

**Implementação de fios fluxados metal-cored em
soldadura mecanizada**

Estaleiros Navais de Viana do Castelo

João Pedro do Rego Lima

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador nos ENVC: Engenheiro Alfredo Silva

Orientadores na FEUP: Prof. Paulo M. S. Tavares de Castro

Prof. Miguel A. V. de Figueiredo



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2008

Ao meu pai

Resumo

A concorrência imposta pelas economias emergentes tem aumentado a pressão económica sobre os países desenvolvidos com produtos a preço inferior. A resposta por parte das indústrias ameaçadas tem vindo a ser feita através do desenvolvimento de novas técnicas de produção, que possam compensar os menores custos da mão-de-obra dos seus rivais. Em paralelo, tem sido feita uma grande aposta nos padrões de qualidade. Na indústria naval, esta concorrência tem levado ao fecho de inúmeros estaleiros de construção. Em resposta, os estaleiros dos países ameaçados têm redefinido as suas estratégias, de forma a construir navios mais avançados e adoptando técnicas de produção mais evoluídas.

Este trabalho descreve o estudo elaborado, tendo em vista a introdução de fios fluxados de alma metálica em oficinas de construção naval que utilizem soldadura mecanizada. O sistema em causa baseia-se no recurso a sistemas de soldadura MAG acoplados a tractores de soldadura mecanizados através, dos quais seja possível obter rendimentos superiores com menores custos, sem comprometer a qualidade do produto final.

Os trabalhos realizados compreenderam uma análise ao actual processo, providenciando um termo de comparação com a nova configuração do processo. Foram efectuados uma série de testes com vista a adoptar um consumível mais apropriado. Efectuaram-se também alguns testes mecânicos para assegurar a qualidade do produto final.

Os trabalhos levados a cabo permitiram concluir que a substituição de fios fluxados de tipo rutílico por fluxados de alma metálica em sistemas mecanizados de soldadura semi-automática, usando Dióxido de Carbono como gás de protecção, não tem resultados satisfatórios a nível prático ou produtivo.

A utilização de misturas à base de Argon aplicadas aos ditos sistemas permite obter soldaduras de melhor qualidade e maiores taxas de produtividade relativamente aos fios rutilicos, sem aumentar significativamente os custos.

Abstract

The world is changing. The competition imposed by emerging economies increases the pressure on developed countries with products at a much lower price. This resulted in a response, by the threatened industries, to the development of more advanced production techniques that can compensate the lower labour costs of their rivals. Parallel to this, is the great emphasis that is applied on the quality standards of the final product. In the naval industry, this ferocious competition is leading to the bankruptcy of a vast number of shipyards. The response of the threatened countries' shipyards was to redefine their strategies in order to build more advanced vessels with the use of the most recent technologies as well as the adoption of more advanced techniques of production.

This paper reports the study of one such attempt. It describes the studies about the viability of introducing metal-cored wires on mechanized welding found on workshops in shipbuilding companies. The procedure focused on MAG welding systems used on mechanized welding tractors to provide a solution that could ensure both high productivity and low operating costs without compromising quality on the result.

The work carried out consisted of a survey about the current processes used, providing a base for comparison. In order to select the most indicated cored wire, a series of them were tested. A small number of mechanical tests were also done in order to ensure quality standards.

The work that has been done lead to the conclusion that the substitution of rutile type fluxed cored wires by metal-cored wires in mechanized semi-automatic systems, using CO₂ as a shielding gas, is neither profitable nor practical.

Also, the use of metal-cored wires with Argon based mixtures applied to such systems is capable of providing better quality welding and higher productivity rates than the rutile type ones without raising the costs.

Agradecimentos

Aos *Estaleiros Navais de Viana do Castelo* pela aceitação do projecto.

Ao engenheiro *Alfredo Silva*, pela orientação e apoio providenciados. Pela sua visão do que deve ser um estágio numa empresa, que se revelou coincidente com a do autor aquando da escolha deste projecto.

Ao professor *Paulo Tavares de Castro* pela compreensão, orientação e liberdade permitida que potenciaram a componente didáctica de todo o projecto.

Ao professor *Miguel Figueiredo*, pela assistência nos pormenores mais técnicos referentes à soldadura, bem como a orientação dada aquando da elaboração das metalografias.

Um agradecimento final a todos os trabalhadores do serviço de soldadura dos ENVC que dum forma ou de outra apoiaram os trabalhos desenvolvidos, e para tal contribuindo com um excelente ambiente de trabalho existente que facilitou, e tornou pequena, a estadia no serviço.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Indústria naval: evolução e a actual conjuntura.....	3
1.2. Estaleiros Navais de Viana do Castelo.....	5
1.3. Apresentação do projecto.....	7
1.4. Organização e Temas Abordados	8
2. Conceitos genéricos: soldadura e mecanização.....	9
2.1. Evolução da soldadura por arco eléctrico.....	11
2.2. Processos mecanizados	13
2.3. Processo de soldadura.....	16
2.3.1. Características, técnicas e equipamentos	19
2.3.2. Gás de protecção	26
2.3.3. Eléctrodo consumível	30
3. Trabalhos experimentais	33
3.1. Análise da soldadura mecanizada nos ENVC.....	35
3.2. Ensaio aos novos consumíveis	39
3.2.1. Atmosfera protectora: Dióxido de Carbono	40
3.2.2. Atmosferas protectoras: Árgon.....	47
3.2.3. Atmosferas protectoras: Árgon – Dióxido de Carbono.....	50
3.2.4. Balanço final dos ensaios.....	53
3.3. Ensaio mecânicos.....	55
3.3.1. Dobragens.....	56
3.3.2. Ensaio metalográficos	60
3.3.3. Durezas	68
3.4. Resumo das características operacionais, técnicas e mecânicas	70
3.5. Análise de custos	71
4. Balanço final do projecto.....	77
4.1. Viabilidade da implementação	79
4.2. Outras aplicações e soluções paralelas.....	79
4.3. Considerações finais.....	83
5. Bibliografia	85
Anexos	87

Índice de figuras

Figura 1.2.1 – Construção n.º 1: arrastão lateral "Senhor dos Mareantes".....	5
Figura 1.2.2 - Navio de patrulha oceânica para a marinha portuguesa	6
Figura 1.2.3 - Construção n.º 258 em fase de aprestamento	6
Figura 1.2.4 - Construção 254 em fase de construção	6
Figura 2.1.1 – Electrogefest (1)	11
Figura 2.1.2 – Esquema do processo	12
Figura 2.2.1 – Pórtico de arco submerso dos ENVC.....	13
Figura 2.2.2 – Panorama da linha de painéis	14
Figura 2.2.3 – Aspecto final de um painel.....	14
Figura 2.2.4 – Esquema produtivo da linha de painéis.....	14
Figura 2.2.5 – Bloco de proa a ir para a doca	15
Figura 2.2.6 – Tractor de soldadura	15
Figura 2.3.1 – Modos de transferência de metal segundo IIW.....	20
Figura 2.3.2 – Parâmetros para os modos mais utilizados	20
Figura 2.3.3 – Equipamento típico para GMAW	24
Figura 2.3.4 – Característica da fonte (2)	25
Figura 2.3.5 – Condutividade térmica de vários gases utilizados (9)	26
Figura 2.3.6 – Energias de dissociação ionização (9).....	27
Figura 2.3.7 – Influência do gás no perfil do cordão.....	29
Figura 2.3.8 – Exemplo de alguns consumíveis para soldadura.....	30
Figura 2.3.9 – Superfícies condutoras nos fios sólidos/tubulares.....	32
Figura 3.1.1 – Tractor em funcionamento	38
Figura 3.2.1 – Aspecto final do cordão AMC 01 (100% CO ₂)	40
Figura 3.2.2 – Defeitos mais comuns nos cordões dos metal-cored com CO ₂	41
Figura 3.2.3 – Emissão de gases: metal-cored / rutílicos.....	41
Figura 3.2.4 – Influência da escória no cordão (100% CO ₂)	42
Figura 3.2.5 – Cordão Fluxofil M8 como soldado (100% CO ₂)	43
Figura 3.2.6 – Aspecto final do cordão Fluxofil M8 (100% CO ₂)	43
Figura 3.2.7 – Excesso de projecções 100% CO ₂	44
Figura 3.2.8 – Inclusão de escória no cordão.....	44
Figura 3.2.9 – Cordão como soldado	48
Figura 3.2.10 – Cordão como soldado 14.12 100% Ar	48
Figura 3.2.11 – Influencia da posição da tocha na deposição de escória (100% Ar).....	48
Figura 3.2.12 – Libertação de fumos: CO ₂ / Árgon.....	48

Figura 3.2.13 –Bucal fundido no cordão devido ao sobreaquecimento da tocha	49
Figura 3.2.15 – Deposição irregular de escória (Atal 5).....	51
Figura 3.2.16 – Cordão após limpeza (Atal 5).....	51
Figura 3.2.14 – Emissão de gases e projecções com atmosfera mista	51
Figura 3.2.17 – Cordão como soldado (Corgon 18).....	51
Figura 3.3.1 – Esquema do provete.....	55
Figura 3.3.3 – Tipos de fractura: a) – Frágil (MXA CO ₂); b) – Dúctil (AMC CO ₂)	57
Figura 3.3.2 – Esquema da dobragem	56
Figura 3.3.4 – Fractura em provete de CO ₂	57
Figura 3.3.5 – Fractura em provete Árgon.....	57
Figura 3.3.6 – Provete CO ₂ (AMC 01).....	57
Figura 3.3.7 – Provete Árgon (AMC 01).....	57
Figura 3.3.8 – Provete CO ₂ (M8).....	57
Figura 3.3.9 – Provete Árgon (M8).....	57
Figura 3.3.10 – Porosidade num cordão (Fluxofil M8).....	58
Figura 3.3.11 – Fractura por arrancamento em cordão a Árgon.....	58
Figura 3.3.12 – Macro da amostra n.º 3 (100 % Ar)	62
Figura 3.3.13 – Orientação do grão da zona fundida.....	62
Figura 3.3.14 – Evolução da forma do cordão de acordo com o gás	63
Figura 3.3.15 – Estrutura da chapa de 8 mm (ampliação 25x).....	65
Figura 3.3.16 – Estrutura da chapa de 10 mm.....	65
Figura 3.3.17 – Pormenor da estrutura metalúrgica da chapa de 8 mm.....	66
Figura 3.3.18 - Estrutura da ZAC nas chapas de 10 e 8 mm.....	66
Figura 3.3.19 – Estrutura da zona fundida: a) 100 % Ar; b)100 % CO ₂	67
Figura 3.3.20 – Zona fundida: a) Atal 5 b) Corgon 18.....	67
Figura 3.3.21 – Esquema do teste de Vickers	68
Figura 4.2.1 – Tractor de arco submerso ideal para a aplicação em causa.....	81
Figura A.1 – Estrutura típica do metal base das amostras 1,2 e 3	91
Figura A.2 – Estrutura típica do metal base das amostras 1 a 3.	91
Figura A.3 – Microestrutura do metal base – filtro diferencial interferencial de contraste.....	93
Figura A.4 – Estrutura da chapa da amostra n.º 4: alinhamento de grão	93
Figura A.5– Macro da amostra n.º 1.....	95
Figura A.6 – Amostra n.º 1: Pormenor do crescimento de grão.....	95
Figura A.7 – Amostra n.º 1: Microestrutura da ZAC	97
Figura A.8– Amostra n.º 1: Estrutura de solidificação	97
Figura A.9 – Macro da amostra n.º 2.....	99
Figura A.10 – Amostra n.º 2: Pormenor do crescimento de grão.....	99

Figura A.11 – Amostra n.º 2: Zona afectada pelo calor.....	101
Figura A.12 – Amostra n.º 2: Estrutura do metal depositado.....	101
Figura A.13 – Macro amostra n.º 3 (100% Árgon)	103
Figura A.14 – Amostra n.º 3: Pormenor do crescimento de grão	103
Figura A.15– Amostra n.º 3: ZAC	105
Figura A.16 – Microestrutura do metal depositado: micro porosidades	105
Figura A.17 – Macro da amostra n.º 4 – 100% CO ₂	107
Figura A.18 – Micro da amostra n.º 4: ZAC.....	107
Figura A.19 – Amostra n.º 4: Estruturas de solidificação do metal depositado	109

Índice de tabelas

Tabela 2.A: Consumo de gases de soldadura em Abril de 2008	29
Tabela 2.B: Tipo de fluxados existentes (NP EN 758).....	31
Tabela 3.A: Eficiência de deposição dos vários processos (2; 6).....	37
Tabela 3.B: Composição química do aço	39
Tabela 3.C: Parâmetros de desempenho óptimo: AMC 01	42
Tabela 3.D: Parâmetros Fluxofil M8 (CO ₂).....	43
Tabela 3.E: Parâmetros (100% Árgon).....	50
Tabela 3.F: Parâmetros: misturas tipo M21 EN439	52
Tabela 3.G: Ensaio exigidos pela norma EN 288/3	55
Tabela 3.H: Amostras para metalografias/durezas	60
Tabela 3.I – Estimativa de custos quanto ao eléctrodo consumível	73
Tabela 3.J – Custos	74

Índice de Gráficos

Gráfico 3-A – Velocidade de soldadura dos fios rutílicos	36
Gráfico 3-B – Taxa de deposição dos fios rutílicos.....	36
Gráfico 3-C – Velocidade de soldadura nos metal-cored	47
Gráfico 3-D – Taxa de deposição dos metal-cored	47
Gráfico 3-E – Desempenho comparativo do 14.12 com diferentes gases.....	53
Gráfico 3-F – Filiação de durezas amostra n.º 4	68
Gráfico 3-G – Filiação de durezas amostra n.º 1.....	68
Gráfico 3-H – Filiação de durezas amostra n.º 2.....	68
Gráfico 3-I – Filiação de durezas amostra n.º 3	68
Gráfico 3-J – Durezas zona fundida.....	69
Gráfico 3-K – Durezas no metal base.....	69
Gráfico 3-L – Durezas na ZAC.....	69
Gráfico 3-M – Custos operatórios comparativos	75

1. Introdução

Indústria naval: evolução e a actual conjuntura...página 3

Estaleiros Navais de Viana do Castelo...página 5

Apresentação do projecto...página 7

Organização e temas abordados...página 8

1.1. Indústria naval: evolução e a actual conjuntura

A crescente competitividade empresarial existente nos dias de hoje leva as empresas a adquirir uma postura diferente face ao mercado. A concorrência dos países que têm como maior trunfo a abundância de mão-de-obra barata, tem levado à proliferação de uma crise industrial nos países onde os custos de mão-de-obra são muito superiores. A diferenciação do produto tem vindo a assumir-se como um factor determinante para a captação de novos clientes. Nos países onde a indústria está assente na utilização de mão-de-obra barata, o factor de diferenciação é um preço muito reduzido. Países como a China, Índia e Coreia do Sul têm invadido os mercados internacionais com produtos a preços muito inferiores aos praticados por países mais desenvolvidos, colocando as empresas desses países em situação delicada.

Portugal não é excepção. Uma das razões da crise industrial que invade o país resulta, em parte, da incapacidade de algumas empresas em prever atempadamente esta situação. Sectores tradicionalmente essenciais da indústria nacional como o calçado ou a indústria têxtil têm sido os mais atingidos, com uma onda de falências a varrer o panorama industrial.

Apesar da crise, a estratégia traçada por algumas empresas a operar em áreas muito afectadas pela concorrência dos países detentores de mão-de-obra barata, tem levado ao seu sucesso económico. Uma das principais razões do sucesso destas empresas assenta numa política de desenvolvimento de novos produtos, procura de novos mercados alvo e a opção pela produção com qualidade.

As sinergias desenvolvidas como resultado destas novas linhas de orientação estratégica têm levado ao aparecimento de centros de I&D. A sua criação por parte de empresas privadas ou através de parcerias desenvolvidas por empresas e universidades tem obtido resultados muito positivos. Um exemplo é a “Pluma”, uma garrafa de gás em material compósito que se apresenta mais leve, mais segura e design muito atractivo, fruto de uma parceria desenvolvida pela Amtrol e INEGI (Instituto Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – instituição de investigação intimamente ligada à FEUP) que permitiu o desenvolvimento de um produto único.

O mar sempre foi um dos principais motores de desenvolvimento nacional. Dos Descobrimentos à frota de pesca nacional da segunda metade do século vinte. Contudo, a sua influência não se resume apenas às indústrias directamente associadas ao mar. Sendo um sector estratégico de desenvolvimento do país, várias indústrias e instituições foram criadas pela sua influência. A própria Faculdade de Engenharia do Porto teve as suas origens nesta área, através da criação, em 1765, da Aula Náutica. A instituição foi alvo de sucessivas reestruturações, passando de Academia Politécnica do Porto para Escola de Engenharia, anexa à Faculdade de Ciências. Finalmente, em 26 de Julho de 1930, ganhou autonomia e passou denominar-se como Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Também na construção naval a concorrência imposta por economias emergentes tem vindo a assimilar uma grande cota do mercado mundial. Países com grande tradição naval têm sido muito afectados pela conjuntura existente no mercado da construção naval. O abandono da construção por parte da Lisnave deixou os Estaleiros Navais de Viana do Castelo, (ENVC), como o último construtor nacional capaz de construir navios de médio porte. Com o desfalecimento do sector da construção, os estaleiros portugueses optaram por redefinir as suas estratégias de sobrevivência no sentido de operar no mercado da manutenção naval. Esta foi a opção da Lisnave, outrora os maiores estaleiros de construção naval em Portugal, agora uma empresa totalmente dedicada à reparação, assumindo o seu lugar como um dos quatro maiores estaleiros europeus a operar na área da reparação naval. Esta estratégia foi parcialmente adoptada pelos ENVC que têm levado a cabo uma forte aposta na área das reparações. O resultado dessa aposta materializa-se na existência de um sector que se tornou bastante lucrativo.

As dificuldades impostas pela concorrência de países capazes de construir embarcações com menor preço final têm de ser ultrapassadas. Uma forma encontrada pelos países afectados tem sido diferenciar os seus produtos através de apostas na qualidade, melhoria das técnicas de produção ou o desenvolvimento de tecnologias inovadoras incorporadas no produto que inclinem a balança em seu benefício.

A empresa tem vindo a trabalhar nesse sentido, fazendo investimentos na construção de novas estruturas de apoio à produção, procurando explorar novos nichos de mercado como navios de cruzeiro, vasos de guerra e estando actualmente a explorar a entrada no mercado de iates de luxo com grande tonelagem, com contratos já assinados para a construção de duas embarcações deste tipo.

1.2. Estaleiros Navais de Viana do Castelo

Os ENVC são uma empresa de importância vital no desenvolvimento da estrutura industrial minhota. Portadores de uma identidade muito própria, o seu longo trajecto merece que seja feita uma breve descrição da sua já longa história.

Essa história iniciou-se em Junho de 1944, com a sua fundação por um grupo de técnicos e operários especializados oriundos dos Estaleiros Navais do Porto e Lisboa. O objectivo era levar a cabo o programa do governo de modernização da frota pesqueira portuguesa.

Inicialmente, a empresa ocupava uma área de 35.000 m², o layout inicial da linha de produção contava com duas docas secas com 151 x 18,5 m e 127 x 18,5 m, bem como várias infra-estruturas de apoio.

As primeiras três construções da carteira de encomendas da empresa seriam arrastões para a pesca do bacalhau. Eram eles o "Senhor dos Mareantes" (Figura 1.2.1), "Senhora das Candeias" encomendados pela Empresa de Pesca de Viana e o "São Gonçalinho" encomendado pela Empresa de Pesca de Aveiro, todas estas embarcações foram entregues em 1948.



Figura 1.2.1 – Construção n.º 1: arrastão lateral "Senhor dos Mareantes"

No decurso da sua actividade a empresa foi-se adaptando às exigências do mercado, sendo possível fazer a distinção de três períodos distintos:

1. Desde a sua criação até 1974 a quantidade de unidades construídas para armadores nacionais ascendia a cerca de 90%, dos quais 50% seriam destinadas ao reforço e renovação da frota pesqueira;

2. Na segunda metade da década de setenta e durante a década de oitenta o principal mercado da empresa seria a União Soviética, para o qual foram produzidas algumas grandes séries;

3. Durante os anos noventa a Alemanha passaria a ser o mercado fundamental para os ENVC.

Desde a sua fundação, os ENVC entregaram duzentas unidades dos mais variados tipos, contando-se entre eles porta-contentores, navios tanques, transportadores de produtos químicos, batelões, rebocadores, ferryboats, navios de pesca, de carga a granel, LPG's, cimenteiros e vasos de guerra.

A partir do ano 2000 tem-se verificado uma maior diversificação do mercado, estando incluída na sua actual carteira de encomendas a renovação da frota da Marinha Portuguesa.



Figura 1.2.2 - Navio de patrulha oceânica para a marinha portuguesa

Actualmente encontram-se em curso as construções n.º 258 e 254, um ferry-boat para os Açores e um porta contentores para o mercado alemão. (1)



Figura 1.2.3 - Construção n.º 258 em fase de aprestamento



Figura 1.2.4 - Construção 254 em fase de construção

1.3. Apresentação do projecto

Como aluno finalista do curso do Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica na área de Projecto e Construções Mecânicas, residente do distrito de Viana do Castelo, vejo-me ligado a esta instituição, que sempre esteve muito presente na vida quotidiana dos vianenses.

Vi também uma oportunidade de complementar a formação obtida durante o trajecto académico com o desenvolvimento do projecto de fim de curso nos ENVC. Apesar de os estaleiros não terem uma posição proactiva no desenvolvimento de parcerias oficiais com instituições académicas, demonstram-se totalmente à disposição para ajudar a formar pessoal especializado nas áreas em que o possa fazer.

A proposta da Faculdade que deu seguimento à minha ambição de desenvolver um trabalho numa das maiores e mais abrangentes empresas de construção do país, foi aceite. Iniciando-se uma etapa que é simultaneamente o encerramento da formação académica e o início da formação profissional.

O percurso traçado pelo engenheiro Alfredo Silva, director do serviço de soldadura dos ENVC e orientador do projecto, vai de encontro às necessidades que a empresa tem de encontrar soluções produtivas que lhe permitam fazer face a um mercado cada vez mais implacável.

A construção naval tem na área da soldadura um peso que ronda os 30% dos custos de construção do navio. Com um impacto tão significativo, torna-se essencial, não uma mera redução de custos, mas também uma optimização de processos que permita, não só reduzir os custos, como aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade. É neste sentido que o projecto deve evoluir.

O núcleo duro dos trabalhos a desenvolver consiste num estudo sobre a viabilidade da optimização da soldadura mecanizada. Essa optimização passa pela alteração do consumível utilizado na mecanização por outro tipo de consumível que permita melhores resultados sem se proceder a alterações de maior magnitude no processo já estabelecido.

1.4. Organização e Temas Abordados

Feita a apresentação do projecto e entidades envolvidas, é conveniente fazer uma breve apresentação dos principais capítulos que dão forma a este trabalho.

Sendo um conjunto de trabalhos essencialmente práticos, é apresentada uma breve exposição teórica que pretende abranger os principais aspectos ligados ao processo de soldadura em questão. Além de essencial para uma melhor compreensão dos trabalhos realizados, a fundamentação descrita no capítulo “*Conceitos genéricos sobre soldadura*”, permitiu uma excelente consolidação dos conhecimentos sobre as técnicas e tecnologias que compõem a soldadura.

Um dos principais objectivos deste trabalho é dar a conhecer o que realmente significa a soldadura para uma empresa de construção naval, os desafios impostos a nível económico, técnico ou até na área de recursos humanos.

O capítulo “*Trabalhos experimentais*” é um registo sucinto dos trabalhos experimentais realizados e uma exposição dos resultados obtidos

Compreende as seguintes etapas:

- Análise da soldadura mecanizada nos ENVC
- Ensaio dos novos consumíveis
- Ensaio mecânicos

O quarto assinala as conclusões retiradas, e faz o balanço final do projecto.

Em anexo encontram-se alguns elementos que constituem resultados dos trabalhos efectuados como metalografias ou documentos utilizados durante os trabalhos

.

2. Conceitos genéricos: soldadura e mecanização

Evolução da soldadura por arco eléctrico...página 11

Processo mecanizados...página 13

Processo de soldadura...página 16

O processo utilizado na mecanização é a soldadura a arco eléctrico com recurso a gás de protecção, genericamente conhecido por GMAW (Gas Metal Arc Welding).

Este tipo de processo utiliza o calor gerado por um arco eléctrico entre a tocha eléctrica e a peça a soldar para a fundir juntamente com um metal de adição de alimentação contínua. Com as elevadas temperaturas atingidas, as interacções entre o metal fundido e o meio ambiente levam a reacções que influenciam negativamente o cordão de soldadura. Para contornar este obstáculo, é utilizado um gás que envolve o arco e o banho de fusão, fazendo a sua protecção.

Para uma melhor compreensão da configuração actual do processo, será útil descrever a evolução que este teve desde as suas origens.

2.1. Evolução da soldadura por arco eléctrico

O princípio que levou ao desenvolvimento do GMAW teve o seu início no século dezanove quando Humphry Davy's descobriu o arco eléctrico em 1800.

Em 1881, August De Meritens, nos laboratórios Cabot em França, utilizou o calor proveniente do arco eléctrico para soldar chapas de chumbo para baterias de armazenamento. No entanto, foi o seu assistente Nikolai N. Bernardos juntamente com Stanislaus Olszewski que, em 1885, registou a primeira patente para uma máquina de soldar com eléctrodos de carvão denominada "Electrogefest".

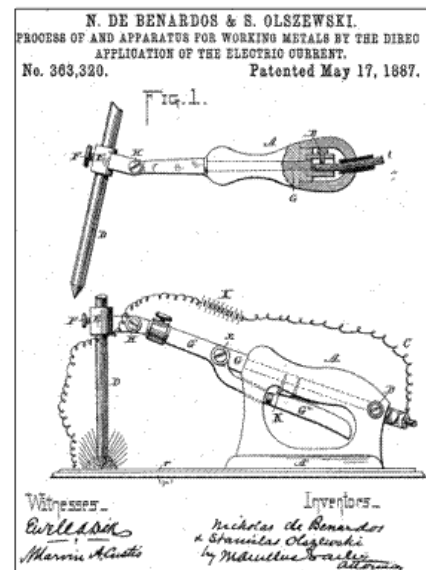


Figura 2.1.1 – Electrogefest (1)

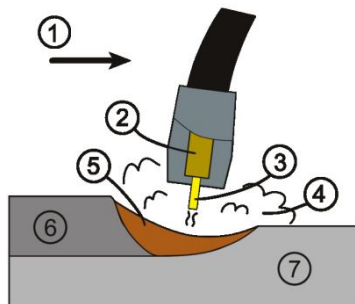
Em 1920, P. O. Nobel criou um predecessor da soldadura semi-automática, um processo que recorria à utilização de um arame de alimentação contínua, utilizando corrente contínua para criar por um arco eléctrico. No entanto, este processo ainda não contava com uma atmosfera protectora.

A utilização de gases para fazer a protecção do processo foi desenvolvida durante os anos vinte, com várias experiências a serem realizadas numa tentativa de melhorar os processos de soldadura, recorrendo a um gás de protecção.

Contudo, foram H.M. Hobart e P.K. Devers que conduziram experiências similares, mas com gases diferentes, utilizando atmosferas de compostas por Árgon e Hélio, respectivamente. Em 1926 registaram a patente de um processo que utilizava gás de protecção em volta do arco.

Em 1948, foi finalmente desenvolvido o conceito actual de GMAW, no Battelle Memorial Institute. Utilizava um eléctrodo de pequeno diâmetro com arame de alimentação contínua, gás de protecção e uma fonte de corrente contínua. Apesar das elevadas taxas de deposição, o elevado custo dos gases inertes utilizados limitava o seu uso à soldadura de metais não ferrosos. A utilização de gases inertes tornou este processo conhecido como MIG – Metal Inert Gas.

Em 1953, Lyubavskii e Novoshilov apresentaram o desenvolvimento de um processo que recorria à utilização de Dióxido de Carbono como gás de protecção, ficando conhecido como MAG – Metal Active Gas. A redução de custos obtida através do recurso a um gás mais económico levou a uma grande popularidade do MAG, pois permitia a soldadura de aços de forma económica. (1) (2)



- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1.Sentido de trabalho | 2.Tubo de contacto |
| 3.Eléctrodo consumível | 4.Gás de protecção |
| 5.Banho de fusão | 6.Metal depositado |
| 7.Metal de base | |

Figura 2.1.2 – Esquema do processo

O conceito deste processo manteve-se até aos dias de hoje, consistindo na utilização de um arco eléctrico para fornecer a energia necessária para a união de peças recorrendo a um arame de alimentação contínua, sendo todo o processo protegido por um gás. Tem contudo sido alvo de várias optimizações e evoluções a nível de atmosferas de protecção, fontes de corrente eléctrica, tochas, sistemas de alimentação e consumíveis.

2.2. Processos mecanizados

Um dos maiores problemas que atinge as áreas de produção da indústria pesada é a exigência física requerida aos trabalhadores. A incapacidade de um ser humano operar continuamente sem diminuição de rendimento ou qualidade, é uma característica própria e inultrapassável, que tem vindo a ser contornada através da materialização de meios mecanizados e automatizados que eliminam ao máximo a exigência física do trabalho.

A soldadura não é excepção. O facto de ser um processo de grande exigência física, aliada à necessidade de grande perícia por parte do soldador, torna a introdução de processos automatizados ou mecanizados muito atractiva. A implementação de processos mecanizados num estaleiro de construção naval é uma área sensível, uma vez que as construções são tendencialmente diferentes umas das outras, o que leva a que este tipo de processo só possa ser implementado em áreas transversais à generalidade das embarcações existentes. Uma vez que na construção naval está implementado um sistema modular de fabricação por blocos é possível implementar, em alguma medida, a automação de processos.

Nos ENVC, o recurso a sistemas de soldadura automatizada e mecanizada implementa-se com o recurso a três tipos de sistemas:

- Equipamentos automatizados fixos, como pórticos de arco submerso.
- Sistemas mecanizados compostos por tractores de soldadura MIG/MAG
- Equipamentos portáteis de arco submerso e autómatos de MIG/MAG, compostos por um tractor sobre calhas que podem ser fixadas magneticamente, permitindo fazer cordões verticais pois o autómato tem a capacidade de oscilação da tocha necessária para fazer os cordões verticais.



Figura 2.2.1 – Pórtico de arco submerso dos ENVC

A oficina com maior implementação de meios de produção com sistemas automatizados ou mecanizados é a linha de painéis.



Figura 2.2.2 – Panorama da linha de painéis

Nesta oficina são produzidos painéis de grandes dimensões a partir de chapas de dimensões normalizadas até 3x12m. Estas são unidas com o recurso ao pórtico de arco submerso da Figura 2.2.1, formando um painel de grandes dimensões. Na etapa seguinte são cortadas e marcadas por plasma, de acordo com o projecto. O próximo passo é a montagem dos elementos resistentes e, finalmente, o trabalho final da soldadura é soldar os elementos resistentes finalizando o painel.



Figura 2.2.3 – Aspecto final de um painel

Figura 2.2.4 – Esquema produtivo da linha de painéis

Os painéis são então agregados entre si, formando os blocos que constituem a estrutura do navio. Para a união de blocos planos como duplos fundos e costados, o recurso ao arco submerso é muito utilizado. Para as ligações entre blocos geometricamente complexos como a proa (Figura 2.2.5) a automatização não é muito utilizada.



Figura 2.2.5 – Bloco de proa a ir para a doca

A mecanização a otimizar constitui a última etapa da linha de painéis (esquema da Figura 2.2.4), fazendo a união definitiva dos elementos resistentes.



Figura 2.2.6 – Tractor de soldadura

O sistema de soldadura mecanizado utilizado é muito simples. Consiste no uso de um tractor de soldadura que permite deslocamentos sobre planos horizontais, fazendo cordões de canto ao baixo na horizontal, guiado por roletes ou preso magneticamente à chapa.

A esse tractor é acoplada uma tocha de MIG/MAG (Figura 2.2.6). Em todo o processo o operador só tem de fazer a regulação da máquina de soldar e posicionar a tocha de acordo com a junta a unir.

Esta simples adaptação permite uma velocidade de soldadura na ordem dos 25-30 metros por hora. O factor de marcha (razão entre o tempo que realmente se está a soldar e o tempo total que um cordão demora a ser feito) pode ser quantificado, após montagem do equipamento, em valores próximos dos 100%, uma evolução significativa para o factor de marcha a manual (eléctrodo revestido ou semi-automática) que anda na casa dos 30~50 %.

Como optimização do processo, é pretendido substituir os fluxados utilizados na linha por fluxados de alma metálica que, nas mesmas condições, consigam melhor desempenho.

Os fluxados de tipo metal-cored deverão conseguir os objectivos pretendidos. No entanto, é necessário verificar a viabilidade técnica, prática e económica quer a nível de implementação quer a nível de custos continuados.

Antes de avançar no relatório é aconselhável proceder, tal como o foi feito no projecto, a uma exposição de alguns conceitos referentes à soldadura. A incidência principal será sobre o processo mais utilizado nos estaleiros e, especialmente, o utilizado na mecanização.

2.3. Processo de soldadura

O avanço das tecnologias de soldadura tem permitido aumentar consideravelmente a gama de materiais passíveis de ser soldados: metais, cerâmicos, plástico e borrachas.

Como este trabalho foca-se sobre a soldadura de metais, o acto de soldar metais pode ser definido como uma forma de obter continuidade metálica entre duas peças a unir.

Existem três formas básicas de conseguir este objectivo:

- Uma consiste na continuidade obtida por fenómenos de difusão que podem ser conseguidos em fase sólida – soldadura por difusão – ou entre uma fase líquida e outra sólida – brasagem.
- É também possível obter uma soldadura através da criação de ligações metálicas a nível atómico, como é o caso na soldadura por ultra-sons ou pressão a frio.
- O método mais usado para obter uma soldadura é o que envolve a fusão e posterior cristalização comum, que resulta da solidificação por epitaxia da zona fundida. A solidificação inicia-se a partir dos grãos do material não fundido orientando-se a estrutura cristalina de acordo com linhas de escoamento de calor.

A forma como a continuidade é conseguida é influenciada por três aspectos essenciais: térmico, químico e mecânico.

A nível químico é necessário ter em conta que as elevadas temperaturas que permitem a fusão do material também potenciam a ocorrência de reacções químicas. Estas reacções podem ser da mesma fase (líquido/líquido) ou entre duas fases distintas (sólido/líquido e líquido/gás).

➤ As reacções do mesmo tipo de fase dão-se no metal fundido, entre este e a escória, e são responsáveis pela constituição química da zona fundida. São elas, por exemplo, as responsáveis pelo aparecimento de óxidos e sulfuretos.

➤ As reacções inter-fase do tipo líquido/gás prendem-se com a interacção existente entre o metal líquido e a atmosfera envolvente como é exemplo o aparecimento de óxidos ou nitretos de ferro no arco eléctrico.

➤ Por fim, as reacções líquidas/sólidas entre o banho de fusão e material de base. Um aspecto essencial deste tipo de reacções é a junção entre material de base e de adição ou a interacção entre metal das componentes diferentes da peça no banho de fusão. Este processo, conhecido como diluição, é quantificado pela taxa de diluição, que se define como a razão entre área do material de base fundido e área total da zona fundida numa secção transversa, tal que:

$$TD = \frac{S_2}{S_1 + S_2}$$



As elevadas temperaturas atingidas durante o ciclo térmico provocam alterações na estrutura metalúrgica do material base não fundido, na zona afectada pelo calor (ZAC). A dimensão, forma e influência na ZAC varia com o tipo de processo e intensidades empregues e assume uma importância significativa pois trata-se de uma zona em que as propriedades mecânicas são bastante afectadas.

As influências a nível mecânico decorrentes da soldadura são provocadas pelos ciclos térmicos aplicados e pela geometria da peça. As diferenças a nível de contracção ou expansão durante o ciclo variam de acordo com a proximidade à zona de aplicação de calor. Estas contracções/expansões tendem a criar tensões residuais que podem provocar empenos e induzir a fissuração. (3) (4)

2.3.1. Características, técnicas e equipamentos

Neste ponto, é conveniente fazer uma breve exposição dos principais fenómenos físicos que intervêm no processo, para que melhor se percebam algumas das situações que surgiram durante os trabalhos práticos.

O arco utilizado para promover o aquecimento das peças pode ser considerado um condutor eléctrico de forma cónica, atravessado por uma corrente eléctrica. Como uma carga eléctrica em movimento gera um campo magnético, também o arco eléctrico gera um campo magnético proporcional à corrente eléctrica que o atravessa.

O campo magnético criado é circular e concêntrico com o eixo do cone e provoca o aparecimento de forças de Lorentz orientadas de fora para dentro. Uma vez que a intensidade de um campo magnético diminui com o quadrado da distância e tendo o cone do arco menor diâmetro junto ao eléctrodo, as forças de Lorentz são superiores na sua proximidade, diminuindo à medida que se vai aumentando a distância do eléctrodo em direcção à junta. Como o sentido das forças é de fora para dentro, estas vão actuar de forma a fazer pressão sobre o arco produzindo um gradiente de pressão que é responsável pela direcção do fluxo no sentido eléctrodo – peça.

Num arame cilíndrico, as forças de Lorentz criadas são radiais e centrípetas, sendo a sua acção resultante nula. A interacção destas forças com a extremidade fundida do eléctrodo vai levar a um estrangulamento no sentido de separar o metal fundido do fio ainda em estado sólido. Este efeito, conhecido como “pinch effect”, vai contrariar a tensão superficial. O metal fundido na ponta do fio separar-se-á quando a gota de metal atingir uma dimensão crítica em que a tensão superficial já não consegue manter a coesão da gota com o fio. Este efeito é o principal responsável pelo modo de transferência de metal.

O modo de transferência varia com as propriedades eléctricas do arco, dimensões e composição do metal de adição, tipo e composição do gás de protecção, etc.

O International Institute of Welding (IIW) define os principais modos de transferência de metal de acordo com a Figura 2.3.1.

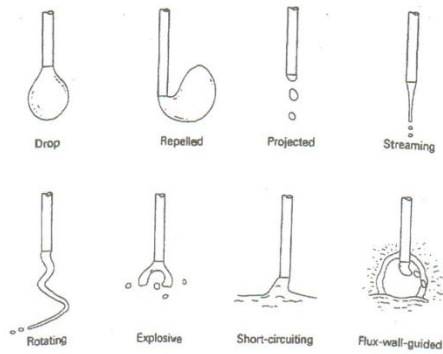


Figura 2.3.1 – Modos de transferência de metal segundo IIW (2)

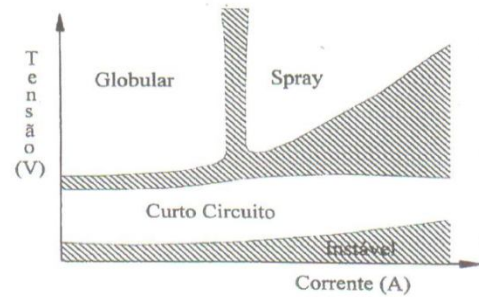


Figura 2.3.2 – Parâmetros para os modos mais utilizados (2)

Os principais modos de transferência são o curto-circuito, transferência globular e em spray (Figura 2.3.1 e Figura 2.3.2). A segunda figura mostra a dependência do modo de transferência da regulação relativa dos parâmetros.

No modo de curto-circuito, esta transferência ocorre quando são utilizadas baixas intensidades e tensões, fazendo com que a taxa de fusão seja inferior à velocidade de alimentação do arame. Isto leva a que a gota de líquida na ponta do eléctrodo mergulhe no banho de fusão, extinguindo-se o arco através do curto-circuito provocado. O aumento súbito de corrente provocado pelo curto-circuito sobreaquece o fio por efeito de Joule, aumentando a sua fusão. Simultaneamente, o metal é transferido para o banho de fusão por acção de tensões superficiais e pela interacção de forças magnéticas. Quando se dá a separação da gota do fio, o curto-circuito é interrompido de forma violenta, dando-se novamente o restabelecimento do arco. Este ciclo pode ocorrer com frequências de 20 a mais de 200 Hz. O final de cada ciclo pode ser bastante violento, caso ocorra vaporização de material, o que tende a originar projecções de metal.

Se a corrente não subir de forma suficientemente rápida, não existe tempo para fundir o material e o fio mergulha no banho antes de se quebrar a ponte líquida, levando a um sobreaquecimento do fio, não se concretizando a sua fusão. Isto provoca um emaranhado de metal não fundido sobre o metal base (bird's nest). A evolução das fontes

permitiu desenvolver máquinas com indutâncias variáveis capazes de controlar a elevação da corrente de modo a controlar esta instabilidade.

Durante parte do processo o arco não está activo (contacto físico do eléctrodo e peça através do banho de fusão), sendo a transferência do calor mais reduzida levando a defeitos de falta de fusão em peças de maior espessura. Para peças de baixa espessura, este método de transferência é o ideal, pois a interrupção do arco permite reduzir a entrega térmica reduzindo empenos e outros defeitos provocados pelo calor excessivo, obtém também bons resultados em soldadura em posição.

Para tensões mais elevadas do que as registadas em curto-circuito, passa-se a obter a transferência globular. A dimensão das gotas fundidas na ponta de eléctrodo tem um diâmetro superior a este. Quando uma dimensão crítica é atingida, o equilíbrio de forças electromagnéticas, gravíticas e tensões superficiais é quebrado transferindo-se a gota para o banho. Sendo que a dimensão da gota depende directamente do diâmetro do fio e da corrente aplicada. No caso da união de aços com protecções à base de Dióxido de Carbono, este tipo de transferência tem tendência a ocorrer mesmo a intensidades mais elevadas.

Para uma atmosfera à base de Árgon verifica-se que, à medida que a corrente aumenta, o diâmetro das gotas diminui de forma suave até um determinado nível de intensidade. A partir dessa intensidade (a rondar os 280~300 amperes, mas dependendo muito do fio, diâmetro, etc.), ocorre uma transição a partir da qual há uma rápida diminuição do diâmetro das gotas que é acompanhado por uma grande subida na frequência de transferência das mesmas. O arco passa a envolver a gota por completo direccionando-a para o banho independentemente da posição, deixando a transferência de ser influenciada pela gravidade. Para intensidades muito elevadas, também o CO₂ promove este tipo de transferência.

A principal interveniente física neste processo é uma força de origem magnética provocada pela passagem de corrente pela própria gota. A transferência de metal torna-se muito suave com grande estabilidade do arco. A necessidade de intensidades muito altas não permite usar este tipo de transferência para a união de chapas finas. Uma evolução deste método possibilita o seu uso em chapas finas recorrendo a um arco pulsado, que permite diminuir as entregas térmicas.

A importância dos parâmetros eléctricos é fundamental, pois a cada propriedade eléctrica estão associados vários factores determinantes no processo.

A corrente imposta é a principal responsável pela taxa de fusão do metal de adição. Um aumento de intensidades implica um aumento da entrega térmica (se os restantes parâmetros se mantiverem constantes) ao material logo, há uma maior capacidade fusão de metal de adição. Implica também uma maior fusão do metal base, traduzindo-se numa maior penetração e largura do cordão. Tem ainda a capacidade de influenciar o modo como a transferência do metal é feita com as implicações na soldabilidade que estão associadas a cada método de transferência.

A entrega térmica pode ser calculada de forma aproximada pela expressão seguinte, para processos semi-automáticos com recurso a fios fluxados está normalmente compreendida entre 1 e 2 kJ/mm (5).

$$ET = \frac{V \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad [kJ/mm] \quad (6)$$

Com:

V = Tensão do arco (Volt) ∴ I = intensidade da corrente (Ampere)

v = velocidade de soldadura (mm/min)

A taxa de fusão de arame é proporcional à corrente e pode ser expressada da seguinte forma:

$$T_{fusão} = a \cdot I + b \cdot L \cdot I^2 \quad (2)$$

Onde:

L = extensão do eléctrodo I = corrente ∴ a e b = coeficientes de aquecimento pelo arco e resistência

A forma como o circuito eléctrico impõe o movimento da corrente nem sempre tem o sentido do eléctrodo para a peça. Essa configuração em que a tocha está ligada ao pólo positivo da fonte e a massa está ligada ao negativo denomina-se de polaridade inversa, ou DCEP – direct current electrode positive. A troca de polaridade impõe uma corrente a

deslocar-se da peça para o eléctrodo atribuindo-se a esta configuração o nome de polaridade directa ou DCEN – direct current electrode negative.

A utilização de DCEP é a mais frequente em GMAW pois para além de permitir uma boa taxa de deposição, diminui as projecções. Deste modo, aumenta o rendimento da transferência de metal que se apresenta mais suave. A penetração provocada por este tipo de polaridade é superior.

A configuração de DCEN não tem uma aplicação muito divulgada, pois apesar de conseguir grandes taxas de deposição, não permite as mesmas penetrações.

A tensão no arco é, a par da intensidade, um dos factores através do qual se podem controlar as propriedades do cordão e da forma como este é conseguido. Varia com o comprimento do arco, diâmetro do eléctrodo, gás de protecção, etc. É regulada experimentalmente, pois é influenciada por vários factores incluindo a técnica e posição de soldadura. Afecta o método de transferência e a geometria do cordão, sendo responsável por espalhar superfície do banho de fusão aumentando a sua área. No caso de aumentos excessivos provoca aumento de projecções, cordões com largura exagerada, roídos, porosidades.

A redução da tensão leva à diminuição da largura do cordão, levando também a uma maior convexidade da superfície do cordão produzindo uma má concordância entre o cordão e a peça. Baixas tensões tem a tendência para promover a transferência por curto-circuito.

A velocidade à qual o cordão é feito influencia-o de várias formas, para uma diminuição da velocidade de soldadura, produz-se um cordão mais largo e aumenta a entrega térmica influenciando a estrutura metalúrgica da junta.

Velocidades demasiado elevadas provocam cordões muito finos com insuficiência de deposição de metal, baixam a penetração e favorecem as mordeduras nos cordões.

A distância entre tubo de contacto e ponta do eléctrodo, extensão do eléctrodo ou stick-out, tem também influência no processo. O seu aumento implica uma maior resistência eléctrica que, por efeito de Joule, aumenta a temperatura do fio aumentando a fusão. O acréscimo da resistência eléctrica provoca a queda de tensão, que a fonte tende a

compensar, baixando a intensidade, o que volta a diminuir a taxa de fusão permitindo a diminuição do arco, verifica-se o inverso para uma diminuição do stick-out. Para transferências de curto-circuito a extensão do eléctrodo deve rondar os 6 a 13 mm, para outras formas de transferência os valores aconselhados rondam os 13 a 25 mm. (2; 5)

A orientação do eléctrodo (posição da tocha) define a técnica de soldadura a utilizar. Se inclinada no sentido de avanço do cordão (puxar), se inclinada para o lado do cordão (empurrar) ou na perpendicular. A técnica a utilizar depende do tipo de consumível, da posição e do processo, tendo muita influência no produto final, constituindo uma forma essencial para o controlo do banho de fusão.

O equipamento básico deste tipo de processo consiste num alimentador, onde é inserida a bobine do consumível e é feita a regulação dos parâmetros, uma tocha, uma fonte de energia, e uma tomada de alimentação de gás.

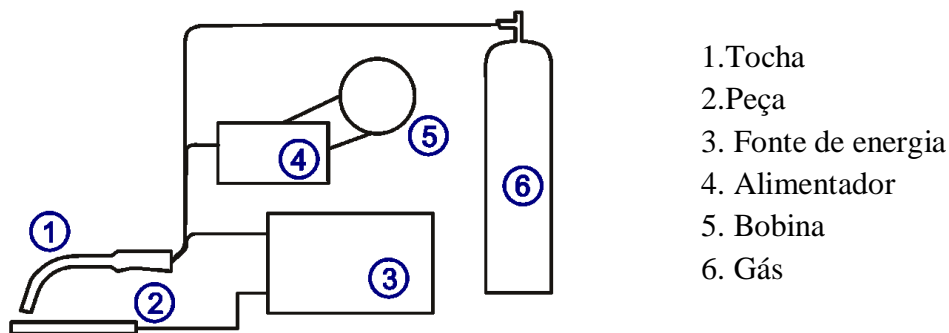


Figura 2.3.3 – Equipamento típico para GMAW

Em certos casos, especialmente em sistemas mecanizados ou automatizados, há a necessidade de recorrer a sistemas de refrigeração da tocha.

A fonte geralmente é do tipo transformador rectificador alimentado, por corrente alternada geralmente trifásica.

Um aspecto essencial da estabilidade do processo é a necessidade de manter a quantidade de metal de adição fundido semelhante à velocidade de alimentação do mesmo. Isto pode ser conseguido de duas formas diferentes: ou permitindo que a máquina auto regule a velocidade de alimentação para igualar a quantidade de metal fornecido com o

fundido, ou então fixando a velocidade de alimentação regulando os parâmetros de soldadura.

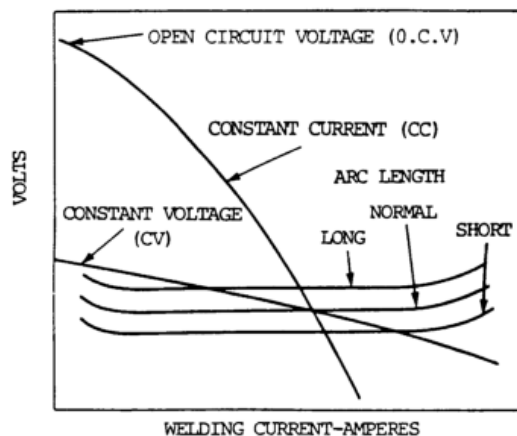


Figura 2.3.4 – Característica da fonte (2)

Quando se regula a velocidade de fusão, está-se a trabalhar em corrente de saída constante (ou característica de fonte mergulhante), sendo a velocidade regulada pelo alimentador que compara a tensão do arco com valores de referência para a mesma velocidade fazendo a compensação.

No caso da fixação da velocidade, está-se a trabalhar com uma fonte de tensão de saída constante (característica da fonte plana ou de potencial constante). Quando existe um aumento do comprimento do arco a variação de tensão imposta leva à redução da corrente que baixa a velocidade de fusão, trazendo o arco ao valor original. A diminuição do arco provoca a reacção contrária aumentando a intensidade aumentando a fusão aumentando o arco.

Esta configuração é mais utilizada por ser mais simples e barata, conseguindo bons resultados para fios de diâmetro inferior a 1.6 mm. (2)

2.3.2. Gás de protecção

A escolha do gás em GMAW é essencial. É necessário escolher o produto que melhor se adapta as exigências, correspondendo também as suas limitações. O gás não pode ser visto apenas como um consumível, pois tem grande influência, já que:

- Afecta o arco térmica e electricamente, influenciando a transferência de calor e eficiência do arco;
- Determina a viscosidade e a tensão superficial do metal fundido controlando assim a molhagem, bem como a penetração do cordão e superfície do cordão;
- Influencia a metalurgia do metal de enchimento e do banho.

Para melhor compreender como é que o gás afecta o processo é necessário conhecer em pormenor alguns dos mecanismos físicos associados. Os principais são a condutividade térmica, reactividade química, energia de ionização e dissociação.

A reactividade química de cada gás tem bastante influência no processo. Os gases activos (CO_2 / O_2) são oxidantes e muito reactivos a elevadas temperaturas, e têm tendência a formar óxidos metálicos que, em baixas concentrações, podem melhorar a estabilidade do arco. Os inertes não reagem com o metal a levadas temperaturas reduzindo-se a tendência para a oxidação.

A condutividade térmica determina de que forma é que parte da energia térmica do arco é transferida através do fluxo de gás. Esta situação afecta a geometria do cordão, molhagem, desgasificação do banho, e a velocidade de soldadura. Como se vê na Figura 2.3.5, o Hélio e o Hidrogénio têm valores de condutividade térmica particularmente elevados.

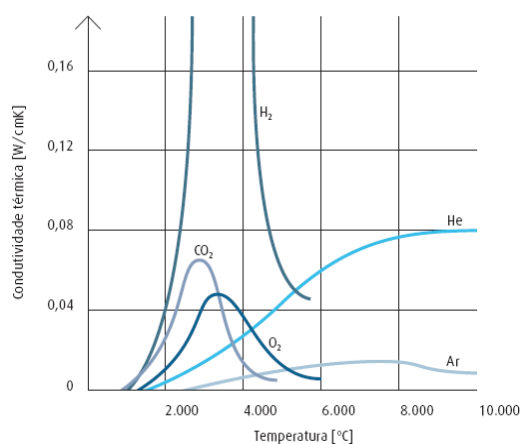


Figura 2.3.5 – Condutividade térmica de vários gases utilizados (9)

Para os gases monoatômicos (Árgon e Hélio) a ionização é directa, ao contrário dos gases poliatômicos (Dióxido de Carbono e Oxigénio) que inicialmente têm de ser dissociados, ocorrendo depois a sua ionização.

A quantidade de energia necessária para a dissociação e ionização de gases monoatômicos é menor relativamente aos poliatômicos, sendo este um dos factores que explica maior facilidade de iniciação do arco de Árgon relativamente ao Dióxido de Carbono.

Este acréscimo de energia consumida é posteriormente libertado na recombinação, podendo aumentar a transferência de calor, velocidade de soldadura e a relação entre profundidade e largura do cordão.

A densidade relativa influencia a eficácia da transferência, dependendo da posição da soldadura.

O Árgon e o Hélio são os gases inertes utilizados na soldadura pois não reagem com qualquer metal, permitindo a sua utilização com todos os metais passíveis de ser soldados por fusão. A nível europeu o gás inerte de maior utilização é o Árgon pois o seu custo é inferior ao Hélio, sucedendo o inverso no continente americano.

Dos gases activos, o mais utilizado é sem dúvida o Dióxido de Carbono. A principal razão é económica, pois trata-se de um gás muito barato (com um custo duas a três vezes menor que os restantes) e pode ser utilizado a 100% na soldadura semi-automática ou ser utilizado em mistura com Árgon ou Hélio.

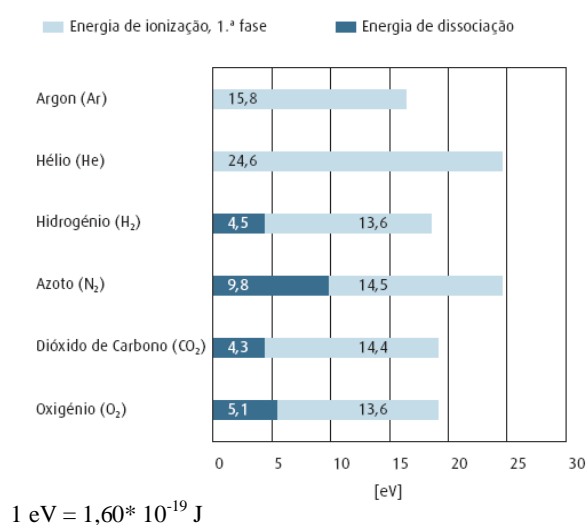


Figura 2.3.6 – Energias de dissociação ionização (9)

Apesar da utilização de CO₂ ter no preço o seu principal impulsionador, este tem as outras vantagens:

- Baixo nível de radiação térmica,
- Relação largura do cordão e penetração superior,
- Relação penetração largura do cordão muito elevada.

Entre as desvantagens encontram-se:

- Um elevado número de projecções,
- Maior dificuldade operatória,
- Estreita banda de tensão – regulação de parâmetros é crítica,
- Menor rentabilidade.

O Árgon não é utilizado a 100% mas geralmente como base principal para uma mistura de Ar-CO₂. Estas misturas têm como vantagem:

- Redução de projecções e estabilidade do arco,
- Menor geração de fumos,
- Acabamento e aspecto visual superior,
- Maior largura de gamas de regulação – regulação menos crítica,
- Penetração mais favorável e superior, principalmente nos fluxados,
- Maior velocidade de soldadura .

Entre as desvantagens estão:

- Custo mais elevado,
- Maior libertação de radiação térmica,
- Poderá ser necessário o recurso a sistemas de arrefecimento.

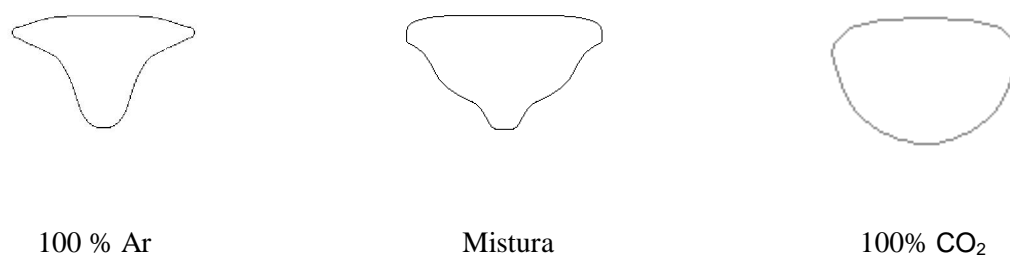


Figura 2.3.7 – Influência do gás no perfil do cordão

A forma do metal fundido na solda é também muito afectada pelo tipo de protecção utilizado. A forma da união com mistura gasosa é uma soma das contribuições de cada um dos gases. Na Figura 2.3.7 está esquematizada a influência do gás na forma do cordão. Como se pode ver, existe uma maior relação largura/profundidade para o Dióxido de Carbono relativamente ao Árgon. Isto acontece como resultado das energias geradas na dissociação/recombinação de um gás diatómico como é o caso do Dióxido de Carbono.

Com uma factura de quase 45 mil euros mensais (Tabela 2.A) referente ao consumo de gás, a importância de justificar o seu uso é por si só evidente.

Tabela 2.A: Consumo de gases de soldadura em Abril de 2008

Gás	Tipo	Quantidade	Custo total
Anidro carbónico	granel	116700 kg	43729 €
Atal 5	garrafa	135.6 m ³	596 €
Arcal 1	garrafa	94.5 m ³	770 €
Anidro carbónico	garrafa	780 kg	1784 €

O recurso ao Dióxido de Carbono pela parte dos ENVC deve-se, sobretudo, a motivos económicos. Isto não quer dizer que seja um gás inadequado para o efeito, pois tem as suas vantagens. Apesar da dificuldade operatória deste tipo de gás ser maior, a sua utilização aliada a um bom fluxado rutílico, permite uma soldabilidade adequada, com baixo custo e boa penetração. O recurso a misturas baseadas em Árgon permite outro tipo de desempenho e qualidade de acabamento. O seu elevado custo é, teoricamente, contra balanceado pela qualidade superior e elevado rendimento.

2.3.3. *Eléctrodo consumível*

Os eléctrodos consumíveis para soldadura são, essencialmente, ligas metálicas de composição química, dureza e condições superficiais bem definidas e muito controladas. O controlo é essencial pois produtos de qualidade inferior provocam instabilidades do arco, inclusões de elementos indesejados ou prejudiciais.



Figura 2.3.8 – Exemplo de alguns consumíveis para soldadura

Quando se trata da escolha do eléctrodo para soldadura semi-automática, o metal de adição utilizado pode ter duas configurações essenciais: fio sólido ou tubular. O fio sólido consiste num arame maciço utilizado como metal de adição. Nesta configuração é necessário e obrigatório recorrer à protecção gasosa – GMAW. Outra configuração consiste num fio tubular, em que no interior é encerrado um fluxo de protecção (FCAW-Fluxed Cored Arc Welding). Neste tipo de eléctrodo a utilização de um gás de protecção tanto pode ser necessária como dispensável, dependendo do tipo de consumível.

O tipo de fluxo utilizado impõe o tipo de comportamento e características da soldadura. Os principais tipos de fluxo são:

- Celulósicos: alto teor de material orgânico
- Rutílico: alto teor de TiO_2
- Básico: cal e fluorita
- Ilmenítico: ferro, titânio e manganês
- Pó de ferro: ferro e silicatos
- Cal-titânio

Os mais utilizados são os rútilicos, já que este tipo de fio possui a melhor soldabilidade (entenda-se soldabilidade como facilidade do operador em soldar), e os básicos, pois este tipo de fluxo permite a obtenção de propriedades mecânicas superiores. Na Tabela 2.B estão expostos os principais tipos de fluxo existentes em FCAW juntamente com algumas das suas características.

Tabela 2.B: Tipo de fluxados existentes (NP EN 758)

	Tipo de fluxo	Passo/ Posição	Transferência	Gás	Propriedades
R	Rútilico, escória de arrefecimento lento	PU-MP (2)	Spray	Ar-CO ₂ CO ₂	Salpicos reduzidos Boa soldabilidade
P	Rútilico, escória de arrefecimento rápido	PU/MP (1)	Spray	Ar-CO ₂ CO ₂	Boa resiliência Boa soldabilidade
B	Básico	PU/MP (1)	Globular	Ar-CO ₂ CO ₂	Excelente tenacidade/resiliência Resistência à fissuração
M	Pó metálico	PU/MP (2) (3)	Spray	Ar-CO ₂ CO ₂	Elevadas velocidades de fusão Boa resistência à fissuração
V	Rútilico ou básico/fluoreto	PU (1)	Ligeiramente Globular/Spray	×	A escória produzida por estes fios eléctricos caracteriza-se por uma gama de solidificações desde o lento ao rápido.
W	Básico/fluoreto, escória de arrefecimento lento	PU/MP (2)(3)	Globular / quase Spray	×	Elevadas taxas de deposição.
Y	Básico/fluoreto, escória de arrefecimento rápido	PU-MP (1)	Spray	×	Boa resistência à fissuração Boa resiliência a baixa temperatura
Z	Classificam-se neste tipo todos os não cobertos pelos tipos atrás descritos.				
	PU Passe único		(1) – Todas as posições		(3) – Horizontal
	MP Multipasse		(2) – Ao baixo		(4) – Vertical

A taxa de deposição destes fios é bastante alta. No entanto no caso dos fluxados de alma metálica – metal-cored – a taxa de deposição é melhorada pela adição de pó de ferro, que permite aumentar bastante a taxa de deposição sem fazer grandes concessões na soldabilidade.

A configuração tubular dos metal-cored tem elevadas taxas pois a sua superfície de passagem de corrente é muito inferior aos sólidos. A densidade de corrente é bastante superior aumentando o calor produzido por efeito de Joule. A maior energia fornecida pelo aquecimento por resistência permite derreter o eléctrodo a uma velocidade superior. O maior rendimento obtido através da inexistência de escória faz com que este tipo de consumível seja dos que têm a maior produtividade de entre os processos semi-automáticos

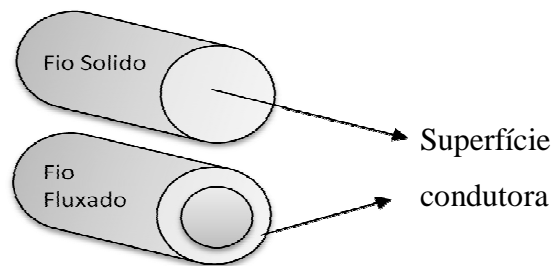


Figura 2.3.9 – Superfícies condutoras nos fios sólidos/tubulares

Um fio fluxado pode ter auto protecção, dispensando o recurso a sistemas de protecção gasosa, o que os torna ideais para pequenos retoques onde não existe acesso a gases de protecção. Podem por outro lado também exigir o recurso à utilização de fluxos protectores de gás, tradicionalmente Dióxido de Carbono ou uma mistura Argon - CO₂.

A capacidade de operar sem gás em FCAW resulta da composição do fluxo que quando queimado permite a criação de uma atmosfera protectora composta pelos gases resultantes. Esta capacidade é limitada a áreas relativamente protegidas de correntes de ar uma vez que este tipo de protecção é muito sensível.

3. Trabalhos experimentais

Análise da soldadura mecanizada nos ENVC página...35

Ensaio dos novos consumíveis página...39

Ensaio mecânico página...55

Este capítulo apresenta-se como um resumo da forte componente prática do projecto existente no decurso do projecto. Os trabalhos de campo podem ser divididos em três fases:

- I. Análise na Soldadura mecanizada nos ENVC
- II. Ensaio dos novos consumíveis
- III. Testes mecânicos

A primeira etapa tem como objectivo principal dar a conhecer os processos de soldadura existentes nos estaleiros. Providencia também um contacto directo com a prática da actividade tendo em vista o objectivo concreto de elaborar de um levantamento dos índices produtivos do processo de soldadura mecanizada a otimizar.

A segunda etapa consiste em ensaiar os novos consumíveis de forma a encontrar o compromisso ideal entre resultado final e custo. É uma etapa enriquecedora pois permite quantificar pessoalmente e de forma bastante profunda o que de facto é a actividade de soldadura.

A última etapa experimental consiste na realização de ensaios mecânicos com objectivo de estudar os cordões, permitindo a aquisição de conhecimentos também nesta área, dando uma perspectiva pessoal a todo o processo e aos seus resultados.

3.1. Análise da soldadura mecanizada nos ENVC

O primeiro contacto prático com a soldadura mecanizada surge justamente nesta etapa, permitindo iniciar um processo de aprendizagem com o objectivo de realizar o levantamento dos índices produtivos do processo. Paralelamente, permitiu obter uma maior sensibilidade prática sobre todo o processo, técnicas e procedimentos utilizados para a obtenção de um cordão aceitável.

Para fazer a caracterização dos consumíveis utilizados na linha, foram definidos os parâmetros que melhor caracterizam as exigências do trabalho. Estes podem ser divididos em dois grupos.

Por um lado, têm-se parâmetros mensuráveis e quantitativos como a velocidade de soldadura, taxa de deposição, geometria do cordão, a quantidade de projecções e fumos libertados. Do outro há que ter em conta factores qualitativos como a soldabilidade, o aparecimento de poros, resistência à ferrugem e revestimento primário e aspecto visual do cordão.

Ao passo que, na soldadura manual não se pode falar verdadeiramente em velocidade de avanço pois esta depende mais do soldador do que dos restantes factores, na mecanização é um factor crucial.

Nesta situação a taxa de deposição de metal não pode ser o único indicativo para avaliar o desempenho dos consumíveis. Terá ainda de se ter em conta a velocidade que o consumível permite operar.

De momento os consumíveis utilizados na linha de painéis são:

- Alloy Rods: Dual Shield 111 RB
- Elga: Elgacore DWX 50

São ambos fios fluxados rutílicos projectados para soldadura mecanizada.

Apesar de serem projectados para mecanização, existem diferenças entre si. O 111-RB é um fio de elevada taxa de deposição e rendimento. Possui uma fina camada de escória que se destaca com alguma facilidade. Uma característica inerente a este fio é a sua elevada taxa de deposição é a tendência para a convexidade do cordão que tem de ser controlada.

O DWX 50, apesar de projectado para mecanização, não está desenhado para este tipo concreto de união. Está projectado para peças mais finas, onde são necessárias menores intensidades e cordões mais finos. Esta característica explica, não só a menor produtividade, mas também a geometria do cordão que se apresenta com qualidade superior ao 111-RB.

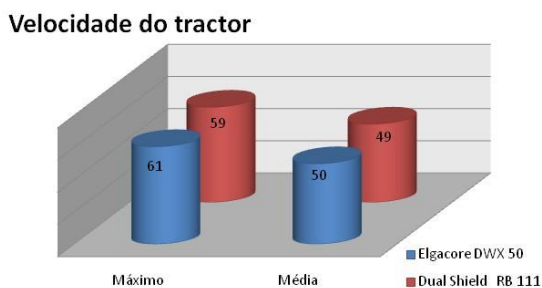


Gráfico 3-A – Velocidade de soldadura dos fios rutilicos

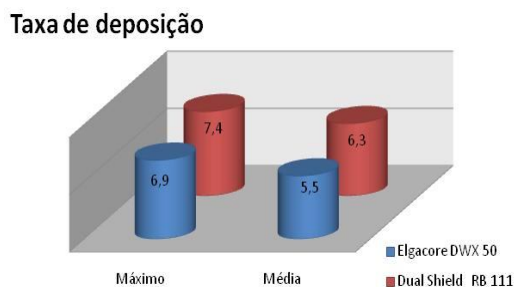


Gráfico 3-B – Taxa de deposição dos fios rutilicos

Como se pode observar pelos gráficos acima, apesar da taxa de deposição ser mais elevada no 111 RB, esta não se traduz necessariamente numa maior velocidade de soldadura, pois nesse campo ambos os fios são utilizados de igual forma.

Estes valores referem-se essencialmente a um tipo básico de união. A mecanização é essencialmente utilizada para fazer a união de elementos resistentes a painéis de grande dimensão (Figura 2.2.3). A configuração da união é uma junta de canto sem chanfro de chapas com espessuras de 10 a 20 mm. O cordão é feito dos dois lados da chapa com colos mínimos de 3 mm, contudo, para diminuir o risco de fissuração, o colo do cordão é geralmente produzido pelos soldadores com 4 a 4.5 mm.

Os parâmetros médios para o 111 RB são intensidades a rondar os 270/280 amperes e tensões de 37-38 V, o DWX 50 tem parâmetros de regulação mais baixos na ordem dos

260/270 amperes e tensões de 37/38 V. As entregas térmicas rondam a 1.2 a 1.4 kJ, valores perfeitamente normais e recomendáveis para as variáveis em causa.

As velocidades de soldadura na linha podem ser estimadas em 50 cm/min. As taxas de deposição variam entre 5.5 kg/hr para o DWX 50 e os 6.3 kg/hr para o 111-RB.

Estes valores são bastante altos, sendo considerados os limites máximos dos processos semi-automáticos com o uso de fluxados rútilicos. É de realçar que as taxas de deposição aqui expressas não contabilizam o rendimento de deposição de metal. Não são levadas em consideração as perdas pela escória e por projecções, pelo que as reais taxas de deposição serão inferiores em cerca de 0,5kg/hr.

Tabela 3.A: Eficiência de deposição dos vários processos (2; 5)

Processo	Protecção	Eficiência
SAW	Fluxo	99 %
GMAW	98% Ar-2% O ₂	98 %
GMAW	Ar – CO ₂	96 %
GMAW	100 % CO ₂	96 %
MCAW	Ar – CO ₂	93 %
FCAW	CO ₂	86 %
FCAW	Auto protegido	78 %
SMAW – 12"	Auto protegido	59 %*
SMAW – 14"	Auto protegido	62 %*
SMAW – 18"	Auto protegido	66 %*

SAW – Arco submerso; MCAW – Mig/Mag com fios metal-cored;
SMAW – Eléctrodo revestido; * – Inclui 2" de desperdício do eléctrodo

A soldabilidade destes fios é adequada à sua utilização e a sua regulação de parâmetros relativamente fácil. A libertação de fumos é aceitável, exigindo contudo o recurso a sistemas de extracção de fumos na oficina. A nível de projecções não se observa diferença quantificável entre os dois fios, o seu nível é aceitável e são de fácil remoção.



Figura 3.1.1 – Tractor em funcionamento

A ocorrência de porosidades depende, na maior parte dos casos, da má preparação da junta. Na maior parte das vezes, a junta não é convenientemente preparada durante a montagem. Um pequeno truque utilizado para diminuir a porosidade consiste na utilização de pequenas porções de arame encravadas sob o elemento resistente a unir. Isto permite uma ligeira folga que facilita a fuga de gases queimados, diminuindo drasticamente a possibilidade de aparecimento de porosidades. Apesar da eficácia, este método nem sempre é utilizado, a poupança de dois minutos a colocar os arames antes de pingar os reforços implica, muitas vezes, uma perda de dez ou vinte minutos a retocar cordões, ou então, obriga à passagem de um segundo cordão sobre toda a extensão do cordão com poros.

Em termos de balanço final, pode-se então afirmar que, para a sua configuração actual, esta área de produção está trabalhar no limite de produtividade estabelecido pela capacidade máxima do processo. Há que referenciar também a existência de desarticulações entre os diferentes serviços que, sendo aparentemente mínimas, levam a que por vezes o incumprimento de certas sequências de produção pré-determinadas, leve à criação de prejuízo.

3.2. Ensaio aos novos consumíveis

Para realizar os testes foram utilizadas chapas de 600x150 mm com espessuras de 8 e 10 mm. O tipo de juntas é de canto sem chanfro. Apesar de em algumas situações terem sido efectuadas rigorosas operações de limpeza, na maioria dos ensaios esta situação não se verificou. Isto foi feito para manter uma semelhança às condições reais da linha de produção. O tipo de aço das chapas é de baixa liga com as composições expressas na Tabela 3.B, retirada dos certificados disponibilizados pela empresa.

Tabela 3.B: Composição química do aço

Espessura	C	Mn	Si	S	Cr	Ceq
8	0,14	0,86	0,20	>0,05	0,2	0,28
10	0,15	0,50	0,21	> 0,02	0,3	0,26

A primeira impressão a registar nesta fase é a menor soldabilidade dos metal-cored. Todos os fios ensaiados se revelaram muito sensíveis na regulação de parâmetros. Para as condições iniciais (com Dióxido de Carbono) os resultados não foram encorajadores, a obtenção de um cordão minimamente aceitável revelou-se de difícil obtenção.

Para contornar esta situação, foi necessário recorrer à regulação de parâmetros muito baixos, o que acaba por prejudicar o seu desempenho.

Foi então inserida uma etapa de testes, a fim de verificar a viabilidade dos consumíveis com outras atmosferas protectoras. Foram ensaiados os fios com atmosferas de gás a 100% de Dióxido de Carbono, mistura Ar-CO₂. A disponibilidade imediata de garrafas de Arcal 1 (100% Ar) levou ao início de testes com este tipo de gás, apesar de não ser uma configuração utilizada na indústria, permite obter resultados maximizados.

Foi também disponibilizada uma mistura tradicionalmente utilizada para soldar aços da secção de encanamentos dos ENVC – Arcal 5. Os fornecedores da ESAB também auxiliaram nos testes trazendo o seu gás – Corgon 18. Além de ser possível conferir o máximo desempenho recorrendo a outro tipo de atmosfera, esta alteração permitiu quantificar, directamente a influência do gás em todo o processo de soldadura, no aumento da soldabilidade, que deriva de um melhor controlo do banho de fusão, o incomparável aspecto visual para os gases de protecção à base de Árgon e o seu rendimento relativo ao CO₂.

3.2.1. Atmosfera protectora: Dióxido de Carbono

Filarc — Fileur AMC 01

Trata-se de um fio cobreado, o que deverá facilitar a alimentação e evitar desgaste nos roletes de alimentação, proporcionando também uma protecção da bobine contra a agressiva corrosão existente em zonas à beira-mar. O revestimento age também como uma superfície condutora, permitindo, uma boa estabilidade do arco, melhorando assim a sua ignição. Este conjunto de características deverá fazer deste fio um bom consumível para soldadura mecanizada.

Os parâmetros fornecidos pelo fabricante para este fio são; intensidades de 150 a 320 amperes e tensões entre 12 e 35 V. Sendo uma gama de parâmetros demasiado alargada foram realizados ensaios iniciais para encontrar os parâmetros mais adequados.

Após a primeira fase de testes os parâmetros apurados foram intensidades a variar entre os 250/300 A e tensões de 29 a 33 V. O débito de CO₂ ronda os 15 litros por minuto.

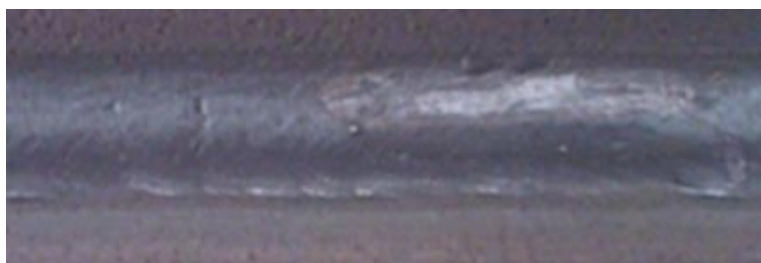


Figura 3.2.1 – Aspecto final do cordão AMC 01 (100% CO₂)

Para estas regulações, é possível trabalhar com velocidades do tractor na ordem dos 35 a 45 cm/min, obtendo cordões com aspecto visual aceitável, como se mostra na Figura 3.2.1. À medida que se vai “puxando” pelo fio, as dificuldades para a correcta regulação da fonte de forma a permitir cordões aceitáveis também aumentam. Dá-se o aparecimento de cordões com grainhas e defeitos potenciados pela posição incorrecta da tocha que leva à deposição de escória para o interior da superfície do cordão (Figura 3.2.2).



Figura 3.2.2 – Defeitos mais comuns nos cordões dos metal-cored com CO₂

O nível de fumos é inferior ao dos fluxados rútilicos, no entanto, o fumo é mais agressivo. As projecções aparentam ser em maior quantidade nos metal-cored (Figura 3.2.3).



Figura 3.2.3 – Emissão de gases: metal-cored / rútilicos

Um aspecto recorrente resulta da elevada taxa de deposição deste tipo de produto, que apresenta uma tendência para a convexidade excessiva do cordão. Quando a regulação de parâmetros e a posição da tocha são as mais adequadas, os cordões têm um aspecto aceitável, existindo sempre uma tendência que pode ser controlada, para o cordão ovalizar. A escória tem um aspecto vidrado com uma cor metálica, depositando-se a intervalos espaçados de forma mais ou menos constantes (Figura 3.2.4). A sua remoção é fácil, caso o arrefecimento já se tenha dado.



Figura 3.2.4 – Influência da escória no cordão (100% CO₂)

É de realçar a boa tolerância à ferrugem que, se presente em quantidades moderadas, não tem qualquer influência no cordão, além de aumentar escória com um aspecto vidrado alaranjado. O seu desempenho, não sendo mau, também não é de particularmente notável. Os melhores resultados com o compromisso entre qualidade do cordão e desempenho do fio encontram-se descritos na Tabela 3.C.

Tabela 3.C: Parâmetros de desempenho óptimo: AMC 01

	Gás	Intensidade	Tensão	TDP	V tractor	Entrega Térmica
	CO ₂	100%	A	V	kg/hr	cm/min
		15 l/min	280~290	33~34	4.5~5	40~50
						1.3 – 1.4

A soldabilidade não é das melhores, é um fio mais difícil de trabalhar do que os fluxados rutílicos, não se obtendo resultados superiores a estes.

Oerlikon — Fluxofil M8

Tal como anterior também este possui um revestimento. O fabricante reclama ainda boa soldabilidade e cordões com bom aspecto. Partindo dos parâmetros iniciais do AMC-01 foi possível obter de imediato cordões de aspecto visual quase aceitável que apresentavam, além de um pequeno excesso de enchimento, um “vinco” a meio do cordão e ao longo de toda a sua extensão como se pode ver na Figura 3.2.5.



Figura 3.2.5 – Cordão Fluxofil M8 como soldado (100% CO₂)

O nível de projecções e libertação de fumos são idênticas ao AMC 01, no entanto as projecções são mais fáceis de retirar e a sua influência no cordão aparenta ser inferior aos outros fios. Regulada a máquina, o aspecto final do cordão é bastante aceitável Figura 3.2.6.



Figura 3.2.6 – Aspecto final do cordão Fluxofil M8 (100% CO₂)

Como se pode ver na Tabela 3.D a capacidade de deposição de metal é superior ao AMC.

Tabela 3.D: Parâmetros Fluxofil M8 (CO₂)

Gás	Intensidade	Tensão	TDP	TDP	V	E.T.
CO ₂ 100%	A	V	kg/hr	g/m	cm/min	kJ/mm
15-20 l/min	280~290	32~34	4.5~5.5	200-220	35~45	1.3-1.4

De entre os metal-cored ensaiados este é o que se revelou mais fácil de trabalhar, sendo relativamente fácil obter cordões de aspecto aceitável. A sua resistência à ferrugem é boa. Em todos os aspectos este consumível é muito semelhante ao AMC 01.

Sendo um consumível projectado para o uso com uma atmosfera protectora composta por mistura de 80% Árgon e 20% Dióxido de Carbono, revelou-se impossível de trabalhar satisfatoriamente.



Figura 3.2.7 – Excesso de projecções 100% CO₂

Apesar de uma boa taxa de deposição, a utilização de uma atmosfera a 100% CO₂ não permite, regra geral, cordões de aspecto aceitável (Figura 3.2.7 e Figura 3.2.8).



Figura 3.2.8 – Inclusão de escória no cordão

ESAB – Ok Tubrod e Aristorod

Os produtos da ESAB demonstraram-se muito difíceis de operar. O Aristorod foi imediatamente descartado pois não se demonstrou capaz de corresponder às expectativas mínimas. O Tubrod 14.12, apesar de difícil no contacto inicial, aparenta ter boas potencialidades. A capacidade de trabalhar com eléctrodo negativo permite-lhe uma maior taxa de deposição e melhor soldabilidade, apesar das dificuldades na obtenção de um cordão aceitável. Os fornecedores do fio disponibilizaram-se a fazer uma demonstração sobre a utilização do fio.

Após os testes dos consumíveis com o auxílio dos fornecedores, conclui-se que este consumível pode ser usado com Dióxido de Carbono de forma aceitável e com bons resultados se a polaridade for negativa e for feita oscilação ao longo do cordão.

Na mecanização em causa esta oscilação manual não é possível de realizar, pelo que torna este consumível inadequado para a disposição do sector produtivo em causa. Foi, pela parte do fornecedor, demonstrado interesse pela utilização de outro tipo de atmosfera disponibilizando-se, para efectuar os testes.

Apreciação final

Durante esta etapa, foi possível verificar algumas características próprias dos metalcored. Com a utilização de CO₂, sendo uma característica intrínseca do gás, dispõe-se de uma largura de banda muito reduzida para a regulação de parâmetros. Este facto veio dificultar de forma considerável todo o processo de testes.

Demonstraram uma boa capacidade de enchimento, o que, no campo de aplicação específico, acaba por não trazer vantagens, pois não permite grandes velocidades de trabalho. A sua capacidade para depositar metal é claramente superior, no entanto, a geometria dos cordões fica muito afectada, e por isso, o perfil plano pretendido toma uma forma a tendencialmente convexa, tornando-os inaceitáveis.

Uma solução passaria pelo aumento da tensão com vista a melhorar o espalhamento do banho. Contudo para velocidades de alimentação muito elevadas, um simples aumento de tensão já não é suficiente para fazer uma boa distribuição do banho. O aumento da velocidade de avanço permite, em parte, resolver a questão, se a alimentação de arame não for muito elevada. A melhor solução passa por reduzir a alimentação de arame, o que permite fazer regulações de parâmetros mais baixas e obter cordões aceitáveis, levando à diminuição dos parâmetros, e reduzindo bastante o desempenho dos fios.

Outra característica a assinalar, é a boa resistência ao aparecimento de porosidade superficial induzida pela presença de ferrugem ou ausência de limpeza da junta. Embora esta resistência seja variável, aparenta ser superior aos rutílicos.

Na grande maioria dos provetes não foram observados poros à superfície do cordão, o que sucedeu durante a elaboração de provetes com os fluxados rutílicos.

No campo visual, e feita uma boa regulação dos parâmetros, o aspecto dos cordões é aceitável, se bem que ligeiramente convexos. Caso o posicionamento da tocha seja adequado a escória deposita-se de forma muito regular, com muito pouca influência no cordão e em quantidades reduzidas aumentando consoante a espessura do primário ou quantidade de ferrugem. A posição da tocha deve ser tal que se empurre o banho, permitindo assim uma deposição regular da escória e um cordão menos ovalizado, tornando-o aceitável.

A libertação de gases é inferior, em volume, nos fluxados rutílicos (Figura 3.2.3) mas bastante agressiva e desconfortável. O nível de projecções varia um pouco de fio para fio. A sua quantidade tende a ser ligeiramente superior aos dos fluxados normais, sendo bastante fáceis de remover. Em certos casos, algumas projecções tendem a cair sobre o cordão, sendo muito difíceis de remover. A soldabilidade é, comparativamente aos rutílicos, má. É muito difícil de acertar os parâmetros, e qualquer pequena alteração leva a resultados desastrosos. Apenas a referenciar que os cobreados são os mais fáceis de trabalhar.

Uma conclusão bem patente nos resultados, é o facto de estes estarem abaixo dos levantados na linha de produção. Tal resultado poderá ter origem em factos como:

- Os testes serem efectuados com cordões muito menos extensos do que os na realidade se fazem na linha, o que leva a uma maior susceptibilidade a erros de medição;
- A menor dimensão dos cordões não permite grandes ajustes, ao passo que na linha os cordões ascendem aos dez metros existindo tempo e espaço para todos os ajustes necessários;
- A familiarização dos soldadores com os fios fluxados permite-lhes operar com um à vontade superior, potenciando o seu desempenho. O inverso ocorre com os metal-cored;
- Finalmente, e talvez o mais relevante, a incapacidade de os metal-cored operarem de forma superior aos rutílicos para atmosferas de protecção com Dióxido de Carbono.

A diferença entre valores da linha de produção e testes de oficina levou a que se fizesse um teste de controlo com o rutílico da linha (DWX 50), de forma a enquadrar os resultados.

As taxas de deposição retiradas durante os testes nas mesmas condições estão muito niveladas. Deve ser mencionado que o 111 RB tem uma taxa de deposição mais elevada que o DWX 50 pois, o primeiro é um fluxado muito semelhante a um metal-cored com

taxas de deposição superiores em 1kg. Para um termo de comparação, será contabilizada a média do desempenho dos rutílicos, no Gráfico 3-C e Gráfico 3-D é possível observar as diferenças.

Velocidade do tractor

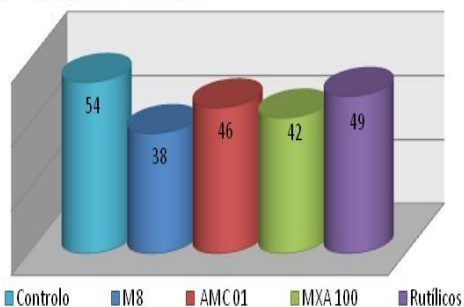


Gráfico 3-C – Velocidade de soldadura nos metal-cored

Taxa de deposição

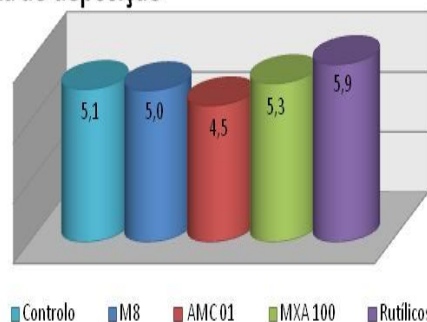


Gráfico 3-D – Taxa de deposição dos metal-cored

Como se pode ver, os resultados são muito inferiores ao esperado não apresentando melhorias relativamente aos rutílicos, nem a nível de produtividade de soldabilidade, nem de qualidade.

3.2.2. Atmosferas protectoras: Árgon

A introdução de Árgon no gás de protecção melhora a soldabilidade, aumenta o rendimento, melhora o aspecto visual e diminui as projecções e fumos. Por estas razões, é também interessante verificar a influência que a alteração de gás introduz no processo de soldadura, adquirindo-se assim uma sensibilidade prática e quantificada referente à sua influência dos vários tipos de gases num processo de soldadura. Estes testes serviram, essencialmente, para verificar as potencialidades máximas de desempenho dos consumíveis pois a nível industrial esta opção não é utilizada.

A introdução de Árgon facilitou a etapa de testes, diminuindo a sua duração para metade, relativamente à etapa com CO₂. Um factor que por si só exprime bem a diferença de desempenho entre os gases.

O aspecto visual em todos os fios é muito semelhante, não se observando diferenças dignas de registo entre os cordões feitos com cada consumível. O aspecto dos cordões é muito bom, praticamente plano e sem imperfeições visíveis (Figura 3.2.9 e Figura 3.2.10).



**Figura 3.2.9 – Cordão como soldado
MXA 100% Ar**



**Figura 3.2.10 – Cordão como soldado
14.12 100% Ar**

A escória é praticamente inexistente, no entanto, quando o cordão passa sobre zonas com ferrugem existe um aumento na quantidade de escória. Se contudo a tocha estiver a empurrar o banho, não tem influência significativa no cordão. Caso a tocha esteja mal posicionada, a sua deposição torna-se ligeiramente irregular, não se depositando com espaçamentos relativamente constantes e na base do cordão. Tal não influencia de forma significativa o cordão (Figura 3.2.11).



Figura 3.2.11 – Influencia da posição da tocha na deposição de escória (100% Ar)

A diminuição na emissão de fumos foi significativa, no entanto, a diminuição das projecções foi reduzida para um nível muitíssimo baixo (Figura 3.2.12).



Figura 3.2.12 – Libertação de fumos: CO₂ / Árgon

Nesta série de ensaios foi possível testar o OK Tubrod 14.12, sendo que os resultados obtidos são muito superiores a todos os outros previamente obtidos. Durante a regulação dos parâmetros foi possível chegar a velocidades de avanço superiores a 70 cm/min com cordões visualmente aceitáveis. Para o caso dos testes, a reduzida espessura das chapas disponíveis no momento (8 mm) tornou-se um factor limitativo. As intensidades de trabalho ascenderam aos 390/400 amperes. A trabalhar com valores desta ordem, promove-se uma entrega térmica demasiado elevada, que nem sempre é bem suportada. Por outro lado conseguem-se velocidades muito elevadas, compensando a entrega térmica, baixando-a para valores mais aceitáveis.

A homogeneidade do comportamento de quase todos os fios permite uma apreciação global, pelo que não serão abordados os comportamentos individuais de cada fio, salvo excepções dignas de nota.

Uma dessas excepções é o fio da Kobe Steel, voltando novamente a demonstrar problemas, desta vez de sobreaquecimento. O bico da tocha, após um ou dois minutos a soldar, sobreaquecia ficando incandescente. Esta situação levou mesmo ao estouro e subsequente fusão do bico da tocha com o cordão (Figura 3.2.13).



Figura 3.2.13 – Bucal fundido devido ao sobreaquecimento da tocha

Após substituição do bico, voltou-se a verificar o sobreaquecimento pelo que os testes foram cancelados, demonstrando ser um consumível instável e inadequado para as condições em questão.

Os fios cobreados não demonstraram problemas. A melhoria da soldabilidade não é tão significativa como nos restantes, pois já era aceitável com CO₂. A avaliar pelos testes o fio da ESAB 14.12, parece ser o mais apropriado ao que se pretende. O intervalo de valores que permite o melhor desempenho para cada consumível está registado na Tabela 3.E.

Tabela 3.E: Parâmetros (100% Árgon)

Consumível	Gás	Intensidade	Tensão	TDP	V tractor	ET
	l/min	A	V	kg/hr	cm/min	kJ/mm
OK Tubrod 14.12	18	360/380	*	7.5-8	60-70	1.04 – 1.1
Fluxofil M8	18	320/330	*	6.5-7	40-50	1.5 – 1.6
Fileur AMC 01	18	350/360	*	6.5-7	40-50	1.64 – 1.78

(*) O equipamento disponível não permitiu extrair valores para a tensão

3.2.3. Atmosferas protectoras: Árgon – Dióxido de Carbono

Foram executados vários ensaios com mistura de gases. O consumível utilizado foi o OK Tubrod 14.12, pois este obteve os melhores resultados com os testes a Árgon. Inicialmente foram feitos testes com o Fileur AMC 01 e o Fluxofil M8, mas cedo se verificou a superioridade do produto da ESAB. Um dos factores que poderá explicar esta diferença será a capacidade deste poder trabalhar com eléctrodo ao negativo. Quando esta opção é utilizada, além de promover maiores taxas de deposição, o arame torna-se mais “macio”, mais fácil de trabalhar, pois existe um melhor controlo sobre banho de fusão, sendo mais fácil de lhe aumentar os parâmetros.

A introdução de um gás binário composto pela mistura de Árgon e Dióxido de Carbono permite avaliar as características de cada um dos gases. As misturas utilizadas são de uso geral para soldadura MIG/MAG à base de Árgon do tipo M21 classificação EN 439.

Entre os diferentes gases não se notou diferença na soldabilidade, estando esse desempenho bastante acima do de 100% CO₂, a diferença para os 100% de Árgon, a existir, não é significativa. A maior rentabilidade do Árgon, aliada à melhoria da penetração e propriedades mecânicas impostas pela utilização de Dióxido de Carbono, fazem deste tipo de mistura a mais utilizada quando o custo não é o factor demasiado restritivo. A sua utilização em detrimento do Dióxido de Carbono e conseqüente acréscimo de custos é geralmente justificada com um aumento de produtividade, que permite cobrir os custos, além de se obter um produto final com melhor qualidade.

A soldabilidade não diminui de forma perceptível relativamente ao Árgon. Existe um aumento na deposição de escória, mas mesmo assim os cordões mantêm um bom aspecto visual após limpeza. A deposição de escória apenas se apresenta irregular (Figura 3.2.15) se a técnica utilizada for a incorrecta, que neste tipo de fio deve ser a empurrar o banho. Ainda assim o aspecto após limpeza é bom (Figura 3.2.16).

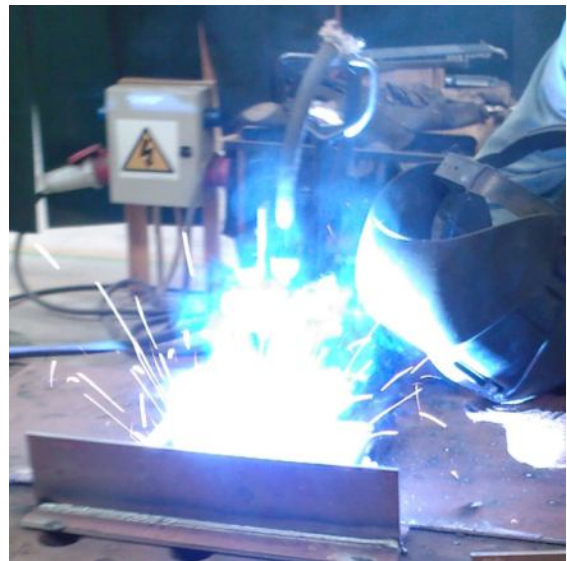


Figura 3.2.14 – Emissão de gases e projecções com atmosfera mista

Nas figuras seguintes pode-se observar o aspecto final dos cordões feitos com gás do tipo M21, como se pode observar na Figura 3.2.16 e Figura 3.2.17, o aspecto final dos cordões é bom.



Figura 3.2.15 – Deposição irregular de escória (Atal 5)



Figura 3.2.16 – Cordão após limpeza (Atal 5)



Figura 3.2.17 – Cordão como soldado (Corgon 18)

Os resultados da Tabela 3.F são os parâmetros médios dos ensaios efectuados. No entanto, deve ser mencionado que foi possível trabalhar com intensidades na ordem dos 350/400 Amperes e velocidades na ordem dos 60/70 cm/min com cordões aceitáveis.

Tabela 3.F: Parâmetros: misturas tipo M21 EN439

<i>Tipo de gás</i>	<i>Caudal</i>	<i>Tensão</i>	<i>Intensidade</i>	<i>V</i>	<i>TDP</i>	<i>E.T.</i>
	<i>l/min</i>	<i>Volt</i>	<i>Amperes</i>	<i>cm/min</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kJ/mm</i>
Atal 5	18	(*)	310/320	54	7	1.12-1.29
Corgon 18	18	(*)	300/320	57	7.2	1.01

(*) – Impossível medir

Os resultados caracterizadores do desempenho nestas condições são ligeiramente inferiores aos obtidos com gás a 100% de Árgon, sendo no entanto excelentes valores numa relação qualidade/desempenho sendo uma velocidade de soldadura de 60 cm/min, um valor que parece perfeitamente aceitável.

3.2.4. Balanço final dos ensaios

O primeiro dado a retirar dos ensaios é a incapacidade dos metal-cored em operar, nas condições instaladas, com resultados satisfatórios. O recurso a este gás não permite uma boa soldabilidade. Para contornar este problema, opta-se por uma redução nos parâmetros para a obtenção de cordões aceitáveis.

Apesar de serem anunciados por parte dos fornecedores cordões com bom aspecto visual e boas taxas de deposição com a utilização de Dióxido de Carbono, na prática, tal não se verifica. Para uma taxa de deposição mais elevada, a tendência para geometrias inaceitáveis é maior, sendo necessário recorrer a subterfúgios para resolver o problema.

Um bom exemplo disso é o caso do 14.12. Se for aplicada uma oscilação no banho de fusão o cordão fica aceitável. Se, com os mesmos parâmetros, for aplicado um passe constante o cordão passa a ficar com uma geometria inaceitável.

O recurso a um gás que maximize a rentabilidade do fio e melhore a soldabilidade permite contornar esta situação com resultados bastante superiores.

No capítulo visual, os cordões com Árgon têm um aspecto muito superior aos produzidos recorrendo ao Dióxido de Carbono. O nível de projecções é muito menor, o mesmo sucedendo com a libertação de fumos.

Desempenho médio

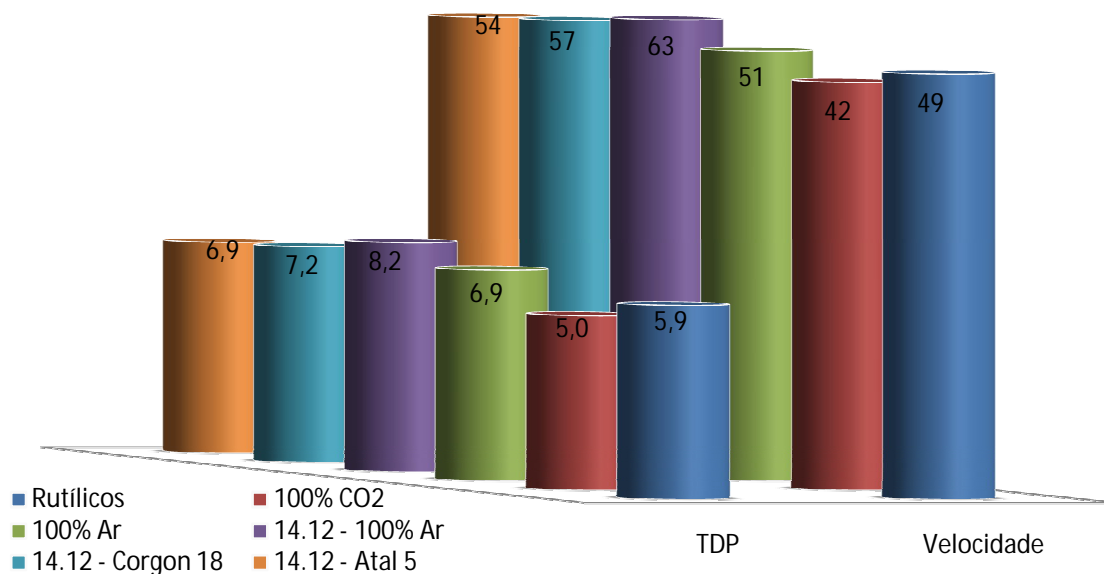


Gráfico 3-E – Desempenho comparativo do 14.12 com diferentes gases

No gráfico encontram-se os valores médios de velocidades e taxas de deposição obtidas, sendo mais perceptível a superioridade do fio 14.12. Como se pode ver, o incremento no desempenho obtido com o recurso a gases à base de Árgon é bastante considerável.

Com a utilização de CO₂, o desempenho dos metal-cored, relativamente aos rutílicos, tem uma evolução negativa na ordem dos 15,2 % nas taxas de deposição. As velocidades de avanço decrescem em cerca de 16,6 %.

Quando se compara o desempenho que alia uma mistura Árgon com fio detentor do melhor desempenho, o 14.12, relativamente ao desempenho dos metal-cored com CO₂ os resultados apresentam grandes melhorias. Para as velocidades de avanço a melhoria média é cerca de 35,7%. Na taxa de deposição a evolução sobe para 44 %.

Quando a comparação é feita entre o 14.12 com mistura e os fios rutílicos a CO₂ a progressão nos resultados é menor, cingindo-se aos 22% nas taxas de deposição e 16,3% na velocidade à qual o cordão é feito.

3.3. Ensaio mecânicos

Para a aprovação das construções por parte das entidades classificadoras é necessário também recorrer à certificação das uniões soldadas. Uma vez que o processo de soldadura mecanizada em questão apenas é utilizado em juntas de canto a norma EN 288/3: qualificação de procedimentos para a soldadura de aços por arco será utilizada como guia. Segundo esta norma, as juntas de canto terão de ser realizadas em chapas com dimensões a e b, figura adjacente, serão obtidas tendo em consideração a espessura, t, tal que:

$$a = 3 \cdot t, \text{ mínimo de } 150 \text{ mm}$$

$$b = 6 \cdot t, \text{ mínimo de } 350 \text{ mm}$$

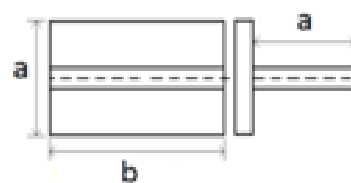


Figura 3.3.1 – Esquema do provete

Tabela 3.G: Ensaio exigidos pela norma EN 288/3

Tipo de provete	Tipo de ensaio	Alcance do ensaio	Notas
	Visual	100 %	#
	Ultra-sons	100 %	1
	Fissuras superficiais	100 %	2
	Dureza	*	3
	Metalografias	2 provetes	#

Notas:

1. Aplicável apenas para aços ferríticos para espessuras superiores a 12 mm;
2. Líquidos penetrantes norma ISO 3452, partículas magnéticas;

Não aplicável no caso de metais base tal que:

- a. Aços ferríticos com $R_m \leq 420 \text{ N/mm}^2$ ($R_e \leq 275 \text{ N/mm}^2$)
- b. Aço-Inox austeníticos

Os testes a realizar serão durezas e metalografias. A imposição de efectuar ultras-sons e líquidos penetrantes não se justifica, pois apenas dão informação sobre a existência, ou não, de defeitos no cordão. Um ensaio tradicional feito nos estaleiros é uma dobragem de chapas soldadas apenas de um lado, permitindo assim ver a penetração de forma simples, económica e muito rápida.

3.3.1. Dobragens

As dobragens foram realizadas numa prensa hidráulica de trinta toneladas de activação manual. A forma como o ensaio é feito está esquematizada na Figura 3.3.2:

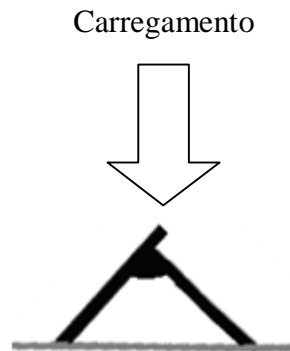


Figura 3.3.2 – Esquema da dobragem

A primeira informação que se destaca das diversas dobragens é a diferença de comportamentos à fractura entre os provetes, conforme a utilização de Dióxido de Carbono ou Árgon.

Em alguns provetes, a dobragem decorreu de forma suave com deformação contínua sem fissuração abrupta. Outros apresentaram comportamento misto em que após uma ligeira deformação inicial, surgiu de forma súbita a rotura, indicando falta de tenacidade em alguns dos provetes, principalmente nos que foram feitos recorrendo ao MXA 100.



Figura 3.3.3 – Tipos de fractura: a) – Frágil (MXA CO₂); b) – Dúctil (AMC CO₂)

O colapso pelo meio do cordão ocorreu apenas em provetes com utilização de Dióxido de Carbono como gás de protecção.

Os provetes de Árgon fracturaram de forma completamente diferente. O colapso de todos os provetes que utilizaram o Árgon deu-se pela lateral do cordão junto à chapa vertical, ao passo que nos cordões que utilizaram CO₂ a fractura deu-se pelo centro do cordão.



Figura 3.3.4 – Fractura em provete de CO₂

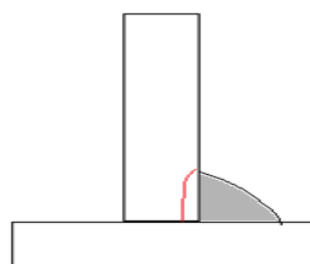


Figura 3.3.5 – Fractura em provete Árgon



Figura 3.3.6 – Provette CO₂ (AMC 01)



Figura 3.3.7 – Provette Árgon (AMC 01)



Figura 3.3.8 – Provette CO₂ (M8)



Figura 3.3.9 – Provette Árgon (M8)

Nos provetes com CO₂, o tipo de fractura permitiu observar porosidades nos provetes que não se observavam à superfície, registando-se aparentemente uma maior tendência do Fluxofil M8, contudo, o reduzido número de provetes não permite extrair uma conclusão fidedigna. A mais provável razão para este problema será a consequência das elevadas intensidades utilizadas.



Figura 3.3.10 – Porosidade num cordão (Fluxofil M8)

Nas soldaduras a Árgon a superfície de rotura é completamente irregular. A ruptura não ocorre segundo um plano bem definido, mas apresenta-se como um arrancamento de metal da interface entre o cordão e a chapa vertical (Figura 3.3.11).

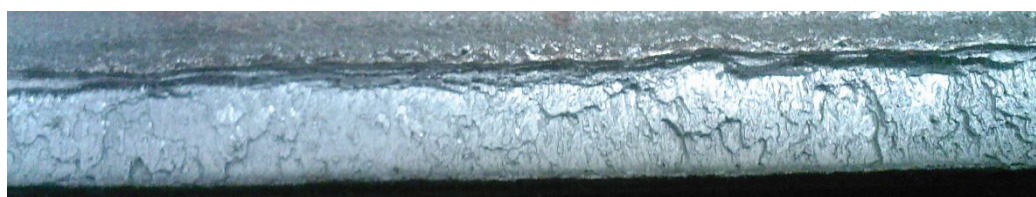


Figura 3.3.11 – Fractura por arrancamento em cordão a Árgon

A existência de um fenómeno com efeitos similares conhecido como arrancamento lamelar pode ser uma explicação. Este fenómeno resultará da combinação de dois factores distintos; a existência de tensões localizadas, procedentes da contracção durante o arrefecimento, e a baixa ductilidade da chapa no sentido da espessura.

A literatura sobre o assunto, (3), refere como causas principais:

- Baixa ductilidade no sentido da espessura da chapa, provocada por defeitos de laminagem.
- A presença de inclusões de forma plana com elevada área de superfície alinhadas segundo a direcção da laminagem da chapa.
- Configurações de junta que imponham tensões residuais de tracção segundo a espessura
- Existência de chapas espessas.

Nenhum dos factores acima referidos se evidência como resposta ao problema, pois apenas as chapas soldadas a Árgon apresentaram este arrancamento, independente mente da espessura das chapas, entregas térmicas e configuração das juntas. O que leva a crer que o gás tenha influência no processo. Um estudo sobre a morfologia do cordão poderá esclarecer a situação, descartando ou confirmando a possibilidade de se tratar de arrancamento lamelar.

3.3.2. Ensaaios metalográficos

Os ensaios metalográficos podem ser separados em dois subgrupos: macrografias e micrografias.

O exame macrográfico consiste na observação de um provete, previamente preparado, recorrendo à microscopia óptica com uma ampliação relativamente baixa. A micrografia é em tudo semelhante, no entanto, as ampliações são da ordem das 100-200 vezes.

A execução deste tipo de exames permite fazer uma descrição pormenorizada da junta soldada, fazendo-se referência principalmente à forma do cordão e dimensão da ZAC (macros) e às estruturas metalúrgicas de solidificação ou constituintes da ZAC (micros). Permitem ainda detectar inclusões de partículas estranhas, como carbonetos ou óxidos não libertados na escória ou até micro porosidades.

As metalografias foram realizadas nos laboratórios de metalurgia da FEUP sobre quatro amostras distintas. Apesar da normas reguladoras exigirem dois provetes por amostra apenas foi realizado um exame de cada tipo em cada provete, pois não é objectivo dos ensaios certificar processos, mas sim descobrir qual a razão da fractura diferenciada para os diferentes gases.

Tabela 3.H: Amostras para metalografias/durezas

Amostra	Consumível	Chapa	ET (kJ)	Gás
1	M	8 mm	1.2	Atal 5
2	M	8 mm	1.1	Corgon 18
3	M	8 mm	1.3	100 %Ar
4	R	10 mm	1.25	100 % CO ₂

R – Rutílico; M – Metal-cored

As amostras foram retiradas dos provetes de testes com recurso a ferramentas de corte refrigerado. A posterior preparação das amostras para este tipo de exame é fundamental.

Após uma operação de desbaste com lixas refrigeradas a água, a amostra é polida. Esse polimento pode ser efectuado de duas formas distintas: polimento mecânico ou electrolítico. O polimento electrolítico consiste na colocação de dois eléctrodos numa superfície condutora levando à formação de um diferencial de potencial. O material detentor do menor potencial funciona como ânodo, dissolvendo-se. Dá-se então a libertação de iões que se deslocam para o eléctrodo de maior electronegatividade (cátodo), pelo que a amostra a polir é o ânodo.

No caso do polimento mecânico, os pratos das polidoras são compostos por panos de feltro ou veludo impregnados com suspensões de abrasivos como óxidos de alumina/magnésio e pasta de diamantes. Este foi o processo utilizado, recorrendo-se à alumina para um primeiro polimento, sendo os passos finais realizados com suspensão de diamantes de 6 e 3 microm.

Após a obtenção de uma superfície polida, esta passa a reflectir toda a radiação incidente o que torna impossível de observar em microscopia óptica. Para contornar este problema é necessário proceder ao contraste da amostra. A contrastação pode ser efectuada de várias formas, tais como o ataque químico (processo utilizado), processos electrolíticos ou até processos físicos e térmicos.

O processo químico consiste na utilização de um reagente químico que faz a dissolução selectiva de constituintes. O reagente depende do material a testar, o mais utilizado em aços não ligados é uma solução de HNO_3 e álcool etílico com concentrações a variar entre dois a cinco por cento em volume. Este é vulgarmente conhecido como Nital.

O ataque realizado para efectuar as micrografias foi Nital a 2% com um tempo de ataque a rondar vinte a trinta segundos. As macrografias foram tiradas após as micrografias às mesmas amostras, pois para uma boa contrastação na macro o ataque foi mais agressivo no sentido de queimar mais a amostra.

Todas as macrografias encontram-se em anexo a este trabalho.

3.3.2.1. Exames macrográficos

O principal objectivo deste tipo de exames é de fazer uma caracterização das heterogeneidades existentes na junta. Entre essas heterogeneidades podem-se enumerar como principais:

Estruturais

Diferenciação das zonas constituintes da junta soldada como ZAC, metal base e zona fundida.

Geométricas

Desalinhamentos, falta de penetração, falta de fusão, bordos queimados, etc.

Físicas

Porosidades, fissuras, inclusões não metálicas ou rechupes.

Químicas

Inclusões, segregações e zonamentos.

A Figura 3.3.12 e Figura 3.3.13 demonstram de forma muito explícita as três zonas distintas de uma junta soldada. É possível observar nitidamente as linhas que delimitam a zona afectada termicamente bem como a linha de fusão e metal depositado.

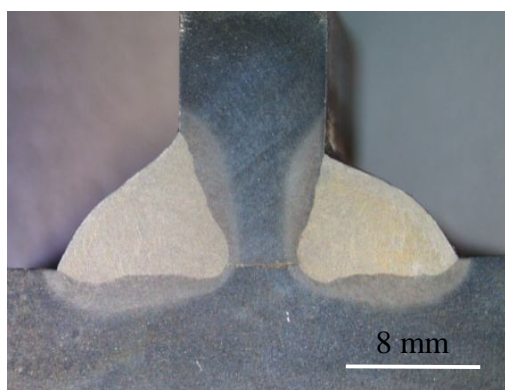


Figura 3.3.12 – Macro da amostra n.º 3
(100 % Ar)



Figura 3.3.13 – Orientação do grão da
zona fundida

A orientação do grão na zona fundida apresentada na Figura 3.3.12 é explicada pelo crescimento do grão. Este inicia-se de acordo com a estrutura cristalina do material base, evoluindo de forma perpendicular às curvas isotérmicas. Assim o grão com alinhamento mais favorável à perpendicular das isotérmicas vai ser o que terá maior desenvolvimento em detrimento dos outros. Esta razão explica a aparência das estruturas metalúrgicas da zona fundida.

A forma do cordão é muito similar ao esquema da Figura 3.2.7, que esquematiza a forma dos cordões a Árgon. À medida que a percentagem de anidro carbónico vai aumentando, a razão entre a penetração e largura da zona fundida vai diminuindo. Para 100% de CO₂ a forma da zona fundida é aproximadamente circular. Por sua vez, o Árgon tem uma zona fundida mais estreita à medida que a profundidade aumenta. Uma mistura dos dois gases apresenta um compromisso entre a forma de cada um deles (esquema da figura 3.2.7).

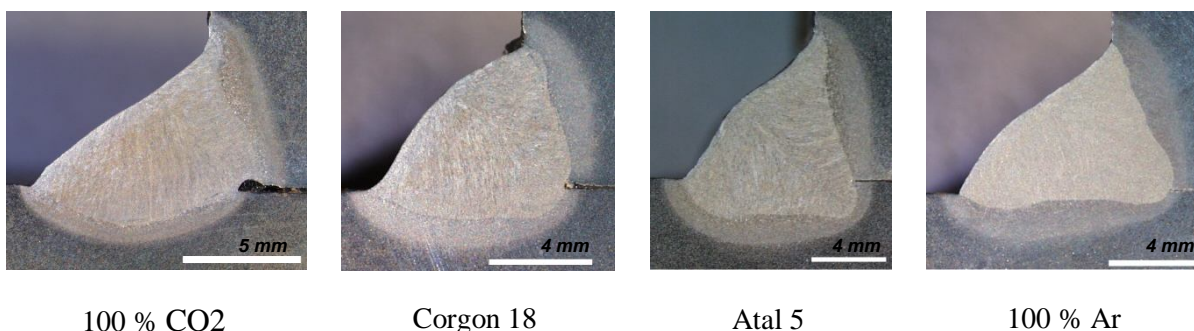


Figura 3.3.14 – Evolução da forma do cordão de acordo com o gás

As macros permitiram verificar que a linha de fusão para atmosferas ricas em Árgon tem um perfil coincidente como o perfil de fractura nos provetes que sofreram rotura por arrancamento. Não se encontrando nenhuma explicação mais forte e plausível para o sucedido, é possível então afirmar que o arrancamento se dá preferencialmente pela linha de fusão onde a maior fragilidade da ZAC potencia esse tipo de rotura.

Este tipo de fractura verifica-se apenas com a utilização de elevados teores de Árgon, pois tem uma geometria que potencia o entalhe pelo qual se inicia a fenda, progredindo a rotura na ZAC de acordo com a orientação da linha de fusão.

3.3.2.2. Exames micrográficos

Este tipo de metalografia permite estudar heterogeneidades, microestruturas (sendo possível dessa forma verificar o tipo de propriedades mecânicas que o material pode apresentar), a forma de arrefecimento ou caracterizar (de forma aproximada e qualitativa), e a composição química do material. Podem também ser extraídos dados sobre o tamanho de grão, fracções volumétricas das fases, fazer a medição de inclusões quer na sua dimensão quer na sua distribuição.

É conveniente fazer uma chamada de atenção, pois nas várias metalografias existem pequenos focos de sujidade que se poderia tentar remover. No entanto sendo esta a primeira vez que efectuei este tipo de trabalhos, e, enquadrando-se estes num período temporal limitado, não foi feita uma preparação demasiado exaustiva.

Metal base – Microestrutura

A Figura 3.3.15 demonstra a microestrutura do metal das chapas de 8 mm, uma estrutura metalúrgica típica de um aço hipoeutectóide. Ao contrário da estrutura típica de um laminado em estado natural, a chapa de 8mm é fornecida com uma microestrutura semelhante à de um aço normalizado, pois as imagens não apresentam indícios de alinhamento do grão geralmente existente em produtos laminados. Isto indica um método de fabrico diferente para cada uma das chapas, provavelmente a uma laminagem a quente permitindo a regeneração do grão.

Na Figura 3.3.16 está representada a estrutura da chapa de 10 mm. Pelo que se observa, esta chapa não apresenta uma estrutura normalizada, já que é possível observar o alinhamento dos grãos imposto pela laminagem da chapa.

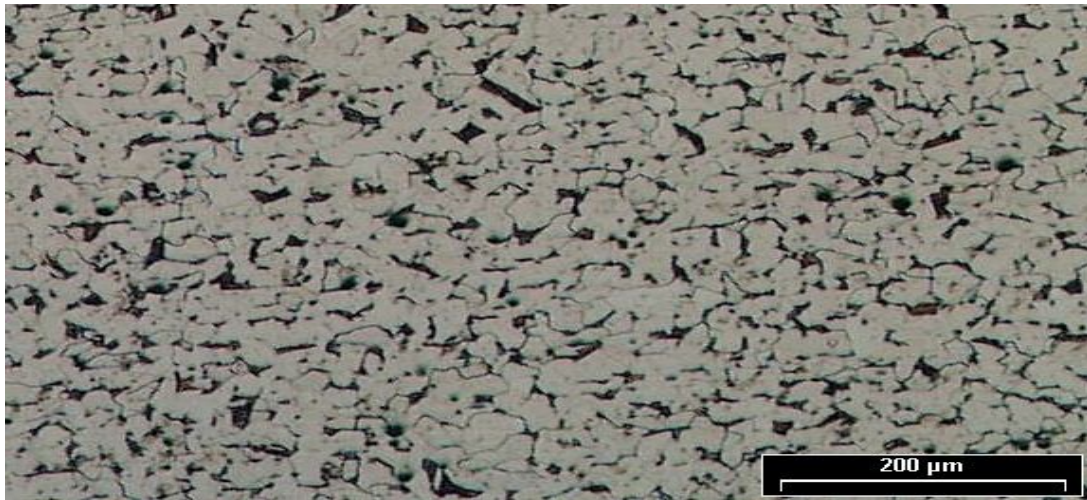


Figura 3.3.15 – Estrutura da chapa de 8 mm (ampliação 25x)

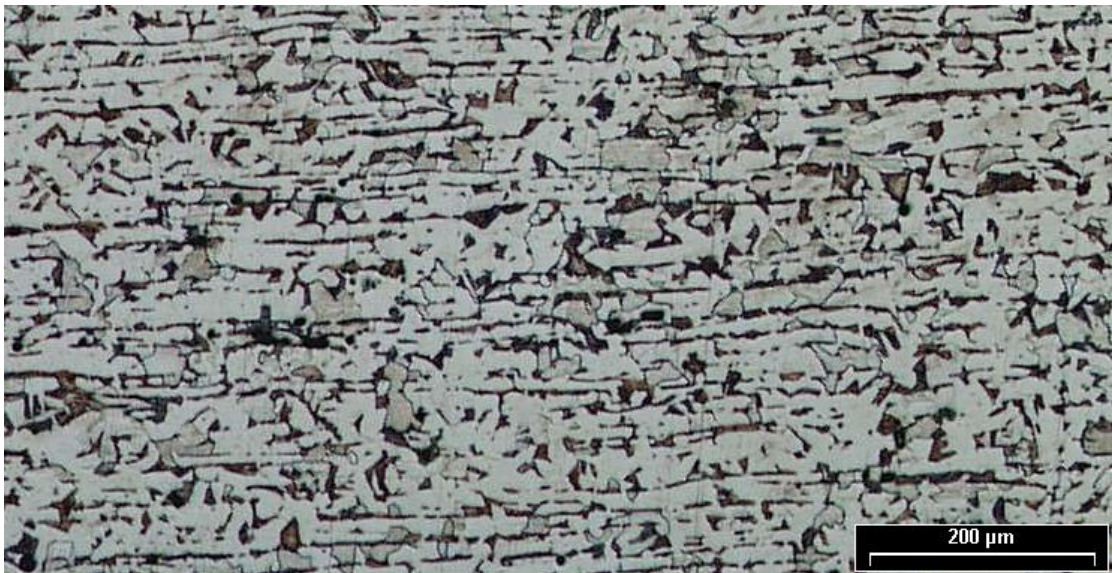


Figura 3.3.16 – Estrutura da chapa de 10 mm

A imagem seguinte (Figura 3.3.17) demonstra em pormenor a microestrutura. Comparando com microestruturas de aços com um teor de 0,1 ou 0,16 % de Carbono, verifica-se uma situação intermédia, o que vem confirmar a presença de um aço com um teor em Carbono nesse intervalo. Este facto é confirmado pelos certificados das chapas que referem as composições expressas na Tabela 3.B da página 39.

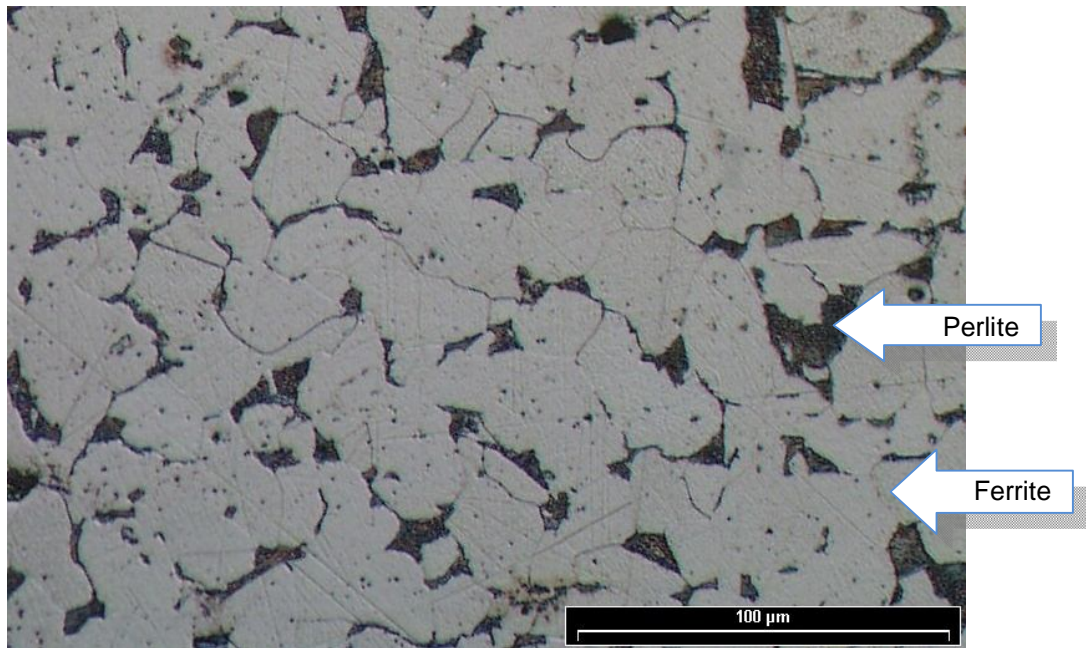


Figura 3.3.17 – Pormenor da estrutura metalúrgica da chapa de 8 mm

Estruturas de solidificação – ZAC e zona fundida

É possível distinguir três tipos de microestruturas identificadoras das zonas numa junta soldada:

1. Zona fundida.
2. ZAC
3. Metal base

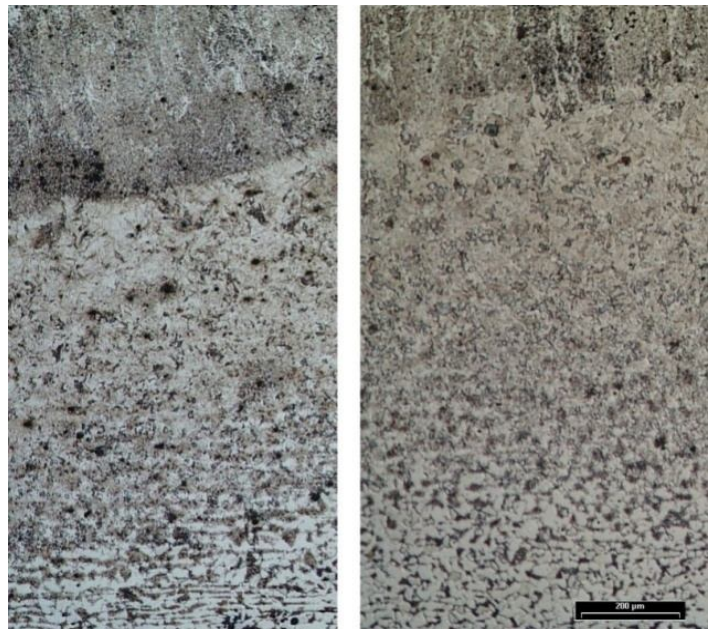


Figura 3.3.18 - Estrutura da ZAC nas chapas de 10 e 8 mm

A microestrutura da ZAC é transversal a todas as amostras, não se registando diferenças dignas de nota como a Figura 3.3.18 que retrata as amostras 3 e 4 demonstra.

As zonas fundidas, por seu lado, apresentam algumas diferenças dignas de registro. A Figura 3.3.19 representa a zona fundida obtida nas amostras 3 e 4.

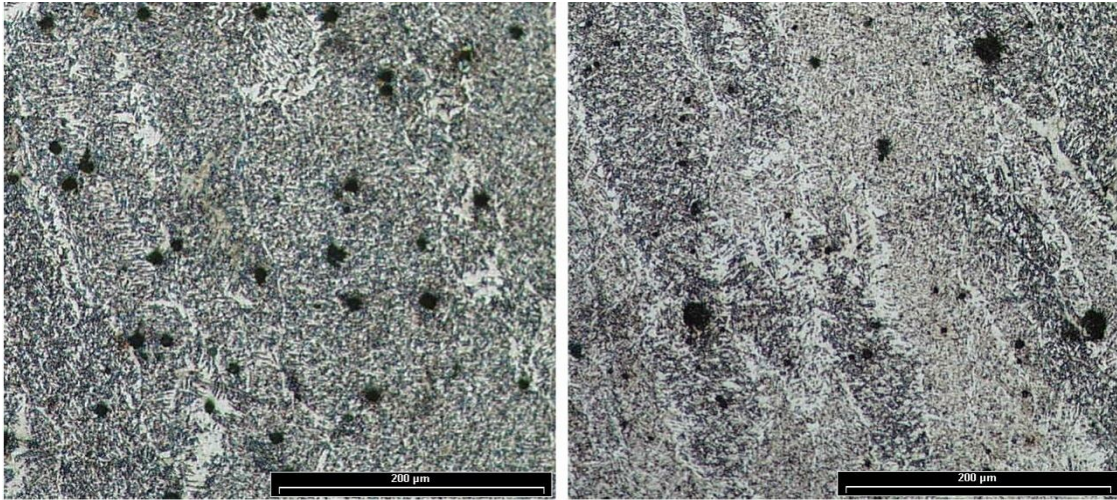


Figura 3.3.19 – Estrutura da zona fundida: a) 100 % Ar; b)100 % CO₂

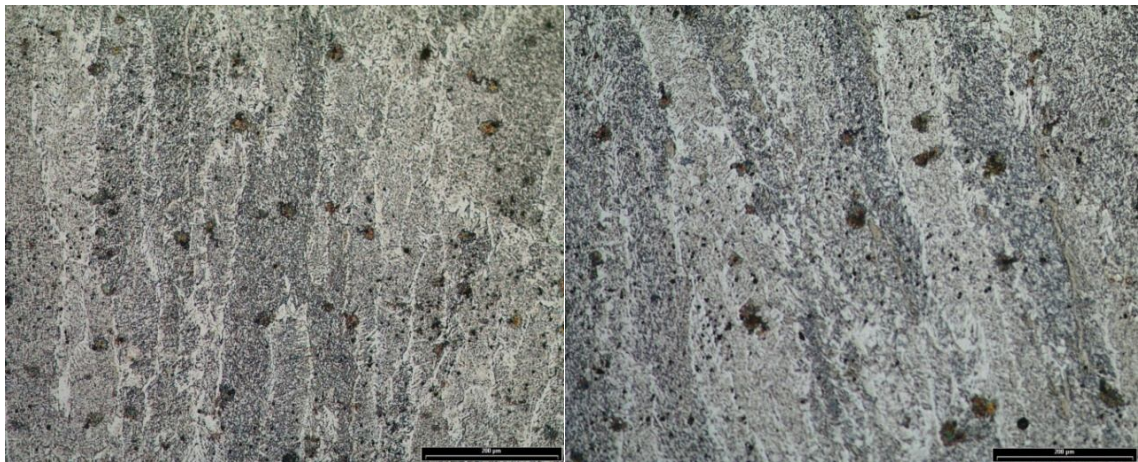


Figura 3.3.20 – Zona fundida: a) Atal 5 b) Corgon 18

A estrutura predominante em ambos os casos é ferrite acicular. Este tipo de estrutura tende a oferecer boa tenacidade, pois o entrelaçamento dos grãos impede a propagação da fissuração (7). Ambas as zonas fundidas apresentam micro porosidades.

As micro porosidades da Figura 3.3.19 são abundantes na zona fundida, no entanto, são consideradas aceitáveis para os padrões da empresa para a aplicação em causa.

3.3.3. Durezas

Uma outra forma de conhecer características mecânicas da junta é proceder a uma filiação de durezas ao longo do cordão. Para a determinação das durezas de Vickers foi utilizada uma carga de 10 kg com um punção de diamante facetado. Para obter a dureza são medidas as diagonais da indentação, consultando-se uma tabela específica (HV_{10}), onde, através da sua média aritmética, é retirada a dureza. A norma reguladora é a ASTM E92.

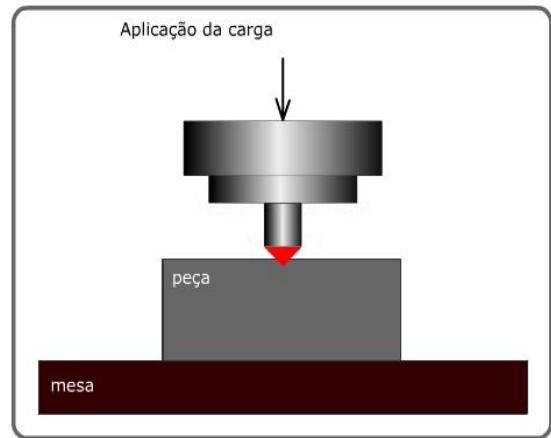


Figura 3.3.21 – Esquema do teste de Vickers

A medição de valores foi feita em intervalos de 1 mm, e atravessado de forma paralela à superfície do cordão as três zonas distintas da junta: metal base, metal depositado e ZAC.

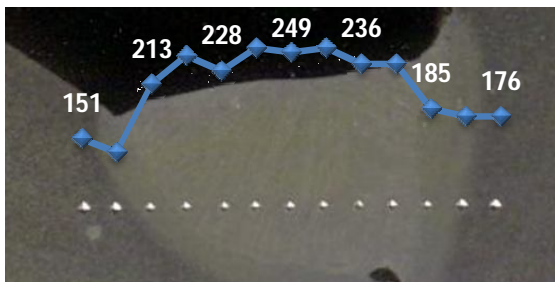


Gráfico 3-F – Filiação de durezas amostra n.º 4

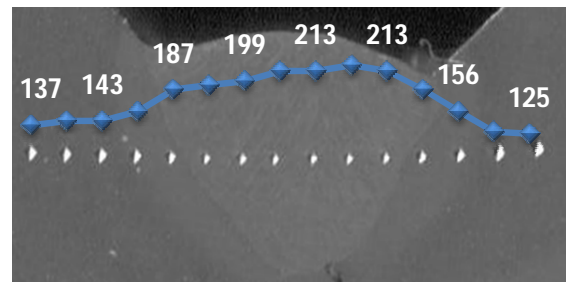


Gráfico 3-H – Filiação de durezas amostra n.º 2



Gráfico 3-G – Filiação de durezas amostra n.º 1



Gráfico 3-I – Filiação de durezas amostra n.º 3

A evolução da dureza expressas do Gráfico 3-F ao Gráfico 3-I demonstram a forma como a solidificação e o arrefecimento influenciaram a dureza ao longo do cordão, afectando a tenacidade da junta.

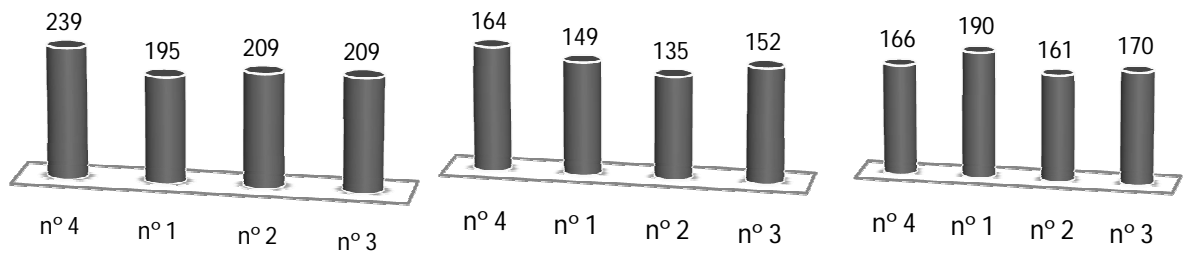


Gráfico 3-J – Durezas zona fundida

Gráfico 3-K – Durezas no metal base

Gráfico 3-L – Durezas na ZAC

As durezas da zona fundida são semelhantes em todas as amostras com Árgon, no entanto para 100% Dióxido de Carbono as durezas são bastante superiores (em média 20/30 HV 10 – Gráfico 3-F). A evolução da dureza ao longo do cordão é aproximadamente simétrica relativamente à bissectriz do cordão, indiciando um arrefecimento uniforme de toda a zona fundida.

3.4. Resumo das características operacionais, técnicas e mecânicas

Como já foi referido, o desempenho de fios fluxados de alma metálica com a utilização de CO₂ não apresenta nenhuma melhoria em relação aos fluxados rutílicos já utilizados. Esta incapacidade resulta de uma geometria inadequada para o que se pretende. A soldabilidade é muito má, o que implica um decréscimo na regulação de parâmetros para os quais o desempenho é inferior aos rutílicos.

A introdução de gases à base Árgon altera completamente o desempenho. Com esta configuração consegue-se facilmente obter cordões com a geometria pretendida. O aspecto visual dos mesmos é bom. No caso de 100% de Árgon o aspecto visual é excelente. No entanto como os ensaios demonstraram, a disposição da zona fundida é tal, que cria um entalhe provocado pela má concordância entre o cordão e a chapa potenciando a fractura pela ZAC.

As atmosferas binárias funcionam como uma situação intermédia. Têm um aspecto do cordão bastante bom, boa geometria, propriedades mecânicas melhoradas e boa soldabilidade. O nível de fumos e projecções é reduzido proporcionando um melhor ambiente de trabalho.

As macrografias apresentaram abundância de micro porosidades na zona fundida das amostras 3 e 4, isto pode ser resultado das elevadas intensidades e velocidades utilizadas, podendo não ter existido uma correcta desgaseificação do banho. Desta forma não se pode tirar nenhuma conclusão por se carecer de dados suficientes.

As durezas revelaram um cordão mais duro para 100% de CO₂, o que poderá significar uma menor tenacidade da junta.

As velocidades de trabalho e taxas de deposição das atmosferas à base de Árgon são bastantes superiores. Relativamente às condições da linha o fio da ESAB com atmosfera mista as melhorias traduzem-se num aumento superior a 16% na velocidade, chegando aos 22% na taxa de deposição. Sendo então necessário verificar se essa melhoria se traduz numa diminuição dos custos (secção 3.5).

3.5. Análise de custos

O projecto de orçamentação de custos é tradicionalmente feito de forma aproximada, não sendo *a priori* possível obter um valor com grande precisão, pois as variáveis em causa são, em geral de difícil quantificação. É possível, contudo, fazer aproximações suficientemente fidedignas, mas no geral na soldadura manual a experiência e registos históricos são os mais fiáveis para fazer estimativas. A mecanização, por sua vez permite um maior controlo sobre as variáveis permitindo assim um maior controlo a nível de custos.

O primeiro aspecto a ter em conta é o processo, pois a cada um está imputado um tipo de custo específico. Entre todos há um paralelismo em certas variáveis tais como o custo da energia, mão-de-obra, equipamentos e acessórios não integrantes do processo em si, como equipamentos de segurança, etc.

O impacto do consumo energético é baixo quando comparado com o custo do processo em geral, além de ser transversal a todos os processos, existe bastante dificuldade na sua determinação (depende, por exemplo, do rendimento da fonte), pelo que a componente dos custos energéticos não será contabilizada. Chega-se então à conclusão que os principais custos operatórios advém do impacto do:

- Eléctrodo consumível
- Gás de protecção
- Mão-de-obra

No caso do eléctrodo consumível há que fazer duas distinções: os fluxados rutílicos e os metal-cored. Esta divisão terá de ser feita pois as suas características operatórias implicam um rendimento que difere de acordo com a escória e projecções. Não existindo tempo para avaliar o rendimento individual de cada teste, recorre-se a valores tabelados de vários processos (Tabela 3.A).

No caso de FCAW, e recorrendo a anidro carbónico como gás de protecção o rendimento ronda os 86 %, para os fluxados de alma metálica (MCAW) com o recurso a mistura de gás à base de Árgon a eficiência sobe para os 93%. Sendo que para condições de boa limpeza da chapa, recurso a atmosferas que permitam pouca geração de salpicos levam a um rendimento muito próximo dos 100%.

Na situação de soldadura manual, um projecto de orçamentação contabilizaria o custo de uma forma semelhante à seguinte:

Quantidade de Metal Depositado necessário:

$$QMD \left(\frac{kg}{m} \right) = CSA * \rho_{metal}$$

CSA – Área da secção do cordão

ρ_{metal} - Densidade do metal de adição
tipicamente 7833kg/m³

A existência de determinado rendimento para cada processo faz com que a Quantidade de Metal Consumido seja:

$$QMC \left(\frac{kg}{m} \right) = \frac{QMD}{\eta_{processo}}$$

$\eta_{processo}$ - Consultar Tabela 3.A
da página 37

Assim o custo com eléctrodo (CE) pode ser orçamentado em:

$$CE_{(\€/m)} = QMC_{kg/m} * CU_{€/kg} \quad (*)$$

(*) Valores de custos segundo Fattori (8)

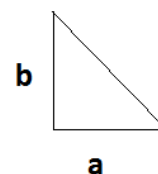
O valor anterior é apenas uma aproximação. Utilizando a fórmula seguinte e partindo de valores experimentais, pode-se confirmar que esta fornece valores quase exactos, a partir de duas variáveis de fácil determinação:

$$CMC \left(\frac{\text{€}}{\text{m}} \right) = \frac{\text{Taxa deposição} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) * \text{Custo consumível} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right)}{\text{Velocidade} \left(\frac{\text{m}}{\text{hr}} \right)}$$

A Tabela 3.I faz a comparação, recorrendo a dados reais, dos dois métodos de estimar custos, observa-se então que o CMC é o mais aproximado do real sendo exacta até ao cêntimo. No entanto, a expressão apenas é validada para soldadura mecanizada/automatizada. Assim, os custos de do eléctrodo podem ser indexados apenas à velocidade e taxas de deposição com elevada precisão, sem necessidade de proceder a medições e cálculos demasiado complicados.

Tabela 3.I – Estimativa de custos quanto ao eléctrodo consumível

	DWX 50 - I	DWX 50 - I	111 RB - I	111 RB - II
Densidade	7833 kg/m ³			
Rendimento	86%			
Colo mm	4.1	4	4	4.1
a (mm)	6.5	6	5	06.5
b (mm)	5	5	5	5
CSA (m ²)	1.63E-05	1.50E-05	1.42E-05	1.63E-05
Comprimento do cordão (m)	11.82	11.60	20.41	11.82
Metal Consumido (kg)	2.82	2.32	4.60	2.82
TDP (kg/hr)	7.36	6.10	6.72	7.36
Velocidade (m/hr)	30.86	30.48	29.82	30.86
Custo do consumível (€/kg)	2.15	2.15	2.10	2.10
QMD kg/m	0.13	0.12	0.11	0.13
QMC kg/m	0.15	0.14	0.13	0.15
Orçado (€/m)	0.32	0.29	0.27	0.31
CMC (€/m)	0.51	0.43	0.47	0.50
Real (€/m)	0.51	0.43	0.47	0.50



Para contabilizar o impacto do gás, partindo dos mesmos pressupostos utilizados para o custo do metal consumido, pode-se recorrer à fórmula

$$CG \left(\frac{\text{€}}{\text{m}} \right) = \frac{\text{Debito gás} \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right) * \text{Custo gás} \left(\frac{\text{€}}{\text{l}} \right)}{\text{Velocidade} \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right)} * 100 \left(\frac{\text{cm}}{\text{m}} \right)$$

Por fim a o custo de mão-de-obra, é contabilizado por cada metro de cordão em:

$$CMO \left(\frac{\text{€}}{\text{m}} \right) = \frac{\text{Custo do trabalhador à empresa} \left(\frac{\text{€}}{\text{hr}} \right)}{\text{Velocidade de trabalho} \left(\frac{\text{m}}{\text{hr}} \right)}$$

O custo do metro de cordão será então:

$$CT_{(\text{€/m})} = CMC + CG + CMO$$

Não existindo dados disponíveis para o custo do Árgon a granel será feita a comparação entre custos com o gás em garrafa. Para que fique uma ideia, o CO₂ em garrafa é 5 vezes mais caro do que a granel, no entanto, isso no custo final implica apenas um aumento de 10% no custo do cordão.

Para o cálculo dos custos foram utilizados os custos da Tabela 3.J.

Tabela 3.J – Custos

Gás (cêntimos/l)			Consumível Preço (€/kg)	
Garrafa	Árgon	0.814	Rutílico	2.15
	Mistura	0.439	Metal-Cored	2.20 (*)
	CO ₂	0.418		
Granel	CO ₂	0.069	(*) - Estimado	
Mão-de-obra: 16,6 €/hr				

Calculados os custos, pode-se observar no gráfico seguinte, contabilizando o custo do gás em garrafa, que não se retira ganho económico para a utilização de misturas à base de Árgon.

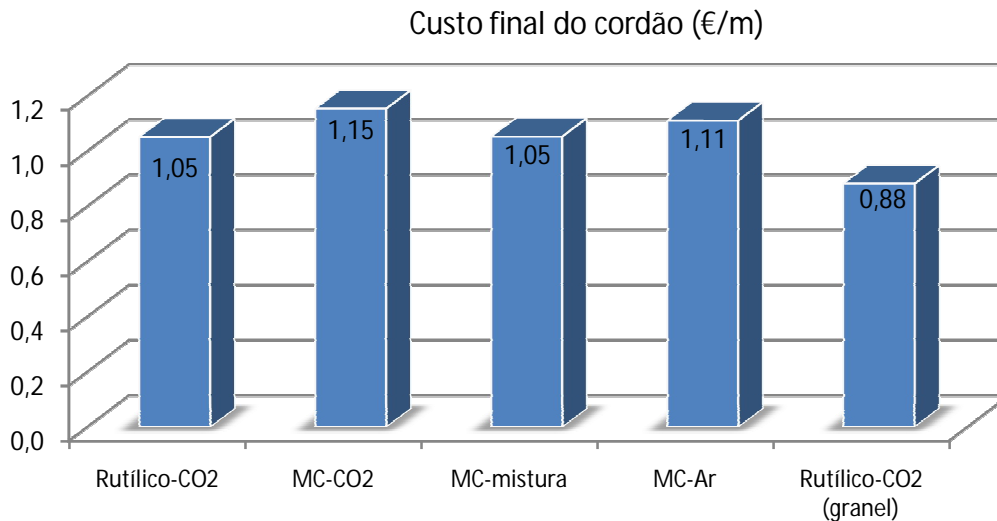


Gráfico 3-M – Custos operatórios comparativos

Contabilizando os custos do cordão, pode-se estimar a influência de mão-de-obra em cerca de 50% do custo total, o custo do eléctrodo em cerca de 30% e o gás em apenas 20%. A influência dos factores varia um pouco em função do tipo de gás, mas o principal factor é sem duvida a mão-de-obra, sendo este o principal factor que leva algumas empresas a optarem por gases que chegam a ser duas a três vezes mais caro que o Dióxido de Carbono.

A obtenção de valores para o custo de Árgon a granel poderia esclarecer melhor se, de facto, o ganho em utilizar mistura compensaria. O volume de gás consumido pelos ENVC torna impossível estimar um valor credível para o custo de Árgon, pois a empresa possui capacidade de negociação suficiente para reduzir os preços de tal forma que é difícil fazer uma aproximação credível aos custos que teria em todo o processo.

Conclui-se então, que o uso de CO₂ com fios de alma metálica não é uma opção economicamente viável.

4. *Balanço final do projecto*

Viabilidade da implementação pretendida... página 79

Outras aplicações e soluções paralelas ... página 79

Considerações finais... página 83

4.1. Viabilidade da implementação pretendida

Os trabalhos realizados permitiram concluir que a aplicação de fios metal-cored com protecção de Dióxido de Carbono é incapaz de superar fios fluxados rutílicos na mecanização especificada com as especificações requeridas.

O recurso a uma mistura de gás à base de Árgon, aliada à utilização de um fio fluxado de alma metálica, permite aceder a todas as exigências de produção. Possibilita um acabamento superficial superior, melhor ambiente de trabalho e um aumento de desempenho. Este pode ser contabilizado num aumento de 16% nas velocidades de trabalho e de 22% nas taxas de deposição.

Pela breve análise económica elaborada, é claro que a adopção de fluxados de alma metálica com CO₂ é economicamente inviável. Isto, aliado à impraticabilidade da sua implementação técnica, torna muito clara a sua incapacidade de satisfazer os objectivos que inicialmente foram propostos.

Dada a dificuldade de implementação de fios metal-cored com Dióxido de Carbono esta opção não é recomendada, pois não permite nenhum tipo de melhoria produtiva, de qualidade, ou económica.

A sua utilização com atmosferas à base de Árgon impõe resultados de produtividade superiores, melhor facilidade de trabalho, melhor qualidade e economia de operações pós-solda. O custo desta solução é sensivelmente o mesmo, contabilizando o custo de gás em garrafa.

4.2. Outras aplicações e soluções paralelas

É clara a maior taxa de deposição dos fios de alma metálica, mas a geometria dos cordões não é das melhores quando estão associados à utilização Dióxido de Carbono.

No entanto, a sua capacidade como consumível de enchimento é excelente. A elevada capacidade deposição, aliada à ausência de escória, permite fazer cordões com um nível considerável de passes, sem qualquer operação de remoção de escória. Têm ainda vantagem extra de possuírem boa resistência à ferrugem, o que os perfila como bons candidatos a usar em reparações.

Aliados à utilização com atmosferas à base de Argon são excelentes soluções para áreas onde a exigência de qualidade final é imprescindível, sempre que o custo do gás não seja problema são a escolha ideal.

Não foi só na área directamente ligada à soldadura que a experiência se revelou uma mais-valia. A estadia nos ENVC também possibilitou observar em primeira mão os desafios impostos a uma estrutura produtiva. Entender como é que os diferentes serviços cooperam, a capacidade que uma área tem de influenciar outra criando-lhe dificuldades ou tornando o seu trabalho mais fácil. No fundo compreender verdadeiramente a dinâmica que uma empresa necessita para um bom funcionamento, bem como os problemas internos com que se depara.

Tome-se o exemplo da oficina de painéis, o local onde o recurso a sistemas mecanizados ou automatizados é bastante utilizado. A disposição esquematizada na Figura 2.2.4 permite um volume de produção significativo com um recurso a pouca mão-de-obra. Apresenta contudo um bottle-neck na parte da montagem dos elementos resistentes. A menor capacidade de produção deste subsector leva à criação de um estrangulamento da cadeia produtiva que acaba por originar tempos improdutivos a jusante da linha de produção. Uma razão para este facto deve-se, sobretudo ao método de montagem utilizado, pois trata-se de um método essencialmente manual e demorado por natureza.

A correcção deste estrangulamento poderia passar pela implementação de sistemas alimentação e de posicionamento mecânicos acompanhados de sistemas de fixação de activação servo hidráulica capazes de posicionar e pressionar os elementos resistentes de forma mais rápida com o recurso a menos mão-de-obra e de forma mais eficaz. Permitiriam um aumento da cadência que teria de ser compensado com um sistema de soldadura a jusante capaz de suportar o aumento da carga de trabalho. Uma alteração nesta etapa poderá exigir uma mudança de estratégia na união dos reforços, talvez adoptando pórticos de soldadura MIG/MAG ou sistemas de arco submerso capazes de fazer este tipo de união.

A alteração que talvez melhor impacto poderia obter no aumento de produtividade seria o abandono de sistemas semi-automáticos e a adopção de um sistema de arco submerso semelhante ao da Figura 4.2.1. Além da maior versatilidade, a capacidade de fazer o cordão dos dois lados simultaneamente, dobrando a carga de trabalho, a maior eficácia inerente ao arco submerso traz ainda um incremento de velocidade, o que impõe um aumento ainda mais significativo. A qualidade da soldadura seria superior, e o número de defeitos menor.



Figura 4.2.1 – Tractor de arco submerso ideal para a aplicação em causa

Outro exemplo de aplicações paralelas nas quais se poderiam implementar processos automatizados seria a inserção de sistemas robotizados na oficina do pólo do aço. Esta constrói pequenos conjuntos (chapas reforçadas de pequena dimensão – 1 a 2 m de lado – responsáveis coisas pela ligação entre painéis dos blocos). É uma solução encontrada em algumas empresas que produzem estruturas semelhantes. Neste tipo de estrutura, a relativa simplicidade geométrica e juntas simples deverá permitir a inclusão de sistemas automatizados/robotizados.

Na área de encanamentos, a introdução de equipamentos de soldadura orbital para a união de tubos de forma automatizada poderia ser uma estratégia a estudar. No entanto teria de se ter em conta que na união de tubos, sendo este um processo relativamente standard, não existem grandes séries, exigindo portanto uma grande versatilidade do equipamento para garantir a sua rentabilidade. Essa versatilidade teria de incluir a capacidade de trabalhar com uma variada gama de materiais, espessuras e diâmetros, bem como uma estrutura que permita lidar com as formas complexas das tubagens.

Este tipo de melhorias carece sempre de investimentos de volume considerável, sendo necessário verificar, tanto a viabilidade técnica como rentabilidade de tais opções. Servindo essencialmente como um exercício de valor académico de implementação de conhecimentos adquiridos.

4.3. Considerações finais

Este projecto permitiu dar a conhecer o que realmente é a soldadura numa empresa. Ficou contudo a impressão que a nível industrial existe uma falta de investimento no desenvolvimento da área, apesar do aparecimento de novos investimentos em que o recurso a este tipo de processo é imprescindível, levando a uma estagnação no desenvolvimento do sector.

A transversalidade permitida e encorajada pela orientação dada ao projecto pelo engenheiro Alfredo Silva, possibilitou ultrapassar as áreas de aprendizagem restringidas ao projecto. Permitiu uma melhor compreensão da cultura da empresa, o seu layout produtivo, pontos fortes e suas fragilidades, um panorama geral da sua orgânica, técnicas de produção e estrutura administrativas.

A interacção com vários profissionais, tanto do sector de produção, como mais ligados à área de projecto, permitiu evoluir as aptidões necessárias para um melhor relacionamento interpessoal numa perspectiva profissional. A estadia no serviço de soldadura permitiu também observar diferentes estratégias de liderança por parte das chefias, dando uma maior sensibilidade à dinâmica de trabalho que se encontra num ambiente de produção. Observar as diferentes filosofias que cada indivíduo adopta para levar a cabo a sua função, permitiu ver as que melhor se adaptam a determinado tipo de pessoa ou função.

O projecto fomentou ainda o desenvolvimento de maior autonomia pessoal, maior capacidade de transposição de obstáculos, incitamento à procura de novas soluções ou diferentes ângulos de aproximação a diferentes problemas.

A experiência revelou-se um excelente processo de aprendizagem e de evolução a nível pessoal, social e sobretudo profissional, sendo também considerada uma das experiências mais frutuosas em todo o percurso académico. Considero a experiência indispensável a todos os que desejem enveredar no mundo do trabalho pela indústria e, em particular, nas áreas directamente ligadas à produção.

5. Bibliografia

1. About.com. [Online] <http://inventors.about.com/library/inventors/blwelding.htm>.
2. **ENVC**. *Manual sobre conceitos genéricos de soldadura*. s.l. : Centro de Formação, 2000.
3. **Lopes, E. M. Dias e Miranda, R. M.** *Metalurgia da Soldadura*. s.l. : Instituto da Soldadura e Qualidade, n.d.
4. **Cary, Howard B.** *Modern Welding technology*. Englewood Cliffs - New Jersey : Prentice-Hall, 1979.
5. **ESAB**. OK TUBROD Cored wires - Product brief. s.l. : ESAB Group.
6. ESAB North America. [Online] <http://www.esabna.com>.
7. **OLIVEIRA, N. P.** “*Propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono com estrutura ferrita acicular*”. s.l. : Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista, 2007.
8. **Fattori, Henrique**. *Custos de Soldadura*. s.l. : DEMEC - FEUP, 1987.
9. **Linde Sogás, Lda**. Catalogo Lynde Gas. [Online] www.linde.pt.
10. **Soares, Pinto**. *Aços, Características e tratamentos*. s.l. : LivroLuz, 1992.
11. **Silva, Alfredo**. *Ensaio comparativo de fios fluxados*. Viana do Castelo : ENVC, 1999.
12. **The Lincoln Electric Company**. <http://www.lincolnelectric.com/>. [Online] <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/c4200.pdf>.
13. **Astilleros de Huelva, S.A.** *Informe sobre rentabilidad en el uso de hilos tubulares*. Huelva : s.n., 1995. Estudio técnico-económico.
14. Estaleiros Navais de Viana do Castelo. *ENVC*. [Online] <http://www.envc.pt>.



Anexos

A. Metalografias

Figura A.1 – Estrutura típica do metal base das amostras 1,2 e 3	91
Figura A.2 – Estrutura típica do metal base das amostras 1 a 3.	91
Figura A.3 – Microestrutura do metal base – filtro diferencial interferencial de contraste.....	93
Figura A.4 – Estrutura da chapa da amostra n.º 4: alinhamento de grão	93
Figura A.5– Macro da amostra n.º 1.....	95
Figura A.6 – Amostra n.º 1: Pormenor do crescimento de grão.....	95
Figura A.7 – Amostra n.º 1: Microestrutura da ZAC	97
Figura A.8– Amostra n.º 1: Estrutura de solidificação	97
Figura A.9 – Macro da amostra n.º 2.....	99
Figura A.10 – Amostra n.º 2: Pormenor do crescimento de grão.....	99
Figura A.11 – Amostra n.º 2: Zona afectada pelo calor.....	101
Figura A.12 – Amostra n.º 2: Estrutura do metal depositado.....	101
Figura A.13 – Macro amostra n.º 3 (100% Árgon)	103
Figura A.14 – Amostra n.º 3: Pormenor do crescimento de grão.....	103
Figura A.15– Amostra n.º 3: ZAC	105
Figura A.16 – Microestrutura do metal depositado: micro porosidades	105
Figura A.17 – Macro da amostra n.º 4 – 100% CO ₂	107
Figura A.18 – Micro da amostra n.º 4: ZAC.....	107
Figura A.19 – Amostra n.º 4: Estruturas de solidificação do metal depositado	109

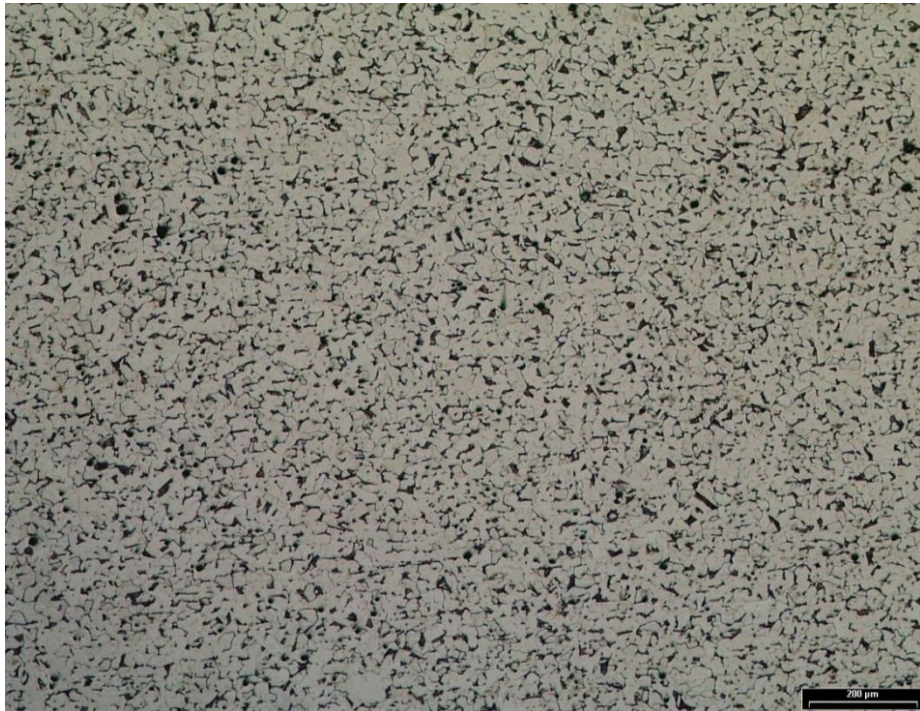


Figura A.1 – Estrutura típica do metal base das amostras 1,2 e 3

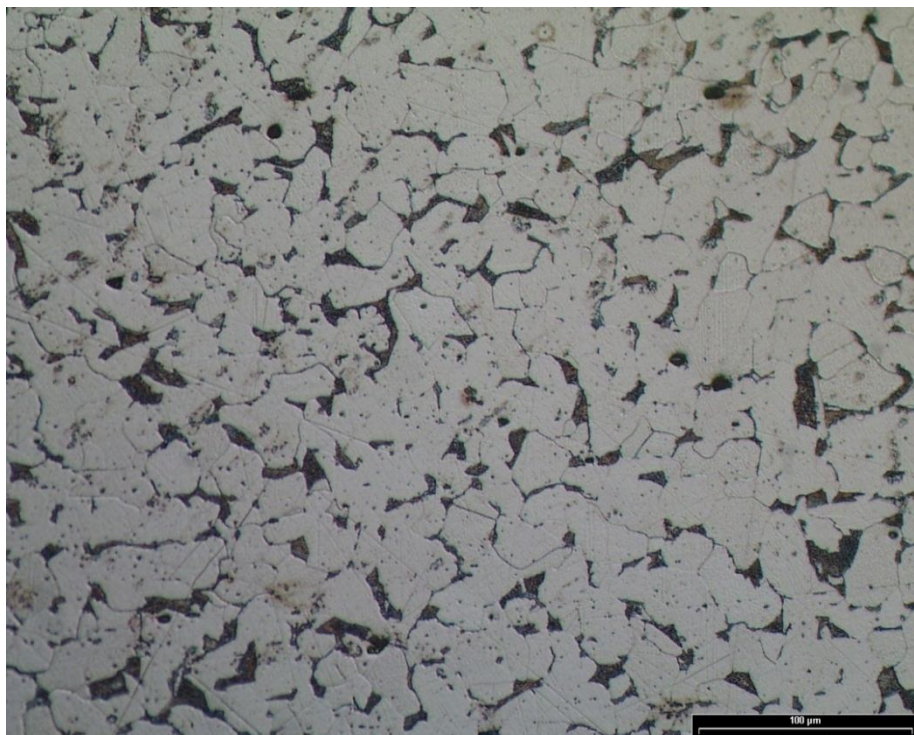


Figura A.2 – Estrutura típica do metal base das amostras 1 a 3.

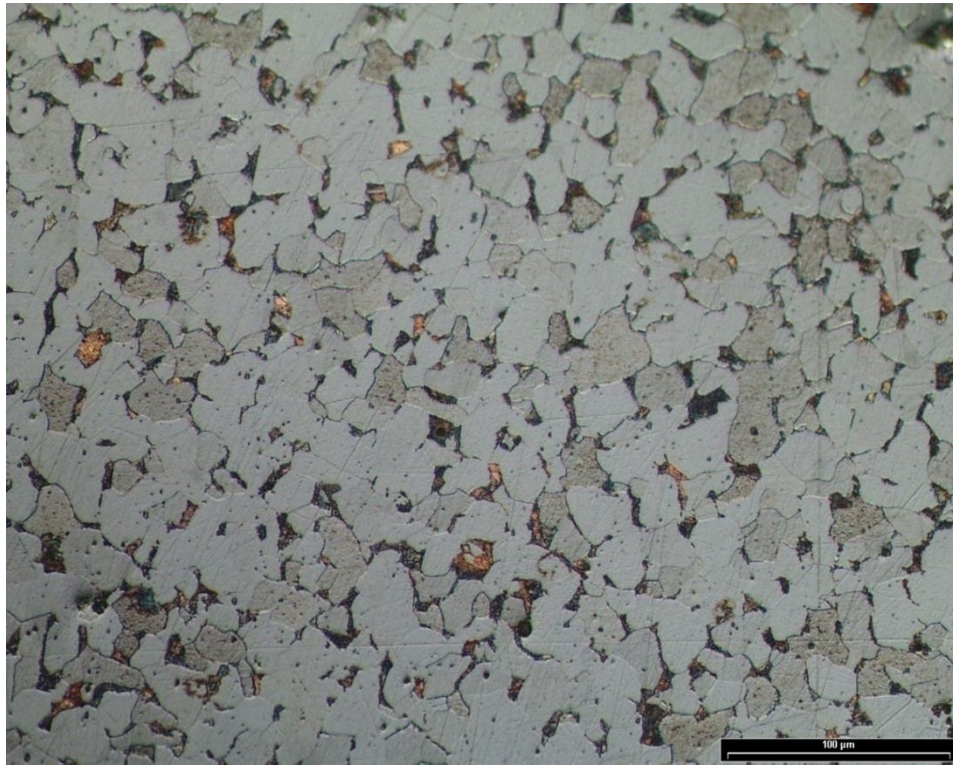


Figura A.3 – Microestrutura do metal base – filtro diferencial interferencial de contraste



Figura A.4 – Estrutura da chapa da amostra n.º 4: alinhamento de grão

AMOSTRA N.º 1

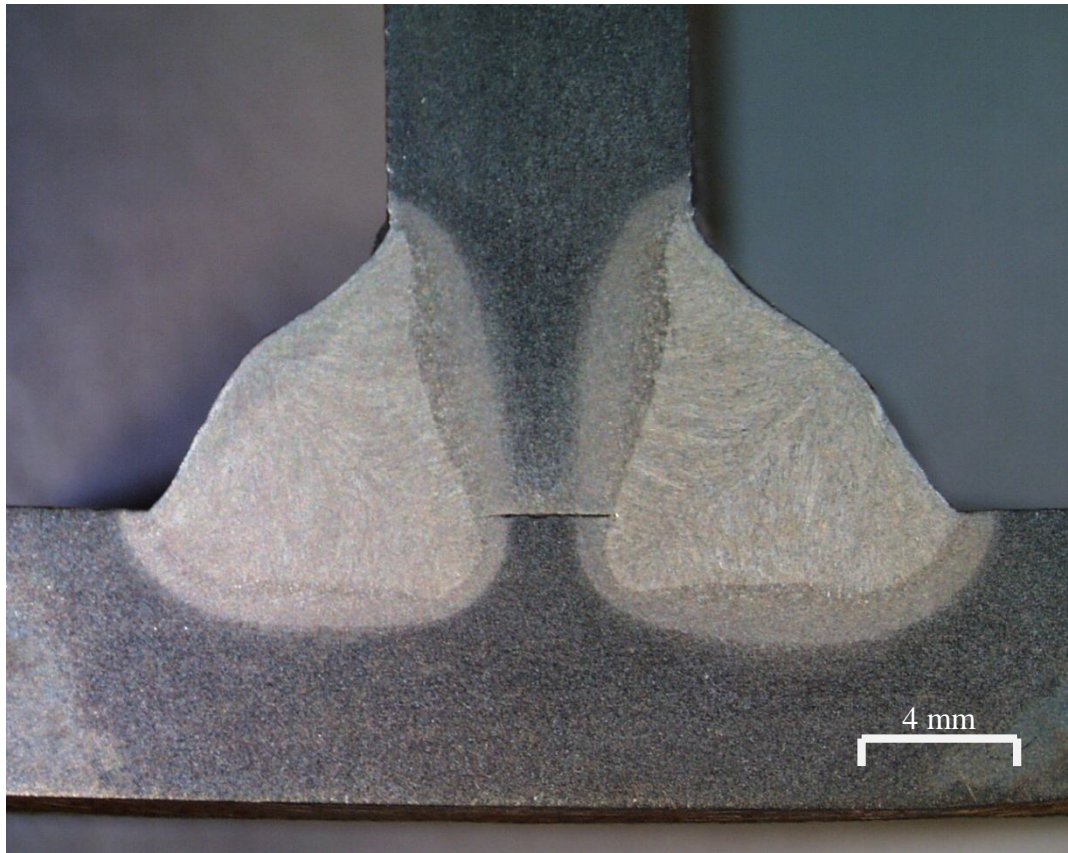


Figura A.5– Macro da amostra n.º 1

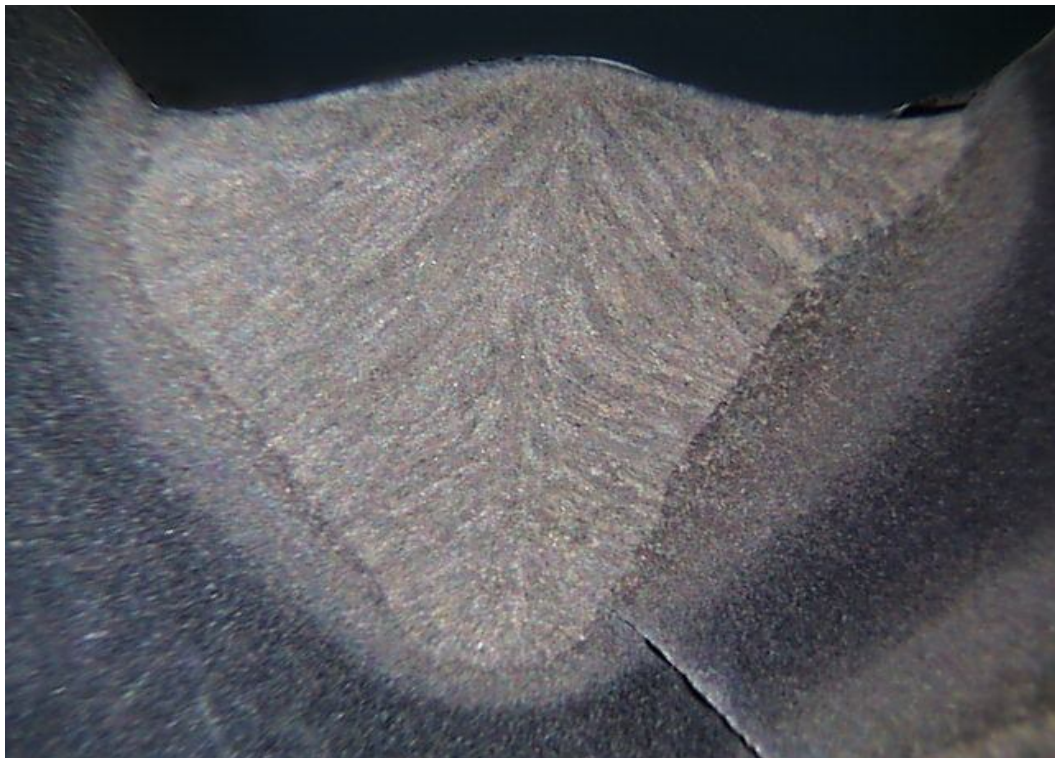


Figura A.6 – Amostra n.º 1: Pormenor do crescimento de grão

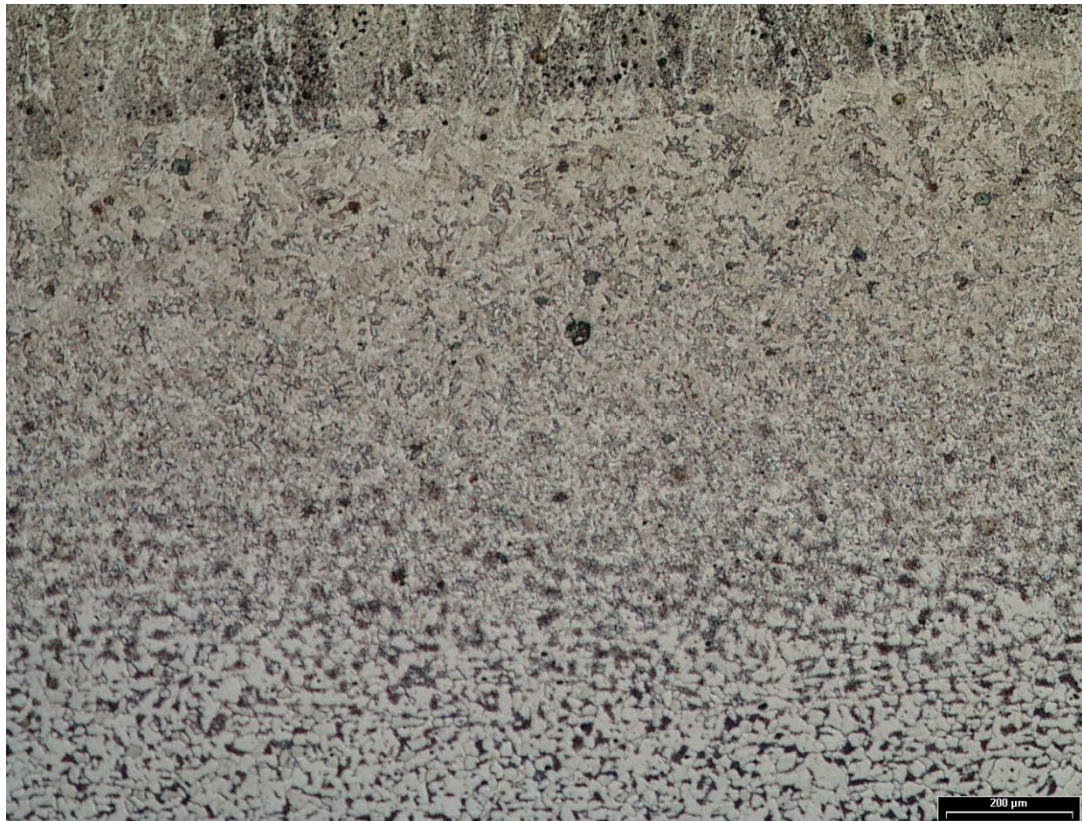


Figura A.7 – Amostra n.º 1: Microestrutura da ZAC

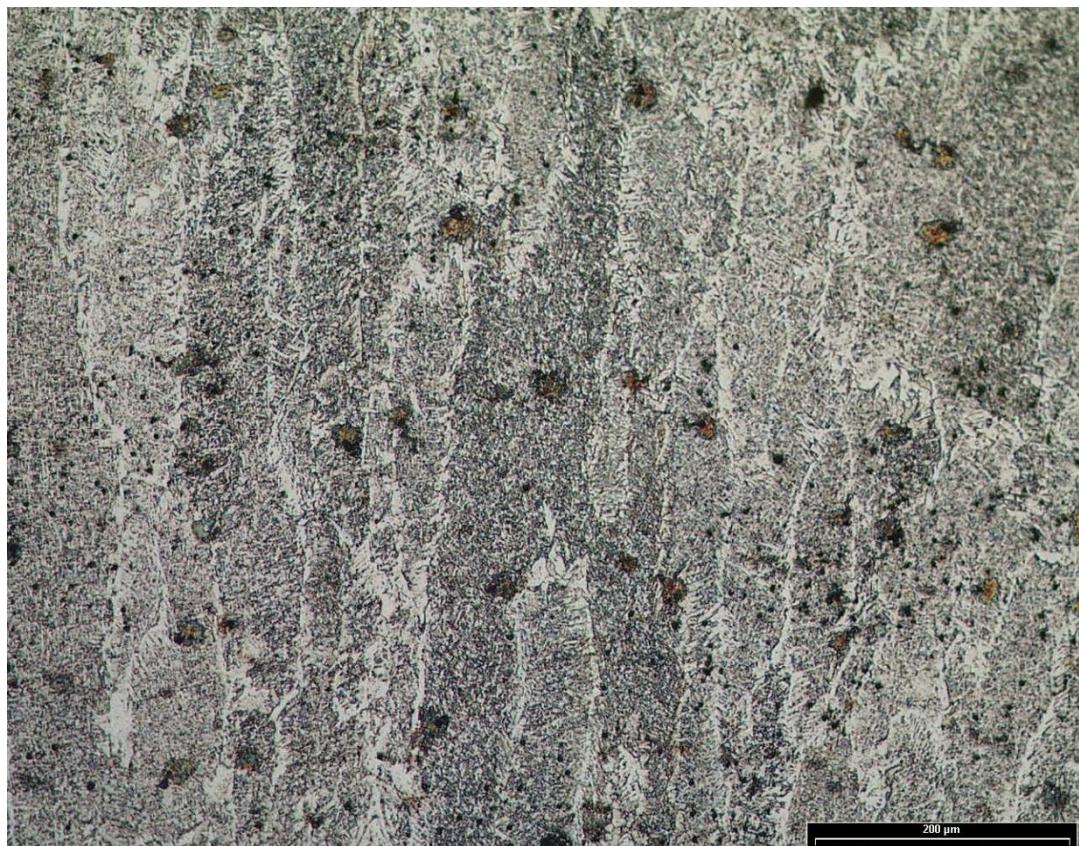


Figura A.8– Amostra n.º 1: Estrutura de solidificação

AMOSTRA N.º 2

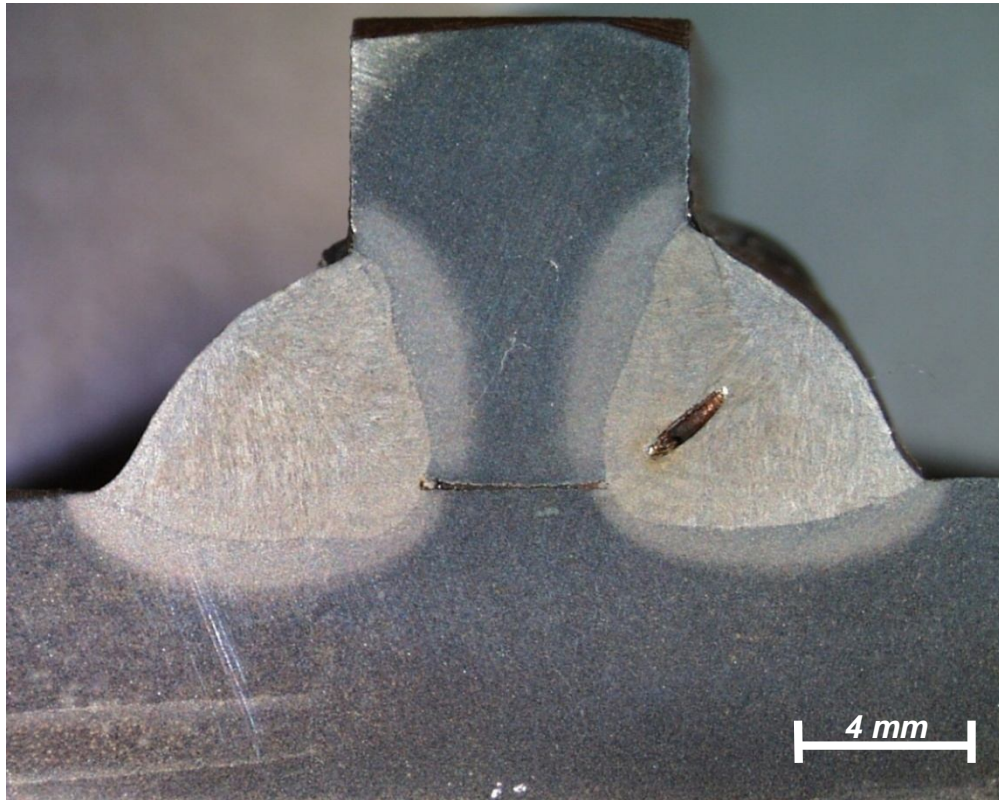


Figura A.9 – Macro da amostra n.º 2



Figura A.10 – Amostra n.º 2: Pormenor do crescimento de grão

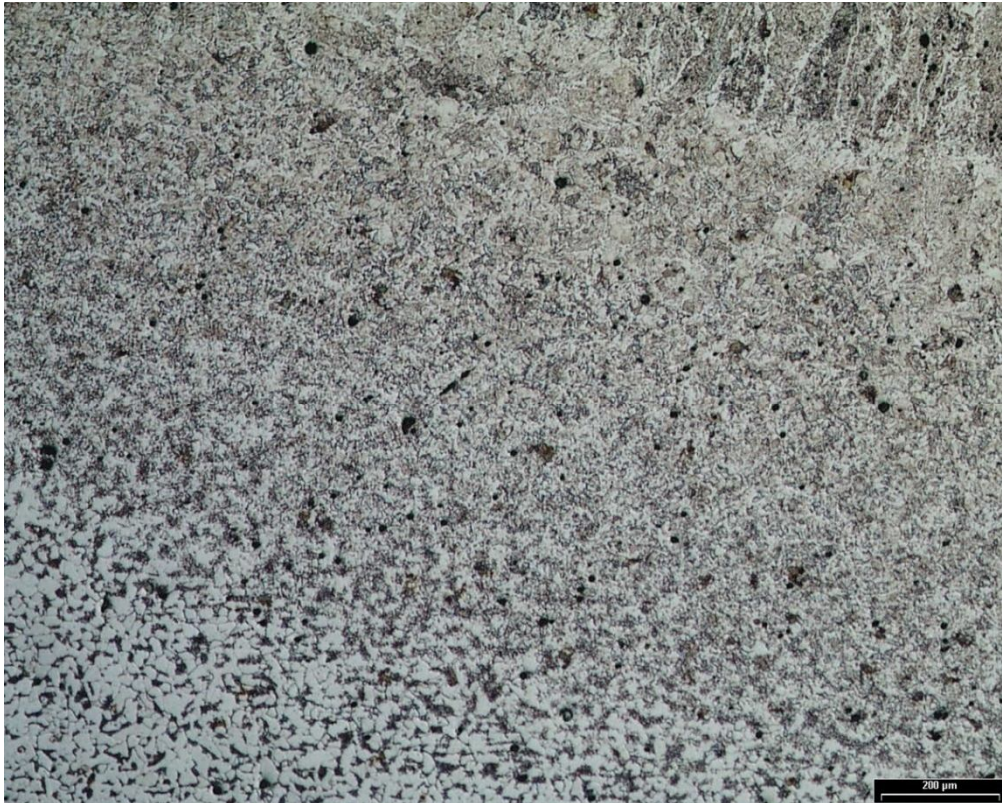


Figura A.11 – Amostra n.º 2: Zona afectada pelo calor.

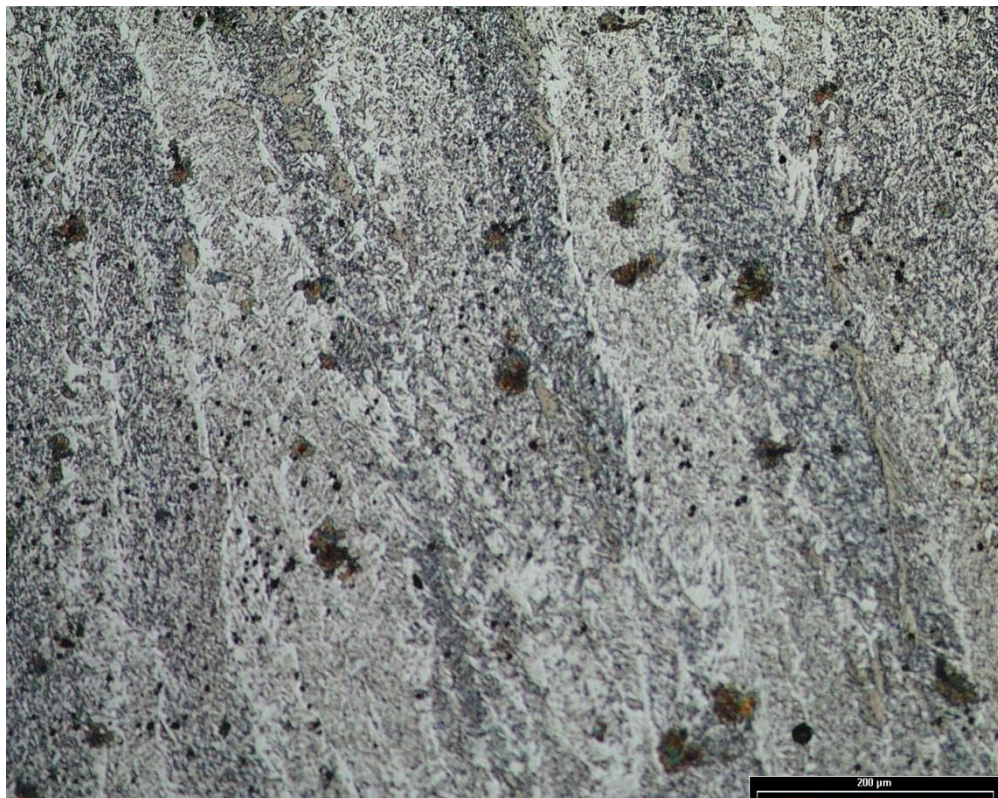


Figura A.12 – Amostra n.º 2: Estrutura do metal depositado

AMOSTRA N.º 3



Figura A.13 – Macro amostra n.º 3 (100% Árgon)

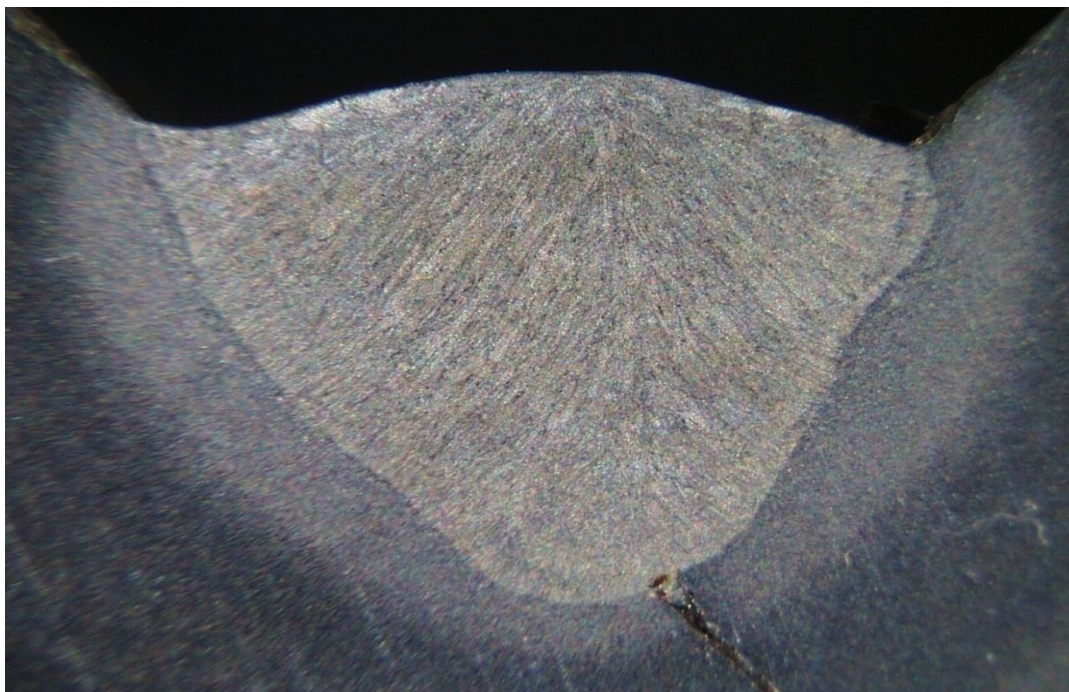


Figura A.14 – Amostra n.º 3: Pormenor do crescimento de grão

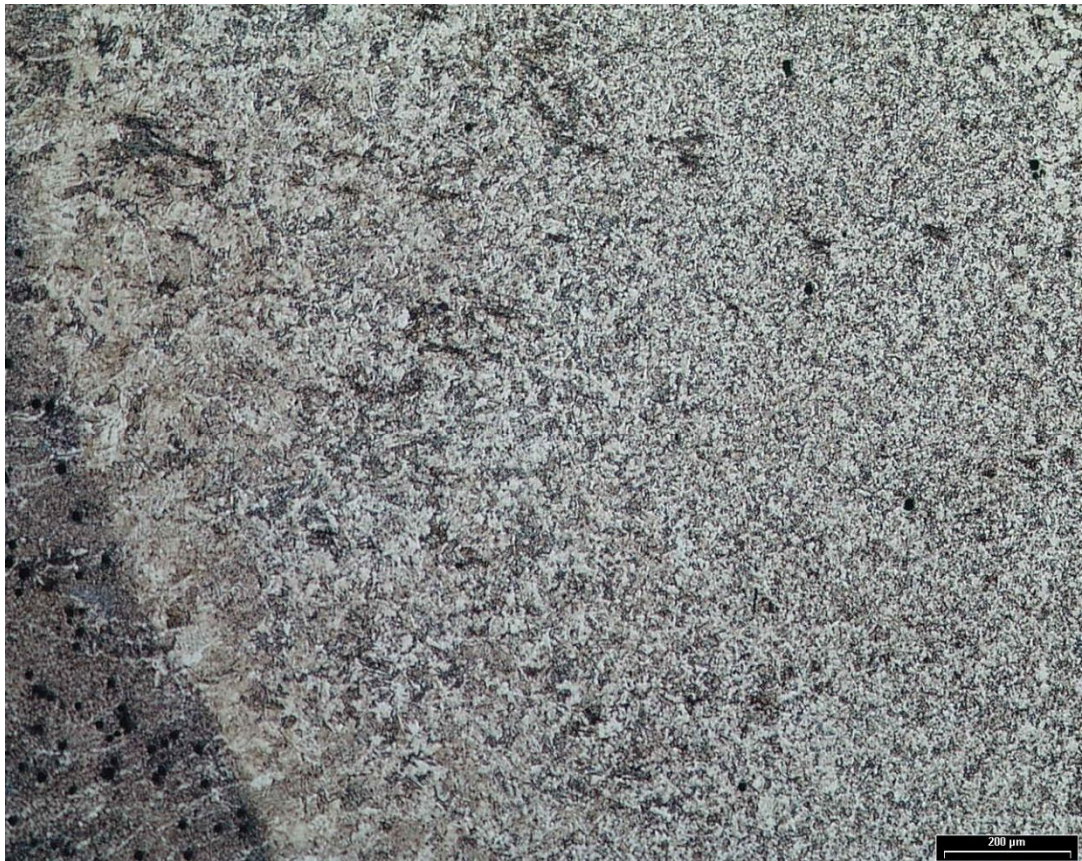


Figura A.15– Amostra n.º 3: ZAC

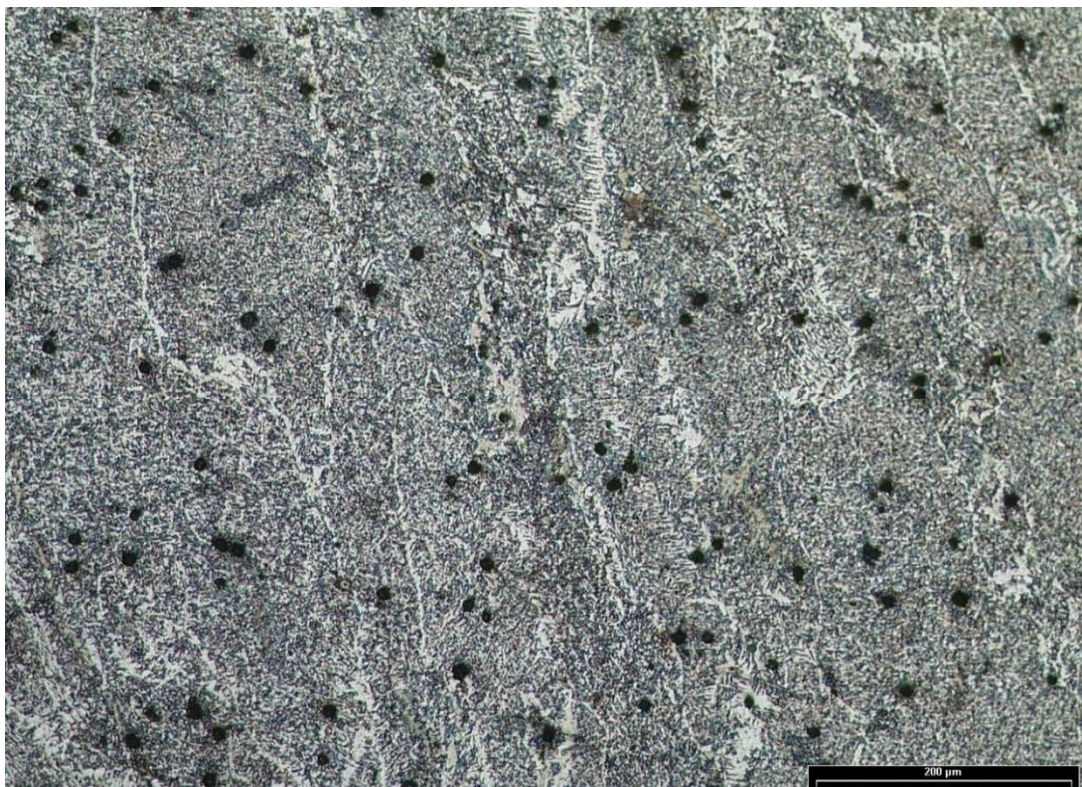


Figura A.16 – Microestrutura do metal depositado: micro porosidades

AMOSTRA N.º 4

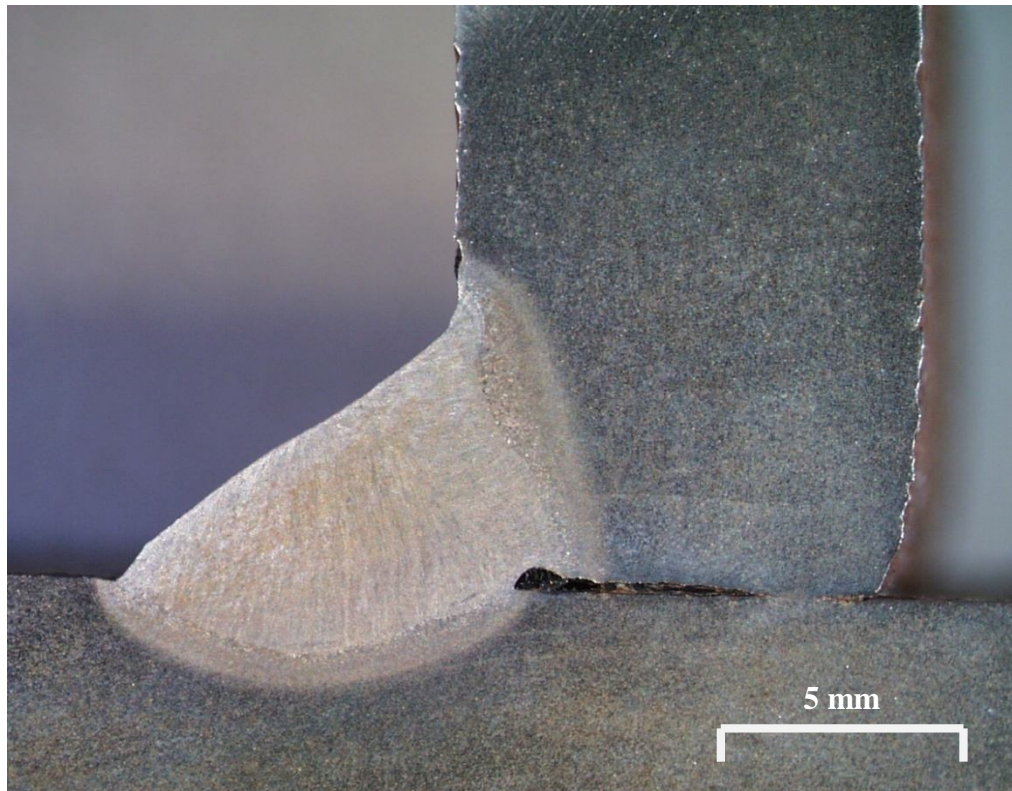


Figura A.17 – Macro da amostra n.º 4 – 100% CO₂



Figura A.18 – Micro da amostra n.º 4: ZAC

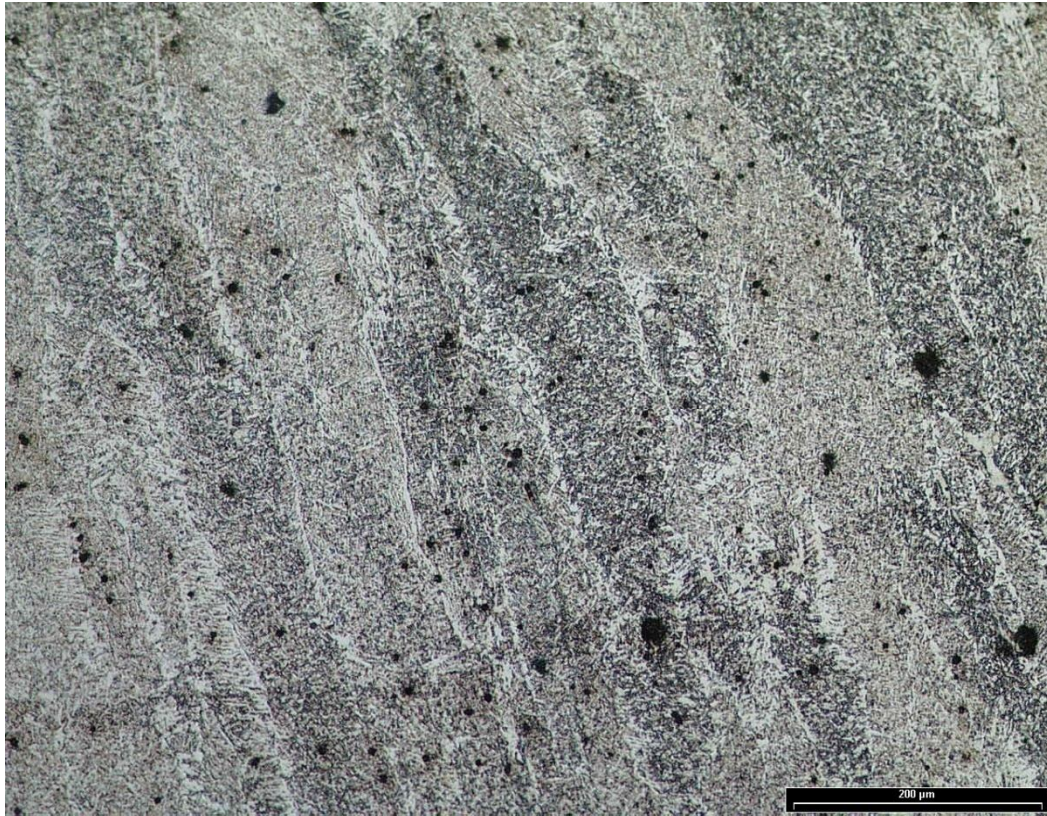


Figura A.19 – Amostra n.º 4: Estruturas de solidificação do metal depositado

B. Folhas com as características técnicas dos consumíveis







Fileur – AMC 01

Descrição do Fabricante	<p>Segundo o fabricante, Fileur, trata-se de um arame indicado tanto para passe único como multi-passe. Indicado para aços ao carbono, ligas de carbono/magnésio e tipos de aço similares incluindo os de grão fino, 100% CO₂ ou com mistura Ar-CO₂.</p> <p>Entre as suas características o fabricante realça uma elevada tensão de cedência, boa soldabilidade, ausência de salpicos e escória, características excepcionais a baixas temperaturas (-40°C).</p> <p>Particularmente indicado para automatização e robotização.</p> <p>Usado em construção naval; indústria ferroviária, reservatórios alta temperaturas /sobre pressão.</p>								
Classificação	<p>EN 758: T46 4 M M 1 H5 / T42 4 M C 1 H5 AWS A5.18: E70C 6M H4</p>								
Aprovações	<p>ABS, BV, CL, DNV, GL, LRS, RINA, TÜV, DB.</p>								
Atmosfera / Débito	<p>Ar/ CO₂ – CO₂ 14 – 20 l/min</p>								
Composição	<p>C = 0.05% Mn = 1.30% Si = 0.30% P <0.025% S <0.025%</p>								
Propriedades	<p>Rm = 500-640 N/mm² – Rs > 420 N/mm² A % 50 > 22 – kV (-40°C) > 47J (~70J) Hidrogénio <3 ml/100g</p>								
Posições	<p>EN: PA – PB – PC – PF – PG – PE – PF – PG AWS: 1G – 2F – 2G – 3Gup – 3Gdown – 4G – 5Gup – 5Gdown</p>								
Parâmetros	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Corrente</th> <th>Intensidade (A)</th> <th>Tensão (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DCEP</td> <td>50-320</td> <td>12-35</td> </tr> </tbody> </table>			Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)	DCEP	50-320	12-35
Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)							
DCEP	50-320	12-35							

Oerlikon – Fluxofil M8

Descrição do Fabricante	<p>Fio metal-cored, com adição de pó de ferro, sem escória, para soldadura de passe único e multi-passe. Excelente soldabilidade, bom aspecto do cordão incluindo sobre chapas com primário alto grau de deposição.</p> <p>Recomendado para aplicações mecanizadas e robotizadas devido a sua excelente iniciação de arco, inclusive a frio.</p>								
Classificação	EN	758: T46 4 M M 1 H5	AWS A5.18: E70C 6M H4						
Aprovações	GL, LRS, TUV								
Atmosfera / Débito	Ar/ CO ₂ – CO ₂ N.D.								
Composição	C = 0.03-0.08% Mn = 1.1-1.6% Si = 0.45-0.75% P <0.03% S <0.03%								
Propriedades	<p>Rm = 550-650 N/mm² Rs > 430 N/mm² A5 > 24 %</p> <p>Resiliência (-20°C) > 50 J</p> <p>Hidrogénio < 3 ml/100g</p>								
Posições	AWS: 1G – 2F – 2G – 3Gup – 3Gdown – 4G – 4F – 5Gup – 5Gdown								
Parâmetros	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;">Corrente</th> <th style="width: 33%;">Intensidade (A)</th> <th style="width: 33%;">Tensão (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DCEP</td> <td>N.D.</td> <td>N.D.</td> </tr> </tbody> </table>			Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)	DCEP	N.D.	N.D.
Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)							
DCEP	N.D.	N.D.							

Kobe Steel – MXA 100

Descrição do Fabricante	Adequado para juntas de topo e de canto. Estabilidade do arco aperfeiçoada e ampla gama de intensidade onde ocorre transferência em spray com quantidade de salpicos inferior.											
Classificação	EN 758: T46 4 M M 3 H5 AWS A5.18: E70C 6M											
Aprovações	BV, GL, LR, NV, RINA, TÜV											
Atmosfera / Débito	Ar/ CO ₂ N.D.											
Composição	C ≤ 0.012% Mn ≤ 1.75% Si ≤ 0.9% P ≤ 0.03% S ≤ 0.03% (Garantido) C = 0.05% Mn = 1.58% Si = 0.63% P = 0.017% S = 0.011% (média)											
Propriedades	Rm ≥ 483 N/mm ² Rs > 450 N/mm ² A5 > 22 % Resiliência (-40°C) ≥ 27 J Hidrogénio N.D.											
Posições	AWS: 1G – 2F – 2G – 3Gup											
Parâmetros	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Corrente</th> <th>Intensidade (A)</th> <th>Tensão (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DCEP</td> <td> 150~350</td> <td>N.D.</td> </tr> <tr> <td>DCEP</td> <td> 150~300</td> <td>N.D.</td> </tr> </tbody> </table>			Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)	DCEP	 150~350	N.D.	DCEP	 150~300	N.D.
Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)										
DCEP	 150~350	N.D.										
DCEP	 150~300	N.D.										

ESAB – OK Tubrod 14.12

Descrição do Fabricante	OK Tubrod 14.12 é um metal-cored para utilização tanto com 100% CO ₂ ou com misturas de Árgon com CO ₂ . Produtividade e qualidade melhoradas quando comparadas com fios nus. Especialmente adequado para juntas de canto e com elevada tolerância a primários.								
Classificação	EN 758: T 42 2 M M 1 H10 / T 42 2 M C 1 H10 AWS A5.18: E70C-6M / E70C-6C								
Aprovações	ABS, BV, DB, DNV, GL, LR, RINA, VdTUV, CE								
Atmosfera / Débito	Ar/ CO ₂ – CO ₂ N.D.								
Composição	C ≤ 0.07% Mn ≤ 1.3% Si ≤ 0.6%								
Propriedades	R _m ≥ 550 N/mm ² R _s > 470 N/mm ² A > 28 % Resiliência (-20°C) ≥ 100 J Hidrogénio N.D.								
Posições	AWS: 1G – 2F – 2G – 3Gup – 3Gdown – 4G								
Parâmetros	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Corrente</th> <th>Intensidade (A)</th> <th>Tensão (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DCEP/DCEN</td> <td>100~320</td> <td>16-32</td> </tr> </tbody> </table>			Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)	DCEP/DCEN	100~320	16-32
Corrente	Intensidade (A)	Tensão (V)							
DCEP/DCEN	100~320	16-32							