

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS ROBOTIZADAS PARA SOLDADURA E *CLADDING*

António Ricardo Moreira Leal de Oliveira



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

2015

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: António Ricardo Moreira Leal de Oliveira, N° 1031048, 1031048@isep.ipp.pt

Orientação científica: Isabel Maria de Sousa de Jesus, isj@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Empresa: **ABB**



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

2015

Agradecimentos

A realização deste trabalho acompanhou uma etapa da minha vida profissional e pessoal em que me afastei fisicamente da família e dos amigos, mas mesmo a milhares de quilômetros todos se mantiveram sempre por perto. A eles, o primeiro agradecimento pelo apoio permanente ao longo deste desafio.

Aos colegas e amigos da ABB, principalmente o Igor Kudryashov, a Oksana Vedentsova e o Pavel Leonidov, pela enorme disponibilidade e ajuda que deram quase diariamente para a minha integração na vida quotidiana de Moscovo. Sem eles, tudo podia ter sido mais difícil: desde procurar habitação, abrir a conta no banco, ou simplesmente chamar um táxi.

Ao Professor Manuel Silva do ISEP pela sua orientação, pelo esforço na leitura e pelas sugestões de melhoria que levaram ao enriquecimento deste documento.

Aos membros da KAMAZ que tive oportunidade de conhecer ao participar em várias reuniões técnicas e que sempre mostraram grande disponibilidade na troca de conhecimentos. Em particular, o privilégio de partilhar experiências com o Sr. Firdaus Kabirov, piloto vencedor de várias edições do rally Dakar.

A todos, Muito Obrigado!

Resumo

A utilização de equipamentos robóticos para o processo de soldadura por arco elétrico teve um forte crescimento nas décadas de 80 e 90, altura em que o custo e fiabilidade da tecnologia passou a permitir a integração de robôs em linhas de produção ou em células de fabrico. Depressa cresceram as exigências de uma produção com qualidade repetitiva e facilmente ajustável, e as restrições ao uso de processos manuais ou de tecnologias com pouca flexibilidade. Desde o início do século XXI que a renovação de uma estação de fabrico de peças soldadas para produção em série, especialmente no setor automóvel, parece forçada à integração de robôs industriais, que assim se tornaram símbolos de produtividade.

A KAMAZ encontra-se atualmente a renovar alguns dos seus processos de fabrico, incluindo as áreas de soldadura por arco ou *cladding*. Esta Dissertação aborda o trabalho elaborado, depois de contratualizada com a ABB Rússia a instalação de novas células de fabrico robotizado nesta empresa. Este projeto tem início com o levantamento das necessidades, a verificação do processo existente, e a procura da solução tecnológica que se adapte a essas condições e cumpra os requisitos acordados. São realizadas modelações e simulações *off-line* em 3D, usando o *software* RobotStudio da ABB, que permitiram testar cada solução e analisar a sua adequação e viabilidade. Para maior garantia de se obter a qualidade esperada na fusão e deposição do material por processo com arco elétrico revestido a gás, foram realizados testes reais utilizando equipamento robótico em condições baseadas nos testes feitos no ambiente virtual.

Por último, são ajustadas as localizações dos postos de trabalho ao *layout* existente e é feito o balanceamento do tempo de operação manual com o tempo do processo robotizado. Este projeto de Tese termina com a aceitação do cliente para a solução encontrada e para os resultados dos testes reais de ambos os processos.

Palavras-Chave

Cladding, robótica, RobotStudio, soldadura

Abstract

The use of robotic equipment for the arc welding process had a strong growth in the 80s and 90s, when the cost and reliability of the technology started to allow the integration of robots in production lines or manufacturing cells. Quickly have grown the demands of production with repetitive quality and easy to adjust, and the restrictions on the use of manual processes or technologies with low flexibility. Since the beginning of the twenty-first century the renewal of a manufacturing station for welded parts in serial production, especially in the automotive sector, seems forced to the integration of industrial robots which became symbols of productivity.

KAMAZ is now renewing some of its manufacturing processes, including the areas of arc welding or cladding. This Master Thesis deals with the work done after being contracted with ABB Russia the installation of new robotic manufacturing cells in this company. This project begins with the statement of requirements, verification of the existing process, and the search for the technological solution that suits these conditions and meets agreed requirements. Modelling and offline 3D simulations were performed using the ABB RobotStudio software, which allowed testing each solution and analyze its suitability and viability. For greater assurance of obtaining the expected quality in fusion and deposition of the material on gas shielded arc welding process, real tests were performed using robotic equipment in the conditions based on tests made in the virtual environment.

Finally, location of the workstations are adapted to the existing layout, and the manual operation time is balanced with the robotic process time. This Thesis project ends with the customer acceptance for the latest solution and for the results of the real tests performed for both processes.

Keywords

Cladding, robotics, RobotStudio, welding

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2.OBJETIVOS	3
1.3.CALENDARIZAÇÃO	5
1.4.ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. ASPETOS GERAIS DE UM PROJETO INDUSTRIAL COM ROBÔS	7
2.1.O ROBÔ	8
2.2.PRINCIPAIS PARÂMETROS DE UM ROBÔ	21
2.3.EQUIPAMENTO ROBÓTICO ADICIONAL, EIXOS EXTERNOS	29
2.4.SEGURANÇA.....	33
3. O PROCESSO GMAW DE SOLDADURA OU CLADDING	43
3.1.INTRODUÇÃO AO PROCESSO GMAW	44
3.2.O ELÉTRODO	46
3.3.TIPO DE GÁS	50
3.4.VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ELÉTRODO	52
3.5.MODOS DE ARCO	53
3.6. <i>STICKOUT</i> E ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA TOCHA.....	56
3.7.POSIÇÕES DE PROCESSOS DE SOLDADURA E ASSOCIADOS	58
3.8.ESPECIFICIDADES DO <i>CLADDING</i>	61
4. ROBOTIZAÇÃO DE UM PROCESSO GMAW	63
4.1.EQUIPAMENTO ROBÓTICO PERIFÉRICO	63
4.2.EQUIPAMENTO DE PROCESSO	72

4.3.SIMULAÇÃO E PROGRAMAÇÃO <i>OFFLINE</i>	79
4.4.CÉLULAS DE FABRICO	98
4.5. <i>JIG</i> DE PROCESSO	102
5. DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO	105
5.1.DESCRICÃO GENÉRICA DOS DADOS INICIAIS E DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DE <i>CLADDING</i>	105
5.2.DESCRICÃO GENÉRICA DOS DADOS INICIAIS E DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DE SOLDADURA ..	128
6. CONCLUSÕES.....	155
6.1.CÉLULAS E PROCESSO DE <i>CLADDING</i>	155
6.2.CÉLULAS E PROCESSO DE SOLDADURA	156
6.3.CONSIDERAÇÕES FINAIS	157
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	159
ANEXOS	163

Índice de Figuras

Figura 1	Camião da KAMAZ, modelo 6520 [2]	3
Figura 2	Principais fabricantes de robôs industriais e exemplos de manipuladores	11
Figura 3	Unidade de balanceamento de massa de manipulador ABB	12
Figura 4	Robô <i>dual-arm</i> da ABB [9]	15
Figura 5	Controlador IRC5 da ABB e comunicações com periféricos	18
Figura 6	Robô com ferramenta estática, para lazer [11]	20
Figura 7	Manipulador com seis graus de mobilidade	22
Figura 8	Precisão posicional e repetibilidade posicional	28
Figura 9	Precisão em trajeto e repetibilidade em trajeto	28
Figura 10	Eixo externo para translação de um manipulador [16]	30
Figura 11	Exemplo de célula robotizada de soldadura ou <i>cladding</i> [17]	32
Figura 12	Trabalho colaborativo de soldadura [20]	36
Figura 13	Características da radiação do arco de soldadura	41
Figura 14	Princípio de funcionamento do processo GMAW	45
Figura 15	Contorno da penetração usando diferentes gases de revestimento	51
Figura 16	Efeito do gás de revestimento CO ₂ e misturas com argon ou oxigênio	52
Figura 17	Comprimento do arco: velocidade de fio em função da tensão	53
Figura 18	Relação da transferência nos modos de arco curto, misto e <i>spray</i>	55

Figura 19	Posições de soldadura do tipo PA	59
Figura 20	Posições de soldadura horizontal do tipo PB e PC	59
Figura 21	Posições de soldadura do tipo vertical PF e PG	60
Figura 22	Posições de soldadura ao teto do tipo PD e PE	60
Figura 23	Princípio de funcionamento do Bullseye	64
Figura 24	Elemento RC de ligação entre o bocal e o cabo de corrente de soldadura [35]67	
Figura 25	Terminal laser de um sensor ótico da Scansonic para seguimento de junta	69
Figura 26	Formatos de um seguimento de junta de soldadura	71
Figura 27	Equipamentos de processo GMAW do fabricante Fronius	73
Figura 28	Painel de interface da fonte de potência Fronius TPS5000	74
Figura 29	Interface Fronius TPS5000 em modo <i>Job</i> , com um robô	76
Figura 30	Resposta da fonte de potência ao sinal de soldadura do robô	77
Figura 31	Direções da definição de carga do alimentador de fio	78
Figura 32	Janela do RobotStudio com estação de processo GMAW	82
Figura 33	<i>Freehand</i> da tocha sobre uma peça para processo GMAW	83
Figura 34	Editor <i>offline</i> do programa RAPID	85
Figura 35	Consola de programação virtual do RobotStudio	85
Figura 36	Exemplo de um programa RAPID de movimentação	90
Figura 37	Exemplo de um programa de movimentação com zonas	91
Figura 38	Ajuste e execução das instruções de procura com SmarTac	92
Figura 39	Edição do dado <code>weld1</code> na consola de programação	94

Figura 40	Formas de oscilação num dado <i>weavedata</i> [42]	95
Figura 41	Parâmetros da oscilação	96
Figura 42	Instruções RAPID de processo de soldadura	96
Figura 43	Controlador externo do sistema ótico de seguimento de junta	98
Figura 44	Células de processo GMAW com dois postos de trabalho partilhado [43]	99
Figura 45	Posição típica de um painel do operador	100
Figura 46	Local e disposição da barreira de segurança	101
Figura 47	Vedações de segurança de uma célula de processo GMAW	102
Figura 48	<i>Jig</i> manual (esquerda) e <i>Jig</i> automatizado (direita)	104
Figura 49	Modelo inicial em RobotStudio da célula de <i>cladding</i>	107
Figura 50	Primeiro protótipo de <i>Jig</i> de <i>cladding</i> com seis peças	108
Figura 51	Canais de circulação do líquido refrigerante através do <i>Jig</i>	109
Figura 52	<i>Jig</i> de <i>cladding</i> com duas peças	110
Figura 53	Massa e centro de massa do <i>Jig</i> estimados através do SolidWorks™	111
Figura 54	Diagrama de carga do posicionador ABB IRBP600K	112
Figura 55	Pontos de manipulação com pinça de dois dedos	113
Figura 56	Testes da pinça de manipulação com robô ABB	114
Figura 57	Medição da temperatura no ponto de manipulação	116
Figura 58	Paletes de peças de <i>cladding</i> e robô de manipulação	117
Figura 59	Diagrama de carga do IRB4600-60/2.05 com punho vertical e centro de massa da peça transportada	118

Figura 60	Teste em RobotStudio do alcance dos robôs de <i>cladding</i>	119
Figura 61	Diagrama de carga do manipulador IRB1600-6/1.45 com a massa da tocha	120
Figura 62	Testes iniciais do processo de <i>cladding</i>	124
Figura 63	Testes do processo de <i>cladding</i> em cordões longitudinais	125
Figura 64	Forma e dimensões do deslocamento em ziguezague do robô	125
Figura 65	Teste de <i>cladding</i> com cordões transversais	126
Figura 66	Modelo inicial da célula de soldadura ocultando vedações de segurança	129
Figura 67	Localizações da flange (esquerda), bucha (centro) e suporte (direita) no eixo médio	130
Figura 68	Teste de alcances do robô de manipulação de peças IRB6620	132
Figura 69	Testes de alcances do robô de manipulação de peças IRB6700	133
Figura 70	Restrição no diâmetro do bocal da tocha de soldadura	134
Figura 71	Primeiro protótipo do <i>Jig</i> de soldadura	135
Figura 72	Limites do centro de massa do posicionador IRBP600D	136
Figura 73	Irregularidades e impurezas no anel de fixação central do eixo	136
Figura 74	Diagrama de carga do IRB6640-235/2.55 e centro de massa do eixo	138
Figura 75	Teste virtual e real de soldadura com eixo suportado em robô	138
Figura 76	Limites do centro de massa do posicionador IRBP500A	139
Figura 77	Teste virtual e real de soldadura com eixo suportado em posicionador	140
Figura 78	Aspetto da folga entre o eixo e a bucha	141
Figura 79	Variação da velocidade nos cordões de soldadura do suporte	141

Figura 80	Aspeto visual do cordão de soldadura entre o eixo e o suporte	142
Figura 81	Aspeto visual do cordão de soldadura entre o eixo e a bucha	142
Figura 82	<i>Jig</i> de soldadura para montagem manual de peças	145

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização do projeto	5
Tabela 2	Comparativo dos tipos de atuadores de juntas [4]	10
Tabela 3	Comparativo de posicionadores de vários eixos	31
Tabela 4	Conceitos de trabalho colaborativo	37
Tabela 5	Requisitos de composição química para elétrodos de aço macio	49
Tabela 6	Efeitos da dimensão do <i>stickout</i> no cordão	57
Tabela 7	Efeitos do ângulo da tocha no cordão	58
Tabela 8	<i>Software</i> de simulação de alguns fabricantes de robôs industriais	79
Tabela 9	Comparativo de custo e características de alguns elétrodos para <i>cladding</i>	122
Tabela 10	Parâmetros dos testes de <i>cladding</i> com cordões longitudinais	124
Tabela 11	Tempos de processo de <i>cladding</i>	127
Tabela 12	Tempo de ciclo para cada célula de <i>cladding</i>	127
Tabela 13	Conceitos para manipulação das peças	131
Tabela 14	Limites do centro de massa em função do peso total, no IRBP600D	135
Tabela 15	Composição das peças para soldadura	137
Tabela 16	Limites do centro de massa em função do peso total, no IRBP500A	139
Tabela 17	Tempo de ciclo para cada célula de soldadura	143
Tabela 18	Tempo de ciclo do operador no posto de soldadura manual	144
Tabela 19	Tempo de ciclo revisto para cada célula de soldadura	146

Tabela 20	Tempo de ciclo do operador com montagem manual de peças	147
Tabela 21	Fator f_M da fórmula de cálculo de limite de carga	151
Tabela 22	Limites recomendados de carga acumulada	152

Acrónimos

AC	–	<i>Alternating Current</i>
A/D	–	<i>Analógico/Digital</i>
ANSI	–	<i>American National Standards Institute</i>
AOPD	–	<i>Active Opto-Electronic Protection Devices</i>
AWS	–	<i>American Welding Society</i>
CAD	–	<i>Computer Aided Design</i>
CEN	–	<i>Commitee for European Standardization</i>
CMT	–	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	–	<i>Comando Numérico Computorizado</i>
CPU	–	<i>Central Processing Unit</i>
CTWD	–	<i>Contact Tip to Work Distance</i>
DCS	–	<i>Dual Check Safety</i>
DVD	–	<i>Digital Versatile Disc</i>
EPS	–	<i>Electronic Position Switches</i>
GDL	–	<i>Graus De Liberdade</i>
GDM	–	<i>Graus De Movimento</i>
GMAW	–	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
HD	–	<i>Harmonic Drive</i>

IEC	–	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFR	–	<i>International Federation of Robotics</i>
ISO	–	<i>International Standard Organization</i>
MAG	–	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	–	<i>Metal Inert Gas</i>
NIOSH	–	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
PC	–	<i>Personal Computer</i>
PCI	–	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PLC	–	<i>Programmable Logic Controller</i>
PTC	–	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
RAM	–	<i>Random-Access Memory</i>
RDC	–	<i>Resolver Digital Converter</i>
RIA	–	<i>Robotic Industries Association</i>
RIO	–	<i>Remote I/O</i>
SCARA	–	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
SMB	–	<i>Serial Measurement Board</i>
TAST	–	<i>Through Arc Seam Tracking</i>
TIG	–	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TPS	–	<i>TransPuls Synergic</i>
UL	–	<i>Underwriters Laboratory</i>

USB – *Universal Serial Bus*

UV – Radiação Ultravioleta

1. INTRODUÇÃO

A KAMAZ foi criada em 1969 como complexo de fábricas Kama para a produção de caminhões pesados (Associação de Produção KamAZ). Em 1990, a PA KamAZ foi reorganizada numa sociedade anónima. O primeiro veículo saiu da correia transportadora em 16 de fevereiro de 1976. Desde então foram produzidos mais de 2 milhões de veículos e cerca de 2,8 milhões de motores. Um em cada três caminhões de 14-40 t de peso bruto usado na Rússia e nos estados que faziam parte da antiga União Soviética é KAMAZ. Além disso, os veículos KAMAZ são usados em mais de 80 países [1].

De momento a KAMAZ está envolvida num processo de melhoria do seu processo produtivo que envolve a robotização de algumas tarefas de soldadura e de tratamento de superfície pelo método de *cladding*.

A ABB é um dos principais fabricantes de robôs e soluções de robótica industrial. Desde 1975 que a ABB disponibiliza aos seus clientes o equipamento robótico ou a solução robotizada completa para a soldadura por arco, tendo esta aplicação sido uma das impulsionadoras do mercado e da tecnologia de robótica.

A representação local da ABB para a Federação Russa, com sede em Moscovo, estabeleceu em meados de 2014 uma ligação contratual com a KAMAZ para a robotização de algumas das suas tarefas de soldadura e *cladding* que, embora já se realizem no processo de fabrico atual, ocorrem de modo essencialmente manual suportadas em

automatismos pouco flexíveis e em fim de vida. No caso específico do processo de *cladding* foi solicitada também a alteração do método de deposição existente.

A realização deste projeto surge na sequência do convite que me é dirigido pela ABB Rússia para integrar durante 12 meses a equipa local de engenharia de aplicações de robótica, no centro de testes localizado em Moscovo, gerindo-a e participando ativamente no desenvolvimento do projeto de robotização dos processos mencionados para a KAMAZ. Este desafio centrou-se na responsabilidade pelo sucesso técnico na concretização deste projeto. Por este motivo, enquanto representante da marca ABB e nos termos contratualizados, a exposição que se segue pode também mencionar a KAMAZ ou os seus colaboradores recorrendo às expressões “cliente” ou “utilizador”.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Como já mencionado, este projeto surge da necessidade da KAMAZ automatizar uma parte da sua linha produtiva onde são realizados processos de soldadura e *cladding*. As peças em causa fazem parte do conjunto de componentes localizado na parte inferior do camião que transmite a potência às rodas, conjunto este também designado na indústria automóvel por *drivetrain*. Pretende-se a soldadura de três peças pertencentes aos eixos médio e traseiro do camião, assim como o revestimento de superfície, por *cladding*, de outros cinco modelos de peças utilizadas para suportar a suspensão traseira do veículo. O início dos trabalhos aqui mencionados ocorre na sequência de um acordo contratual entre a ABB e a KAMAZ, com origem num caderno de encargos deste cliente. Assim, a base documental do projeto caracteriza desde logo, de forma sumária, o modo de funcionamento e os objetivos pretendidos para as células de fabrico. Existe um orçamento básico mas descritivo dos elementos principais do projeto, equipamentos e mão-de-obra, assim como um cronograma estimado para a sua execução. É conhecido o *layout* que mostra o espaço disponível na fábrica para a instalação dos novos equipamentos e prevê as zonas de trabalho das células, espaços de operação manual e localização preferencial da alimentação de peças. Estão quantificados os modelos de peças envolvidos neste projeto e as suas características técnicas principais: composição, dimensões e tolerâncias. A execução do projeto prevê também a obtenção de uma produção anual mínima de peças, para o total das células fornecidas. Por razões de confidencialidade, esta Dissertação apenas expõe as quantidades de peças produzidas individualmente por cada uma das células desenvolvidas,

embora a base apresentada para estudo tenha sido a capacidade de produção total necessária por cada ano. Outros aspetos técnicos disponíveis inicialmente, e que poderiam também ser relevantes para uma maior compreensão da solução obtida, e para análise dos testes realizados, são aqui restritos quanto à sua exposição, por razões de confidencialidade tecnológica naturais a um processo de fabrico do setor automóvel. Exemplos disso são os desenhos das peças, o maior detalhe quanto às suas características e tolerâncias, e alguns métodos ou meios de produção existentes.

A Figura 1 ilustra um camião KAMAZ modelo 6520, um dos modelos onde são utilizadas as peças mencionadas ao longo da execução do projeto.



Figura 1 Camião da KAMAZ, modelo 6520 [2]

Em resumo, o conhecimento e a tecnologia da ABB para robotização de processos por arco elétrico devem levar à implementação de uma nova solução avançada de fabrico robotizado com vista à melhoria da qualidade e redução da mão-de-obra especializada necessária para estes processos da KAMAZ.

1.2. OBJETIVOS

Recorrendo à tecnologia necessária, a robotização do processo de fabrico de peças por arco elétrico revestido a gás, para soldadura ou *cladding*, deverá permitir à KAMAZ:

- melhorar a qualidade dos cordões de soldadura dos três componentes dos eixos;
- melhorar a qualidade do processo de revestimento de cinco modelos de peças de apoio à suspensão traseira, com endurecimento da superfície de contacto;

- aumentar a produção com ambos os processos;
- diminuir o custo de matéria-prima, ao otimizar o material uniformemente depositado no processo de soldadura, e ao substituir o método de *cladding* existente por outro processo através de arco elétrico revestido a gás.

Para atingir estes objetivos, pode resumir-se a realização deste trabalho à execução das seguintes atividades:

- efetuar o levantamento da situação atualmente existente na empresa KAMAZ;
- analisar o estado da arte em aplicações robotizadas para o processo de soldadura por arco elétrico e *cladding*;
- efetuar o levantamento das possíveis soluções alternativas para o problema, tendo em consideração as opções em termos de manipuladores e posicionadores, atuadores finais, estratégia para alimentação das peças e para saída dos produtos acabados;
- realizar a modelação 3D e a simulação das possíveis soluções que se afigurem como mais promissoras;
- escolher a solução a implementar e efetuar o desenvolvimento dessa solução;
- realizar testes parciais e reais à solução escolhida, antes do início do fabrico da solução completa;
- aferir a concordância da solução com as especificações;
- adequar o *layout* às necessidades específicas do cliente;
- balancear os tempos de ciclo e de operação das células.

Pretende-se assim a concretização dos principais estudos e testes que levem à entrega do sistema ao cliente de acordo com os requisitos. Este projeto não acompanha o processo de fabrico completo e de arranque do novo sistema nas instalações do cliente, cenário previsto desde o início e motivado pela centralização do fabrico das células de processo por arco elétrico, e da sua instalação no cliente final, num modelo que a ABB designa por *FlexArc*. Trata-se de um modelo padronizado de fabrico e instalação de células que, para o espaço Europeu, se localiza em Praga, na República Checa. Assim, este projeto realiza-se até ao ponto em que a ABB procederá ao fabrico e instalação dos equipamentos baseados no padrão *FlexArc*, depois de aceites pelo cliente os resultados dos testes e a solução encontrada. Os testes reais de processo realizam-se com equipamentos disponíveis nos centros de testes da ABB para esse efeito, em Moscovo e em Praga, sendo entregue ao

cliente apenas o equipamento novo que é produzido posteriormente, após definição das especificações.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A realização deste trabalho é feita ao longo de cerca de um ano, coincidente com a duração do contrato local de trabalho com a ABB Rússia, cujo início foi em Agosto de 2014 e terminou 12 meses depois. Um atraso na obtenção do visto de trabalho viria a adiar a deslocação para Moscovo e o início dos trabalhos em cerca de 1 mês. A Tabela 1 ilustra as principais atividades deste projeto e a sua calendarização.

Tabela 1 Calendarização do projeto

Nome da etapa	2014				2015							
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Chegada a Moscovo, Rússia	■											
Levantamento das especificações	■	■										
Simulação virtual 3D de diferentes soluções			■	■								
Preparação e execução dos testes reais em Moscovo				■	■							
Exposição ao cliente dos resultados intermédios						■						
Remodelação da solução encontrada						■	■					
Transporte de materiais de Moscovo para Praga								■				
Preparação e execução de testes em Praga								■	■	■		
Validação dos testes finais, <i>layout</i> e tempos											■	
Acordo final para o início de produção e entrega											■	■
Retorno a Portugal												■

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente Dissertação expõe os conteúdos e o trabalho realizado no âmbito deste projeto sendo constituído por seis capítulos e um anexo descritivo do conteúdo em formato *Digital Versatile Disc* (DVD).

No Capítulo 1 é feita a apresentação do projeto e desta Dissertação.

De seguida, no Capítulo 2, são apresentados os aspetos gerais de um projeto industrial com robôs. Com vista à robotização dos processos de fabrico por arco elétrico, este capítulo introduz o estado da arte quanto ao equipamento robótico e os aspetos a ter em conta na seleção dos equipamentos específicos para a robotização desse processo.

No Capítulo 3 é apresentado o processo para soldadura ou *cladding* por arco elétrico revestido a gás. É feita uma explicação deste processo, dos materiais envolvidos, os principais parâmetros a considerar e alguns métodos de realização.

O Capítulo 4 apresenta a combinação dos temas abordados nos capítulos anteriores. Assim se pretende conjugar o conhecimento sobre o equipamento robótico com as especificidades de um processo por arco elétrico, resultando nas considerações necessárias e nos métodos para concretizar a robotização de um processo deste tipo.

O Capítulo 5 aborda especificamente o projeto para a KAMAZ. Expõe os requisitos iniciais e a forma como foram obtidas as soluções finais que melhor combinaram a obtenção das características técnicas pretendidas com a adequação aos aspetos previamente contratualizados.

Por último, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões do trabalho realizado.

2. ASPETOS GERAIS DE UM PROJETO INDUSTRIAL COM ROBÔS

O desenvolvimento do trabalho em curso implica o conhecimento de alguns aspetos gerais de um projeto industrial com recurso a robôs, e a preparação dos trabalhos com vista à seleção dos equipamentos robóticos e respetivos periféricos de suporte em conformidade e com as características necessárias ao funcionamento desejado do sistema robótico no seu conjunto.

Neste capítulo, há um esforço de concentração da informação apresentada em torno do facto de se tratar de um trabalho de soldadura e *cladding*, evitando por isso referências a aspetos ou características que sejam específicas de outro tipo de aplicações robotizadas, como por exemplo a pintura. Além da referência aos aspetos relacionados com os robôs industriais, este capítulo apresenta também algumas características relacionadas com a célula de soldadura ou *cladding* e outros equipamentos necessários à robotização destes processos. Inclui também uma abordagem do tema da segurança com robôs industriais, assim como para a aplicação específica do processo de soldadura por arco elétrico.

2.1. O ROBÔ

Segundo a definição apresentada pela Norma da *International Organization for Standardization* (ISO) 8373, um robô é uma máquina manipuladora com três ou mais eixos, multifuncional e controlada automaticamente, reprogramável, e que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial. Deve poder adaptar-se a diferentes aplicações com iterações físicas e, por ser reprogramável, executar movimentos ou funções que podem ser alterados sem alterações físicas sobre ele, com exceção da própria memória. Por eixos, entende-se a direção usada para especificar o movimento do robô como linear ou rotativo [3].

Esta definição permite limitar o tipo de máquina industrial que pode ser designada por robô. A designação de um sistema ou processo como robotizado tem implícito o recurso a, pelo menos, um robô. Alerta também para o erro que é facilmente cometido ao tratar um braço robótico existente numa célula ou linha de fabrico, por si só, como o “robô”. Na maioria dos robôs industriais produzidos atualmente o robô é constituído por um ou vários braços manipuladores com acionamento por motores elétricos, e o respetivo comando e controlo encontra-se num armário separado. Portanto, só ao conjunto do(s) manipulador(es) e do seu armário controlador pode ser dada, corretamente, a designação de robô.

2.1.1. COMPONENTES DE UM ROBÔ

De um modo geral, um robô industrial é constituído pela integração dos componentes descritos de seguida.

2.1.1.1. ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura mecânica é o conjunto de componentes mecânicos ligados entre si que executam o movimento do robô, sendo mais vulgarmente designada por braço ou por manipulador. Esta varia conforme o tipo de robô, mas é essencialmente composta por juntas, elos e uma base. O conjunto e configuração destes corpos forma um modelo cinemático que define a estrutura mecânica, que por sua vez pode permitir o agrupamento de robôs consoante o tipo de manipulador, tema que será retomado adiante. Nos robôs industriais o acionamento das juntas pode ser de origem elétrica, hidráulica ou pneumática, sendo o atuador elétrico, por meio de servomotores, claramente o mais frequente. Os

motores elétricos mais utilizados nos manipuladores são do tipo síncrono *Alternating Current* (AC), com rotor de íman permanente, e tensão nominal tipicamente até 480 V. O motor pode estar acoplado diretamente à junta, caso o binário desse acionamento assim o permita, mas é mais frequente que entre o motor e a respetiva junta esteja colocada uma caixa redutora. Para uma mesma corrente consumida, maior tensão elétrica no servomotor corresponde à disponibilidade de mais rotações por minuto para obter maior binário na junta, ou seja, implica a existência de uma relação de transmissão com caixa redutora. A substituição do lubrificante ou das correias de transmissão das caixas redutoras das juntas representam, aliás, a principal operação de manutenção preventiva que se observa nos manipuladores de robôs industriais.

O servomotor tem habitualmente acoplado um travão eletromecânico, que sustenta a posição da junta na eventual falta de energia elétrica ou numa paragem de emergência. Alguns fabricantes permitem configurar a atuação automática do travão do motor quando é expectável um período longo de paragem do manipulador durante um ciclo de trabalho, permitindo então desligar a corrente elétrica dos motores, com a correspondente poupança de energia. No servomotor, o travão representa uma ligação mecânica entre o estator e o rotor que é atuada por meio de indução de bobina elétrica sobre um dispositivo metálico. Na ausência de energia elétrica, e por meio de molas, existe uma força de atrito entre o estator e o rotor que provoca a travagem. Com energia elétrica, o atuador reage com força superior às molas e elimina essa força de atrito, libertando o motor. Note-se ainda a existência de sensores de temperatura colocados no motor. Tratam-se tipicamente de termístores tipo *Positive Temperature Coefficient* (PTC), ou seja, semicondutores cujo valor resistivo aumenta com o aumento de temperatura no seu corpo. A medição de uma resistência elétrica elevada neste sensor representa um excesso de temperatura do motor, ou uma falha da ligação elétrica do próprio sensor, ambas as situações indicadoras de necessidade de manutenção.

O acionamento hidráulico parece ser a opção apenas nos casos em que são manipuladas grandes cargas, sendo a força ou o binário obtido a principal vantagem deste acionamento. O acionamento pneumático gera grandes dificuldades de controlo do manipulador, pelo que a sua utilização num robô é raramente visível.

A Tabela 2 apresenta um comparativo das principais características, entre os tipos de atuadores de juntas de robôs mencionados.

Tabela 2 Comparativo dos tipos de atuadores de juntas [4]

Característica	Tipos de atuadores		
	<i>Elétricos</i>	<i>Hidráulicos</i>	<i>Pneumáticos</i>
Controlo	Fácil. Possibilidade de ser elaborado.	Hoje em dia mais facilitado com as electro servo-válvulas	Muito difícil devido a questões de compressibilidade do ar
Velocidades	Grande	Média/Grande	Muito grande
Binário a baixa velocidade (acelerações)	Pequenos/Médios	Grande	Pequenos
Precisão	Boa. Limitada pelo uso de transmissão	Boa	Má, excepto em operações a posições fixas.
Funcionamento em situação estática	Mau. Requer travões.	Excelente. Trata-se de funcionamento normal.	Bom. Não há risco de danificação do sistema.
Questões ambientais	A presença de arcos elétricos pode ser indesejável.	Perigo de fugas de óleo.	Sistemas limpos. Risco de poluição sonora de componentes, compressores e das fugas.
Custos	Relativamente baixos	Altos	Relativamente baixos

Os manipuladores são também constituídos por sensores que fornecem ao controlador informações sobre o estado ou posição do braço. Habitualmente estes sensores convertem uma posição mecânica num sinal elétrico, pelo que se designam estes dispositivos com mais rigor como sendo transdutores. Os mais utilizados são os *encoders* e os *resolvers*. Destes dois tipos de transdutores, e ao contrário do que se verifica no tipo de acionamento utilizado em robôs, as opções seguidas pelos principais fabricantes de robôs industriais não parecem mostrar uma tendência. Os fabricantes de origem Europeia ABB e KUKA utilizam maioritariamente *resolvers* no controlo de posição, enquanto as marcas Japonesas FANUC e MOTOMAN optam pelos *encoders*. Por um lado, a opção digital do *encoder* permite obter maior precisão, no sentido que a leitura e comunicação do sinal é mais imune a ruído eletromagnético. Por outro lado, o *resolver* é um dispositivo analógico mais robusto para ambientes industriais, com maior resistência a condições adversas de temperatura, vibração ou choques mecânicos, humidade ou poeiras, o que se traduz num tempo de vida útil superior. A comunicação do sinal entre o *encoder* e o controlador é por ligação série. Se utilizado um *resolver*, existe necessidade de um componente intermédio de conversão do sinal analógico em sinal digital, ou seja, um conversor Analógico/Digital (A/D). A ABB designa este componente por *Serial Measurement Board (SMB)*, tratando-se de um circuito colocado no interior do manipulador que recebe o sinal analógico de cada um dos *resolvers* do manipulador, faz a conversão para sinal digital, e transmite os dados

ao controlador via comunicação série RS-422. A KUKA designa este conversor A/D por *Resolver Digital Converter (RDC)*.

A Figura 2 ilustra modelos dos principais fabricantes de robôs industriais, que colocam no mercado de robótica industrial uma gama com fabrico em série de manipuladores de seis eixos, e a imagem de alguns manipuladores de cada um desses fabricantes. Para a seleção das imagens apresentadas foi escolhido aleatoriamente um dos manipuladores mais pequenos da gama de cada fabricante, com capacidade de carga entre 3 kg e 10 kg e alcance inferior a 1 m.



Figura 2 Principais fabricantes de robôs industriais e exemplos de manipuladores

A construção mecânica de um manipulador recorre a diferentes materiais, que vão desde o ferro fundido, aço, alumínio, plástico, ou materiais compósitos como a fibra de carbono.

Se, por um lado, a utilização com desempenho industrial de uma máquina requer robustez, por outro, o peso próprio de um manipulador implica maior consumo energético na sua própria sustentação e o seu controlo é mais difícil. Pretende-se também que, qualquer que seja o material utilizado, as características de elasticidade sejam suficientemente baixas para não afetarem o posicionamento rápido e repetitivo do manipulador e a elevada

plasticidade não coloque em causa esse reposicionamento após quaisquer esforços adicionais imprevistos sobre o manipulador, ou em caso de colisão acidental.

Nos robôs com maior capacidade de carga, que aqui se entende por várias dezenas de quilogramas, alguns fabricantes colocam unidades de balanceamento de juntas, isto é, cargas mecânicas que compensam o peso próprio da construção de um elo do manipulador, para que a carga na junta de efeito sobre esse elo fique mais equilibrada e requeira menor binário no seu acionamento. Esta carga mecânica é tipicamente constituída por uma massa metálica ou por outro material pesado, por molas, ou recorrendo a um cilindro fechado atuado por gás hidráulico. O facto de esta carga representar uma série de componentes com um custo de produção adicional, parece ser compensada pela redução do binário que representa um menor tamanho dos motores, e respetivo consumo energético, assim como na redução nas caixas de engrenagem. A Figura 3 representa a unidade de balanceamento que atua sobre a junta rotativa número dois, compensando a massa do elo designado por braço superior, do robô ABB modelo IRB4400. A existência destas unidades de balanceamento restringe a posição de montagem do manipulador ao solo, ou com pouco ângulo de inclinação da base face ao plano horizontal.

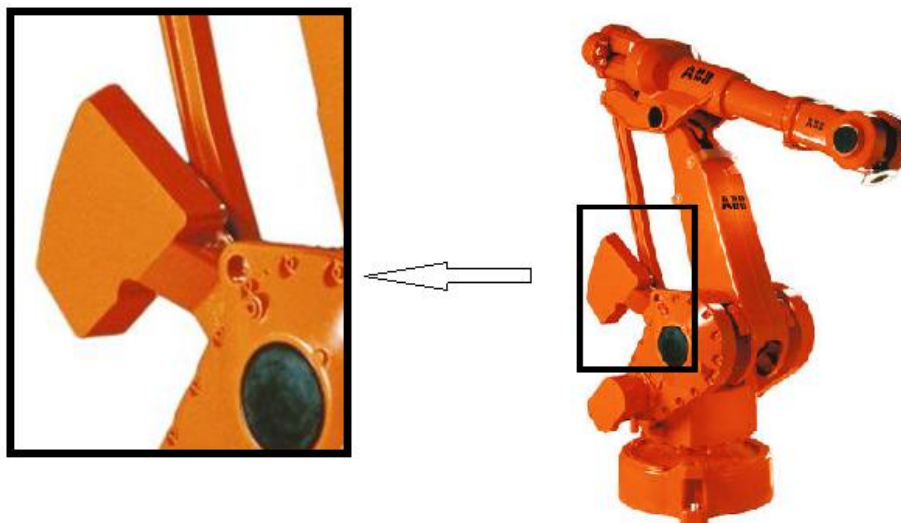


Figura 3 Unidade de balanceamento de massa de manipulador ABB

Na Figura 3 observa-se também a existência de dois elos de ligação mecânica do braço superior até ao braço inferior. Este par de elos paralelos, ou o elo adicional, representa uma

diferença no modelo cinemático deste manipulador ao criar uma malha fechada de ligação entre elos e esta característica no seu modelo cinemático representa especificidades de desempenho, pelo que é utilizada na própria designação do manipulador, neste caso, como manipulador com braço paralelo. Se todas as juntas do manipulador forem em cadeia cinemática aberta, ou em série, então trata-se de um manipulador de estrutura em série. A existência do elo paralelo no eixo 2, e também considerando a massa de balanceamento referida acima, diminui o binário necessário no acionamento desse eixo. A mecânica de construção dos eixos superiores pode ser mais robusta, para o mesmo binário nos eixos inferiores, comparativamente à estrutura em série. O manipulador com braço paralelo é então mais robusto, e assim especialmente vantajoso nas aplicações de processos mecânicos que transmitam vibração ao manipulador, como exemplo da lixagem, furação, fresagem ou polimento. O manipulador série tem maior liberdade de movimentos nos eixos dois e três, que normalmente se traduz também em maior velocidade angular nesses eixos, assim como na capacidade do braço superior rodar mais do que 180° em torno do eixo três, executando o movimento que os fabricantes tipicamente designam por “*bending backwards*”. Neste caso, a rotação mais rápida do eixo três pode substituir uma rotação mais lenta do eixo um, para obter a mesma posição, com ganho no tempo resultante da realização deste movimento.

A temperatura ambiente recomendada para um manipulador durante o seu funcionamento, entre os modelos mais usuais disponíveis pelos principais fabricantes, situa-se entre os 5° C e os 45° C. Alguns fabricantes desenvolveram modelos para funcionamento em temperaturas ambientes mais adversas, como por exemplo os manipuladores modelo ARTIC do fabricante KUKA, cuja temperatura de funcionamento se deve situar entre -30° C e +5° C. Os limites de temperatura de funcionamento de um manipulador têm por base restrições mecânicas e elétricas associadas à manutenção do seu desempenho: as restrições mecânicas centram-se no desempenho das caixas redutoras das juntas, com variação no atrito interno, e do respetivo lubrificante, cuja variação de temperatura altera a viscosidade e a durabilidade do mesmo. A alta temperatura numa caixa redutora pode também, por exemplo, provocar fugas de lubrificante pelos retentores, derivadas do aumento da pressão pela expansão volumétrica desse lubrificante e pela variação da sua viscosidade. Em termos elétricos, a variação da temperatura resulta na variação do desempenho do servomotor. A resposta dinâmica do movimento de um servomotor está associada a duas

constantes de tempo, elétrica e mecânica, e ambas as constantes de tempo dependem, além de outros, da temperatura de funcionamento. Com o aumento de temperatura do motor, aumenta a temperatura das bobinas e a correspondente resistência elétrica, causando o aumento da constante mecânica e a diminuição da constante elétrica. Nos motores sem escovas existe ainda o efeito adicional de desmagnetização térmica do íman permanente, embora reversível, o que leva ao aumento da constante mecânica do motor [5]. Ignorar estas variações mecânicas e elétricas no desempenho de um manipulador, devido à temperatura ambiente de funcionamento, leva a falhas significativas no controle de posição desse manipulador.

O tipo de caixa redutora utilizada nas juntas dos manipuladores é variada. Embora o tipo de caixa redutora utilizada não seja divulgada pelos fabricantes de robôs, a Nabtesco™, um fabricante de caixas redutoras do tipo cicloide, divulga na sua página de internet [6] que desde 1985 já entregou mais de 2 milhões de caixas redutoras deste tipo (cicloide) para uso específico em robôs industriais, que designa pela série RV. Esta caixa redutora tem como vantagens ser mais compacta e leve do que as caixas redutoras de engrenagem simples com rodas dentadas ou correias, embora estas últimas sejam mais robustas, de desenvolvimento mais flexível e mais fáceis de reparar. Nalguns manipuladores mais pequenos, sendo necessário menor dimensão e binário, também se encontram caixas redutoras do tipo *Harmonic Drive* (HD). Uma caixa redutora do tipo HD raramente necessita de substituição do lubrificante como medida de manutenção periódica o que, aliás, devia ser um fator a ter em conta na escolha de um manipulador industrial, representando um menor custo de manutenção. Como exemplo, o manipulador modelo IRB120 da ABB utiliza caixas redutoras HD em todos os seis eixos deste manipulador, que se depreende pelo tipo de lubrificante utilizado (Harmonic Grease 4B N°2) e, no entanto, a substituição deste lubrificante não está prevista ao longo de toda a vida útil do manipulador [7]. Alguns fabricantes restringem a obtenção do lubrificante das caixas redutoras ao seu fornecimento exclusivo, como aparenta ser o lubrificante HC-1A para os manipuladores do fabricante Panasonic, ou SK-1 para as redutoras HD de alguns manipuladores da MOTOMAN [8].

A estrutura mecânica de um robô pode ser constituída por mais do que um braço ou manipulador, ligados ao mesmo controlador. Como exemplo, a MOTOMAN permite que o seu atual controlador padrão de robôs, que designa por DX200, possa controlar até oito manipuladores, ou o limite de setenta e duas juntas, em simultâneo. A ABB permite que

vários manipuladores ligados ao mesmo controlador possam realizar movimentos coordenados entre si, podendo, por exemplo, dois manipuladores de seis eixos estarem a ser controlados no seu movimento como se de um manipulador de doze eixos se tratasse. Nestas configurações, pode ser difícil interpretar a definição de robô abordada anteriormente e determinar se se trata apenas de um robô ou de vários robôs.

Alguns dos principais fabricantes de robôs industriais comercializam modelos de robô que designam *dual-arm*, tratando-se de um modelo de robô cuja configuração mecânica se assemelha ao tronco e membros superiores de um ser humano. Nalguns casos, este modelo de robô pode ser colocado em funcionamento lado-a-lado na linha de fabrico com operadores humanos, desde que se verifique a conformidade do robô e da sua instalação para trabalhos colaborativos desta forma.

A Figura 4 ilustra o robô *dual-arm* da ABB, que esta designa por YuMi.



Figura 4 Robô *dual-arm* da ABB [9]

Nestes modelos de robô a estrutura mecânica tem uma base comum e o seu uso pressupõe a execução de tarefas que em algum momento se coordenam para executar um trabalho conjunto, tal como fariam as duas mãos de um operador.

2.1.1.2. CONTROLADOR

O controlador é o quadro de comando do manipulador, tipicamente um quadro elétrico. Nele se concentram os equipamentos de processamento e memória usados pelo robô, o controlo da potência para os acionamentos, a leitura do retorno de posição do braço, a gestão das interfaces com o operador ou com outras máquinas e o sistema de seguranças do robô. Consoante a especificidade de cada robô, podem ser encontrados diversos outros componentes no seu controlador. Nos robôs industriais, encontram-se possíveis variações nos modelos de controlador dependendo da potência do manipulador que lhe será conectado, sendo que para os manipuladores de menor alcance e capacidade de carga pode ser utilizado um controlador mais compacto do que nos manipuladores maiores, que requerem maior potência elétrica nos acionamentos. Por isto, nestas variantes de controladores, a diferença encontra-se principalmente na dimensão do *hardware* de potência e na sua distribuição com vista à maior ou menor dispersão térmica. Isto traduz-se na diferente dimensão exterior do quadro, na possível limitação da existência de outros componentes adicionais de interface ou específicos da aplicação robotizada, que em conjunto afetam também o espaço existente para outros componentes que possam ser necessários existir próximos do controlador do robô, preferencialmente no seu interior. Entre os vários modelos de controlador do mesmo fabricante, verifica-se que o modo de operação, a linguagem de programação e o interface com o operador são habitualmente mantidos.

O controlo de um robô pode ser baseado em *Programmable Logic Controller* (PLC) ou numa arquitetura baseada em computador, sendo esta a opção seguida pelos principais fabricantes de robôs industriais. O cálculo das trajetórias e o controlo das funções do robô com o melhor desempenho possível, assim como a necessidade em tornar o robô facilmente programável, levou cada fabricante a desenvolver a sua própria arquitetura de *hardware* e *software* para o controlador, assim como a sua própria interface, não existindo um padrão. Assim, cada fabricante de robôs requer conhecimentos especializados para realizar as tarefas de programação ou prestar manutenção aos seus equipamentos.

A ABB designa o seu controlador comercializado atualmente por IRC5. Este controlador tem integrado um computador industrial baseado em multiprocessador com *Central Processing Unit* (CPU) de arquitetura Pentium®, barramento *Peripheral Component*

Interconnect (PCI), memória volátil *Random-Access Memory* (RAM) e memória não volátil em disco *flash* ou disco rígido.

Dos controladores de robô industriais atualmente no mercado, verifica-se uma tendência para o uso padrão dos interfaces com protocolos cujo nível de *hardware* esteja baseado em *Universal Serial Bus* (USB) ou Ethernet/IP, embora estes ainda se mantenham principalmente para uso na ligação a computadores remotos ou como formas de acesso à memória ou à configuração de dispositivos do próprio robô, e também para salvaguarda externa desse *software*. Para interface com outros componentes periféricos ao robô, com menores quantidades de informação e requisitos na rapidez da troca dessa informação, pode ser usada uma rede de campo. Aqui cada fabricante disponibiliza diversas opções, sendo as mais usuais a Profibus/DP, DeviceNet, EtherCAT, Interbus, Allen-Bradley *Remote I/O* (RIO) e a CC-Link. Note-se também que a utilização de uma destas redes de campo implica, quase sempre, que seja adquirido um adaptador próprio ao fabricante do robô, para montagem no respetivo controlador. Para alguns equipamentos de processo, como impressoras ou leitores óticos de códigos de fabrico, podem ser usadas comunicações série RS232, RS422 ou RS485, pelo que a maioria dos fabricantes de controladores de robôs também disponibiliza, pelo menos, um destes portos de comunicações série por omissão, sendo que um conversor externo pode converter a comunicação entre quaisquer dois destes quatro protocolos.

Na evolução histórica dos controladores de robôs, um dos aspetos mais visíveis é a redução das suas dimensões. Se na década de 1990 a maioria dos controladores de robôs pesava mais de 100 kg e eram difíceis de transportar, hoje em dia os controladores mais pequenos são portáteis manualmente e aproximam-se das dimensões de um computador tipo *desktop*. Pelos equipamentos e pela tecnologia em causa, nada impede que se preveja que esta redução do tamanho de um controlador de robô industrial vá continuar e, se assim for, é natural que uma evolução próxima na robótica industrial seja a integração do controlador no próprio braço manipulador.

A Figura 5 apresenta o aspeto atual do controlador IRC5 da ABB, e ilustra os métodos de conectividade típicos deste controlador com o meio industrial atual. Se a comunicação *Ethernet* entre a rede de computadores da fábrica e o robô inclui o envio de ordens de trabalho para o robô, essa rede pode também ser designada por ‘controlo superior’.

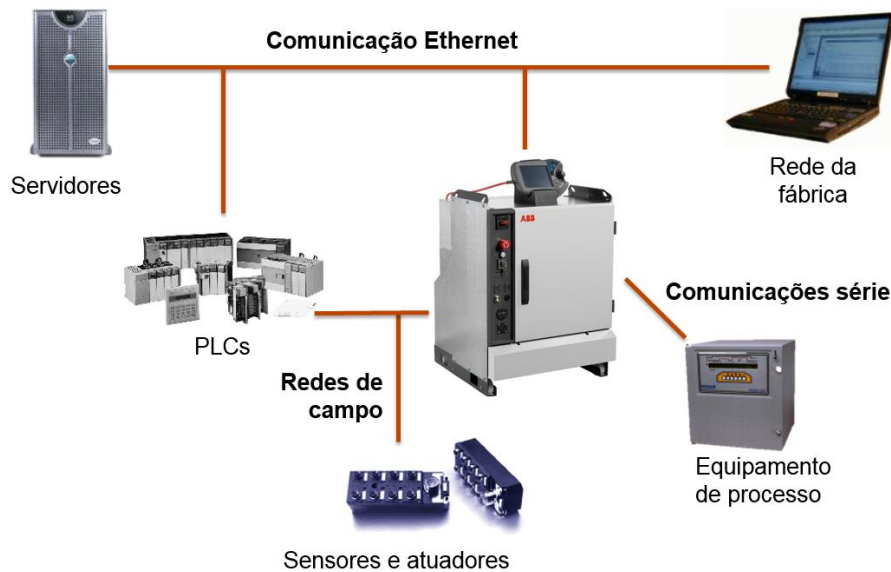


Figura 5 Controlador IRC5 da ABB e comunicações com periféricos

Ao controlador de robô está normalmente associado um dispositivo de interface móvel para o operador, que permita realizar todas as interações habilitadas de comando e controlo do robô. Os nomes mais frequentes para este dispositivo são consola de programação ou *Teach-Pendant*. A consola de programação ainda é vista como parte integrante do controlador, porque assim o era nas primeiras gerações de controladores industriais, mas atualmente a consola de programação é cada vez mais um item opcional. Por um lado, porque as funções de programação e configuração *online* do robô podem ser feitas por um computador pessoal externo e respetivos programas próprios de acesso cedidos pelos fabricantes; por outro lado, porque as funções da interface das consolas de programação atuais, por via de um ecrã colorido e tátil, com tamanho de cerca de cinco a dez polegadas, são substituíveis, na sua maioria, por aplicações de *software* que possam ser executadas em equipamentos de uso corrente como *Smartphones* ou *Tablets*.

Entre o controlador e o manipulador, os fabricantes disponibilizam ligações elétricas por via de cabos pré-fabricados em comprimentos padrão que, com diferenças entre os vários fabricantes e entre os modelos de robô, podem variar entre os 3 m e os 50 m. Verifica-se uma tendência em separar o cabo da ligação elétrica de potência para os servomotores, e o cabo de ligação elétrica para os sensores de posição do manipulador. Havendo várias configurações possíveis de ligação, o cenário mais habitual parece ser a existência de dois cabos separados: o cabo para a alimentação elétrica de potência dos motores, que é

tipicamente designado *power cable* ou ainda *motor cable*, e o cabo de ligação dos sinais de posição do manipulador, que é designado *data cable* ou *signal cable*. No mercado mundial dos grandes fabricantes, podem ser implementadas algumas adaptações locais, como é o exemplo do cabo adicional de massa ou terra, como previsto na norma DIN/EN 60204-1, transposição local Alemã da norma da União Europeia EN 60204-1 [10].

2.1.1.3. FERRAMENTA

Note-se que, segundo a definição de robô apresentada anteriormente em 2.1, a ferramenta de trabalho não parece ser necessária para que uma máquina manipuladora seja considerada um robô. Mas no campo específico dos robôs industriais, e na utilização em automação dos robôs industriais atualmente produzidos pelos principais fabricantes, a presença de uma ferramenta de trabalho adicionada ao manipulador é o cenário mais habitual, assim como, nas aplicações mais comuns desses robôs, a não utilização de uma qualquer ferramenta torna o robô praticamente inútil. Entenda-se ser este o motivo da referência, neste capítulo, à ferramenta do robô industrial na sequência da apresentação dos respetivos componentes.

No conjunto de todo o tipo de ferramentas utilizadas por um robô, pode-se considerar a organização em três tipos: estáticas; dinâmicas; de projecção ou sucção.

As ferramentas estáticas são as ferramentas colocadas no braço manipulador que, para a realização do trabalho, não alteram o seu estado nem projetam ou sugam qualquer material, sendo o tipo de ferramenta de uso menos frequente. Como exemplos de ferramentas deste tipo, verifica-se a existência de aplicações de corte de material com uma ferramenta de corte estática simples tipo faca. Outro exemplo é a existência de ferramentas de robôs para manipulação de cargas tipo paletes ou tabuleiros, sendo para tal usado apenas um conjunto de garfos metálicos fixos. Algumas aplicações de mistura de matérias com movimentos simples, como o mexer de uma colher, ou o empurrar de um produto, podem recorrer a ferramentas estáticas. A manipulação de uma câmara, ou outro sensor de recolha de informação do processo de fabrico, são outros exemplos de ferramentas estáticas. Na memória dos conhecedores de aplicações menos comuns de robôs industriais, como as de lazer, uma ferramenta estática também conhecida é a de uma ou várias cadeiras preparadas

para susterem pessoas, tal como ilustra a Figura 6, e que assim se sujeitam a uma série de movimentos executados pelo robô, disfrutando deste tipo de atividade recreativa “radical”.



Figura 6 Robô com ferramenta estática, para lazer [11]

As ferramentas dinâmicas são as ferramentas de utilização pelo robô que alteram o seu estado durante o trabalho, o que na maioria dos casos representa a execução de algum tipo de movimento comandado pelo robô. Se este movimento é usado para manipular objetos, então esta ferramenta é também designada por garra ou *gripper*. O acionamento dos movimentos pode ser pneumático, elétrico, hidráulico ou mecânico. O acionamento pneumático ou hidráulico de uma ferramenta implica a necessidade de transportar o fluido de acionamento até essa ferramenta, o que normalmente é feito através do braço do robô e requer a necessidade de tubos flexíveis ao longo das juntas. O comando hidráulico é pouco comum, utilizado quando necessária uma força elevada e tem a desvantagem de necessitar do retorno de fluido até ao depósito.

As ferramentas pneumáticas são as ferramentas dinâmicas mais habituais. A energia, sob forma de pressão do ar comprimido, é convertida numa força utilizada para aperto, desaperto, ou realização de movimentos de rotação ou translação de componentes da ferramenta. Alguns fabricantes desenvolveram e comercializam *grippers* como produtos de fabrico em série e assim mais facilmente aplicados em ferramentas de robôs, por já estarem pré-desenvolvidos e testados, e por serem mais fáceis de substituir se tal for necessário, por exemplo, para manutenção. Como exemplo, o fabricante Schunk disponibiliza no mercado uma gama de garras com variantes em tamanho, número e configuração de dedos, força de aperto, índice de proteção, entre outros. Este fabricante disponibiliza também sistemas de

troca de ferramentas, também frequentemente visíveis em aplicações robotizadas. Este sistema é também de acionamento pneumático e permite ao robô acoplar e desacoplar automaticamente a ferramenta que está a utilizar e assim poder trabalhar com diferentes ferramentas, sem necessidade de aumentar a capacidade de carga do robô nem a complexidade de desenvolver uma única ferramenta que inclua todas as variadas funcionalidades. As ferramentas dinâmicas podem também ser de acionamento elétrico. Nestes casos é tipicamente utilizado um motor ou servomotor cuja aplicação pode ser convertida mecanicamente em movimentos rotativos ou lineares. O enrolamento de uma bobine elétrica alimentada com uma corrente contínua (ou eletroímã), comandada pelo robô, pode ser utilizada para transporte de materiais metálicos com propriedades ferromagnéticas que assim o permitam. Estas ferramentas magnéticas têm como vantagens a rapidez de atuação e a necessidade de utilizar apenas uma superfície da peça para a manipular, o que facilita o transporte de peças metálicas finas como, por exemplo, discos.

As ferramentas de projeção ou sucção são ferramentas que durante o trabalho projetam ou sugam alguma peça ou material do processo. Uma ferramenta de projeção ou sucção é, na maioria dos casos, uma evolução da ferramenta dinâmica, no sentido em que a projeção ou sucção de uma peça ou material implica também a mudança do estado da ferramenta na forma de um qualquer seu componente, fluído ou corrente elétrica. Como exemplos de ferramentas de projeção podem ser referidas as pistolas de pintura a ar, que projetam simultaneamente a tinta e o ar, tipicamente na forma de um leque. Nas ferramentas de sucção, refira-se o exemplo das ventosas que, com ar de pressão (em bar) negativa, ou seja vácuo, podem manusear peças sugadas temporariamente contra o seu corpo. As ferramentas de sucção implicam a existência de uma bomba de vácuo, ou de um sistema de sucção de ar por Venturi que consome ar comprimido. A tocha de soldadura por arco elétrico é também uma ferramenta de projeção.

2.2. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE UM ROBÔ

Os robôs industriais são projetados com características técnicas que os adaptem quer à produção flexível de pequenas séries quer à produção contínua de grandes séries, em ambiente industrial. A seleção de um robô para executar um determinado trabalho decorre após ter em conta alguns parâmetros principais, de onde se destacam as características dinâmicas associadas ao alcance do manipulador e a capacidade de carga do robô. Mas

outros parâmetros podem ser considerados com igual ou maior importância que estes, dependendo da aplicação específica do robô. Nesta seção apresentam-se, sucintamente, alguns desses parâmetros de um robô.

2.2.1. GRAUS DE MOBILIDADE

Pela definição apresentada em 2.1, um robô deve ter três ou mais eixos para que assuma esta designação. Verifica-se que os robôs industriais disponíveis atualmente pelos principais fabricantes são constituídos por manipuladores com três a sete graus de mobilidade (GDM), ou seja, este número de articulações, juntas ou eixos. Cada par junta-elo constitui um GDM, sendo que os GDM de um manipulador são de configuração prismática ou rotativa, sendo as rotativas as mais frequentes. Nos manipuladores com mais do que quatro eixos, é habitual que a configuração mecânica dos últimos três eixos possa designar-se também por punho, talvez pelos GDM que se assemelham aos de um punho humano. Estes três GDM, correspondentes às últimas três juntas do manipulador, podem também ser designados pelos termos *Roll*, *Pitch* e *Yaw*, que num manipulador de seis eixos, como o exemplificado na Figura 7, são os movimentos que correspondem à rotação dos eixos quatro, cinco e seis, respetivamente. A Figura 7 (adaptada de [12]) apresenta um manipulador com seis GDM, estando cada um deles ilustrado com o respetivo número. Num manipulador, a numeração normalmente atribuída aos GDM é sequencial ao longo da estrutura mecânica e começa por 1, a partir da base. Num manipulador como o apresentado na Figura 7, o número de GDM é igual ao número de graus de liberdade (GDL), mas estes conceitos não são iguais.

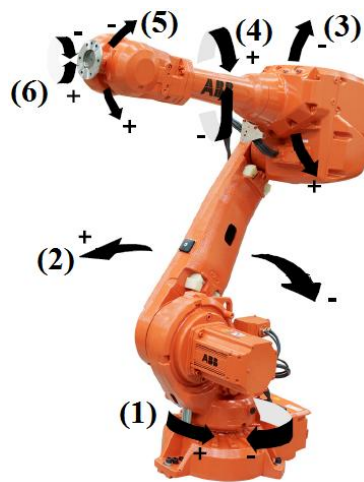


Figura 7 Manipulador com seis graus de mobilidade

O número total de movimentos independentes que um dispositivo pode fazer designa-se por GDL. Um objeto necessita de seis GDL para se movimentar livremente no espaço: deslocando-se em três direções e rodando em torno de três eixos. O número de GDM de um manipulador é diferente do número de GDL se os eixos estiverem acoplados mecanicamente. Estas definições levam à referência dos problemas de singularidades cinemáticas num manipulador de robô. Singularidades cinemáticas são configurações em que existe uma alteração inesperada no número instantâneo de GDL de um manipulador [13]. Tal pode acontecer se dois GDM rotacionais ficarem concêntricos ou se dois GDM prismáticos se alinharem na mesma direção: se vistos autonomamente, estes são cenários em que dois GDM se tornam em apenas um GDL. A presença de singularidades num manipulador pode afetar profundamente o seu controlo e, dependendo dos algoritmos de controlo associados, representar uma limitação incontornável no desempenho dos movimentos.

2.2.2. ESPAÇO DE TRABALHO

O espaço de trabalho de um manipulador é o volume total acessível pelo mesmo, considerando a posição extrema do braço em todas as possibilidades de movimentos das juntas. Para este espaço de trabalho consideram-se as posições máximas alcançadas pela extremidade do manipulador sem ter em conta as orientações. Este espaço é limitado pela geometria do manipulador, bem como pelas restrições físicas das juntas, o que permite portanto, classificar um manipulador pela sua estrutura cinemática. Consideram-se cinco tipos de estruturas: (i) manipulador cartesiano ou retangular ou *gantry*, em que as três primeiras juntas da estrutura cinemática são prismáticas e mutualmente perpendiculares, que permitem movimentos num sistema de coordenadas cartesianas x , y e z , associadas a essas juntas, podendo seguir-se outras juntas rotacionais; (ii) manipulador cilíndrico, em que uma das juntas prismáticas do manipulador cartesiano equivalente é substituída por uma junta rotativa; (iii) manipulador esférico, em que duas juntas do manipulador cartesiano equivalente são substituídas por juntas rotativas; (iv) manipulador articulado vertical, se todas as juntas são rotativas; (v) e o manipulador articulado horizontal ou *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA), um tipo de manipulador em que, às duas primeiras juntas rotativas, se segue uma junta prismática, sendo que o eixo das juntas rotativas do robô SCARA está orientado paralelamente ao plano vertical. Note-se que este

agrupamento em cinco classificações dos manipuladores limita-se ao volume de trabalho de manipuladores de estrutura mecânica em série.

Um conceito distinto do espaço de trabalho de um manipulador é o seu alcance. O alcance de um manipulador tem forma semelhante ao limite exterior do volume de trabalho, mas é mais pequeno na maioria dos manipuladores, porque o alcance do manipulador deve ter em conta a possibilidade de orientação da ferramenta, passando a ser usado como referência o centro do punho. Ao analisar as características técnicas de um manipulador deve-se, portanto, ter em atenção se a característica associada ao volume de trabalho do robô se refere ao seu espaço total ou ao seu alcance, sendo o alcance mais relevante para o estudo dos movimentos necessários, e o espaço de trabalho para os estudos de cinemática ou para as considerações de segurança da célula robotizada. Na documentação técnica de manipuladores de robôs que se apresentem em língua Inglesa, verifica-se que o alcance é normalmente designado pelas expressões *working range* ou *work envelope*, mas nenhuma designação parece ser consensual.

2.2.3. VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

A velocidade de operação, ou de trabalho, é um parâmetro controverso na análise de um robô industrial, tal a importância que habitualmente tem no cálculo do desempenho. Por um lado, a velocidade de operação depende, na maioria dos casos, da carga aplicada ao manipulador, sendo que quanto maior a carga aplicada, menor a velocidade. Por outro lado, a velocidade máxima de deslocação ou rotação de cada uma das juntas do manipulador não é necessariamente igual, o que leva a que a análise da velocidade máxima de um qualquer trajeto linear, medida na ferramenta, dependa da direção desse trajeto, que por sua vez implique maior ou menor deslocação de determinadas juntas e a diferente velocidade máxima associada a cada uma delas. Num manipulador, verifica-se frequentemente que as juntas inferiores são mais lentas do que as juntas superiores, pelo que um movimento mais dependente das juntas inferiores será mais lento, e vice-versa. Dependendo do sistema de controlo, uma trajetória realizada num sentido favorável à força gravitacional pode também ter um desempenho superior no que toca à sua velocidade máxima. A velocidade máxima também não tem em conta as acelerações e desacelerações do movimento, que são fatores naturais no controlo de um manipulador ao longo de um trajeto, pelo que um movimento curto pode não atingir a velocidade máxima. Se um

fabricante apresenta uma velocidade máxima linear para um manipulador articulado esse dado deve ser analisado com cautela e o estudo da velocidade máxima de um manipulador ser feito preferencialmente por simulação, que tenha em conta a posição de montagem do manipulador, a carga aplicada, as direções dos movimentos do trabalho, e os dados de controlo associados à velocidade e aceleração de cada junta individualmente.

2.2.4. CAPACIDADE DE CARGA

Este parâmetro especifica o peso máximo que o robô pode manipular. A referência à capacidade de carga de um robô pode ser dividida em três tipos: nominal, máxima e adicional. A capacidade de carga nominal corresponde à carga máxima permitida no extremo do manipulador para movimentos até à velocidade máxima e sem perda de precisão. A capacidade de carga máxima corresponde à carga máxima permitida no extremo do manipulador, com movimentos a velocidade reduzida e sem perda de precisão. A capacidade de carga adicional refere-se a cargas adicionais que podem ser montadas sobre o manipulador em pontos que não são o seu limite extremo. Estas cargas adicionais podem ser necessárias, por exemplo, quando o trabalho da ferramenta necessita de equipamento de suporte próximo, como é o caso do alimentador de arame eletrodo num robô de soldadura por arco elétrico, tipicamente montado próximo à junta do eixo três num manipulador de seis eixos. A capacidade de carga sobre este eixo é então adicional à capacidade de carga no extremo do braço. O parâmetro de carga máxima de um manipulador raramente corresponde a esse limite físico, motivo pelo qual o valor indicado de capacidade máxima deve salvaguardar a manutenção da precisão dos movimentos. Excessos de carga, ou seja, carregar um manipulador com uma massa superior à especificada pelo fabricante como máxima, pode manter o robô funcional mas tal deverá corresponder a perda considerável de desempenho dos movimentos, precisão e velocidade, e a um menor tempo de vida do robô.

2.2.5. RESOLUÇÃO

Resolução é a medida do menor movimento incremental que um manipulador pode produzir. A resolução depende do sistema de medição de cada junta e, como já referido, a cada junta do manipulador está habitualmente associada uma caixa redutora. O menor movimento possível de uma junta, na inexistência de folgas mecânicas, depende da

resolução do sistema de medição do acionamento que tipicamente é um servomotor. Ao movimento angular do servomotor, por sua vez associado à resolução do respetivo *encoder* ou do conversor A/D do *resolver*, corresponde um movimento angular ainda menor da junta acionada, pelo que a resolução da junta deve ser calculada em função da multiplicação obtida na caixa redutora. Pelos dados disponibilizados pela ABB, a resolução de uma junta rotativa situa-se entre 0,001° e 0,01°. Na cinemática direta, o resultado do menor movimento cartesiano incremental produzido pelos movimentos angulares de várias juntas, depende da resolução de cada uma das juntas solicitadas e da proporção de cada uma delas na direção e ao longo desse movimento. Por este motivo, na maioria dos robôs industriais, o cálculo e apresentação de um valor da resolução em unidades cartesianas não é viável.

2.2.6. REPETIBILIDADE

A repetibilidade de um robô indica a variação possível do seu reposicionamento num ponto anteriormente atingido ou ao percorrer novamente um trajeto anteriormente percorrido. A diferença no reposicionamento entre pontos designa-se por repetibilidade posicional, enquanto a diferença na sequência de posições entre trajetos designa-se por repetibilidade em trajeto. Estas designações encontram-se na documentação em língua Inglesa como *Pose Repeatability* e *Path Repeatability*, respetivamente. Se apenas é indicado um único valor de repetibilidade de um robô, este pode referir-se apenas à repetibilidade posicional, ou seja, à diferença máxima de posicionamento considerando o manipulador parado num determinado ponto, que é um valor mais favorável comparativamente à repetibilidade em trajeto. O valor de repetibilidade de um robô pode ser obtido por testes, de acordo com a norma ISO 9283, já que esta norma define as mais importantes características de desempenho de um robô, como elas devem ser especificadas, e recomenda os seus métodos de teste. Segundo esta norma, o valor de repetibilidade obtém-se sujeitando o robô à sua carga máxima e fazendo movimentos sobre um plano inclinado, a uma velocidade de referência, que coloque todos os seus eixos em movimento. Os principais fabricantes de robôs industriais apresentam a repetibilidade num valor absoluto e em milímetros. É comum encontrar a colocação do sinal ‘±’ antes do valor de repetibilidade, o que facilita a interpretação desse dado, já que o valor de repetibilidade representa o desvio máximo verificado face à média, na análise dos resultados dos testes de repetibilidade do robô. O valor de repetibilidade costuma ser menor nos modelos de manipulador mais pequenos, e

aumenta progressivamente com o aumento do espaço de trabalho ou da capacidade de carga dos robôs.

2.2.7. PRECISÃO

Precisão é a medida que reflete o desvio máximo do robô ao posicionar-se num ponto programado ou ao executar uma trajetória programada, dentro do seu volume de trabalho. Tal como na repetibilidade, existe igual distinção entre a precisão posicional e a precisão em trajeto, respetivamente *Pose Precision* e *Path Precision*. O método mais habitual de programação de um robô é movimentando o manipulador até aos pontos necessários e repetindo esse processo a todos os restantes pontos principais do programa de trabalho, método também designado por programação ponto-a-ponto. Neste método podem ser criados sistemas de referência em parte dos pontos programados para obter os restantes por cálculo das suas distâncias relativas. Assim, a precisão será a distância entre os pontos em que o robô foi posicionado e o ponto ou trajeto executado pelo programa, sendo este o significado típico do valor de precisão de um robô nos cenários em que ele é apresentado pelo respetivo fabricante, e é também o significado previsto na norma ISO 9283. Este será, no entanto, um valor de precisão relativa. A precisão é afetada pela carga transportada e pela posição do manipulador no espaço de trabalho, devido à resolução das diferentes juntas, mas principalmente devido às tolerâncias de fabrico e montagem do manipulador e às deflexões da sua própria estrutura mecânica. A compensação prática destas variações, com os algoritmos de controlo do manipulador, representa um problema complexo de resolução não-linear. O valor de precisão de um robô pode também representar a diferença entre o posicionamento obtido pelo extremo do braço e as coordenadas pretendidas para esse posicionamento com referência à base do modelo cinemático. Este seria um valor de precisão absoluta, que raramente é apresentada pelos fabricantes de robôs industriais, e pode atingir as dezenas de milímetros. A aplicação de um robô para trabalhos de elevada precisão, como os que habitualmente se encontram num sistema por comando numérico computadorizado (CNC), cuja programação seja realizada textualmente ou *offline*, deve ser ponderada porque requer boa precisão absoluta, o que pode implicar calibrações adicionais ou outras compensações individualizadas do manipulador.

A Figura 8 (adaptada de [14]) ilustra uma forma de representação dos resultados dos testes para obtenção dos valores de precisão posicional e repetibilidade posicional de um robô.

Note-se que A: representa a posição programada; B: representa a média das posições executadas pelo manipulador em teste; AP: representa a precisão posicional relativa, que é a distância média desde a posição programada; RP: representa a repetibilidade posicional, que é o desvio máximo de um posicionamento face à média das várias posições obtidas no teste.

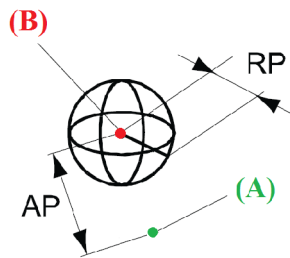


Figura 8 Precisão posicional e repetibilidade posicional

A Figura 9 (adaptada de [14]) ilustra uma forma de representação dos resultados dos testes de obtenção dos valores de precisão e repetibilidade em trajeto de um robô. Note-se que D: representa um trajeto executado pelo manipulador em teste; E: representa o trajeto programado; AT: representa a precisão relativa em trajeto, que é o desvio máximo desde E da média dos trajetos executados em teste; RT: representa a repetibilidade em trajeto, que é o desvio máximo de um trajeto face à média das várias repetições do trajeto de teste.

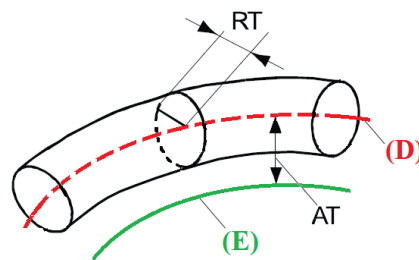


Figura 9 Precisão em trajeto e repetibilidade em trajeto

Na referência às características técnicas de um robô, podem ser encontrados os valores de *Pose Stabilization Time* e de *Pose Over-Shoot*, ambos preferencialmente obtidos com referência ao instruído pela norma ISO 9283. O tempo de estabilização posicional, *Pose Stabilization Time*, é o tempo decorrido entre o instante em que o extremo do manipulador atinge a posição desejada pela primeira vez e o instante em que o movimento oscilatório do extremo do manipulador diminuiu até uma determinada distância de referência, em torno

da posição desejada. Esta distância de referência não é indicada pela norma acima referida, mas deve ser um valor próximo da repetibilidade do robô. Aliás, esta distância de referência pode também ser designada por zona de repetibilidade [15]. O segundo, *Pose Over-Shoot* refere-se ao valor máximo da distância absoluta da posição extrema do manipulador entre o ponto desejado e a posição máxima atingida em *over-shoot* após a passagem por esse ponto. Note-se que ambos os valores se referem ao cenário em que é solicitada ao robô a paragem num determinado ponto, após a realização de movimento.

2.3. EQUIPAMENTO ROBÓTICO ADICIONAL, EIXOS EXTERNOS

No tratamento dos aspetos gerais de um projeto com robôs associado às aplicações de processo de soldadura ou *cladding*, surge a necessidade de referência ao equipamento robótico adicional de suporte a estes processos. Trata-se do equipamento que, não fazendo parte integrante de um robô enquanto produto de fabrico em série, é necessário para a execução de alguns trabalhos específicos e é controlado, ou manipulado, pelo mesmo. Um equipamento robótico tipicamente encontrado numa célula robotizada e controlado pelo robô são os eixos externos. Tratam-se de juntas cujo controlo é comum e conjunto ao manipulador, e estão associadas mais frequentemente a uma ou duas funções: (i) à movimentação do próprio braço pela sua base, para o aumento do espaço de trabalho na solução conjunta do manipulador com este eixo externo, e (ii) à movimentação das peças ou do seu equipamento de suporte, para facilitar o reposicionamento durante a realização do trabalho, melhorando o seu alcance pelo manipulador. Numa célula robotizada de soldadura ou *cladding* é muito habitual existir, pelo menos, um destes tipos de eixos externos associados ao robô. A designação ‘externos’ parece estar relacionada com o algoritmo de controlo destes eixos, porque mesmo sendo juntas igualmente servocontroladas pelo robô, o seu controlo integra o robô na forma de um grau de movimento independente dos existentes, ou seja, aos graus de liberdade do robô para o posicionamento no espaço é acrescentada uma ou várias deslocações que não alteram as entradas no modelo cinemático para obtenção da posição e orientação desejada no extremo do braço. Se um eixo externo é utilizado para movimentar outro equipamento de suporte ao trabalho do robô, ou peças, a sua função pode limitar-se ao reposicionamento, linear ou rotativo, que é mais fácil de instalar e programar quando comparado com outras soluções mecânicas menos flexíveis. Os fabricantes de robôs industriais já permitem facilmente a

integração adicional de eixos externos no controlador dos robôs e, na maioria dos casos, disponibilizam produtos previamente desenvolvidos para as duas configurações descritas. A Figura 10 apresenta um manipulador montado sobre um eixo externo linear que, neste caso, tem a função de realizar o movimento do braço em translação.



Figura 10 Eixo externo para translação de um manipulador [16]















A colocação de um manipulador sobre um eixo externo, tal como apresentado na Figura 10, invalida grande parte das suas características dinâmicas que se referem ao desempenho dos movimentos, como a precisão ou a repetibilidade, no conjunto do sistema montado. Neste caso, isto acontece porque a base do robô deixa de ser um órgão estático, passando para um grupo de componentes que acrescentam folgas mecânicas, incerteza na fixação, dilatação de materiais, elasticidades, 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. Note-se também que esses valores referentes ao eixo externo não dependem apenas do seu fabrico mas também, por exemplo, do rigor da sua montagem, nivelação e alinhamento, ou da rigidez do solo. Outros dados que podem ser relevantes na análise de um eixo externo deste tipo é a sua capacidade de aceleração e velocidade máximas, referentes à base do manipulador, assim como o tempo de estabilização posicional. Tratando-se de um produto previamente desenvolvido pelos fabricantes de robôs, a capacidade de carga deste tipo de eixo externo raramente é referida, em detrimento da indicação dos modelos de manipulador para o qual ele está preparado.

Se o eixo externo, ou um conjunto deles, é utilizado para manipular as peças ou o equipamento de suporte ao trabalho do robô, a designação mais utilizada para esse mecanismo é a de posicionador. Além de facilitar o alcance do manipulador, através do

posicionamento das peças em pontos ou orientações mais favoráveis, em muitos casos o posicionador é também utilizado para criar a divisão entre a área de trabalho do robô e a de montagem manual pelo operador. Os principais fabricantes desenvolveram posicionadores em diferentes gamas e configurações, que se adequam a uma grande parte das aplicações de soldadura ou *cladding* robotizadas. Estes posicionadores são normalmente constituídos por um a cinco eixos, e adequam-se a vários tamanhos e capacidades de carga. Se comparados os posicionadores disponíveis enquanto produto de fabrico padrão, nota-se uma tendência para igualar os graus de liberdade possibilitados pelos vários modelos. Dos principais fabricantes de robôs industriais, a ABB e a MOTOMAN parecem ter a maior gama de posicionadores disponível como produto de fabrico padronizado. A gama do fabricante KUKA é mais limitada nas configurações de posicionadores previamente desenvolvidas, e a FANUC praticamente não apresenta posicionadores de vários eixos previamente desenvolvidos, mas apenas diversos conjuntos de moto-redutores, ou posicionadores de um eixo, permitindo o seu agrupamento e posterior desenvolvimento dedicado de um posicionador com vários eixos.

A Tabela 3 mostra o comparativo de alguns posicionadores de vários eixos disponibilizados por estes fabricantes. As imagens apresentadas nesta tabela foram obtidas exclusivamente das páginas de internet de cada um dos fabricantes mencionados.

Tabela 3 Comparativo de posicionadores de vários eixos

Fabricante	2 eixos	3 eixos	3 eixos	5 eixos
				
				não disponível
				

Nas características técnicas destes produtos encontram-se parâmetros semelhantes aos de um manipulador: volume de trabalho, velocidade máxima das juntas, capacidade de carga, precisão e repetibilidade, e tempo de alternância ou *interchange*. Os tempos de alternância correspondem, nos posicionadores com eixo de divisão entre áreas de trabalho, ao tempo total necessário para o posicionador alternar as estações de trabalho entre o posto do operador e o posto do robô, o que na maioria dos casos corresponde a uma rotação de 180° no eixo principal e demora entre três a seis segundos. Nos exemplos apresentados anteriormente na Tabela 3, apenas os posicionadores com mais de três eixos permitem esta funcionalidade. No entanto, existem posicionadores de apenas um eixo em que esta é a sua única funcionalidade.

O modelo de célula de fabrico industrial para os processos de soldadura ou *cladding* mais facilmente encontrado atualmente em produção, é constituído por um ou dois manipuladores e o respetivo controlador, um posicionador, o equipamento de soldadura e as proteções de segurança. A Figura 11 apresenta uma célula robotizada de soldadura ou *cladding*. Nesta célula, que representa o padrão *FlexArc* da ABB, são visíveis dois robôs, um posicionador de três eixos e as vedações de segurança.



Figura 11 Exemplo de célula robotizada de soldadura ou *cladding* [17]

2.4. SEGURANÇA

A Figura 11 introduz já um aspeto de especial relevância no desenvolvimento de uma célula robotizada: a segurança. Em ambiente industrial, os equipamentos de produção podem gerar diversos perigos, de diferentes naturezas, para a interação com humanos: perigos mecânicos, elétricos, térmicos, de ruído ou vibrações, radiações, químicos e ergonómicos. É também notória a crescente orientação dos fabricantes de máquinas, e das empresas que as adquirem, para o aspeto da segurança de pessoas como prioritário, o que é suportado pela melhoria da normalização dos aspetos relacionados com a segurança, assim como na legislação em vigor sobre este tema na maioria dos países industrializados. Globalmente, as normas da *International Standard Organization* (ISO) parecem ser o padrão mais aceite para os aspetos relacionados com segurança de máquinas, seguido das recomendações *Underwriters Laboratory* (UL). Em termos regionais, verifica-se na União Europeia a existência das normas do *Committee for European Standardization* (EU – CEN), enquanto nos Estados Unidos da América e no Canadá são habitualmente seguidas as normas do *American National Standards Institute / Robotics Industries Association* (ANSI/RIA). Especificamente para os riscos elétricos existem normas internacionalmente reconhecidas da *International Electrotechnical Commission* (IEC). Se uma máquina cumpre os requisitos de segurança, higiene e proteção ambiental exigidos pela União Europeia, então o respetivo fabricante pode atribuir-lhe a marcação CE, com esse significado.

Nesta secção dedicada à segurança, e tal como previsto na norma ISO 10218, devem distinguir-se as características exigidas ao fabricante do robô, daquelas referentes ao construtor da célula ou sistema de fabrico robotizado. A norma ISO 10218-1 descreve as responsabilidades de segurança do fabricante de robôs. A norma ISO 10218-2 descreve as responsabilidades de segurança do construtor de máquinas que realize a integração de robôs numa célula ou sistema robotizado. Ambas as partes desta norma fazem referência a outras normas ISO ou IEC de diferentes especificidades, e algumas serão aqui abordadas.

2.4.1. SEGURANÇA NOS ROBÔS INDUSTRIAIS

Para a sua integração num ambiente de fabrico, o robô, enquanto produto desenvolvido para um mercado global, é construído com diversos elementos de segurança respeitantes do maior número possível de recomendações das normas acima referidas, entre outras que

requeiram maior especialização. Há, por isso, aspetos de segurança relacionados com o robô industrial, comuns aos principais fabricantes mundiais de robôs, dos quais se apresentam alguns exemplos [18]:

- paragem de emergência: a norma IEC 60204-1 prevê uma condição que sobreponha todos os outros controlos do robô e remova a potência dos atuadores dos eixos, pare todas as partes em movimento e retire potência de quaisquer outras funções controladas pelo robô;
- dispositivo de habilitação: a mesma norma prevê que o robô industrial esteja dotado, na consola de programação, de um dispositivo de habilitação de três posições que, quando atuado numa única posição central, ative as funções com risco do robô, sem as iniciar. Noutra qualquer posição, libertada ou comprimida face à posição habilitante central, o mesmo atuador deve parar essas funções em segurança;
- paragem de modo geral: a norma ISO 10218-1 prevê que o robô seja dotado de um circuito de segurança com conexões que necessitem de um rearme antes dos atuadores dos eixos serem novamente habilitados com potência e ocorra movimento. Este rearme do circuito de segurança, por si só, não deve iniciar a operação do robô;
- modo de velocidade reduzida: a norma ISO 10218-1 prevê a necessidade de dotar o robô com um mecanismo seleccionável de uma velocidade reduzida, que restrinja a velocidade de movimentação do robô de tal modo que permita ao pessoal próximo do manipulador que se afaste com segurança, ou pare o movimento do robô atempadamente.

Recentemente, alguns fabricantes criaram sistemas de segurança para limitar a velocidade ou a posição do manipulador, através de *hardware* adicional redundante colocado no controlador do robô, para permitir o trabalho colaborativo em duas formas principais: reduzindo automática e progressivamente a velocidade do robô se algum dispositivo de segurança detetar a aproximação humana, ou mesmo parando-o, se a zona de trabalho do robô for invadida. Tal permite criar soluções de automação em que o operador interage com o robô de forma segura, estando este parado em modo automático mas não se tratando de uma paragem de segurança, ou seja, o ciclo poderá ser retomado automaticamente sem rearme. Este limite de velocidade para trabalho colaborativo permite funções de programação do robô através da manipulação direta do braço, guiando o robô aos pontos pretendidos para a execução do programa, de forma que ele grave automaticamente os

trajetos ao longo dos quais foi guiado manualmente, método que é também conhecido por guiamento manual ou *hand-guiding*. Este mecanismo de supervisão adicional de segurança do robô também pode ser usado para limitar os seus movimentos a zonas de acesso proibido para o manipulador como acontece, por exemplo, se o alcance do braço atinge um corredor de passagem de pessoas, e uma falha de programa possa representar um risco elevado de invasão dessa zona. A paragem segura e o guiamento manual de robôs estão previstos na norma ISO 10218-1, com várias alterações na revisão de 2011 (note-se que as normas ISO são atualmente revistas a cada cinco anos). O equipamento adicional do controlador para realizar a redundância da supervisão do posicionamento do manipulador deve ter programação e configuração autónoma e estar protegido contra alterações indesejadas, normalmente através de um código de acesso. A ABB coloca duas opções de segurança disponíveis neste contexto: os *Electronic Position Switches* (EPS), cuja função é limitada à supervisão angular dos eixos, em velocidade e posição; ou a opção *Safemove*, cuja supervisão do manipulador evolui para o sistema de coordenadas cartesianas, permitindo a supervisão da velocidade da ferramenta de trabalho ou da sua orientação. Os dados da ferramenta do robô podem ser introduzidos quanto à sua forma geométrica e posição de montagem, para que esta seja incluída na eventual limitação segura do acesso do robô a zonas de trabalho comuns com o operador. Monitorar de forma segura a orientação de uma ferramenta de trabalho pode ter uma importância adicional em aplicações como o corte por laser ou por jato de água, nas quais é essencial garantir que a projeção do corte não se orienta noutras direções diferentes das necessárias para o trabalho, mesmo que ocorra um erro de programação. Um sistema semelhante é disponibilizado pelo fabricante FANUC, que este designa por *Dual Check Safety* (DCS), e também é integrado opcionalmente no robô. A FANUC apresenta como outro exemplo vantajoso do DCS a possibilidade de realizar operações de manutenção elementares, como a limpeza do manipulador, durante a realização do trabalho [19]. Normalmente, o manipulador do robô industrial é um braço pesado e potente mesmo a baixas velocidades. Se considerada a maioria dos modelos de manipulador de robô entre os atualmente disponíveis, as formas de trabalho colaborativo apresentadas anteriormente continuam a conter alguns riscos na interação humana, ao dependerem da eficácia como o sistema de segurança está projetado ou programado e a real mitigação de todos os riscos inerentes aos movimentos do manipulador. Suponha-se, por exemplo, que existe um erro no projeto ou na programação do sistema de segurança redundante de um robô com elevadas velocidade e capacidade de

carga. Tal representa um risco considerável para a segurança do operador em cenários de trabalho colaborativo. A Figura 12 ilustra um cenário de trabalho colaborativo em que dois manipuladores colocam uma peça pesada em várias posições para que um operador realize alguns trabalhos de soldadura manual sobre as mesmas. Nesta situação, a presença do operador deve limitar a velocidade dos robôs até zero e assim permanecerem, em paragem monitorada, até que esse trabalho manual esteja terminado e o operador se afaste em segurança da área de trabalho de ambos os robôs, altura em que os robôs poderão retomar progressivamente o movimento.

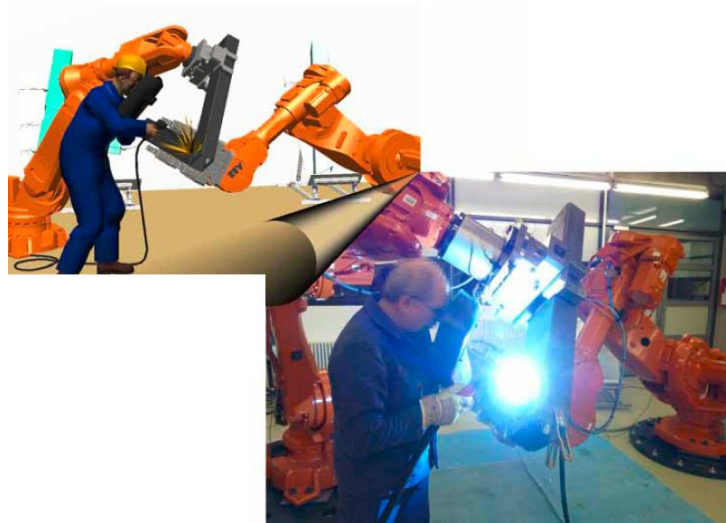


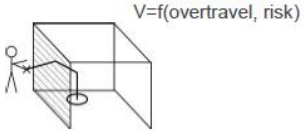
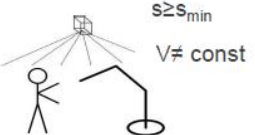
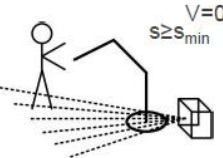
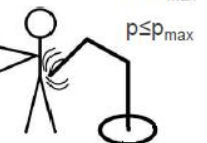
Figura 12 Trabalho colaborativo de soldadura [20]

Atualmente, encontram-se disponíveis alguns modelos de robôs para trabalhos designados como verdadeiramente colaborativos, ou seja, estando o manipulador e o seu controlo projetados para limitar a força e a potência de um choque acidental com humanos, assim como recorrer a geometrias de materiais menos ofensivas em caso de impacto com o corpo humano. Tal permite o trabalho conjunto do robô com os operadores, eventualmente sem equipamentos de segurança adicionais. Estas características para operação colaborativa encontram-se descritas na cláusula 5.10.5 da norma ISO 10218-1. Os robôs para trabalho verdadeiramente colaborativo estão sujeitos ao desempenho de segurança de nível PLd, o penúltimo maior nível de risco que um equipamento pode representar, segundo o método de estimação de risco previsto no anexo A da norma ISO 13849-1, e obtido porque o maior ferimento possível que este robô poderá provocar num humano é reversível e a exposição ao risco é frequente e difícil de evitar, feita por limitação das características do braço.

Alguns fabricantes interpretam desde já o conceito de trabalho verdadeiramente colaborativo como aquele em que o pior acidente resultante do impacto dos movimentos desse robô com o corpo humano resulte numa consequência inferior ao início da sensação de dor.

A norma ISO 15066, que ainda está em desenvolvimento, aborda especificamente o campo dos requisitos dos robôs industriais para trabalhos de operação colaborativa [21]. Um rascunho desta norma antecipa a caracterização dos trabalhos colaborativos com robôs em quatro conceitos, já aqui abordados, e ilustrados na Tabela 4 (adaptada de [22]).

Tabela 4 Conceitos de trabalho colaborativo

<p style="text-align: center;">Guiamento Manual</p>  <p style="text-align: center;">$V=f(\text{overtravel, risk})$</p>	<p style="text-align: center;">Monitoração de posição e velocidade</p>  <p style="text-align: center;">$s \geq s_{\min}$ $V \neq \text{const}$</p>
<p style="text-align: center;">Paragem monitorada</p>  <p style="text-align: center;">$V=0$ $s \geq s_{\min}$</p>	<p style="text-align: center;">Limitação da força e potência</p>  <p style="text-align: center;">$F \leq F_{\max}$ $p \leq p_{\max}$</p>

2.4.2. SEGURANÇA NAS CÉLULAS OU SISTEMAS ROBOTIZADOS

Se não forem considerados os robôs para trabalho verdadeiramente colaborativo, os restantes estão sujeitos à instalação de equipamentos adicionais de segurança. A construção de uma célula ou sistema robotizado deve assegurar, tanto quanto possível, que nenhum acidente decorre da operação dessa máquina, ou de uma aproximação involuntária à mesma. Sendo certo que o operador deverá conhecer os riscos associados à máquina que opera, o desenvolvimento dessa máquina deve assegurar que tal conhecimento pode não existir, e portanto todos os riscos devem ser mitigados ou eliminados, quando possível, e estarem devidamente sinalizados. No que respeita aos robôs industriais, o integrador ou

fabricante de máquinas robotizadas é o responsável por garantir a sua segurança na colocação em funcionamento. O robô industrial deve ser visto como uma máquina incompleta, que não está, por si só, preparada para a colocação imediata em produção após a entrega pelo seu fabricante. A segurança do trabalho com um robô depende principalmente da forma como foi integrado e colocado em serviço.

A forma mais segura de prevenir acidentes com robôs industriais é garantindo que o acesso à sua zona de trabalho se encontra restrito, mas esta restrição raramente pode ser completa pela necessidade da existência de pontos de acesso para entrada e saída de materiais, do operador, ou de ambos. Considera-se também que a vedação do robô deve estar dotada de, pelo menos, uma porta de acesso humano temporário para efeitos de programação ou manutenção. Uma célula robotizada pode conter portanto vários riscos, ou seja, perigos à vida ou à saúde humana, ligados a uma probabilidade não nula de exposição aos mesmos. Numa célula robotizada de soldadura ou *cladding*, é frequente a existência de duas zonas distintas quanto aos riscos: a zona restrita, que é a zona de trabalho do robô e onde a presença humana deve ser muito limitada (normalmente apenas para trabalhos de manutenção e programação); e a zona salvaguardada, que é a zona de acesso frequente durante a operação e partilhada pelo equipamento robótico, portanto, com existência de riscos que devem ser mitigados com medidas de segurança adicionais.

É necessário identificar os perigos, para avaliar os riscos associados ao robô e à aplicação, antes de seleccionar e projetar as medidas de segurança apropriadas para reduzir esses riscos. A norma ISO 10218-2 diz que as medidas técnicas para redução do risco são baseadas nos seguintes princípios fundamentais [23]:

- a eliminação dos perigos deve ser realizada no projeto da máquina ou a sua redução ser feita por substituição;
- prevenir os operadores do contacto com os perigos, ou de controlá-los, encontrando um estado seguro do equipamento antes do operador entrar em contacto com ele;
- a redução do risco durante as intervenções (por exemplo, de programação).

A mesma norma diz que a realização destes três princípios pode envolver:

- projetar o sistema robotizado para permitir que as tarefas do operador sejam realizadas do lado de fora do espaço salvaguardado;
- a criação de um espaço salvaguardado e de um espaço restrito para operação;

- provisionar seguranças quando as intervenções tenham que ocorrer dentro do espaço salvaguardado.

O acesso ao perímetro ou área salvaguardada de uma célula robotizada é feito com mais frequência através de dispositivos eletrônicos de segurança, como as barreiras fotoelétricas de segurança, ou *Active Opto-Electronic Protection Devices* (AOPD), que permitem o acesso a essa zona sem necessidade de operações manuais adicionais, tais como a abertura de uma porta. Nestes casos, a AOPD é habitualmente montada com um conjunto de feixes horizontais que deverão detetar a entrada de um corpo humano completo, o que em questões de segurança é diferente de detetar apenas um membro do corpo como um dedo, uma mão, um braço, a cabeça, etc. Note-se que, no que respeita à deteção do corpo completo, a norma EN 13857 prevê que o primeiro feixe de deteção de entrada deve estar colocado a uma altura máxima de 300 mm do solo, distância que previne a entrada do operador rastejando. A altura máxima deve prevenir a entrada saltando sobre a AOPD, sendo recomendado um valor superior a 900 mm de altura em relação ao solo. Os feixes intermédios devem estar colocados com diferença inferior a 400 mm entre eles, exceto se usados apenas dois feixes, a 300 mm e 900 mm respetivamente. O critério da deteção do corpo completo implica a existência de uma distância de segurança entre o risco mecânico, um robô ou eixo externo, e a AOPD vertical, que permita a mitigação completa desse risco até ao seu alcance físico por parte do operador. Aliás, a colocação de uma AOPD de montagem horizontal, paralela ao solo, é possível mas pouco comum, porque aumenta significativamente a distância de segurança e o número de feixes intermédios necessários. No caso de um equipamento robótico, a distância linear entre a AOPD vertical e o equipamento nunca será inferior ao valor da distância S , em milímetros, calculada por [24][25]:

$$S = (K \times T) + C$$

$K = 1600$ mm/s, valor constante de velocidade, considerado o limite da velocidade de invasão por um humano;

$T =$ Tempo em segundos, somatório do tempo de reação do AOPD, do tempo total de reação dos equipamentos e interfaces de segurança, e do tempo de paragem do equipamento robótico;

$C = 850$ mm, valor constante da distância de prevenção de acesso de um corpo humano completo.

Se for usado um *Scanner* de segurança, em substituição da AOPD, a fórmula apresentada pode manter-se válida ou aumentar o valor da constante C até 1200 mm, porque este valor passa a depender da resolução do *Scanner* em função da distância de detecção.

2.4.3. RISCOS EM SOLDADURA POR ARCO ELÉTRICO

O processo de soldadura por arco elétrico contém riscos próprios, adicionados aos riscos típicos de um processo robotizado.

Numa célula de soldadura manual, alguns dos riscos associados ao processo de soldadura são causas frequentes de acidentes de trabalho. A robotização desse processo diminui significativamente a exposição a esses riscos mas, na sua maioria, não os elimina por completo. Aqui, abordam-se os cinco riscos mais importantes num processo de soldadura por arco elétrico: riscos térmicos, projeções, elétricos, radiações, e fumos e gases tóxicos.

2.4.3.1. RISCOS TÉRMICOS E PROJEÇÕES

O processo de soldadura por arco elétrico tem na sua gênese uma fonte de calor associada à formação e manutenção do arco elétrico para a fusão do metal, cuja temperatura pode superar os 3000° C. Note-se o risco de incêndio desta temperatura caso seja combinada a um combustível e ao ar ambiente da fábrica, potencial fornecedor do oxigénio (o comburente).

Mesmo após o fim do processo de soldadura, a peça soldada mantém uma temperatura elevada por vários minutos. Se a desmontagem da peça soldada é feita manualmente por operador, existe o risco de queimaduras durante essa manipulação. A alta temperatura dos materiais de suporte às peças soldadas, ou ao processo de soldadura, deve também ser atendida nos cuidados a ter. Durante o processo de fusão podem ser projetadas partículas incandescentes, ou mesmo haver escorrimento do metal líquido, causando queimaduras graves. Note-se que algumas destas partículas podem atingir longas distâncias e não se conterem à célula de soldadura, se o sistema de vedações de segurança assim o permitir, representando um risco que implique a utilização de equipamentos de proteção individual.

2.4.3.2. RISCOS ELÉTRICOS

Sendo um processo elétrico, uma incorreta instalação, operação ou manutenção dos equipamentos do processo de soldadura são origens de riscos elétricos, ao poderem criar diferenças de tensão que se propaguem no próximo contacto por toque humano. É importante que os equipamentos elétricos do processo de soldadura estejam devidamente ligados à massa ou terra. Aqui, devem distinguir-se as conexões à terra, como em qualquer equipamento elétrico, com as conexões à massa de soldadura. A massa da soldadura está associada à polaridade inferior do processo de soldadura, que é distinta da polaridade do solo, ou terra. É importante o uso de cabos e conectores elétricos com o diâmetro mínimo necessário para evitar os riscos de danos nos mesmos e a má condução da corrente elétrica. Os equipamentos elétricos devem também estar protegidos da humidade. Se forem utilizados vários equipamentos de potência, pode existir risco de tensão em circuito aberto entre eles.

2.4.3.3. RADIAÇÕES

A fonte de calor deste processo de soldadura é gerada por um arco elétrico e essa descarga elétrica é mantida através de um gás, cujo aquecimento (ou ionização térmica) emite radiações eletromagnéticas com comprimento de onda variável, consoante o processo. Este comprimento de onda tem o limite máximo em $1,4 \times 10^{-6}$ m, o que no espectro eletromagnético corresponde ao infravermelho, atravessa a região da luz visível, e inclui parte da região do espectro correspondente à radiação ultravioleta (UV), incluindo toda a região de UV do tipo A e do tipo B (UV-A e UV-B), diminuindo até 2×10^{-7} m [26]. A Figura 13 ilustra a região do arco de soldadura, nas suas características de comprimento de onda e frequência, numa parte do espectro da radiação eletromagnética.

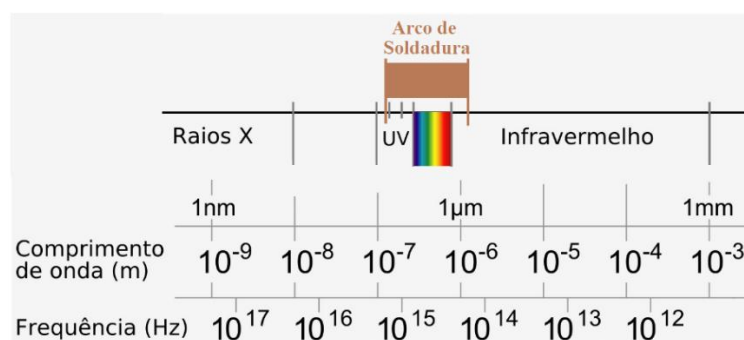


Figura 13 Características da radiação do arco de soldadura

A exposição a estas radiações (mesmo após reflexão) é prejudicial à saúde, causando vários problemas visuais e cutâneos, imediatos e a longo prazo. Sendo radiações não-ionizantes, em que o nível de energia térmica não é suficiente para separar os elétrons dos átomos produzindo iões, a proteção deste risco numa célula robotizada passa pelo isolamento da zona de soldadura por superfícies que sejam opacas para as radiações referidas, e não refletoras. Se, por algum motivo, o isolamento destas radiações não for eficaz, os operadores podem estar sujeitos ao uso de equipamentos de proteção individual e a tempos limite de exposição. Note-se que alguns processos de soldadura podem gerar energia suficiente para emitir radiação ionizante, como o exemplo de alguns processos *Tungsten Inert Gas* (TIG), mas tais processos não são abrangidos por este trabalho.

2.4.3.4. FUMOS E GASES TÓXICOS

O processo de soldadura gera fumos e gases tóxicos para a saúde. Estes fumos contêm partículas de metais. Dependendo do processo de soldadura, os metais perigosos contidos no fumo gerado podem ser diversos, tais como o alumínio, antimónio, arsénio berílio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, crómio, estanho, ferro, manganês, molibdénio, níquel, prata, titânio, vanádio e zinco. Os gases perigosos gerados pelo processo de soldadura podem ser oriundos do próprio gás de isolamento, tipicamente o árgon, hélio, nitrogénio ou dióxido de carbono, assim como serem gases resultantes do processo como o óxido nítrico, dióxido de azoto, monóxido de carbono, ozono, fosgênio e fluoreto de hidrogénio. A exposição prolongada aos fumos ou gases de soldadura provoca diversos problemas de saúde. Os fumos podem provocar danos no sistema respiratório e vários tipos de cancro. Os gases causam úlceras estomacais e danos no sistema urinário, nas articulações e no sistema nervoso [27]. A elevada concentração de gases não adequados à respiração causa asfixia. Numa célula robotizada de soldadura ou *cladding*, a melhor prevenção ao risco dos fumos e gases resultantes do processo é a colocação de um sistema de aspiração eficiente sobre a zona de processo, dotado de um adequado sistema de filtragem desses fumos e gases, e a evacuação do ar filtrado preferencialmente para o exterior da fábrica, para promover a renovação do ar ambiente. Pode ser necessário incluir esta aspiração na zona de acesso salvaguardado do operador, e não apenas na zona de acesso restrito do robô, já que a emissão de gases e fumos tóxicos associada à alta temperatura da peça pode continuar por vários minutos após a conclusão do processo elétrico e da rotação das peças soldadas para o posto de desmontagem.

3. O PROCESSO GMAW DE SOLDADURA OU *CLADDING*

O processo de soldadura é muito comum no fabrico de componentes metálicos, especialmente no setor automóvel. Os dados estatísticos do grupo *International Federation of Robotics* (IFR), acerca do parque de robôs instalados a nível mundial, evidenciam a soldadura por pontos e a soldadura por arco como as principais aplicações na utilização final dos robôs industriais fornecidos pelos fabricantes membros desta associação [28].

Existindo uma grande variedade de processos de soldadura, este projeto está orientado apenas para os processos com adição de metal, através do consumo contínuo de elétrodo aplicado sobre o efeito de um arco elétrico e revestido a gás. Aqui se inclui também o processo de *cladding*. A *American Welding Society* (AWS) atribui a este processo a designação de *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), enquanto a norma ISO 4063, que classifica vários processos de soldadura atribuindo-lhes uma numeração identificativa, distingue este processo de soldadura consoante os dois subtipos de gás usados para o revestimento [29]:

1. o processo número 131 é designado *Metal Inert Gas* (MIG), e corresponde ao processo que utilize um gás inerte no revestimento;

2. o processo número 135 é designado *Metal Active Gas* (MAG), e corresponde ao processo que utilize um gás ativo no revestimento.

Este capítulo expõe alguns aspectos relacionados com o processo GMAW, na sua abordagem nos métodos de fabrico atuais e que tenham relevância para o desenvolvimento deste projeto. Sendo a soldadura um tema bastante orientado para o ramo da mecânica dos materiais, não se pretende aqui o aprofundamento dos dados científicos com ela relacionados, mas apenas a exposição dos necessários à obtenção dos parâmetros técnicos requeridos aos processos específicos deste projeto e à sua robotização. Note-se a existência de requisitos prévios no que se refere aos tipos de processo de soldadura ou *cladding* a utilizar, tipo de eletrodo e tipo de gás de revestimento, não parecendo razoável a exploração de alternativas neste contexto.

3.1. INTRODUÇÃO AO PROCESSO GMAW

Na forma mais restrita, como aqui serão abordados, os processos de soldadura ou *cladding* consistem na adição de um metal sobre outro através da fusão causada pelo efeito de um arco elétrico. No instante dessa fusão, o processo está revestido por um gás cujas duas principais funções, mas não únicas, são a de evitar reações químicas adversas à exposição do metal em estado líquido ao ar ambiente, e melhorar a formação de um meio condutor gasoso para a ionização. No processo GMAW, designa-se por eletrodo ao metal que é adicionado. Este eletrodo é um fio sólido, com diâmetros típicos padronizados entre 0,6 mm e 1,6 mm, ou tubular com alma metálica e diâmetros entre 0,9 mm e 2,4 mm. A sua constituição depende do metal de base a que se vai fundir e das propriedades mecânicas necessárias na liga do material fundido: o metal de base e o eletrodo. Note-se que, durante o processo de fusão por arco elétrico, não só o eletrodo atinge o estado líquido mas também uma parte do metal de base, sendo o parâmetro que quantifica a profundidade desta mistura designado por penetração. Para a formação do arco elétrico é usada uma fonte de corrente contínua. O eletrodo tem normalmente a polaridade positiva e a peça de base a polaridade negativa, o ânodo e o cátodo respetivamente. O eletrodo é alimentado a uma velocidade constante mas ajustável, podendo fundir com uma corrente elétrica que varia tipicamente entre 50 A e 600 A, e tensão entre 13 V e 38 V [30]. A alimentação contínua do eletrodo ao local do processo realiza-se através da sua passagem por um conjunto de dispositivos, sendo o mais próximo ao processo e terminal designado por

tocha. A tocha permite a polarização do eléctrodo em simultâneo com o guiamento deslizante através do seu interior, em forma de um tubo metálico em espiral, flexível, e condutor eléctrico, terminando num bico de contacto. O tubo condutor eléctrico interno e o bico de contacto no extremo da tocha permitem a transferência da potência eléctrica para o eléctrodo enquanto este é alimentado continuamente ao processo. Uma maior corrente eléctrica, quase sempre na ordem das centenas de Ampere, em conjunto com uma taxa de utilização elevada, pode implicar que a tocha seja refrigerada internamente por um líquido em circulação para diminuir a temperatura gerada pela radiação do arco e pela resistência na passagem da corrente eléctrica. No entanto, não existe um padrão que defina a suficiência da refrigeração por ar, à temperatura ambiente, ou a necessidade do circuito de refrigeração líquida da tocha. Outros fatores influenciam também esta decisão, como, por exemplo, o custo de aquisição inicial em função do custo de manutenção. Os componentes da tocha com a função de passagem de corrente para o eléctrodo são substituídos periodicamente, pelo desgaste causado por esse contacto eléctrico deslizante, desgaste este que é superior quanto maior seja a temperatura. De um ponto de vista exclusivamente técnico, a refrigeração líquida da tocha é, quase sempre, a melhor opção. Outra função da tocha de soldadura é o guiamento e aplicação uniforme do gás de revestimento. Junto à saída do eléctrodo polarizado, no extremo da tocha, o gás deve ser projetado paralelamente e de forma a revestir uniformemente toda a periferia do eléctrodo e do arco. Para auxiliar esta função, a tocha é dotada de um componente situado no extremo, designado bocal. A Figura 14 ilustra os componentes mencionados, representando o princípio de funcionamento do processo GMAW.

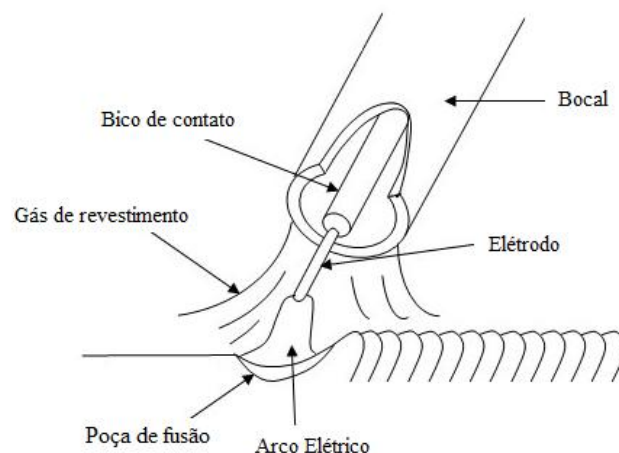


Figura 14 Princípio de funcionamento do processo GMAW

3.2. O ELÉTRODO

Um dos fatores mais importantes a ter em consideração num processo GMAW é a escolha do eletrodo. Este material, em combinação com o gás de revestimento, irá produzir o depósito de um composto químico que determina as propriedades químicas e físicas resultantes do processo. Existem basicamente cinco fatores principais que influenciam a escolha do tipo de eletrodo para um processo GMAW:

1. a composição química do material de base;
2. as propriedades mecânicas do material de base;
3. o gás de revestimento utilizado;
4. o tipo de processo de aplicação;
5. o tipo de junta pretendido.

Na ausência de qualquer padronização, a seleção do tipo de eletrodo a utilizar poderia ser uma tarefa complexa, tendo em conta a quantidade de variáveis que estes cinco pontos introduzem. No entanto, algumas normas ou padrões internacionais facilitam a sua seleção, seguindo classificações previamente tabeladas e utilizadas pelos fabricantes deste material.

3.2.1. TIPO DE ELÉTRODO

Para aplicação em processo GMAW existem dois tipos principais de eletrodos:

- o eletrodo sólido, ou *solid wire*: um fio metálico feito de uma composição química que cumpre tipicamente um conjunto de especificações padronizadas;
- o eletrodo de alma metálica, ou *metal-cored wire*: um fio constituído por um pó metálico interior envolto num tubo sólido. Este tipo de eletrodo produzirá uma quantidade mínima de escória e mantém a necessidade do gás de revestimento, característica que o distingue do eletrodo tubular, ou *flux-cored wire*, cuja utilização não representa um processo GMAW.

A seleção entre um eletrodo sólido ou de alma metálica é pouco objetiva e não parece ter uma relação evidente entre custo e benefício. A adequação de uma composição química de um eletrodo a um determinado processo GMAW pode sugerir que o fabrico desse eletrodo

se realize por mistura de componentes em forma de pequenos grãos (pó), que dão origem ao eletrodo pretendido, sem que essa mistura implique a fusão dos componentes num único fio sólido. Um eletrodo de alma metálica gera diferenças no arco elétrico do processo porque o percurso da corrente ocorre principalmente no tubo exterior, tendo o núcleo granular uma inferior condutividade, comparativamente ao eletrodo sólido. Por outro lado, este eletrodo de alma metálica transfere partículas de metal mais pequenas através do arco, estabilizando-o mais facilmente. Esta estabilidade no arco parece trazer vantagens, como a possibilidade de aumento da taxa de deposição e da velocidade de soldadura, entre outras, embora os fabricantes deste material não permitam conclusões muito evidentes sobre as mesmas.

3.2.2. COMPOSIÇÃO PARA MATERIAIS FERROSOS

A composição química de um eletrodo baseia-se em dois grupos de processo GMAW, consoante o material de base: materiais ferrosos e materiais não-ferrosos. Aqui se mencionam apenas os materiais metálicos ferrosos por ser o único tipo tratado neste projeto. A exposição seguinte desta subsecção é parcialmente adaptada de um guia elaborado pelo fabricante ESAB [31].

Antes de abordar os eletrodos específicos para o processo GMAW de materiais ferrosos, existem similaridades básicas que todos os eletrodos ferrosos compartilham nos elementos de liga adicionados ao ferro. Na soldagem GMAW de aços carbono, a função primária das adições de elementos de liga, abordados em seguida, é controlar a desoxidação da poça de fusão e ajudar a determinar as propriedades mecânicas da solda. Oxidação é a combinação de um elemento com o oxigénio, na poça de fusão, resultando numa escória ou num filme vítreo sobre a superfície do cordão. A remoção do oxigénio da poça de fusão elimina a principal causa de porosidade no metal de solda. Alguns dos elementos de liga de um eletrodo para metais ferrosos são os seguintes:

- Silício (Si) – é o elemento mais comum usado como desoxidante em eletrodos utilizados no processo GMAW. Geralmente estes eletrodos têm na sua composição entre 0,40 % a 1,00 % de silício, dependendo da aplicação. Nessa faixa percentual o silício apresenta uma capacidade de desoxidação muito boa. Quantidades maiores de silício aumentarão a resistência mecânica da solda, com uma pequena redução na

ductilidade e na tenacidade. No entanto, acima de 1,0 % a 1,2 % de silício o metal de solda pode tornar-se sensível à fissuração.

- Manganês (Mn) – é também utilizado como desoxidante e para aumentar a resistência mecânica. O manganês está presente com 1,00 % a 2,00 % dos eletrodos de aço macio. Teores maiores de manganês aumentam a resistência do metal de solda, sendo esta influência maior que a do silício. O manganês também reduz a sensibilidade à fissuração a quente do metal de solda.
- Alumínio (Al), titânio (Ti) e zircônio (Zr) – estes elementos são os desoxidantes mais poderosos. Por vezes são feitas adições muito pequenas destes elementos, tipicamente não mais que 0,20 % como teor total dos três elementos. Nessa faixa é obtido algum aumento na resistência mecânica.
- Carbono (C) – o carbono é o elemento que apresenta a maior influência nas propriedades mecânicas e microestruturais do cordão. Na fabricação de eletrodos de aço para GMAW o teor de carbono é geralmente mantido entre 0,05 % a 0,12 %. Esta faixa é suficiente para proporcionar a resistência necessária ao metal de solda sem afetar consideravelmente a ductilidade, a tenacidade e a porosidade. Maiores teores de carbono no eletrodo e no metal de base têm o efeito de gerar porosidade, particularmente durante o processo com o gás de proteção CO₂. Quando o teor de carbono do eletrodo e/ou da peça ultrapassar 0,12 % o metal de solda perderá carbono na forma de CO. Isto pode causar porosidade. No entanto, desoxidantes adicionais ajudam a superá-lo.
- Outros – níquel, cromo e molibdênio, são frequentemente adicionados para melhorar as propriedades mecânicas e/ou a resistência à corrosão. Podem ser adicionados aos eletrodos de aço carbono em pequenas quantidades para melhorar a resistência e a tenacidade do depósito, sendo adicionados em maiores quantidades nos eletrodos de aço inoxidável. Geralmente, quando o processo é realizado com gás de revestimento argon com 1 % a 3 % de oxigênio, ou com outras misturas de argon contendo baixos teores de dióxido de carbono, a composição química do metal de solda não vai diferir muito da composição química do eletrodo. No entanto, quando o dióxido de carbono é usado como gás de revestimento, podem ser esperadas reduções nos teores de silício,

manganês e outros elementos desoxidantes. Os teores de níquel, crômio, molibdênio e carbono permanecerão constantes. Elérodos com teor de carbono muito baixo (0,04-0,06 %) produzirão, com o dióxido de carbono como gás de proteção, metais de solda com maior teor de carbono.

Quando a corrente de soldadura, o tamanho da poça de fusão, a quantidade de oxidação, os resíduos de fundição, e o óleo encontrados na superfície do metal de base aumentam, ou mesmo quando os teores de dióxido de carbono ou de oxigênio aumentam, os teores de manganês e de silício do eletrodo devem também aumentar para proporcionar melhor qualidade ao cordão.

A Tabela 5 [31] lista os requisitos químicos e as designações para todos os eletrodos de aço carbono para GMAW cobertos pela especificação AWS, designação A5.18.

Tabela 5 Requisitos de composição química para eletrodos de aço macio

AWS	C	Mn	Si	S	P	Mo	Outros
ER70S-2	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	≤0,035	≤0,025	---	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-4	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-5	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,025	---	0,50-0,90 Al
ER70S-6	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-7	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	---	
ER80S-D2	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	0,40-0,60	
ER70S-G	não especificado – requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor						

Na escolha do eletrodo adequado para a soldadura de aços inoxidáveis existem geralmente alguns aspectos a serem considerados [31]:

- os gases de proteção são normalmente limitados a Argon com 1 % O₂ para a soldadura em *spray* e outro de 90 % He com 7,5 % Ar e 2,5 % CO₂ para curto-circuito.
- os eletrodos são, na maioria das vezes, escolhidos para combinar com a composição química do metal de base;
- os níveis de desoxidantes são de primordial importância. Ao contrário dos eletrodos de aço carbono, não há requisitos de propriedades mecânicas para o metal de solda depositado.

3.3. TIPO DE GÁS

O tipo de gás utilizado no processo GMAW é o que define também a designação alternativa por processo MIG ou MAG. O processo MIG consiste numa atmosfera com um gás predominante do tipo inerte, como por exemplo, o argon. Entre os especialistas em processos de soldadura, o processo MAG tende a significar a utilização de gás de revestimento com uma composição superior a 20 % de dióxido de carbono, CO₂. O dióxido de carbono é o gás mais barato e, talvez por esse motivo, o mais frequentemente utilizado em misturas de até 100 % CO₂, apesar de poucas vezes representar o gás com os melhores resultados qualitativos [31]. Note-se ser habitual encontrar a designação ‘100 % CO₂’ embora tal represente um abuso que apenas pretende indicar um dióxido de carbono ausente de misturas forçadas, e não um gás em estado puro. Atualmente, os fabricantes disponibilizam as mais variadas misturas de gases ativos e inertes tornando-se difícil afirmar se o processo é MIG ou MAG, pelo que estas designações tendem a perder significado porque, para ser exato, o processo é ativo se o gás de revestimento contém qualquer percentagem não residual de um gás que promova reações químicas ou metalúrgicas ao metal fundido.

Os principais gases de revestimento utilizados num processo GMAW são:

- gases inertes (ou inativos): argon (Ar), hélio (He);
- gases ativos: dióxido de carbono (CO₂), hidrogénio (H); oxigénio (O₂);
- gases parcialmente ativos (gases ativos apenas sob certas condições): nitrogénio (N).

O fluxo de gás de revestimento à saída do bocal da tocha situa-se tipicamente entre 12 l/min e 20 l/min. Um caudal superior pode ser necessário nos locais de grande circulação de ar ou em casos de processo em ambientes exteriores. Se houver uma mudança do diâmetro do bocal instalado na tocha, isso pode alterar o fluxo de gás e forçar uma nova regulação do mesmo. Note-se que o dispositivo regulador e o dispositivo medidor do fluxo de gás devem ambos estar adequados ao tipo de gás com que são utilizados.

3.3.1. PROPRIEDADES DO GÁS

As propriedades básicas de um gás de revestimento que afetam o desempenho de um processo GMAW são [32]:

- propriedades térmicas a elevadas temperaturas;
- reação química do gás aos vários elementos do material de base e do elétrodo;
- efeito do gás no modo de transferência de metal.

A condutividade térmica do gás à temperatura do arco elétrico influencia a tensão desse arco assim como a energia térmica dissipada pelo processo. Com o aumento da condutividade térmica, maior a tensão elétrica necessária para manter um arco estável. Por exemplo, a condutividade térmica do hélio ou do dióxido de carbono é muito superior à do árgon, logo, esses gases dissipam mais calor do arco para o processo. Essa dissipação de calor leva à necessidade de uma tensão elétrica maior para manter o arco estável. A Figura 15 (adaptada de [33]) ilustra o efeito relativo da escolha de um gás, para um valor igual de tensão, no contorno e na penetração de um cordão de soldadura, assim como na transferência do metal.

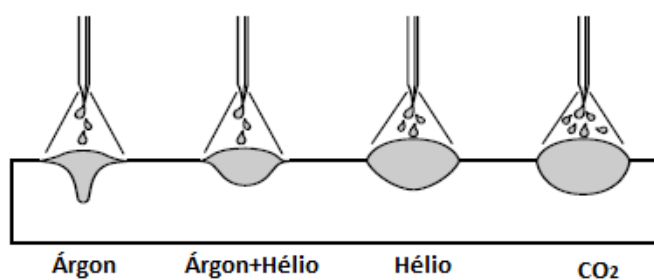


Figura 15 Contorno da penetração usando diferentes gases de revestimento

A compatibilidade de cada gás de revestimento com o elétrodo e o metal de base determina a adequação das várias combinações de misturas de gases. Por exemplo, o dióxido de carbono e a maioria dos gases de revestimento compostos de oxigénio não devem ser utilizados para soldar alumínio, devido à formação de oxidação desse metal. No entanto, esses gases (CO_2 e O_2) são úteis ou mesmo essenciais para o processo GMAW de alguns tipos de aços, promovendo a estabilidade do arco e uma boa fusão entre a poça de solda e o material de base. O oxigénio é muito mais oxidante que o CO_2 . Por isto, as adições de oxigénio em árgon são geralmente menos do que 12 % do volume total dessa mistura. Por outro lado, um gás 100 % CO_2 pode ser utilizado para GMAW nos aços macios. Os elétrodos devem conter fortes elementos antioxidantes para suprimir porosidades quando usados com gases oxidantes, especialmente nas misturas com percentagens elevadas de CO_2 ou O_2 e, em especial, no caso de 100 % CO_2 .

Os gases de revestimento determinam o modo de transferência de metal e a profundidade a que a peça de base é fundida (penetração). A Figura 16 (adaptada de [33]) ilustra o efeito relativo na penetração num cordão, usando um gás de revestimento 100 % CO₂, e nas misturas com argônio ou oxigênio.

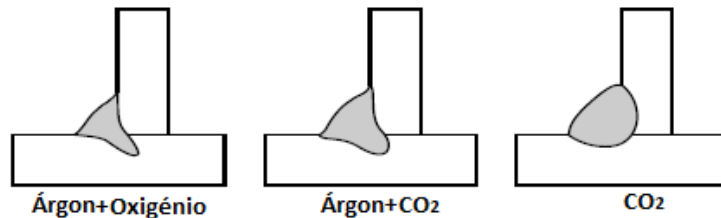


Figura 16 Efeito do gás de revestimento CO₂ e misturas com argônio ou oxigênio

A transferência em arco *spray* não é obtida quando o gás é rico em CO₂, e mesmo as misturas que contêm mais do que cerca de 20 % de CO₂ não exibem uma verdadeira transferência em arco *spray*. A formação de salpicos tende a aumentar quando as misturas são mais ricas em CO₂. É frequente os fabricantes de gás de revestimento apresentarem tabelas indicando o gás recomendado para um determinado processo GMAW, tendo também em consideração o material de base utilizado e o tipo de eletrodo.

3.4. VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ELÉTRODO

No processo GMAW deve haver um equilíbrio entre a velocidade com que o eletrodo é alimentado ao processo de fusão e adição, e a potência elétrica estabelecida no respetivo arco. Assumindo-se que a potência elétrica é suficiente para o estabelecimento contínuo de um arco elétrico, a variação da tensão ou da velocidade de alimentação do eletrodo resultam na variação de duas características relacionadas entre si e com o desempenho do processo: o comprimento do arco e a taxa de deposição.

O comprimento do arco é a distância do arco elétrico estabelecido entre o extremo do eletrodo antes da fusão e o material fundido depositado na peça de base. A taxa de deposição relaciona-se com a quantidade de eletrodo depositado, dependendo da velocidade de alimentação.

Pela relação sinérgica entre a potência elétrica e a velocidade de alimentação do eletrodo num processo GMAW, a maioria dos fabricantes de equipamentos para este processo

facilitam o ajuste destes parâmetros, disponibilizando nos seus equipamentos aquilo que designam por linhas sinérgicas: tratam-se de programas previamente instalados e associados ao controlo da fonte de potência e da alimentação de eléctrodo que, introduzindo alguns dados específicos, como por exemplo, o diâmetro do eléctrodo, o tipo de material e o gás de revestimento utilizados, estabelecem uma relação quanto à potência eléctrica e à velocidade de alimentação do eléctrodo e, neste modo, eventuais ajustes posteriores continuam a forçar uma relação coerente entre ambos.

A Figura 17 ilustra de que forma a velocidade de fio e a tensão influenciam o comprimento do arco. A zona vermelha representa a viabilidade de um arco contínuo. As retas verdes pretendem recordar que o aumento da velocidade de fio, com o respetivo aumento do comprimento do eléctrodo e diminuição do comprimento do arco, provoca queda da tensão. Note-se a influência do comprimento do arco na penetração do material.

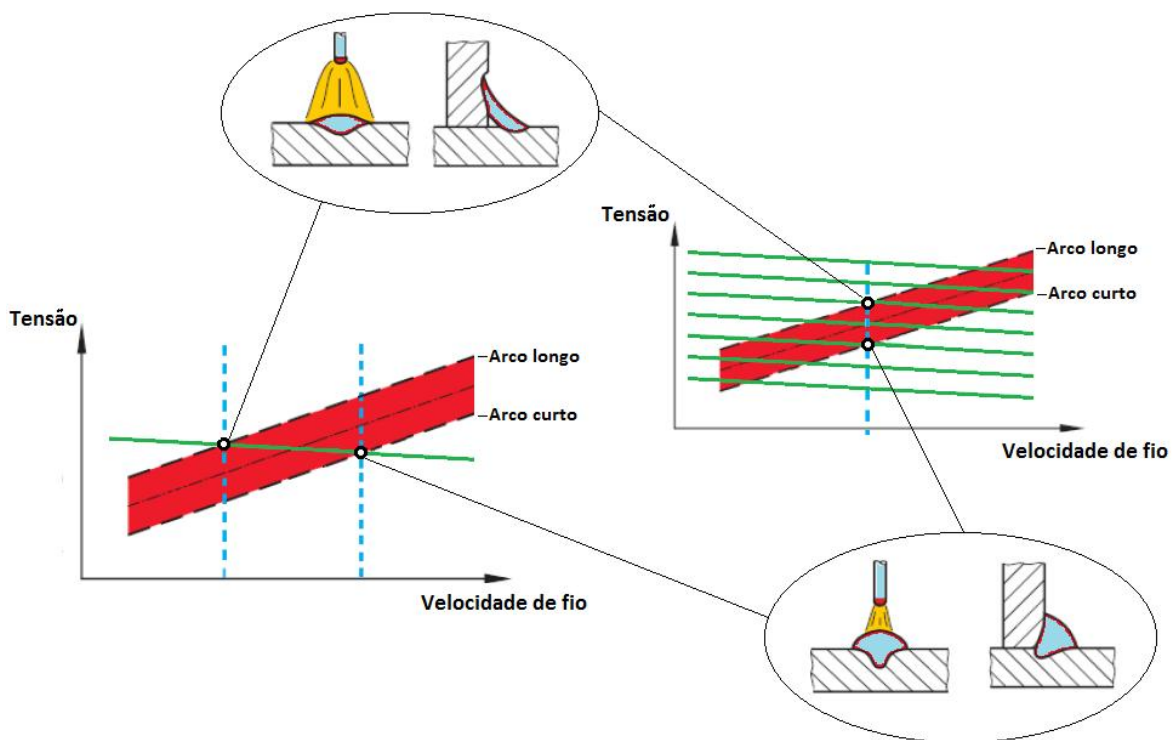


Figura 17 Comprimento do arco: velocidade de fio em função da tensão

3.5. MODOS DE ARCO

Depois de exposta a relação entre a tensão e a velocidade de alimentação de eléctrodo, pode ser feita uma análise ao modo de arco e, desta forma, obter um agrupamento das principais

características a ele referentes e associadas à transferência de material. Importa salientar que cada modo de arco tem características e aplicabilidades próprias, que dependem fundamentalmente dos ajustes adequados da tensão e da corrente, do tipo de gás de revestimento, entre outras variáveis relativas ao equipamento, e mesmo externas ao processo [30].

3.5.1. ARCO CURTO

O modo arco curto (ou curto-circuito) refere-se a uma menor tensão e velocidade de fio que resultam na fusão de uma gota de eletrodo apenas no instante próximo àquele em que o eletrodo toca na peça de base provocando um curto-circuito, processo que se repete entre 20 e 200 vezes por segundo. Nesse instante a corrente elétrica sobe, assim como a força magnética aplicada à ponta do eletrodo. Este campo eletromagnético que rodeia o extremo do eletrodo causa a separação da gota fundida na sua ponta e a projeção à peça de base. Este modo de transferência de metal suporta tipicamente o uso de eletrodos mais finos, de até 1,1 mm de diâmetro [33]. Como tem uma menor transferência de calor, adequa-se aos casos de processo em peças mais sensíveis à deformação térmica. Por isto, e porque permite a realização do processo em qualquer posição, é um dos modos de arco mais fácil de usar numa operação manual, ou de robotizar. Uma má regulação deste processo pode facilmente resultar numa má fusão do eletrodo com as peças, ou no excesso de salpicos e na necessidade da sua limpeza posterior.

3.5.2. ARCO SPRAY

O modo arco *spray*, ou arco aerossol, refere-se à elevação dos mesmos parâmetros (potência e velocidade de eletrodo) para valores mais altos, o que resulta numa transferência de material na forma de diversas gotículas pequenas, inferiores ao diâmetro do eletrodo, parecendo ser esta a origem do termo '*spray*' na designação deste modo. Este é o modo de arco cuja transferência de material implica a maior energia num processo GMAW e permite elevadas taxas de deposição.

Embora as posições de soldadura sejam mais limitadas, podendo ser usado praticamente apenas na soldadura horizontal e plana, as qualidades obtidas quanto ao aspeto do cordão, a fusão com a peça de base e a menor geração de salpicos compensam para uma preferência por este método.

3.5.3. ARCO MISTO

Se utilizados parâmetros elétricos superiores aos do arco curto mas inferiores aos do arco *spray*, com uma velocidade de alimentação do eletrodo que resulte numa transferência de metal em forma de glóbulos, os modos de arco mencionados anteriormente podem conjugar-se num modo intermédio conhecido por arco misto. Esta transferência globular, cujo material fundido é transferido em gotas de dimensão superior ao diâmetro do eletrodo, resulta em maior instabilidade do arco elétrico por dar origem a curto-circuitos eventuais, durante essa transferência através da coluna do arco. Por isso, este modo de arco é tido como mais perigoso porque tende a originar mais salpicos. Uma má regulação dos parâmetros deste arco facilmente leva à existência de defeitos de soldadura conhecidos como colagem, em que o material depositado não funde devidamente com as peças de base.

O gráfico da Figura 18 pretende ilustrar a relação da transferência de material entre os modos de arco já mencionados: arco curto, arco misto e arco *spray*. A ilustração do parâmetro de tensão de arco, e não da corrente elétrica ou potência, deve-se a que é mais evidente a influência da variação de tensão no modo de transferência de material metálico.

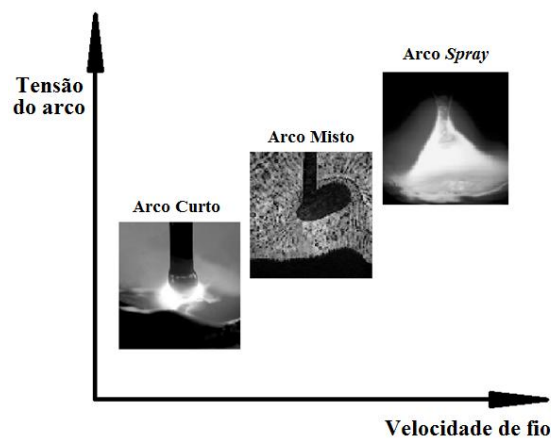


Figura 18 Relação da transferência nos modos de arco curto, misto e *spray*

3.5.4. ARCO PULSADO

O modo de arco pulsado corresponde a uma tensão de arco por pulsos elétricos, em que cada pulso corresponde, em duração e valor de tensão, a uma taxa de fusão e deposição de eletrodo numa forma semelhante ao arco *spray*.

O arco pulsado caracteriza-se por apresentar dois níveis de corrente elétrica: (i) um nível baixo, conhecido como corrente de base, que tem como finalidade manter o arco e gerar aquecimento do eletrodo e (ii) um nível alto, conhecido como corrente de pico, que gera energia suficiente para destacar a gota da extremidade do eletrodo e projetá-la através da coluna do arco. Por não se tratar de um arco constante, a seleção do gás passa a ser mais condicionada já que este deve promover uma estabilização do arco mais rápida. Por exemplo, um gás ativo com grande percentagem de dióxido de carbono não é utilizável neste modo de arco. Este método representa uma temperatura inferior gerada pelo processo, devido aos menores valores de tensão e corrente médios, assim como o arrefecimento durante o tempo nulo do ciclo elétrico.

3.5.5. ARCO CMT

O modo *Cold Metal Transfer* (CMT), apresentado pelo fabricante Fronius™, representa um método que pretende minimizar a temperatura gerada pelo processo de transferência de material. Dos modos já referidos, e no que toca à transferência de material, o método assemelha-se ao arco curto, sendo que o comprimento de eletrodo que não funde (logo não forma a gota de material transferido) recua ligeiramente no interior da tocha, obtendo-se desta forma um maior controlo da corrente necessária para a transferência de material, minimizando-a. Embora recorra a equipamentos de controlo do processo especiais, logo mais dispendiosos, o processo CMT apresenta-se mais vantajoso para a maioria dos materiais, representando um dos modos de arco com maior controlo na deposição de material. Tal como no arco curto, o modo CMT tem limitações no diâmetro do eletrodo, sendo pouco frequente utilizá-lo com diâmetros superiores a 1 mm, e raramente superiores a 1,2 mm. Tal como no modo de arco pulsado, o modo CMT tem limitações na seleção do tipo de gás de revestimento.

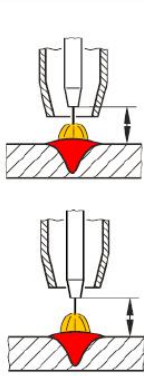
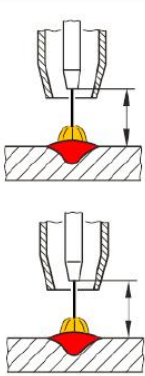
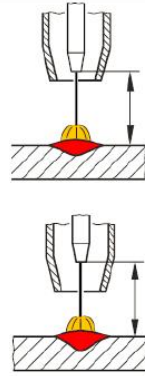
3.6. STICKOUT E ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA TOCHA

O termo *stickout* é habitualmente utilizado para designar a distância entre a peça de base e o extremo do bico de contacto no ponto de saída do eletrodo. Nalguns documentos técnicos em língua Inglesa, o *stickout* pode também ser designado por *Contact Tip to Work Distance* (CTWD), tendo o mesmo significado. Assim, durante a realização do processo, o *stickout* é a soma do comprimento do arco e do comprimento do eletrodo sólido fora do

bico de contacto da tocha. Esta distância tem influência no processo na medida em que um *stickout* menor permite mais penetração, logo uma maior taxa de deposição de material. A geração de salpicos é tendencialmente superior quanto maior for o *stickout*.

A Tabela 6 (adaptada de [34]) ilustra os efeitos da dimensão do *stickout* nos parâmetros de penetração, geração de salpicos e taxa de deposição de material num cordão de processo GMAW.

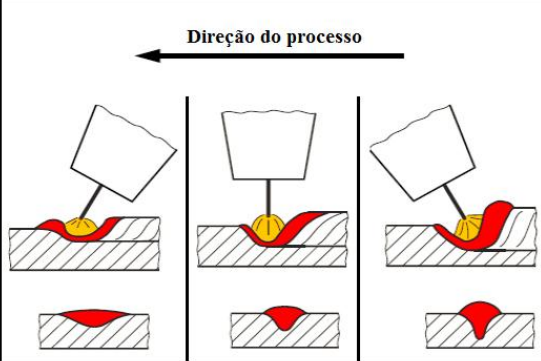
Tabela 6 Efeitos da dimensão do *stickout* no cordão

			
Penetração	Funda	Média	Suave
Geração de Salpicos	Baixa	Média	Alta
Taxa de Deposição	Alta	Média	Baixa

O ângulo de inclinação da tocha em relação à direção de deslocação do processo, durante a realização do cordão, também afeta alguns dos parâmetros mencionados, entre outros, mesmo mantendo a velocidade de deslocação e o *stickout*. Nos testes iniciais de um processo GMAW é habitual começar por se posicionar a tocha com uma inclinação perpendicular em relação à direção da junta, variando depois o seu ângulo nessa direção, conforme a melhoria no resultando pretendido para alguns parâmetros desse processo. Estabelecer um limite quanto à inclinação máxima da tocha em relação à direção perpendicular ao seu deslocamento não parece consensual. Na procura por recomendações quanto a este ângulo encontram-se valores de referência até 20 graus, como limites de estabilidade face à combinação dos vários efeitos resultantes.

A Tabela 7 (adaptada de [34]) pretende ilustrar, de modo genérico, os efeitos do ângulo de inclinação da tocha em relação à direção do processo, em vários parâmetros deste.

Tabela 7 Efeitos do ângulo da tocha no cordão

			
Penetração	Suave	Média	Funda
Geração de Salpicos	Alta	Média	Baixa
Estabilidade do Arco	Má	Mediocre	Boa
Largura do Cordão	Largo	Médio	Estreito

3.7. POSIÇÕES DE PROCESSOS DE SOLDADURA E ASSOCIADOS

Um processo soldadura, ou outros associados como o *cladding*, tem posições mais ou menos adequadas à sua realização. Sem depender do tipo de arco, a realização do processo de modo favorável à força gravitacional é o mais recomendado, sempre que tal for possível. Este é o motivo principal do uso de posicionadores na robotização do processo. A norma EN ou ISO 6947 estabelece uma nomenclatura para diversas posições de soldadura, sendo aqui referidos alguns exemplos mais comuns.

A posição PA é a mais favorável para a maioria das aplicações de soldadura. Tem melhor controlo de penetração e facilmente se obtém um bom aspeto do cordão. É a posição que permite maiores velocidades de soldadura e a mais recomendada quanto à durabilidade da tocha de soldadura. A Figura 19 ilustra duas posições de soldadura do tipo PA.

A posição 1F é aquela em que o cordão é dado numa junta em forma de canto entre duas superfícies perpendiculares e permite que a tocha esteja posicionada verticalmente, na posição mais favorável à deposição gravitacional do processo.

A posição 1G representa o cordão sobre duas peças paralelas, situação onde é recomendada a existência de um chanfro para melhorar a penetração na junta em ambas as peças.

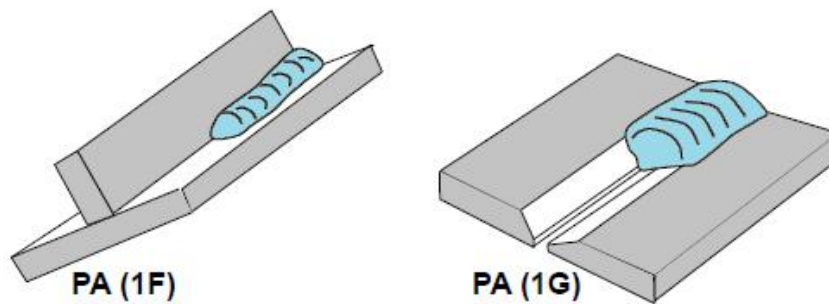


Figura 19 Posições de soldadura do tipo PA

As posições horizontais do tipo PB ou PC (ilustradas na Figura 20) são muito comuns em soldadura e representam uma boa posição para esse processo, embora requeiram mais cuidados do que as posições anteriores, motivo pelo qual a velocidade de processo é ligeiramente menor. O controlo da penetração é razoável, mas facilmente ocorrem defeitos associados ao corte de material na parte superior da junta entre o cordão e a peça de base. O depósito de material tende a ser superior na parte de baixo do cordão e a notar-se esse efeito de escorrimento.

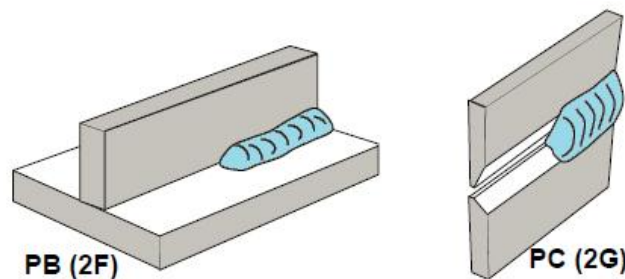


Figura 20 Posições de soldadura horizontal do tipo PB e PC

As posições de soldadura vertical distinguem-se nas suas características quanto ao sentido de realização do processo. Um cordão vertical executado de cima para baixo, designado PG, tende a forçar uma deslocação rápida da deposição, motivo pelo qual o controlo de penetração é fraco assim como baixa a deposição de material. Deve por isto ser usado para materiais mais finos, tipicamente com até cerca de 3 mm de espessura. Este cordão pode ter uma boa aparência, mas tem pouca qualidade de junção nos materiais mais espessos. O cordão vertical executado de baixo para cima, designado PF, pode ser realizado mais

lentamente pelo que permite ser usado em materiais mais espessos. Neste obtém-se uma melhor penetração e maior qualidade da junta. A Figura 21 ilustra as posições de soldadura vertical, com junta de superfícies perpendiculares 3F, ou com junta de peças paralelas 3G.

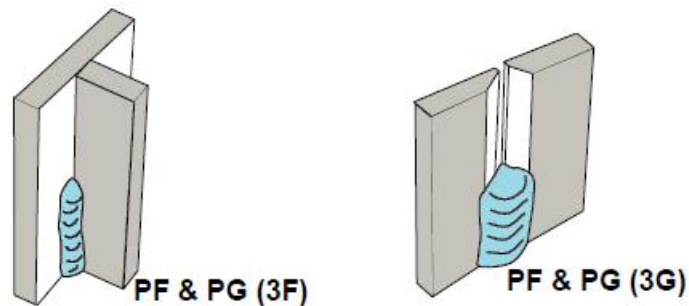


Figura 21 Posições de soldadura do tipo vertical PF e PG

A soldadura ao teto é a mais difícil para a maioria dos processos e deve por isso ser evitada sempre que possível. Como a realização do cordão é na posição contrária à força da gravidade, a penetração é de difícil controlo e exige velocidades mais lentas, com menos deposição. O aspeto visual é fraco e a qualidade do cordão é baixa. Nos casos em que é necessária uma grande deposição de material, esta posição pode levar à realização de várias passagens em detrimento de uma única. Por implicar que a tocha esteja por baixo do processo, a queda de detritos leva à necessidade de limpezas mais frequentes e perda de durabilidade dos componentes. Na soldadura ao teto, caso se trate de um cordão em canto designa-se PD. Se for totalmente vertical designa-se PE. A Figura 22 ilustra as posições de soldadura ao teto para uma junta de superfícies perpendiculares em 'T' do tipo 4F, e uma junta de chapas paralelas do tipo 4G.

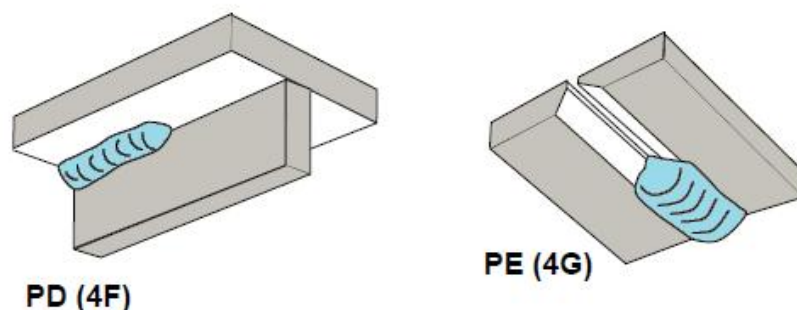


Figura 22 Posições de soldadura ao teto do tipo PD e PE

3.8. ESPECIFICIDADES DO *CLADDING*

Nos modos de um processo GMAW, a soldadura é utilizada para juntar (soldar) peças metálicas. O material adicionado para a junção tem propriedades semelhantes aos materiais de base que estão a ser soldados e a qualidade do processo baseia-se na robustez com que o cordão aplicado cumpre a função maior de unir esses materiais.

A distinção para um processo de *cladding* surge porque este processo tem como objetivo a adição de uma camada de um metal sobre outro, cada um deles com diferentes propriedades. Um processo de *cladding* é utilizado quando se pretende adicionar sobre uma superfície metálica uma camada de outro material metálico com:

- uma dureza diferente, tipicamente superior;
- maior resistência química ao meio a que será sujeito;
- outras propriedades mecânicas ou químicas, diferentes das do material de base.

Se substituído o termo *cladding* por *hardfacing* parece ser imposta uma limitação deste processo ao objetivo de endurecimento de uma superfície, o que nem sempre consiste no principal objetivo. Por outro lado, substituir o termo *cladding* pela expressão de língua Portuguesa ‘revestimento’ tende a ser interpretado como um tratamento de superfície que pode ser realizado por diferentes métodos e não necessariamente através de uma fusão por arco elétrico revestido a gás. O termo *cladding* parece assim ser o mais consensual para designar este processo.

A adição de um metal sobre outro através de um processo GMAW de *cladding* é feita de forma robusta e duradoura já que o material adicionado se funde ao material de base em toda a superfície revestida. Neste processo, é comum existirem duas características que também o distinguem de um processo de soldadura clássico:

- na passagem de vários cordões paralelos, para formar uma camada, cada um deles deve sobrepor-se parcialmente aos cordões pelos quais é ladeado. É comum realizar uma sobreposição entre 30 % e 50 % de modo a uniformizar a superfície da camada e a garantir uma quantidade mínima de material adicionado em qualquer ponto dessa superfície;
- a penetração do material adicionado com o material de base deve ser mínima, caso contrário a mistura resultante da fusão dos materiais pode adquirir propriedades

próximas ao material de base, perdendo o interesse deste processo. Pode ser necessária a aplicação de várias camadas de material, em que cada uma delas diminui progressivamente a quantidade de mistura com o material de base até que sejam obtidas as propriedades pretendidas.

Comparativamente a um processo típico de soldadura, a taxa de deposição de material de um processo *cladding* é mais elevada. Note-se que a deposição de material é o principal objetivo deste processo GMAW. Para isto são utilizados elétrodos de diâmetros superiores, raramente abaixo de 1,2 mm, em conjunto com uma elevada velocidade de alimentação do mesmo ao processo. Para obter a fusão desta quantidade superior de material, recorrem-se a potências elétricas também superiores a um típico processo de soldadura, levando a uma concentração de energia térmica que implica a necessidade de instalação de refrigeração forçada do equipamento de processo e do equipamento de suporte de peças.

4. ROBOTIZAÇÃO DE UM PROCESSO GMAW

Este capítulo apresenta alguns aspetos relacionados com a robotização de um processo GMAW e que são relevantes para o desenvolvimento deste projeto.

Além dos aspetos gerais quanto ao robô e posicionador mencionados no Capítulo 2, e das características específicas do processo GMAW mencionadas no Capítulo 3, este capítulo faz a combinação e apresentação de outros equipamentos, características e funcionalidades esperadas da robotização do processo GMAW, dando maior destaque aos equipamentos da Fronius, uma vez que é este o fabricante previsto contratualmente para a realização deste projeto.

4.1. EQUIPAMENTO ROBÓTICO PERIFÉRICO

Se um equipamento tem funções auxiliares à robotização do processo, é habitual designá-lo por equipamento periférico. Trata-se do equipamento que, não tendo uma influência direta no processo GMAW, é no entanto importante para auxiliar a robotização do mesmo. Nesta secção faz-se referência aos equipamentos periféricos considerados para a realização deste processo, nomeadamente: o centro de limpeza de tocha, o sistema de deteção de junta e o sistema de seguimento de junta, sendo que o sistema de limpeza de tocha é fundamental ao processo GMAW robotizado, enquanto os sistemas de deteção ou seguimento de junta são ainda tratados como um investimento opcional.

4.1.1. CENTRO DE LIMPEZA COM BULLSEYE

O centro de limpeza é um mecanismo de limpeza mecânica da tocha de soldadura ou *cladding* que, por ser comandado pelo robô, executa o seu trabalho de forma totalmente automática. Atua-se uma válvula pneumática que coloca em rotação uma fresa. Ao ser colocada em rotação, a fresa é também elevada e penetra o interior da tocha mantendo essa rotação. Isto faz com que os detritos sólidos do processo acumulados no interior desta sejam removidos. Para finalizar a limpeza, a tocha desloca-se para um ponto onde é aplicado um *spray* no seu interior, cuja função é criar uma película antiaderente a salpicos de soldadura.

No mesmo local do centro de limpeza pode também estar instalado o Bullseye, tecnologia específica da ABB. Do ponto de vista de *hardware*, o Bullseye é um sensor ótico que deteta a passagem da estrutura de extremidade da tocha, com o bocal e um pequeno comprimento exterior de elétrodo. Após várias passagens, em várias direções e com diferentes orientações da tocha, o robô pode calcular a posição e orientação da ferramenta que lhe está aplicada, adiante designado, pela ABB, por *Tool Center Point* (TCP). A Figura 23 ilustra este princípio de funcionamento do Bullseye.

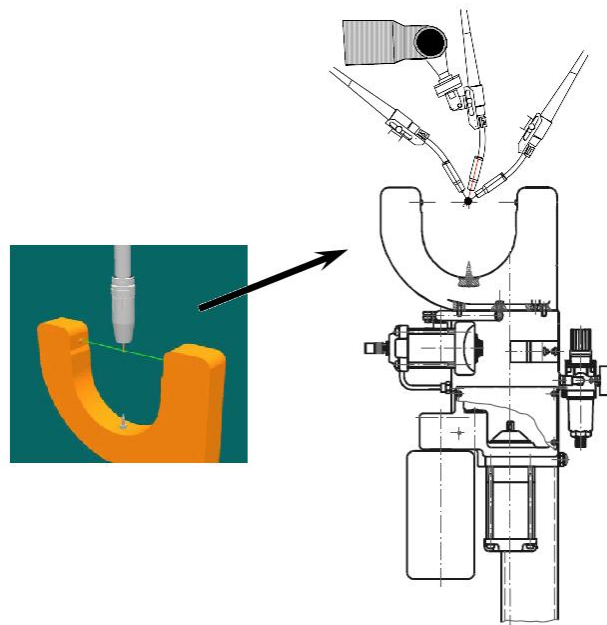


Figura 23 Princípio de funcionamento do Bullseye

Um feixe de luz tipo laser, com emissor e recetor, pode ser usado para utilização das funções de Bullseye.

O principal cuidado a ter na instalação mecânica do Bullseye é que a zona envolvente esteja livre. O robô fará movimentos automáticos em várias direções e orientações, como mostrado na Figura 23, e isso pode provocar colisões caso o Bullseye seja instalado, por exemplo, junto a uma parede.

4.1.2. SISTEMA DE DETEÇÃO INICIAL DE JUNTA DE SOLDADURA

O sistema de detecção inicial de junta consiste no equipamento e respetivo controlo que permita ao robô obter um ajuste automático das coordenadas ponto-a-ponto (não aplicável em trajeto contínuo) das posições iniciais, intermédias ou finais da execução do cordão de soldadura. Do ponto de vista do *hardware*, a detecção inicial de junta tem duas abordagens:

- a colocação de sensores de proximidade, sem contacto físico com a peça de base, que permitam ao robô obter a correção à posição inicial da junta, abordagem esta que não parece seguir um padrão de construção;
- a detecção inicial da junta através do toque na peça de base, tipicamente utilizando a própria tocha, abordagem em que parecem já estar estabelecidas semelhanças no seu princípio de funcionamento, entre os vários fabricantes de máquinas de soldadura.

O detetor de junta através do toque, única abordagem apresentada nesta subsecção, é um circuito instalado sobre o equipamento de processo, mais frequentemente no alimentador de fio e ligado entre o bocal da tocha e o cabo de corrente de soldadura, e pode ser encontrado opcionalmente nos equipamentos de vários fabricantes, como por exemplo a ESAB ou a Fronius. Este sistema complementa o circuito de comando da fonte de potência e converte a existência de um contacto elétrico entre o bocal e a peça a soldar, num sinal digital. Posteriormente o robô trata esse sinal por *software* e é este conjunto de *hardware* com *software* que permite a detecção inicial de uma junta. Por “inicial”, entenda-se que esta detecção antecede a realização do trajeto de processo, mas não ocorre durante a realização do mesmo. No caso da ABB, este sistema em funcionamento conjunto com o equipamento de processo é designado por SmarTac. No princípio de funcionamento deste sistema para a Fronius, por exemplo, é aplicada ao circuito de potência de processo da tocha uma tensão de aproximadamente 30 V DC com corrente limitada a 3 A. Note-se que a resistência do próprio equipamento de soldadura provoca uma queda de tensão até 5 V, valor que aumenta com o desgaste, oxidação ou a existência de sujidades nos contactos entre os componentes metálicos. Ao encostar a tocha à peça de base ocorre o fecho do circuito

elétrico da fonte de potência e assim é detetado esse “toque”. Na utilização do bocal como elemento de procura por toque com a peça de base o cliente é informado que o bocal da tocha deve ser mantido limpo para melhorar tanto quanto possível o seu contacto elétrico. Também pode ser usado o eléctrodo como elemento polarizado da tocha para o toque na peça de base. No entanto, a posição e comprimento do eléctrodo são difíceis de estabilizar entre realizações de cordões, e não sendo constantes torna-se pouco viável a sua utilização para procuras rigorosas. Um aumento da resistência elétrica destas peças diminuiu a precisão da procura porque pode implicar a realização de uma força de toque superior à esperada, até que se estabeleça um contacto com menor resistência elétrica entre os componentes e só então seja detetado o toque.

O líquido usado na refrigeração interior da tocha também merece atenção, por se tratar de um condutor elétrico. O circuito de deteção de contacto prevê uma resistência elétrica em paralelo para este refrigerante, que deve ser superior à habitual água “da torneira”. É também frequente os clientes criarem erradamente uma solução líquida de refrigeração para evitar oxidação, por exemplo com adição de sal, o que aumenta a condutividade da água. Portanto, ao cliente é apresentada uma recomendação para que o refrigerante a usar seja adquirido ao fabricante do equipamento de processo cujo cuidado nestes aspetos está assegurado. O cliente pode também produzir o líquido refrigerante, se utilizar uma base de água destilada em solução com etilenoglicol.

Existem sinais de interface com o robô para a utilização do *hardware* do SmarTac ligado à fonte de potência de soldadura, sendo apenas necessários dois sinais: um para ativar a função de procura pelo robô e outro de retorno, enviado pela fonte de potência no momento do contacto. Do lado do robô trata-se de uma saída e entrada digitais, respetivamente. Estes sinais são configurados no controlador do robô e são aqui mencionados com a mesma designação encontrada nos documentos técnicos de suporte à sua configuração. Para a entrada digital, a fonte de potência utiliza um sinal que é também usado para a indicação de arco estável (`diFr1ArcStable`). No momento da procura, o robô liga a saída digital `doFr1TouchSense`, e aguarda o contacto através do bit de resposta `diFr1ArcStable`.

O sinal de saída digital do robô, `doFr1TouchSense`, é usado para a ativação da procura. As linhas seguintes são escritas no ficheiro de configuração de entradas e saídas do robô:

```

-Name "diFr1ArcStable" -SignalType "DI"
-Unit "ioFronius1" -UnitMap "0"
-Name "doFr1TouchSense" -SignalType
"DO" -Unit "ioFronius1" -UnitMap "12"

```

A fonte de potência gere o *hardware* de procura e o processo de soldadura, sendo a primeira função prioritária, isto é, caso a fonte receba o sinal de procura doFr1TouchSense durante a execução de um cordão de soldadura ou *cladding*, este processo é interrompido de imediato.

O manual Fronius [35] descreve ainda parte do *hardware* envolvido na deteção do toque com o bocal – importante porque o bocal deverá estar eletricamente isolado do circuito de potência de soldadura. Entre o bocal de contacto com a peça e o circuito V+ de soldadura aplicado ao eléctrodo (pelo circuito interno da tocha), é colocado em série um circuito RC que evita a “fuga” de correntes elétricas de soldadura, caso o bocal toque na peça a soldar no decurso da solda. A Figura 24 apresenta este circuito que é instalado no interior do alimentador de fio.

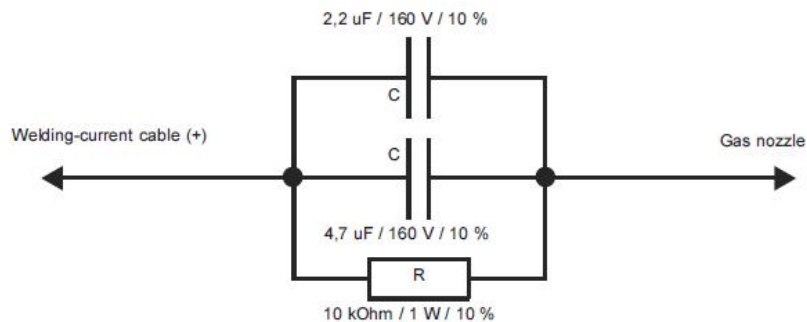


Figura 24 Elemento RC de ligação entre o bocal e o cabo de corrente de soldadura [35]

Este equipamento faz com que a corrente de curto-circuito na deteção do toque, tal como a corrente de soldadura caso o bocal toque na peça durante o processo, apenas exista durante um tempo máximo de 4 ms, até que os condensadores sejam recarregados.

4.1.3. SISTEMA DE SEGUIMENTO DA JUNTA DE SOLDADURA

Um dos desafios frequentemente colocado à robotização de um processo de soldadura é que este se possa adaptar à realização desse trabalho em peças inconsistentes ou de dimensões irregulares. Os avanços recentes em equipamento periférico de soldadura melhoraram a automação deste processo nessas circunstâncias e tornaram viável a sua

execução mesmo quando o trajeto do robô tem que ser corrigido em tempo real, durante a realização do cordão. A adição de sensores corretamente selecionados, montados e configurados, em combinação com o controle do robô, permite detetar a junta de soldadura e aproximar as capacidades desse processo robótico à operação realizada visualmente por um soldador manual, que ajusta permanentemente a tocha à posição da junta e adapta a velocidade do processo ao enchimento do cordão que está a observar. Além deste ajuste do trajeto e da velocidade, um sistema de seguimento automático de junta pode também alterar os parâmetros do processo, como a potência ou velocidade de elétrodo, conforme a variação do enchimento necessário à realização da junta de soldadura. Assim, para obter um maior enchimento do cordão, o sistema pode reduzir a velocidade de deslocamento da tocha ou aumentar o depósito do material de processo. Historicamente, esta abordagem de correção em tempo real do trajeto ou dos parâmetros do cordão, com a adição de sensores para esse efeito, tem sido limitada pelo custo inicial desse investimento, pelas limitadas capacidades de processamento, e pelas dimensões físicas do equipamento que implicam restrições na sua montagem para não causar limitações aos movimentos do manipulador.

4.1.3.1. SEGUIMENTO DE JUNTA ATRAVÉS DE VISÃO OU LASER

O sistema de seguimento de uma junta de soldadura através de um sistema de visão ou laser é uma tecnologia estabelecida e com resultados aceitáveis mas de fiabilidade questionável, motivo pelo qual o seu uso ainda seja mais habitual em situações onde os requisitos qualitativos do processo são pouco exigentes, como por exemplo, nos casos em que o depósito de material de processo seja elevado, tornando menos relevante o rigor do posicionamento da tocha face à junta. Se a junta de soldadura consiste em peças saídas de um processo de fundição ou forja, ou de um processo mecânico do qual resulte uma junta irregular com excessos ou falta localizada de material, o seguimento de junta por visão pode tornar-se mais dispendioso para poder dar a resposta adequada a esses cenários. É também frequente as peças metálicas para soldadura surgirem com uma película de lubrificante ou com um tratamento de superfície, condições que criam uma reflexão vítrea tipo espelho. Estas condições geram grande instabilidade num sistema de visão artificial. Noutros casos mais simples estão disponíveis soluções capazes e de baixo custo. Em resumo, cada sistema de visão ou laser tem as suas próprias capacidades ou limitações e a sua seleção deve ser feita tendo em conta o planeamento das tarefas que lhe são pretendidas.

Os sistemas de seguimento de junta dividem-se nas categorias 1D, 2D e 3D. No caso de um laser, o respetivo feixe para estas categorias tem forma pontual, em linha ou em forma de círculo, respetivamente. Tipicamente, estes sensores são programados através de um controlador próprio que, por sua vez, envia a informação ao robô na forma de dados que representam os valores de ajuste na direção do deslocamento da soldadura, entre uma dimensão e três dimensões. Para isto, o sensor é programável de forma autónoma. Enquanto a componente ótica do sensor é montada no extremo da tocha, para que o feixe laser fique próximo e direcionado à junta de soldadura, o respetivo controlador é instalado externamente, num local preferencialmente mais afastado das temperaturas e impurezas inerentes ao processo. A Figura 25 ilustra o terminal ótico de um sensor laser para seguimento de junta, da marca Scansonic modelo TH6D, existente no centro de testes de robótica da ABB em Moscovo. Note-se a montagem sobre a tocha do robô, em que o feixe laser é projetado a um ponto próximo à realização do processo, no extremo do bocal.



Figura 25 Terminal laser de um sensor ótico da Scansonic para seguimento de junta

Na seleção de um sistema ótico, por visão, por laser, ou até uma combinação de ambos, alguns aspetos do ambiente envolvente devem estar considerados. Neste tipo de sistemas, para montagem junto ao processo, podem surgir limitações quanto à temperatura, vibração, iluminação ou humidade a que serão expostos. Alguns sistemas estão também mais adequados à captura estática de dados, enquanto outros permitem o seguimento da junta em deslocação como é o caso do TH6D. Para o seguimento em deslocação, que implica a montagem do sistema de captura ótica junto à tocha e sobre o robô, devem ser verificadas as limitações mecânicas dessa montagem e a possibilidade de esse equipamento adicional

permitir que se alcancem todos os locais pretendidos para a realização da soldadura. Uma simulação virtual com o RobotStudio, por exemplo, pode antecipar restrições ou a necessidade de revisão da instalação do sistema, antes da sua concretização.

Para os sistemas de seguimento de junta por visão com captura de imagem de câmara e posterior processamento, note-se a necessidade de mão-de-obra especializada para os ajustes de um sistema deste tipo com manipulação de algoritmo de processamento de imagem.

4.1.3.2. SEGUIMENTO DE JUNTA ATRAVÉS DO ARCO

O seguimento de junta pode ser realizado através da medição das grandezas físicas do arco de processo. Por várias razões já mencionadas, o sistema de visão nem sempre se adequa a um seguimento de junta. No entanto, realizar esse seguimento através da medição das grandezas do arco elétrico apresenta diversas vantagens, em termos de fiabilidade e custo. Com o desenvolvimento da tecnologia e a padronização deste tipo de seguimento de junta, esta tecnologia pode vir a tornar-se um componente integrante de um sistema de soldadura robotizada. Embora ainda represente a montagem de *hardware* adicional para a medição do arco, ligado diretamente ao controlador do robô, a tendência pode levar a que este sistema se integre nas fontes de potência de soldadura (passando a representar apenas um acréscimo de *hardware*) e na interface já existente entre o robô e esse equipamento. A ABB designa este método de seguimento de junta por *Weldguide*. A FANUC designa o mesmo método por *Through Arc Seam Tracking* (TAST). Este sistema utiliza a variação da impedância do arco elétrico de soldadura para determinar a sua posição na junta. Medindo a impedância do arco, e não apenas a sua tensão ou corrente elétrica, é possível obter uma relação da distância entre a ponta do eletrodo polarizado e a peça de base, e assim detetar um desvio da posição desejada perante a junta de soldadura. A impedância do arco varia com esta distância, fenómeno ligado à ionização do gás de revestimento do processo. Embora a impedância associada à ionização do arco varie também com a pressão atmosférica, a humidade ou a temperatura, isto não causa uma relevante variação na interpretação do valor medido, já que o sistema de seguimento de junta apenas utiliza a comparação dos valores de topo: o seguimento de junta por este método implica que o robô execute o movimento de soldadura com oscilação, ou ziguezague, e a medição sincronizada da impedância permite comparar os valores de topo desse movimento com

contorno oscilatório. Se a impedância do arco variar num dos topos, o robô aproxima ou afasta a posição executada consoante o aumento ou diminuição da impedância medida nesse topo, respetivamente. Se este ajuste de posição significar também um aumento da amplitude do movimento oscilatório, o robô pode reduzir a sua própria velocidade de avanço ou solicitar aumento da deposição de material. Isto ocorre quando o enchimento da junta de soldadura é variável ao longo do cordão.

A Figura 26 (adaptada de [36]) ilustra três imagens com o formato típico de utilização de um sistema de seguimento de junta. O seguimento de um centro é o mais habitual, em que a oscilação do movimento compara os valores de impedância dos dois topos dessa oscilação e corrige a trajetória obtendo a posição central da junta. O seguimento de lateral utiliza-se quando a medição apenas é fiável num dos topos do movimento oscilatório, o que normalmente significa que no outro topo a presença de material é irregular ou não existe material com altura suficiente para um comprimento de arco que permita a medição fiável da impedância. Se a realização do cordão implica várias passagens de deposição de material, a combinação dos métodos anteriores pode ser realizada de forma automática pelo robô.

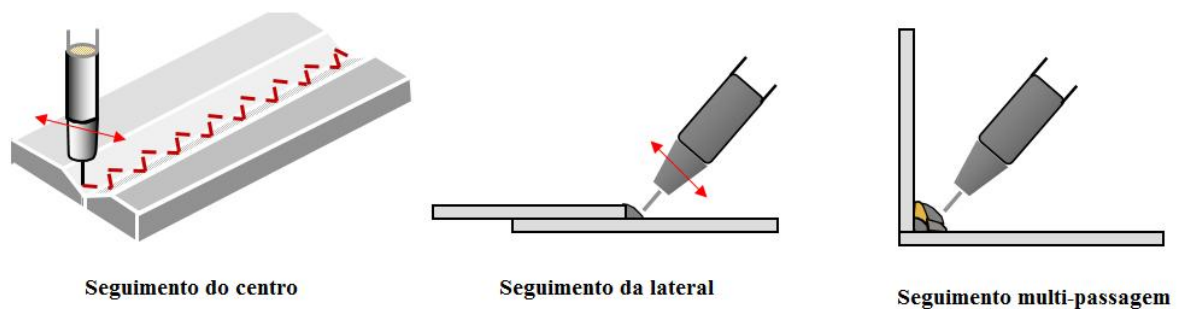


Figura 26 Formatos de um seguimento de junta de soldadura

Nalguns materiais metálicos, como o exemplo do alumínio, a sua resistência elétrica é tão baixa que torna mais difícil a medição da variação de impedância associada ao comprimento de arco e resistência do eletrodo, precisamente por essa variação ser demasiado pequena. A necessidade do movimento oscilatório para utilização deste método também pode representar uma desvantagem, nos casos em que esse movimento não seja possível.

4.2. EQUIPAMENTO DE PROCESSO

O equipamento de processo de soldadura ou *cladding* aqui mencionado é um conjunto de componentes específicos que irão tratar o processo de soldadura GMAW. O equipamento de soldadura usado, por requisito prévio deste projeto, é do fabricante Fronius. De todo o equipamento de soldadura a instalar num robô, destacam-se três conjuntos principais:

- a fonte de potência, mais vulgarmente conhecida por ‘máquina de soldar’, embora esse nome seja pouco rigoroso para este equipamento;
- a tocha de soldadura montada no manipulador;
- o alimentador de arame/eléctrodo montado no manipulador.

A escolha das características do equipamento de soldadura para aplicar num processo robotizado deve ter em conta as grandezas esperadas para esse processo, com maior importância quanto às características elétricas. O envolvimento do utilizador na seleção deste equipamento pode ser importante para avaliar a possível utilização de conhecimento prévio de um qualquer equipamento já utilizado, a existência de apoio técnico especializado no local de instalação do sistema e os resultados pretendidos no processo. Isto verifica-se no início deste projeto, no caso do processo de soldadura que já é realizado em modo manual, pelo que a fonte de potência para soldadura aqui mencionada considera as características existentes no processo manual do cliente. Os testes do processo de *cladding*, que serão mencionados adiante neste relatório, viriam a validar a utilização do mesmo modelo de fonte de potência para esse processo. Embora algumas recomendações do fabricante Fronius fossem no sentido de utilizar arco CMT, isso não veio a verificar-se necessário.

Como exemplo, apresenta-se em seguida uma listagem de equipamentos de soldadura Fronius que são necessários para robotizar os processos GMAW:

- fonte de potência *TransPuls Synergic* (TPS) 5000: 360 A para um ciclo de trabalho de 100 %, 500 A para um ciclo de trabalho de 40 %. A potência da máquina depende também do tipo de arco;
- tocha de soldadura Robacta W/F++/1,5 m com *Torch Body* RA5000 22°;
- sistema de refrigeração da tocha por água FK4000-R FC;
- sistema de alimentação de arame VR 1500 4R/F++;

- sistema de detecção de colisão Fronius XL;
- *kit* de interface com o robô, por exemplo, DeviceNet;
- sensor de gás e *kit* de detecção de toque no bocal (extremo da tocha);
- acessórios de montagem no manipulador e cabos de corrente de soldadura de 70 mm².

A Figura 27 mostra alguns equipamentos Fronius utilizados, como a tocha de soldadura, o alimentador de arame montado sobre o manipulador e a fonte de potência.



Figura 27 Equipamentos de processo GMAW do fabricante Fronius

4.2.1. INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE PROCESSO NO ROBÔ

A instalação do equipamento de soldadura no robô consiste, normalmente, na seguinte sequência de procedimentos:

1. ligação elétrica da fonte de potência;
2. ligação da interface com o robô;
3. ligação do cabo de massa entre o posicionador e a fonte de potência;
4. instalação da tocha de soldadura no manipulador;
5. instalação do alimentador de arame/eléctrodo no manipulador;
6. instalação do pacote de mangueiras entre a fonte de potência e o alimentador de arame;
7. ligação do gás de revestimento do processo;
8. colocação do arame eléctrodo;
9. instalação do sensor de contacto, usado no SmarTac.

Nesta subsecção pretende-se apresentar alguns detalhes principais da instalação e colocação em serviço deste equipamento em conjunto com o robô.

4.2.1.1. FONTE DE POTÊNCIA

A fonte de potência é o componente que controla as grandezas elétricas do processo. Como já mencionado, refere-se aqui o exemplo da fonte Fronius modelo TPS5000 por se tratar do modelo que os testes posteriores viriam a validar. Esta fonte permite correntes de processo até 360 A para um ciclo de trabalho inferior a 100 % e até 500 A para um ciclo de trabalho inferior 40 %, e usa comando digital por microprocessador, assim como um painel de interface.

A Figura 28 apresenta uma foto do painel de interface da fonte Fronius TPS5000.



Figura 28 Painel de interface da fonte de potência Fronius TPS5000

A fonte de potência deve ser programada para o processo que irá realizar. Esta programação pode ser feita pela consola do robô, como interface com a fonte de potência, ou diretamente na fonte de potência, usando o painel de interface, como apresentado na Figura 28. No caso da máquina Fronius, esta pode ter até 100 programas de soldadura diferentes, numerados entre 0 e 99, e que também são designados por 'Jobs'. Cada *Job* tem os parâmetros de processo de um dado cordão com características de soldadura específicas. Para cada cordão de soldadura diferente (diferente material, eletrodo, gás, penetração pretendida, enchimento, fusão de solda, posição de soldadura, tipo de junta, etc.), existem *Jobs* diferentes previamente programados na fonte de potência. Posteriormente será o

programa do robô, através da interface com a fonte de potência, que indica o *Job* de soldadura a utilizar pela fonte de potência em cada cordão.

Na fonte de potência existe uma lista de parâmetros de soldadura que, juntos, formam um *Job*. A lista dos principais parâmetros de soldadura e a sua descrição obtida a partir do manual Fronius é a que se apresenta de seguida [37]:

- **P:** *Power correction* – correção da potência de Soldadura, definida através da velocidade do arame. Unidade em m/min.
- **AL.1:** *Arc-Length correction* – correção geral do comprimento do arco voltaico. Unidade % (da tensão).
- **dYn:** *dynamic* – correção dinâmica no arco voltaico ou correção de pulsação no arco voltaico de impulso.
- **GAS:** *Gasflow* – valor nominal para o fluxo de gás inerte (opção “*Digital Gas Control*”). Unidade l/min.
- **GPr:** *Gas pre-flow time* – tempo de pré-fluxo de gás. Unidade segundos.
- **GPo:** *Gas post-flow time* – tempo de pós-fluxo de gás. Unidade segundos.
- **Fdc:** *Feeder creep* – arame de avanço gradual. Unidade m/min.
- **Fdi:** *Feeder inching* – velocidade de inserção. Unidade m/min.
- **Bbc:** *burn back time correction* – tempo de retro-fusão de arame. Unidade segundos.
- **I-S:** *I (current) - Starting* – corrente inicial. Unidade % (de corrente nominal).
- **SL:** *Slope* – tempo de salto entre *Jobs*. Unidade segundos.
- **I-E:** *I (current) - End* – corrente final. Unidade % (de corrente nominal).
- **t-S:** *time - Starting current* – duração de corrente inicial. Unidade segundos.
- **t-E:** *time - End current* – duração de corrente final. Unidade segundos.

Para o controlo do processo de soldadura e respetivo arco elétrico, a interface entre a fonte de potência e o robô recorre a um conjunto de sinais digitais pré-definidos, disponibilizados pelo fabricante Fronius. A Figura 29 (extraída de [38]) descreve os sinais usados nesta interface ao longo da realização de um único cordão, representando vários sinais digitais de entrada ou de saída de ambos os equipamentos.

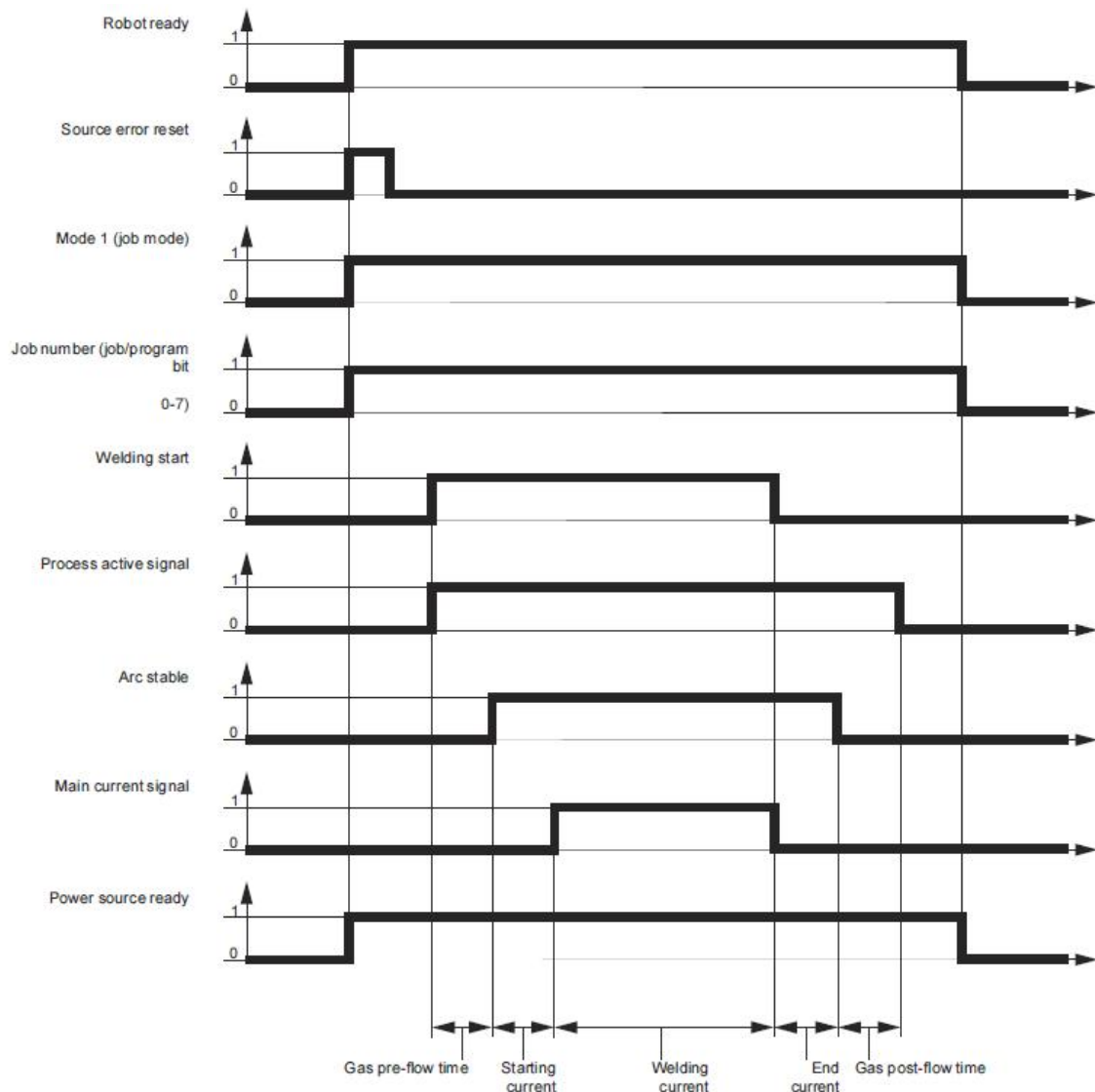


Figura 29 Interface Fronius TPS5000 em modo *Job*, com um robô

A Figura 30 (adaptada de [39]) apresenta a resposta do processo de soldadura da fonte de potência ao sinal de arco recebido do robô. Verifique-se nas Figura 29 e Figura 30 a apresentação de alguns dos parâmetros de soldadura com afetação da corrente de arranque e finalização do cordão.

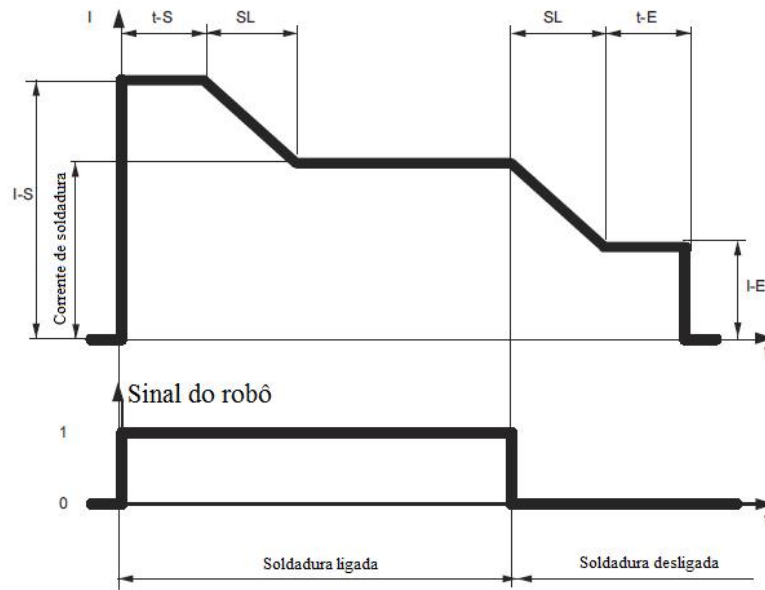


Figura 30 Resposta da fonte de potência ao sinal de soldadura do robô

4.2.1.2. TOCHA DE SOLDADURA

Aplicada sobre o manipulador, e fixada à flange do eixo 6, está a tocha de soldadura, ferramenta que deve ser configurada no robô. Os dados mais importantes a ter em consideração na configuração desta ferramenta num robô são a sua massa, o seu centro de massa e o momento de inércia.

À ferramenta tocha, tal como configurada no robô, é atribuído um campo de dados do tipo carga, ou *loaddata*, onde são definidos:

- a massa da ferramenta definida em kg;
- os valores das distâncias X , Y e Z do centro de massa em relação à flange do eixo 6 (*frame* do *tool0*), em mm;
- os valores dos momentos de inércia da ferramenta. Caso estes não sejam dados, a ferramenta é tratada como uma massa pontual.

A ordem dada a estes campos de dados é [massa,[dX,dY,dZ],[Q1,Q2,Q3,Q4],iX,iY,iZ] o que dá à tocha usada o seguinte *loaddata*:

```
[3.4, [0, 30, 130], [1, 0, 0, 0], 0.21, 0, 0.27]
```

Os valores apresentados em cada um destes campos serão explicados com maior detalhe em 5.1.1.3, durante a definição das características necessárias para os robôs de processo.

4.2.1.3. ALIMENTADOR DE ARAME ELÉTRODO

Sobre o manipulador é normalmente instalado o alimentador de arame elétrico, mais conhecido por alimentador de fio. Este componente do sistema de soldadura ou *cladding*, não exclusivo de um processo GMAW, é tipicamente colocado em série entre a fonte de potência e a tocha de soldadura e a sua principal função é a alimentação, por tração e arrasto entre carretos, do arame elétrico. O controle do alimentador de fio Fronius VR 1500 é feito integralmente pela fonte de potência a que este esteja conectado, não havendo qualquer ligação elétrica direta com o robô.

Por ser montado sobre o braço manipulador, o peso do alimentador de fio tem que ser configurado no robô, para que o robô possa reconhecer esta carga adicional no seu manipulador e saber de que forma ela foi aplicada ou quais as juntas afetadas por ela. A Figura 31 (adaptada de [40]) mostra as direções a considerar na definição de uma carga para cada um dos eixos afetados.

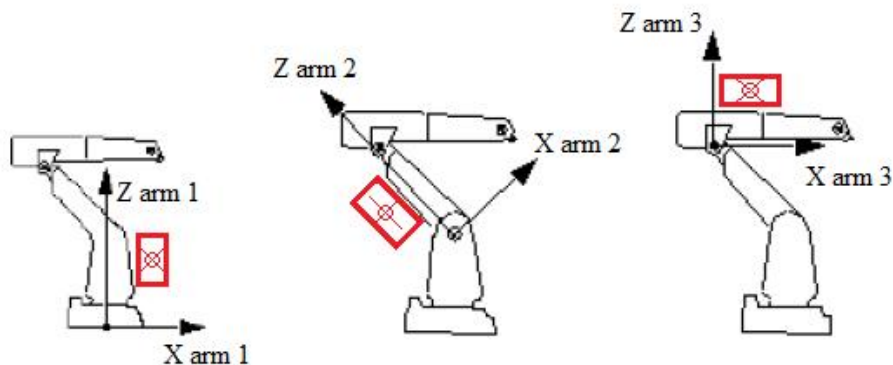


Figura 31 Direções da definição de carga do alimentador de fio

O peso de um alimentador de fio é de aproximadamente 7 kg, peso este que varia entre os diferentes fabricantes, modelos, e consoante o equipamento instalado nesse alimentador. Esta carga é aplicada com mais frequência sobre o eixo 3 do manipulador (onde é tipicamente montado), embora a montagem no eixo 1 ou no eixo 2 também seja aplicável, tal como mostrado na Figura 31. O centro das caixas apresentadas com cor vermelha pretende ilustrar o ponto que será próximo ao centro de massa do alimentador e que deve ser utilizado em cada variante de montagem do alimentador para a definição da carga aplicada ao respetivo eixo, sendo necessárias apenas as distâncias X e Z do centro de massa, em relação ao eixo afetado.

4.3. SIMULAÇÃO E PROGRAMAÇÃO *OFFLINE*

A simulação de um projeto robotizado permite antecipar as principais características dos equipamentos necessários a esse método de fabrico, adequar a sua instalação em conjunto e prever uma parte do desempenho do sistema. Este estudo virtual de várias alternativas e a demonstração da viabilidade de um sistema robotizado, sem envolver custos de construção física, tem vantagens no projeto e no prazo de desenvolvimento desse sistema. Por outro lado, deve ser considerado que a simulação apresenta apenas aquilo que está programada para simular. Pode haver fatores internos ou externos não considerados num ambiente virtual, e o desempenho da simulação diferir do desempenho em ambiente real, embora este risco seja tendencialmente diminuído com o aumento da capacidade preditiva dos programas de simulação.

Os principais fabricantes de robôs industriais disponibilizam ferramentas de *software* para simulação dos seus robôs permitindo que, em ambiente virtual, se antecipe o desempenho do sistema robotizado.

A Tabela 8 apresenta o nome das ferramentas de *software* de simulação disponibilizadas atualmente por alguns dos principais fabricantes de robôs industriais.

Tabela 8 *Software de simulação de alguns fabricantes de robôs industriais*

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

Embora com distintas funcionalidades, as duas características mais comuns destas ferramentas são: (i) a capacidade de simulação das possibilidades de posicionamento do manipulador no seu volume de trabalho, assim como essa representação gráfica; (ii) a possibilidade de programar o robô em código compatível com o controlador real.

O nível de rigor na capacidade de simular o desempenho dinâmico de um robô real pode não estar assegurado. Por isto, torna-se recomendável que o *software* utilizado nessa simulação seja construído pelo mesmo fabricante do robô, dando assim maiores garantias quanto às semelhanças com o robô real. Alguns fabricantes de robôs referem que o seu

algoritmo de controlo do manipulador virtual é igual ao instalado no controlador real, esperando assim uma maior aproximação da simulação ao desempenho efetivo do robô em estudo.

A programação *offline*, suportada numa simulação a três dimensões do sistema, permite que o algoritmo necessário para o trabalho desse sistema robotizado possa ser desenvolvido em ambiente virtual. Na fase de desenvolvimento do sistema, esta capacidade pode antecipar a realização do trabalho de programação necessário, trabalho que pode até ficar concluído em conjunto com o fabrico e a montagem de componentes. Neste cenário, o arranque da máquina pode ser quase imediato, sem a espera típica dos ajustes de programação realizados após a montagem e ligação dos componentes. Depois de colocado em funcionamento, a programação *offline* continua a apresentar vantagens na capacidade de realizar e testar ajustes do sistema, eventualmente sem a necessidade de paragens de produção para esse efeito. Muito utilizado na fase de projeto e desenvolvimento de uma nova solução, o RobotStudio é uma das principais ferramentas de *software* para programação *offline* e simulação dos robôs da ABB.

Porque o recurso ao RobotStudio foi essencial neste projeto, segue-se uma breve explicação sobre a utilização deste *software* e as suas potencialidades básicas.

4.3.1. UTILIZAÇÃO DO ROBOTSTUDIO

O RobotStudio é um programa da ABB disponibilizado gratuitamente para a instalação num *Personal Computer* (PC) com Windows™, embora a licença gratuita e para uso industrial permita apenas uma utilização temporária durante 30 dias, momento a partir do qual a não aquisição de uma licença comercializada torna a utilidade deste *software* muito restrita, por exemplo, a algumas funcionalidades possíveis apenas com a ligação *online* a um robô. Atualmente este *software* é disponibilizado na versão 6.0, adequando-se apenas à última geração de controlador de robôs ABB, o IRC5.

Entre diversas funcionalidades, o RobotStudio permite:

- o desenho assistido por computador, ou *Computer Aided Design* (CAD), embora básico, ou a importação de geometrias em 3D podendo elas serem componentes de máquinas, mecanismos, peças, etc.;

- a importação de bibliotecas próprias das geometrias 3D de diversos equipamentos ABB, incluindo os manipuladores, posicionadores, controlador e outros periféricos de fabrico padronizado;
- criar e executar um controlador IRC5 virtual que simula vários componentes, como por exemplo, a consola de programação, e controla (movimenta) virtualmente os manipuladores ABB usando o mesmo algoritmo instalado no controlador real;
- programar o robô em modo *offline* usando o controlador virtual;
- se usado num computador ligado em rede Ethernet/IP ao controlador, pode programar o robô *online* e executar diversos comandos de serviço no controlador, como por exemplo: *reboot*; verificação remota do ecrã da consola; *backups* de segurança; ver o estado de IO; gerir os utilizadores da consola; alterar parâmetros de *software* do controlador; transferir ficheiros com o disco do robô; verificar mensagens de alarme; etc.;
- criar aplicações para a consola do robô, usando o aplicativo *ScreenMaker*;
- criar, descarregar e instalar o sistema operativo no controlador, usando o aplicativo *SystemBuilder*.

4.3.1.1. POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS

O RobotStudio pode ser usado num projeto para a definição da localização e disposição dos principais equipamentos, nomeadamente os robôs ou o posicionador, permitindo antecipar a existência de restrições ao nível do *layout*, quanto ao espaço previsto para futura instalação do sistema robotizado. Usando este *software* pode ser construída uma estação robotizada virtual que deve corresponder na sua dimensão e composição, tanto quanto possível, à estação real. O RobotStudio pode assim ser utilizado para verificação do alcance do manipulador e, dependendo desse teste, definir a sua posição face aos restantes equipamentos ou peças com que ele necessita interagir. É, por isto, importante que estejam representados os principais equipamentos de trabalho da estação real, principalmente os que se afigurem como uma restrição no volume de trabalho do robô.

A Figura 32 apresenta o ecrã do programa RobotStudio, onde já se encontram posicionados os principais equipamentos de uma estação de processo GMAW desenvolvida para este projeto, e aqui ilustrada como exemplo de utilização deste software.

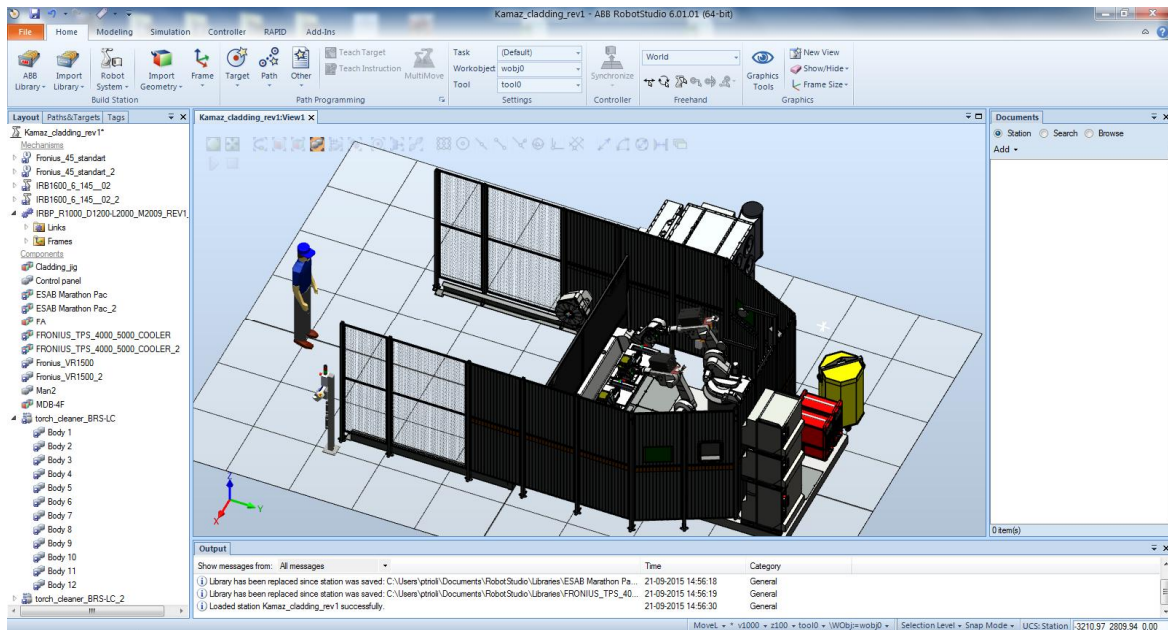


Figura 32 Janela do RobotStudio com estação de processo GMAW

Depois de colocado o manipulador na estação de soldadura, normalmente o primeiro a sê-lo, seguem-se os equipamentos e vedações que começam por ser dispostos na estação em locais espectáveis, ou seja, onde será suposto que se posicionem face ao manipulador e ao restante equipamento. Em seguida o manipulador é movido para os locais de trabalho e as posições dos equipamentos dependem principalmente do alcance do manipulador. Durante esta fase deve ser verificado o alcance do manipulador e a sua conformidade para o trabalho esperado. Se isso estiver em causa, o manipulador deve ser substituído por outro modelo.

Depois de importados para o simulador, quer os equipamentos, quer o manipulador, podem ser movidos na estação virtual de vários modos, entre eles:

- pela sua posição face ao *User Coordinate System* (UCS) alterando as coordenadas x , y e z ou a orientação (em graus) face a esse sistema de coordenadas;
- manualmente, usando as funções *Freehand*.

Parece ser mais prática a utilização das funções *Freehand*, que permitem a movimentação direta das geometrias usando o rato do PC: sobre uma qualquer geometria selecionada surgem setas lineares em seis sentidos correspondentes às três direcções das coordenadas x , y e z ; ou então três setas circulares correspondentes à rotação em torno de cada um destes eixos. Com o rato, e por *drag-and-drop*, move-se a geometria para a posição desejada. A

utilização do rato sobre geometrias pode ser facilitada se forem usadas funcionalidades de *snap*, que suportam o apontamento do cursor aos pontos de referência de superfícies da geometria, como por exemplo os cantos ou centros. O *Freehand* é deste modo mais prático que a movimentação via *Set Posision*, que implica a edição dos valores das coordenadas da posição pretendida na geometria.

Esta ferramenta pode também ser usada para a movimentação do manipulador como se estivesse a ser controlado via *Joystick*, ou seja, pelo comando manual através da consola de programação. Será também esta a forma mais prática de movimentar o robô para os extremos dos locais de trabalho e assim testar o seu alcance.

A Figura 33 mostra a ferramenta *Freehand* a ser utilizada numa tocha, estando o manipulador colocado numa das posições iniciais da peça a processar e já com essa ferramenta aplicada.

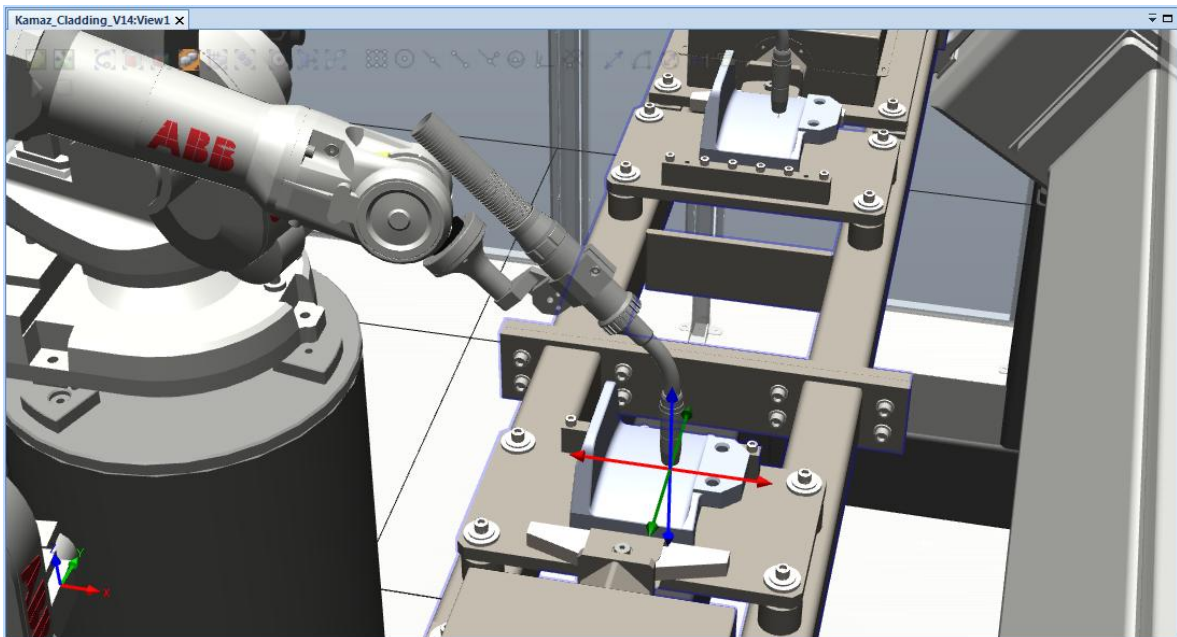


Figura 33 *Freehand* da tocha sobre uma peça para processo GMAW

Para que o manipulador possa ser movido usando a ferramenta *Freehand*, já deve estar em execução um controlador virtual.

Durante o projeto em RobotStudio, o controlador virtual pode ter as características e configurações do controlador e do manipulador reais exceto os valores de calibração do manipulador: trata-se de valores únicos em cada manipulador, que indicam a posição zero

absoluta de cada uma das suas juntas. Nas juntas rotativas, o valor de calibração corresponde a um determinado ângulo do veio de um *resolver*, diretamente acoplado a cada motor do manipulador, variando por isso entre 0 e 6,28 Radianos. Após a receção do equipamento robótico de fábrica, torna-se possível que o robô virtual tenha as mesmas características do robô real, podendo a programação *offline* de trajetórias ser realizada no robô virtual e, em seguida, carregada no robô real. Desta forma, a realização de trajetos do robô real pode ficar muito próxima aos resultados do robô virtual. Esta proximidade de resultados depende do rigor das dimensões e do posicionamento dos equipamentos em ambiente virtual, assim como do rigor no seu fabrico.

4.3.1.2. PROGRAMAÇÃO *OFFLINE*

O RobotStudio pode ser usado para a programação *online* ou *offline* de um robô. O termo *offline* permite distinção com as ferramentas exclusivas para a programação *online* de um robô real, acedendo à sua memória através de uma ligação em rede, e utilizando um computador pessoal, *tablet* ou *smartphone*. No RobotStudio é usado um robô virtual e a programação *offline* desse robô pode ser feita por vários métodos, entre os quais o utilizador seleciona aquele para o qual esteja mais habilitado:

- usando a consola de programação virtual;
- usando o editor *offline* do programa, funcionando do mesmo modo como se estivesse *online* em rede ligada ao controlador real;
- criando trajetos e pontos (*Paths* e *Targets*) no manipulador virtual e, em seguida, convertendo-os em instruções de programação.

Na fase de projeto é mais habitual a programação do robô *offline*, permitindo a sua preparação antes da disponibilidade do equipamento real. A programação desenvolvida nesta fase, para um projeto GMAW, consiste principalmente em:

- preparar o algoritmo RAPID para os movimentos do sistema robótico, preparação que será tão avançada quanto maior o rigor da modelação 3D;
- desenvolver as rotinas de controlo dos periféricos do robô e as funções para utilização dos sistemas de deteção ou seguimento de junta;
- criar a configuração do sistema robótico e suas interfaces, ao nível do *software*.

A Figura 34 mostra o ambiente de programação *offline* no RobotStudio.

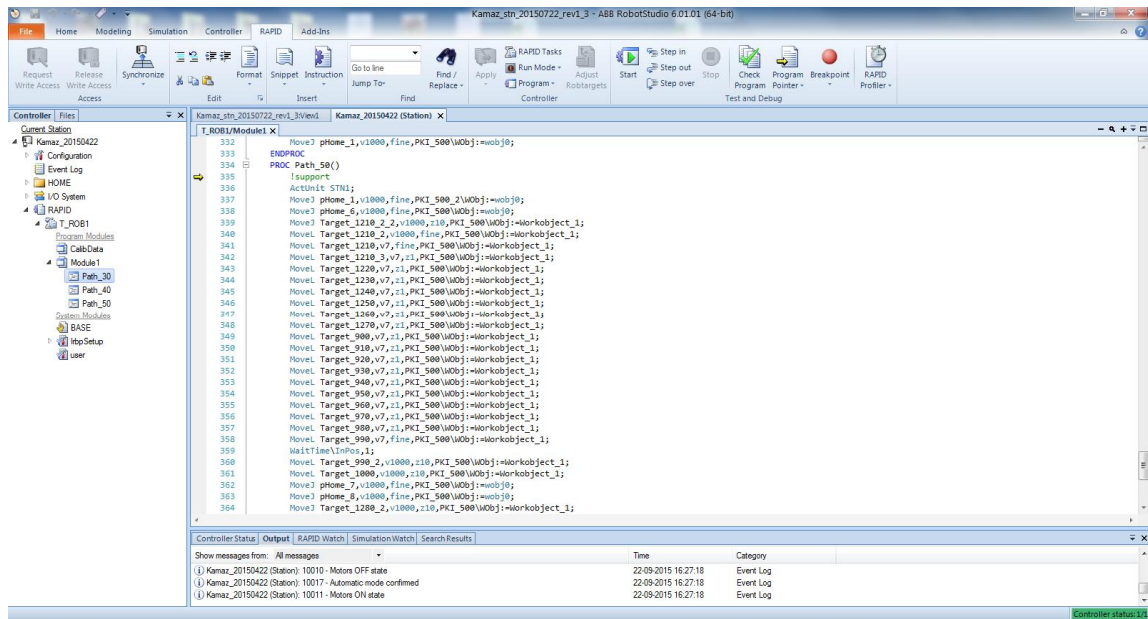


Figura 34 Editor *offline* do programa RAPID

A consola de programação virtual também pode ser usada para programação *offline*. Embora menos prática no desenvolvimento de programação, é mais prática na alteração de dados já criados e mais simples na procura de funções previamente criadas. A consola virtual pode ainda ser usada para movimentar o manipulador virtual, funcionando do mesmo modo que o comando do robô na consola real.

A Figura 35 apresenta a consola de programação virtual. A consola pode também ser designada por *TeachPendant*, ou *FlexPendant* no caso da geração mais recente da ABB.

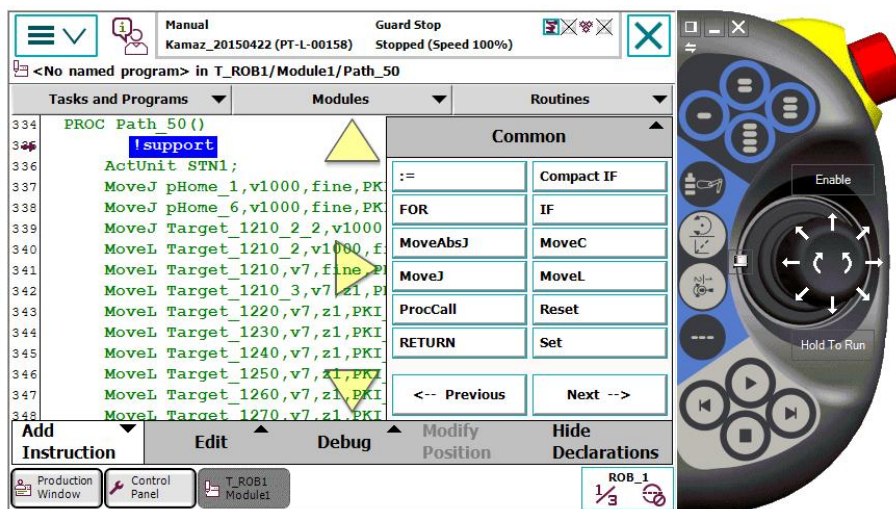


Figura 35 Consola de programação virtual do RobotStudio

Se ligado em rede Ethernet/IP ao controlador real, o RobotStudio mostra-se também como uma ferramenta prática para interface com o robô ABB, dando acesso à memória de programa e ao disco de memória do controlador e permitindo a realização de todas as configurações de *software* possíveis no controlador. Todo o desenvolvimento de *software* necessário para a colocação em serviço de um robô da ABB pode ser feito recorrendo ao RobotStudio.

4.3.2. PROGRAMAÇÃO RAPID

RAPID é o nome da linguagem de programação dos robôs ABB. Trata-se de uma linguagem de programação de alto nível, especificamente criada pela ABB para os seus controladores. Esta linguagem é utilizada desde a geração S4 (1994), tendo vindo a ser sucessivamente otimizada e frequentemente são adicionadas novas instruções. De referir que é uma linguagem com semelhanças a outras linguagens de alto nível, como PASCAL. Embora uma simulação básica no RobotStudio possa, por si só, dispensar o conhecimento desta linguagem, a exportação e ajuste de um programa do RobotStudio para um controlador, assim como a programação de um robô ABB real implica o conhecimento de RAPID.

O programa RAPID (um ficheiro com extensão *.prg*, *.mod* ou *.sys*) é constituído por um número de instruções que descrevem o trabalho do robô. Cada um destes ficheiros tem um cabeçalho próprio, mas o conteúdo pode ser variado em rotinas (conjuntos de instruções), funções, dados, etc..

4.3.2.1. DECLARAÇÕES DE DADOS RAPID

Existem três tipos de declarações de dados RAPID:

- variáveis, por exemplo:

```
VAR num isep;  
VAR num peças := 100;
```

- constantes, por exemplo:

```
CONST string str:="ABB Robotics...";
```

- persistentes, por exemplo:

```
PERS bool flag:=FALSE;
```

O prefixo LOCAL permite que um dado apenas seja reconhecido no módulo onde foi declarado, por exemplo:

```
LOCAL PERS num exemplo:=0;
```

O prefixo TASK permite que um dado persistente apenas seja reconhecido na tarefa onde foi declarado, por exemplo:

```
TASK PERS bool bActivo:=FALSE;
```

Um dado persistente que não tenha o prefixo TASK, e que tenha o mesmo nome em mais que uma tarefa, usa o mesmo espaço de memória. Note-se que o controlador IRC5 permite multitarefa, e cada tarefa tem o seu programa RAPID. Esta funcionalidade é útil para a troca de dados entre tarefas.

4.3.2.2. DADOS RAPID

Os dados RAPID são agrupados em diferentes tipos de dados (*data types*), que descrevem diferentes tipos de informações, tais como ferramentas, posições, cargas, etc.. Estes dados podem ser criados pelo programador e possuem nomes arbitrários, com tamanho limitado a 32 caracteres e com algumas restrições quanto a caracteres especiais (por exemplo: =|!"#\$%&/?). Não existe limite do seu número, exceto o imposto pela memória. Estes dados podem existir tanto globalmente no programa, ou localmente dentro da rotina ou função.

Alguns tipos de dados em RAPID usados neste projeto são:

- valores lógicos (“bool”): TRUE, FALSE

```
PERS bool bEst1Activa:=TRUE;
```

- valores de *String* (“string”): *array* de caracteres, máximo de 80 por cada declaração

```
PERS string sMensagem:="Mesa 2 virada para o robô";
```

- valores numéricos (“num”):
 - Inteiro (ex: 3, -100, 3E2)
 - Decimal (ex: 3.5, -0.345, -245E-2)

```
TASK PERS num nAnguloM1{4}:=[30,120,210,300];  
LOCAL PERS num nTcpExtension:=15;
```

- Comentários:

```
!comentário
```

- Dados de ferramenta ("tooldata") usados para definir uma ferramenta do robô com o *frame* do TCP, a massa, o centro de massa e o momento de inércia:

```
PERS tooldata tWeldGun :=
  [TRUE, [[171.036, 21.1264, 314.351], [0.827033, -
  0.0238348, 0.560613, -
  0.0340737]], [1, [1, 0, 0], [1, 0, 0, 0], 0, 0, 0]];
```

- Dados de objeto de trabalho ("wobjdata") usados para definir um plano de trabalho do robô, na forma de um referencial cartesiano, tendo por base um ou dois *frames*:

```
LOCAL PERS wobjdata obCuba :=
  [FALSE, TRUE, "", [[0, 0, 0], [1, 0, 0, 0]], [[0, 0, 0], [
  1, 0, 0, 0]]];
```

- Dados de destino ("robtargt") usados para definir o destino de uma trajetória do robô que inclui um ponto (com coordenadas *x*, *y* e *z*), uma orientação da ferramenta especificada por um quaternião, a configuração do manipulador e os valores dos seis eixos externos possíveis:

```
LOCAL PERS robtargt
pIni1 := [[764.08, 648.47, 799.88], [0.0143673, 0.9
0993, -0.0031297, 0.4145], [0, -
2, 0, 0], [9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09]]
;
```

- Dados de juntas ("jointtarget") usados para definir o destino de uma trajetória do robô definida com doze ângulos correspondentes aos seis eixos do manipulador e aos valores dos seis eixos externos possíveis:

```
TASK PERS jointtarget
jtBEApprPos := [[89.1026, 40.9781, 74.4856, 4.2529
, -53.0808, -
1.25837], [9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09
]];
```

- Dados de velocidade ("speeddata") usados para definir uma velocidade linear do robô, uma velocidade de orientação de ferramenta, uma velocidade linear dos eixos externos e uma velocidade de rotação dos eixos externos:

```
TASK PERS speeddata vRoda := [ 0, 0, 0, 50];
```

4.3.2.3. INSTRUÇÕES RAPID

O programa RAPID é executado sequencialmente, isto é, instrução por instrução, embora existam instruções que interrompem uma determinada sequência, mediante um evento tipicamente associado a entradas digitais, como ocorre na utilização de algoritmos com funcionalidades de *trapping*.

Algumas das instruções RAPID mais utilizadas, e algumas das mais conhecidas por programadores, são:

- IF;
- FOR;
- WHILE;
- TEST;
- GOTO;
- EXIT, STOP;
- BREAK;
- WaitTime, WaitUntil, WaitDI;
- TPErase (“limpa” o ecrã da consola de programação);
- TPWrite (escreve *strings* e dados associados a um determinado tipo na consola).

Adiante serão usadas algumas destas instruções, podendo ser verificados exemplos da sua utilização em programação RAPID.

4.3.2.4. INSTRUÇÕES RAPID DE MOVIMENTAÇÃO

As instruções que possibilitam a movimentação do robô ABB têm um aspeto próprio. Algumas das características de movimento do robô são determinadas pela utilização de instruções lógicas que se aplicam a todos os movimentos. Os movimentos do robô são programados de trajetória em trajetória, isto é, move-se a partir da posição atual para a nova posição. A trajetória entre estas duas posições é então calculada automaticamente pelo robô.

As características básicas dos movimentos, tais como o tipo da trajetória, são especificadas pela escolha da instrução de posicionamento apropriada. As características restantes são especificadas pela definição de dados, que são argumentos da instrução de movimento, entre elas:

- dados de destino;
- dados de velocidade;
- dados de zona;
- dados de ferramenta;

- dados de objeto de trabalho.

As duas instruções de movimentação mais utilizadas são o MoveL e o MoveJ. MoveL é uma instrução que move o robô linearmente. O MoveL é usado para mover o ponto central da ferramenta (ou TCP) em linha reta até um dado destino. Esta instrução pode também ser usada para reorientar a ferramenta, permanecendo o TCP estacionário.

Como exemplo, com a linha de instrução MoveL p1, v1000, z10, tIsep; o TCP da ferramenta tIsep é movido linearmente para a posição p1 com dado de velocidade v1000 e dado de zona z10.

MoveJ é uma instrução que move o robô com movimento eixo a eixo. O MoveJ é usado para mover o robô rapidamente de um ponto a outro, quando o movimento não tem que ser em linha reta. O robô e os eixos externos movem-se até ao destino ao longo de uma trajetória não linear. Na execução do MoveJ o robô calcula a velocidade de rotação de cada eixo, de modo a que essa velocidade seja constante (exceto durante acelerações) ao longo do movimento até ao destino e todos os eixos arranquem e parem em simultâneo.

A título de exemplo, com a linha de instrução MoveJ p10, vmax, z30, tool_dee; o ponto central da ferramenta (TCP) da ferramenta tool_dee é movido ao longo de uma trajetória não linear para a posição p10 com dado de velocidade vmax e dado de zona z30. A Figura 36 mostra o exemplo de um programa RAPID que executa vários trajetos utilizando duas instruções MoveL e uma instrução MoveJ.

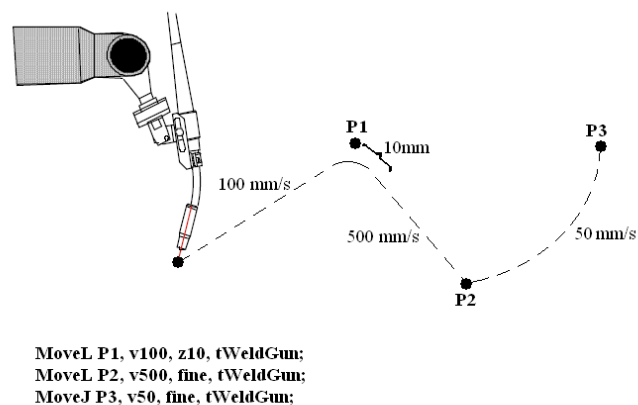


Figura 36 Exemplo de um programa RAPID de movimentação

Das instruções de movimentação, destaca-se o argumento de zona. Este argumento permite ao robô interromper a trajetória em direção ao destino e fazer um desvio circular, com raio igual à zona, em direção ao destino seguinte. Este movimento é também designado *fly-by*. A maior vantagem do argumento zona, quando possível o seu uso, é a melhoria do tempo de execução de um trajeto com vários pontos intermédios – a zona evita que o manipulador tenha uma aceleração negativa e positiva ao aproximar-se de cada um desses pontos. A zona é definida em milímetros e a Figura 37 dá o exemplo de uma trajetória com várias direções usando zonas. Se a zona não for nula (*fine* ou zero '0'), as instruções que não sejam de movimentação são executadas antes do movimento com maior zona, ou do primeiro (caso as zonas sejam iguais).

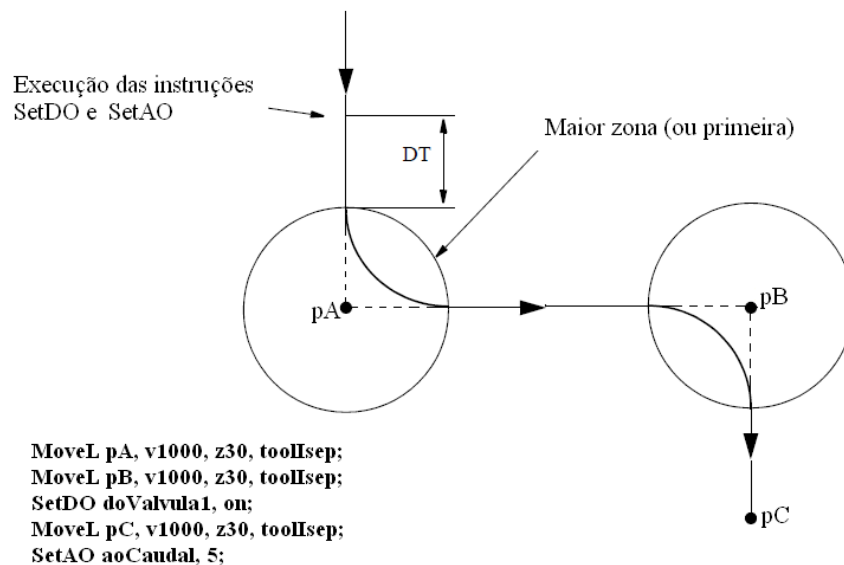


Figura 37 Exemplo de um programa de movimentação com zonas

Na Figura 37, a distância *DT* pretende representar um eventual atraso na execução do movimento caso a execução das instruções de lógica o obriguem.

4.3.2.5. INSTRUÇÕES RAPID DE PROCURA DE JUNTA

Existem instruções de programação do robô ABB para a procura de junta, ou *SmarTac*. Estas instruções realizam os movimentos de procura da junta de processo e delas resultam os dados que podem ser utilizados para o ajuste de trajetos de processo. Como mencionado anteriormente, esta procura de junta pode ser feita com o eléctrodo ou com o bocal da tocha de soldadura e a posição da peça é detetada no momento em que um deles, por exemplo o

bocal, toca a peça a soldar. As instruções RAPID de procura com SmarTac realizam um movimento linear e param esse movimento no momento do toque do bocal com a peça.

A instrução de programação RAPID para utilização do SmarTac tem um formato como ilustra o exemplo seguinte:

```
Search1D peOffset, pIni, pProc, v200,  
tWeldGun;
```

Esta instrução executa o movimento linear que começa em `pIni`, dirige-se para `pProc` e mantém o movimento até duas vezes a distância entre `pIni` e `pProc`. O valor da distância entre o ponto de contacto (de toque com o bocal) e `pProc`, que no exemplo ilustrado na Figura 38 é de 20 mm, fica gravado num dado tipo *pose*, neste exemplo chamado `peOffset`. A Figura 38 (adaptada de [41]) dá o exemplo de uma procura com SmarTac usando esta instrução. A imagem de “ajuste” mostra os pontos usados para a gravação dos *robtargets* `pIni` e `pProc`, enquanto a imagem de “procura” representa a execução da instrução de procura `Search1D`.

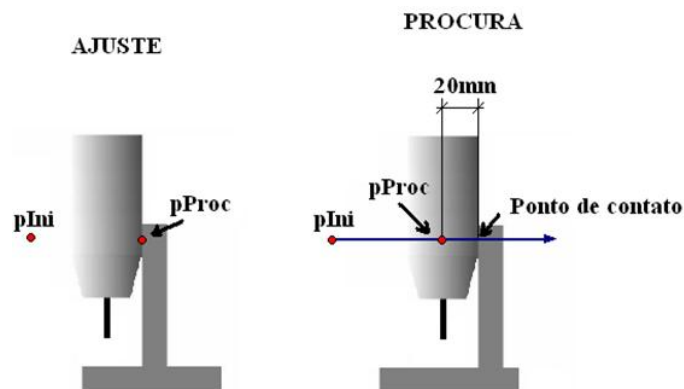


Figura 38 Ajuste e execução das instruções de procura com SmarTac

O dado `peOffset`, que é alterado pela execução da instrução de procura do SmarTac, pode depois ser utilizado nas instruções de soldadura para corrigir os pontos de realização do cordão às posições da junta anteriormente procurada. Este sistema é limitado à procura do ponto inicial ou outros intermédios do cordão de soldadura, mas não realiza a correção em tempo real do trajeto do robô. Para cordões de soldadura que não sejam lineares, este sistema pode assim limitar-se à procura do ponto inicial desse cordão ficando o restante ajuste do trajeto dependente de um sistema de seguimento de junta, tema que será abordado em seguida.

4.3.2.6. INSTRUÇÕES RAPID DE PROCESSO GMAW

Na linguagem RAPID estão previstas instruções que facilitam a programação de um processo de soldadura (ou *cladding*). As instruções RAPID de soldadura permitem que o robô execute um movimento, tipicamente retilíneo ou circular, ao mesmo tempo que pode controlar diretamente o arco elétrico (tensão, corrente, velocidade do fio, etc.), entre outros controlos associados a esse processo de soldadura ou *cladding* (do gás, da refrigeração da tocha, etc.) que se encontra a decorrer. Aqui se mantém a referência específica à fonte de potência Fronius, que na abordagem mais habitual executa todo o controlo do processo, pelo que as instruções de programação do robô limitam-se, neste caso, a solicitar um número do programa ou *Job* à fonte de potência, a controlar o momento de arranque do processo, a verificar a estabilidade do arco ao longo do movimento e a desligar o processo no fim desse movimento correspondente ao cordão.

Apresenta-se o exemplo de programação do robô apenas com instruções de processo com direção linear. As instruções de soldadura lineares têm o seguinte aspecto:

```
ArcLStart pA, v200, seam1,
weld1\Weave:=weave1, fine, tWeldGun;
ArcL pB, v200, seam1, weld1\Weave:=weave1,
fine, tWeldGun;
ArcLEnd pC, v200, seam1, weld1\Weave:=weave1,
fine, tWeldGun;
```

A instrução `ArcLStart` é usada para uma trajetória linear que não executa soldadura mas prepara o processo (por exemplo, liga o gás um tempo definido antes de atingir o destino). As instruções `ArcL` ou `ArcLEnd` executam uma trajetória linear com a soldadura ligada, isto é, são as instruções que realizam um cordão de soldadura. A instrução `ArcLEnd` desliga a soldadura ao atingir o destino, enquanto a instrução `ArcL` presume a continuidade do cordão de soldadura na instrução seguinte.

As instruções de soldadura utilizam dados RAPID próprios deste processo. No exemplo dado das instruções `ArcL`, são:

- `seam1` é um dado do tipo *seamdata* que controla o início e o fim do processo. Por exemplo, é no dado *seamdata* que se indica o tempo de pré-fluxo e pós-fluxo de gás no processo de cada cordão. Quando o processo é totalmente controlado pela fonte de

potência, este dado mantém-se indicado na instrução mas quase todos os campos que o compõem ficam em branco.

- `weld1` é um dado do tipo `welddata` que controla o arco de soldadura. Quando o arco é totalmente controlado pela fonte de potência, este dado é usado apenas para indicar o número de programa ou *Job* pedido à fonte, assim como a velocidade do movimento de soldadura. O argumento da velocidade (`speeddata`) apenas é usado nas instruções de soldadura caso a soldadura esteja a ser simulada – funcionalidade que é também possível, fazendo com que as instruções de soldadura tenham um resultado prático igual às instruções de movimentação.

Um exemplo de declaração de um dado RAPID do tipo `welddata` usado é:

```
LOCAL PERS welddata  
weld1 := [10,0,[2,0,0,0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,  
0,0,0,0]];
```

A velocidade de soldadura neste exemplo é 10 mm/s e o programa de soldadura pedido à fonte de potência é o 2.

Os campos dos dados de soldadura são mais facilmente alterados através da consola de programação do robô, permitindo conhecer a que parâmetro corresponde cada um dos campos. A Figura 39 apresenta o ecrã da consola de programação, com a possibilidade de editar o valor de um campo do dado `weld1`. Note-se a presença da designação dos parâmetros de velocidade `weld_speed` e do número de programa, ou *Job*, da fonte de potência, aqui designado por `sched` (diminutivo de *schedule*), com o valor 2.

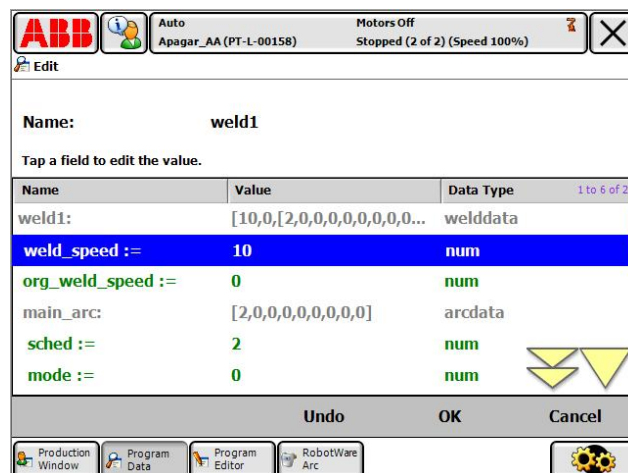


Figura 39 Edição do dado `weld1` na consola de programação

- `weave1` é um dado do tipo *weavedata*. Estes dados permitem ativar a ondulação do robô durante o movimento de soldadura. É frequente um cordão de soldadura precisar de um grande depósito de material, ou ter uma largura considerável, por exemplo 15 ou 20 milímetros, o que se torna difícil apenas com uma passagem em linha reta. A solução, nestes casos, será a execução de várias passagens, com a desvantagem de penalizar o tempo de ciclo, ou então, a realização de uma só passagem em que o robô execute simultaneamente um movimento em oscilação, isto é, ao longo da trajetória linear o robô move-se também num trajeto tipo ziguezague, V, ou triangular. Como mencionado em 4.1.3.2, o movimento ziguezague é obrigatório na utilização do sistema de seguimento de junta através do arco.

Os dados do tipo *weavedata* são constituídos por 16 campos, onde se destacam os parâmetros *weave_shape*, *weave_length*, *weave_width* e *weave_height*. O parâmetro *weave_shape* indica o tipo de oscilação, e pode ter um valor entre 0 e 3. A Figura 40, obtida do manual de programação RAPID de soldadura [42], representa os tipos de oscilação possíveis num dado *weavedata*.

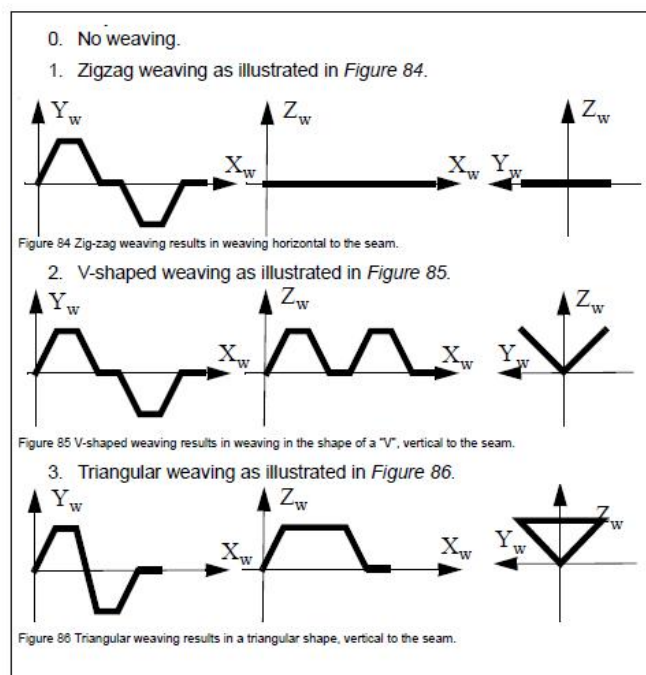


Figura 40 Formas de oscilação num dado *weavedata* [42]

O *weave_shape* número 0 significa movimento de processo sem oscilação, e o número 1 é em ziguezague mas sem penetração (sem deslocamento na direção Z da ferramenta).

Os parâmetros *weave_length*, *weave_width* e *weave_height* dão as restantes informações acerca do tipo de oscilação usado, em que *weave_length* é o comprimento da onda, *weave_width* é a sua largura e *weave_height* é a respetiva altura, embora esta não seja usada pelo *weave_shape* número 1 (sem penetração em altura, na direção Z da ferramenta).

A Figura 41 (adaptada de [42]) ilustra os parâmetros de oscilação referidos e usados neste projeto. Note-se que o parâmetro de comprimento de onda (*weave_length*) deve ter em conta a frequência máxima de 2 Hz, dependente também da velocidade de soldadura.

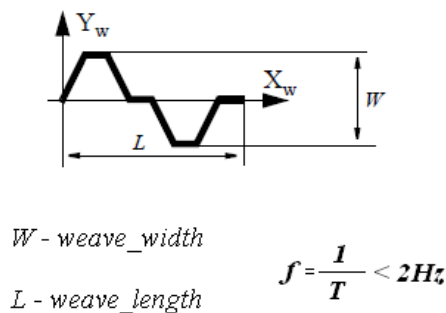


Figura 41 Parâmetros da oscilação

A Figura 42 (adaptada de [42]) apresenta um exemplo de utilização das instruções de soldadura *ArcLStart* e *ArcLEnd*, na realização de um cordão entre os pontos p1 e p2, sem oscilação.

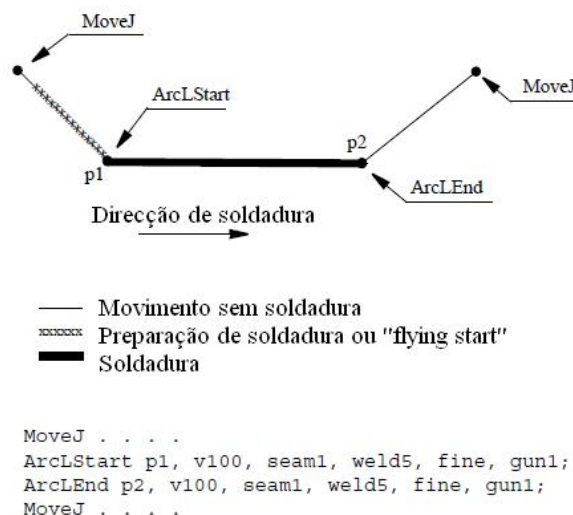


Figura 42 Instruções RAPID de processo de soldadura

4.3.2.7. INSTRUÇÕES RAPID DE PROCESSO COM SEGUIMENTO DE JUNTA

Para um processo GMAW que utilize o método de seguimento de junta, a programação do robô ABB é feita com instruções RAPID como as utilizadas para um processo de soldadura sem seguimento, acrescentando apenas o argumento opcional `\Track`. Este argumento opcional solicita um dado com declaração do tipo `trackdata`, como apresentado:

```
LOCAL PERS trackdata
track1:=[1,FALSE,0,[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],[4,0,0,3,0,0,0]];
```

O dado `trackdata` implica várias configurações prévias que definem o modo de seguimento da junta. Como exemplo, ao primeiro campo deste dado pode ser atribuído o valor 1 ou 2 consoante se trate de um seguimento por sensor ótico ou através do arco, respetivamente. O equipamento para seguimento de junta deve também estar configurado nos parâmetros de sistema do robô. Apresenta-se o exemplo de programação do robô em que é realizado um cordão único com início de uma forma circular no ponto pA, com um raio que passa pelo ponto pB e termina em pC, realizando também um segmento de reta entre pC e pD. As instruções de soldadura têm o seguinte aspecto:

```
ArcLStart pA, v200, seam1,
weld1\Weave:=weavel, fine, tWeldGun
\Track:=track1;
ArcC pB, pC, v200, seam1,
weld1\Weave:=weavel, fine, tWeldGun
\Track:=track1;
ArcLEnd pD, v200, seam1, weld1\Weave:=weavel,
fine, tWeldGun \Track:=track1;
```

Ambos os métodos de seguimento de junta, por visão ou por medição do arco elétrico, implicam a existência do *hardware* adicional, sendo em ambos os casos instalada uma caixa para ligação dos componentes desse sistema, o seu controlo e a interface com o robô. A configuração do sistema de seguimento de junta pode ser feita utilizando a consola de programação do robô, ou de modo autónomo através de um PC com *software* próprio. O algoritmo necessário para a realização completa do seguimento de junta implica a programação de ambos: (i) o controlador do sistema de seguimento; (ii) o robô.

A Figura 43 ilustra um controlador de sistema ótico de seguimento de junta da marca Scansonic. Neste caso, a ligação física com o sensor ótico montado no manipulador e com o controlador do robô é feita através de Ethernet/IP.



Figura 43 Controlador externo do sistema ótico de seguimento de junta

4.4. CÉLULAS DE FABRICO

O cenário mais habitual para um processo GMAW robotizado e integrado num ambiente industrial é ser encontrado numa célula de fabrico. As peças para processar são colocadas na célula manualmente por operador, num posto de entrada para esse efeito, e retiradas manualmente após terminado o processo. Para esta interação humana, a célula de fabrico é dotada de uma série de componentes e apresenta-se com uma configuração típica, que aqui será abordada.

A célula de soldadura ou *cladding* pode ser de vários tipos, sendo o seu desenvolvimento determinado por:

- dimensão e peso das peças;
- complexidade das peças e necessidade de posicionador;
- capacidade de produção;
- logística (carga e descarga de peças, ou necessidade de re-trabalhos manuais)
- qualidade das peças;
- existência de modelo pré-definido ou outras expetativas do cliente;
- planos de produção futuros.

Embora a análise destes aspetos seja comum à maioria dos casos de robotização de um processo GMAW, a padronização de um modelo de *layout* para estas células de fabrico parece dificultada pelos primeiros aspetos apresentados: a dimensão e o peso das peças.

Para peças de elevada dimensão ou peso, a dificuldade na sua manipulação antes e após o processo pode levar ao desenvolvimento de uma célula com postos de trabalho partilhados entre o operador e o robô, que permita reduzir a quantidade de movimentos da peça. Deste modo, a peça é montada pelo operador num posto de trabalho, fixo ou rotativo, que é igualmente utilizado pelo robô para o processo. A montagem pelo operador e o processo pelo robô ocorrem em momentos diferentes, com a devida gestão da segurança desse espaço de trabalho comum. Para o balanceamento de tempos, esta restrição pode levar à existência de dois postos de trabalho partilhado, permitindo que o robô esteja a processar as peças num posto enquanto o operador substitui as peças no outro.

A Figura 44 ilustra três exemplos virtuais de células de processo de soldadura, obtidas no RobotStudio, cada uma com dois postos de trabalho partilhados entre o operador e o robô.

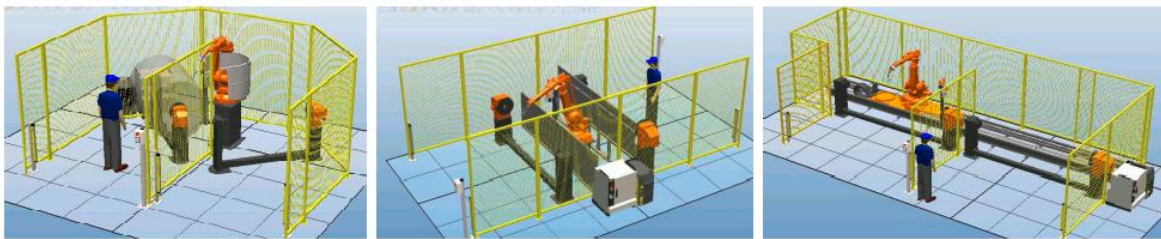


Figura 44 Células de processo GMAW com dois postos de trabalho partilhado [43]

O cenário mais habitual quanto ao *layout* de uma célula de processo GMAW é que o posto de trabalho do operador e do robô sejam diferentes, separados por posicionador que gere a troca de peças entre a estação de processo robotizado e a estação de carga e descarga manual, como já foi abordado em 2.3. É para este modelo de célula, mais comum, que está orientada a exposição das subsecções seguintes.

4.4.1. PERIFÉRICOS DE OPERAÇÃO E SEGURANÇA

Para uma célula de fabrico com processo GMAW são disponibilizados periféricos para uso habitual no decurso da operação manual da célula como, por exemplo, o painel de operador e outros dispositivos de segurança.

O painel de operador é uma botoneira com alguns botões de comando da estação. As funções habituais mínimas de um painel de operador são:

- rearme das barreiras de segurança para rotação do posicionador;
- início do programa do robô;

- paragem do programa do robô;
- sinalização luminosa de estados;
- paragem de emergência.

Atualmente o painel de operador é mais habitualmente apresentado num ecrã tátil e as suas funcionalidades podem incluir controlos de produção, mudança de programa, diagnóstico de falhas, ajustes automáticos da célula, entre outros.

A Figura 45 apresenta o exemplo de um painel do operador e a sua posição típica numa célula de soldadura, junto à entrada para montagem manual de peças.

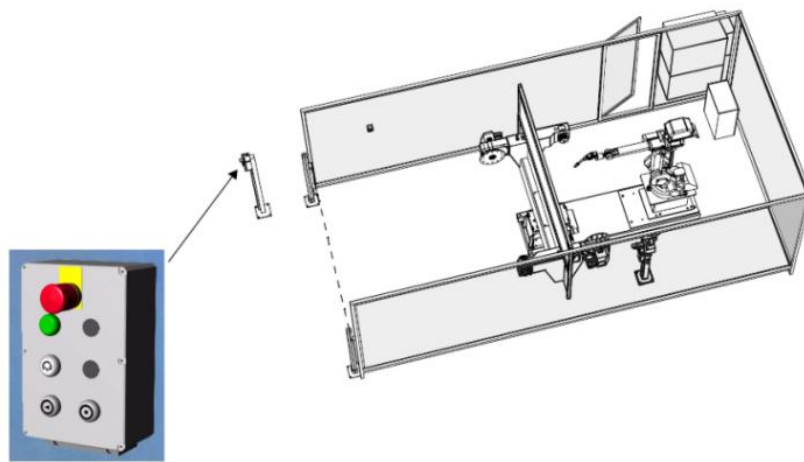


Figura 45 Posição típica de um painel do operador

As barreiras de segurança são frequentemente um dispositivo optoelectrónico destinado a vedar uma zona de passagem de pessoas, como já abordado em 2.4.2. O objetivo da barreira de segurança é parar, por *hardware*, o manipulador ou o posicionador, caso uma pessoa intercete uma área de trabalho que não pode estar ocupada durante a movimentação do posicionador, sob risco de fatalidade.

O interruptor de segurança é outro dispositivo de segurança, colocado na porta de acesso à estação de soldadura. O interruptor de segurança deve também parar, por *hardware*, o manipulador ou o posicionador caso alguma pessoa abra a porta da estação durante o funcionamento em modo automático. Ambos os dispositivos podem estar em modo de *standby*: as barreiras de segurança em todos os momentos em que o *interchange* não esteja a ser usado; o interruptor da porta sempre que o controlador esteja em modo manual de funcionamento.

A Figura 46 mostra o local e disposição típica da barreira de segurança, ou AOPD, numa estação de soldadura com um posto de operação manual.

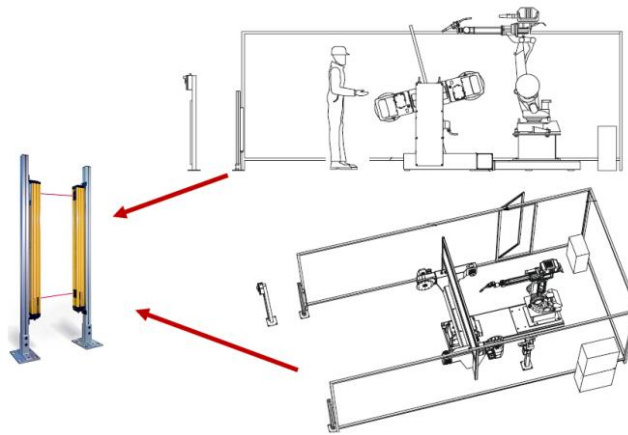


Figura 46 Local e disposição da barreira de segurança

O conjunto dos dois dispositivos de segurança referidos, a barreira de segurança e o interruptor de segurança, devem estar colocados de tal forma que seja o mais difícil possível a entrada de uma pessoa na estação de soldadura sem atuar um deles. As normas de segurança de máquinas estabelecem uma série de condições no que respeita aos dispositivos de segurança a usar: vedações, disposição e ligação.

4.4.2. VEDAÇÕES E CONSTRUÇÃO METÁLICA

A construção de uma célula de soldadura ou *cladding* deve ter em conta a sua instalação em solo fabril, tipicamente construído em betão. Se forem fixados os principais equipamentos da célula, robô ou posicionador, individualmente num solo deste tipo, é possível que existam ou surjam ao longo do tempo fissuras nesse pavimento. Tal situação criará uma variação na posição relativa entre os vários equipamentos, levando a desvios na posição de trabalho entre os manipuladores e o posicionador. A fixação direta em betão de equipamentos sujeitos a forças e momentos de inércia variáveis e elevados, dá também menores garantias quanto à durabilidade dessa fixação e à possibilidade de ajustes posteriores. Para evitar esta situação, a célula de soldadura é preferencialmente construída sobre uma base metálica comum e que interliga com rigidez os principais equipamentos. Além disso, esta construção metálica comum facilita o transporte da célula num conjunto montado, melhorando o processo de instalação e reduzindo os requisitos necessários para o solo onde será instalada. Em caso de necessidade de deslocação posterior da célula, a

distância entre os equipamentos é assim mantida, evitando-se reajustes de programação dos robôs.

As vedações para células de soldadura devem ter em consideração a proteção de entrada de pessoal, assim como a contenção das projeções e radiações do processo, como já abordado em 2.4. Para proteção contra a radiação emitida por um processo GMAW, é preferível o recurso ao isolamento da zona de processo robotizado da célula, como mostrado na imagem esquerda da Figura 47.



Figura 47 Vedações de segurança de uma célula de processo GMAW

A Figura 47 apresenta os exemplos de duas células de processo GMAW cujas dimensões das vedações de segurança cumprem as respectivas normas, em dependência do dispositivo de deteção de entrada segura utilizado. As vedações de segurança devem cumprir as recomendações para essa utilização, como o exemplo das Normas Europeias EN953, EN292, EN294, EN811 e DL277.

4.5. JIG DE PROCESSO

Na metalomecânica, o *Jig* de processo, ou apenas *Jig*, é uma construção mecânica desenvolvida de forma dedicada a um conjunto de peças e é utilizado para controlar a posição dessas peças e garantir uma precisão repetitiva desse posicionamento durante os ciclos de produção. Deve também permitir a colocação de peças antes do processo e a sua remoção em conjunto depois de processadas. Em língua Portuguesa é frequente que este componente seja designado por gabarito, termo que parece pouco adequado já que tal designação é utilizada também para tratar um conjunto mecânico de onde se pretende um

modelo dimensional que sirva como medida padrão ou de controlo. Assim, o termo gabarito não parece esclarecer a existência de uma fixação repetível e precisa de peças, nem a adequação à realização de processo sobre o mesmo. Em língua Inglesa, a designação *welding fixture* é mais consensual para designar um *Jig* de soldadura.

Para adequar as peças a soldar aos restantes componentes de uma célula de soldadura, o *Jig* deve ser desenhado tendo em consideração os seguintes requisitos (adaptado de [44]):

- ser forte, leve e rígido;
- apertar e fixar as peças na posição correta;
- permitir apenas a montagem das peças na forma pretendida;
- facilitar a instalação e operação num posicionador;
- a precisão e o rigor da construção são adequados aos requisitos e apenas as dimensões essenciais das peças devem ser controladas;
- as juntas de soldadura estão expostas para permitir a realização do cordão;
- ser flexível, em pontos específicos, para evitar tensões residuais no conjunto soldado;
- para a precisão pretendida após o processo, as peças podem ter que ser moldadas ao *Jig*;
- os mecanismos de aperto e fixação devem operar rapidamente;
- os componentes de um *Jig* estão protegidos contra os resíduos e as temperaturas do processo;
- uma boa condução elétrica no contacto com as peças a soldar e através do *Jig* é essencial porque afeta o arco elétrico do processo;
- estabilizar a temperatura do *Jig* ao longo do processo pode implicar a sua refrigeração forçada;
- o produto terminado deve ser facilmente retirado.

No desenvolvimento de um *Jig* para colocação em célula de fabrico robotizado, um dos aspetos mais subjetivos nas opções possíveis é o nível de automação. Com montagem manual, a operação de colocação das peças no *Jig* pode ser seguida de aperto e controlo humano ou automatizado. Um *Jig* pode ser totalmente manual se nenhuma operação de aperto ou montagem, desaperto ou desmontagem, ou controlo de peças, é realizada com recurso a automação mas somente com movimentos manuais e análise visual humana. Por outro lado, um *Jig* pode envolver elevados níveis de automação se as funções do operador se limitam ao ato de pousar e retirar as peças, com gestos grosseiros quanto ao rigor desse

posicionamento manual, ficando as restantes funções de posicionamento preciso, fixação, controlos de presença ou dimensionais, entre outros, dependentes de um processo substancialmente automatizado.

A Figura 48 ilustra os exemplos de um *Jig* manual e um *Jig* automatizado.

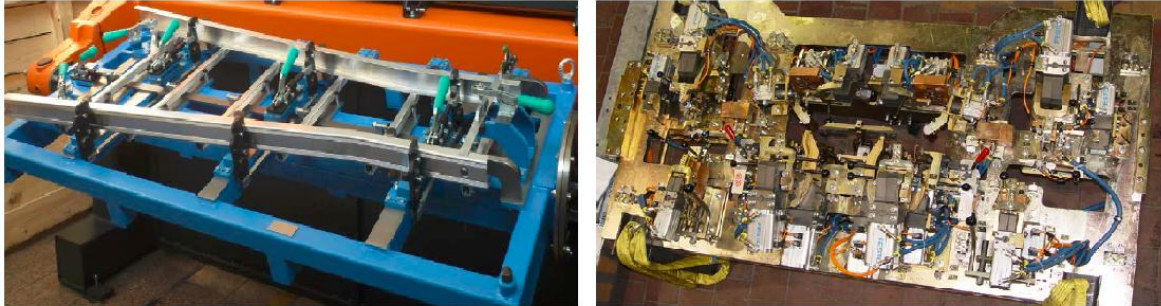


Figura 48 *Jig* manual (esquerda) e *Jig* automatizado (direita)

Um *Jig* com pouca automação é de desenvolvimento mais simples, mas o seu desempenho fica mais dependente do operador e está sujeito a erros de montagem e análise humanas. O seu uso é mais habitual nas aplicações em que os requisitos da soldadura são pouco exigentes.

Um *Jig* com elevado grau de automação, como é frequente na indústria automóvel, é de desenvolvimento mais complexo, mas de funcionamento mais fiável, e pode evitar ou corrigir possíveis erros de montagem ou análise do operador. Um *Jig* automatizado implica a instalação de diversos componentes dessa automação, tipicamente controlados por um PLC e interligados com uma rede de campo.

5. DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

A realização deste projeto teve início com o levantamento das necessidades junto do utilizador final, na fábrica da KAMAZ. A visita às instalações desta empresa proporcionou o levantamento das características técnicas pretendidas e da solução proposta por este fabricante de veículos pesados, de acordo com várias opções constantes do processo comercial que antecedeu esta fase. Este capítulo pretende demonstrar o desenvolvimento da solução técnica obtida, desde o levantamento das necessidades, até à solução acordada por ambas as partes: a ABB enquanto fornecedor do sistema completo, e a KAMAZ enquanto requisitante das células fabris.

5.1. DESCRIÇÃO GENÉRICA DOS DADOS INICIAIS E DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DE *CLADDING*

O processo de *cladding* já era realizado pelo cliente, em processo manual, no início deste projeto. No entanto, pretende-se não só a sua robotização como também a alteração do processo tecnológico associado à deposição do material de *cladding*. Por este motivo, o levantamento do processo tecnológico inicial do cliente é pouco contributivo para o desenvolvimento da solução no que respeita aos novos parâmetros e materiais de processo.

Pretende-se que o processo de *cladding* se execute numa ou duas superfícies de cinco modelos de peças distintas entre si. Com a concretização deste projeto, pretende-se obter uma maior qualidade da deposição desse material e redução da mão-de-obra humana.

5.1.1. DESCRIÇÃO DAS CÉLULAS ROBOTIZADAS

O cliente pretende a entrega de várias células robotizadas independentes, para o processo de *cladding*. Cada uma destas células, de igual configuração, deverá ser constituída por duas áreas de trabalho: uma área de realização do processo de *cladding* e outra área para carga e descarga de peças. O principal equipamento tecnológico de cada uma destas células são dois robôs de processo, um robô de manipulação, um posicionador com duas zonas e dois *Jigs*, e duas fontes de potência.

As peças deverão ser introduzidas e retiradas das células com recurso a paletes próprias multi-posição. Estas paletes devem, em simultâneo, permitir introduzir as peças antes do processo e retirar as mesmas peças posteriormente, com o processo de *cladding* realizado. Conclui-se que deverão ser fornecidas dez paletes por cada célula de *cladding*, sendo cada par de paletes preparado para um modelo de cada uma das cinco peças. Existir um par de paletes por cada modelo de peça permite que, enquanto uma esteja a ser processada pela célula de *cladding*, a outra está a ser operada manualmente e exteriormente para substituição das peças terminadas por peças a trabalhar.

O cliente aceita, desde logo, o requisito prévio de que cada célula apenas trabalha, no mesmo instante, com um único modelo de peça. Este requisito permite que a célula seja projetada com apenas dois postos de entrada e saída de paletes de peças, evitando interromper a produção da célula para a recarga manual de um deles, ao assumir que o tempo de processo de *cladding* pela célula é muito superior comparativamente ao tempo da substituição externa das peças. Estes postos de paletes estarão equipados com dispositivos que detetam a presença correta de paletes e também um sistema eletromecânico de verificação do modelo de paletes instalado, que corresponderá a um modelo de peça.

Com a recolha destas informações, é realizado um modelo inicial de composição e localização de componentes da célula de *cladding*, o *layout*, com recurso ao RobotStudio. A Figura 49 apresenta a imagem do primeiro modelo apresentado para análise quanto à composição e localização genérica dos componentes da célula.

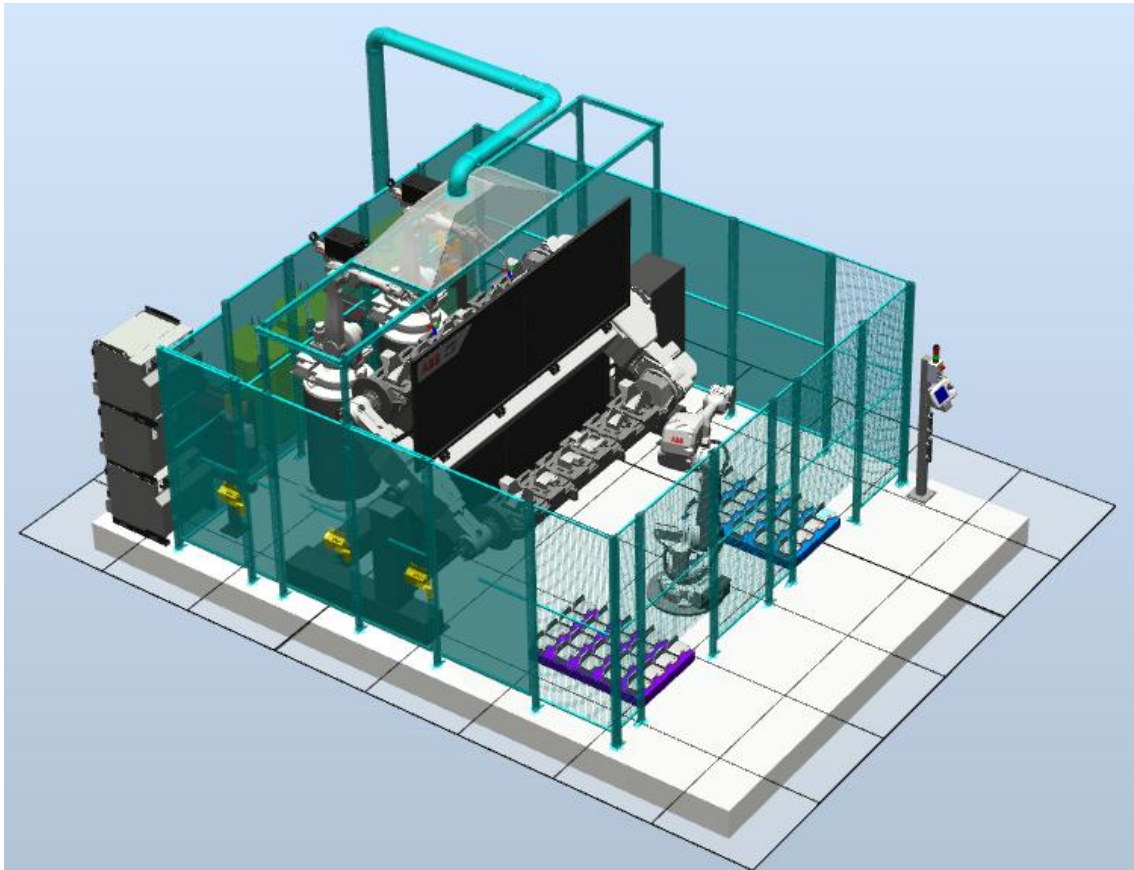


Figura 49 Modelo inicial em RobotStudio da célula de *cladding*

Como esperado, este modelo viria a ser alterado ao longo da realização do projeto, e conforme as necessidades que se foram observando no estudo da solução mais adequada.

5.1.1.1. JIGS DE PEÇAS E POSICIONADOR

O dimensionamento inicial da célula de *cladding*, do posicionador e dos robôs, está muito dependente da quantidade de peças que se pretendem colocar nos *Jigs* do posicionador em cada ciclo de produção. Como já referido, é um pressuposto do processo comercial que a célula possua dois robôs de processo de *cladding*. Isto implica, preferencialmente, que o número de peças do *Jig* seja par, para que o processo nas peças decorra em simultâneo por ambos os robôs. Por outro lado, a quantidade de peças do *Jig* depende do tempo de ciclo, e da otimização entre o tempo de processo de *cladding* e o tempo de rotação do posicionador. Também se deve considerar o equilíbrio de tempos entre o processo de *cladding* numa estação e a troca de peças na outra, embora seja expectável, mesmo antes da realização de testes, que os robôs de processo sejam mais lentos que o robô de troca de peças.

O primeiro protótipo desenvolvido para *Jig* considera o suporte para colocação de seis peças. Este número de peças tem por base apenas a melhor distribuição tendo em conta que o posicionador resultante da negociação comercial prevê uma distância de 2000 mm entre pratos, ou seja, antecipa este comprimento para o *Jig*. A Figura 50 apresenta o primeiro protótipo desenhado para *Jig* de *cladding*, com a representação dos cinco modelos de peças considerados, para ilustração da compatibilidade do *Jig* a esses modelos, embora se considere que, em produção contínua, apenas um modelo de peça será colocado no *Jig*.

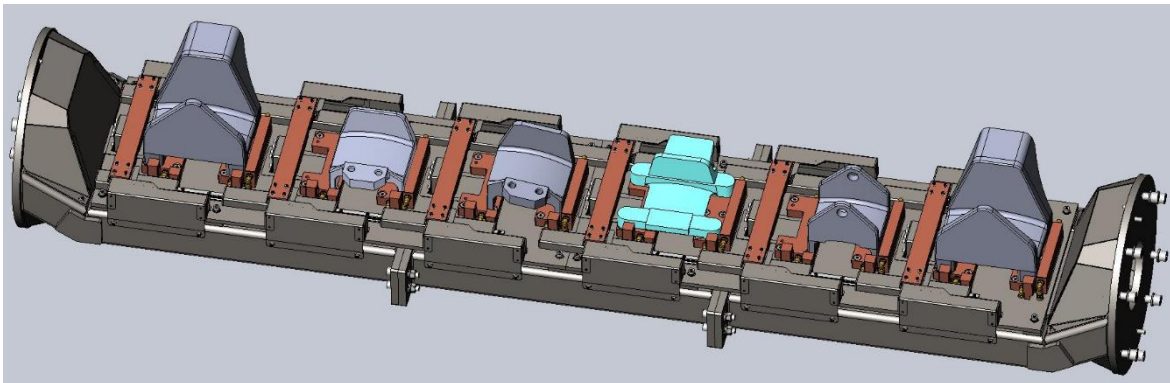


Figura 50 Primeiro protótipo de *Jig* de *cladding* com seis peças

Tendo em conta a temperatura esperada durante o processo de *cladding*, cujo depósito de material conduz a uma concentração de energia térmica superior a um processo típico de soldadura, o *Jig* desenhado inclui refrigeração com recurso a circulação interna, em circuito fechado, de um líquido refrigerante cuja principal composição é água. Os testes de processo, realizados posteriormente, permitiram verificar a temperatura da camada de material depositado e das zonas da peça mais próximas que, poucos segundos após terminar o processo, se encontram a uma temperatura de cerca de 900° C. A necessidade de arrefecimento do *Jig*, neste caso concreto, está ligada principalmente à proteção dos componentes de automação previstos neste protótipo: os acionamentos pneumáticos de retenção das peças, os sensores de presença e posicionamento de peça e de controlo de posição dos acionamentos, os cabos de ligação, entre outros. Estes dispositivos de automação não suportam a exposição às temperaturas deste processo e o seu afastamento físico, num *Jig* com seis peças, é de difícil concretização. A Figura 51 ilustra duas posições de colocação de peças, parte do desenho do protótipo do *Jig*. Na posição sem peça, do lado esquerdo, os componentes de contacto direto com as peças estão parcialmente

transparentes para que se verifique o sistema de canais de circulação interior do líquido refrigerante.

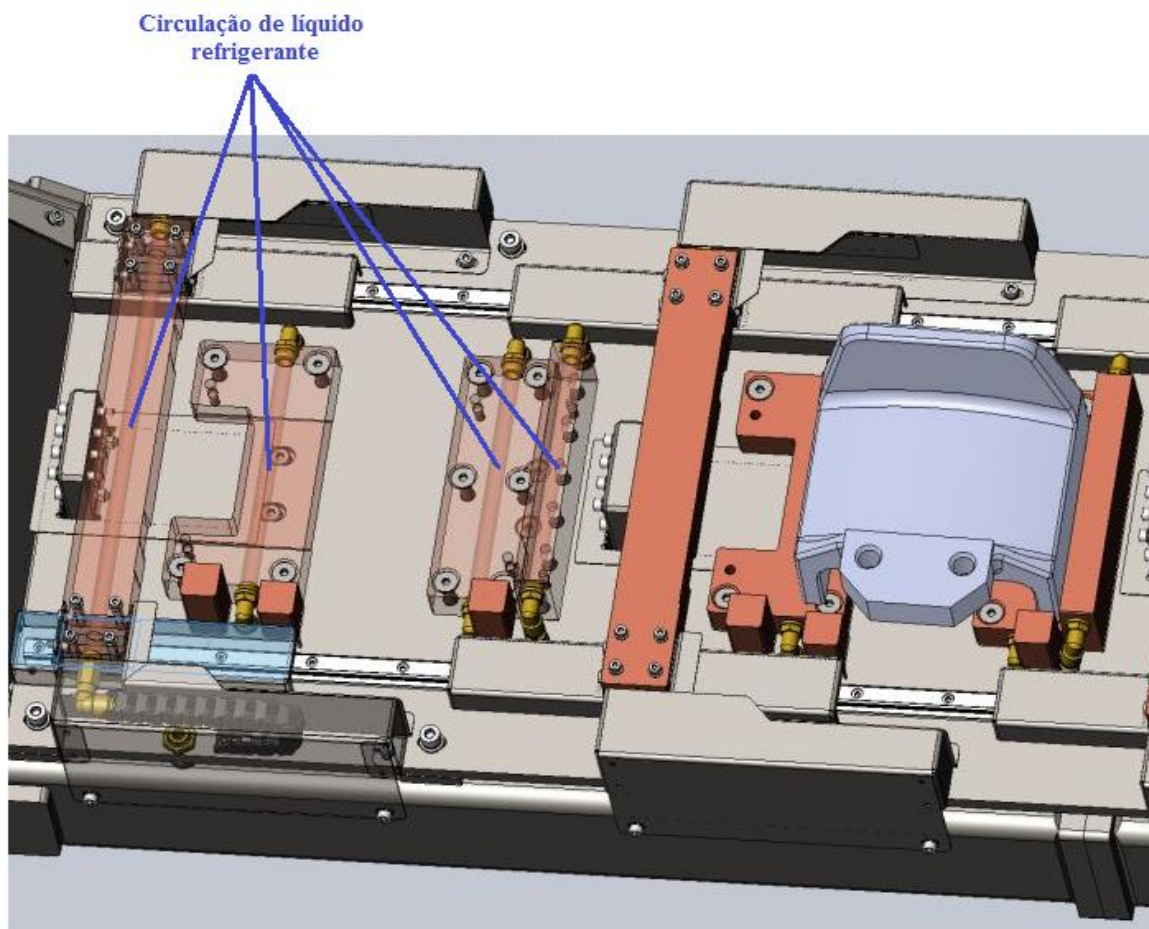


Figura 51 Canais de circulação do líquido refrigerante através do *Jig*

A execução dos testes de processo de *cladding*, que será abordada adiante, permite uma estimativa mais rigorosa do tempo de ciclo que se obtém com estas células de fabrico. Este estudo posterior, apresentado em 5.1.2.2, viria a demonstrar que com apenas duas peças em cada *Jig* é possível obter a produtividade esperada pelo utilizador. Este resultado está ligado à folga existente entre o tempo do processo e o tempo disponível para a produção, tema que será novamente abordado adiante. Se estes tempos fossem aproximados, os tempos de não produção da célula, como é o caso da rotação do posicionador entre estações e toda a automação envolvente desta operação, teriam que ser amortizados na produção de mais peças entre cada um destes ciclos. Um *Jig* com apenas duas peças tem ganhos de fiabilidade, ao possuir menos componentes suscetíveis de falha, assim como permite maior afastamento mecânico entre os dispositivos de automação e as peças em

processo de *cladding*. Com apenas duas peças no *Jig*, em que cada uma será processada em simultâneo por um robô, evita-se que uma peça já concluída esteja depositada no *Jig* aguardando a conclusão do processo noutras peças do mesmo *Jig*, ou seja, as duas peças podem ser evacuadas para a estação de descarga quase de imediato, após a conclusão do processo pelos robôs, diminuindo a exposição do *Jig* e dos seus componentes às temperaturas elevadas e permitindo a eliminação do circuito fechado de refrigeração. A Figura 52 ilustra o protótipo de *Jig* com apenas duas peças. A apresentação de duas peças diferentes no mesmo *Jig* ilustra novamente a compatibilidade do mesmo aos vários modelos de peças. Na peça do lado esquerdo, pode ver-se o sistema de acionamento pneumático para fixação da peça que está revestido de uma tampa estanque. Neste *Jig*, o acionamento está colocado a 350 mm de distância da peça, algo mais difícil de obter para o modelo de *Jig* anteriormente apresentado, com capacidade para seis peças.

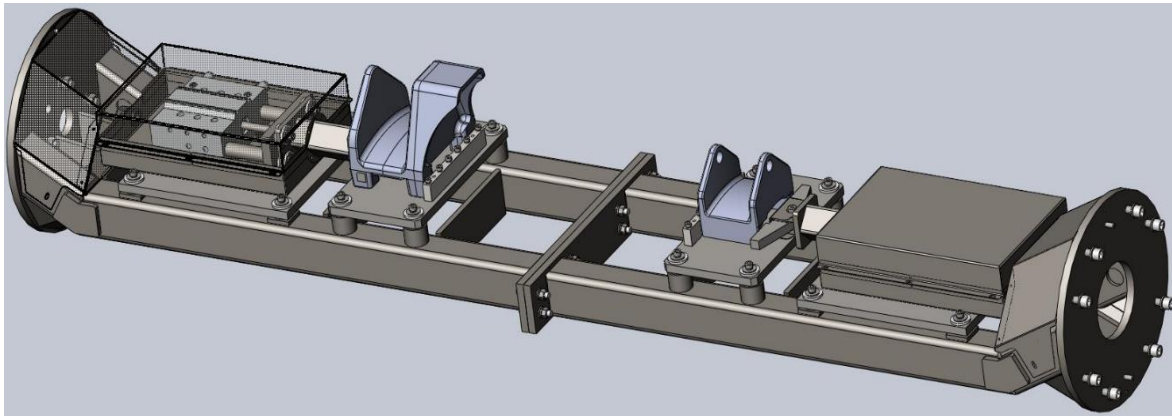


Figura 52 *Jig de cladding com duas peças*

Enquanto protótipos desenvolvidos através do programa SolidWorks™, é possível estimar a massa dos *Jigs*. Este é também o método usado para estimar a massa de outros mecanismos desenvolvidos para este projeto, como o caso das ferramentas aplicadas aos robôs de manipulação, e, desta forma, poder adequar as características do equipamento robótico às condições mecânicas. Para o primeiro protótipo de *Jig*, a massa estimada em vazio (sem peças) é de 349,198 kg e o centro de massa desvia-se cerca de 37,1 mm do eixo do acionamento do posicionador. A Figura 53 ilustra a janela do programa SolidWorks™ ao apresentar vários dados, entre eles os relativos à estimativa de massa, centro de massa e momentos de inércia do primeiro protótipo do *Jig*. Os dados de massa e centro de massa do *Jig* são importantes para se estimar o modelo de posicionador a utilizar. Se considerado o

primeiro protótipo de *Jig*, que representa o pior cenário em termos de massa entre ambos os protótipos desenvolvidos, carregado com seis peças do modelo mais pesado, a massa total do *Jig* sobe para aproximadamente 465,6 kg e o centro de massa afasta-se 74,2 mm do eixo do acionamento.

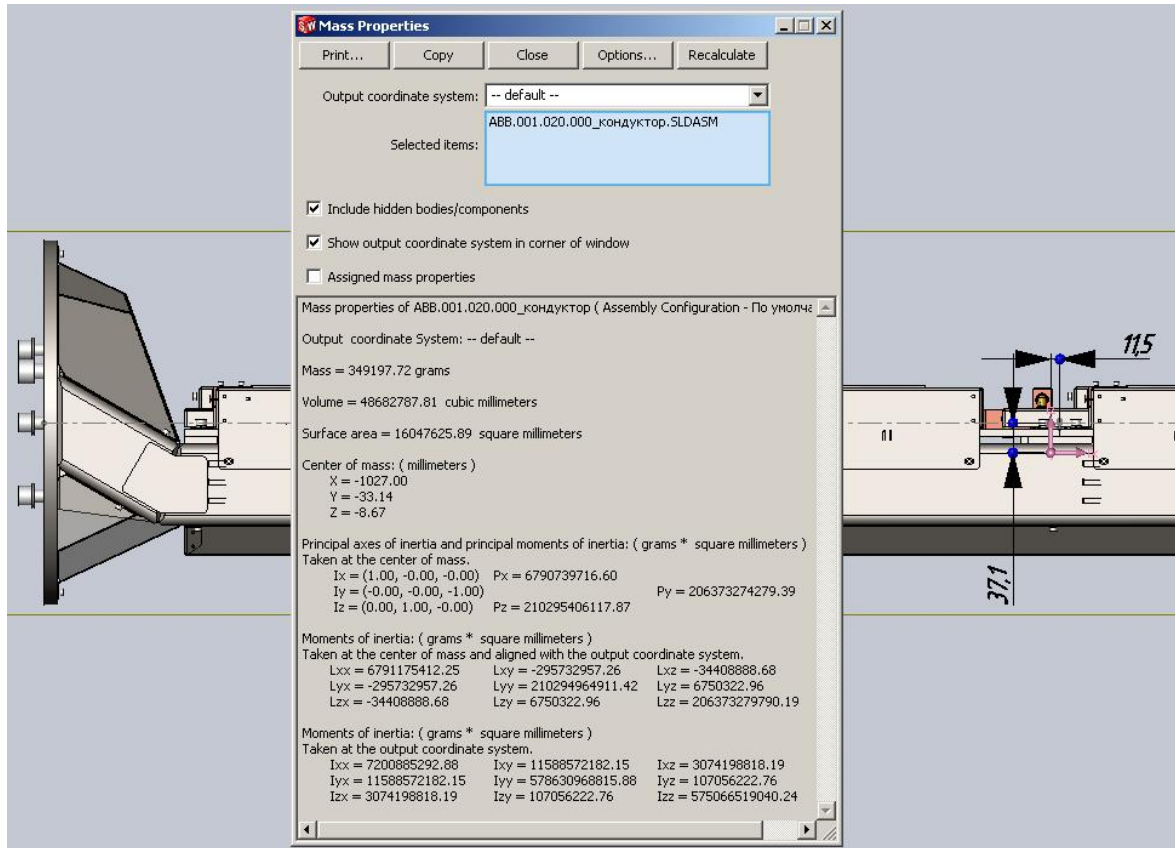


Figura 53 Massa e centro de massa do *Jig* estimados através do SolidWorks™

A Figura 54 (adaptada de [45]) representa o diagrama de carga do posicionador ABB, modelo IRBP600K, cuja capacidade de carga máxima é de 600 kg. Note-se que, no caso dos posicionadores ABB, este fabricante indica a capacidade de carga máxima, e não a nominal como acontece nos manipuladores. R indica a distância do centro de massa do *Jig* até ao eixo do acionamento e C representa a localização do centro de massa no diagrama de carga. Verifique-se a conformidade dos dados deste *Jig*, estando dentro da zona de cor castanha que é limitada pela função da linha azul: o centro de massa C está representado em 465,6 kg, com R a afastar-se 74,2 mm do acionamento. No diagrama referido, e para o mesmo centro de massa, verifique-se que a massa do *Jig* pode atingir até 600 kg, mantendo-se no limite deste posicionador.

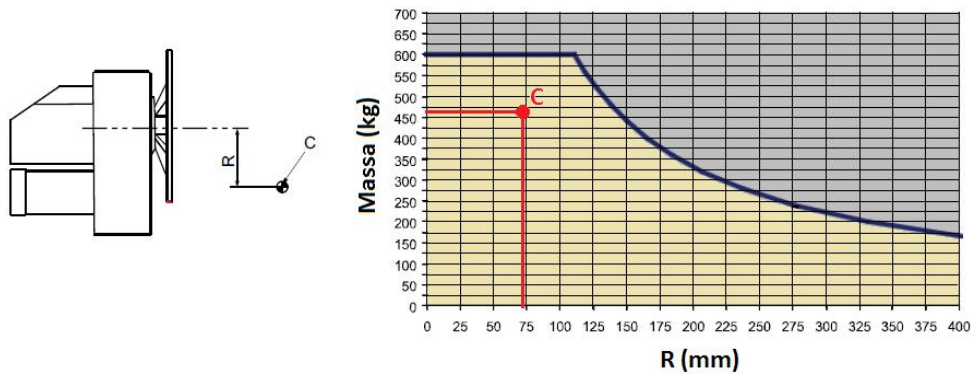


Figura 54 Diagrama de carga do posicionador ABB IRBP600K

O segundo protótipo de *Jig*, com fixação de apenas duas peças, apresenta-se mais favorável no que toca à sua massa e centro de massa. O valor estimado de massa do *Jig* em vazio é de 190,316 kg. Carregado com duas peças do modelo mais pesado, este valor sobe para cerca de 229,1 kg e o centro de massa desloca-se 54,2 mm do eixo do acionamento. Com estes dados, pode concluir-se que o *Jig* de apenas duas peças permite a seleção de um posicionador de menor capacidade de carga máxima, de 300 kg, também existente na gama ABB a que o projeto se restringe. No entanto, a seleção do posicionador de 600 kg de capacidade de carga relaciona-se com aspetos comerciais, que se antecipam à execução do projeto, momento no qual esta redução de peso do *Jig* não estava assegurada.

5.1.1.2. PALETES DE ENTRADA E MANIPULAÇÃO DE PEÇAS

A primeira abordagem quanto ao projeto das paletes de entrada de peças orientou-se para que as suas dimensões se baseassem nas medidas padrão EUR-pallet tipo 1, que são de 1200 mm de comprimento e 800 mm de largura [46], medidas referenciadas em diversas normas ISO e EN, de onde se destaca a ISO 8611-1 que se refere em específico às paletes para manipulação de materiais. A adoção destas dimensões padrão para as paletes é reconhecida pelo cliente como favorável ao armazenamento daquelas cujos modelos de peças não estejam em uso. Em produção contínua, e por cada célula de *cladding*, estão armazenadas oito paletes e apenas duas estão ao serviço.

Analisando os desenhos de cada um dos modelos de peças, verifica-se que uma das laterais existente em cada peça tem dimensão aproximada, com variação máxima de apenas 8 mm entre peças. Esta lateral das peças pode então ser utilizada para manipulação das peças pelo robô, utilizando uma pinça de dois dedos paralelos. A Figura 55 ilustra os cinco modelos

de peças para o processo de *cladding* e a face das peças na qual se pretende, em cada uma delas, fazer a manipulação robotizada com uma pinça de dois dedos. O ponto coaxial de aperto está representado por setas de cor azul.

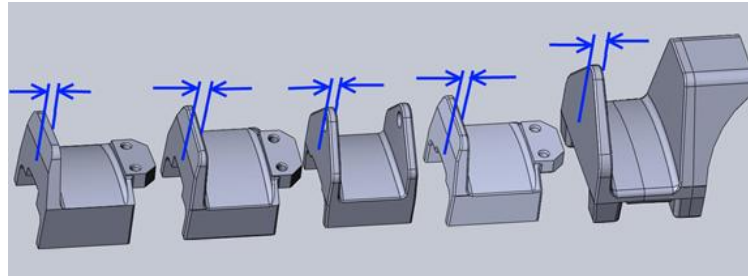


Figura 55 Pontos de manipulação com pinça de dois dedos

A peça mais pesada, que na Figura 55 está representada pelo desenho da extremidade direita da fila de peças ilustrada, tem uma massa de 19,4 kg. O atuador dos dois dedos deve ser preferencialmente um mecanismo de fabrico e comercialização padronizada, para facilitar as futuras operações de manutenção que impliquem substituição de peças. No projeto preliminar da pinça, ou seja, antes da verificação de conformidade dos desenhos das peças e realização de testes, foi considerado o atuador marca Schunk™ modelo PGN-plus 240-2-AS. Este modelo foi selecionado após consulta à documentação do fabricante [47], e tendo em atenção as seguintes características principais:

- curso máximo de abertura ou fecho, por cada dedo: 17 mm;
- força de fecho (aperto): 8340 N;
- peso (com a opção de proteção máxima): 14,4 kg;
- peso máximo recomendado da peça a manipular: 33 kg;
- comprimento máximo dos dedos de manipulação: 240 mm;
- índice de proteção: IP 64;
- temperatura máxima: 130 ° C.

Num momento inicial do desenvolvimento deste projeto, foram realizados testes de manipulação das peças de *cladding* com uma pinça de teste de três dedos, com acionamento concêntrico, marca Schunk™ modelo PZN-plus 160-1. Este acionamento tem uma força de aperto até 6000 N, valor inferior aos 8340 N considerados para o projeto da pinça de utilização final. A Figura 56 apresenta três imagens dos testes de manipulação robotizada das peças com esta pinça. Para estes testes foi utilizado um robô ABB, modelo

IRB6640, com 185 kg de capacidade de carga nominal. Este robô, sobredimensionado na sua capacidade de carga face aos requisitos para o teste de manipulação, foi selecionado apenas por representar o único equipamento disponível no laboratório de testes.



Figura 56 Testes da pinça de manipulação com robô ABB

A programação do robô para a realização dos testes de manipulação foi realizada tendo em conta a sua máxima simplificação, a propósito do objetivo do teste ser essencialmente mecânico, ou seja, pretender-se verificar apenas a estabilidade da peça ao ser agarrada pela pinça, durante a realização dos movimentos de manipulação por robô. A abertura e fecho da pinça era executada manualmente, antes e após a realização dos movimentos de teste. Assim sendo, apresenta-se em seguida todo o programa do robô, em linguagem RAPID, necessário para a realização dos testes:

```
MODULE Module1
  !Teste de manipulação de gripper
  PERS tooldata
  Tool_1:=[TRUE,[[173,0,258],[1,0,0,0]],[23.4,[
63,26,107],[1,0,0,0],0,0,0]];
  CONST speeddata Speed_1:=[1000,500,0,0];
  PROC main()
    MoveJ *,Speed_1,fine,Tool_1;
    MoveL *,Speed_1,fine,Tool_1;
    MoveL *,Speed_1,fine,Tool_1;
    WaitTime 2;
    MoveL *,Speed_1,fine,Tool_1;
    MoveL *,Speed_1,fine,Tool_1;
    MoveL *,Speed_1,fine,Tool_1;
    WaitTime 2;
    MoveL *,Speed_1,fine,Tool_1;
    MoveJ *,Speed_1,fine,Tool_1;
  ENDPROC
ENDMODULE
```

No programa do robô, destaca-se a criação de um dado de velocidade (*Speed_1*) que, ao ser utilizado em todas as instruções de movimentação, permite facilmente alterar a velocidade dos movimentos do robô entre os diferentes testes, iniciando-os com velocidades reduzidas e aumentando progressivamente, conforme o sucesso nas velocidades mais baixas. Os dados de massa, centro de massa e momentos de inércia da ferramenta (declarada como *Tool_1*) foram obtidos através do programa SolidWorks®, tendo em conta a peça mais pesada. Ao manipular peças mais leves mantendo constantes estes dados de declaração da ferramenta, como foi feito, a realização de trajetórias pelo robô não está otimizada. No entanto, isto pode ser desprezado tendo em conta que as trajetórias do robô, por si só, não apresentam interesse face ao objetivo do teste. A declaração errada da massa de uma ferramenta, por excesso e num período curto, não tem consequências ao nível do desgaste mecânico do manipulador mas apenas no servocontrolo dos trajetos. A pinça de manipulação fará o transporte de peças não trabalhadas, aproximadamente à temperatura ambiente, no momento da carga do *Jig* de *cladding*. Mas antes disso, em ciclo automático contínuo, fará a descarga das peças terminadas após o processo de *cladding*. Por este motivo, deve considerar-se que ao manipular as peças após o processo de *cladding* elas estarão a uma temperatura elevada. O valor desta temperatura foi obtido em conjunto com a realização de testes de processo, que serão abordados posteriormente. A medição da temperatura, conforme ilustrado na Figura 57, permitiu concluir preliminarmente que o ponto de contacto dos dedos da pinça se encontra à temperatura de 450 °C, logo após a conclusão do processo de *cladding*. Entenda-se, portanto, que esta será a temperatura máxima no ponto de contacto com a peça manipulada, já que esta manipulação se iniciará após, pelo menos, uma rotação de 180° do posicionador. Esta temperatura, elevada face à temperatura máxima de operação do acionamento da pinça, implica que esta deve ser preparada com sistemas mecânicos de isolamento térmico. Tratam-se habitualmente de componentes de fabrico baseado em cerâmica, que reduzem significativamente a transferência térmica que ocorreria numa construção apenas baseada em metais. Após obtido o tempo de ciclo da célula, que será abordado adiante, poder-se-á calcular o tempo de exposição da pinça às peças quentes provenientes do processo de *cladding* e, assim, saber quantas irá manipular e quanto tempo demora essa manipulação num determinado tempo de produção. Cálculos baseados na termodinâmica, que aqui não serão expostos, permitem concluir que a temperatura a que o acionamento da pinça está exposto é sempre inferior a 80° C.



Figura 57 Medição da temperatura no ponto de manipulação

Sempre que uma paleta de peças não trabalhadas for carregada pelo operador, em ciclo automático, deve-se antecipar que a célula possui, desde logo, duas peças para serem retiradas. Tal apenas não acontecerá no primeiro ciclo de trabalho de cada *Jig*, ou estação, da célula, estando ela em vazio. Assim sendo, ao introduzir uma paleta de peças é pedido ao utilizador que as primeiras duas posições entrem desde logo vazias, sendo usadas pelo robô para depositar as peças já existentes no *Jig*. Para que o primeiro ciclo de uma nova paleta seja tão rápido quanto possível, antecipando possíveis atrasos da operação de recarga exterior, foi definido que as duas posições vazias estão na fila de peças da paleta mais próxima do *Jig*, como mostrado na Figura 58. Através de sensores, o robô de manipulação da célula deverá ser capaz de detetar estas duas posições vazias numa paleta, antes de iniciar a operação de remoção.

Podia ser criada uma exceção à operação da célula, no caso referido de se tratar do primeiro ciclo de produção de cada *Jig*, em que todas as posições das paletes estariam ocupadas com peças não trabalhadas para entrada já que não existem nesse momento inicial quaisquer peças de saída nos *Jigs*. No entanto, para uniformizar o trabalho externo de recarga de paletes, foi recomendado que o procedimento de manter as duas primeiras posições vazias se mantenha válido em todas as circunstâncias. A seleção do modelo de robô para manipulação de peças, conforme mostrado na Figura 58, tem em conta o alcance e a capacidade de carga necessários.

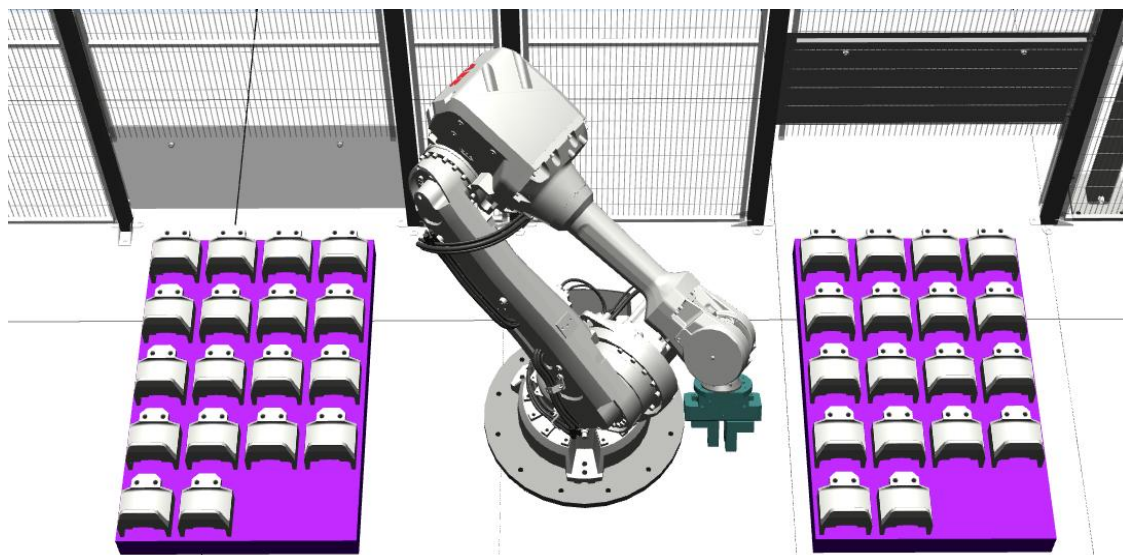


Figura 58 Paletes de peças de *cladding* e robô de manipulação

O projeto da pinça em Solidworks, representada a cor verde na Figura 58, prevê uma massa de 31,8 kg. A este valor deve-se somar a massa da peça mais pesada, com 19,4 kg, sendo portanto a carga máxima a considerar para o robô de 51,2 kg. Na gama de robôs da ABB, o modelo IRB4600-60/2.05, com 60 kg de capacidade de carga nominal e 73 kg de carga máxima, parece adequar-se a esta massa.

Ao analisar o diagrama de carga deste robô [12], e tendo em conta a configuração de punho vertical na qual o eixo cinco do robô se encontra em qualquer momento com um desvio máximo de dez graus perpendicularmente ao solo, o diagrama de carga da Figura 59 ilustra, a vermelho, a posição do centro de massa esperado do conjunto da pinça com a peça mais pesada, que se situa a 261 mm de distância vertical (Z) e 156 mm de distância horizontal (L).

Pelo diagrama da Figura 59, pode-se verificar que a capacidade de carga do robô se adequa às condições de massa da manipulação.

Devido à configuração de punho vertical, à configuração compacta da ferramenta, e tendo em conta que a inércia da rotação da ferramenta do robô em torno do eixo vertical é desprezável, por ser reduzida e realizada a baixa velocidade, neste caso a apresentação dos cálculos dos momentos de inércia da ferramenta do robô não é relevante.

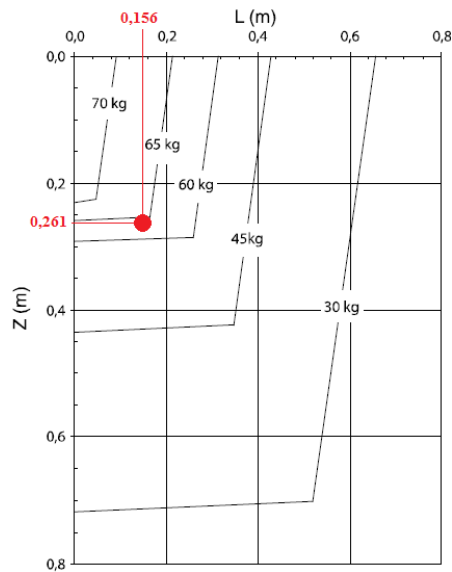


Figura 59 Diagrama de carga do IRB4600-60/2.05 com punho vertical e centro de massa da peça transportada

Por outro lado, o alcance do manipulador é verificado em simulação com o RobotStudio, como representado na imagem da Figura 58. Nessa simulação, apresentada no Anexo A, pode perceber-se que o alcance do robô IRB4600-60/2.05 também se adequa ao *layout* apresentado, atingindo as posições de trabalho em ambas as paletes, assim como as posições de carga e descarga das peças no *Jig*. Para adaptação do estudo elaborado ao padrão *FlexArc* de fabrico de células ABB, foi realizada uma nova modelação em RobotStudio onde se aplica a base metálica comum que interliga os equipamentos, e se efetua uma nova disposição de alguns periféricos. Apresenta-se no Anexo B esta simulação, mantendo-se os mesmos equipamentos robóticos até aqui selecionados, e suas características, pelo que não repete a simulação dos movimentos.

5.1.1.3. ROBÔS DE PROCESSO

Como já mencionado, a estação de processo das células de *cladding* deve estar dotada de dois robôs de processo. Cada um deles realizará, em simultâneo com o alimentador de fio e a tocha instalados sobre si, o comando e os trajetos necessários à aplicação do material de *cladding* sobre as peças. A seleção do modelo de robô adequado ao processo é feita tendo em conta as características de alcance e capacidade de carga. Em termos de alcance, e como já abordado, o RobotStudio é muito prático na verificação do cumprimento das necessidades: o alcance para a superfície de *cladding* em cada um dos cinco modelos de

peças, e o afastamento necessário desde o posicionador, para que este possa realizar a rotação entre estações sem colidir com os robôs. A Figura 60 ilustra o teste em RobotStudio destas duas variantes. Na imagem da esquerda, apresenta-se a verificação do alcance para a superfície de *cladding*. Na imagem da direita, mostra-se a verificação que o posicionador pode realizar a rotação de 180°, sem colidir com os manipuladores ou os respectivos pedestais de elevação, notando-se aqui a curta distância (36,98 mm medida através da ferramenta *Minimum Distance* do RobotStudio) entre o posicionador e a base dos manipuladores no momento em que a rotação do posicionador atravessa o ângulo de noventa graus.

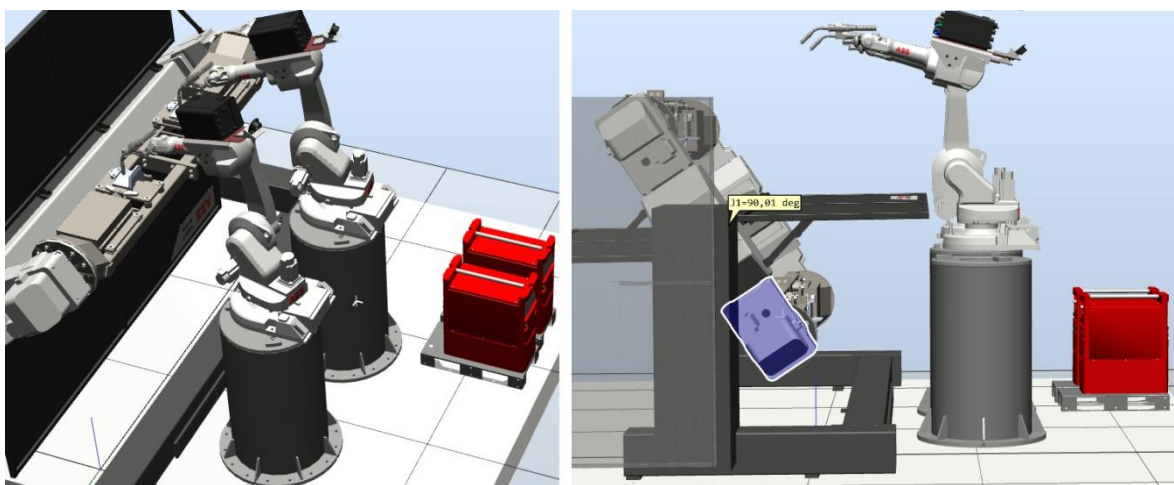


Figura 60 Teste em RobotStudio do alcance dos robôs de *cladding*

Através desta simulação conclui-se que o modelo de robô adequado, pelo critério do alcance, é o IRB1600-6/1.45, com 1450 mm de alcance. O modelo imediatamente inferior na gama de robôs da ABB é o IRB1600-6/1.2, com 1200 mm de alcance, que se verificam insuficientes após simulação. Tendo sido verificado que este alcance de 1450 mm é suficiente, os testes com modelos de robôs de alcance superior são desnecessários. Note-se também que para melhorar o alcance deste manipulador até aos trajetos pretendidos nas peças de *cladding*, estes trajetos devem estar alinhados com a junta número dois do manipulador. Para obter esta melhoria no alcance através do posicionamento dos manipuladores, cada um deles é elevado num pedestal metálico com 1200 mm de altura, conforme visível na Figura 60. A capacidade de carga nominal deste modelo de robô é de 6 kg. Para validar esta capacidade de carga determina-se o peso da tocha de soldadura (que representa o conjunto de componentes entre o alimentador de fio e o bocal) que é de

3,4 kg. O diagrama de carga deste robô já considera a carga adicional de 15 kg ao nível do eixo 3 [48], onde é instalado o alimentador de fio. Na Figura 61 é apresentado o diagrama de carga do robô 1600-6/1.45. A vermelho está representado o centro de massa aproximado da tocha de soldadura, a cerca de 0,13 m de distância no alinhamento com a flange do eixo 6 (Z) e 0,03 m de deslocação lateral face ao mesmo eixo (L). Analisando esta figura, conclui-se que nestas condições o limite para esta posição do centro de massa é de 4 kg, sendo, verificada a conformidade deste modelo de robô para esta aplicação.

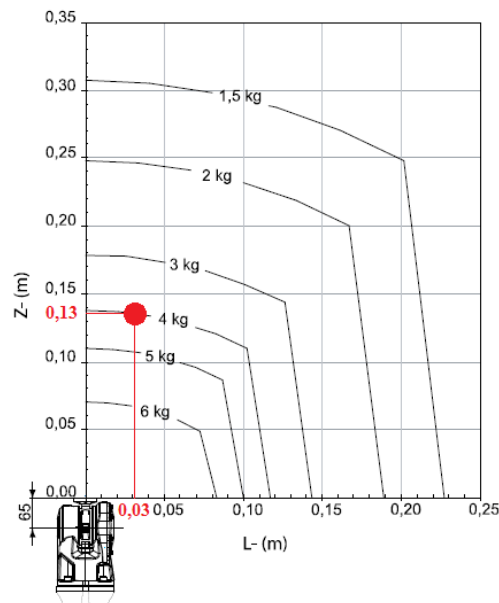


Figura 61 Diagrama de carga do manipulador IRB1600-6/1.45 com a massa da tocha

Habitualmente, se a massa da ferramenta usada pelo robô está compactada à proximidade do seu centro de gravidade, o cálculo do momento de inércia máximo é desprezado. Isto não deve ser feito se a ferramenta é volumosa, criando uma massa distribuída por uma distância considerável após a flange do eixo 6 do manipulador, como é o caso numa tocha de soldadura. Os momentos de inércia máximos apresentados pela ABB para as juntas 5 e 6 deste modelo de manipulador têm os valores de $0,42 \text{ kgm}^2$ e $0,39 \text{ kgm}^2$, respetivamente [48]. Para o seu cálculo são necessários os valores do momento de inércia da ferramenta utilizada em torno dos eixos X, Y e Z, o centro de massa/gravidade e a massa, obtendo-se:

$$J5 = \text{Massa} \times ((Z + 0.065)^2 + L^2) + \max(J_{ox}, J_{oy}) \leq 0,42 \text{ kgm}^2$$

$$J6 = \text{Massa} \times L^2 + J_{oz} \leq 0,39 \text{ kgm}^2$$

Neste projeto verifica-se, usando valores aproximados de $J_{ox} = 0,21 \text{ kgm}^2$ e $J_{oz} = 0,27 \text{ kgm}^2$, que o momento de inércia máximo na junta 5 é de $0,342 \text{ kgm}^2$ e na junta 6 de $0,273 \text{ kgm}^2$. Logo, os valores dos momentos de inércia da tocha estão dentro dos limites para os momentos de inércia máximos das juntas 5 e 6 permitidos por este modelo de robô.

Antecipando uma programação do robô realizada ponto-a-ponto, por preferência do utilizador, a repetibilidade posicional de $0,02 \text{ mm}$ e a repetibilidade em trajeto de $0,19 \text{ mm}$ deste robô [48] adequam-se aos critérios requeridos para a aplicação do processo de *cladding*, no que se refere às tolerâncias das cotas laterais da camada de material aplicada sobre as peças, que é de $\pm 1,5 \text{ mm}$. Note-se também que a medição deste desempenho do robô, quanto à repetibilidade em trajeto, é medida de acordo com o teste ISO 9283, considerando o limite nominal de carga e a velocidade de $1,6 \text{ m/s}$, condições mais desfavoráveis comparativamente às deste processo robótico.

5.1.2. TESTES DO PROCESSO E RESPETIVOS TEMPOS

A realização de testes do processo de *cladding* na fase de desenvolvimento do projeto é essencial para se verificar a obtenção de vários requisitos. Neste capítulo, note-se a importância da não divulgação das características mecânicas das peças do cliente, devido à sua confidencialidade tecnológica. Por este motivo, a exposição do método de seleção dos materiais dos elétrodos utilizados não será aqui tratada com maior detalhe.

A dureza obtida é um dos principais requisitos e que motiva o processo de *cladding*, mas o utilizador pretende também que se obtenha uma boa qualidade de deposição, sem escória e com o mínimo de salpicos, assim como a dimensão mínima desejada para a camada de material depositado, com destaque para a altura. O eletrodo utilizado deve ter em conta uma boa relação custo-benefício, relação que depende da dureza do material depositado após o processo, e da qualidade dessa deposição no que respeita à uniformidade e ausência de escória, tudo isto em função do custo da quantidade de eletrodo consumido por cada peça. Este processo de *cladding*, igual para todos os modelos de peças, requer uma dureza superior a 55 HRC (HRC indica tratar-se de um valor da escala de dureza da Rockwell) na camada depositada. Um valor de dureza na escala HRC implica a utilização do método de teste de dureza de metais da Rockwell, descrito na norma ISO 6508 que se refere aos testes de dureza Rockwell em materiais metálicos [49]. Segundo este teste de dureza, o metal é

sujeito a duas forças de penetração de um cone de 120° de diamante polido. Uma força inicial $F_0 = 98,07$ N é aplicada à superfície do metal, seguindo-se a aplicação e remoção de uma força final $F = 1470$ N, com o retorno à força inicial F_0 . Depois disto, a distância h de penetração, que representa a distância da penetração após a aplicação da força inicial F_0 e até terminar a penetração com a força final F , permite obter o valor de dureza HRC da seguinte forma:

$$Dureza (HRC) = 100 - \frac{h}{0,002}$$

O valor de 55 HRC significa que o material testado suporta uma tensão mecânica até 2070 MPa ($1 \text{ Mpa} = 1 \text{ N/mm}^2$) de acordo com a tabela apresentada no Anexo C [50]. Se considerados os pressupostos da dureza pretendida, do material de base das peças, e do gás de revestimento do processo (sendo este 100 % CO_2), a consulta aos fabricantes de elétrodos permite pré-selecionar alguns tipos deste material consumível que se poderão adequar às necessidades. Para este efeito, foram consultados os fabricantes ESAB e ITW Hobart.

A Tabela 9 ilustra os resultados do primeiro estudo comparativo, antes de testes, de alguns elétrodos para *cladding* com parâmetros estimados pelos respetivos fabricantes para esse processo. O valor apresentado para o custo de cada elétrodo, em Euros por quilograma desse material, não deve aqui ser considerado rigoroso devido à lógica comercial e de mercado inerente ao processo de aquisição de uma matéria-prima.

Tabela 9 Comparativo de custo e características de alguns elétrodos para *cladding*

Tipo de elétrodo	Sólido		Tubular		
	Autrod 13.90 Autrodur 58 G M	Autrod 13.91 Autrodur 56 G M	Tubrodur 15.50 Tubrodur 60 G M	Tubrodur 15.52 Tubrodur 58 O/G M	MF A760 M
Fabricante	ESAB	ESAB	ESAB	ESAB	ITW Hobart
Custo [EUR/kg]	17	21	8	13	7
C [%]	1,1	0,45	0,7	0,4	0,5
Mn [%]	2	0,45	0,8	1,3	1,5
Si [%]	0,4	3	0,8	0,3	0,6
Cr [%]	1,8	9	5,5	5	6
Mo [%]	0	0	1	1,2	0,9
Dureza esperada (HRC)	55-60	50-60	55-62	55-60	57-63
Tipos de cordão	-	-	Escamado	Escamado	Uniforme
Disponível em <i>Marathon</i>	Não	apenas 1,2mm	Sim	Não	Sim
Diâmetro do fio [mm]	1,0; 1,2	1,0; 1,2; 1,6	1,2; 1,6; 2,4	1,6	1,2; 1,6
Escória	Não	Não	Não	Sim	Não
Camadas	1 (1,6mm)	2 (1,2mm)	1 (1,6mm)	1 (1,6mm)	1 (1,6mm)
Taxa de deposição [kg/h]	1,5 - 6,6	1,5 - 6,6	1,8 - 9,0	2,4 - 5,5	3,0 - 10,0

Observando este comparativo, um tipo de eletrodo de cada fabricante parece mais interessante que os restantes na relação entre as características técnicas e o seu custo: o Tubrodur 60 G M, do fabricante ESAB, e o MF A760 M, do fabricante ITW Hobart. Esta conclusão tem em conta a conformidade da dureza pretendida, que em ambos os casos é obtida no limite inferior esperado de 55 HRC e 57 HRC, respetivamente, com apenas uma camada de material depositado. Note-se que, para valores de dureza mais altos, podia ser necessária a aplicação de duas ou mais camadas de material para que, em cada camada, aumente a pureza (e a dureza) do material depositado, obtida com uma menor mistura do material de base menos duro. Ambos os eletrodos mencionados não depositam escória, evitando a limpeza desse depósito nas peças após o processo, e permitem a aquisição ao fabricante no formato *Marathon* que facilita a operação das células ao diminuir a quantidade de operações de recarga.

5.1.2.1. TESTE ROBOTIZADO DO PROCESSO DE *CLADDING*

O teste do processo de *cladding*, com vista à verificação da possibilidade da sua robotização, só podia ser realizado em condições semelhantes às pretendidas para as células de fabrico descritas. Para isto, foram realizados vários testes, em diferentes condições, cada um deles com maior aproximação às características técnicas esperadas: a utilização de fonte de potência marca Fronius modelo TPS5000, o robô ABB de seis eixos IRB1600-6/1.45 e um posicionador. Recorde-se que o gás de revestimento utilizado no processo de *cladding* deste projeto é apenas 100 % CO₂, tratando-se de um requisito prévio do cliente que não representa a única possibilidade técnica.

O primeiro teste realizou-se com o eletrodo ESAB e utilizando peças de base com diferentes propriedades daquelas requeridas neste trabalho. Este teste pretendia apenas estabilizar os valores de regulação da fonte de potência em peças de reduzido valor comercial, evitando a destruição de peças do cliente para estas regulações iniciais com menores sucessos. Os requisitos que se pretendiam neste teste eram apenas a deposição de uma camada superior a 3 mm de altura e com aspeto uniforme. A Figura 62 ilustra alguns resultados destes primeiros testes, onde se realizaram cordões únicos com 200 mm de comprimento, cerca de 20 mm de largura, e altura superior a 3 mm exceto nos bordos. A melhoria de resultados é visível na deposição sequencial das nove peças testadas, da esquerda para a direita.



Figura 62 Testes iniciais do processo de *cladding*

Os testes seguintes, utilizando as peças finais, requerem já a programação do robô em várias trajetórias em que a deposição dos vários cordões paralelos resulte numa camada tendencialmente uniforme. Além disso, o aumento da temperatura da peça de base por cada cordão realizado permitirá concluir que a regulação da potência do processo de *cladding* deverá diminuir progressivamente a cada cordão, com um programa diferente na fonte de potência. A Tabela 10 apresenta os principais parâmetros da fonte de potência, para cada um dos quatro programas de cada cordão de um modelo de peça que implica estas quatro passagens. Sequencialmente, do primeiro ao quarto programa, verifique-se o decréscimo dos valores de potência e de comprimento do arco para compensação do aumento da temperatura na peça de base. De referir que as linhas sinérgicas utilizadas nestes primeiros testes não estavam adequadas ao gás e tipo de eletrodo utilizados, porque essas linhas sinérgicas específicas para *cladding*, e nas condições pretendidas neste projeto, não existem nas fontes de potência Fronius, tal como são comercializadas enquanto produto padrão. O desenvolvimento destas linhas sinérgicas seria feito posteriormente, pelo fabricante Fronius.

Tabela 10 Parâmetros dos testes de *cladding* com cordões longitudinais

Parâmetro	1	2	3	4
P	13,4	13,2	13,0	13,0
AL.1	-24	-24	-23	-22
dyn	-5,0	-5,0	-5,0	-5,0
GPr	0,1	0,1	0,1	0,1
Gpo	0,2	0,2	0,2	0,2
bbc	10	10	10	10
I-S	130	110	110	110
I-E	80	80	80	80
t-S	0,1	0,1	0,1	0,1
t-E	0,1	0,1	0,1	0,1

Num dos modelos de peças do cliente, como a apresentada na Figura 63, verifica-se que a realização de quatro cordões longitudinais apresenta alguns defeitos, poros e fissuras, além da sobreposição do material ser pouco uniforme. Testes com cordões transversais mostram-se assim necessários, sendo realizados em seguida. Comparativamente aos testes iniciais, verificou-se que a deslocação do robô em forma de ziguezague favorecia o aspeto visual dos cordões, dando maior estabilidade quanto à ausência de poros e fissuras, e uniformidade de aspeto.



Figura 63 Testes do processo de *cladding* em cordões longitudinais

O deslocamento em ziguezague do robô com o formato apresentado na Figura 64, com um comprimento de onda de 2,4 mm e amplitude de 9 mm, permite obter a largura de 22 mm do cordão de material depositado.

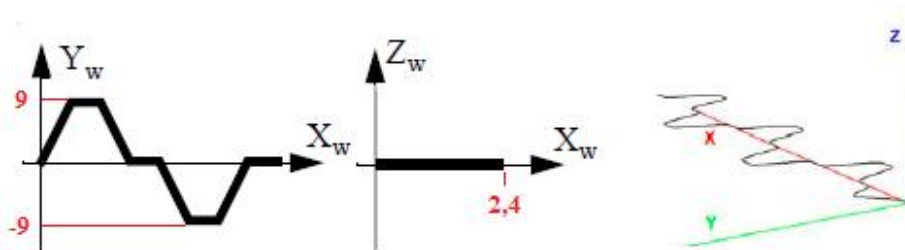


Figura 64 Forma e dimensões do deslocamento em ziguezague do robô

Para obter uma sobreposição de cordões, de modo a que o paralelismo de vários cordões represente uma superfície praticamente plana, verificou-se que o afastamento entre o trajeto do robô entre os vários cordões deveria ser de 17 mm. Para que a deposição de material resulte numa camada de altura superior a 3 mm, nestas condições a velocidade de deslocação do robô é de 7 mm/s.

A Figura 65 apresenta o resultado obtido com o teste de processo de *cladding* em cordões transversais.



Figura 65 Teste de *cladding* com cordões transversais

5.1.2.2. TEMPO DE CICLO

A realização dos testes de *cladding*, em conjunto com o estudo dos tempos associados aos processos robotizados das respetivas células de fabrico, permite determinar o tempo necessário para a produção de peças. Dos dados já apresentados, note-se a velocidade de deslocação do robô de 7 mm/s para a realização do cordão, que resulta num depósito cuja largura efetiva é de 17 mm, considerando a sobreposição de material entre cordões. Estes dados permitem verificar a taxa de deposição de material, que é de 119 mm²/s. Tendo em conta a área de processo de cada modelo de peça, pode então ser calculado o tempo de processo esperado por cada um desses modelos. Por tempo de processo entende-se o tempo

de duração da deposição de material. Tal como apresentado na Tabela 11, o tempo de deposição de material nas peças com maiores superfícies, e tendo em conta a produção em simultâneo de duas peças por cada célula, resulta no tempo médio de processo de cada peça numa célula de *cladding* de 1,25 minutos, ou seja, 1 minuto e 15 segundos.

Tabela 11 Tempos de processo de *cladding*

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Superfície para depositar (mm ²)	17800	17800	17800	10400	10400
Tempo de processo (s)	149,58	149,58	149,58	87,39	87,39
Tempo de processo (min)	2,49	2,49	2,49	1,46	1,46
Tempo médio de processo cada peça numa célula (min)	1,25	1,25	1,25	0,73	0,73

Para se obter o tempo de ciclo devem ser adicionados aos tempos de processo os tempos referentes às restantes operações do ciclo robotizado da célula, os quais são obtidos através de simulação com o RobotStudio. A Tabela 12 apresenta o somatório destes tempos e a obtenção do tempo de ciclo para cada célula de *cladding*. A sequência de operações é repetida em cada ciclo, sem paragens, assumindo que o robô de carga e descarga de peças não provoca atrasos. Nos tempos expostos na Tabela 12, verifica-se que o tempo de limpeza automática de tocha é de 9,85 segundos. A limpeza realiza-se sempre no final de cada ciclo. Embora o tempo total desta operação seja 15 segundos, o início da operação de limpeza ocorre em simultâneo com o início de rotação do posicionador, motivo pelo qual aos 15 segundos totais do tempo de limpeza é subtraído o tempo de 5,15 segundos de rotação do posicionador.

Tabela 12 Tempo de ciclo para cada célula de *cladding*

Nº Operação	Designação	Tempo (em segundos)
1	Rotação do posicionador	5,15
2	Robôs deslocam-se para a posição de início de processo	2,65
3	Preparação de início de arco	0,2
4	Processo de <i>cladding</i>	149,58
5	Preparação de fim de arco	0,5
6	Robôs deslocam-se para a posição de repouso	2,6
7	Limpeza automática de tocha	9,85
	Tempo de ciclo	170,53

O tempo de ciclo de 170,53 segundos corresponde ao tempo de produção de duas peças por cada célula de *cladding*. Se for considerado que o número de horas estimadas de trabalho por cada ano é de 3760, com uma eficiência de 80 %, então o tempo de produção efetiva anual é de 3008 horas. Pelo tempo de ciclo obtido no cálculo apresentado na Tabela 12, cada célula de fabrico permite uma produção anual superior a 127 000 peças.

5.2. DESCRIÇÃO GENÉRICA DOS DADOS INICIAIS E DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DE SOLDADURA

Tal como no processo de *cladding*, o processo de soldadura já era realizado pelo cliente, em processo manual, no início deste projeto. O principal objetivo da robotização deste processo de soldadura é a obtenção de maior uniformidade e qualidade na realização dos cordões. Existe apenas uma peça de base, que se designa por eixo médio ou eixo traseiro, ao qual são soldadas três peças diferentes. Duas das três peças a soldar ao eixo têm como função a acessibilidade ao conteúdo da caixa de transmissão onde circula óleo lubrificante. Por este motivo, o cordão de solda a aplicar nestas duas peças deve ser estanque.

5.2.1. DESCRIÇÃO DAS CÉLULAS ROBOTIZADAS

O cliente pretende a entrega de várias células robotizadas independentes para o processo de soldadura. Cada uma destas células, de igual configuração, deverá ser constituída por duas áreas de trabalho: uma área de realização do processo de soldadura, e outra área para carga e descarga manual de peças.

O principal equipamento tecnológico de cada uma destas células sofreu várias alterações ao longo do desenvolvimento do projeto. No entanto, o resultado do processo comercial que antecedeu a realização do projeto previa que cada célula de soldadura seria constituída por um robô de processo, um robô de manipulação, um posicionador de cinco eixos com duas zonas e dois *Jigs*, e uma fonte de potência.

Com semelhanças ao descrito anteriormente para o processo de *cladding*, a configuração inicial das células de soldadura previa a existência de paletes de entrada de peças para processar, mas numa configuração diferente. A entrada das peças de base principais (os eixos) é realizada manualmente pelo operador no posto de carga e descarga da célula, utilizando um guindaste de comando manual. As restantes três peças para serem soldadas ao eixo entram nas células de soldadura suportadas em paletes próprias, tal como nas células de *cladding*, mas os locais de entrada situam-se do lado da estação de processo.

A Figura 66 ilustra o modelo inicial da célula de soldadura em RobotStudio. As vedações de segurança metálicas não estão visíveis para melhorar a apresentação de detalhe da estação de processo, podendo assim ver-se os robôs e as paletes de peças.

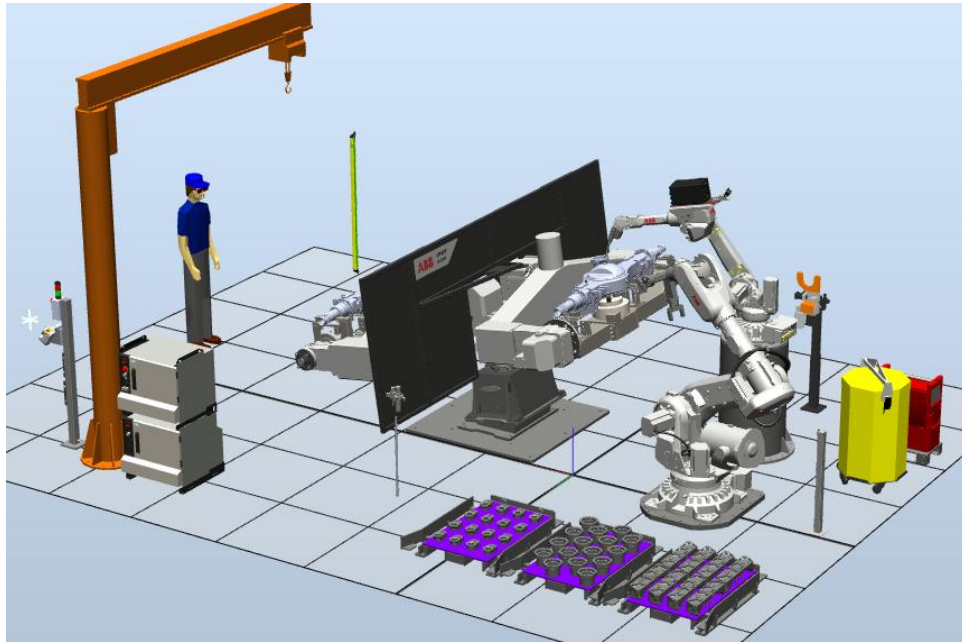


Figura 66 Modelo inicial da célula de soldadura ocultando vedações de segurança

Os robôs de processo e de manipulação de peças estão colocados lado-a-lado, na mesma estação, porque a manipulação de cada uma das peças para soldar até ao eixo deve terminar com o início da soldadura, como forma de fixar de imediato a posição onde cada uma delas é colocada pelo robô manipulador. Esta fixação provisória das peças, antes do cordão final de soldadura, é feita através de pequenos cordões de soldadura, por vezes designados por ‘pingos’ de soldadura, nome que poderá estar associado ao aspeto típico em forma de gotas. A designação habitualmente encontrada para estes pingos de soldadura, na documentação técnica em língua Inglesa, é a de *tack welds*.

5.2.1.1. MANIPULAÇÃO DAS PEÇAS PARA MONTAGEM ROBOTIZADA

Na estação de soldadura, a manipulação de peças para os pingos de soldadura é feita por um robô que trabalha de modo parcialmente colaborativo com o robô de processo. O robô de manipulação recolhe cada uma das peças da sua paleta de entrada e transporta-as até ao ponto onde são soldadas ao eixo. Existem três modelos distintos de peças para soldar ao eixo: a bucha, a flange e o suporte. Desde logo se conhece um dado técnico – num determinado modelo de eixo, apenas são soldadas duas destas três peças: o suporte e a flange. No entanto, esta restrição será gerida apenas pelo programa de controlo da célula de soldadura, não sendo relevante para a fase inicial de desenvolvimento deste projeto.

A Figura 67 ilustra as fotografias das três peças, tal como apresentadas na visita ao local de produção, e os respectivos locais onde se pretende soldar cada uma delas ao eixo médio, cuja imagem é a do modelo tridimensional utilizado nas simulações em RobotStudio. A flange, a bucha e o suporte são apresentados nesta imagem, sequencialmente, da esquerda para a direita.

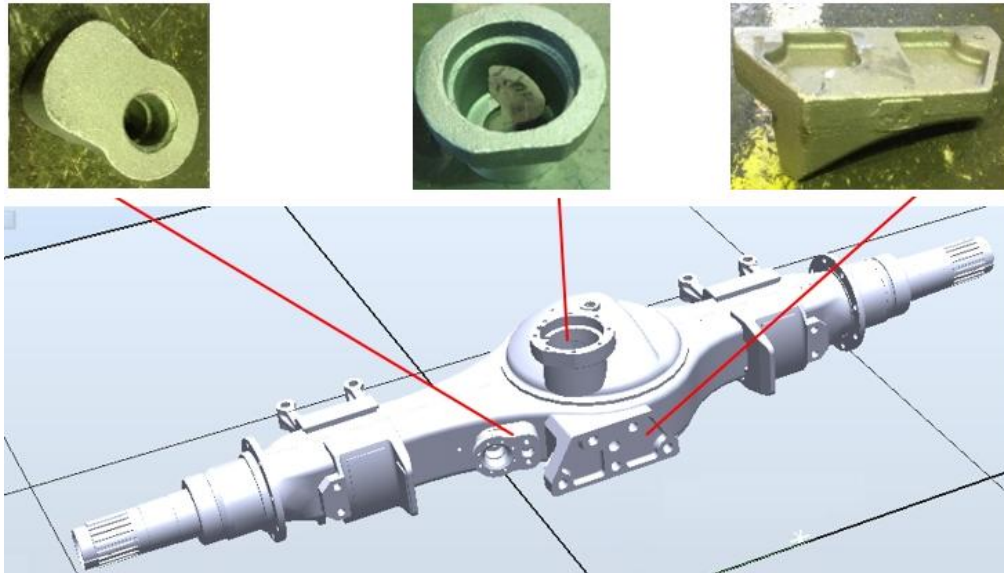


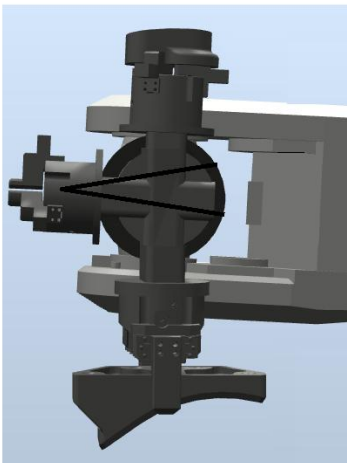


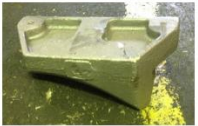



Figura 67 Localizações da flange (esquerda), bucha (centro) e suporte (direita) no eixo médio

O desenvolvimento das pinças de manipulação tem em conta a geometria de cada uma das três peças a manipular. Na sequência esperada para as operações da célula de soldadura, verifica-se a necessidade desta pinça manipular em simultâneo as três peças, para que as operações de recolha de cada uma delas, na respetiva paleta de entrada, ocorram em simultâneo com a realização dos cordões finais de soldadura. Desta forma, na montagem inicial das peças para os pingos de solda, o robô manipulador está pronto a instalar cada uma das três peças no seu local, minimizando a espera do robô de soldadura por estas operações de manipulação.

Para cada modelo de peça foi projetado e testado um conceito de aperto que permitisse uniformizar a posição final da peça na garra e manter esse posicionamento durante o seu transporte e até à colocação no eixo. Foram realizados vários testes reais de manipulação, com robô ou manualmente, até se chegar aos conceitos apresentados na Tabela 13 e que se mostraram os mais adequados a cada modelo de peça.

Tabela 13 Conceitos para manipulação das peças

Peça	Conceito de garra	Desenho
	 2 dedos paralelos	
	 3 dedos concêntricos	
	 2 dedos paralelos	

O projeto em Solidworks da pinça de manipulação, conforme os conceitos estabelecidos após os testes, e tendo em conta a manipulação das três peças em simultâneo, permite estimar uma massa de 72,13 kg, com centro de massa situado a 324 mm de distância do eixo Z, e 64 mm de distância horizontal (L). Nestas condições, e na gama de robôs ABB disponíveis, dois modelos parecem adequar-se no seu limite nominal de capacidade de carga: o modelo IRB6620 com 150 kg de capacidade de carga e 2200 mm de alcance, e diferentes versões do modelo IRB6700, com capacidades de carga nominal variando entre 150 kg e 300 kg, e alcances desde 2600 mm até 3200 mm. De todos estes modelos, que pela sua capacidade de carga estão claramente acima das necessidades, foram testados em RobotStudio os modelos de menores alcances: o IRB6620-150/2.2 e o IRB6700-200/2.6. A simulação com o modelo IRB6620 mostra que o alcance de 2200 mm deste modelo implica a elevação do próprio manipulador a 600 mm de altura em relação ao solo, o desalinhamento linear das paletes de entrada de peças, e a elevação em altura de, pelo menos, uma delas em 500 mm, tal como ilustra a Figura 68. A elevação do manipulador não representa qualquer limitação técnica, mas apenas de custo quanto ao componente mecânico desta elevação, o pedestal. No entanto, o desalinhamento das paletes e a necessidade de elevar uma delas, como representado a cor vermelha na Figura 68, mostra-se bastante restritiva do desenvolvimento das paletes e do sistema de entrada das mesmas. Se se considerarem paletes com construção de dimensão padrão *EUR-pallet* tipo 1 (como descrito em 5.1.1.2), a necessidade de posicionamento de uma delas a 500 mm de altura não se apresenta conveniente.

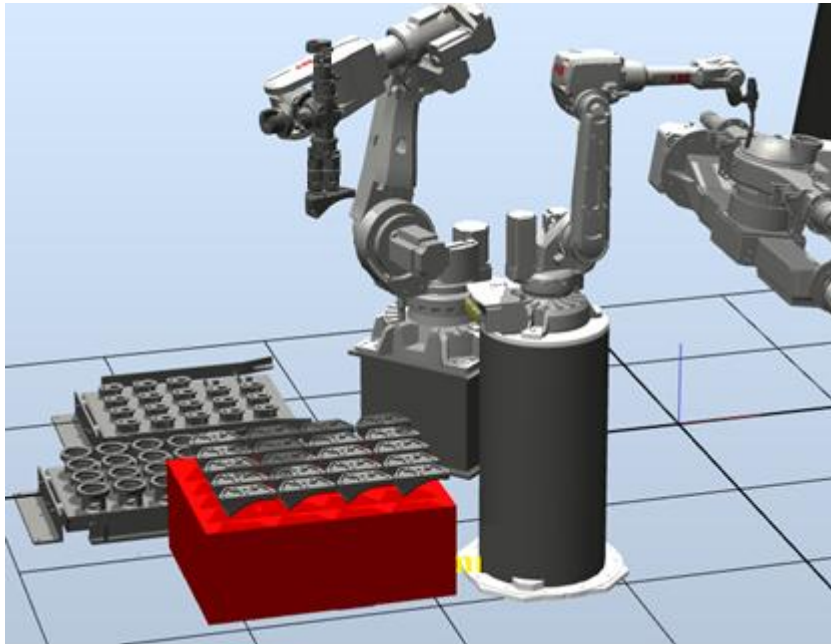


Figura 68 **Teste de alcances do robô de manipulação de peças IRB6620**

O teste em RobotStudio com o segundo modelo de robô selecionado, o IRB6700-200/2.6, permite verificar que este modelo pode ficar colocado com a sua base fixada ao nível do solo, tal como as paletes de entrada.

A Figura 66 ilustrou a configuração da célula robotizada utilizando este modelo de robô. A Figura 69 apresenta algumas imagens dos testes de alcance em RobotStudio do robô manipulador IRB6700 e do robô de soldadura no momento de realização dos pingos, durante o qual o robô manipulador sustém as peças na sua posição no eixo. Esta simulação, apresentada no Anexo D, permite validar o alcance do robô de manipulação de peças modelo IRB6700. No Anexo D, tal como na Figura 69, este robô encontra-se elevado 350 mm porque esta elevação mostra-se mais favorável para os movimentos de trabalho coordenado com o robô de soldadura, no momento de realização dos pingos de solda e para a posição das paletes no lado oposto deste robô face ao posicionador. No entanto, a pedido do cliente durante a primeira revisão de *layout*, é indicada a preferência que as paletes se situem na célula lateralmente ao robô IRB6700, para favorecer o local de troca de paletes pelo operador.

Uma nova simulação, com esta nova posição para as paletes, é apresentada no Anexo E e permitiu revalidar o alcance do robô IRB6700 posicionado ao solo, tendo também em conta a presença das vedações de segurança.

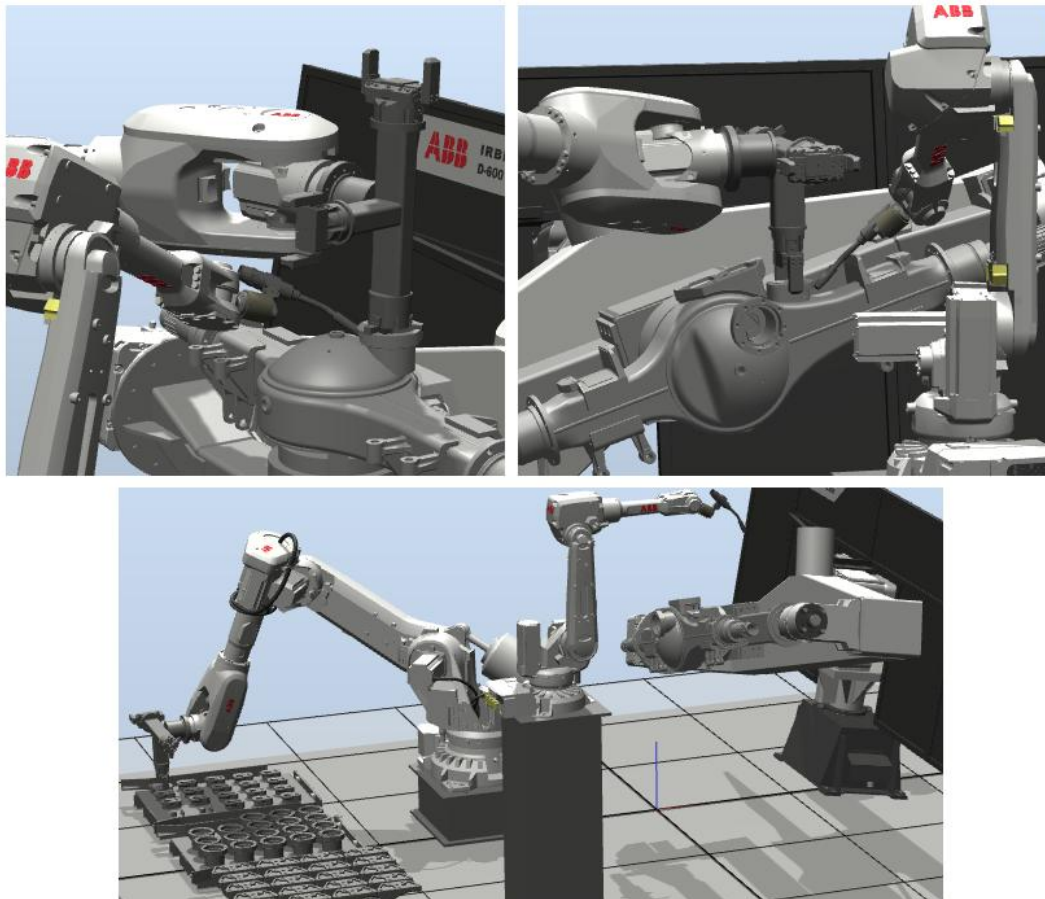


Figura 69 Testes de alcances do robô de manipulação de peças IRB6700

Ambas as simulações, apresentadas nos Anexo D e Anexo E, permitem testar o alcance do robô de soldadura e verificar o modelo adequado. O modelo IRB 2600-12/1.65, com 12 kg de capacidade de carga e 1650 mm de alcance foi o modelo que se verificou adequado às características da célula de soldadura. O alcance de 1650 mm é necessário para que o manipulador atinja todos os trajetos de soldadura e também se afaste o suficiente no momento de rotação do posicionador, tal como já foi abordado nas células de *cladding*. O teste de alcance do robô de soldadura, para as respectivas posições e trajetos deste processo, viria a mostrar uma limitação quanto à tocha de soldadura. Isto deve-se a um local de dimensões reduzidas durante o trajeto de soldadura da bucha e que implica a utilização de um bocal de diâmetro até 19 mm. A Figura 70 ilustra o local desta restrição e as dimensões do bocal utilizado, permitindo uma folga superior a 1 mm entre cada limite lateral do trajeto. Esta folga é importante, não só para assegurar a durabilidade do bocal, mas também para antecipar os movimentos de oscilação da tocha, obrigatórios para a utilização da tecnologia de seguimento de junta (o *WeldGuide*,) já abordado no capítulo de

robotização do processo. A restrição do diâmetro do bocal implica a restrição do caudal de gás e as implicações desta restrição serão consideradas na realização dos testes de soldadura.

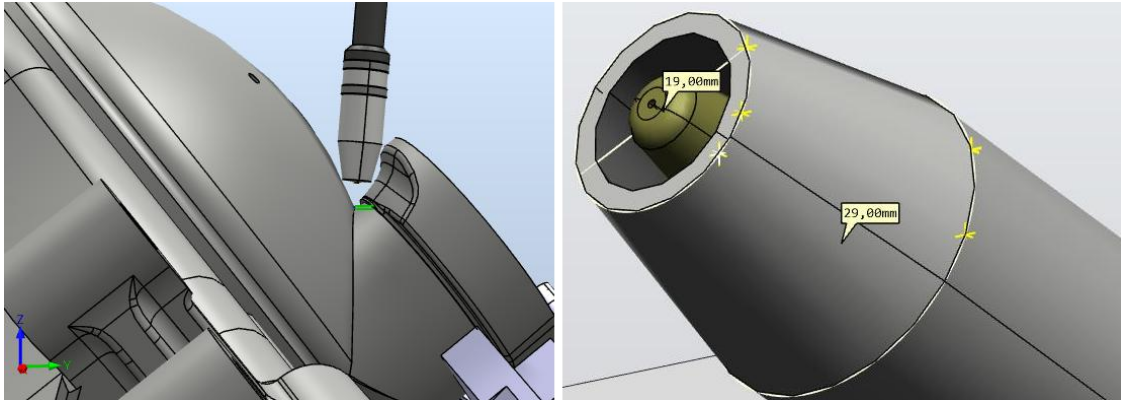


Figura 70 Restrição no diâmetro do bocal da tocha de soldadura

O robô de soldadura testado em RobotStudio (o modelo IRB2600-12/1.65) tem capacidade de carga superior ao modelo utilizado no processo de *cladding* (modelo IRB1600-6/1.45), para a mesma massa de ferramenta, já que o fabricante e modelo de tocha considerados são os mesmos. Logo, uma nova verificação da capacidade de carga deste robô de soldadura, por ser superior, é desnecessária.

As simulações dos trajetos de soldadura evidenciam também a necessidade de utilizar um posicionador de cinco eixos, tal como previsto no processo comercial que antecedeu o desenvolvimento deste projeto. Só assim podem ser melhoradas as posições para a realização dos trajetos de soldadura, de modo que se mantenha a posição vertical do ataque da tocha à junta de soldadura e o débito de material favorável à força da gravidade, como é desejável.

5.2.1.2. JIGS DE EIXOS E POSICIONADOR

Os *Jigs* de soldadura devem ser capazes de suportar as peças soldadas na mesma posição durante a realização do processo, ao mesmo tempo que permitem a colocação manual, de forma robusta, da peça de base e a retirada do conjunto final depois de soldado: o eixo com a bucha, a flange e o suporte. O primeiro protótipo de *Jig* desenvolvido previa que no posto de carga e descarga de eixos pelo operador, cada eixo fosse colocado fixo pelo seu anel central e por um dos topos do eixo. O anel central é indicado pelo cliente como ponto de

referência das montagens de peças, enquanto os topos se encontram maquinados, pelo que representam um bom ponto de fixação repetível. A Figura 71 ilustra este primeiro modelo de *Jig*, onde o ponto indicado a cor vermelha representa o centro de massa.

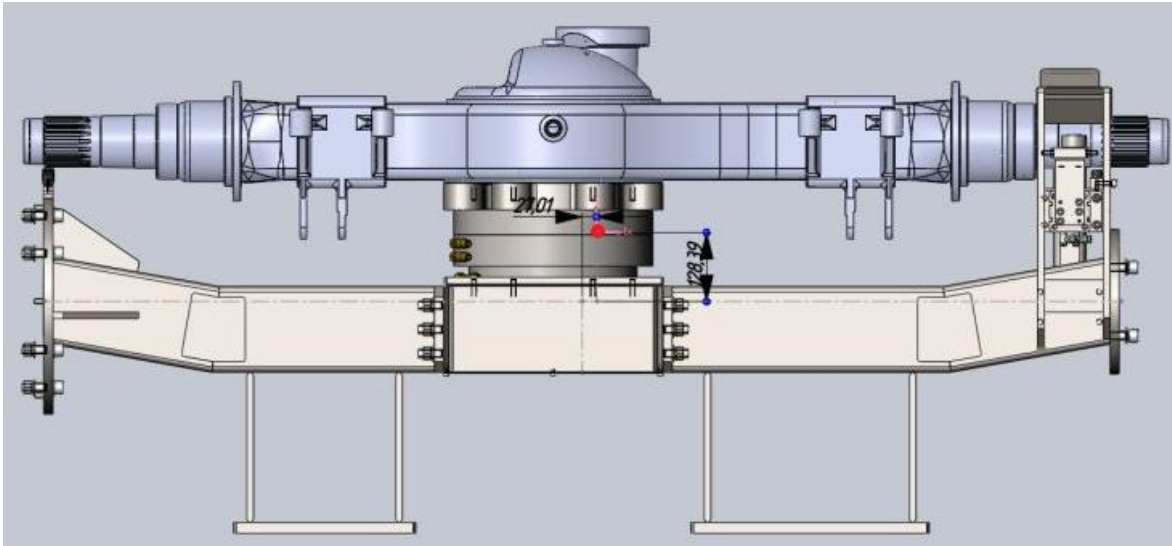


Figura 71 Primeiro protótipo do *Jig* de soldadura

A massa estimada em Solidworks do conjunto do *Jig* com o eixo montado e terminado (com as peças soldadas) é de 494,57 kg, com centro de massa que se afasta 128,39 mm do eixo do acionamento e 27,01 mm do centro entre pratos. Estes dados são importantes para se verificar a capacidade de carga do posicionador. O diagrama de carga no modelo de posicionador de 5 eixos difere dos restantes modelos da ABB, nos quais apenas o afastamento perpendicular ao eixo do acionamento é importante. No posicionador de 5 eixos, a distância do centro de massa em relação ao centro da distância entre pratos também é importante, porque afeta a inércia de um dos acionamentos.

A Tabela 14 (adaptada de [45]) ilustra os limites quanto ao posicionamento do centro de massa, em função do peso total do *Jig*.

Tabela 14 Limites do centro de massa em função do peso total, no IRBP600D

Peso total do jig e peças montadas (kg)	600	550	500	450	400	350	300	250
ØD (mm)	221	241	265	294	331	379	442	530
A (mm)	315	344	379	421	473	541	631	757
B (mm)	398	434	478	531	597	683	796	956

A Figura 72 ilustra a relação destas distâncias numa estação do posicionador IRBP600D da ABB [45].

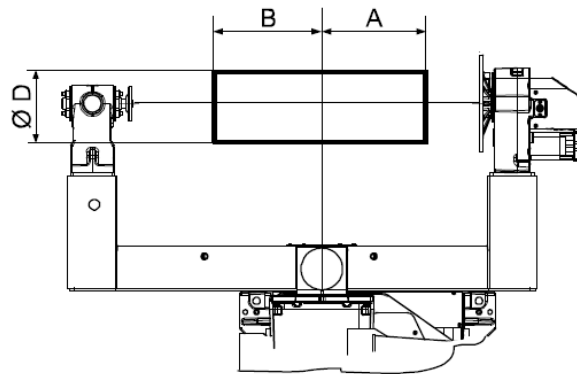


Figura 72 Limites do centro de massa do posicionador IRBP600D

Tendo em conta o limite de 500 kg, verifica-se que o centro de massa deve estar contido no diâmetro de 265 mm, o que está em conformidade com o valor estimado de 128,39 mm. A distância máxima desde o centro entre pratos é de 379 mm no sentido A, ou 478 mm no sentido B, o que também está em conformidade com o valor estimado de 27,01 mm no sentido B. No primeiro protótipo de *Jig*, acima referido, a principal garra de fixação do eixo ao *Jig* atuava sobre um anel central desse eixo. A fixação de topo pretendia apenas garantir o posicionamento da peça no sentido da rotação em torno do eixo de fixação do anel. No entanto, a medição de peças que seriam submetidas aos testes de soldadura, que serão abordados adiante, permitiu detetar limitações a este conceito de fixação do eixo no *Jig*, associados à irregularidade dessa superfície e à existência de impurezas nesse ponto de fixação, como apresentado nas imagens da Figura 73.

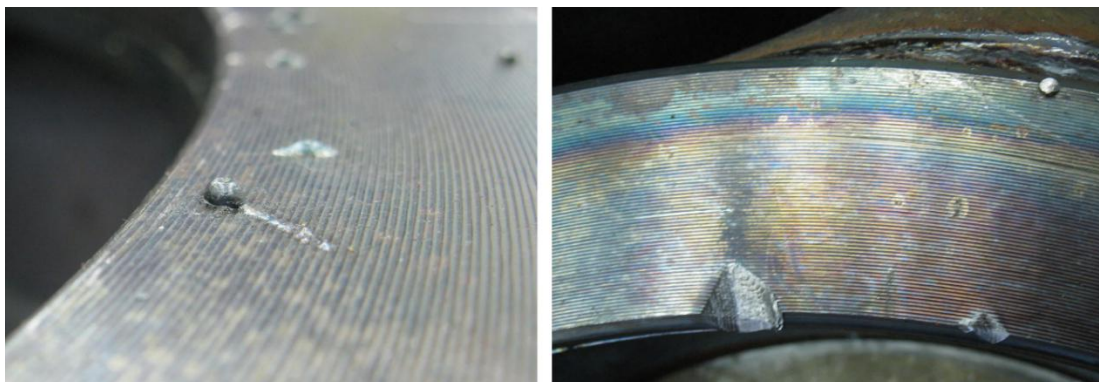


Figura 73 Irregularidades e impurezas no anel de fixação central do eixo

Tal situação forçou uma revisão do conceito de *Jig*, passando o suporte do eixo a ser realizado pelos dois topos em conjunto. Será mantida uma fixação no anel central, mas apenas com o objetivo de limitar a rotação do eixo em torno de si próprio. Esta revisão ao *Jig* aumenta o seu peso estimado para 614,5 kg, levando por isso a uma revisão do posicionador considerado e das simulações RobotStudio testadas até este ponto.

5.2.2. TESTES DE PROCESSO DE SOLDADURA

A realização de testes do processo de soldadura tem em vista a verificação da robotização desse processo. Note-se que a soldadura das mesmas peças já é realizada de modo manual pelo cliente, pelo que as características mecânicas e de materiais desse processo não serão aqui abordadas com detalhe. O gás de revestimento utilizado no processo de soldadura deve ser 100 % CO₂. Os elétrodos testados deverão ser de dois tipos, tal como utilizado em processo manual: o tipo OK AristoRod 12.50 com diâmetro de 1,2 mm, e o tipo OK AristoRod 12.63 com diâmetro 1,2 mm. Os dois tipos de elétrodos são do fabricante ESAB. A seleção destes elétrodos tem em conta a adequação aos materiais a soldar, considerando que a bucha, a flange e o suporte terão que ser soldados ao eixo. Os materiais constituintes de cada uma destas peças em aço é como apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 Composição das peças para soldadura

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Bucha e Suporte	0,32 - 0,4	0,2 - 0,52	0,4 - 0,9	<0,045	<0,04	<0,3	<0,3	<0,3
Flange	0,17-0,24	0,17 - 0,37	0,35 - 0,65	<0,04	<0,04	<0,25	<0,25	<0,25
Eixo	0,14 - 0,2	0,4 - 0,6	1 - 1,4	<0,04	<0,035	<0,3	<0,3	<0,3

Os testes robotizados deste processo de soldadura foram realizados com duas configurações de equipamento. Na primeira configuração um eixo é fixado a um robô que substitui os movimentos de um posicionador. Na segunda configuração é utilizado um posicionador de dois eixos, que permite maior aproximação ao posicionador que se estimou em RobotStudio.

5.2.2.1. TESTE COM EIXO MANIPULADO POR ROBÔ

Para a primeira configuração, cujo teste foi realizado no centro de testes da ABB em Moscovo, na Federação Russa, o robô utilizado para suportar o eixo foi o ABB modelo IRB6640-235/2.55. A capacidade de carga nominal deste robô é de 235 kg, sendo que o eixo instalado pesava 163,11 kg e o conjunto dos acessórios de fixação manual do eixo ao

robô pesavam 54,35 kg, o que resulta num peso total de 217,46 kg. Ao analisar o diagrama de carga deste robô [51], apresentado na Figura 74, é ilustrado a vermelho a posição do centro de massa esperado do conjunto montado no robô, que se situa a 349,66 mm de distância no eixo do acionamento (Z), e 61,15 mm de distância lateral (L).

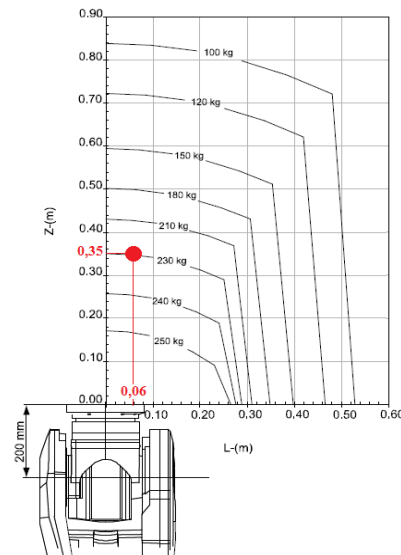


Figura 74 Diagrama de carga do IRB6640-235/2.55 e centro de massa do eixo

Para estes testes, o robô utilizado para o processo de soldadura foi o ABB modelo IRB1600-6/1.45, o mesmo utilizado anteriormente para o processo de *cladding* e cuja capacidade de carga foi então verificada. A simulação em RobotStudio, que antecedeu os testes reais, permitiu verificar os alcances dos robôs quanto aos trajetos necessários para o processo de soldadura. Um vídeo da simulação é apresentado no Anexo F e a Figura 75 ilustra o comparativo entre o ambiente virtual e o ambiente real deste teste quanto ao equipamento robótico utilizado.

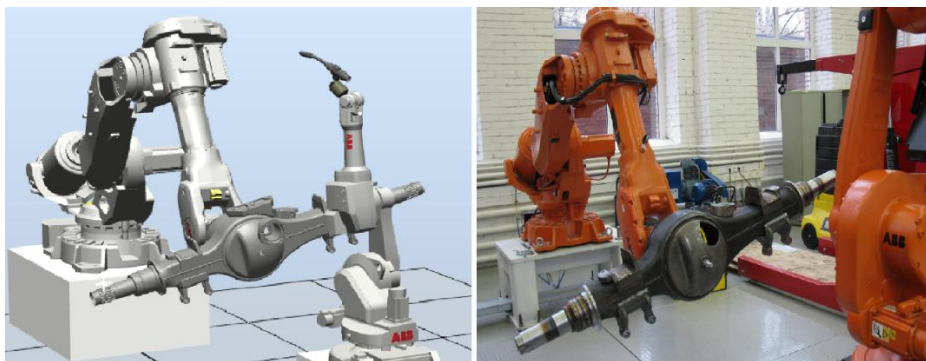


Figura 75 Teste virtual e real de soldadura com eixo suportado em robô

5.2.2.2. TESTE COM EIXO MANIPULADO POR POSICIONADOR

Para a segunda configuração, cujo teste foi realizado no centro de aplicações de soldadura da ABB em Praga, na República Checa, o eixo foi manipulado por um posicionador de dois eixos da marca ABB, modelo IRBP500A. O motivo da realização deste segundo teste, com diferente equipamento, está associado à disponibilidade do mesmo nas diferentes instalações da ABB, assim como por se pretender uma maior aproximação deste segundo teste face ao equipamento robótico que será instalado na versão final do projeto.

A Tabela 16 (adaptada de [45]) apresenta os limites quanto ao posicionamento do centro de massa, em função do peso total instalado no posicionador IRBP500A.

Tabela 16 Limites do centro de massa em função do peso total, no IRBP500A

Peso total do jig e peças montadas (kg)	500	450	400	350	300	250	200	150
ØD (mm)	265	294	331	379	442	530	663	888
H (mm)	673	748	841	950	950	950	950	950

Os dados da carga instalada no posicionador deste teste são os mesmos do teste de manipulação por robô, descritos anteriormente. Ao analisar a Tabela 16, e tendo em conta o limite de 250 kg para o peso total montado (que representa o valor mais aproximado, por excesso, do valor da carga instalada de 217,46 kg), verifica-se que o centro de massa deve estar contido no diâmetro de 530 mm, o que está em conformidade com o valor estimado de 61,15 mm. A distância máxima H desde o prato de acionamento é de 950 mm, o que também está em conformidade com o valor estimado de 128,39 mm. A Figura 76 ilustra a relação destas distâncias no posicionador modelo IRBP500A da ABB [45].

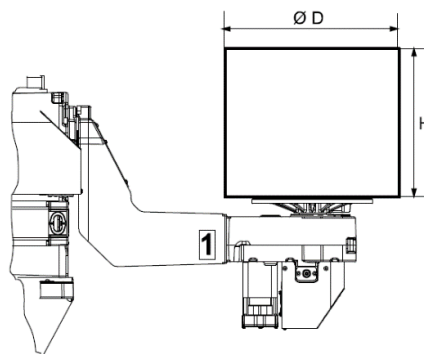


Figura 76 Limites do centro de massa do posicionador IRBP500A

O robô de soldadura utilizado neste teste foi o modelo IRB2600ID-15/1.85 da ABB. Devido à sua capacidade de carga (15 kg), superior à dos modelos de robô de processo de soldadura já mencionados anteriormente, a verificação da conformidade da carga aplicada neste é desprezada. A simulação em RobotStudio, que antecedeu os testes reais, permitiu mais uma vez verificar os alcances do robô quanto aos trajetos necessários para o processo de soldadura em movimentos coordenados com o posicionador. A Figura 77 ilustra o comparativo entre o ambiente virtual e o ambiente real deste teste quanto ao equipamento robótico utilizado. No detalhe da imagem real, do lado direito da Figura 77, pode verificar-se o cordão de soldadura já realizado na peça flange, peça que na imagem virtual do lado esquerdo surge em cor azul.

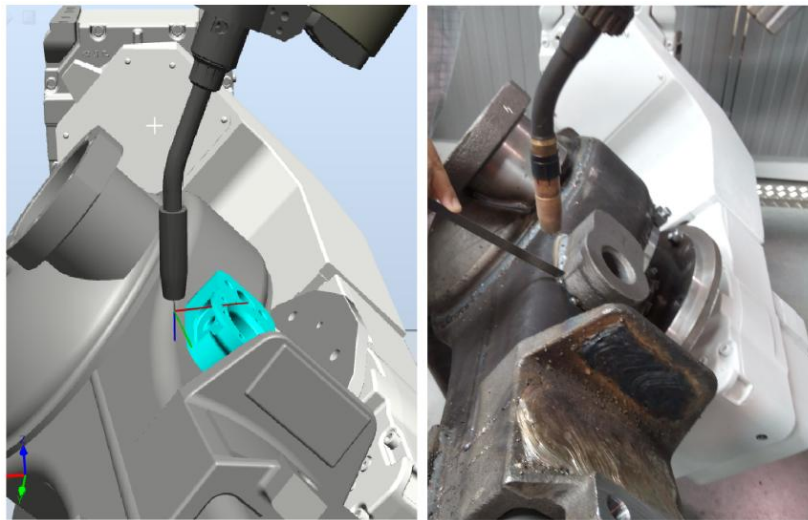


Figura 77 **Teste virtual e real de soldadura com eixo suportado em posicionador**

5.2.2.3. RESULTADOS DOS TESTES DE PROCESSO DE SOLDADURA

No que respeita ao processo de soldadura, e quanto ao resultado qualitativo dos cordões realizados, os testes deste processo foram facilitados pelo facto do cliente já executar este processo manualmente no atual sistema de fabrico. O único tipo de elétrodo utilizado para os testes aqui mencionados, e tal como utilizado no processo manual que antecede este projeto, foi do tipo OK AristoRod 12.50, com diâmetro de 1,2 mm, do fabricante ESAB. Os testes robotizados permitiram verificar as velocidades dos trajetos de soldadura, para a obtenção de cordões com aspeto e dimensão satisfatórios, que se distinguem consoante o modelo de peça a soldar: para a bucha a velocidade do trajeto é de 7 mm/s, enquanto para a flange a velocidade do trajeto é de 9 mm/s. No suporte a velocidade varia entre 5 mm/s e

7 mm/s, consoante a posição do trajeto. Em todos os casos, as diferenças na velocidade devem-se à necessidade de ser compensada a existência de folgas entre o eixo e cada uma dessas peças. Na imagem da Figura 78 pode verificar-se a existência de uma folga no local de realização de cordão de soldadura na bucha, antes da realização do processo, notando-se uma falta de material superior a 3 mm num dos pontos de soldadura. A flange é o único modelo de peça cuja folga com o eixo é desprezável.

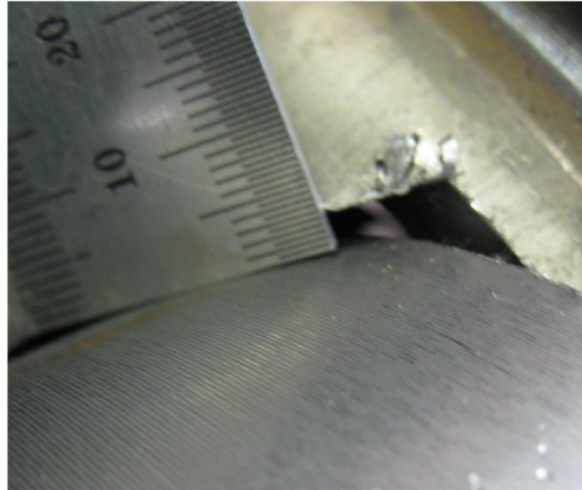


Figura 78 Aspeto da folga entre o eixo e a bucha

No caso específico do suporte, a velocidade de soldadura é de 5 mm/s nas laterais desta peça para compensar uma folga de 2 mm com o eixo ao longo desse trajeto, folga esta que é praticamente uniforme em ambas as laterais. O topo do suporte é soldado a 7 mm/s para compensar uma folga menor de 0,6 mm. A Figura 79 ilustra as variações de velocidade na execução dos cordões de soldadura nas laterais e nos topos do suporte, cujos trajetos estão representados a cor verde.

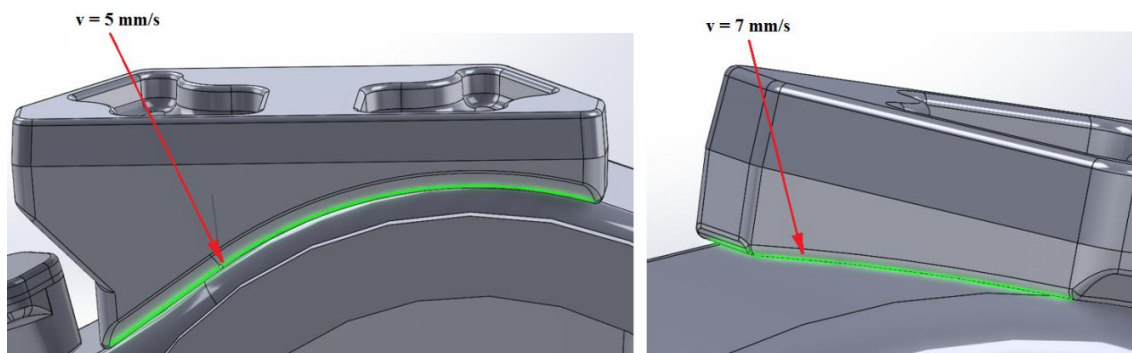


Figura 79 Variação da velocidade nos cordões de soldadura do suporte

A Figura 80 permite verificar o aspeto visual do cordão de soldadura de um dos lados do suporte para com o eixo.



Figura 80 **Aspeto visual do cordão de soldadura entre o eixo e o suporte**

A Figura 81 permite verificar o aspeto visual do cordão de soldadura de um dos lados da bucha para com o eixo. A realização destes testes robotizados, permitiu verificar a obtenção de um processo com qualidade superior ao processo manual, quanto ao aspeto e à uniformidade dos cordões de soldadura.



Figura 81 **Aspeto visual do cordão de soldadura entre o eixo e a bucha**

Verifica-se também, por apreciação visual, que o processo de limpeza automática da tocha apenas se justifica uma vez em cada ciclo da célula de soldadura, ou seja, após a realização de todos os cordões de soldadura para as três peças do mesmo eixo.

5.2.2.4. TEMPO DE CICLO

Com o conhecimento da velocidade dos trajetos para realização dos cordões de soldadura, pode ser calculado o tempo de ciclo da respectiva célula de soldadura. Para se obter este tempo de ciclo, e tal como considerado para as células de *cladding*, devem ser adicionados aos tempos de processo os tempos referentes às restantes operações do ciclo robotizado da célula, os quais são obtidos através de simulação com o RobotStudio. A Tabela 17 apresenta o somatório destes tempos e a obtenção do tempo de ciclo para cada célula de soldadura. A sequência de operações é repetida em cada ciclo, sem paragens, se se pressupor que o operador que realiza a carga e descarga de peças não provoca atrasos. Nos tempos expostos na Tabela 17, verifica-se que o tempo de limpeza automática de tocha é de 7,8 segundos. Embora o tempo total desta operação seja 15 segundos, o início da operação de limpeza ocorre em simultâneo com o início de rotação do posicionador, motivo pelo qual aos 15 segundos totais do tempo de limpeza é subtraído o tempo de 7,2 segundos de rotação do posicionador. Os tempos do processo de soldadura das três peças, num total de 332 segundos, são obtidos por simulação em RobotStudio, tal como apresentado no Anexo G. O tempo de 45 segundos da operação número 3, correspondente às funções de procura de peças, constitui uma reserva acordada com o cliente para a eventual necessidade de realização de três operações de procura de peça utilizando a tecnologia ABB SmarTac. Cada operação deste tipo tem um tempo previsto de 5 segundos, sendo que o total de três operações para cada uma das três peças resulta nos 45 segundos apresentados.

Tabela 17 Tempo de ciclo para cada célula de soldadura

Nº Operação	Designação	Tempo (em segundos)
1	Rotação do posicionador	7,2
2	Robô desloca-se para a posição de início de processo	2,5
3	Funções de procura de peças	45
4	Soldadura da flange, pingos e cordão completo	117
5	Soldadura da bucha, pingos e cordão completo	105
6	Soldadura do suporte, pingos e cordão completo	110
7	Robô desloca-se para a posição de repouso	2,7
8	Limpeza automática de tocha pelo robô	7,8
	Tempo de ciclo	397,2

O tempo de ciclo apresentado na Tabela 17, no total de 397,2 segundos para cada célula de soldadura, deve ser balanceado com as tarefas do operador da célula. Se tal não acontecer o operador pode estar sujeito a tempos de espera sem qualquer função atribuída, o que suscita questões de produtividade da estação de trabalho manual. Para verificar este balanceamento foi realizado um estudo de tempos por cronometragem nas instalações do cliente, referente aos tempos necessários por um operador para realizar a função de recarga de um posto de soldadura manual de eixos. Este posto de soldadura manual apresenta operações de carga e descarga de um eixo idênticas às que se estimam para cada célula robotizada, já que o operador também posiciona cada eixo num *Jig* de soldadura, embora manual. O registo de tempos médios está apresentado na Tabela 18. Os tempos apresentados são anotados depois de observadas as várias operações durante cerca de 20 ciclos de soldadura manual, tendo sido solicitado ao operador que realizasse as operações com tranquilidade. Os tempos eram registados com arredondamento por excesso, para assegurar que não se consideravam tempos de difícil realização prática.

Tabela 18 Tempo de ciclo do operador no posto de soldadura manual

Nº Operação	Designação	Tempo (s)
0	Início do ciclo	
1	Desloca-se para agarrar o comando manual do guindaste	4
2	Roda o guindaste e posiciona os ganchos sobre o jig	6
3	Fixa os ganchos no eixo	10
4	Eleva o eixo sobre o jig	8
5	Posiciona o eixo desde o jig até ao posto de saída	15
6	Baixa o eixo até à posição correta no posto de saída	12
7	Retira os ganchos do eixo	7
8	Roda o guindaste até à posição de entrada de eixos	10
9	Sobe o gancho do guindaste para a altura de recolha	4
10	Fixa os ganchos ao eixo que vai ser retirado	10
11	Levanta o eixo	6
12	Transporta o eixo até ao ponto sobre o jig	10
13	Baixa o eixo até à posição de largada no jig	10
14	Verifica ou ajusta a correta posição do eixo	15
15	Retira o gancho do eixo	7
16	Eleva o gancho	5
17	Desloca e prende o guindaste até posição de segurança	10
18	Desloca-se para painel de operador e dá o comando de início de ciclo	6
	Tempo de ciclo do operador	155

A comparação de tempos de ciclo de 397,2 segundos para a célula robotizada e 155 segundos para o operador representa um problema de balanceamento que implica a paragem sem ocupação do operador durante cerca de 4 minutos por cada ciclo da célula de soldadura. Por outro lado, pretende-se uma melhoria da produtividade de cada célula de soldadura, de modo que o tempo de produção de cada eixo possa ser reduzido. A

combinação destes interesses levou a uma mudança no modo de funcionamento da célula de soldadura, que permita equilibrar os tempos de ciclo de ambas as estações e, principalmente, diminuir o tempo de produção de cada eixo. Ao transferir para o operador algumas tarefas que até então era previsto serem robotizadas, obtém-se o maior equilíbrio de tempos e a redução do tempo de ciclo da estação de soldadura, com o conseqüente aumento da produtividade. Este princípio viria a resultar na decisão de retirar à célula de soldadura o robô de manipulação de peças, passando esta operação a ser realizada manualmente. Assim, antes de colocar um eixo na célula de soldadura, o operador coloca as peças bucha e flange e realiza os pingos de soldadura de fixação, não havendo implicações relevantes de qualidade com esta alteração. Para estas duas peças, o robô executa apenas o cordão de solda em torno das mesmas e é dispensado dos pingos de solda iniciais. Para a peça suporte o operador monta a peça manualmente no *Jig* mas não pinga. Isto é necessário porque o suporte não pode ser colocado na sua posição final no eixo até que a flange esteja soldada, porque estas duas peças se encontram muito próximas de tal forma que uma delas, a flange, não pode ser soldada em todo o seu contorno. Como a flange implica uma soldadura de estanquicidade, o que não ocorre com o suporte, esta é colocada e soldada por completo no eixo, antes do suporte. A aplicação do suporte na sua posição no eixo é feita por um mecanismo de acionamento pneumático e de forma automática, controlada pelo robô, que ocorre apenas após a soldadura da flange. A Figura 82 ilustra o *Jig* desenvolvido para a montagem manual das peças a soldar ao eixo, cuja principal diferença é a inclusão do mecanismo de posicionamento do suporte por atuador pneumático.

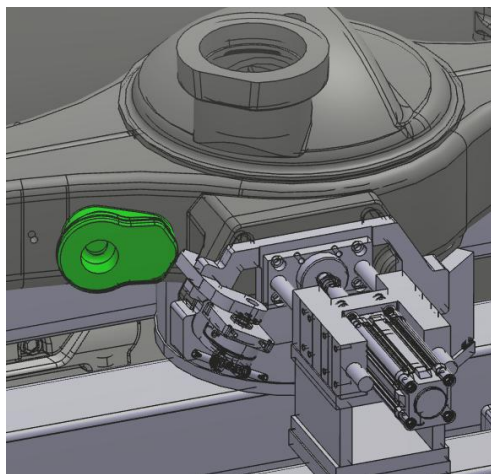


Figura 82 *Jig* de soldadura para montagem manual de peças

A simulação em RobotStudio apresentada no Anexo H, e que considera as velocidades de soldadura obtidas com os testes reais desse processo realizados anteriormente, permite antecipar o tempo de ciclo de 275 segundos para as operações de soldadura robotizada.

No novo estudo de tempo de ciclo, tal como apresentado na Tabela 19, a função de procura com SmarTac passa a estar limitada apenas ao suporte porque as duas restantes peças são montadas manualmente. Isto pressupõe que não há necessidade de ajuste da posição de soldadura, já que o operador verifica visualmente o correto posicionamento das peças que coloca e que pinga manualmente sobre o eixo.

Comparativamente ao estudo anterior, esta nova tabela (apresentada em seguida) exclui os tempos de movimentação do robô até às posições de início de processo e de repouso por já estarem incluídos nesta simulação em RobotStudio, como se mostra no Anexo H.

Tabela 19 Tempo de ciclo revisto para cada célula de soldadura

Nº Operação	Designação	Tempo (em segundos)
1	Rotação do posicionador	7,2
2	Função de procura do suporte	15
3	Soldadura da flange, apenas cordão completo	80,1
4	Soldadura da bucha, apenas cordão completo	83,2
5	Soldadura do suporte, pingos e cordão completo	111,7
6	Limpeza automática de tocha pelo robô	7,8
	Tempo de ciclo	305

O novo tempo de ciclo da célula de soldadura de 305 segundos, tal como apresentado na Tabela 19, confirma o ganho de 92,2 segundos em cada uma das células. Este tempo total de 305 segundos corresponde ao tempo de produção de um eixo por cada célula de soldadura.

A Tabela 20 apresenta o novo estudo relativamente ao tempo de ciclo das operações manuais, que inclui os tempos de pingar cada uma das duas peças pelo operador, a bucha e a flange, seguindo-se a colocação do suporte. Relativamente às primeiras, o operador pode optar qual das duas monta e pinga primeiro, motivo pelo qual a tabela não especifica a sequência quanto ao modelo de peça. Se for considerado que o número de horas estimadas de trabalho por cada ano é de 3760, com uma eficiência de 80 %, então o tempo de produção efetiva anual é de 3008 horas. Logo, cada célula de fabrico permite uma produção anual superior a 35 500 eixos.

Tabela 20 Tempo de ciclo do operador com montagem manual de peças

Nº Operação	Designação	Tempo (s)
0	Início do ciclo	
1	Desloca-se para agarrar o comando manual do guindaste	4
2	Roda o guindaste e posiciona os ganchos sobre o jig	6
3	Fixa os ganchos no eixo	10
4	Eleva o eixo sobre o jig	8
5	Posiciona o eixo desde o jig até ao posto de saída	15
6	Baixa o eixo até à posição correta no posto de saída	12
7	Retira os ganchos do eixo	7
8	Roda o guindaste até à posição de entrada de eixos	10
9	Sobe o gancho do guindaste para a altura de recolha	4
10	Fixa os ganchos ao eixo que vai ser retirado	10
11	Levanta o eixo	6
12	Transporta o eixo até ao ponto sobre o jig	10
13	Baixa o eixo até à posição de largada no jig	10
14	Verifica ou ajusta a correta posição do eixo	15
15	Retira o gancho do eixo	7
16	Eleva o gancho	5
17	Desloca e prende o guindaste até posição de segurança	10
18	Desloca-se para o contentor da primeira peça e agarra-a	8
19	Desloca-se com a peça até ao eixo	6
20	Coloca a primeira peça no eixo e pinga	30
21	Desloca-se para o contentor da segunda peça e agarra-a	8
22	Desloca-se com a peça até ao eixo	6
23	Coloca a segunda peça no eixo e pinga	30
24	Desloca-se para o contentor do suporte e agarra-o	8
25	Desloca-se com o suporte até ao jig	6
26	Coloca o suporte no jig	10
27	Desloca-se para painel de operador e dá o comando de início de ciclo	6
	Tempo de ciclo do operador	267

5.2.3. TRABALHO MANUAL E CARGA DO OPERADOR

A alteração de funcionamento da célula de soldadura, como exposto em 5.2.2.4, motivada pela necessidade do aumento de produtividade, em combinação com maior balanceamento das funções do operador humano, levou a que a montagem das três peças para soldar ao eixo seja feita manualmente. Para duas dessas peças, a bucha e a flange, o operador recolhe cada uma delas individualmente num contentor de peças, transporta-as até um *Jig* manual junto à célula de soldadura, e realiza os pingos de solda que as fixam provisoriamente ao eixo. Para outra peça, o suporte, o operador coloca a peça no *Jig* de soldadura do posicionador, sem pingar, e suportada num mecanismo de acionamento pneumático que apenas aplica a peça sobre o eixo após terminada a soldadura completa da flange.

Esta nova configuração da operação da célula de soldadura suscita a necessidade de se verificar a ergonomia da estação de trabalho do operador. O aumento do transporte de cargas realizado manualmente levanta a necessidade de verificação da carga instantânea e

total a que o operador está sujeito para realização do novo conjunto de tarefas, assim como a distância percorrida com essa carga. Estes fatores levam à verificação de normas existentes quanto às recomendações sobre carga máxima manipulada ou transportada por um operador em local de trabalho. Na área de estudo da ergonomia do trabalho encontram-se diversos trabalhos de investigação concluídos na forma de recomendações quanto a posturas de trabalho, direções e sentidos de forças a que se sujeitam partes do corpo ou dos membros e os limites dessas forças, assim como ações de puxar, empurrar, levantar, baixar e transportar cargas, entre outros. A quase inexistência de legislação que limite de forma clara as condições de trabalho de um operador, por exemplo quanto à carga máxima transportada, parece estar ligada a que este limite se associa diretamente à fisionomia e robustez física desse operador e é diferente para cada ser humano. A norma ISO 11228:2003 [52], sobre a ergonomia na manipulação de cargas, é uma das referências internacionais nesta área e divide-se em três partes:

- parte 1: levantamento e transporte de cargas;
- parte 2: esforços de puxar ou empurrar cargas;
- parte 3: manipulação de pequenas cargas com elevada frequência.

A parte 1 estabelece um sistema passo-a-passo para estimar os riscos para a saúde do operador derivados das funções de levantamento e transporte de cargas. Em cada passo propõe limites e conselhos práticos para a organização ergonómica destas tarefas. Se cada um dos seguintes cinco passos se satisfaz, então o risco do levantamento e transporte de cargas é considerado aceitável; caso contrário, é necessária uma adaptação dessa tarefa:

1. comparação do peso do objeto com um peso de referência;
2. comparação do peso do objeto e da frequência da tarefa com limites estabelecidos;
3. comparação do peso do objeto com limites proporcionados por uma equação matemática;
4. comparação do peso diário acumulado com o limite máximo diário;
5. comparação do peso diário acumulado e da distância percorrida com os limites estabelecidos.

De notar que nem todos os passos são aplicáveis. Por exemplo, o segundo passo apenas apresenta recomendações para levantamento de cargas em curtos períodos: até duas horas de trabalho. Os quarto e quinto passos são mutuamente exclusivos, caso ocorra ou não a deslocação do operador durante a manipulação da carga.

5.2.3.1. COMPARAÇÃO COM O PESO DE REFERÊNCIA

As três peças que serão manipuladas e transportadas pelo operador, bucha, flange e suporte, pesam respetivamente 3,4 kg, 2,8 kg e 9,6 kg. A massa de referência da norma ISO 11228-1 para um trabalhador profissional adulto, homem ou mulher, é de 25 kg. Portanto, os valores de manipulação cumprem o primeiro requisito listado para esta norma. Segundo a mesma norma, um peso inferior a 10 kg está contido nos valores de referência para população não profissional, exceto crianças e idosos.

5.2.3.2. COMPARAÇÃO DOS LIMITES PARA O PESO E FREQUÊNCIA DA TAREFA

Pelo tempo de ciclo estimado em 5.2.2.4, o operador fará a manipulação de cada uma destas peças até um máximo de 12 vezes, por cada hora, correspondente à recolha e transporte de 36 peças no mesmo período. Este cálculo tem em conta o tempo de ciclo de 305 segundos para a produção de cada eixo, com três peças, numa célula de soldadura.

A norma ISO 11228:2003 apresenta uma fórmula de cálculo para determinar a adequação da manipulação de carga a diversos fatores. Esta fórmula é igualmente utilizada pela agência federal Norte Americana designada *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), que conduz investigações sobre segurança ocupacional e apresenta recomendações sobre riscos de saúde no trabalho. A fórmula é dada por:

$$m \leq m_{ref} \times h_M \times v_M \times d_M \times \alpha_M \times f_M \times C_M$$

Sendo:

m_{ref} = valor de referência de massa, que é de 25 kg;

h_M = fator horizontal, valor dado pela equação $\frac{0,25}{H}$, sendo H o valor da distância horizontal, em metros, entre o centro do corpo do operador e o ponto de pega do objeto. O valor H está compreendido entre um mínimo de 0,25 m e um máximo de 0,63 m,

correspondentes aos valores h_M entre 1 e 0 respetivamente (para $H > 0,63$ deve ser considerado $h_M = 0$). A recolha de peças é feita a partir de um contentor e o operador pode realizar o levantamento e o transporte da peça encostada ao seu corpo, ou seja, numa distância para o ponto de pega em que apenas se adicione à distância fixa do centro do corpo (0,25 m) a distância até ao centro da maior peça, a bucha, com raio de 87 mm (0,087 m) que resulta em $H = 0,25 + 0,087 = 0,337$ m. Assim, $h_M = 0,742$.

v_M = fator vertical, valor dado pela equação: $1 - (0,3 \times |0,75 - V|)$, sendo que V corresponde à altura vertical, em metros, do ponto de pega do objeto em relação ao piso. O valor V está limitado ao mínimo 0 m e ao máximo 1,75 m. Fora destes limites este fator vertical é nulo. Considera-se que a recolha de peças é feita num contentor praticamente vazio, que representa o pior cenário na elevação da recolha de peças, com uma distância de 0,15 metros ao solo, medida obtida dos contentores em utilização atual pelo cliente e que serão continuados nessa função. Assim, $v_M = 0,82$.

d_M = fator de distância, valor dado pela equação: $0,82 + \frac{0,045}{d}$, sendo que d corresponde à distância de elevação ou abaixamento vertical do objeto, em metros, desde a sua posição de pega até à altura do transporte. O valor d está limitado ao mínimo de 0,25 m e ao máximo de 1,75 m, correspondente aos valores d_M entre 1 e 0 respetivamente (para $d > 1,75$ deve ser considerado $d_M = 0$). Para um operador que realize o transporte da peça com os braços recolhidos e observando-se um ângulo de aproximadamente 90° nos cotovelos, a distância das mãos até ao solo é de cerca de 1,1 m. A este valor é subtraída a altura mínima do contentor de peças, que é de 0,15 m. Logo, $d = 0,95$ que resulta em $d_M = 0,867$.

α_M = valor de assimetria do ponto de pega, dado pela equação: $1 - 0,00032 \cdot \alpha$, sendo α o valor do ângulo (em graus) da posição de pega do objeto em relação à orientação frontal do corpo do operador. O valor de α tem o limite mínimo de 0° e máximo de 135° , ângulo a partir do qual α_M é considerado nulo. Considera-se que o operador recolhe as peças do contentor podendo fazê-lo perfeitamente à sua frente, sem rotação entre o ponto de pega e a frente do seu corpo, pelo que $\alpha_M = 1$.

f_M = fator da frequência da carga, obtido através da Tabela 21 (adaptada de [52]). Se consideradas as operações manuais como apresentado na Tabela 20 da sub-subsecção

5.2.2.4, note-se que o tempo entre cada levantamento de cada uma das três peças para pingar ou colocar no *Jig* é superior a 30 segundos. Por outro lado, o operador dispõe de um tempo superior a 4 minutos para realizar as operações de manipulação das 3 peças, que resulta num tempo médio superior a 1 minuto para cada levantamento e transporte. Para esta frequência de até 1 levantamento por cada minuto, num turno até 8 horas de trabalho, e para o pior caso em relação à altura de levantamento da carga superior a 0,75 metros (embora este dado seja irrelevante para uma frequência até 8 levantamentos por minuto), então o fator f_M é de 0,75, como apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 Fator f_M da fórmula de cálculo de limite de carga

Frequência dos levantamentos (por minuto)	f_M					
	Duração ≤ 1 h		1 h < Duração ≤ 2 h		2 h < Duração ≤ 8 h	
	v < 0,75 M	v ≥ 0,75 M	v < 0,75 M	v ≥ 0,75 M	v < 0,75 M	v ≥ 0,75 M
< 0,2	1,00	1,00	0,95	0,95	0,85	0,85
0,5	0,97	0,97	0,92	0,92	0,81	0,81
1	0,94	0,94	0,88	0,88	0,75	0,75
2	0,91	0,91	0,84	0,84	0,65	0,65
3	0,88	0,88	0,79	0,79	0,55	0,55
4	0,84	0,84	0,72	0,72	0,45	0,45
5	0,80	0,80	0,60	0,60	0,35	0,35
6	0,75	0,75	0,50	0,50	0,27	0,27
7	0,70	0,70	0,42	0,42	0,22	0,22
8	0,60	0,60	0,35	0,35	0,18	0,18
9	0,52	0,52	0,30	0,30	0,00	0,15
10	0,45	0,45	0,26	0,26	0,00	0,13

C_M = fator de pega. Este fator é dado por uma avaliação pouco objetiva que se relaciona com a facilidade do ato de pegar ou agarrar o objeto por parte do operador. Segundo o manual de aplicações da fórmula para levantamentos do NIOSH [53], este fator é unitário para a pega de objetos soltos e não embalados, em que as mãos do operador facilmente contornem o objeto e desta forma eles sejam agarrados e transportados individualmente, sendo estas as condições consideradas para este caso. Logo, $C_M = 1$.

Aplicando os valores calculados em cada um dos fatores multiplicativos, obtém-se:

$$m \leq 25 \times 0,742 \times 0,82 \times 0,867 \times 1 \times 0,75 \times 1$$

Logo,

$$m \leq 9,89 \text{ kg}$$

Tendo em conta que a peça mais pesada, o suporte, apresenta o peso de 9,6 kg, verifica-se conforme o valor da carga máxima recomendada para transporte pelo operador, segundo este método.

5.2.3.3. LIMITE DIÁRIO ACUMULADO

Além do limite de carga relacionado com a frequência do levantamento da mesma, a norma ISO11228-1 recomenda um limite diário de carga acumulada que se relaciona com a distância realizada pelo operador e com a frequência de levantamentos. Se considerado o tempo de ciclo da célula de soldadura como apresentado na Tabela 19, e desprezando as paragens de produção, o operador deve montar as 3 peças de soldadura (buchas, flange e suporte) em cada período de 305 segundos. Num turno de 8 horas, esta carga das 3 peças pode ser realizada até 95 vezes. Logo, a carga acumulada diária é dada por:

$$95 \times (3,4 + 2,8 + 9,6) = 1\,501 \text{ kg}$$

Mesmo considerando a máxima distância percorrida em carga como apresentado na Tabela 22, até 20 metros, verifica-se que este valor de carga acumulada de 1501 kg é bastante inferior ao limite diário recomendado de 6 000 kg. A Tabela 22 (adaptada de [52]) sugere o limite de carga acumulada até 6000 kg por turno de 8 horas, considerando uma distância do deslocamento em carga até 20 metros e a frequência de 1 levantamento por minuto.

Tabela 22 Limites recomendados de carga acumulada

Distância do transporte (em metros)	Frequência de levantamentos (por minuto)	Massa acumulada			Exemplos do produto <i>m . f</i>
		kg / min	kg / h	kg / 8 h	
20	1	15	750	6000	5 kg × 3 lev. / min 10 kg × 1 lev. / min 25 kg × 0,5 lev. / min
10	2	30	1500	10000	5 kg × 6 lev. / min 10 kg × 2 lev. / min 25 kg × 1 lev. / min
4	4	60	3000	10000	5 kg × 12 lev. / min 10 kg × 4 lev. / min 25 kg × 1 lev. / min
2	5	75	4500	10000	5 kg × 15 lev. / min 10 kg × 5 lev. / min 25 kg × 1 lev. / min
1	8	120	7200	10000	5 kg × 15 lev. / min 10 kg × 8 lev. / min 25 kg × 1 lev. / min

Para outros esforços a que o operador da célula de soldadura está sujeito, como por exemplo a manipulação da tocha de soldadura para os pingos de solda manuais ou a manipulação do comando do guindaste de transporte de eixos, podia ser realizado um estudo suportado na parte 2 da norma ISO 11228, referente aos esforços de puxar ou empurrar cargas. No entanto, verifica-se que estes esforços manuais não se mostram anormais face a um típico posto de trabalho por operador manual, com equipamentos preparados para esse efeito por marcação CE.

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado, em seguimento à exposição feita neste documento. Este começa por expôr os aspetos conclusivos genéricos do projeto, seguindo-se com as particularidades dos processos e das células robotizadas para soldadura e para *cladding*, e termina com breves considerações finais.

O levantamento inicial das necessidades tem por base o acordo contratual que definiu os principais componentes robóticos de cada tipo de célula para processo GMAW: soldadura ou *cladding*. No entanto, apenas as primeiras modelações e simulações em RobotStudio permitiram validar ou modificar os modelos de robô e a disposição dos equipamentos nas células. É, aliás, com base nessas simulações 3D, realizadas neste projeto, que o cliente valida o modo de funcionamento de cada uma das células e o respetivo *layout* da futura implantação nas suas instalações. Este projeto terá assim a sua evolução futura com o início do fabrico e instalação das células de processo baseadas no padrão ABB *FlexArc*.

6.1. CÉLULAS E PROCESSO DE *CLADDING*

As células para processo de *cladding* viriam a ter poucas alterações quanto ao principal equipamento robótico utilizado e comparativamente à previsão contratual inicial. No

entanto, este processo para revestimento duro da superfície das peças de suporte da suspensão traseira de veículos era feito até então por outro processo diferente de adição de material, que não o GMAW. A investigação sobre *cladding* através de GMAW veio a mostrar tratar-se de um processo pouco comum. Antes da realização dos testes reais deste processo, tal cenário de pouco conhecimento específico deste processo representava um risco considerável do projeto, entretanto mitigado.

Embora até à conclusão deste trabalho não tenham sido feitos testes de dureza das superfícies revestidas, as características técnicas do material depositado indicam um intervalo de rigidez esperada superior aos requisitos, pelo que o próprio cliente considerou os resultados aceitáveis sem necessidade de concretizar essa verificação nesta fase. O facto dos testes considerarem as opções mais económicas quanto ao eléctrodo consumido foi também valorizado.

6.2. CÉLULAS E PROCESSO DE SOLDADURA

Existindo requisitos prévios do cliente quanto aos materiais utilizados neste processo (o tipo de gás e eléctrodo a utilizar), os testes reais permitiram validar a robotização deste processo quanto à montagem e posicionamento das peças e o tempo de ciclo obtido. Note-se que apenas a execução de testes reais permite aferir a velocidade de realização do cordão de soldadura, podendo os restantes movimentos robotizados serem aferidos por simulação virtual em RobotStudio. O estudo de tempos e métodos, como apresentado, veio mostrar que a montagem robotizada de peças no *Jig* de soldadura implicava uma penalização considerável do tempo de ciclo da célula e um mau balanceamento da atividade do operador nesse modo de funcionamento. Simular novamente o processo prevendo a montagem manual adicional das três peças a soldar ao eixo (bucha, flange e suporte) mostrou um ganho significativo no tempo de ciclo da célula, obtendo também maior equilíbrio com o tempo de operação manual de entrada e saída de peças. Só os testes reais em conjunto com as simulações em Robotstudio permitiram esta conclusão, que implicou uma mudança significativa no conceito contratualizado para as células de soldadura ao remover a montagem automática de peças no *Jig* e o respetivo manipulador robótico, tal como o sistema de paletes desenhado para esta alimentação automatizada de componentes. A utilização do sistema de seguimento de junta *Welguide* nos cordões de teste realizados em Praga, onde este sistema estava disponível, não mostrou limitações

significativas com exceção da necessidade de redução do diâmetro do bocal da tocha, e tal como previsto antecipadamente na simulação. A oscilação necessária na tocha para permitir o seguimento de junta através de medição do arco, favorece a realização do cordão com as dimensões projetadas. O aspeto visual dos cordões e a quase inexistência de salpicos foi considerado muito bom pelo cliente, reação típica da primeira visualização de um cordão realizado por processo robotizado comparativamente aos resultados de longa data obtidos por métodos manuais.

A solução desenvolvida para as células de soldadura pode facilmente evoluir, do ponto de vista técnico, para a alimentação robotizada das quatro peças que agora são montadas manualmente pelo operador. Uma transformação deste tipo poderá depender apenas da implicação financeira do investimento em ativos fixos, tal como na compreensível limitação quanto à progressão na robotização de uma linha de fabrico existente e em produção.

6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como previsto, a exposição de conteúdo técnico deste documento foi limitada pela necessidade de confidencialidade tecnológica dos processos e resultados obtidos, associados a conhecimento técnico que é proprietário e comercializável, ou outros aspetos de relevância concorrencial de uma marca automóvel como é a KAMAZ. Ainda assim, foi demonstrada a evolução do processo de fabrico existente para um novo processo robotizado, utilizando a tecnologia de ponta em robôs e periféricos, e obtendo os resultados qualitativos e quantitativos desejados.

Os objetivos propostos inicialmente, foram atingidos.

Referências Documentais

- [1] KAMAZ. História da KAMAZ. Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://kamaz.ru/en/about/history/>.
- [2] KAMAZ. Imagem do veículo KAMAZ 6520 – *Cars and Trailers – Trading House*. Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.apr-td.ru/kamaz-6520.html>.
- [3] *Industrial Robots – IFR Internation Federation of Robotics*. Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.ifr.org/industrial-robots>.
- [4] SILVA, Manuel - Apontamentos para as aulas teóricas de Robótica Industrial do ISEP, Publicados para a edição de disciplina do ano letivo 2013/2014.
- [5] Richard H. Welch Jr & George W. Younkin, Control Technology Corp., *How Temperature Affects a Servomotor's Electrical and Mechanical Time Constants*, S.d.
- [6] Nabtesco. Redutores tipo RV da Nabtesco, *Nabtesco Applications - Robotics*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.nabtescomotioncontrol.com/applications.php#robotics>.
- [7] ABB Robotics Products, *Product Manual IRB120, Revision E*, 2012.
- [8] RobotWorks, *Robot Maintenance: Grease and Robotic Gears*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.robots.com/blog/viewing/robot-maintenance-grease-and-robotic-gears>.
- [9] ABB. Imagem do YuMi da ABB, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://new.abb.com/products/robotics/yumi>.
- [10] International Electrotechnical Commission - *EC/EN60204-1 Appliance of reference designations on machinery in accordance with ISO/IEC/EN 81346*, Setembro 2010.
- [11] Robocoaster. Imagem do RoboCoaster RCX, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.robocoaster.com/core-technologies---rcx>.
- [12] ABB Robotics Products, *Product Specification IRB4600, Revision K*, 2012.
- [13] Peter Donelan, Victoria University of Wellington New Zealand, InTec 2010, *Kinematic Singularities of Robot Manipulators*, S.d. ISBN: 9789533070704
- [14] ABB Robotics Products, *Product Specification IRB4600, Revision K*, 2012.

- [15] J. Swevers, D. Torfs, M. Adams, J. De Schutter, H. Van Brussel, *Comparison of Control Algorithms for Flexible Joint Robots*, Publicado em 1991 por IEEE.
- [16] KUKA. Imagem do eixo linear KUKA modelo KL250-3, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.kuka-robotics.com/en/products/addons/linearunits/>.
- [17] Imagem da célula FlexArc, *ABB FlexArc Arcwelding Equipment*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/arc-welding-equipment/arc-welding-packages/FlexArc>.
- [18] International Standard Organization, ISO 10218, *Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots*, Segunda Edição, 2011-07-01.
- [19] Vídeo do Youtube, publicado a 08/05/2012 por: FANUC Europe, título: *FANUC Dual Check Safety*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.youtube.com/watch?v=hHVyPfHIwSA>.
- [20] THOMAS, Carsten - *Ensuring safety in a hybrid human-robot assistance system*, Institute of Production Systems, Junho de 2013.
- [21] International Standard Organization, ISO 15066, *Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Collaborative operation*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=62996.
- [22] International Standard Organization, *Draft of ISO 15066, Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Collaborative robots*, 2014-03-06.
- [23] International Standard Organization, *ISO 10218, Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration*, Primeira Edição, 2011-07-01.
- [24] Rockwell Automation Inc., *A practical guide to machine safety application, legislation and standards*, Março 2007.
- [25] LEUZE Electronic, Informação sobre segurança no trabalho, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.safety-at-work.leuze.de/en/deutschland/loesungen/anwenderwissen/arbeitssicherheit/index.php>
- [26] Canadian Center for Occupational Health and Safety (CCOHS) – *Welders: Health and Safety Guide*, 24-10-2013.

- [27] *Occupational Safety and Health Administration (OSHA) – Controlling Hazardous Fume and Gases during Welding*, U.S. Department of Labor, Março de 2013.
- [28] IFR. Dados estatísticos sobre Robótica Industrial, *International Federation of Robotics*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>.
- [29] International Standard Organization, *ISO 4063, Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers*, 1998.
- [30] Revista da Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem: A soldagem GMAW (ou MIG-MAG), Edição 04, 2006.
- [31] ESAB, *Welding Handbook - Consumables for manual and automatic welding, eighth edition*, 2005.
- [32] ESAB, Informação sobre gás de revestimento, *Handbook Shielding Gases*, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_2.htm.
- [33] Lincoln Electric – *Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection*, Publicação C4.200, Agosto de 2014.
- [34] David Green, Petr Svoboda, *CZABB Robotics Welding&Cutting Application Center – Arc Welding Processes*, Junho de 2012.
- [35] Fronius International GmbH, *Gas-nozzle touch sensor*, 20/01/2006.
- [36] ABB Robotics Products, *Operating Manual – Seam tracking with Weldguide and Multipass, Revision: C*, S.d.
- [37] Fronius International GmbH, *TS 4000, TS 5000, TPS 2700, TPS 3200, TPS 4000, TPS 5000, TIME 5000 Digital, Product Manual*, 2005.
- [38] Fronius International GmbH, *Robot Interface ROB 4000 / 5000 TIG*, released 20/04/2005.
- [39] Fronius International GmbH, *Instructions Manual and Spare Parts TS 4000, TS 5000, TPS 2700, TPS 3200, TPS 4000, TPS 5000, TIME 5000 Digital*, 20/01/2006.
- [40] ABB Robotics Products, *Technical Reference Manual – System Parameters, Revision: P*, 21-03-2012.
- [41] ABB Robotics Products, *Application Manual - Smartac, Revision: B*, Abril 2012.

- [42] ABB Robotics Products, *Application Manual – Arc and Arc Sensor, Revision: N*, Abril 2012.
- [43] Petr Svoboda, *CZABB Robotics Welding & Cutting Application Center - Types of Arc Welding Stations*, Junho 2012.
- [44] Talalaev, R.; Sarkans, M.; Laansoo, A.; Veinthal, R.; *Methodology for Configuration of Robot Welding Cell for SMEs Under Conditions of Small And Medium Sized Production Using MIG/MAG Process*, Abril 2012.
- [45] ABB Robotics Products, *Product Specification IRBP /D2009, Revision: D*, 17-04-2012.
- [46] International Standard Organization, *ISO 8611-1:2011, Pallets for material handling – Part 1: Flat pallets*, Maio 2011.
- [47] SCHUNK GmbH & Co. KG, *PGN-plus Pneumatic 2-Finger Parallel Gripper, Edition 03.05*, Janeiro 2014.
- [48] ABB Robotics Products, *Product Specification IRB1600, Revision S*, 05-04-2012.
- [49] International Standard Organization, *ISO 6508-1, Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method*, Third edition, 01-03-2015.
- [50] Gruppo Lucefin, Tabela de conversão de durezas HV-HRC, Acedido em 24 de Outubro de 2015, em: http://intranet.lucefin.com/it_pdf/tabella_durezze_euras.pdf
- [51] ABB Robotics Products, *Product Specification IRB6400, Revision K*, 12-04-2012.
- [52] International Standard Organization, *ISO 11228-1, Ergonomics – Manual Handling – Part 1: Lifting and Carrying*, 15-05-2003.
- [53] U.S Department of Health and Human Services, *Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation*, Janeiro 1994

Anexos

Devido às suas dimensões ou formato, e para não aumentar desnecessariamente o tamanho deste relatório escrito, os anexos encontram-se no DVD fornecido juntamente com este relatório.

De seguida descreve-se a forma como se encontra organizada toda a informação desse DVD.

A pasta \Anexo A contém o ficheiro ‘Anexo A - Simulacao RobotStudio Cladding V1.exe’.

A pasta \Anexo B contém o ficheiro ‘Anexo B - Simulacao RobotStudio Cladding V2.exe’.

A pasta \Anexo C contém o ficheiro ‘Anexo C - Tabela de Conversão de Durezas’.

A pasta \Anexo D contém o ficheiro ‘Anexo D - Simulacao RobotStudio Soldadura V1.exe’.

A pasta \Anexo E contém o ficheiro ‘Anexo E - Simulacao RobotStudio Soldadura V2.exe’.

A pasta \Anexo F contém o ficheiro ‘Anexo F - Simulacao RobotStudio Teste V1.exe’.

A pasta \Anexo G contém o ficheiro ‘Anexo G - Simulacao RobotStudio Soldadura V3.exe’.

A pasta \Anexo H contém o ficheiro ‘Anexo H - Simulacao RobotStudio Soldadura V4.exe’.