento estão de acordo com os requisitos e padrões acordados.</p> <p>Se não for previamente acordado, a instalação será validada nas instalações do cliente de acordo com o protocolo de teste MOTOFIL S.A. e acompanhado pelo documento comprovativo da receção final do equipamento.</p>
<p>Garantia Motofil</p>	<p>A garantia inicia após a receção final do equipamento (SAT) e abrange o fornecimento e/ou instalação de componentes com defeito de fabrico e/ou montagem durante o período definido na proposta comercial.</p> <p>A garantia não abrange consumíveis de soldadura, peças de desgaste (tochas, tubos, cabos, entre outros) nem possíveis problemas decorrentes da má utilização do equipamento.</p>