

**Optimização e estudo dos parâmetros de soldadura MAG  
Robotizada de uma estrutura tubular de aço S235 com o fio  
consumível G3Si1**

**Caetano Components SA**

*Mário Jorge de Meireles Mendes*

**Relatório de Dissertação do MIEMM**

Orientador na Caetano Components SA: *Engenheira Fátima Silva*

Orientador na FEUP: *Professor Acácio Lima*



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

Porto, Setembro de 2009

<i>CANDIDATO</i>	Mário Jorge de Meireles Mendes	<i>Código</i>	030508016
<i>Título</i>	Optimização e estudo dos parâmetros de soldadura MAG robotizada de uma estrutura tubular de aço S235 com o fio consumível G3Si1		
<i>DATA</i>	8 de Setembro de 2009		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C603- 9:30h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Henrique Manuel Cunha Martins dos Santos	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro	DEM/FCTUC
	<i>Orientador</i>	Professor António Acácio Couto Jorge Lima	DEMM/FEUP

## Resumo

O processo de soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gás: fio eléctrodo e protecção gasosa) é uma das tecnologias de soldadura por fusão mais utilizadas em todo o mundo, ajustando-se muito bem em aplicações robotizadas tendo em vista aumentar a produtividade das empresas em especial quando há uma produção em série estabelecida.

A realização do estágio na Caetano Components teve como objectivo o estudo de possíveis subconjuntos tubulares de aço estruturais, para elaboração em um robot de soldadura. Uma vez definida a peça de estrutura tubular a produzir por esta via, houve então a necessidade de projectar um gabarito de soldadura (suporte dos componentes da peça) que garantisse os requisitos dimensionais - cotas da estrutura, bem como evitar as distorções desta. Após a sua idealização, modelação e fabricação foram então estudadas três condições de soldadura distintas de forma a avaliar os melhores parâmetros para o fabrico da mesma.

Após o fabrico das peças, foram extraídos algumas amostras de cordões de soldadura para uma análise mais exhaustiva de caracterização. A caracterização das amostras foi obtida com a realização de ensaios de análise macro e micro estrutural e de caracterização mecânica (microdurezas) para uma análise mais cuidada das características das soldaduras.

Os resultados obtidos permitiram avaliar os melhores parâmetros de trabalho para a soldadura robotizada nas diferentes condições de trabalho, com vista a optimização da produção da estrutura tubular inicialmente definida.

## Abstract

The welding process MIG / MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas: wire electrode and gas protection) is one of the most commonly used technology of fusion welding around the world, fitting very well in robotic applications in order to increase the productivity of firms, in particular, when there is a mass production set.

The completion of the internship in Caetano Components aimed to study the possible subsets of tubular structural steel for preparation in a robot welding. After determining the piece form to produce by this way, tubular structure, there was the need to design a welding jig (support component part) to guarantee the dimensional requirements - fees structure and to avoid distortions. After modeling and manufacturing were then studied three different welding conditions in order to assess the best parameters for the manufacture thereof.

After the manufacture of parts, some samples were taken from the weld beads for a more thorough characterization. The characterization of the samples was obtained from the testing of macro and micro structural analysis and mechanical characterization (hardness) for a more careful analysis of the characteristics of the welds.

The results allowed evaluating the best working parameters for the welding robot, in different working conditions, in order to optimize the production of tubular structure initially set.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Caetano Componets S.A. e à Engenheira Fátima Silva pela oportunidade que me concederam para a realização deste trabalho.

Queria também agradecer ao meu orientador Engenheiro Acácio Lima, pela disponibilidade, incentivo que demonstrou e toda a ajuda que me despendeu durante a elaboração deste trabalho experimental.

Ao Eng. Paulo Cunha, Eng. Eurico Calheiros, ao Eng. Pedro Serafim e a todos os funcionários em especial ao Sr. Galvão por toda a ajuda e apoio que despenderam durante o meu estágio na Caetano Componets.

A todos os meus amigos gostaria de agradecer pelas palavras de apreço carinho e amizade que me transmitiram durante todo o curso e toda a força que me deram para a realização deste trabalho.

Finalmente, agradeço e dedico este trabalho aos meus pais, Joaquim e Lucília e ao meu irmão Zé Miguel pela coragem que me transmitiram e transmitem a cada dia da minha vida e a quem devo tudo.

A todos o meu sincero obrigado.

## Índice

1	Objectivo.....	1
2	Empresa .....	1
3	MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) Fio Eléctrodo Nú e Protecção Gasosa .....	2
3.1	Soldadura MIG/MAG Robotizada .....	2
3.2	Fontes de energia e de alimentação de eléctrodo .....	4
3.3	Parâmetros mais relevantes do processo .....	5
3.3.1	Tensão do arco.....	5
3.3.2	Intensidade de corrente do arco eléctrico.....	6
3.4	Tipos de deposição de metal.....	6
3.4.1	Transferência por spray .....	7
3.4.2	Transferência globular .....	7
3.4.3	Transferência por curto-circuito .....	7
3.4.4	Transferência por arco pulsado .....	8
3.5	Vantagens & Desvantagens .....	8
3.6	Influência dos parâmetros de soldadura na geometria do cordão de soldadura .....	9
3.6.1	Corrente .....	9
3.6.2	Tensão .....	9
3.6.3	Velocidade de avanço.....	10
4	Entrega térmica.....	10
5	Metalurgia da soldadura .....	12
5.1	Zona fundida.....	12
5.2	Zona de ligação .....	12
5.3	Zona Termicamente Afectada (ZTA) .....	12
5.4	Material base .....	13
6	Soldabilidade .....	14
6.1	Factores que afectam a soldabilidade dos aços .....	14
6.1.1	Temperabilidade.....	14

6.1.2	Carbono Equivalente (CE) .....	14
7	Fixadores de soldadura .....	16
7.1	Projecto de um gabarito de soldadura.....	17
7.2	Critérios a ter em conta para a elaboração do gabarito de soldadura.....	18
7.3	Fabricação do <i>Gabarito</i> de Soldadura .....	19
8	Materiais utilizados para a produção da peça .....	20
8.1	Material base .....	20
8.2	Material consumível .....	21
8.3	Gases de protecção do arco e do banho metálico .....	22
8.4	Equipamento de soldadura utilizado .....	24
9	Soldaduras Efectuadas .....	25
	Soldaduras topo-a topo.....	26
	Soldaduras de Canto .....	26
9.1	Condições de soldadura testadas .....	26
9.2	Soldaduras efectuadas .....	27
9.3	Aspecto visual das soldaduras de topo e defeitos visuais .....	28
9.4	Aspecto visual das soldaduras de canto e defeitos.....	30
10	Métodos de análise das soldaduras.....	32
10.1	Ensaio realizados.....	32
10.1.1	Preparação das amostras .....	32
10.1.2	Exame macrográfico .....	33
10.1.3	Ensaio micrográfico .....	35
10.1.4	Ensaio de microdurezas Vickers .....	35
11	Apresentação e discussão de resultados .....	36
11.1	Análise Macrográfica .....	37
11.1.1	Soldaduras de topo a topo .....	37
11.1.2	Soldaduras de canto.....	41
11.2	Análise Microestrutural .....	44
11.2.1	Caracterização microestrutural do material base.....	44

11.2.2	Caracterização microestrutural das soldaduras .....	45
11.3	Microdurezas.....	47
11.3.1	Soldaduras de topo.....	47
11.3.2	Soldaduras de canto.....	48
12	Conclusões .....	49
13	Bibliografia .....	51

## 1 OBJECTIVO

O objectivo deste trabalho efectuado em conjunto com a empresa Caetano Componets S.A. incidiu na elaboração de um gabarito de soldadura para a produção de uma nova estrutura tubular em aço carbono na célula robotizada de soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) que a empresa possui.

Com a realização deste trabalho pretende-se estudar os parâmetros de soldadura mais indicados para a produção da estrutura tubular, garantindo soldaduras de qualidade satisfatória com o menor número de defeitos, e no caso da ocorrência destes avaliar as suas possíveis causas. Sendo que, os defeitos podem advir ou dos parâmetros ensaiados não serem os mais correctos para os materiais em causa, da colocação das peças no gabarito de soldadura, de fixadores das peças insuficientes do gabarito de soldadura ou defeitos causados por distorções das peças.

## 2 EMPRESA

A Caetano Componets S.A. é uma empresa do grupo Salvador Caetano, que está situada na freguesia de Pedroso no concelho de Vila Nova de Gaia, Portugal.

A empresa tem diversas actividades na área da metalomecânica, sendo a área de componentes para a indústria automóvel o seu alvo preferencial.

Alguns dos produtos fabricados pela empresa Caetano Components são os seguintes:

- × Bancos para veículos de transporte;
- × Componentes metálicos para a indústria automóvel;
- × Espumas flexíveis de poliuretano;
- × Revestimentos em couro para bancos;
- × Sistemas de condutas para autocarros.

A partir da descrição dos produtos fabricados verifica-se uma larga utilização das tecnologias de soldadura, na sua grande maioria a utilização recai sobre a soldadura MIG/MAG semi-automática e alguma com soldadura MIG/MAG robotizada. Os materiais mais usados para a produção são:

- × Aços de baixo carbono;
- × Aços inoxidáveis austeníticos.

### 3 MIG/MAG (METAL INERT GAS/METAL ACTIVE GAS) FIO ELÉCTRODO NÚ E PROTECÇÃO GASOSA

O processo e soldadura MIG/MAG é uma tecnologia de soldadura por arco eléctrico que foi desenvolvido no século XX mais propriamente no ano de 1920 sendo que a sua comercialização iniciada só a meio do século [1].

O arco eléctrico é a fonte de energia que suporta esta tecnologia, tendo a sua origem no eléctrodo consumível que transporta a corrente eléctrica da fonte de energia que quando entra em contacto com a peça trabalho fecha o circuito eléctrico e o potencial (Volts) criado garante a passagem de corrente (Amperes) responsável pelas elevadas temperaturas geradas, permitindo a fusão do consumível e do material base sendo a protecção do arco efectuada por um gás [1,2].

A protecção do arco eléctrico e do banho metálico no processo MIG e MAG é assegurada por gases, podendo ser estes, inertes (Ar e He) ou activos ( $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2$ ) estando a sua escolha dependente do tipo de materiais a unir e das características do banho metálico que se pretendem [3,4 e 5].

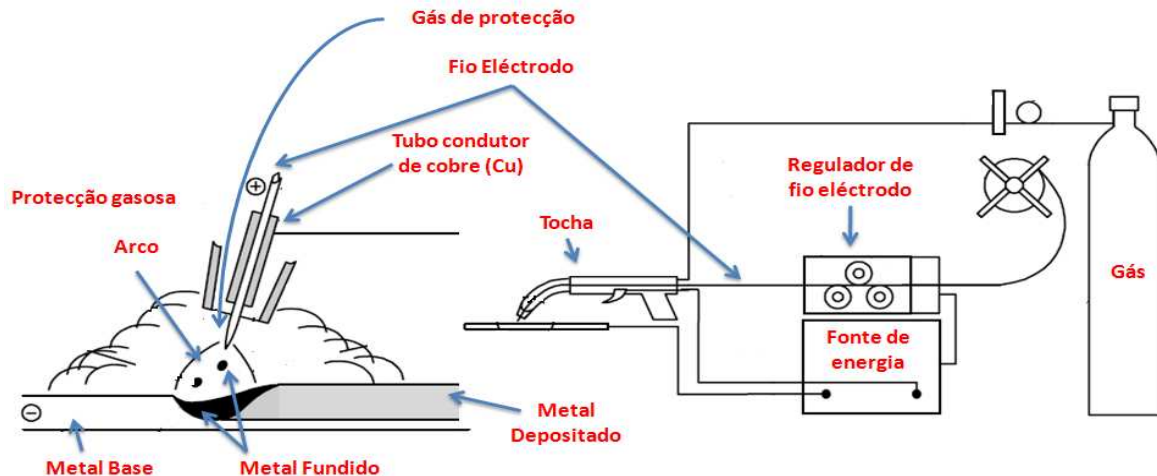


FIGURA 1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E COMPONENTES DO PROCESSO MIG/MAG [4].

#### 3.1 SOLDADURA MIG/MAG ROBOTIZADA

A soldadura MIG/MAG robotizada apresenta o mesmo princípio de funcionamento do processo MIG/MAG convencional de funcionamento semi-automático. Contudo, com a sua robotização este processo ganha uma maior rentabilidade na fabricação de peças em série, uma vez que o robot através da programação deste efectua a mesma sequência de

soldadura de forma precisa a soldadura que lhe é solicitada e tendencialmente haverá menos descontinuidades (defeitos) induzidos, se o robot for bem optimizado quanto aos melhores parâmetros de funcionamento [6].

Algumas das características que fazem com que os robots de soldadura tenham cada vez mais um maior utilização no meio industrial são as seguintes:

- × Tem movimentações muito flexíveis, pois possuem sistemas de movimentação no mínimo com 5 eixos, o que lhe garante grande mobilidade e flexibilidade perante as zonas a unir;
- × Possui uma zona de trabalho bem definida, sendo a sua célula de trabalho definida mediante as suas capacidades de funcionamento;
- × Possui grande precisão na execução das soldaduras e capacidade de repetição sem a ocorrência do erro humano.
- × Permite grandes velocidades de avanço grandes taxas de deposição, quando da optimização das condições de soldadura impostas;
- × Sequência de trabalho bem definida, reduzindo drasticamente o tempo de execução das peças [6].

Pelas razões mencionadas anteriormente a soldadura robotizada tem aumentado em larga escala nos últimos anos, sendo a indústria onde o se verifica uma maior utilização deste processo a indústria automóvel, na produção dos diversos componentes, aumentando desta forma a produtividade [6].

O local de instalação do robot de soldadura é designado por célula, Figura 2, onde se situam os diversos componentes necessários para o seu funcionamento. A célula robotizada é composta pelos seguintes equipamentos:

- × Robot de soldadura,
- × Uma ou duas mesas de trabalho dependente do tipo de robot;
- × Fixadores das peças;
- × Equipamento de soldadura: Fonte de energia, sistema de alimentação de fio eléctrodo e tocha de soldadura;
- × Equipamento de segurança cortinas de protecção que envolvem a zona de trabalho [6].

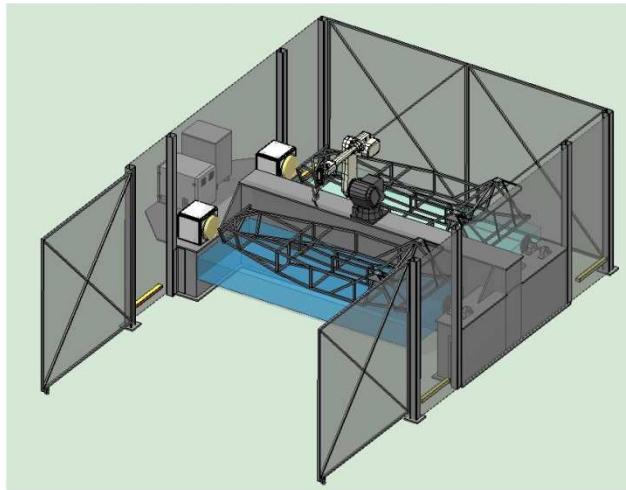


FIGURA 2 - IMAGEM ILUSTRATIVA DE UMA CÉLULA DE SOLDADURA ROBOTIZADA

A Figura 2 é ilustrativa de uma célula robotizada com utilização de duas mesas de trabalho que garantem um trabalho sistemático do robot e uma produtividade elevada, sem haver paragens na produção.

## 3.2 FONTES DE ENERGIA E DE ALIMENTAÇÃO DE ELÉCTRODO

A escolha das fontes de alimentação no processo MIG/MAG estão limitadas a correntes contínuas com polaridade inversa de forma a garantir maiores taxas de fusão do eléctrodo. Estas contudo podem ser de dois tipos, corrente constante ou de tensão constante [1].

A fonte de energia de corrente constante, possuem uma variação da corrente quase nula, que favorece taxas de deposição constantes, mesmo com comprimentos de arco variáveis. Contudo para se utilizar este tipo de fontes de energia, é necessário, uma alimentação do fio eléctrodo constante. Este tipo de alimentação pode ser prejudicial, pois pode assegurar a rápida fusão do eléctrodo ou fusão insuficiente [1].

As fontes de tensão constante, permitem um comprimento do arco estável após a ignição do arco, devido a manutenção da tensão. A velocidade de alimentação do eléctrodo deve ser controlada automaticamente de forma a garantir taxas de fusão constante [3].

Pelas razões mencionadas anteriormente as fontes de corrente constante são as mais favoráveis, permitindo uma auto-regulação do fio que mantém as taxas de fusão do eléctrodo. Contudo, hoje em dia estão disponíveis e com utilização crescente, fontes de corrente pulsada com controlo mais eficaz da transferência do metal, utilizando novas tecnologias da electrónica de potência (máquinas sinérgicas) que faz com que haja uma

oscilação da corrente a cada intervalo de tempo garantido melhores propriedades, bem como entregas térmicas menores [1,3].

## 3.3 PARÂMETROS MAIS RELEVANTES DO PROCESSO

### 3.3.1 TENSÃO DO ARCO

A tensão do arco eléctrico é de extrema importância nos processos, dependendo desta, o comprimento do arco, tipo de deposição e forma do cordão de soldadura.

Os valores típicos de funcionamento da tensão variam mediante o tipo de material e composição do gás de protecção conseguindo desta forma diferentes tipos de deposição como mostra a tabela 1 [1].

A tensão de utilização deve ser ensaiada nas condições em que vai operar, para que não se apliquem tensões demasiado elevadas que possam provocar condições indesejáveis, por exemplo propícias á formação de porosidades, tamanho exagerado do cordão, salpicos de metal ou mesmo corte da peça. Tensões demasiado baixas, também não são desejáveis pois, podem resultar numa baixa penetração do arco eléctrico, resultando uniões parciais do material base [1, 3].

TABELA 1-TENSÕES DE ARCO CONVENCIONAIS PARA A SOLDADURA MIG/MAG E TIPOS DE TRANSFERÊNCIA [1]

Tipo de transferência	Transferência globular (V)					Transferência por curto-circuito (V)			
	Ar	He	Ar -He (25% - 75%)	Ar-O <sub>2</sub> (1 a 5%)	CO <sub>2</sub>	Ar	Ar-O <sub>2</sub> (1 a 5%)	Ar - CO <sub>2</sub> (75% - 25%)	CO <sub>2</sub>
Alumínio	25	30	29	-	-	19	-	-	-
Aço Carbono	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Aços inoxidáveis	24	-	-	26	-	18	19	21	-

### 3.3.2 INTENSIDADE DE CORRENTE DO ARCO ELÉCTRICO

Quando todas as outras variáveis são mantidas constantes, a intensidade de corrente, varia com a velocidade de alimentação do fio eléctrodo numa relação não linear como demonstra a Figura 3 [1].

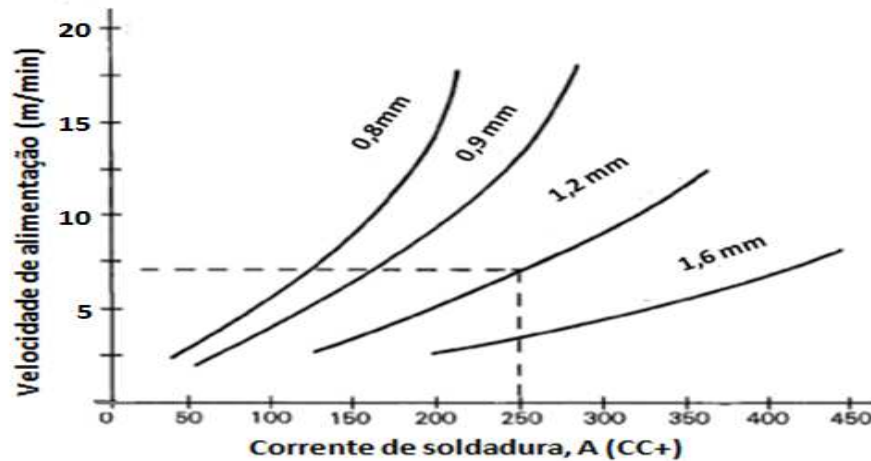


FIGURA 3 - VARIAÇÃO DA CORRENTE VERSUS VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO AÇO COM DIFERENTES DIÂMETROS DE FIOS CONSUMÍVEIS [1]

Como a velocidade de alimentação do eléctrodo não é constante, a corrente de soldadura vai variar de forma a manter a tensão constante da fonte de energia.

Esta relação de aumento de corrente com o aumento da velocidade de alimentação, vai depender das: tensões de soldadura e composição dos eléctrodos. Havendo diferenças de correntes de funcionamento nos diversos metais [1,3, 4].

### 3.4 TIPOS DE DEPOSIÇÃO DE METAL

As características do processo MIG/MAG permitem efectuar deposições de metal fundido para o metal base de três formas distintas de transferência, sendo estas, a transferência globular, transferência por spray e a transferência por curto-circuito [1,3, 7].

Estes tipos de deposição são caracterizados por diferentes condições de funcionamento, como demonstrado na Figura 4.

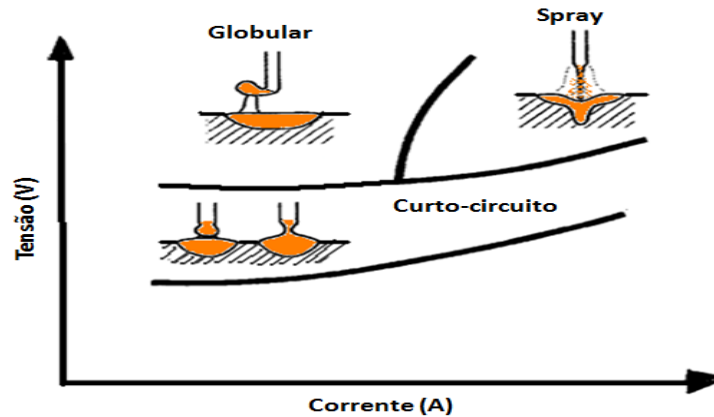


FIGURA 4: TIPOS DE DEPOSIÇÃO CONSEGUIDAS COM AS VARIAÇÕES DE CORRENTE E TENSÃO REGULADAS NA FONTE DE ENERGIA [5]

### 3.4.1 TRANSFERÊNCIA POR SPRAY

A transferência por spray é caracterizada por trabalhar com altas tensões e altas correntes, que se situam acima da corrente de transição. Originado uma deposição de gotículas de pequenas dimensões, que são projectadas às centenas por segundo através do arco eléctrico. Com este tipo de deposição é frequente ocorrerem salpicos do material durante a deposição de metal fundido [1, 3].

### 3.4.2 TRANSFERÊNCIA GLOBULAR

A transferência globular é originada com elevadas tensões e correntes de soldadura situadas antes da corrente de transição, ou seja, baixas correntes. Este tipo de deposição é caracterizado, por deposições de gotas de metal fundido de elevadas dimensões, geralmente com um diâmetro com as mesmas dimensões do eléctrodo podendo criar salpicos de metal a quando da sua deposição. A ocorrência de salpicos é originada pelas elevadas dimensões das gotas de metal fundido formadas na ponta do eléctrodo, que originam deposições mais abruptas sobre o material anteriormente depositado, promovendo esta ocorrência [1 e 3].

### 3.4.3 TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

A transferência por curto-circuito é originada com baixas tensões e baixas correntes de soldadura, com eléctrodos de diâmetros reduzidos. Estas condições vão originar um pequeno banho metálico no metal base de solidificação rápida, o que torna este tipo de transferência preferencial na união de materiais de baixas espessuras. O metal é

transferido do eléctrodo para o metal base quando se dá o contacto com o banho metálico, não havendo transferência através do arco [1 e 3].

### 3.4.4 TRANSFERÊNCIA POR ARCO PULSADO

A transferência por arco pulsado é obtida com fontes de energia com controlo de potência (máquinas sinérgicas). Este tipo de fontes de energia permite que a corrente oscile entre uma corrente máxima acima da corrente de transição (transferência por spray) e uma corrente mínima abaixo da corrente de transição (transferência globular) a cada intervalo de tempo. Com a oscilação da corrente há a formação de uma gota de metal a cada pulso de corrente, que é depositado quando a corrente máxima é atingida, produzindo desta forma uma transferência por spray com uma corrente inferior à normalmente necessária. Este tipo de deposição permite a regulação dos pulsos em função do tempo, permitindo desta forma controlar a deposição do material fundido sobre o material base havendo a possibilidade de haver entre 60 a 120 pulsos por segundo [1, 3].

Com este tipo de deposição conseguem-se um maior controlo da transferência de metal e a possibilidade de soldar peças de baixa espessura por transferência por spray, com fios com maiores diâmetros sem haver fusão excessiva de material [1, 3].

### 3.5 VANTAGENS & DESVANTAGENS

As vantagens deste processo são muito diversas, uma vez que permite vários tipos de protecção gasosa mediante os gases de protecção seleccionados (garantindo diferentes comportamentos do banho metálico e das características da soldadura resultante), possui elevadas taxas de deposição, funciona de forma automática ou semi-automática, possui vários tipos de deposição e permite efectuar soldaduras com comprimentos elevados [4].

Quanto a desvantagens as mais relevantes são o custo do equipamento, dificuldade de efectuar soldaduras em alguns locais devido ao tamanho elevado das tochas, o equipamento de elevadas dimensões que não é de fácil transporte, há a necessidade de haver uma protecção do arco do ambiente externo (abrigadas de correntes de ar) de forma a evitar a extinção do arco eléctrico e falta de protecção do banho metálico [4].

## 3.6 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDADURA

Os parâmetros de soldadura com maiores influências na soldadura são: a corrente de soldadura ( $A$ ), tensão ( $U$ ) e a velocidade de avanço ( $v$ ). Estes parâmetros vão ser responsáveis por diferentes características das soldaduras quanto a geometrias, bem como possíveis ocorrências de defeitos devido a uma escolha incorrecta. Desta forma passo a descrever a influência destes parâmetros na geometria dos cordões e dos possíveis defeitos que podem originar devido à má selecção destes.

### 3.6.1 CORRENTE

A corrente de soldadura é a variável mais importante de todo o processo, pois vai ser responsável pela taxa de fusão do eléctrodo, capacidade de penetração da solda e quantidade de material base que vai fundir. Logo se a corrente for elevada vai originar um aumento da taxa de fusão do eléctrodo resultando num cordão de maior dimensão, bem como um aumento da penetração do metal. Já para baixas correntes acontece o oposto. [1, 5].

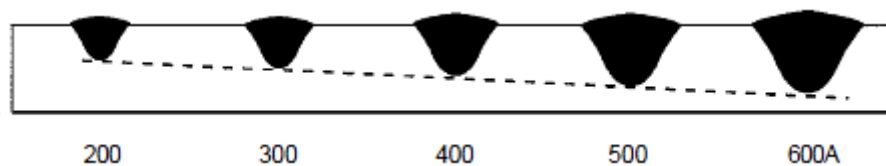


FIGURA 5: EFEITO DA INTENSIDADE DE CORRENTE NA GEOMETRIA DO BANHO METÁLICO [5]

Com as considerações atrás referidas, conclui-se que a escolha da corrente é fundamental no processo, tendo ainda em consideração que, elevadas entregas térmicas também originam uma maior tendência para a deformação das peças aquando do arrefecimento [1, 3, 5].

### 3.6.2 TENSÃO

A tensão de soldadura, é responsável pelo comprimento de arco do processo entre o eléctrodo e o material base, logo se aumentar a tensão vai aumentar o comprimento do arco e vice-versa [1, 3, 5].

A variação da tensão de soldadura, embora não tenha uma influência significativa na taxa de deposição, vai influenciar a largura do cordão, aumentando a largura com o aumento da tensão do arco como demonstra a Figura 6 [1, 3, 5].

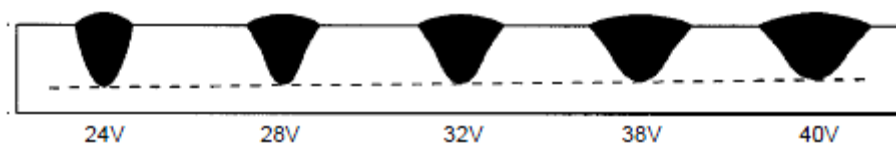


FIGURA 6: EFEITO DA TENSÃO NA GEOMETRIA DO MATERIAL FUNDIDO [5]

### 3.6.3 VELOCIDADE DE AVANÇO

A velocidade de avanço tem uma grande influência na largura e profundidade do cordão de soldadura. Desta forma velocidades elevadas de avanço produzem soldaduras de baixas espessuras e com pequena penetração. Velocidades de soldadura muito elevadas podem originar corte por soldadura, porosidade, deposição insuficiente e sopro magnético do arco mais elevado. Baixas velocidades resultam numa soldadura de forma irregular, já com velocidades excessivamente baixas produzem-se soldaduras com penetração em forma de “cogumelo”, que pode originar a fissuração da soldadura [1, 3, 5].

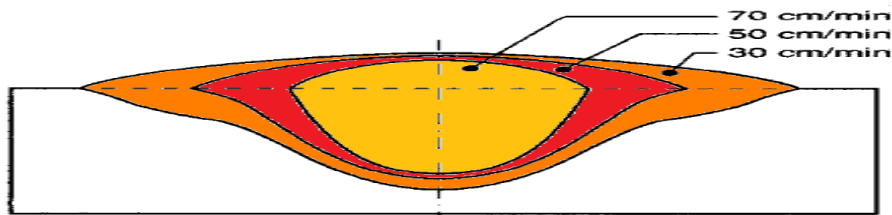


FIGURA 7: EFEITO DA VELOCIDADE DE AVANÇO NA GEOMETRIA DA SOLDADURA, COM TENSÃO E CORRENTE CONSTANTE [5]

## 4 ENTREGA TÉRMICA

A entrega térmica ( $Q$ ), relaciona os parâmetros de soldadura com a energia por unidade de comprimento de soldadura. Esta é definida pela *Equação 1*, onde o  $k$  é o factor de eficiência térmica baseado em cada processo de soldadura como demonstra a tabela 2.

A constante  $k$  é o grau de eficiência térmica de cada processo que influencia a entrega térmica. O factor de eficiência térmica expressa o valor máximo para o processo de soldadura por arco submerso (SAS) onde  $k$  é igual a 1 havendo menores entregas térmicas nos restantes processos [8].

TABELA 2 - GRAU DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO [8]

Número do processo (EN 3690: 2000)	Processo	Factor <i>k</i>
111	SER (Soldadura por Eléctrodo Revestido)	0,8
121	SAS (soldadura por Arco Submerso)	1,0
131/135	MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas)	0,8
141	TIG (Tungsten Inert Gas)	0,6

A entrega térmica  $Q$  depende de diversas variáveis, como demonstra a equação 1:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 1})$$

Legenda:

$Q$  - entrega térmica (kJ/mm - kilo Joules por milímetro);

$U$  - tensão de soldadura (V - Volts);

$I$  - corrente de soldadura (A - Amperes);

$v$  - velocidade de soldadura (mm/s - milímetros por segundo);

$k$  - eficiência térmica.

Contudo para além das variáveis expressas na equação deve-se ter em conta a performance da soldadura, bem como a posição de soldadura que afectam a entrega térmica. A tensão  $U$  e a corrente  $I$ , podem ser regulados através da unidade da fonte de energia. A velocidade de avanço  $v$  é também uma variável de extrema importância influenciando directamente a entrega térmica, bem como a geometria do cordão havendo um aumento da entrega térmica com a diminuição da velocidade de avanço e a diminuição com o inverso [8].

A entrega térmica é de extrema importância para a qualidade metalúrgica das soldaduras. Quando as restantes variáveis de soldadura são mantidas constantes, elevadas entregas térmicas resultam em elevadas temperaturas do arco eléctrico, que promovem uma velocidade de arrefecimento menor no banho metálico formado. Baixas velocidades de arrefecimento podem originar características indesejáveis como: aumento do tamanho de

grão, ZTAs de maiores dimensões e zona fundida de elevadas dimensões. Pelas razões mencionadas anteriormente deve haver um compromisso entre os parâmetros de funcionamento evitando entregas térmicas excessivas e arrefecimentos muito lentos que podem originar deformações excessivas [9].

## 5 METALURGIA DA SOLDADURA

Para se unir os materiais neste processo de soldadura como ficou implícito nos itens anteriores, é necessário ocorrer a fusão dos materiais. Como resultado das elevadas temperaturas formadas durante a fusão, resultam gradientes de temperatura desde a zona de fusão até às zonas adjacentes respectivas e conseqüentemente zonas distintas da transformação [10].

As seguintes zonas podem ser classificadas:

### 5.1 ZONA FUNDIDA

É a zona onde o estado líquido existiu durante a execução da soldadura. Sendo que esta zona foi obtida pela fusão dos materiais envolvidos, podendo ser única e exclusivamente composta pelo material base dos materiais, ou ainda pelo material base e o material de adição caso o este tenha sido utilizado. Esta zona vai ser caracterizada pelo seu estado bruto de fusão, sendo que os grãos metálicos resultantes da solidificação são, em geral aí visíveis, sem ampliação. O material que aí se constituiu chama-se então de material fundido [10].

### 5.2 ZONA DE LIGAÇÃO

Esta zona corresponde ao limite, da qual o material de base chegou á fusão. Esta, delimita portanto, a zona fundida, é evidenciada pela diferença de estrutura que se constata de cada um dos lados. Se olhar mais de perto, deve-se ter em conta que o facto de que qualquer liga é caracterizada por um domínio de temperatura dito intervalo de solidificação, no qual coexistem duas fases, líquida e sólida. Por outro lado, o interesse desta zona é de ser o berço do inicio da solidificação do material fundido [10].

### 5.3 ZONA TERMICAMENTE AFECTADA (ZTA)

A zona termicamente afectada vai ser a zona que vai sofrer alterações devido ao ciclo térmico que vai estar sujeito, devido à soldadura efectuada. Estas alterações dão-se

então, a quando do início da soldadura onde as temperaturas formadas para formar a zona fundida provocam transformações no estado sólido da zona adjacente. As transformações são caracterizadas por uma temperatura mínima, o limite da correspondente zona afectada coincide com a isotérmica característica desta temperatura, esta isotérmica aparece mais ou menos nitidamente, conforme o fenómeno, progressivo ou não, em função da temperatura. Assim na Figura 8 relativamente ao aço, distingue-se, por variação progressiva da coloração, a entrada no domínio onde a temperatura ultrapassa o ponto da dissolução progressiva da perlite, por uma descontinuidade nítida na passagem do domínio completamente austenitizado no aquecimento (isotérmica A3). Mais próximo da zona fundida, o crescimento de grão da austenite, fenómeno progressivo, introduziu uma zona de sobreaquecimento cada vez mais aparente, cuja ocorrência não é assinalável por uma isotérmica bem definida [10].

## 5.4 MATERIAL BASE

Se bem que seja evidente, é importante mencionar o material base como fazendo parte de uma soldadura destinada a exame, macro ou micrográfico. Com efeito, o material de base serve de referência, para a apreciação das transformações que ocorrem do decurso da soldadura. Por outro lado, certas modificações não são reveladas á escala macrográfica, porque, põe em jogo constituintes e estruturas muito finas, ou muito dispersas, para que a heterogeneidade seja revelada por contraste macrográfico. Não é portanto, forçosamente necessário que o material base não é afectado, só pelo facto de que o exame macrográfico nada revelou [10].

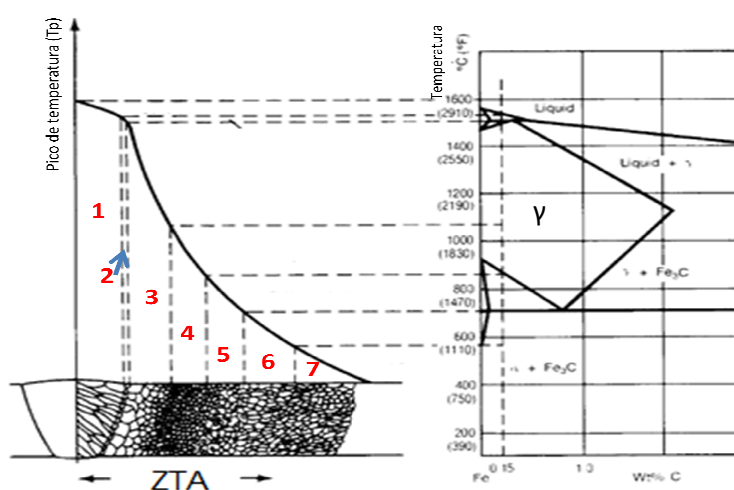


FIGURA 8 - DIFERENTES ZONAS PRESENTES NUMA SOLDADURA DE UM AÇO DE BAIXO CARBONO HIPOEUTECTOIDE E RESPECTIVO DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FE-C.

Legenda:

- 1 - Zona Fundida;
- 2 - Linha de fusão, transição sólido/líquido;
- 3 - Zona de crescimento de grão grosseiro;
- 4 - Zona de recristalização;
- 5 - Zona de transformação parcial;
- 6 - Zona recozida;
- 7 - Zona não afectada.

## 6 SOLDABILIDADE

A soldabilidade é definida pela Sociedade Americana de Soldadura (Welding American Society), como a capacidade de um metal ou a combinação de metais a serem unidos, com as condições de soldadura impostas respondendo de forma satisfatória quanto à forma predefinida, propriedades dos materiais a quando da sua utilização em serviço. Sendo desta forma, quanto melhor for a soldabilidade, maior será a facilidade de se obterem soldaduras de qualidade satisfatória [11].

Como pode ser verificado nas diversas ligas metálicas, a soldabilidade vai depender dos aspectos metalúrgicos, bem como das tecnologias de soldadura utilizadas para a sua união, resultando em propriedades mecânicas satisfatórias da soldadura. A compatibilidade metalúrgica dos materiais envolvidos no processo, materiais base e material fundido (cordão de soldadura) vai resultar numa combinação de ambos os materiais sendo que, esta vai estar dependente do processo de soldadura utilizado para proceder à ligação [11].

### 6.1 FACTORES QUE AFECTAM A SOLDABILIDADE DOS AÇOS

#### 6.1.1 TEMPERABILIDADE

A temperabilidade nos aços é geralmente usada como indicador de austenite estabilizada com a adição de elementos de liga. Contudo, este factor também é usado como indicador de soldabilidade sendo um ponto de referência para a selecção do material e do processo de união que evite a temperabilidade excessiva e a fissuração da zona termicamente afectada (ZTA). Os aços com elevada temperabilidade apresentam uma maior tendência para a formação de martensite, o que aumenta o risco de fissuração durante o processo de soldadura. A temperabilidade também é usada como indicador da susceptibilidade do aço à fissuração por incorporação de hidrogénio [11].

Devendo desta forma ser um factor a ter em conta a quando da selecção do aço de forma a garantir as propriedades pretendidas da soldadura sem afectar o seu desempenho [11].

#### 6.1.2 CARBONO EQUIVALENTE (CE)

Como forma de evitar uma má escolha do aço, foram desenvolvidas equações empíricas que expressão a soldabilidade. O Carbono Equivalente (CE) é uma das equações utilizadas, esta foi desenvolvida com o intuito de estimar a susceptibilidade do aço à soldadura e determinar a necessidade de um pré ou pós tratamento de forma como forma de evitar a

fissuração por incorporação de hidrogénio, que ocorre quando teor de hidrogénio está acima do nível crítico.

A equação do carbono equivalente segundo o *International Institute of Welding* é a seguinte:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde a concentração dos elementos de liga é dada em percentagem. Como pode ser verificado na equação o elemento que apresenta uma maior influência da soldabilidade é o carbono. Este quando conjugado com os diversos elementos de liga, pode afectar a gama de temperatura de solidificação, e originar fissuração a quente ou mesmo a fissuração a frio. A Figura 9 é ilustrativa do carbono equivalente e soldabilidade das diversas famílias dos aços bem como da influência dos elementos de liga [12].

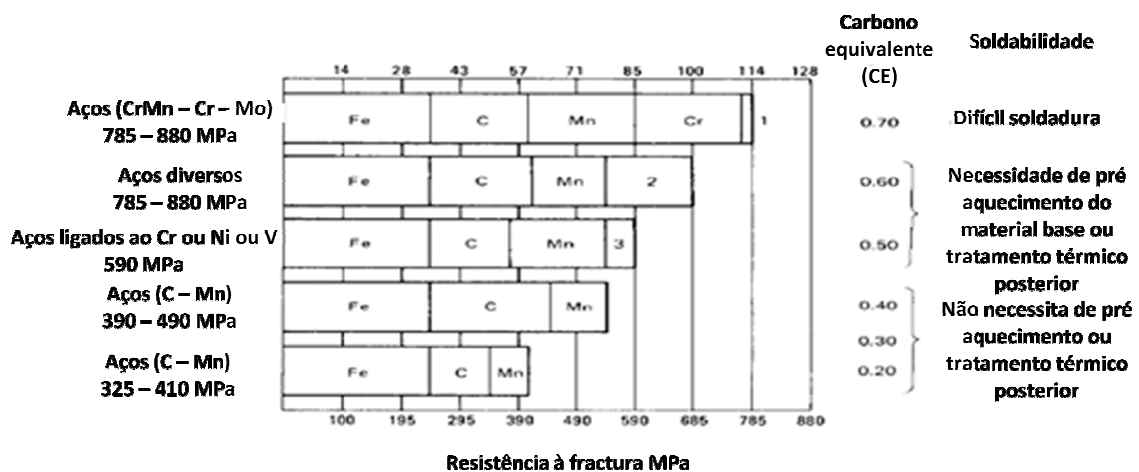


FIGURA 9 - SOLDABILIDADE DOS DIFERENTES AÇOS TENDO EM CONTA O CARBONO EQUIVALENTE. [12]

A aplicação da expressão do carbono equivalente é empírica. A sua utilização é aplicada em função da experiência adquirida, estando bem definidas as condições de operação dos diversos tipos de aços, como se pode verificar na norma NP EN 1011-2. Com a sua consulta podem-se observar diversos gráficos de aços com o CE bem definido, apresentando nestes as características mais favoráveis para a sua soldadura. Estes gráficos baseiam-se então no carbono equivalente (CE), nas espessuras dos materiais e na entrega térmica (Q). Desta forma, com o conhecimento de todas as variáveis do processo, pode-se consultar os gráficos aí apresentados e, mediante as características do material a unir e do processo em causa, avaliar se há ou não necessidade de um pré-aquecimento do material, assim como a temperatura mais aconselhada para o seu procedimento. Contudo, com a observação destes, pode-se concluir que quanto maior forem as espessuras dos aços, e o respectivo

carbono equivalente, a necessidade de um pré aquecimento é quase obrigatória, como forma de se conseguir soldaduras de qualidade [13].

### 7 FIXADORES DE SOLDADURA

Em geral os fixadores de soldadura podem ter diversas funções desde serem guias das peças a unir, garantir o suporte das peças e fixarem as peças nos locais apropriados, para que o produto final cumpra as especificações definidas aquando do desenvolvimento do produto [14].

Os fixadores de soldadura vão garantir o posicionamento correcto de todos os componentes, garantido que todos os componentes não sofram deslocamentos com o decorrer do processo, eliminando desta forma possíveis defeitos de fabricação como empenos, folgas excessivas e garantindo a acessibilidade da tocha de soldadura a todos os pontos de união definidos. Como forma de prevenir possíveis defeitos devem ser seguidos alguns princípios fundamentais na elaboração de um gabarito de soldadura sendo que a seguinte lista os passos seguidos pela *Canadian Welding Bureau*:

1. Sempre que possível os fixadores devem ser posicionados de forma a garantirem o bom posicionamento da tocha de soldadura de forma a evitar defeitos.
2. O design do gabarito deve ser o mais simples e funcional possível;
3. Os fixadores devem ser construídos de forma a libertar as zonas de soldadura
4. Devem garantir o cumprimento das cotas pré-definidas;
5. As juntas de soldadura devem ser o mais expostas possíveis e com folgas mínimas entre os componentes;
6. Para compensar as possíveis distorções térmicas, com decorrer da soldadura devem ser colocados fixadores nas peças o mais próximo possível das zonas a soldar;
7. A movimentação das peças a unir nos gabaritos devem ser evitadas, sendo preferíveis a execução e todas as soldaduras no gabarito evitando a ocorrência de empenos excessivos;
8. As soldaduras verticais e ao tecto devem ser evitadas de sendo preferíveis quando possível soldaduras horizontais evitando o escorrimento da soldadura ao longo da junta [14].

Por vezes de forma a evitar custos elevados na fabricação dos gabaritos muitos dos fixadores das peças a unir são abolidos na sua produção, contudo estes são de extrema importância para a qualidade do produto final, pois quanto maior o número de fixadores a suportar as peças, menores serão os defeitos resultantes como por exemplo: distorções

excessivas resultantes da movimentação das peças com o decorrer do processo e defeitos de má colocação das peças que com o a colocação de fixadores não ocorrem uma vez que estas ajustam-se ao gabarito evitando-as [14].

### 7.1 PROJECTO DE UM GABARITO DE SOLDADURA

Com o intuito de estudar as soldaduras efectuadas num robot de soldadura MIG/MAG de estruturas tubulares para a indústria automóvel, foi proposto a elaboração de raiz de uma nova peça de forma a rentabilizar o Robot.

Desta forma foram fornecidos alguns desenhos técnicos das estruturas fabricadas pela *Caetano Components*, com o intuito de extrair destes desenhos partes da estrutura com viabilidade de serem executadas no robot de soldadura. Contudo, a sua selecção devia ter em conta as dimensões da área de trabalho do robot que está evidenciada na Figura 10 de forma a garantir a sua exequibilidade.

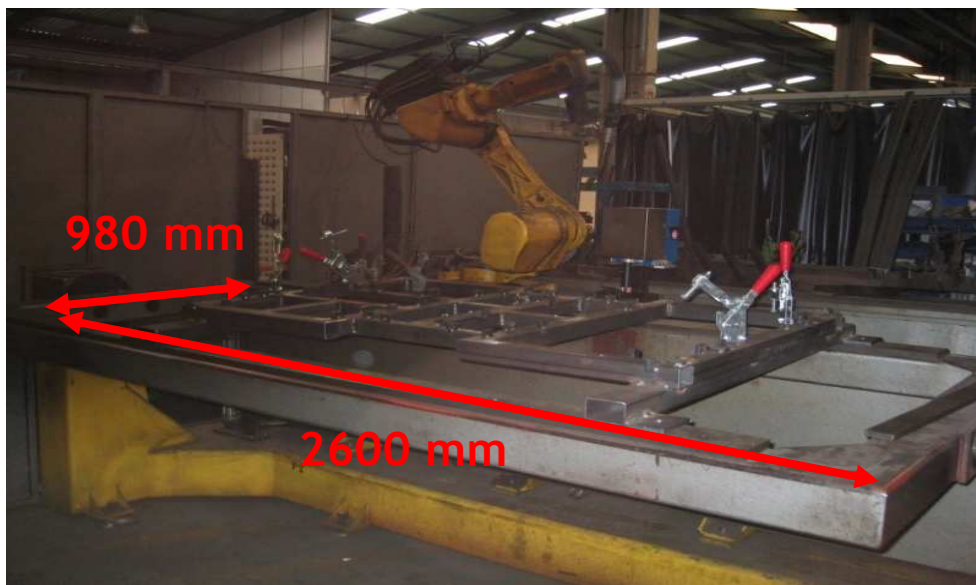


FIGURA 10 - DIMENSÕES DA ÁREA ÚTIL DA MESA DE TRABALHO DO ROBOT

Com as condicionantes anteriormente referidas nomeadamente, foi seleccionada uma estrutura tubular que respeitasse as dimensões da área de trabalho mencionada anteriormente, de forma a poder ser efectuada no robot de soldadura como demonstra a Figura 11.

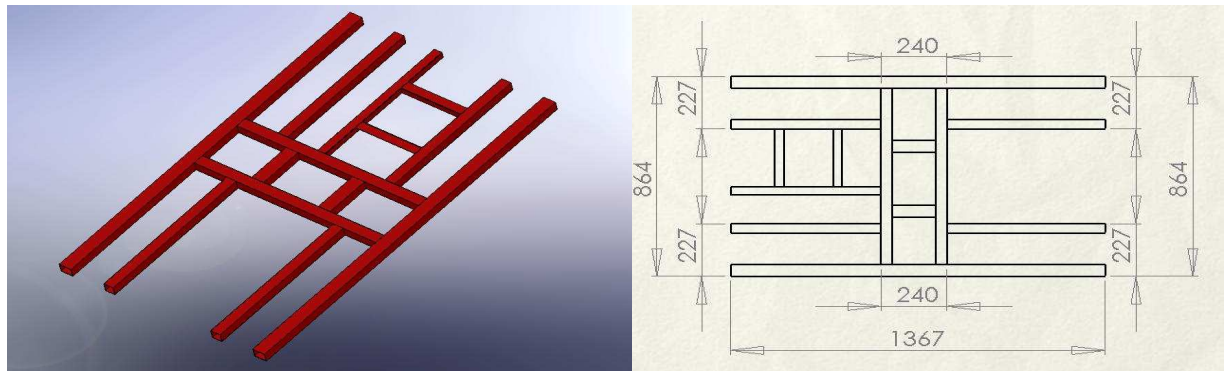


FIGURA 11 - PEÇA DEFINIDA PARA ELABORAÇÃO E RESPECTIVAS DIMENSÕES (mm)

Com a peça definida para produção houve a necessidade de projectar e construir uma estrutura de suporte e fixação de todos os componentes da peça a produzir, denominado no meio industrial por gabarito de soldadura.

## 7.2 CRITÉRIOS A TER EM CONTA PARA A ELABORAÇÃO DO GABARITO DE SOLDADURA

Como forma de garantir, a viabilidade da soldadura da peça formam levados em conta os seguintes critérios para a sua execução:

- Libertar as zonas onde se vão efectuar as soldaduras (nós de soldadura);
- Garantir o suporte das peças, necessárias para a elaboração da estrutura;
- Garantir o cumprimento das cotas da peça de acordo com o desenho técnico;
- Definir a colocação das guias de colocação dos tubos da estrutura;
- Colocação de fixadores, que garantam a o ajuste correcto das peças e o suporte da mesma, quando há a inversão da mesa de trabalho para efectuar as soldaduras inferiores.

Uma vez definidos os critérios para a elaboração do gabarito foi necessário recorrer a um software de modelação (*SolidWorks versão 2008*), onde se efectuou a modelação da peça e através desta procedeu-se à modelação da estrutura de suporte, para posterior produção.

Os passos para a elaboração do gabarito de soldadura com o recurso ao software de modelação *SolidWorks 2008* formam os seguintes:

- × Modelação da peça (1);

- \* Modelação da estrutura em função da peça garantido o suporte de todos os componentes bem como o acesso da tocha de soldadura aos pontos de solda (2).
- \* Colocação das guias de encaixe dos componentes da peça (3);
- \* Colocação dos fixadores da peça nos possíveis pontos críticos da peça (4);

Uma das etapas mais problemáticas da modelação do gabarito de soldadura foi definir os pontos de colocação das “guias” de forma a garantir uma boa colocação dos componentes necessários para a execução da peça, evitar distorções com o decorrer da soldadura, devido às elevadas temperaturas que ocorrem durante o processo e possibilitar a remoção da peça após a sua fabricação.

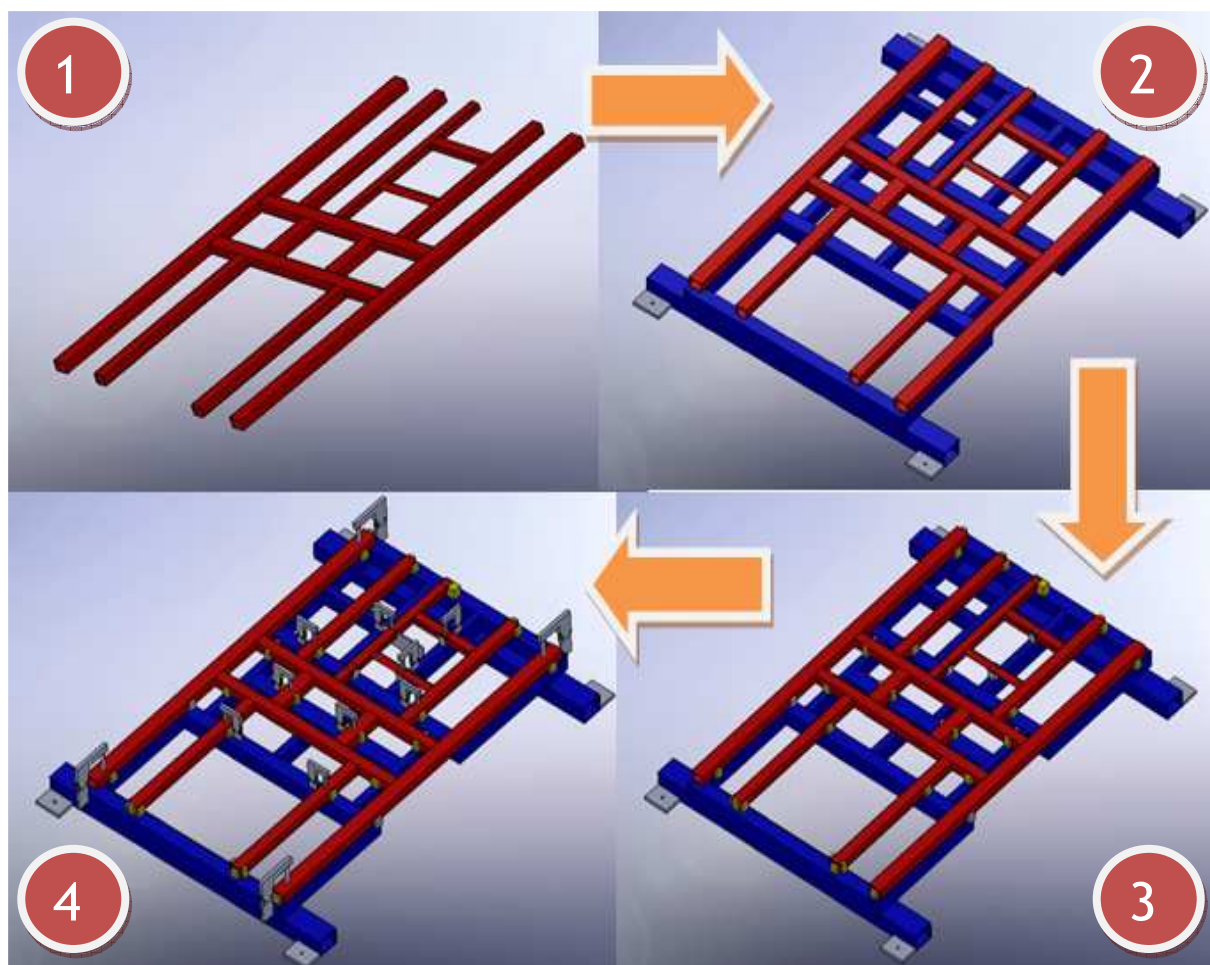


FIGURA 12 - IMAGEM ILUSTRATIVA DAS ÉTAPAS DE MODELAÇÃO EFECTUADAS EM SOLIDWORKS DA PEÇA E GABARITO DE SOLDADURA

### 7.3 FABRICAÇÃO DO GABARITO DE SOLDADURA

Uma vez ultrapassada a etapa de modelação da estrutura de suporte necessária, foi fabricado o *gabarito de soldadura* como está demonstrado na Figura 12 de forma manual

recorrendo aos componentes da peça final a fabricar, para facilitar a colocação das respectivas guias de suporte, com o intuito de prevenir a ocorrência de folgas excessivas entre os componentes da peça e as guias de suporte e o cumprimento das cotas do desenho técnico.

Após a conclusão da produção do *gabarito*, este foi levado para a mesa de trabalho do Robot de soldadura e fixado a esta. Após a sua fixação foi elaborado o programa de soldadura necessário para a soldadura da peça e respectiva produção.



FIGURA 13 ETAPA DE SOLDADURA DA ESTRUTURA DE SUPORTE DA PEÇA E COLOCAÇÃO DAS GUIAS.

## 8 MATERIAIS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DA PEÇA

### 8.1 MATERIAL BASE

O material base utilizado foram tubos de secção rectangular do Aço S 235 segundo a Norma Europeia EN 10219-1 que apresenta uma composição química representada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço S 235 JRH segundo a norma EN 10219-1:1997 [15]

Material Base	Composição Química (%)					
	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Azoto (N)
Aço S 235 JRH	0,17	-	1,40	0,045	0,045	0,009

Um aço com esta composição química ainda segundo a norma apresenta as propriedades apresentadas na tabela 4.

TABELA 4 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO S235 [15]

Material Base	Propriedades Mecânicas		
Aço S 235 JRH	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Alongamento (%)
	235	360 - 510	24

O aço S235 é definido como um aço estrutural de médio carbono uma vez que apresenta um teor de carbono entre 0,15 a 0,29. Este aço tem como vantagem possuir uma boa soldabilidade uma vez que possui um carbono equivalente (CE) de 0,35 segundo norma EN 10219-1 o que é favorável para a soldadura, uma vez que não têm tanta tendência para a fissuração do material quando sujeito à soldadura como os aços com teores de carbono equivalente mais elevados como referido anteriormente [16].

## 8.2 MATERIAL CONSUMÍVEL

O material de adição utilizado para a soldadura do aço S 235 foi o fio eléctrodo G3Si1 normalizado segundo a norma EN ISO 14341 com um diâmetro de 0,8 mm. Com uma composição química como está evidenciada na tabela 5 [17].

TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL CONSUMÍVEL USADO [17]

Material consumível	Composição Química (%)		
G3Si1	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)
	0,1	0,9	1,5

Este fio consumível é caracterizado por ser um fio muito utilizado para a soldadura MIG/MAG para aços de médio e baixo carbono para aços estruturais de construção, geralmente para aplicações na área de componentes para a indústria automóvel e para construção naval [17].

O fio eléctrodo G3Si1, é essencialmente usado em soldadura MAG (Metal Active Gas) apresentando uma elevada eficiência, especialmente em soldadura robotizada ou soldadura mecanizada [17].

O fio eléctrodo G3Si1 apresenta as seguintes características:

- Boas propriedades de ignição do arco eléctrico;
- Elevadas velocidades de alimentação de fio;

- Proporcionar soldaduras de elevadas dimensões;
- Arco eléctrico estável com elevadas intensidades de corrente;
- Baixa propensão para a ocorrência de salpicos de solda;
- Baixo teor de gases libertados [17].

Quanto às propriedades mecânicas o fio eléctrico, estas estão evidenciadas na Tabela 6.

TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FIO CONSUMÍVEL G3Si1 [17]

Material consumível	Propriedades Mecânicas		
G3Si1	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Alongamento (%)
	470	560	26

Quanto às condições típicas de funcionamento, ou seja parâmetros de soldadura, o fio G3Si1, apresenta diferentes condições de operação, mediante o diâmetro do fio utilizado como está demonstrado na Tabela 7 sendo que a vermelho está representado as condições típicas de funcionamento do fio eléctrico utilizado nas soldaduras efectuadas [17].

TABELA 7 - PARÂMETROS DE SOLDADURA COMUNS PARA O FIO DE SOLDADURA G3Si1 [17]

Parâmetros de soldadura				
Diâmetro	Velocidade de alimentação de fio (m/min)	Corrente de soldadura (A)	Tensão do arco (V)	Taxa de deposição (kg/hora)
0,8	3,2 - 10	60 - 200	18 - 24	0,8 - 2,5
0,9	3,0 - 12	70 - 250	18 - 26	0,8 - 3,3
1,0	2,7 - 15	80 - 300	18 - 32	1,0 - 5,5
1,4	2,3 - 12	150 - 420	22 - 36	1,6 - 8,7
1,6	2,3 - 15	225 - 550	28 - 38	2,1 - 11,4

### 8.3 GASES DE PROTECÇÃO DO ARCO E DO BANHO METÁLICO

Os gases incorporados nos processos de soldadura, possuem diversas funções no desenrolar do processo, entre as quais a protecção do banho metálico das contaminações atmosféricas (azoto e oxigénio), promover a estabilidade do arco e da transferência de metal [1, 3].

Os gases são factores fundamentais nos processos de arco com protecção gasosa, havendo por isso uma variedade significativa de tipos de protecção, entre as quais, protecções com gases inerte, gases activos ou misturas de gases inertes com gases activos [1, 3].

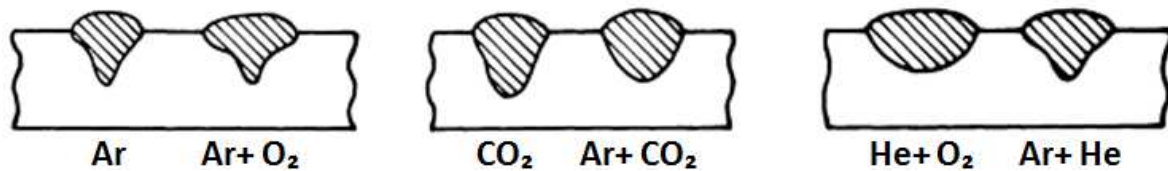


FIGURA 14 - GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDADURA VARIANDO A CONSTITUIÇÃO DOS GASES DE PROTECÇÃO [3]

Os gases que podem ser incorporados no processo de soldadura para protecção do arco eléctrico e do banho metálico são:

× **Gases Inertes:**

- ✓ **Árgon (Ar)** - é um gás inerte ou não reactivo para os materiais; possui um baixo potencial de ionização ( $2,52 \times 10^{-18}$  J) promovendo uma boa ignição e a manutenção do arco [3].
- ✓ **Hélio (He)** - é também um gás inerte não reactivo com os materiais. Tem uma elevada condutividade térmica e elevado potencial de ionização ( $3,92 \times 10^{-18}$  J), logo tem uma maior entrega térmica para o material base provocando desta forma maiores dimensões dos cordões de soldadura [3].

× **Gases activos:**

- ✓ **Oxigénio (O<sub>2</sub>)** - melhora a estabilidade do arco e a fluidez do banho metálico quando adicionado a gases inertes (Ar e He); porém a suas proporções têm de ser controladas para evitar a oxidação em excesso e o aumento exponencial da temperatura [3].
- ✓ **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)** - como é um gás reactivo pode ser utilizado em algumas situações sozinho, quando se necessita de uma rápida fusão. Contudo a sua grande utilização é na mistura com o árgon de forma a melhorar a entrega térmica e a penetração do arco [3].
- ✓ **Hidrogénio (H<sub>2</sub>)** - geralmente a sua utilização é só em casos especiais pois como o hidrogénio é muito reactivo com quase todos os materiais a sua utilização é condicionada [3].
- ✓ **Azoto (N<sub>2</sub>)** - é um gás considerado inerte à temperatura ambiente, contudo nas temperaturas que o arco atinge este torna-se reactivo com a maior parte dos materiais o que limitando a sua utilização ao cobre [3].

O gás utilizado é o *Arcal 21* fornecido pela empresa Air Liquide que está normalizado segundo a norma ISO EN 439 que apresenta uma composição química que está descrita na Tabela 8, sendo esta uma mistura de um gás inerte com o gás activo.

TABELA 8 - COMPOSIÇÃO DO GÁS DE PROTECÇÃO UTILIZADO E DESIGNAÇÃO NORMATIVA SEGUNDO A NORMA EN 439 [18]

Gases		Característica	Designação normativa	
	CO <sub>2</sub>	Árgon	Ligeiramente oxidante	M21
Teor (%)	12	88		

Esta mistura gasosa é utilizada na soldadura de aços carbono de baixo e médio carbono, uma vez, que aumenta a capacidade de penetração da soldadura, bem como uma maior dimensão do cordão como ficou evidenciado na Figura 14. Com esta mistura gasosa a é também facilitada uma maior taxa de fusão do fio eléctrodo aumentando a cadência de produção [3].

## 8.4 EQUIPAMENTO DE SOLDADURA UTILIZADO

O equipamento de soldadura utilizado para a soldadura da peça projectada foi como anteriormente descrito anteriormente o processo MAG robotizado em sistema monobloco com as seguintes componentes:

- × Robot de soldadura - FACUC ArcMate 100 i;
- × Controlador - FANUC RJ2 Teach Pendant;
- × Máquina de Soldadura;
  - ✓ Fonte de energia - Kemppi ProMig 520R;
  - ✓ Alimentador de fio eléctrodo - Kemppi ProMig 120R;
- × Posicionadores - MOTOFIL.

O robot de soldadura utilizado, *FANUC Arc Mate 100i* é caracterizado por possuir um movimento articulado em 6 eixos o que garante uma grande mobilidade do robot, garantindo desta forma a execução de quase todos os tipos de soldadura, excepto soldadura ao tecto uma vez que está limitado à área de trabalho do robot [19].



FIGURA 15 - ROBOT FANUC ARCMATE MODELO 100I UTILIZADO

A fonte de energia utilizada *Kemppi ProMig 520R* apresenta as seguintes características [20]:

- × Tensão em circuito aberto de 50 V;
- × Corrente máxima de 440 Amperes;
- × Possibilidade de trabalhar com corrente constante ou com corrente pulsada (maquina sinérgica).

Apresentando desta forma a possibilidade de trabalhar com elevadas taxas de deposição e com entregas térmicas menos intensas devido ao seu controlo sinérgico.

O controlador FANUC RJ2 é caracterizado por estar ligado a um CPU de 32-bit, que permite a programação do robot de soldadura de forma simples, efectuando os cálculos necessários ao programa rapidamente, reduzindo o tempo de processamento do programa aumentando o rendimento do robot e ainda é responsável pela regulação automática do circuito de refrigeração do robot de soldadura.

## 9 SOLDADURAS EFECTUADAS

As soldaduras efectuadas durante a produção da peça seleccionada abrangiam então estruturas tubulares de secção rectangular de forma perpendicular. Desta forma as soldaduras a efectuar pelo robot teriam de ser de acordo com o posicionamento do gabarito de soldadura na mesa de trabalho.

As soldaduras efectuadas na estrutura tubular foram então de dois tipos:

## SOLDADURAS TOPO-A TOPO

As soldaduras de topo formam, executadas com uma posição da tocha em relação à zona de união com uma inclinação de 90° e com um *stick-out* (extensão do eléctrodo) de 5 mm (Figura 16). Estas condições foram, assim definidas de forma a garantir uma protecção gasosa satisfatória do banho metálico e facilitar a movimentação do robot de soldadura.

## SOLDADURAS DE CANTO

As soldaduras de canto foram executadas com a tocha posicionada em relação ao ponto de união com uma inclinação de 45° e com um *stick-out* de 8 mm sendo o sentido de deslocação da tocha é vertical descendente. O *stick-out* (extensão do eléctrodo) apresenta maiores dimensões que na soldadura de topo, uma vez que a acessibilidade é dificultada pela geometria da peça e das envólucros desta (fixadores, estrutura metálica e guias) necessitando desta forma uma extensão do eléctrodo maior e da inclinação imposta.

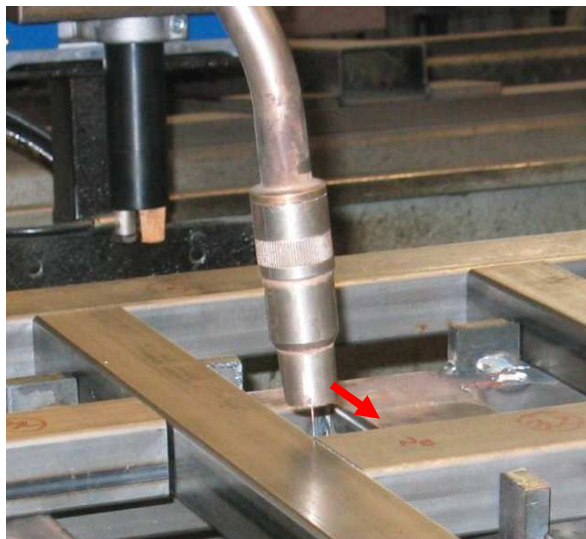


FIGURA 16 - EXEMPLO DAS SOLDADURA DE TOPO EFECTUADAS NA ESTRUTURA TUBULAR E O RESPECTIVO STICK-OUT UTILIZADO



FIGURA 17 - FIGURA ILUSTRATIVA DA COLOCAÇÃO DA TOCHA EM TRABALHO NAS SOLDADURAS DE CANTO EFECTUADAS

## 9.1 CONDIÇÕES DE SOLDADURA TESTADAS

Como objectivo de proceder a um estudo dos parâmetros com vista a optimização das soldaduras a ser efectuadas pelo robot, foram definidos os parâmetros de execução das soldaduras para os dois tipos de posições de soldadura a efectuar na peça, sendo estas como mencionado anteriormente a soldadura de topo e soldadura de canto.

As condições de soldadura testadas foram seleccionadas, tendo em conta os catálogos de consumíveis dos fabricantes de fio eléctrodo (G3Si1) apresenta como as mais favoráveis para a soldadura. Após a consulta dos catálogos foram definidas três condições de soldadura a ensaiar, adoptando-se a velocidade de soldadura seria constante em todas as condições a ensaiar, desta forma a velocidade utilizada foi a velocidade de avanço máxima do robot com o intuito de haver uma maior cadência de produção da peça, mas também garantir a qualidade das soldaduras efectuadas.

As condições definidas foram as representadas na Tabela 9, para a elaboração das soldaduras a efectuar.

TABELA 9 - PARÂMETROS DE SOLDADURA UTILIZADOS NAS SOLDADURAS EFECTUADAS

Condições de trabalho	Programa A	Programa B	Programa C
<i>Tensão (Volts)</i>	23	19	17
<i>Intensidade (Amperes)</i>	210	175	159
<i>Velocidade de avanço (mm/s)</i>	7,3	7,3	7,3
<i>Caudal de gás de protecção (L/min)</i>	12	12	12
<i>Factor de eficiência térmica</i>	0,8	0,8	0,8
<i>Entrega térmica (kJ/mm)</i>	0,53	0,36	0,30

### 9.2 SOLDADURAS EFECTUADAS

As soldaduras efectuadas com os parâmetros mencionados no item anterior, resultaram em diferentes características dos cordões efectuados, uma vez as condições de soldadura definidas têm diferentes entregas térmicas (figura 18). O que vai originar diferentes características das soldaduras, devido às diferentes condições de trabalho, impostas.

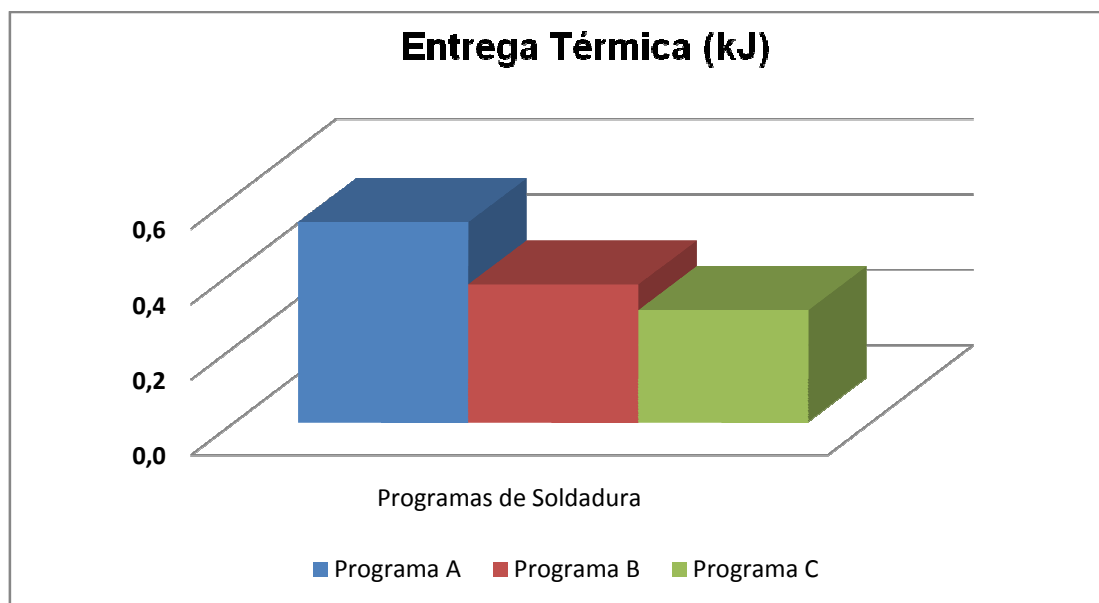


FIGURA 18 - GRÁFICO DA ENTREGA TÉRMICA CÁLCULADA PARA OS PROGRAMAS DE SOLDADURA.

### 9.3 ASPECTO VISUAL DAS SOLDADURAS DE TOPO E DEFEITOS VISUAIS

As imagens que se seguem, são representativas do aspecto visual das soldaduras de topo a topo obtidas com os diferentes programas de soldadura ensaiados (A, B e C) para este tipo de junta, apresentando boas características visuais, ou seja, cordões efectuados de forma contínua e sem a ocorrência de defeitos superficiais.



FIGURA 19 - IMAGEM REPRESENTATIVA DOS CORDÕES DE SOLDADURA EFECTUADOS COM O PROGRAMA A

#### Parâmetros de soldadura Programa A:

- × *Tensão:* 23 V
- × *Intensidade de corrente:* 210 A
- × *Velocidade de avanço:* 7,3 mm/s
- × *Gás utilizado:* Árgon + CO<sub>2</sub>
- × *Caudal de Gás:* 12 L/min
- × *Distância soldada:* 40 mm
- × *Diâmetro do fio:* 0,8 mm
- × *Velocidade de alimentação do fio:* 8 m/min

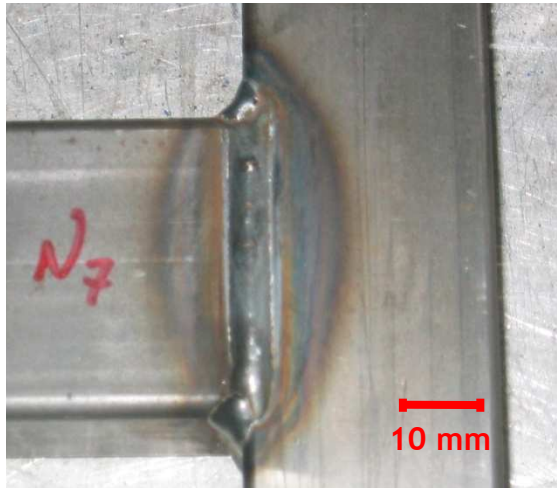


FIGURA 20 - IMAGEM REPRESENTATIVA DOS CORDÕES DE SOLDADURA EFECTUADOS COM O PROGRAMA B

**Parâmetros de soldadura Programa B:**

- × *Tensão:* 19 V
- × *Intensidade de corrente:* 175 A
- × *Velocidade de avanço:* 7,3 mm/s
- × *Gás utilizado:* Árgon + CO<sub>2</sub>
- × *Caudal de Gás:* 12 L/min
- × *Distância soldada:* 40 mm
- × *Diâmetro do fio:* 0,8 mm
- × *Velocidade de alimentação do fio:* 8 m/min

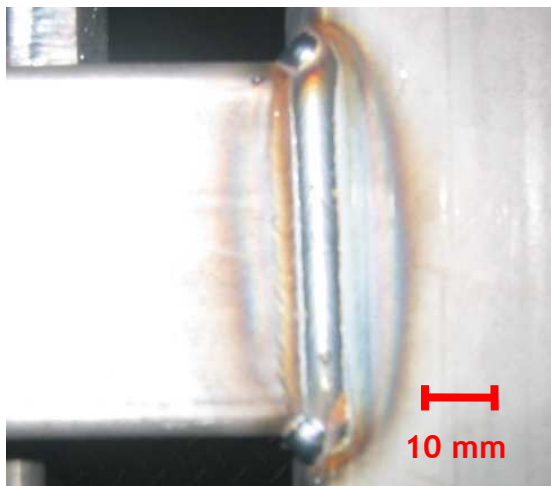


FIGURA 21 - IMAGEM REPRESENTATIVA DOS CORDÕES DE SOLDADURA EFECTUADOS COM O PROGRAMA B

**Parâmetros de soldadura Programa C:**

- × *Tensão:* 19 V
- × *Intensidade de corrente:* 175 A
- × *Velocidade de avanço:* 7,3 mm/s
- × *Gás utilizado:* Árgon + CO<sub>2</sub>
- × *Caudal de Gás:* 12 L/min
- × *Distância soldada:* 40 mm
- × *Diâmetro do fio:* 0,8 mm
- × *Velocidade de alimentação do fio:* 8 m/min

O aspecto visual das soldaduras como está patente nas Figuras 19, 20 e 21 são representativos das soldaduras efectuadas das diferentes condições impostas.

Contudo alguns dos cordões efectuados com os mesmos parâmetros atrás referidos não apresentavam estas características. A ocorrência de defeitos de soldadura ficam a dever-se a algumas condicionantes do processo como:

- × Colocação incorrecta dos tubos no gabarito de soldadura que originam:
  - ✓ Defeitos de alinhamento;
  - ✓ Folgas excessivas entre os componentes a soldar.

- × Programação incorrecta do posicionamento da tocha de soldadura:
  - ✓ Soldadura efectuada no material base;
  - ✓ Soldaduras descontínuas.

Alguns dos defeitos mencionados anteriormente estão evidenciados na tabela 10, bem como as possíveis causas da sua ocorrência.

TABELA 10 - DEFEITOS DE SOLDADURA NAS SOLDADURAS DE TOPO

<i>Defeitos</i>	<i>Imagem representativa do defeito</i>	<i>Possível causa do defeito</i>
<b>Soldadura efectuada sobre um dos materiais base</b>		Posicionamento incorrecto da tocha de soldadura
<b>Furos ou perfurações</b>		Folgas excessivas entre os materiais base
<b>Soldaduras descontínuas</b>		Falta de fusão momentânea do fio eléctrodo resultante da extinção do arco eléctrico

## 9.4 ASPECTO VISUAL DAS SOLDADURAS DE CANTO E DEFEITOS

As soldaduras de canto efectuada com os parâmetros de soldadura mencionados anteriormente que apresentaram qualidades satisfatórias foram as soldaduras obtidas com os parâmetros de soldadura dos programas A e B onde os cordões efectuada eram efectuada de forma contínua sem defeitos como demonstram as Figuras 22 e 23.



FIGURA 22 - IMAGEM REPRESENTATIVA DOS CORDÕES DE SOLDADURA EFECTUADOS COM O PROGRAMA A

**Parâmetros de soldadura programa A:**

- × *Tensão:* 23 V
- × *Intensidade de corrente:* 210 A
- × *Velocidade de avanço:* 7,3 mm/s
- × *Gás utilizado:* Árgon + CO<sub>2</sub>
- × *Caudal de Gás:* 12 L/min
- × *Distância soldada:* 20 mm
- × *Diâmetro do fio:* 0,8 mm
- × *Velocidade de alimentação do fio:* 8 m/min



FIGURA 23 - IMAGEM REPRESENTATIVA DOS CORDÕES DE SOLDADURA EFECTUADOS COM O PROGRAMA B

**Parâmetros de soldadura programa B:**

- × *Tensão:* 19 V
- × *Intensidade de corrente:* 175 A
- × *Velocidade de avanço:* 7,3 mm/s
- × *Gás utilizado:* Árgon + CO<sub>2</sub>
- × *Caudal de Gás:* 12 L/min
- × *Distância soldada:* 20 mm
- × *Diâmetro do fio:* 0,8 mm
- × *Velocidade de alimentação do fio:* 8 m/min

As imagens são representativas dos cordões efectuados, com os diferentes programas de soldadura e com qualidade visual satisfatória.

Quanto às soldaduras efectuadas com os parâmetros do Programa C atrás descrito, não apresentavam qualidades satisfatórias pois a fusão de material não ocorria de forma contínua, originado uma soldadura descontínua que não garante uma ligação de qualidade satisfatória.

Quanto aos defeitos mencionados anteriormente nas soldaduras topo-a topo, de má colocação das peças no suporte e de programação do robot, são também comuns na

soldadura de canto sendo a Figura 24 representativa da descontinuidade da soldadura efectuada originando uma soldadura por pontos.

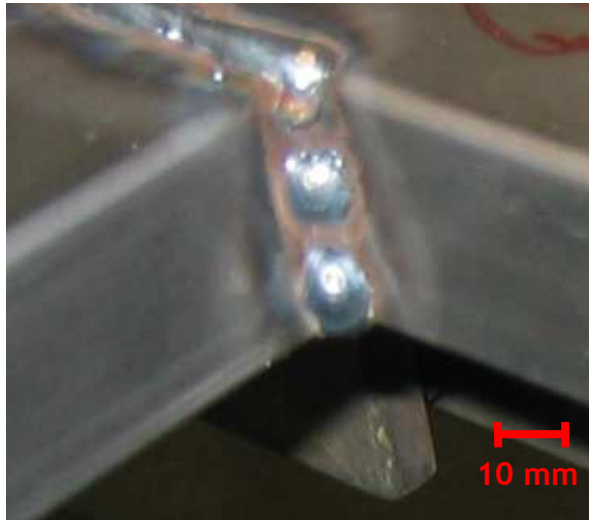


FIGURA 24 - IMAGEM ILUSTRATIVA DA DESCONTINUIDADE DAS SOLDADURAS EFECTUADAS COM O PROGRAMA C

## Parâmetros de soldadura programa C:

- × *Tensão*: 19 V
- × *Intensidade de corrente*: 175 A
- × *Velocidade de avanço*: 7,3 mm/s
- × *Gás utilizado*: Árgon e CO<sub>2</sub>
- × *Caudal de Gás*: 12 L/min
- × *Distância soldada*: 40 mm
- × *Diâmetro do fio*: 0,8 mm
- × *Velocidade de alimentação do fio*: 8 m/min

## 10 MÉTODOS DE ANÁLISE DAS SOLDADURAS

Com o intuito de avaliar as melhores características das soldaduras efectuadas no decorrer deste trabalho experimental algumas soldaduras foram sujeitas, a uma análise mais aprofundada como forma de definir um critério de selecção dos melhores parâmetros para a elaboração da peça em questão.

Os métodos de avaliação formam os seguintes:

- × Análise macrográfica das soldaduras;
- × Análise micrográfica das soldaduras;
- × Microdurezas nas diferentes zonas dos materiais soldados.

### 10.1 ENSAIOS REALIZADOS

#### 10.1.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras realizadas para o estudo macrográfico e micrográfico das soldaduras efectuadas, foram efectuadas com o recurso á montagem da secção transversal das soldaduras efectuadas, de forma a garantir a sua sustentabilidade nas operações de desbaste e polimento necessárias para a observação posterior.

As montagens foram efectuadas a frio com recurso ao material da marca AcryFix da Struers que é composto por um pó de metacrilato de metilo (AcryFix Powder), e um líquido endurecedor (AcryFix Liquid), que é misturado nas proporções de 2 para 1 em volume. Estes constituintes foram então misturados durante 30 segundos de forma a haver a homogeneização do polímero (Metacrilato de Metilo) e de seguida foi depositado sobre as amostras a observar, sendo necessário cerca de 15 minutos para a sua solidificação.



FIGURA 25 - IMAGEM ILUSTRATIVA DAS AMOSTRAS EFECTUADAS PARA OS DOIS TIPOS DE CONDIÇÕES SOLDADURAS DE TOPOA TOPO E SOLDADURAS DE CANTO

Após a preparação das amostras, estas foram então sujeitas aos passes de desbaste com uma granulometria decrescente (180, 300, 400 e 600 mesh) e de polimento com recurso a soluções de partículas de diamante de 6 $\mu$ m e 1 $\mu$ m.

### 10.1.2 EXAME MACROGRÁFICO

O exame macrográfico efectuado das soldaduras teve como objectivo, obter o maior número de dados sobre as características superficiais das soldaduras (defeitos visíveis) bem como, com recurso a amostragens destrutivas de forma a avaliar as suas características. Contudo esta análise é feita com o recurso à vista desarmada ou com recurso lupas de ampliações inferiores a 5x, de forma a fornecer o maior número possível de informações relevantes sobre a soldadura em causa [9, 10 e 21].

Com o estudo macrográfico das soldaduras pretende-se avaliar por um lado as anomalias geométricas ou físicas, e por outro lado validar as condições de soldadura com que foram efectuados [9, 10 e 21].

A análise das anomalias das soldaduras tem um carácter pontual, uma vez que a zona examinada pode não ser representativa da totalidade da soldadura, o que é uma das

limitações desta técnica. Mas com a análise macroestrutural das amostras podem-se fazer as seguintes avaliações:

- × Geométricas:
  - ✓ Desalinhamento dos bordos;
  - ✓ Deformação angular;
  - ✓ Bordos queimados;
  - ✓ Sobreespessura excessiva ou falta de material;
  
- × Defeitos físicos (ou de homogeneidade):
  - ✓ Falta de fusão (defeitos de penetração)
  - ✓ Porosidades
  - ✓ Inclusões não metálicas
  - ✓ Faltas de ligação colagens
  - ✓ Fissuras [10 e 21].

Com recurso à contrastação dos materiais (ataque químico) podem ainda ser evidenciadas as diferentes zonas da soldadura e proceder à sua medição e análise.

Esta técnica é um modo de identificar as heterogeneidades físicas e químicas existentes no material à escala macrográfica e, a partir da sua apreciação, obter informações sobre textura, estruturas, descontinuidades, homogeneidade, processos de fabricação, sanidade, estado do material (fragilidade), etc., e ajudar ainda, consoante a importância dos defeitos revelados e a utilização do produto, a definir a qualidade desse produto. [20]

De forma a evidenciar as diferentes zonas das soldaduras efectuadas foram sujeitas a um ataque químico para avaliação macroestrutural das amostras avaliar as suas dimensões sendo que o contraste foi obtido com recurso à solução de Nital 10% (solução composta por 10 ml de  $\text{HNO}_3$  + 90 ml de  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) durante alguns segundos [21].

Após a contratação das amostras com o ataque químico, foi efectuada a sua observação com recurso á uma lupa da marca Nikon, modelo SMZ-2T onde se procedeu à captação das imagens com recurso ao software PAQI para posterior análise e medição das diferentes zonas das soldaduras efectuadas.

## 10.1.3 ENSAIO MICROGRÁFICO

A realização do exame micrográfico às soldaduras teve como objectivo primordial avaliar as características estruturais ou de constituição do material, com o intuito de relacionar com as suas propriedades físicas e químicas e mecânicas.

Esta análise permite um estudo mais detalhado que o estudo macrográfico, nomeadamente sobre a constituição do material, permitindo desta forma estudar os seguintes itens:

- × Caracterizar e identificar as fases presentes, assim como definir a sua extensão e distribuição;
- × Identificar as diversas heterogeneidades, como inclusões não metálicas, segregações, fissuras internas, entre outras;
- × Avaliar o tamanho de grão, bem como a fracção volúmica das fases presentes
- × Avaliar a dimensão das inclusões e distribuição destas [9].

Quanto à análise das soldaduras estudadas estas foram analisadas após o polimento e ataque de contraste respectivo. O ataque de contraste utilizado foi com uma solução de Nital 2 % (solução composta por 2 ml de  $\text{HNO}_3$  + 98 ml de  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) durante alguns segundos de forma a evidenciar os constituintes [23].

Após a observação das amostras foram observadas ao Microscópio Óptico Composto (MOC) e respectiva captação de imagens para análise.

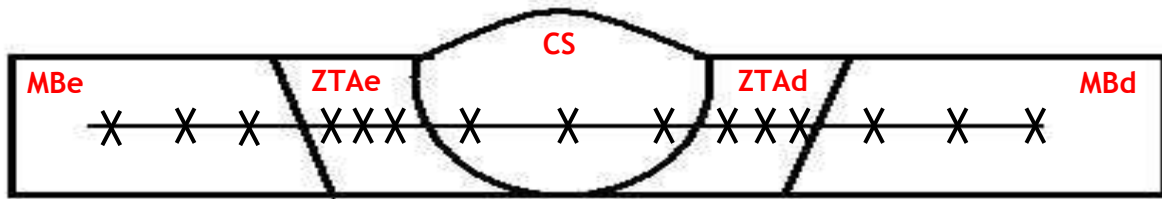
## 10.1.4 ENSAIO DE MICRODUREZAS VICKERS

O ensaio de microdureza foi realizado com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas nas diferentes zonas do material, que se formam com o decorrer das soldaduras, de forma a avaliar as diferenças entre as zonas originadas no processo [24].

Este ensaio consiste numa avaliação das propriedades de resistência mecânica e de ductilidade dos materiais com o recurso ao ensaio de microdureza Vickers, que avalia a resistência do material à penetração, com recurso a um penetrador em forma de pirâmide quadrangular de diamante [24].

O ensaio efectuado consistiu numa aplicação de uma carga de 0,98 N (100gF) durante 15 segundos nas amostras a ensaiar nas diversas zonas evidenciadas nos esquemas seguintes, onde o × que representa os locais das indentações efectuadas.

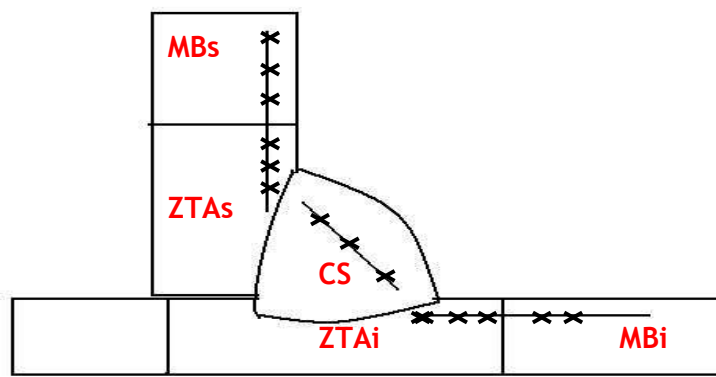
As soldaduras de topo a topo foram avaliadas segundo o seguinte esquema:



**Legenda:**

**MBe/MBd** - material base esquerda/direita, **ZTAe/ZTAd** - Zona termicamente afectada (esquerda/direita) e **CS** - cordão de soldadura.

As soldaduras de canto foram avaliadas segundo o seguinte esquema:



**Legenda:**

**MBs/MBi** - material base superior/inferior, **ZTAs/ZTAi** - Zona termicamente afectada superior/inferior e **CS** - cordão de soldadura.

O equipamento usado para a obtenção do ensaio de microdurezas foi um microdurímetro da marca SHIMADZU tipo M, nº87433.

## 11 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como a realização dos ensaios mencionados anteriormente foi realizado um estudo exaustivo das características soldaduras efectuadas. Desta forma passo a apresentar as características dos dois tipos de soldadura efectuados soldaduras de topo a topo e soldaduras de canto da estrutura tubular fabricada, com os diferentes parâmetros ensaiados, de forma a proceder à comparação destes e selecção das condições mais favoráveis para a sua produção em série.

Por forma, a obter uma melhor análise de cada condição de soldadura foram estudadas três amostras de cada uma das condições que foram definidas e realizadas com o decorrer do trabalho na Caetano Components.

## 11.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA

### 11.1.1 SOLDADURAS DE TOPO A TOPO

Para cada soldadura de topo foram efectuadas diversas fotomicrografias de forma a conseguir uma visualização global de todo o cordão de soldadura, bem como as zonas adjacentes a este sendo que após a visualização destas se fizeram algumas avaliações, comparações e conclusões sobre as diversas características evidenciadas por esta análise.

#### 11.1.1.1 PROGRAMA A:

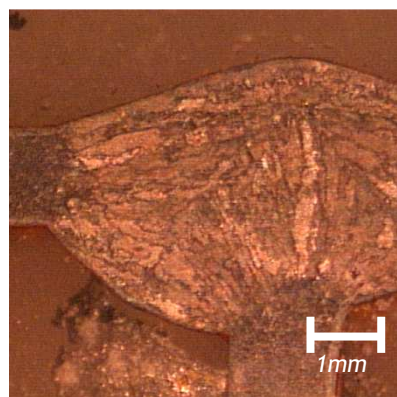


FIGURA 26 - AMOSTRA A1

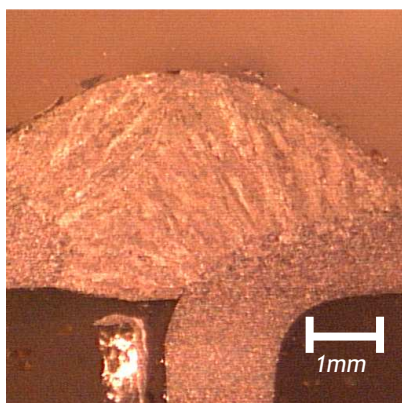


FIGURA 27 - AMOSTRA A2

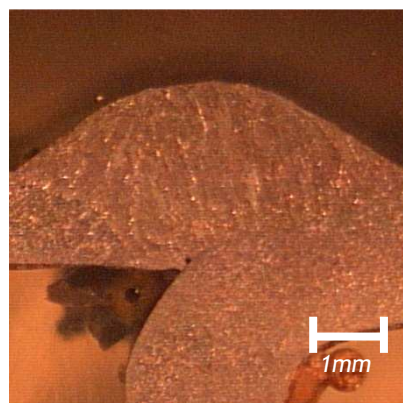


FIGURA 28 - AMOSTRA A3

TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DAS SOLDADURAS EFCTUADAS COMS OS PARÂMETROS DE SOLDADURA DO PROGRAMA A

Amostra	A1	A2	A3
Largura do cordão	7,1 mm	6,0 mm	6,2 mm
Altura do cordão	1,2 mm	1,4 mm	1,5 mm
Penetração obtida	Total	Total	Incompleta
ZTA esquerda	3,0 mm	2,1 mm	2,5 mm
ZTA direita	3,3 mm	3,0 mm	2,0 mm

Como demonstram as macrografias das soldaduras de topo efectuadas com o programa A, existe uma grande taxa de fusão do consumível garantido desta forma, uma penetração

total do material base. A amostra **A1** o cordão evidenciado na Figura 23 está explícito a intensidade de corrente excessiva, esta originou um cordão de elevadas dimensões bem como um escorrimento lateral da soldadura pelos materiais base. Quando às amostras **A2** e **A3** estas apresentam já dimensões do cordão menores e com penetração total do material fundido sem escorrimento lateral da soldadura como está evidenciado nas Figuras 27 e 28.

Quanto às alturas de cordões que estão evidenciadas na tabela 11 estas não apresentam grande variação nem dimensões exageradas estando compreendidas na ordem do 1,4 mm de altura nas amostras ensaiadas.

Quanto aos defeitos internos existentes nestas amostras ao nível macroscópico o único defeito visível é um poro na raiz do cordão da amostra **A3**, já o desalinhamento dos materiais base é também visível na amostra **A3**.

### 11.1.1.2 PROGRAMA B

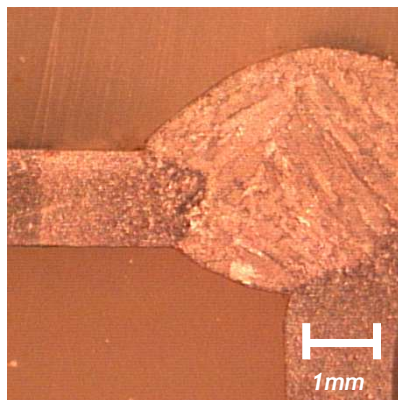


FIGURA 29 - AMOSTRA B1

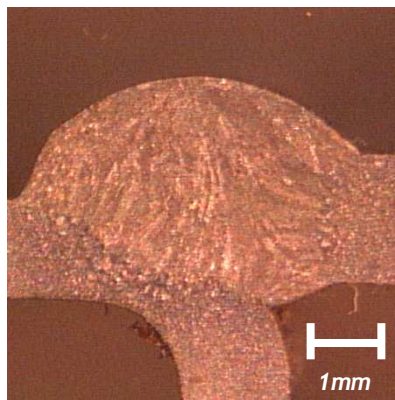


FIGURA 30 AMOSTRA B2

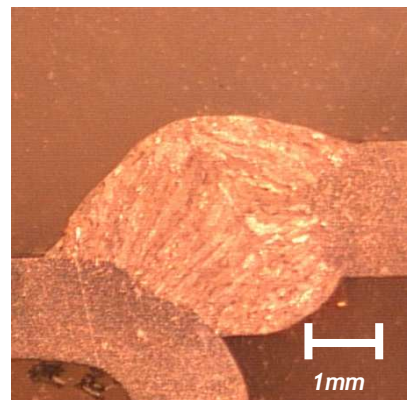


FIGURA 31 AMOSTRA B3

TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DAS SOLDADURAS EFCTUADAS COM OS PARÂMETROS DE SOLDADURA DO PROGRAMA B

Amostra	B1	B2	B3
Largura do cordão	5,6 mm	5,2 mm	4,3 mm
Altura do cordão	2,2 mm	2,3 mm	1,7 mm
Penetração obtida	Total	Total	Total
ZTA esquerda	2,4 mm	2,2 mm	3,0 mm
ZTA direita	2,8 mm	2,0 mm	1,7 mm

Com a análise mais cuidada das macrografias das soldaduras efectuadas com o programa de soldadura B, não se verificam defeitos nos cordões de soldadura, há apenas de referir o desalinhamento dos materiais base na amostra B3 devido a uma má colocação das peças no gabarito de soldadura o que origina um cordão com deformação angular devido ao desalinhamento dos materiais base e um ligeiro escorrimento da soldadura nas amostras B1 e B3 como se verifica nas Figuras 29 e 31.

Quanto ao aspecto dos cordões analisados, estes apresentam características comuns como altura e largura dos cordões sendo que a penetração da soldadura é garantida em todas as amostras analisadas.

### 11.1.1.3 PROGRAMA C

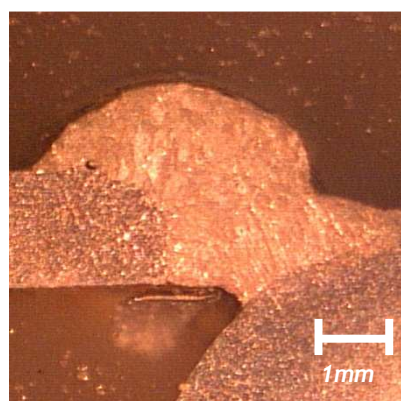


FIGURA 32 - AMOSTRA C1

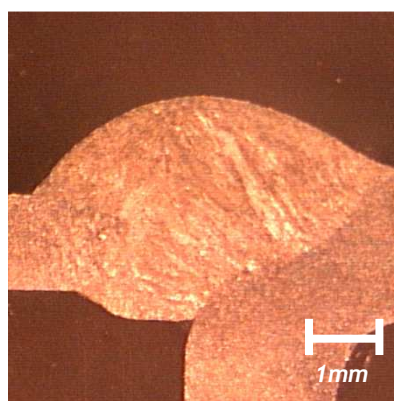


FIGURA 33 - AMOSTRA C2

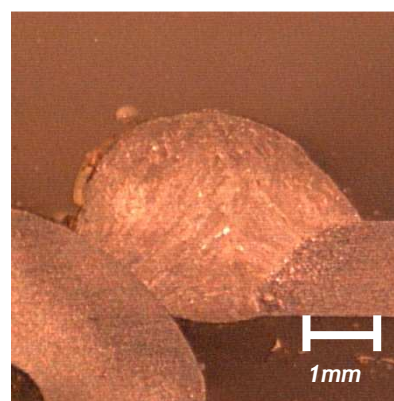


FIGURA 34 - AMOSTRA C3

TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DAS SOLDADURAS EFCTUADAS COMS OS PARÂMETROS DE SOLDADURA DO PROGRAMA B

	Amostra C1	Amostra C2	Amostra C3
Largura do cordão	3,3 mm	4,3 mm	4,0 mm
Altura do cordão	2,3 mm	2,2 mm	1,6 mm
Penetração obtida	Total	Total	Incompleta
ZTA esquerda	2,2 mm	2,4 mm	3,0 mm
ZTA direita	2,0 mm	2,8 mm	1,7 mm

As características das soldaduras efectuadas com o programa de soldadura C, apresentam desde logo alguns defeitos visuais como a fusão insuficiente, que não garante uma ligação adequada dos materiais base como está evidenciado nas Figuras 32 e 34. Contudo a falta de ligação da amostra C1 pode ficar a dever a uma má colocação da tocha de soldadura,

que incide sobre o material base da esquerda originando a deposição preferencial sobre este. Há ainda a referir as pequenas dimensões dos cordões de soldadura efectuados. Que podem ser explicados pelas baixas intensidade de corrente utilizadas que originam deposições menores de material e penetrações da soldadura inferiores, resultantes de uma fusão menor do consumível [4].

## 11.1.1.4 ANÁLISE DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLDADURA PARA AS SOLDADURAS DE TOPO A TOPO

Com a comparação dos elementos extraídos das soldaduras de topo efectuadas com os diferentes programas de soldadura (A, B e C) podem-se fazer algumas análises que as distinguem. Desde logo há que referir que para maiores entregas térmicas favorecem maiores dimensões dos cordões de soldadura, havendo um decréscimo das suas dimensões das condições dos programa A até ao programa C como ficou implícito na análise das tabelas 11, 12 e 13 [3, 4].

Quanto às zonas termicamente afectadas (ZTA) estas também apresentam variações mediante os programas impostos como está evidenciado na Figura 35.

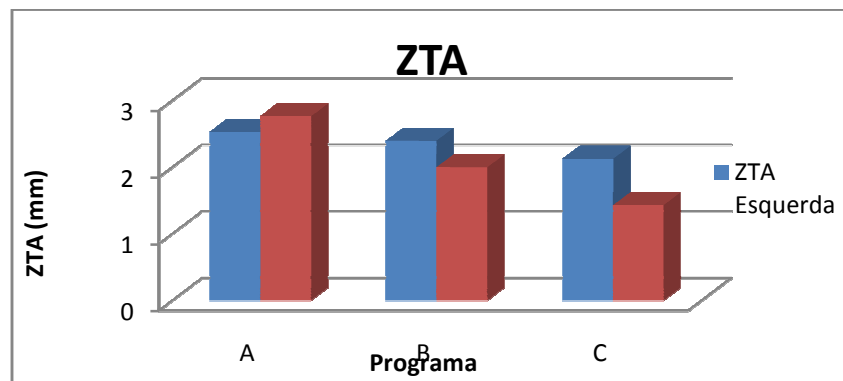


FIGURA 35 - GRÁFICO ILUSTRATIVO DO DECRESCIMO DAS DIMENSÕES DAS ZONAS TÉRMICAMENTE AFECTADAS DOS DIFERENTES PROGRAMAS DE SOLDADURA IMPOSTOS

Com a análise da Figura 35 pode-se verificar um decréscimo das dimensões das ZTAs do material base, o que corrobora que menores entregas térmicas ( $Q$ ) resultam em ZTAs de menores dimensões [2].

O desalinhamento dos materiais base, verificado em alguns cordões de soldadura pode ter ocorrido devido a distorções de rotação provocadas pelas tensões internas criadas no arrefecimento do banho metálico. Uma das possíveis causas para a ocorrência destas distorções pode ser a falta de fixadores dos pontos de soldadura da estrutura de suporte dos tubos [4].

## 11.1.2 SOLDADURAS DE CANTO

As soldaduras de canto, onde foi efectuado o estudo macrográfico, foram apenas as soldaduras das condições realizadas com os programas A e B, uma vez que, as efectuadas com o programa C não apresentavam soldaduras contínuas, não garantindo desde logo a viabilidade destas. Desta forma passaremos à análise das soldaduras efectuadas com os programas A e B.

### 11.1.2.1 PROGRAMA A

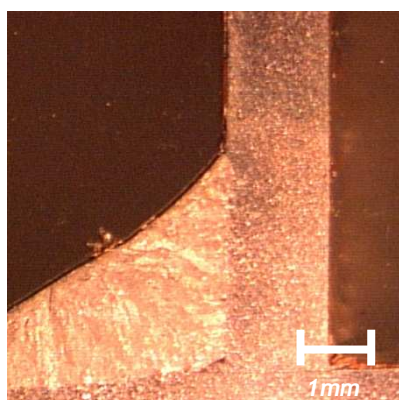


FIGURA 36 - AMOSTRA A1 CANTO

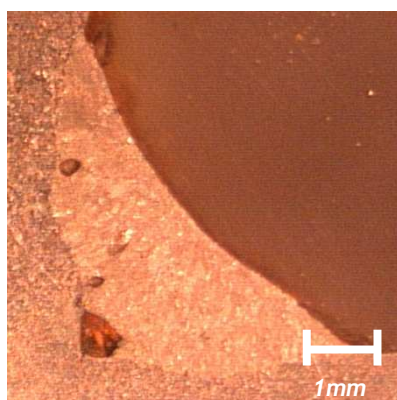


FIGURA 37 - AMOSTRA A2 CANTO

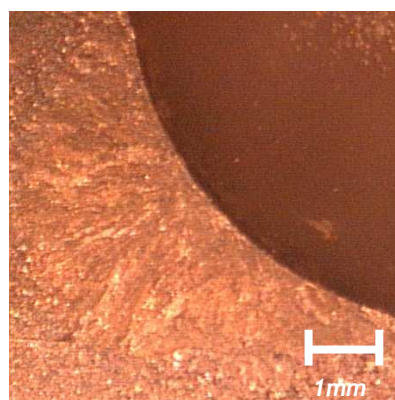


FIGURA 38 - AMOSTRA A3 CANTO

TABELA 14 - CARACTERÍSTICAS DAS SOLDADURAS EFECTUADAS COM O PROGRAMA A PARA AS SOLDADURAS DE CANTO

Amostra	A1 Canto	A2 Canto	A3 Canto
Garganta do cordão	2,3 mm	2,5 mm	3,0 mm
Comprimento da zona vertical do cordão	3,4 mm	4,5 mm	6,2 mm
Comprimento da zona horizontal do cordão	5,8 mm	4,0 mm	6,1 mm
ZTA superior	3,5 mm	4,2 mm	7,6 mm
ZTA inferior	6,7 mm	7,4 mm	10 mm
Penetração	Total	Total	Total

As condições de soldadura impostas para as soldaduras de canto com o programa A originaram algumas diferenças nos cordões efectuados, desde logo, há que referir a existência de porosidade na amostra A2 (Figura 37). Esta pode ter ocorrido por uma falta

de protecção do gás momentânea ou mesmo devido às elevadas correntes utilizadas que podem ter causado turbulência do banho metálico e originar a porosidade verificada [2 4].

Com a análise dos dados apresentados na tabela 14 verifica-se que a penetração de soldadura foi conseguida nas três amostras, bem como gargantas do cordão de dimensões similares. Existindo uma variação no comprimentos verticais e horizontais que se devem ficar a dever, aos diferentes posicionamentos da tocha.

Em forma de resumo pode-se afirmar que as soldaduras efectuadas apresentam qualidades satisfatórias não havendo excesso de deposição de material fundido que poderiam provocar distorções nas peças e que garantem a penetração da soldadura em todas as amostras ensaiadas como ficou evidenciado.

### 11.1.2.2 PROGRAMA B

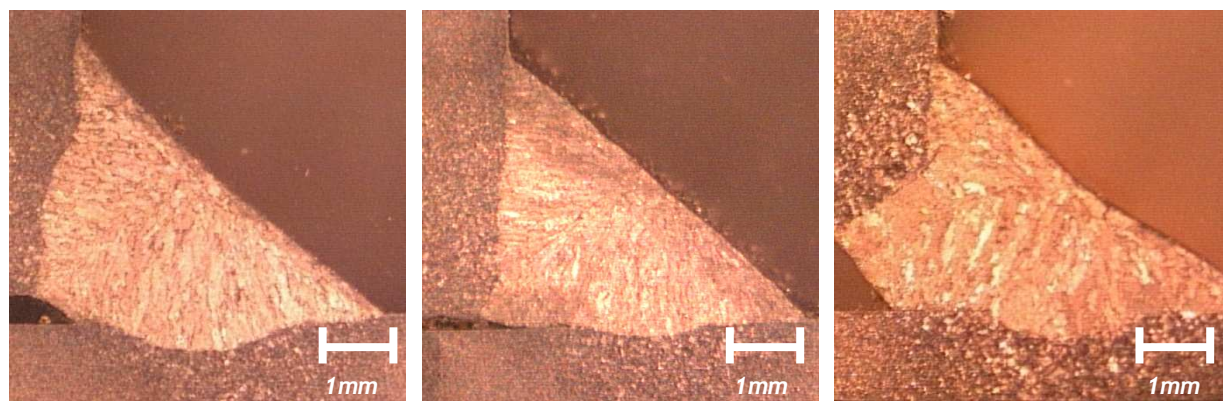


FIGURA 39 - AMOSTRA B1 CANTO

FIGURA 40 - AMOSTRA B2 CANTO

FIGURA 41 - AMOSTRA B3 CANTO

TABELA 15 - CARACTERISTICAS DAS SOLDADURAS EFECTUADAS COM O PROGRAMA B PARA AS SOLDADURAS DE CANTO

Amostra	B1 Canto	B2 Canto	B3 Canto
Garganta do cordão	3,0 mm	3,2 mm	2,8 mm
Comprimento da zona vertical do cordão	4,0 mm	3,8 mm	3,4 mm
Comprimento da zona horizontal do cordão	4,8 mm	4,1 mm	5,2 mm
ZTA superior	4,2 mm	4,1 mm	3,3 mm
ZTA inferior	6,3 mm	6,2 mm	7,6 mm
Penetração	Incompleta	Incompleta	Incompleta

Da análise nas macrografias das soldaduras de canto efectuadas com o programa de soldadura B, e com os dados retirados destas, pode-se verificar desde logo, a existência de folgas entre os dois materiais base onde a mais notória é da amostra B3 originado um defeito de má colocação das peças que origina soldadura deficiente [22].

A penetração da soldadura característica destes parâmetros é muito superficial, o que não é um bom indicador de ligação, pois como há folgas entre os materiais base, a penetração deveria ser facilitada por haver fusão dos materiais base e isso não se verifica.

A geometria do cordão, não apresenta excesso de soldadura o que é um bom indicador, pois quanto maior o cordão efectuado maiores as tensões resultantes da contracção que ocorre com solidificação do material fundido [22].

Com as informações retiradas das amostras observadas pode-se verificar que a intensidade de corrente ensaiada nestas condições não garante penetração necessária da soldadura para efectuar ligações sustentáveis dos materiais. Contudo as soldaduras estudadas não foram as mais adequadas uma vez que as folgas existentes podem deturpar as conclusões efectuadas, podendo as soldaduras apresentar características mais favoráveis se não houve-se as existências de folgas entre os materiais.

### 11.1.2.3 ANÁLISE DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SOLDADURA ENSAIADAS PARA AS SOLDADURAS DE CANTO

Através dos dados atrás descritos pode-se fazer uma análise das soldaduras obtidas de onde se denota as melhores características para as soldaduras efectuadas com o programa A em detrimento do programa B. As características que as distinguem são a existência de folgas nas soldaduras do tipo B, bem como uma menor penetração da soldadura no material base evidenciado nas macrografias. As amostras analisadas das condições do programa A apresentam melhores penetrações e inexistência de folgas que comprometam a ligação.

Quanto á análise das ZTAs obtidas com as diferentes condições de soldadura denota-se que, como verificado nas soldaduras de topo-a-topo que o programa A vai produzir ZTAs de maiores dimensões que o programa B devido à maior entrega térmica que produz ao material como se pode verificar na Figura 42.

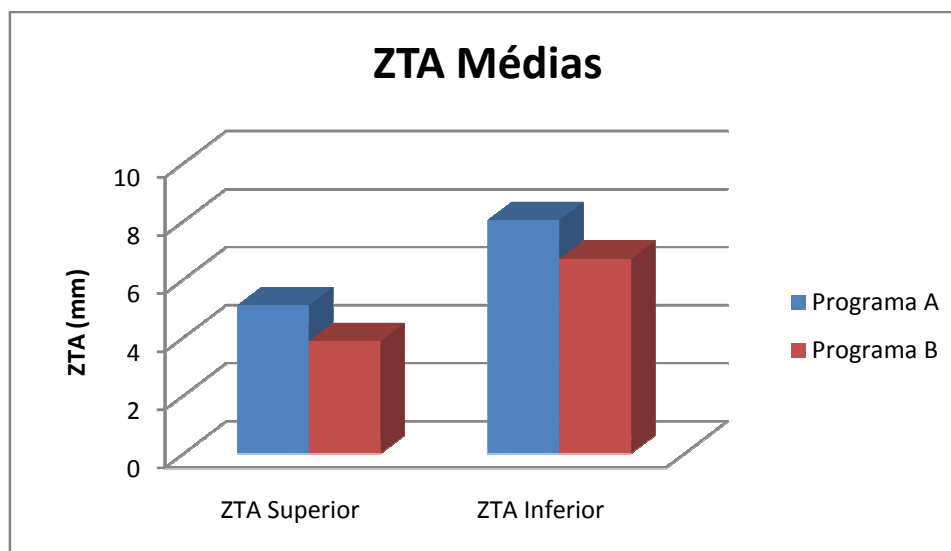


FIGURA 42 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DAS VARIAÇÕES DAS ZTAS NAS SOLDADURAS DE CANTO PARA OS PROGRAMAS DE SOLDADURA A E B

## 11.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Uma vez que os materiais utilizados durante o trabalho formam os mesmos, as micrografias apresentadas são representativas das estruturas obtidas nas diversas amostras analisadas. Desta forma, foram analisadas todas as zonas do material de forma a tirar algumas ilações sobre o comportamento dos materiais utilizados após soldadura bem como retirar informações relativamente à estrutura metalográfica do aço utilizado S235 JR bem como as estruturas resultantes após soldadura com o fio consumível utilizado G3Si1.

### 11.2.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO MATERIAL BASE

O aço S235 como foi referido anteriormente é um aço de médio carbono uma vez que possui um teor de carbono de 0,17 %, ou seja, é um aço hipoeutectoide estando situado no diagrama ferro carbono à esquerda do ponto eutectoide (0,77% C).

A estrutura típica destes aços é uma estrutura inteiramente ferrítica proeutectoide com a presença de forma aleatória de algumas colónias de perlite como está evidenciado na Figura 43 [23].

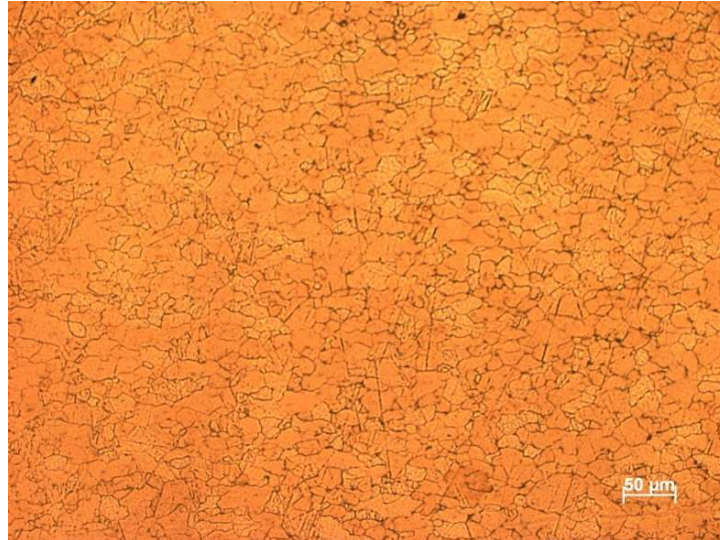


FIGURA 43 - ESTRUTURA METALOGRAFICA REPRESENTATIVA DO AÇO S235 ONDE SE DENOTA A MATRIZ FERRITICA COM A PRESENÇA DE ALGUMAS COLÓNIAS DE PERLITE. NITAL 2%

### 11.2.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS SOLDADURAS

A soldadura por arco como evidenciado na análise macroestrutural origina diferentes zonas ao longo do material soldado, estas zonas são caracterizadas por diferentes microestruturas devido aos diferentes gradientes térmicos a que o material é sujeito.

As zonas que se podem diferenciar são então as seguintes a zona fundida onde se pode verificar a estrutura de Widmanstätten que é composta por grãos colunares, característica das soldaduras de um passe único, onde as colónias de perlite formadas são envolvidas por uma ferrite pró-eutectoide que lhe dá o aspecto característico apresentado na Figura 44. A zona adjacente ao cordão de soldadura ZTA do aço é caracterizada por diferentes zonas ao longo da sua extensão, apresentando diferentes características como se pode visualizar na Figura 45 o tamanho de grão grosseiro presente junto á linha de fusão, devido ao sobreaquecimento excessivo provocado pelo metal depositado na ordem do 1100 e 1500°C esta temperatura elevada faz com que haja formação de grãos austeníticos de elevadas dimensões que provoca um aumento da temperabilidade, resultando no seu arrefecimento em estruturas ferrítico-perlíticas grosseiras. A segunda zona denominada de zona de recristalização, ocorre devido ao gradiente térmico menos intenso imposto, que promove a formação de novos grãos ferríticos que tiveram origem com a austenitização parcial ocorrida entre as linhas  $Ac_1$  e  $Ac_3$  do diagrama Fe-C [23 e 25].

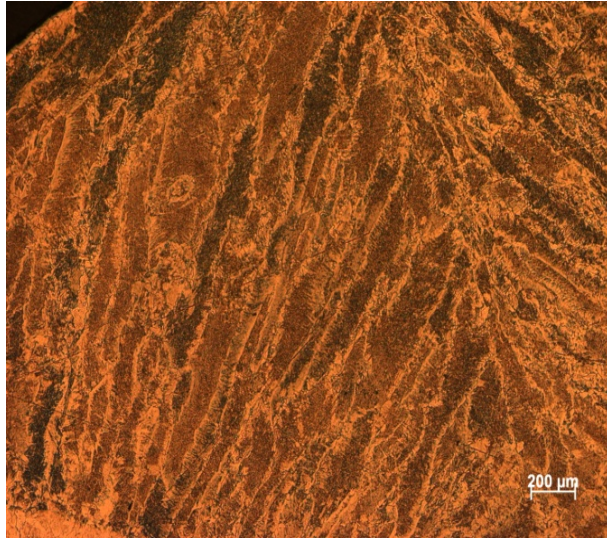


FIGURA 44 - GRÃOS COLUNARES DO CORDÃO DE SOLDADURA ONDE SE DENOTA AS COLÓNIAS DE PERLITE COM UMA TONALIDADE MAIS ESCURA ENVOLVIDAS POR FERRITE PRO-EUTECTOIDE A CLARO. NITAL 2%

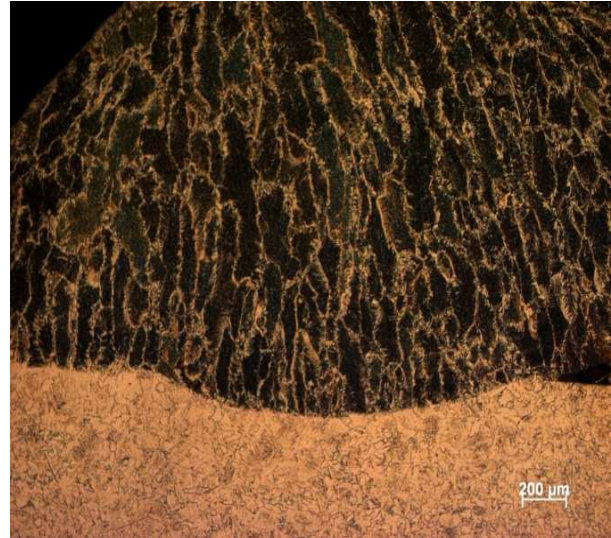


FIGURA 45 - GRÃOS COLUNARES DO CORDÃO DE SOLDADURA , LINHA DE FUSÃO E ZONA DE CRESCIMENTO DE GRÃO. NITAL 2%

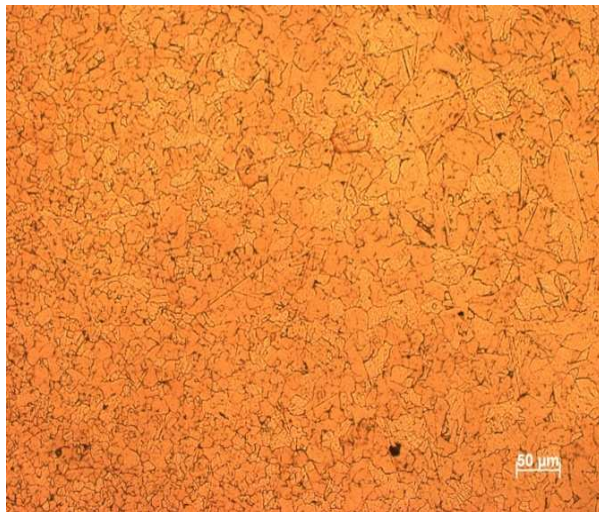


FIGURA 46 - ZTA DO AÇO COM AS DUAS ESTRUTURAS DA ZTA GROSSEIRA DE FERRITE E COLÓNIAS DE PERLITE GROSSEIRAS E ZTA RECRISTALIZADA COM UM TAMANHO DE GRÃO BASTANTE MENOR. NITAL 2%

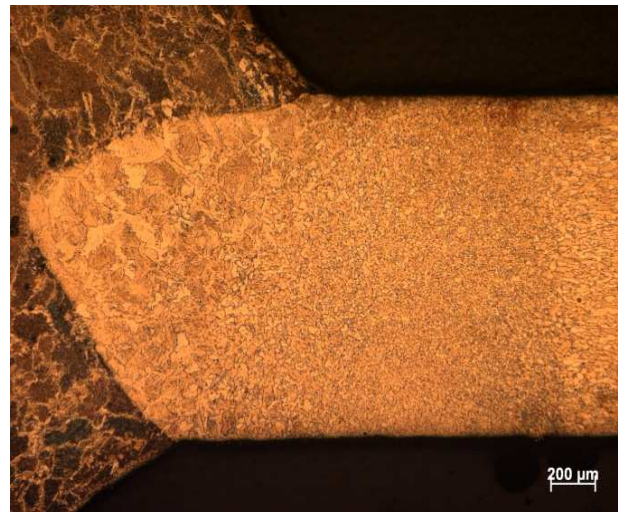


FIGURA 47 - PANORÂMICA GERAL DE TODAS AS ZONAS RESULTANTES DA SOLDADURA EFECTUADA. NITAL 2%

A zona termicamente afectada fica então definida, como uma variação microestrutural ao longo do material base, sendo a que pode então ser dividida em duas zonas: a zona de grãos grosseiros de ferrite pró-eutectoide e a zona recristalizada (Figura 47).

### 11.3 MICRODUREZAS

Com a realização do ensaio de microdurezas Vickers, pretendeu-se verificar as influências da dos parâmetros ensaiados nas variações de dureza dos materiais. Respectivamente as apresentadas pelo material base, zona termicamente afectada e cordão de soldadura.

#### 11.3.1 SOLDADURAS DE TOPO

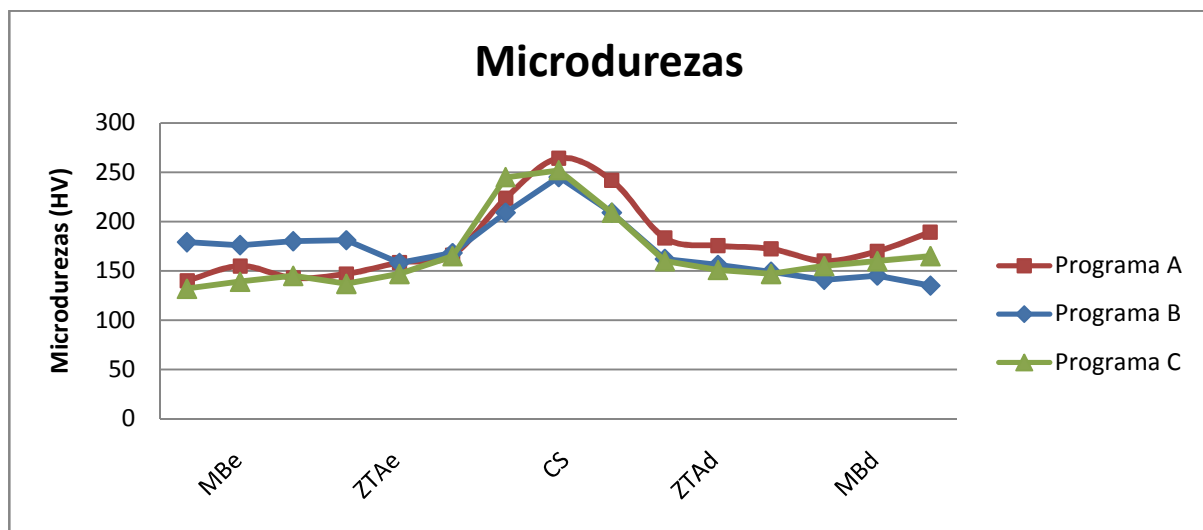


FIGURA 48 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DAS MICRODUREZAS EFECTUADAS AO AÇO S235 NOS DIFERENTES PROGRAMAS DE SOLDADURA ENSAIADOS NAS SOLDADURAS DE TOPO

Com a comparação das durezas obtidas no ensaio das diferentes amostras, das três condições de soldadura impostas podem-se retirar algumas ilações, com a observação do gráfico da Figura 48. Desta análise, pode-se verificar a variação dos valores de microdurezas nas diferentes zonas dos materiais ligados. A maior dureza obtida foi conseguida nos cordões de soldadura (CS) que regista uma dureza média de 225 HV nas amostras com os três programas testados. As durezas obtidas nas zonas termicamente afectadas (ZTAe e ZTAd), apresentam um decréscimo de dureza em relação ao cordão de soldadura na casa dos 75 HV, embora o seu comportamento não seja muito constante como está evidenciado no gráfico da Figura 48, pois as identificações efectuadas mais próximas do cordão de soldadura apresentam maior dureza que a zona mais próxima do material base, este efeito pode ser resultante da incorporação de carbono nos grãos de austenite formados na zona adjacente ao cordão, provocando no arrefecimento uma maior dureza do material devido aos maiores níveis de carbono apresentados, o que não acontece na zona recristalizada. A dureza do material base é da ordem dos 150 HV, apresentando uma

dureza inferior ao cordão de soldadura que ronda os 100 HV apresentando um decréscimo para a ZTA de cerca de 25 HV.

A queda de dureza verificada entre o material fundido até ao material base pode ser explicada pelo simples facto de o fio consumível possuir uma composição química à base de silício e manganês, que promove um efeito endurecedor e maior efeito de têmpera aquando do arrefecimento, possuindo desta forma uma dureza superior do cordão de soldadura quando comparado com os materiais base e a ZTAs das amostras ensaiadas.

### 11.3.2 SOLDADURAS DE CANTO

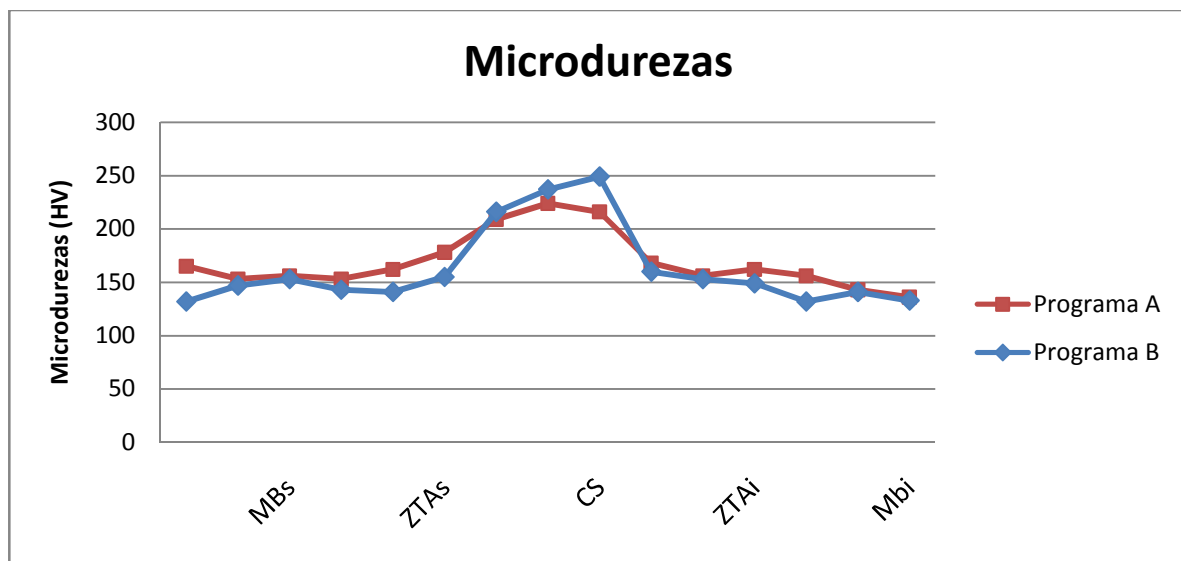


FIGURA 49 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DAS MICRODUREZAS EFECTUADAS AO AÇO S235 NOS DIFERENTES PROGRAMAS DE SOLDADURA ENSAIADOS NAS SOLDADURAS DE CANTO

As durezas obtidas com as soldaduras de canto (Figura 49), apresentam as mesmas variações de durezas das obtidas para as soldaduras de topo-a-topo, ou seja, apresenta durezas do cordão de soldadura acima dos, 200 HV. A uma dureza mais elevada na identificação mais próxima do cordão de soldadura (grãos grosseiros) da ZTA foi mais uma vez identificada em comparação com as obtidas na zona recristalizada. O material base continua a apresentar uma dureza da ordem dos 150 HV como era de esperar para as posições inferiores e superiores.

O efeito endurecedor dos elementos de liga presentes no fio eléctrico (silício e manganês) como verificado nas soldaduras de topo a topo analisadas anteriormente, justificam a maior dureza do cordão de soldadura em relação às zonas adjacentes devido ao maior efeito de têmpera resultante do seu arrefecimento.

## 12 CONCLUSÕES

Com a realização do estudo efectuado sobre as soldaduras de estruturas tubulares fabricadas de forma automática por um robot de soldadura MIG/MAG podem-se tirar as seguintes conclusões:

- ✘ A elaboração do gabarito de soldadura é uma etapa fundamental para a soldadura robotizada de estruturas tubulares, pois é responsável pela colocação de todas as peças necessárias, garantir o cumprimento das cotas pré-definidas e libertar os nós de soldadura (zonas de soldadura) de forma a permitir o acesso da tocha de soldadura aos pontos de soldadura. A colocação das guias de encaixe dos tubos e dos fixadores das peças são etapas da elaboração de elevada complexidade, pois é difícil prever as distorções da peça o que dificulta a colocação das guias, já os fixadores devem ser colocados junto aos pontos de soldadura eliminando desta forma defeitos como o desalinhamento dos materiais base.
- ✘ A programação do Robot é um factor de elevada importância para a execução da soldadura, de forma a garantir a boa colocação da tocha de soldadura nas juntas e não sobre os materiais base. A escolha correcta da sequência de soldadura deve ser levada em conta de forma a diminuir as distorções provocadas pelas elevadas temperaturas a que os materiais são sujeitos.
- ✘ As características das soldaduras de topo como os diferentes programas de soldadura ensaiados resultaram em diferentes características dos cordões obtidos devido às diferentes entregas térmicas inerentes a cada condição de soldadura. Desde logo há que referir que o programa A que apresenta maior entrega térmica resulta em cordões com espessuras mais elevadas e apresenta grande penetração havendo o risco de escorrimento do material depositado e excesso de material. O programa C com a menor entrega térmica dos programas ensaiados apresentou menores deposições de material bem como uma penetração da soldadura insuficiente não garantindo nas soldaduras estudadas a ligação total dos materiais. O programa B com a entrega térmica intermédia foi o que apresentou melhores características da soldadura não havendo deposição excessiva de material e garantindo penetração total das soldaduras efectuadas e espessuras de cordão com dimensões satisfatórias.

- ✘ No que respeita às soldaduras de canto efectuadas com os programas definidos, o programa C não apresentou características da soldadura satisfatórias, não havendo continuidade da soldadura efectuada originando uma soldadura descontínua, denominada de soldadura por pontos que se deveu às baixas intensidade de corrente utilizadas que não garantem a manutenção de um arco estável. O programa A foi o que apresentou melhores características para este tipo de soldadura uma vez que garantiu a penetração e dimensões do cordão satisfatórias. No programa B as amostras analisadas apresentavam todas folgas excessivas entre os materiais contudo a penetração sobre o material base era algo superficial, o que não é um bom indicador de ligação dos materiais.
  
- ✘ A análise macroestrutural das soldaduras verificou ser uma ferramenta de grande utilidade na avaliação de defeitos. Sendo que os defeitos detectados formam na sua maioria desalinhamento dos materiais base que se ficam a dever à falta de fixadores em alguns nós de soldadura, folgas existentes entre os materiais, porosidades internas e falta de penetração das soldaduras.
  
- ✘ As medições efectuadas das ZTAs, demonstrou a influência das diferentes entregas térmicas testadas, originando zonas termicamente afectadas com diferentes dimensões. As maiores dimensões foram obtidas com o programa de soldadura A e as mais baixas com o programa de soldadura C, o que explica a influência da entrega térmica na variação microestrutural.

## 13 BIBLIOGRAFIA

- [1] - American Welding Society; “Welding Handbook Volume 2: Welding Processes ”; 8ª Edição; 1991; United Sates of America;
- [2] - America welding society; “Welding Power Handbook : A Basic Manual on the theory and use arc welding power suppllies”; 1973 Union Carbide Corporation, New York;
- [3] - ASM Handbook; “Welding Brazing and Soldering”; Volume 6; 1998;
- [4] - Kon, Sindo; “Welding Metallurgy Second Edition”; 2003 John Wiley and Sons Inc, Hoboken New Jersey;
- [5] - Weman, Klas; “Welding Processes Handbook”; 2003 Woodhead Publishing Ltd, Abington Hall, Abington Cambridge;
- [6] - Pires, J. Norberto; Loureiro, Altino; Bölmsjo, Gunnar; “Welding Robots - Technology, System Issues and Aplications”; 2006 Springer-Verlag, London
- [7] - Killing, Robert; “Welding Processes and Thermal Cutting”; 2001 Verlag für ScheiBen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [8] - Liedtke, M. and Krampen; J.; “Welding recommendations for modern tubular steels”, 2009, Taylor & Francis Group, London UK
- [9] - Dias Lopes, E. M.; Miranda, R. M.; Metalurgia Da Soldadura; ISQ - Edições técnicas do Instituto de soldadura e qualidade; 1993
- [10] - Granjon, H.; “*Bases Metalúrgicas da soldadura*”;1998 Publicações da Soldadura Autogénea; 32, Boulevard de la Chapelle 75880 Paris;
- [11] - AWS Welding Handbook Volume 1 - Fundamentals of Welding; 1968
- [12] - ASM Handbook; “Properties and Selection Irons, Steels, and High-Performance Alloys”; Volume 1; 2005;

- [13] - Instituto Português da Qualidade; “Recomendações para a soldadura de materiais metálicos; Parte 2: Soldadura por arco de aços ferríticos: NP EN 1011-2+A1” CEN
- [14] Boyes, William E.; Bakerjian Ramon; “Handbook of Jig and Fixtures Design”;1989 Society of Manufacturing Engineers SME.
- [15] - British Standard; “Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steel”:BS EN 10219-1:1997
- [16] - AWS Welding Handbook Volume 4 - “Metals and their weldability”; 1973
- [17] - Welding Handbook; “Consumables for Manual and Automatic Welding - Eight Edition”; 2008 ESAB
- [18] - European committee for standardization; “Welding consumables: shielding gases for arc welding and cutting: DIN EN 439-1994”; CEN
- [19] - [www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com) (acedido a 28 de Julho 2009)
- [20] - [www.kemppi.com](http://www.kemppi.com) (acedido a 28 de Julho 2009)
- [21] - Vander Voort, George F.; “Metallography: principles and practice”; 1984; McGraw-Hill New York.
- [22] - Lima, A. A.; Cunha, A. P.; Tecnologia de Soldadura; A. Jorge Lima,Lda. 2004.
- [23] - ASM Metals Handbook volume 9 - Metallography and Microstructures; 1985.
- [24] - Davin, J.P., Magalhães, A. G.; “Ensaio mecânicos e tecnológicos” 2ª Edição;2004 Poblindústria Edições Técnicas, Porto.
- [25] - Barralis, J., Maeder,G; “Prontuário de Metalurgia”;1997; Fundação Caulouse Glubenkian, Lisboa.