

# Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Em parceria com SODECIA, S.A.

Caracterização mecânica e microestrutural de juntas  
topo a topo, unidas por processos de soldadura GMAW e  
Laser.

**Autor:** Orlando Vicente

**Orientador:** Professor Doutor Manuel Vieira

**Co-orientador:** Eng. João Leite



Tese de Mestrado integrado

2009

---

*CANDIDATO* Orlando Jorge Teixeira Vicente Código 040508009

Caracterização mecânica e microestrutural de juntas topo a topo, unidas por  
processos de soldadura GMAW e Laser

---

*DATA* 23/07/2009

---

*LOCAL* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C603 - 11:30h

---

---

*JÚRI* Presidente Professor Henrique Manuel Cunha Martins dos Santos - DEMM/FEUP

---

Arguente Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro - DEM/FCTUC

---

Orientador Professor Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira - DEMM/FEUP

---

*“Só os que perderam a cabeça sabem raciocinar”*

*Oscar Wilde*

## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Manuel Vieira o empenho e dedicação dispensados à orientação deste trabalho.

Agradeço à SODECIA S. A. a oportunidade de realização conjunta deste trabalho. Ao Engenheiro João Leite gostaria de agradecer toda a informação disponibilizada e a orientação fornecida, bem como ao Engenheiro João Senra a dedicação com que correspondeu a todos os pedidos que lhe dirigi.

Um obrigado especial a todos os amigos que, directa ou indirectamente, contribuíram em diferentes etapas da realização deste trabalho, quer com produtivas discussões, quer com o devido apoio nos momentos certos. Em especial à minha namorada que sempre me apoiou e motivou, e ao Rúben pelo companheirismo com que dividimos não só estes últimos meses mas os últimos 5 anos.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha família: aos meus pais que sempre me apoiaram e sem os quais eu nada atingiria, à minha irmã pelos “puxões de orelha” nas alturas certas, e à minha sobrinha que fez questão de me acordar todos os fins-de-semana, motivando-me, mesmo sem saber, a continuar este trabalho.

*A todos um especial MUITO OBRIGADO!*

## Resumo

A soldadura estabeleceu-se mundialmente como uma das técnicas de ligação entre materiais metálicos mais utilizada. Nesse sentido, a criação de comparações entre as variadíssimas técnicas de soldadura utilizadas industrialmente torna-se numa ferramenta importante para todos aqueles que pretendam efectuar ligações de soldadura, prevendo e prevenindo eventuais defeitos que possam surgir.

Para a realização deste trabalho foram inicialmente fornecidos dezoito cordões de soldadura diferentes, variando parâmetros como material ou materiais de base utilizados, processo de soldadura com que a ligação foi realizada (MIG/MAG, CMT, Fibre Laser), ou ainda velocidade a que as soldaduras foram efectuadas.

Após a obtenção dos referidos cordões de soldadura, foram realizados sobre estes vários ensaios de caracterização macro e micro estrutural e de caracterização mecânica (ensaios de tracção e microdurezas).

Com os resultados obtidos pretendeu-se avaliar a conformidade das soldaduras efectuadas bem como uma possível comparação entre as diferentes técnicas de soldadura aplicadas, tendo no entanto em consciência que os resultados obtidos neste trabalho poderão ser alterados e melhorados por modificações à técnica utilizada. Nesse sentido, ao longo deste trabalho são fornecidas ainda algumas sugestões de possíveis correcções a utilizar futuramente.

## Abstract

Welding set up worldwide like one of the metallic materials joining technique most used. In this sense, the establishment of comparisons between the various techniques available in industry becomes an important tool for those wishing to make welding joining, predicting and preventing any defects that may arise.

For this work were initially provided eighteen different welding beads, varying parameters such as base metal or metals, welding processes (MIG/MAG, CMT and Fibre Laser), and welding speed.

The welding beads were performed on these various tests to characterize macro and micro structure and mechanical characterization (tensile and microhardness tests).

With the results, it was intended to assess the conformity of the welding beads well as a possible comparison between the different welding techniques applied, but in awareness that the results obtained in this work may be modified and improved by modifications to the technique used. Accordingly, throughout this work are given some suggestions for possible corrections to be used in future.

## Índice

I.	Resumo	
II.	Abstract	
		<b>Pg.</b>
1.	Objectivo	1
2.	Empresa	1
3.	Motivação	2
4.	Metalurgia da soldadura	3
	4.1 Zona termicamente afectada	3
	4.2 Entrega térmica	4
5.	Processos GMAW	5
	5.1 GMAW - Transferência de metal	8
	5.1.1 Transferência por curto-circuito ou imersão	9
	5.1.2 Transferência globular	10
	5.1.3 Transferência por spray	10
	5.2 Variantes do processo GMAW	11
	5.2.1 MIG/MAG	11
	5.2.2 CMT - Cold Metal Transfer	11
	5.2.2.1 Equipamento CMT	13
	5.2.3 Soldadura pulsada	14
6.	Soldadura por laser	16
	6.1 Fundamentos do processo	16
7.	Trabalho Experimental	17
	7.1 Dados de soldadura	17
	7.1.1 Materiais de Base	17
	7.1.1.1 Aço QSTE 340	17
	7.1.1.2 Aço DC 04	18
	7.1.1.3 Alumínio EN AW 1050A	19
	7.1.1.4 Alumínio EN AW 5052	19
	7.1.2 Ligações efectuadas	20
	7.1.3 Materiais de adição	21

7.1.3.1 Ligações do tipo A	21
7.1.3.2 Ligações do tipo B	22
7.1.4 Gases de protecção	23
7.1.5 Soldaduras efectuadas	23
7.2 Ensaaios realizados	29
7.2.1 Preparação de amostras	29
7.2.2 Exame Macrográfico	30
7.2.3 Exame Micrográfico	32
7.2.4 Ensaaios de Tracção	33
7.2.5 Microdurezas	34
<b>8. Apresentação e discussão de resultados</b>	<b>35</b>
8.1 Macrografias	35
8.2 Micrografias	43
8.2.1 Ligações do tipo B	43
8.2.2 Ligações do tipo A	45
8.3 Ensaaios de tracção	47
8.4 Microdurezas	50
8.4.1 Microdurezas das ligações Tipo B	50
8.4.1.1 Ligações DC 04 - DC 04 por processos GMAW	50
8.4.1.2 Ligações DC 04 - DC 04 por soldadura Laser	51
8.4.1.3 Ligações QSTE 340 - QSTE 340	52
8.4.1.4 Ligações DC 04 - QSTE 340 por processos GMAW	53
8.4.1.5 Ligações DC 04 - QSTE 340 por soldadura Laser	53
8.4.2 Microdurezas das ligações Tipo A	54
8.4.2.1 Ligações EN AW 1050A - EN AW 1050A	54
8.4.2.2 Ligações EN AW 5052 - EN AW 5052	55
8.5 Comparação Económica	56
<b>9. Conclusões</b>	<b>57</b>
<b>10. Bibliografia</b>	<b>58</b>

## 1. Objectivo

O objectivo deste trabalho incidiu na caracterização mecânica e microestrutural de juntas topo a topo ligadas por três diferentes processos de soldadura, o processo MIG/MAG, o processo CMT (Cold Metal Transfer) e o processo Fibre Laser.

Para além da análise das diferenças apresentadas por cada processo, pretendeu-se realizar este tipo de caracterização em quatro materiais diferentes, dois aços de baixo carbono de composição química e estado de processamento diferentes e duas ligas de alumínio de séries diferentes.

## 2. Empresa

SODECIA S.A. é um grupo industrial português, com sede na Maia, Portugal. A actuar no mercado de componentes automóveis desde 1980, o Grupo SODECIA consolidou a sua experiência no desenvolvimento e produção de pequenos e médios componentes estampados, sub-conjuntos genéricos, conjuntos soldados, estruturas metálicas de assentos, pedaleiras e travões de mão, entre outros.

O Grupo SODECIA actua como um fornecedor completo na área de estampagem, a começar pelo ante-projecto até ao desenvolvimento do Produto, com uma gestão completa da cadeia de fornecimento [1].

Tem actualmente aproximadamente 1000 colaboradores, e representações em Detroit, Paris, Wolfsburg, Russelsheim, Turim e Praga. O grupo SODECIA é parceiro da maioria das OEM'S, exportando a partir das suas fábricas localizadas em Portugal e no Brasil, para vários países nomeadamente EUA, Argentina, Alemanha, Espanha, França, Inglaterra, Polónia e Turquia.

Em Portugal, a fábrica do Grupo está localizada no interior norte do país, na cidade da Guarda, assegurando uma localização privilegiada, pela proximidade geográfica com Espanha e Europa Central [1].

Em 2009, o Grupo SODECIA adquiriu 50% do capital social do Grupo FSG Automotive, uma empresa de referência na produção de componentes de elevada precisão para sistemas de transmissões e sistemas de travões, nomeadamente, alavancas de velocidades, garfos de

selecção e calços para travões. A tecnologia de produção aplicada vai desde corte fino, soldadura a laser, montagem e testes funcionais em linha.

Com sede na Alemanha, a empresa é um fornecedor de referência do Grupo VW, Daimler e BMW, com unidades de negócio em todo o mundo, tais como;

- uma unidade industrial em Oelsnitz (Alemanha);
- uma unidade industrial em Wuhan (China);
- um centro tecnológico em Hannover (Alemanha).

Inovação, personalização e redução de tempo de resposta são os objectivos do Grupo SODECIA, apoiados por uma melhoria contínua de produto e serviço.

### 3. Motivação

A realização deste trabalho surgiu no seguimento de um estudo bibliográfico anteriormente realizado, em conjunto com o grupo SODECIA, SA. O estudo incidiu sobre o funcionamento de uma nova técnica de soldadura, o processo CMT (Cold Metal Transfer). A SODECIA, SA manifestou o interesse em conhecer melhor esta nova técnica de soldadura e compara-la a vários níveis com os processos de soldadura já existentes nas suas filiais, motivando a realização deste trabalho.

A passagem desse estudo puramente teórico para este trabalho, pretendeu dar um maior conhecimento à empresa sobre as características dos materiais já utilizados por eles e de outros possíveis de serem implementados em futuros componentes automóveis, quando soldados pelas técnicas disponíveis, bem como identificar os principais parâmetros a controlar na realização destas soldaduras e avaliar os seus fornecedores.

Os materiais e processos foram escolhidos pelo grupo, tendo em conta factores de utilização actual e futura dos mesmos. Por exemplo, a escolha da tecnologia laser como uma a ser estudada neste trabalho, derivou da sua utilização na unidade Alemã do grupo SODECIA, que produz componentes para a caixa de velocidades DSG (figura 1a)) do grupo VW. Enquanto os processos de soldadura GMAW são utilizados em outras unidades do grupo, por exemplo, no fabrico de Cross Car Beam (figura 1b) na unidade da Guarda.

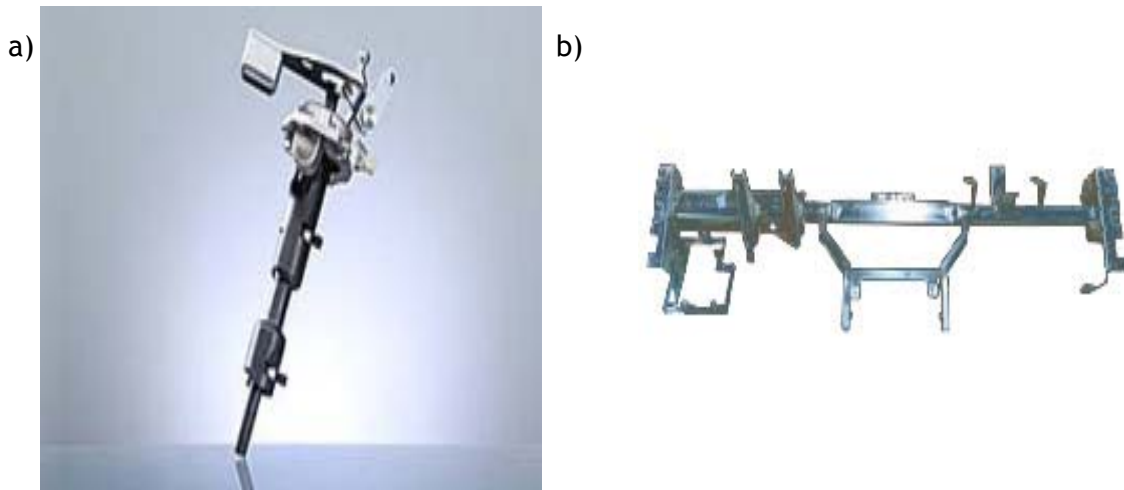


Figura 1 - a) componente para caixa de velocidades DSG [1]. b) Cross Car Beam, [1].

## 4. Metalurgia da soldadura

A soldadura por fusão foi introduzida na indústria após a segunda guerra mundial. O aparecimento desta técnica veio permitir a união de elementos de elevadas dimensões de uma forma bastante aceitável do ponto de vista mecânico. No entanto, esta nova técnica introduziu também novos problemas metalúrgicos nos materiais soldados [2].

De seguida serão apresentados alguns dos principais aspectos a ter em conta quando se pretende estudar a parte metalúrgica de uma ligação efectuada através de soldadura por fusão.

### 4.1 Zona termicamente afectada

Qualquer processo de soldadura por fusão necessita da aplicação de energia calorífica, de modo a fundir o material de base e o material de adição. Esta energia calorífica é dissipada através do metal, estabelecendo gradientes de temperatura ao longo da peça, que vão desde a temperatura de fusão (na zona do cordão) até à temperatura inicial da peça (nas zonas mais afastadas do cordão de soldadura). As zonas mais próximas do cordão de soldadura são pois, aquelas que sofrem um aquecimento mais severo, levando a que ocorram nessas zonas algumas mudanças microestruturais [3].

A zona termicamente afectada (ZTA) ou zona afectada pelo calor (ZAC), representada na figura 2, é definida como sendo toda a região vizinha duma soldadura onde as temperaturas de pico foram superiores a um valor, acima do qual existem transformações de carácter metalúrgico no material [2,3].

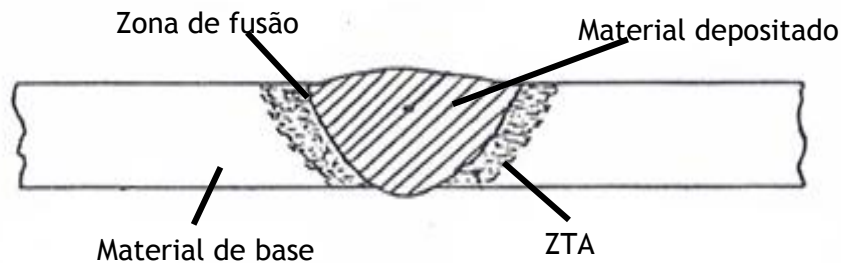


Figura 2 - Esquema representativo de um cordão de soldadura habitual [3].

## 4.2 Entrega térmica

A entrega térmica de um processo de soldadura é entendida como sendo a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear. O seu valor pode ser geralmente conhecido dividindo a potência total da fonte de calor pela sua velocidade de deslocamento, e tomando em consideração a eficiência de transferência de energia do processo de soldadura utilizado (equação 1) [2].

$$Et = \eta \frac{P}{v} \quad (1)$$

Et - Entrega térmica (j/mm)

P - Potencia total da fonte (W)

v - Velocidade de deslocamento (mm/s)

$\eta$  - Eficiência de transferência

No caso dos processos a arco eléctrico a entrega térmica é dada através da equação 2. Os processos de soldadura GMAW que serão descritos no decorrer desta dissertação, utilizam uma eficiência de transferência de energia que poderá variar entre 65 a 85% [2].

$$Et = \eta \frac{V \times I}{v} \quad (2)$$

V - Diferença de potencial (V)

I - Intensidade da corrente (A)

A entrega térmica depende, portanto, não só do processo de soldadura utilizado (através da potência da fonte e eficiência de transferência), mas também da técnica que se utiliza (através da velocidade de deslocamento). Quanto maior for a entrega térmica, maior será a quantidade de calor transferida para a peça de trabalho, maior será o banho de fusão, mais extensa a zona termicamente afectada e menor o gradiente térmico entre a solda e o material de base [2,4,5].

É importante ter em atenção que a eficiência de transmissão pode ser considerada constante para um mesmo processo, a tensão varia apenas dentro de intervalos reduzidos nos processos a arco, e a corrente está condicionada quer ao processo quer ao consumível utilizado. Qualquer variação substancial na entrega térmica está portanto dependente da velocidade de soldadura utilizada, o que pode ser conseguido com diferentes técnicas.

A velocidade de deslocamento define-se como sendo o comprimento linear de solda executado em cada passe por unidade de tempo. As técnicas de soldadura que executem cordões finos têm uma velocidade de deslocamento elevada e conseqüentemente menor entrega térmica.

A entrega térmica é também várias vezes confundida com a intensidade da corrente. A intensidade da corrente é, sem dúvida, uma das principais características que ajuda a distinguir os diferentes processos de soldadura, mas trata-se apenas de um parâmetro que pode influenciar, através da intensidade utilizada pela fonte de calor, mas não definir completamente a entrega térmica do processo. Os processos a arco eléctrico utilizam intensidades de fonte bastante próximas dos  $10^4 \text{ W/cm}^2$  [2,4,5].

## 5. Processos GMAW

A soldadura com arco e protecção gasosa (GMAW) é uma tecnologia de soldadura desenvolvida por volta de 1920 em que a união dos metais é induzida pelo calor produzido por um arco eléctrico, estabelecido e mantido entre um fio consumível de metal de adição

(eléctrodo) e a peça de trabalho. A protecção do arco eléctrico e do banho de fusão contra a acção oxidante do ar é efectuada com recurso ao fornecimento de um gás ou de uma mistura de gases. Consoante o gás de protecção utilizado, a nomenclatura do processo pode variar. Inicialmente a protecção era apenas efectuada com recurso a gases inertes, como o argón e o hélio, passando o processo a denominar-se MIG (Metal Inert Gás), nome pelo qual o processo GMAW continua a ser mais facilmente reconhecido. No entanto, a protecção pode também ser efectuada com recurso a gases activos como o  $\text{CO}_2$ , passando a chamar-se MAG (Metal Active Gás). A figura 3 apresenta uma descrição simplista do processo GMAW [4,6-9].

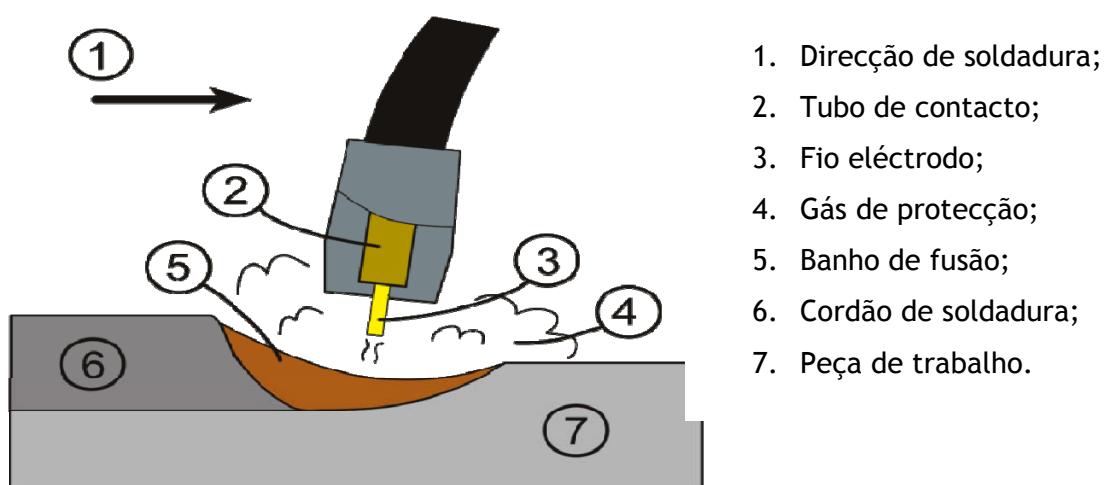
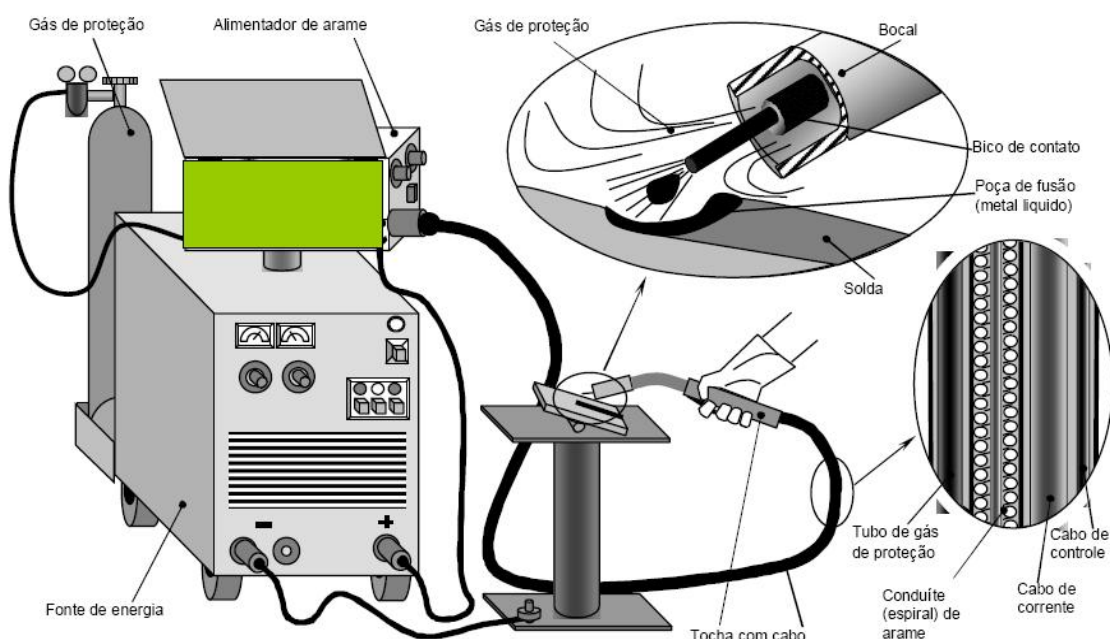


Figura 3 - Descrição simplificada do processo de soldadura GMAW.

O processo GMAW é, de longe, o processo de soldadura mais utilizado nos países industrializados, em grande parte devido à sua extrema versatilidade. O processo pode ser usado quer na forma automática, em que a taxa de deposição do metal de adição e o avanço da soldadura são controlados pela máquina, ou então na forma semi-automática em que a taxa de deposição do metal de adição continua a ser controlado pela máquina, mas o avanço da soldadura é controlado totalmente pelo operador. Para além disto, este processo permite a ligação dos metais comercialmente mais importantes como o aço ao carbono, o aço inoxidável, o alumínio, as ligas de cobre e níquel, e em todas as posições de soldadura, desde que os principais parâmetros do processo sejam correctamente escolhidos, como um gás de protecção e eléctrodo apropriados.

A realização deste processo implica a manutenção do arco eléctrico estável, o que pode ser conseguido de duas formas distintas. Na primeira, podem ser utilizadas fontes de alimentação de corrente variável a uma voltagem constante, junto com um alimentador de eléctrodo a velocidade constante (mas ajustável); à medida que a tocha se aproxima ou

afasta do banho de fusão, ocorrem alterações no comprimento do arco estabelecido, estas alterações são sentidas pela fonte de alimentação que fornece mais tensão ao arco eléctrico (no caso do comprimento do arco ter diminuído) ou menor tensão ao arco eléctrico (no caso do comprimento do arco ter aumentado), causando variações na taxa de fusão do eléctrodo e mantendo o comprimento de arco desejado. Esta é a forma mais utilizada para a estabilização do arco estabelecido. No entanto, esta estabilização pode ser também alcançada com a utilização de fontes de alimentação de corrente constante juntamente com um alimentador de eléctrodo de velocidade variável e sensível a flutuações na voltagem do arco. Neste caso, quando ocorrem flutuações no comprimento do arco eléctrico, a voltagem do mesmo sofre também variações, que por sua vez serão identificadas pelo alimentador de eléctrodo, procedendo este aos ajustes necessários na taxa de fornecimento de eléctrodo para manter o arco estável. A figura 4 apresenta um sistema de soldadura GMAW habitualmente utilizado [4,6-9].



*Figura 4 - Equipamento utilizado em soldadura MIG/MAG*

Durante a execução de uma soldadura existe uma gama de variáveis a controlar seja qual for o processo utilizado. No caso dos processos GMAW as variáveis que poderão afectar as propriedades da soldadura como a geometria, a qualidade dos cordões efectuados ou a entrega térmica durante a operação de soldadura, são as seguintes:

- Corrente de soldadura utilizada;
- Tensão do arco;
- Velocidade de soldadura;
- Extensão do eléctrodo;
- Diâmetro do eléctrodo;
- Composição do gás de protecção.

Efectuando uma análise a estas variáveis, facilmente observamos que as primeiras três terão uma influência directa na entrega térmica do processo (equação 1), sendo esta directamente proporcional à corrente de soldadura utilizada e à voltagem do arco, e inversamente proporcional à velocidade de soldadura. Quanto maior a corrente e a voltagem utilizada, maior será a entrega térmica do processo, sucedendo-se o mesmo se forem utilizadas velocidades de soldadura lentas.

As três últimas variáveis não têm efeito directo na entrega térmica do sistema, embora quanto maior for o diâmetro do eléctrodo utilizado, maior será a intensidade de corrente necessária para o fundir, aumentando assim a entrega térmica do processo [4,6-9].

### 5.1 GMAW - Transferência de metal

O modo como o metal é transferido desde o eléctrodo de material de adição até à peça de trabalho influencia em larga escala o desempenho de qualquer processo de soldadura. Variáveis como a quantidade de salpicos gerados, estabilidade do processo, qualidade da soldadura e capacidade do processo, dependem dos mecanismos de transferência de metal utilizados [4,6,9].

Em GMAW a transferência de metal ocorre segundo três tipos diferentes de mecanismos de transferência:

1. Transferência por curto-circuito ou imersão
2. Transferência globular
3. Transferência por spray

Sendo o tipo de transferência de metal determinado por vários factores, de entre os quais se destacam os seguintes:

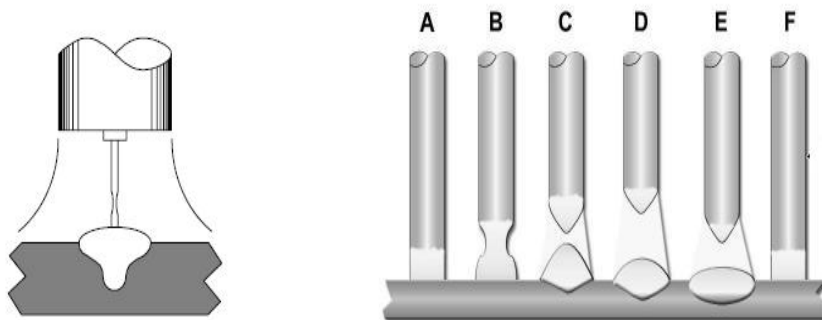
- Magnitude e tipo de corrente utilizada;
- Diâmetro do eléctrodo;

- Composição do eléctrodo;
- Extensão do eléctrodo;
- Gás de protecção;
- Fonte de alimentação utilizada.

### 5.1.1 Transferência por curto-circuito ou imersão

O processo de transferência de metal por curto-circuito ocorre quando a velocidade de fornecimento do fio eléctrodo ultrapassa a taxa de fusão do mesmo, acabando por tocar no banho de fusão; neste ponto a gota de metal formada na ponta do eléctrodo é transferida para o banho de fusão (figura 5). Ao tocar no banho de fusão ocorre o estabelecimento de um curto-circuito entre o material de base e a gota de metal, o que faz com que a corrente aumente e a gota de metal seja atraída para o banho, com esta migração o arco é restabelecido e a corrente desce muito rapidamente. Este é o mecanismo que utiliza a menor gama de corrente de soldadura e de diâmetros de eléctrodo, sendo produzido geralmente um cordão de soldadura pequeno e de rápido arrefecimento, o que o torna adequado para soldar secções finas e em qualquer posição de soldadura [4,6,9].

No entanto, a grande instabilidade do arco que caracteriza este processo, provoca a formação de salpicos. De facto, a corrente de soldadura tem de ser alta o suficiente para aquecer o eléctrodo e promover a formação da gotícula metálica, mas ao mesmo tempo tem de ser suficientemente baixa para que as gotículas não se soltem abruptamente do eléctrodo e assim evitar ao máximo a formação de salpicos.



*Figura 5 - Esquema representativo da transferência de metal por imersão.*

O facto de a transferência ocorrer durante o curto-circuito faz com que o gás de protecção utilizado não tenha uma influência directa no mecanismo de transferência do metal, no entanto, este acaba por influenciar as características do arco eléctrico e a penetração conseguida pelo processo. Quando utilizado  $\text{CO}_2$  como gás de protecção são obtidas penetrações mais profundas, mas aumenta a formação de salpicos, ao passo que se for

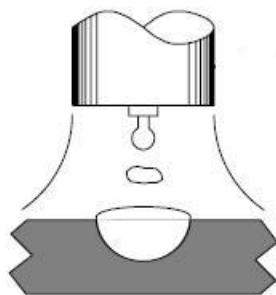
utilizado um gás inerte a penetração é muito superficial, o que leva a que cada vez mais seja utilizado uma mistura de CO<sub>2</sub> e Árgon [4,6,9].

A transferência de gotas metálicas para o banho de fusão pode variar entre 20 a 200 vezes num só segundo.

### 5.1.2 Transferência globular

Na transferência globular o arco eléctrico é mais estável do que na transferência por curto-circuito e a transferência ocorre para valores de corrente de soldadura intermédios. Neste tipo de transferência é a intensidade de corrente que regula o tamanho das gotículas metálicas formadas, tendo estas, tendência a diminuir de tamanho quando a corrente aumenta de intensidade, sendo normalmente sempre superiores ao diâmetro do eléctrodo utilizado. Este “elevado” tamanho da gota de metal torna-a facilmente atraída para o banho de fusão através das forças da gravidade (figura 6). Esta deposição de gotas de grande dimensão induz uma baixa entrega térmica à junta de soldadura, o que tem as suas vantagens, mas por outro lado, produz uma fraca penetração.

Outra das limitações deste tipo de transferência é que pelo facto de ser induzida por forças gravíticas, a sua utilização fica limitada à posição de soldadura plana, com velocidades de soldadura bastante baixas e formação de salpicos muito elevada [4,6,9].



*Figura 6 - Esquema representativo da transferência globular.*

### 5.1.3 Transferência por spray

Quando a corrente utilizada na transferência globular é aumentada, o tamanho das gotas diminui e a frequência a que a transferência ocorre aumenta, passando a denominar-se

transferência por spray. Existindo portanto um valor de corrente de transição bem definida entre a transferência globular e a transferência por spray (figura 7) [3,5,7].

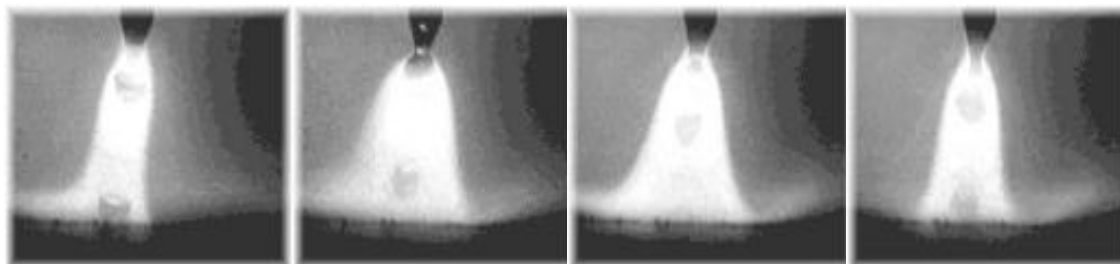


Figura 7 - Esquema representativo da transferência por spray.

A transferência por spray utiliza, portanto, correntes de soldadura relativamente elevadas, o que aumenta o tamanho do banho de fusão e a entrega térmica do processo, incapacitando-o de ser utilizado em chapas finas ou em posições que não a plana.

## 5.2 Variantes do processo GMAW

### 5.2.1 MIG/MAG

Como já foi referido anteriormente, a primeira aplicação de um processo GMAW foi realizada com um gás de protecção inerte, o que levou a que o processo fosse denominado apenas por processo MIG (Metal Inert Gás), no entanto, com o desenvolvimento do processo começaram a ser utilizados também gases activos (principalmente  $\text{CO}_2$ ). Este desenvolvimento levou a que o termo GMAW (Gás Metal Arc Welding) ganhasse uma maior aceitação. O processo MIG/MAG convencional já foi amplamente descrito anteriormente, faltando apenas esclarecer o tipo de corrente utilizada neste processo. De facto, a soldadura MIG/MAG pode ser operada com corrente contínua (DC) ou com corrente alternada (AC). No entanto, a instabilidade verificada no arco gerado por corrente alternada (em grande parte devido ao arco ser desligado e ligado a cada meio ciclo de AC), levou a que a corrente contínua ganhasse uma maior aceitação no mercado, pois produz um arco mais estável e uma transferência de metal mais fácil e regular [3,4,9].

### 5.2.2 CMT - Cold Metal Transfer

O processo CMT (cold metal transfer) foi desenvolvido pela Fronius, uma empresa europeia líder de mercado no que diz respeito a soldadura com arco eléctrico, em 2004. Este processo caracteriza-se por uma transferência de metal a “frio”, tendo em conta, obviamente, que o termo “frio” tem de ser entendido no âmbito dos processos de ligação

por soldadura, mas de facto quando comparado com os métodos convencionais de soldadura MIG/MAG, CMT é sem duvida um processo realizado a frio.

CMT é uma variante dos processos de soldadura com arco com protecção gasosa (GMAW),



*Figura 8 - Soldadura CMT [10].*

mas trata-se de uma revolução nas tecnologias de soldadura, no que respeita a equipamentos e aplicações. Trata-se de um processo completamente novo que veio permitir a utilização da soldadura GMAW a uma nova gama de aplicações, desde que os limites dos processos GMAW sejam respeitados.

Existem muitos materiais e aplicações que não conseguem suportar o constante aquecimento que resulta da utilização dos processos de soldadura como meio de ligação. Estes

materiais necessitam de ser ligados a baixas temperaturas, o que se tornou possível com o aparecimento da soldadura CMT (figura 8) [6,10,11].

O processo CMT, embora descrito como sendo um processo GMAW, com transferência de metal por curto-circuito ou imersão, utiliza um método completamente novo de soltar as gotículas do eléctrodo. Nos processos a arco convencionais o fio eléctrodo é movido para a frente, ao encontro da peça de trabalho, até ocorrer o curto-circuito. Nesse momento existe um aumento da corrente de soldadura, causando a reabertura do curto-circuito e deixando que o arco se estabeleça novamente, repetindo o processo. Este processo contém duas limitações importantes, por um lado a elevada corrente gerada pelo curto-circuito faz corresponder a uma elevada entrega térmica do processo. Por outro lado, esta abertura do curto-circuito de forma descontrolada causa uma imensidão de salpicos, obrigando a operações de maquinaria pós soldadura para garantir a sanidade da peça.

A transferência de metal por CMT realiza-se em duas fases. Numa primeira fase é fornecida uma intensidade de corrente inicial elevada que é suficiente para aquecer a peça e o eléctrodo, e estabelecer um arco eléctrico de voltagem constante entre a peça de trabalho e o material de adição. No entanto, esta corrente inicial é controlada de tal forma que não existe qualquer tipo de transferência de metal do eléctrodo para a peça, permanecendo apenas um glóbulo fundido de metal agarrado na ponta do eléctrodo. A segunda fase deste processo é a fase de imersão do eléctrodo para que ocorra o estabelecimento do curto-circuito. Nesta fase o eléctrodo é empurrado para o banho de

fusão causando um curto-circuito eléctrico resultante de um rápido colapso no valor da voltagem do arco. Neste momento, e como é habitual na transferência por imersão convencional, o curto-circuito provoca um rápido aumento da corrente, fundindo o eléctrodo. Em CMT, este momento em que ocorre o curto-circuito é detectado pelo equipamento e a corrente de soldadura é reduzida a um mínimo, extinguindo o arco e limitando a energia térmica do processo. O restabelecimento do arco eléctrico ocorre durante o tempo em que o eléctrodo é recolhido, ficando a gotícula metálica agarrada ao banho de fusão, recomeçando todo o processo. Este processo, em que o eléctrodo é empurrado e recolhido desde a peça de trabalho, é realizado através de uma alimentação de fio com uma frequência média de oscilação a volta dos 70 Hz. A figura 9 mostra o processo completo de transferência de metal em CMT; as setas a indicam o movimento do eléctrodo em cada uma das fases. A imagem 10 descreve um ciclo típico de soldadura CMT, com os diferentes valores de corrente e voltagem durante as fases de estabelecimento do arco eléctrico e de curto-circuito [4,6,12].

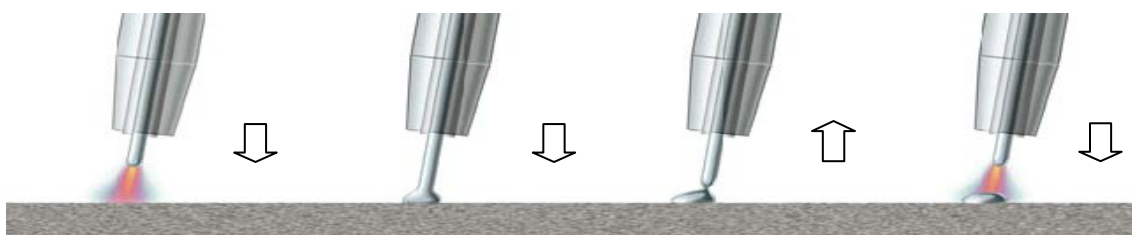


Figura 9 - Transferência de metal em CMT [10].

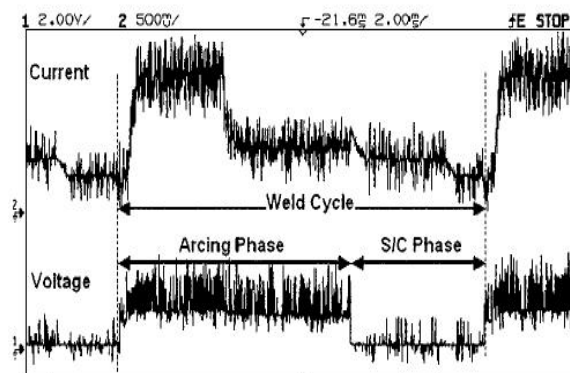


Figura 10 - Ciclo típico de soldadura CMT [13].

### 5.2.2.1 Equipamento CMT

Para este novo processo de soldadura a empresa produtora do mesmo (Fronius), procurou redesenhar alguns dos componentes convencionais da soldadura GMAW, ajustando o sistema ao processo CMT e aos seus novos parâmetros. O sistema pode ser operado quer no modo automático quer no modo semi-automático, permitindo ainda a soldadura com

recurso a corrente pulsada. A figura 11 mostra uma das configurações possíveis para o sistema robotizado, fornecidos pela Fronius [10].

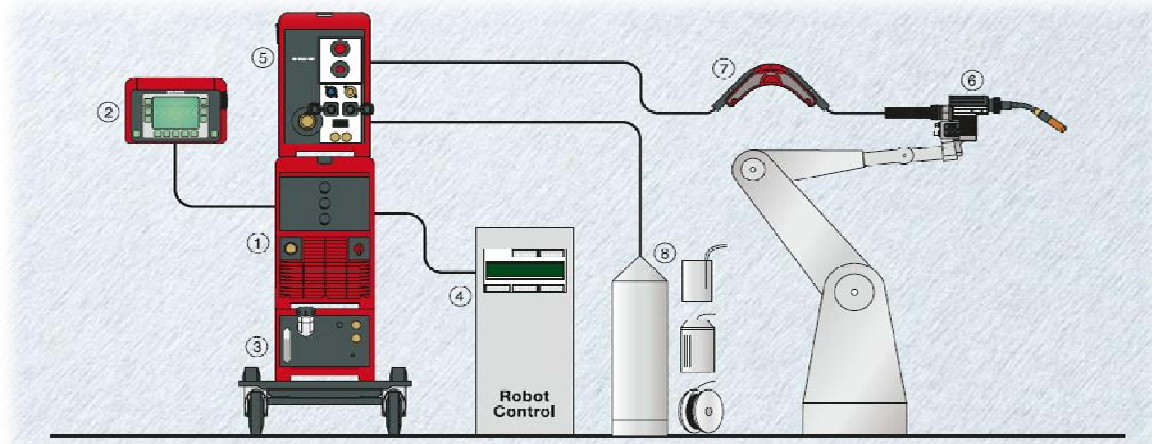


Figura 11 - Equipamento CMT para um sistema de soldadura robotizado [10].

- |                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| 1. Fonte TPS 3200/4000/5000 CMT | 5. Alimentador VR 7000 CMT |
| 2. Unidade remota RCU 5000i     | 6. Robacta Drive CMT       |
| 3. Refrigeração FK 4000 R       | 7. Buffer de arame         |
| 4. Interface para robot         | 8. Alimentação de arame    |

### 5.2.3 Soldadura pulsada

O processo de soldadura com recurso a corrente pulsada tem vindo a ganhar cada vez mais espaço no mercado devido às vantagens que apresenta quando comparado com a soldadura MIG/MAG convencional.

Este processo surgiu no mercado para tentar resolver as deficiências apresentadas pelas técnicas de transferência de metal utilizadas pelos processos GMAW. Pelo que vimos anteriormente, a transferência por spray apenas ocorre quando atingimos uma intensidade de corrente relativamente alta, limitando o processo no que respeita a soldadura de secções finas e em termos de posições de soldadura utilizáveis. Esta elevada corrente aumenta a entrega térmica do processo que por sua vez faz disparar significativamente a taxa de fusão, aumentando assim o tamanho do banho de fusão [4,6,9,12].

A transferência pulsada veio tornar possível a utilização do mecanismo de transferência por spray, a correntes muito inferiores à corrente de transição de globular a spray. Esta transferência resulta do fornecimento de um fluxo de corrente de alta intensidade, de modo intermitente, mantendo, no entanto, o fornecimento de um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição. Torna-se, portanto, usual que se utilize duas fontes de corrente: a primeira estabelece a corrente de base (50-80 A), suficiente para

escorvar o arco e manter ionizado o espaço entre o eléctrodo e a peça; enquanto a segunda fonte de corrente debita intermitentemente uma intensidade de corrente elevada, provocando a libertação e transferência da gota metálica formada.

A transferência de modo pulsado veio permitir portanto a obtenção dos efeitos desejáveis do modo spray com baixos níveis de entrega térmica, característica normalmente associada à transferência por curto-circuito, adquirindo ainda uma baixa produção de salpicos e uma maior estabilidade do arco [4,6,9,12].

Com o aparecimento desta nova técnica, surgiram novos parâmetros para adicionar aos normalmente utilizados na soldadura MIG/MAG convencional. De facto, a corrente pulsada é uma onda periódica (figura 12), onde a corrente de base ( $I_b$ ) se vai alternando com uma corrente de pico ( $I_p$ ), ambas com os seus respectivos tempos de duração ( $t_b$ ) e ( $t_p$ ). Estes novos parâmetros são designados por parâmetros de pulso.

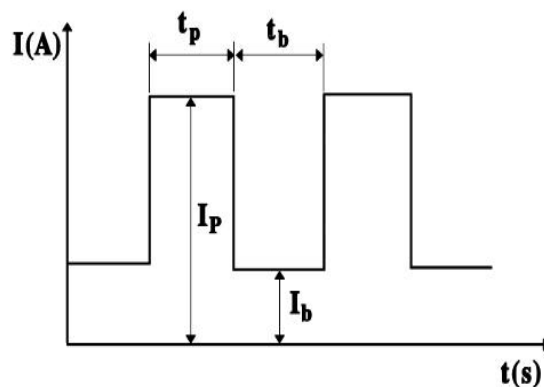


Figura 12 - Esquema de uma onda pulsada e seus componentes [12].

Estes parâmetros permitem o aparecimento de novas grandezas como a corrente média ( $I_m$ ) e o ciclo activo (CA). A corrente média (equação 3) de uma transferência pulsada, apresenta baixos níveis de intensidade, o que se traduz numa baixa entrega térmica do processo, tornando-o utilizável e sugerido para a soldadura de chapas finas [12].

$$I_m = \frac{(I_p \times t_p + I_b \times t_b)}{(t_p + t_b)} \quad (3)$$

O ciclo activo (equação 4) reflecte, por sua vez, a relação existente entre o tempo de deposição ( $t_p$ ) e o tempo total de soldadura, sendo, muitas das vezes, referenciado em substituição dos tempos de pico e de base. [8]

$$CA = \left[ \frac{t_p}{t_p + t_b} \right] \times 100 (\%) \quad (4)$$

## 6 Soldadura por laser

O processo de soldadura por laser caracteriza-se como um processo de elevada densidade energética ( $10^6 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ ), realizado à temperatura ambiente. Trata-se de um processo de soldadura bastante rápido, pois as elevadas densidades energéticas utilizadas possibilitam a utilização de velocidades de soldadura bastante mais rápidas que as habitualmente usadas em processos de soldadura convencionais [9].

A tecnologia laser tem ganho, nos últimos tempos, uma enorme importância em operações de corte e soldadura, podendo inclusive realizar estas duas operações com o mesmo equipamento, bastando apenas uma simples mudança de potência. No caso da soldadura, importantes aspectos têm “jogado” a favor do laser. A entrega térmica deste processo chega a ser 10 vezes inferior à evidenciada por soldadura GMAW, conseqüentemente, esta tecnologia apresenta valores de distorção e zona termicamente afectada bastante reduzidos, para além de proporcionar cordões de soldadura de elevada qualidade e possibilitar a realização de soldaduras em locais de difícil acesso, uma vez que não existe contacto físico entre a fonte de calor e o material a soldar [9].

### 6.1 Fundamentos do processo

Ao incidir-se uma determinada radiação laser sobre o material a soldar, esta toma duas direcções distintas. Uma parte da radiação é reflectida e dissipada na atmosfera envolvente, enquanto a outra parte é transferida para o material, aquecendo-o na zona de interacção e nas zonas envolventes, por mecanismos de condução energética.

Para se promover a soldadura do material este precisa de fundir, para isto, torna-se necessário que a energia da radiação fornecida seja superior à energia que se escoa por condução. Com o aumento da temperatura no material a soldar, a eficiência do processo aumenta, uma vez que a absorção energética passa a ser cada vez maior e a reflexão cada vez menor, tornando-se o aquecimento cada vez mais intenso. Este aumento da densidade energética vai promover a ocorrência de material vaporizado na zona de interacção do feixe, criando uma coluna de vapor, designada por “key-hole”, a qual absorve cerca de 95% da radiação incidente e desenvolve-se em profundidade no material a soldar.

À medida que o laser se desloca, a formação e desenvolvimento do “key-hole”, vai-se deslocando também, no sentido inverso ao feixe e à mesma velocidade [9,14,15].

A penetração conseguida está directamente ligada à profundidade máxima alcançada pelo “Key-hole”, que por sua vez é influenciado pela potência do feixe incidente e da velocidade de deslocação do mesmo. Nos casos em que a densidade energética não seja suficientemente elevada para que ocorra a vaporização de material, a soldadura não acontece por “Key-hole”, mas sim por condução, ou seja, por processos convencionais de transferência de calor. As principais características a considerar na definição da fonte de laser a utilizar são, a potência (ex: laser industrial de CO<sub>2</sub>; 3-5 KW), o diâmetro do feixe, o modo electromagnético transversal, a simetria e estabilidade do feixe e o comprimento de onda da radiação emitida [9,14,15].

Os principais lasers utilizados quer em soldadura quer em corte, são os lasers de CO<sub>2</sub> e os lasers de Nd/YAG. No entanto, surgem já alguns lasers de estado sólido como o Fibre laser, usado nas soldaduras laser deste trabalho.

Os Fibre laser (não confundir com Fibre laser, em que a fibra óptica é apenas utilizada como mecanismo de entrega) são lasers de estado sólido em que uma fibra óptica é dopada com baixos níveis de terras raras, como o Neodímio, Itérbio e Túlio.

## 7. Trabalho Experimental

O principal objectivo desta secção é dar a conhecer as diferentes ligações realizadas e os seus respectivos parâmetros de soldadura, bem como os ensaios realizados para proceder à caracterização mecânica e metalográfica das mesmas. Para tal, serão descritos os materiais de base utilizados, referindo as respectivas composições químicas típicas e suas propriedades mecânicas principais, o mesmo sucedendo para os materiais de adição. Será abordada ainda a influência dos gases de protecção seleccionados para cada processo.

### 7.1 Dados de soldadura

#### 7.1.1 Materiais de Base

##### 7.1.1.1 Aço QSTE 340

O aço QSTE 340 é um aço de baixo carbono laminado a quente com boa qualidade estrutural e excelente conformabilidade. É largamente utilizado em componentes estruturais conformados a frio, principalmente em componentes onde seja exigida uma boa resistência mecânica aliada a uma elevada conformabilidade, para além de boas

características de soldabilidade [16]. A tabela 1 apresenta a composição química típica deste tipo de aços.

Tabela 1 - Composição química típica do aço QSTE 340 [16].

Norma Técnica	Grau	Espessura (mm)	Composição Química (%)									
			C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Nb	Ti	V	Fe	
SEW*	QSTE											
<b>092</b>	340	2,25 - 5,00	0,10	0,90	0,03	0,03	0,50	(1)	(1)	(1)	resto	

\*SEW - Material Specification by Organization of the German Iron and Steel Industry.

(1) - Nióbio, Vanádio e Titânio poderão ser adicionados isoladamente ou combinados, sendo o somatório (Nb + Ti + Va) = 0,20% máx.

#### 7.1.1.2 Aço DC 04

O aço DC 04 é um aço de baixo carbono laminado a frio utilizado principalmente pelas suas boas propriedades de conformabilidade, encontrando diversas aplicações na indústria automóvel, em componentes principalmente provenientes de processos de estampagem [17]. A tabela 2 apresenta a composição química indicada para este tipo de aços.

Tabela 2 - Composição química típica do aço DC 04 [17].

Norma Técnica	Grau	Composição Química (%)				
		C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Fe
SFS-EN	DC 04					
<b>10130:2006</b>		0,08	0,40	0,03	0,03	resto

A tabela 3 apresenta-nos as principais propriedades mecânicas de cada um dos aços acima apresentados.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço QSTE 340 e do aço DC 04 [16, 17].

Material de base	Propriedades mecânicas		
	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
<b>QSTE 340</b>	340 min.	420 - 540	19
<b>DC 04</b>	210 máx.	270 - 350	38

### 7.1.1.3 Alumínio EN AW 1050A

A liga de alumínio 1050A é uma liga bastante utilizada em embalagens, tubagem de radiadores, reflectores de luz e em várias aplicações na indústria química e alimentar, em grande parte devido à sua elevada resistência à corrosão atmosférica, alta condutividade térmica e eléctrica, excelente ductilidade, toxicidade nula e aspecto atraente. No entanto, as suas propriedades mecânicas são bastante baixas [18]. A composição química típica deste tipo de ligas de alumínio encontra-se descrita na tabela 4.

Tabela 4 - Composição química típica da liga de alumínio EN AW 1050A [18].

Liga	Composição Química (%)								
	Fe máx.	Si máx.	Zn máx.	Ti máx.	Mg máx.	Mn máx.	Cu máx.	Outros máx.	Al
<b>EN AW 1050A</b>	0,40	0,25	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	resto

### 7.1.1.4 Alumínio EN AW 5052

A liga de alumínio 5052 encontra, sobretudo, aplicações em reservatórios sobre pressão, tubagens para indústria química, componentes estruturais soldados, sinais de trânsito e painéis arquitectónicos. Este tipo de ligas de alumínio caracteriza-se como sendo bastante resistente à corrosão (atmosférica, marítima e industrial), e apresenta condições de soldadura bastante boas. Excelente conformabilidade a frio e média resistência mecânica, são outras das principais características desta liga [18]. A composição química típica deste tipo de ligas de alumínio encontra-se descrita na tabela 5.

Tabela 5 - Composição química típica da liga de alumínio EN AW 5052 [18].

Liga	Composição Química (%)								
	Fe	Si	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Outros	Al
	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	
EN AW 5052	0,40	0,25	0,10	0,15-0,35	2,20-2,80	0,10	0,10	0,05	resto

A tabela 6 apresenta-nos as principais propriedades mecânicas de cada uma das ligas de alumínio utilizadas nas soldaduras efectuadas.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas das ligas de alumínio EN AW 1050A e EN AW 5052 [18].

Liga	Estado	Forma	Propriedades mecânicas		
			Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
EN AW 1050A	H2	Chapa	60 - 85	90 - 100	13 - 12
EN AW 5052	H2	Chapa	130 - 175	210 - 225	12 - 15

### 7.1.2 Ligações efectuadas

Os materiais de base disponibilizados foram seleccionados pela empresa responsável pelo projecto (SODECIA S.A.), devido à sua larga aplicação em componentes para a indústria automóvel produzidos pelo grupo, no caso dos aços, e devido à crescente implementação de materiais cada vez mais leves neste sector industrial, no caso dos alumínios. Inicialmente foram propostas ligações de três tipos:

1. Ligações do tipo A - Alumínio ligado com Alumínio;
2. Ligações do tipo B - Aço com Aço;
3. Ligações do tipo C - Alumínio com Aço.

No entanto, as ligações do tipo C, que apenas seriam realizadas recorrendo ao processo de soldadura CMT, foram descartadas por falta de meios técnicos para afinação dos principais parâmetros de soldadura, de modo a garantir um boa união deste tipo de materiais dissimilares. As elevadas ondulações apresentadas pelas chapas fornecidas foram outro dos

entraves à realização deste tipo de ligações. Optou-se então por realizar as ligações a seguir descritas.

Alumínios - ligações do tipo A:

- EN AW 1050A (3mm) - EN AW 1050A (3mm);
- EN AW 5052 (1mm) - EN AW 5052 (1mm).

Aços - ligações do tipo B:

- QSTE 340 (2mm) - QSTE 340 (2mm);
- DC 04 (1mm) - DC 04 (1mm);
- QSTE 340 (2mm) - DC 04 (1mm).

Outra das ligações propostas foi a ligação da liga de alumínio EN AW 1050A (3mm) com a liga de alumínio EN AW 5052 (1mm). No entanto, a diferença de espessuras apresentada em conjunto com as deformações iniciais apresentadas pelas chapas, tornou esta tarefa bastante complicada para o operador, dando origem a cordões de soldadura de bastante má qualidade. Posto isto, não foi considerado este tipo de ligações.

### 7.1.3 Materiais de adição

#### 7.1.3.1 Ligações do tipo A

O material de adição utilizado nas ligações das ligas de alumínio por processos de soldadura GMAW foi o OK Autrod 18.04 da marca ESAB com 1mm de diâmetro. Trata-se de um fio sólido de alumínio-silício utilizado geralmente para soldaduras do tipo MIG em ligas AlSi e AlMgSi que contenham um máximo de 7% em Si. Habitualmente utilizado com recurso a argon puro como gás de protecção, este material de adição utiliza-se usualmente ligado ao pólo positivo da fonte de alimentação de corrente directa (DC+) [19]. A tabela 7 apresenta a composição típica do metal depositado, bem como as suas principais propriedades mecânicas, gamas de corrente de soldadura e de tensão do arco.

Tabela 7 - Composição química típica e propriedades mecânicas do OK Autrod 18.04 [19].

Classificação	Composição química típica (%)	Propriedades mecânicas típicas	(A)	(V)
AWS ER 4043	Si - 5,00	Limite elástico, MPa	90-180	22-26
	Mn - <0,01	35		
	Zn - <0,01	Tensão de ruptura, MPa		
	Fe - <0,2	75		
Al - resto	Alongamento, %	33		

### 7.1.3.2 Ligações do tipo B

Para a união das chapas de aço por processos de soldadura GMAW foi utilizado o OK Autrod 12.50 da marca ESAB com 1mm de diâmetro. Disponível na forma de fio sólido não-cobreado ligado ao manganês e ao silício, este material de adição é geralmente utilizado na soldadura GMAW de aços não ligados ou aços C-Mn. Utiliza frequentemente misturas de árgon com 20% de CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub> puro como gás de protecção, soldando com auxílio de corrente directa e com o material de adição ligado ao pólo positivo da fonte de alimentação (DC+) [19] A tabela 8 indica-nos as principais informações sobre este tipo de material de adição.

Tabela 8 - Composição química típica e propriedades mecânicas do OK Autrod 12.50 [19].

Classificação	Composição química típica (%)	Propriedades mecânicas típicas	(A)	(V)
AWS ER 70S-6	C - 0,1	Limite elástico, MPa	80-300	18-32
	Si - 0,9	470		
	Mn - 1,5	Tensão de ruptura, MPa		
	Fe - resto	560		
		Alongamento, %		
		26		

### 7.1.4 Gases de protecção

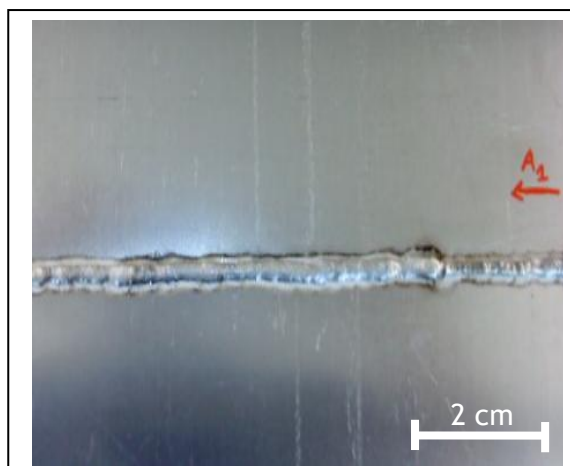
A primeira e principal função dos diferentes gases de protecção utilizados, é evitar o contacto entre o banho de fusão e a atmosfera envolvente. De facto, quando submetidos a temperaturas elevadas, a maior parte dos metais têm tendência a oxidar, se sujeitos a contacto directo com a atmosfera. Esta oxidação, resultante das reacções estabelecidas entre o oxigénio, o carbono e os elementos de liga dos metais a soldar, provoca diversos defeitos na soldadura efectuada, tais como inclusões de escória, porosidade ou fragilização do cordão. No entanto, estes gases têm ainda diversas funções, dependendo da natureza do gás e do débito a que é libertado, podem influenciar a estabilidade do arco eléctrico, o modo de transferência de metal, a geometria e aspecto do cordão efectuada e as características mecânicas e metalúrgicas do metal fundido. Os gases geralmente utilizados quando se utilizam processos de soldadura GMAW, são o argon e hélio (gases inertes) e misturas destes com oxigénio e CO<sub>2</sub> (gases activos) [9].

### 7.1.5 Soldaduras efectuadas

Seguidamente serão apresentadas as diferentes soldaduras realizadas, identificando os processos utilizados e alguns dos principais parâmetros envolvidos na realização dos cordões de soldadura. As soldaduras GMAW (MIG/MAG e CMT) foram realizadas pela Fronius-Portugal de forma semi-automática, enquanto as soldaduras Laser foram realizadas pela Jenoptik-Alemanha com recurso a um Fibre Laser de 1 kW de potência. No caso das soldaduras efectuadas por processos GMAW não foram fornecidos dados acerca das intensidades de corrente e tensão do arco utilizados para as diferentes ligações. As figuras 13 a 30 apresentam o aspecto dos cordões de soldadura efectuados.

#### *Principais parâmetros da ligação A1:*

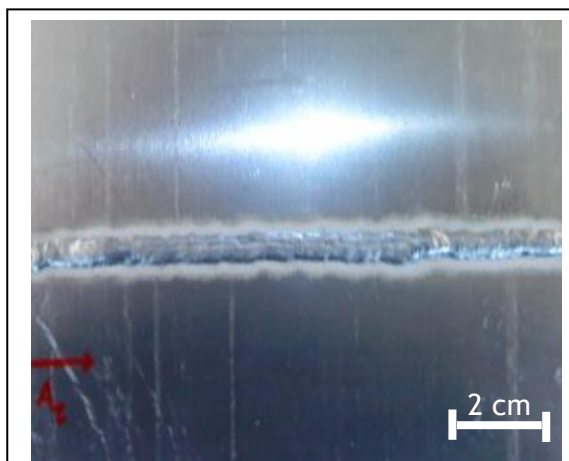
Materials: EN AW 1050A/EN AW 1050A  
Espessuras: 3mm/3mm  
Processo utilizado: MIG P. Manual  
Gás de protecção: 100% Argon  
Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
Distância soldada (mm): 240,0  
Tempo dispendido (s): 19,0  
Velocidade de alimentação (m/min): 6,4  
Velocidade de soldadura (mm/s): 12,6  
Consumo de fio (m): 2,0



*Figura 13: Cordão de soldadura A1*

*Principais parâmetros da ligação A2:*

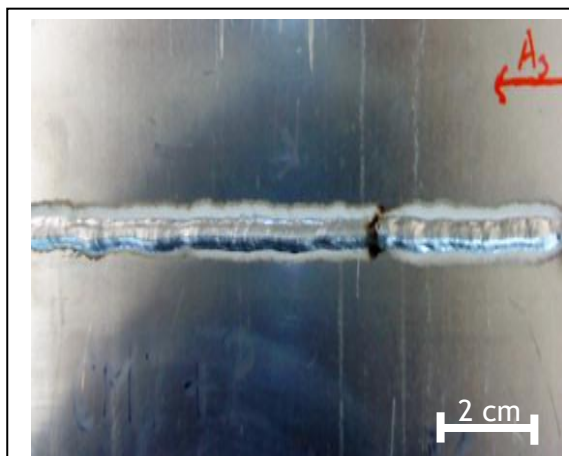
Materiais: EN AW 1050A/EN AW 1050A  
 Espessuras: 3mm/3mm  
 Processo utilizado: MIG P. Manual  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 230,0  
 Tempo dispendido (s): 32,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 6,4  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 7,2  
 Consumo de fio (m): 3,4



*Figura 14: Cordão de soldadura A2*

*Principais parâmetros da ligação A3:*

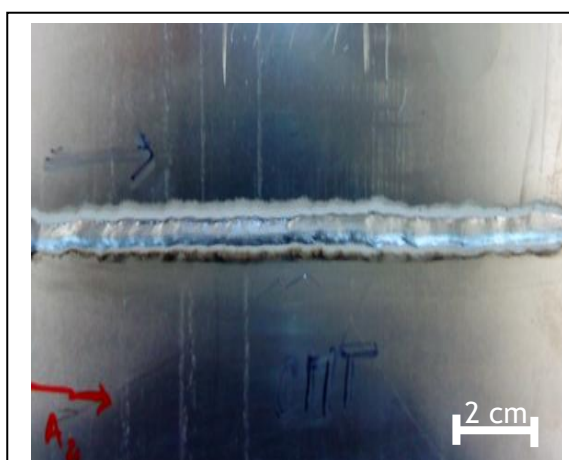
Materiais: EN AW 1050A/EN AW 1050A  
 Espessuras: 3mm/3mm  
 Processo utilizado: CMT Manual  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 280,0  
 Tempo dispendido (s): 32,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 6,0  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 8,8  
 Consumo de fio (m): 3,2



*Figura 15: Cordão de soldadura A3*

*Principais parâmetros da ligação A4:*

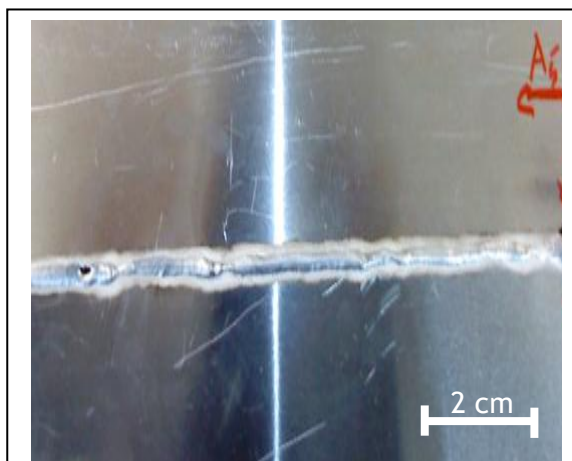
Materiais: EN AW 1050A/EN AW 1050A  
 Espessuras: 3mm/3mm  
 Processo utilizado: CMT P. Manual  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 280,0  
 Tempo dispendido (s): 23,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 6,9  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 12,2  
 Consumo de fio (m): 2,6



*Figura 16: Cordão de soldadura A4*

*Principais parâmetros da ligação A5:*

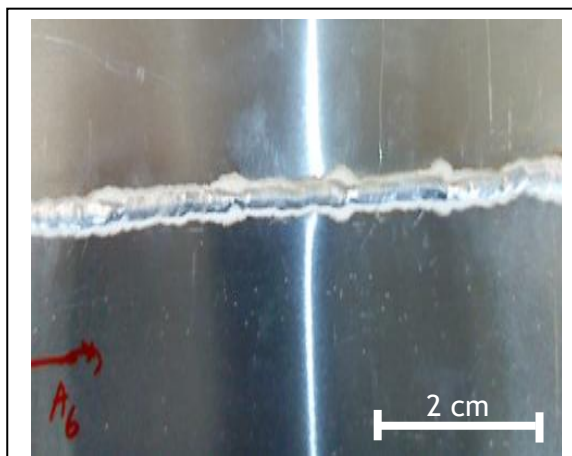
Materiais: EN AW 5052/EN AW 5052  
 Espessuras: 1mm/1mm  
 Processo utilizado: CMT P. Manual  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 270,0  
 Tempo dispendido (s): 22,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 2,3  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 12,3  
 Consumo de fio (m): 0,8



*Figura 17: Cordão de soldadura A5*

*Principais parâmetros da ligação A6:*

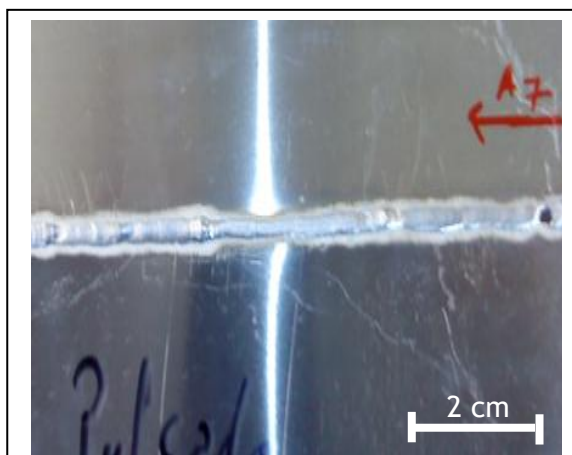
Materiais: EN AW 5052/EN AW 5052  
 Espessuras: 1mm/1mm  
 Processo utilizado: CMT Manual  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 230,0  
 Tempo dispendido (s): 23,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 4,2  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 10,0  
 Consumo de fio (m): 1,6



*Figura 18: Cordão de soldadura A6*

*Principais parâmetros da ligação A7:*

Materiais: EN AW 5052/EN AW 5052  
 Espessuras: 1mm/1mm  
 Processo utilizado: MIG P. Manual  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Metal de adição: AWS ER4043 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 260,0  
 Tempo dispendido (s): 38,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 1,8  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 6,8  
 Consumo de fio (m): 1,1



*Figura 19: Cordão de soldadura A7*

*Principais parâmetros da ligação A8:*

**Materiais:** EN AW 5052/EN AW 5052  
**Espessuras:** 1mm/1mm  
**Processo utilizado:** Fibre laser  
**Gás de protecção:** 100% Árgon  
**Velocidade de soldadura (mm/s):** 40  
**Potência do laser (W):** 2,0



*Figura 20: Cordão de soldadura A8*

*Principais parâmetros da ligação B1:*

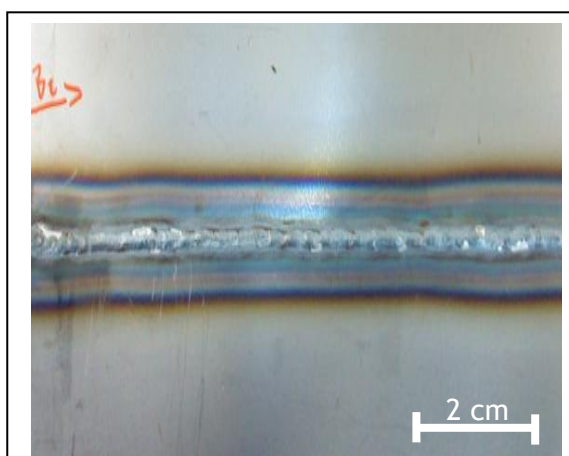
**Materiais:** DC 04/DC 04  
**Espessuras:** 1mm/1mm  
**Processo utilizado:** MAG Manual  
**Gás de protecção:** 88% Árgon, 12% CO<sub>2</sub>  
**Metal de adição:** AWS ER70S-6 d=1mm  
**Distância soldada (mm):** 250,0  
**Tempo dispendido (s):** 33,0  
**Velocidade de alimentação (m/min):** 2,3  
**Velocidade de soldadura (mm/s):** 7,6  
**Consumo de fio (m):** 1,3



*Figura 21: Cordão de soldadura B1*

*Principais parâmetros da ligação B2:*

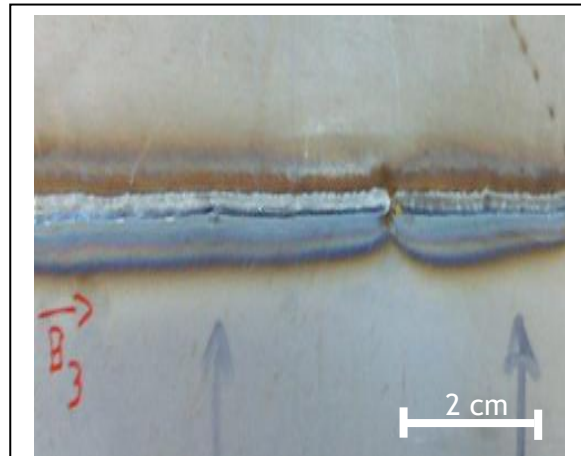
**Materiais:** DC 04/DC 04  
**Espessuras:** 1mm/1mm  
**Processo utilizado:** CMT P. Manual  
**Gás de protecção:** 100% CO<sub>2</sub>  
**Metal de adição:** AWS ER70S-6 d=1mm  
**Distância soldada (mm):** 450,0  
**Tempo dispendido (s):** 53,0  
**Velocidade de alimentação (m/min):** 1,4  
**Velocidade de soldadura (mm/s):** 8,5  
**Consumo de fio (m):** 1,2



*Figura 22: Cordão de soldadura B2*

*Principais parâmetros da ligação B3:*

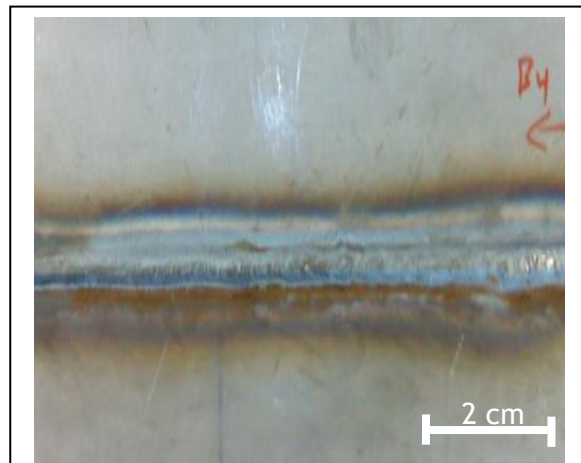
**Materiais:** DC 04/QSTE 340  
**Espessuras:** 1mm/2mm  
**Processo utilizado:** MAG Manual  
**Gás de protecção:** 88% Árgon, 12% CO<sub>2</sub>  
**Metal de adição:** AWS ER70S-6 d=1mm  
**Distância soldada (mm):** 150,0  
**Tempo dispendido (s):** 23,0  
**Velocidade de alimentação (m/min):** 2,6  
**Velocidade de soldadura (mm/s):** 6,5  
**Consumo de fio (m):** 1,0



*Figura 23: Cordão de soldadura B3*

*Principais parâmetros da ligação B4:*

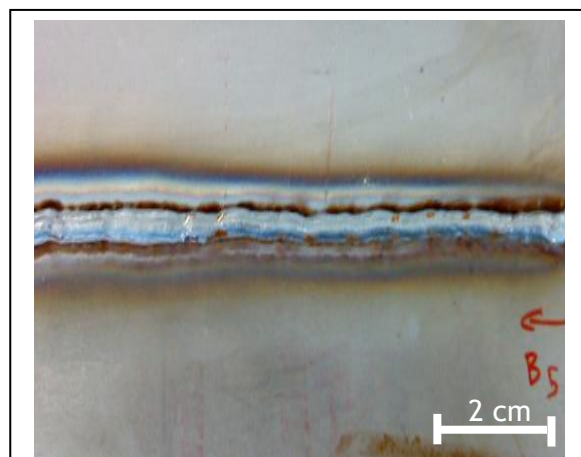
**Materiais:** QSTE340/QSTE340  
**Espessuras:** 2mm/2mm  
**Processo utilizado:** MAG Manual  
**Gás de protecção:** 88% Árgon, 12% CO<sub>2</sub>  
**Metal de adição:** AWS ER70S-6 d=1mm  
**Distância soldada (mm):** 250,0  
**Tempo dispendido (s):** 55,0  
**Velocidade de alimentação (m/min):** 4,5  
**Velocidade de soldadura (mm/s):** 4,5  
**Consumo de fio (m):** 4,1



*Figura 24: Cordão de soldadura B4*

*Principais parâmetros da ligação B5:*

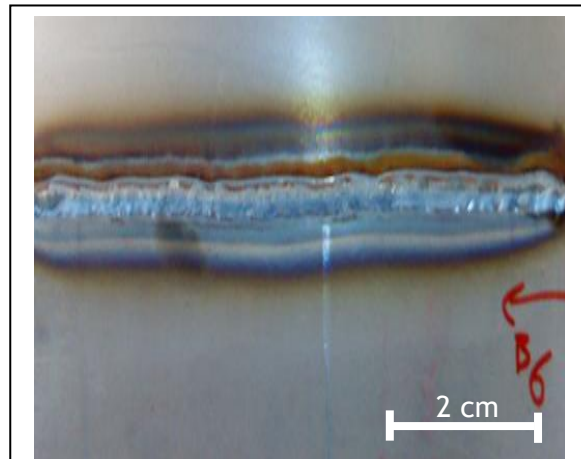
**Materiais:** QSTE340/QSTE340  
**Espessuras:** 2mm/2mm  
**Processo utilizado:** CMT Manual  
**Gás de protecção:** 100% CO<sub>2</sub>  
**Metal de adição:** AWS ER70S-6 d=1mm  
**Distância soldada (mm):** 500,0  
**Tempo dispendido (s):** 40,0  
**Velocidade de alimentação (m/min):** 7,8  
**Velocidade de soldadura (mm/s):** 12,5  
**Consumo de fio (m):** 5,2



*Figura 25: Cordão de soldadura B5*

*Principais parâmetros da ligação B6:*

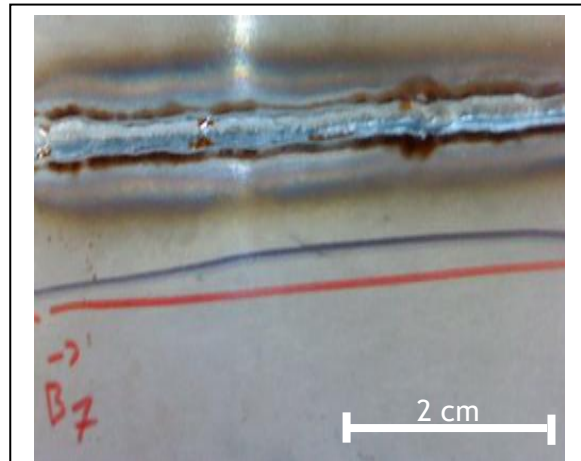
Materiais: DC 04/QSTE340  
 Espessuras: 1mm/2mm  
 Processo utilizado: CMT P. Manual  
 Gás de protecção: 100% CO<sub>2</sub>  
 Metal de adição: AWS ER70S-6 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 460,0  
 Tempo dispendido (s): 60,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 3,0  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 7,7  
 Consumo de fio (m): 3,0



*Figura 26: Cordão de soldadura B6*

*Principais parâmetros da ligação B7:*

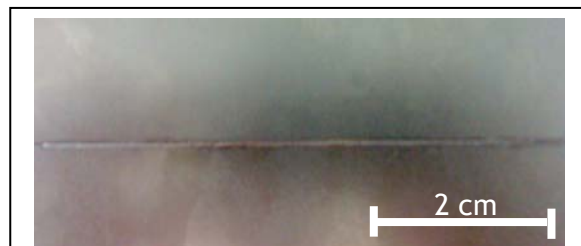
Materiais: QSTE340/QSTE340  
 Espessuras: 2mm/2mm  
 Processo utilizado: CMT Manual  
 Gás de protecção: 100% CO<sub>2</sub>  
 Metal de adição: AWS ER70S-6 d=1mm  
 Distância soldada (mm): 270,0  
 Tempo dispendido (s): 23,0  
 Velocidade de alimentação (m/min): 7,8  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 11,7  
 Consumo de fio (m): 3,0



*Figura 27: Cordão de soldadura B7*

*Principais parâmetros da ligação B8:*

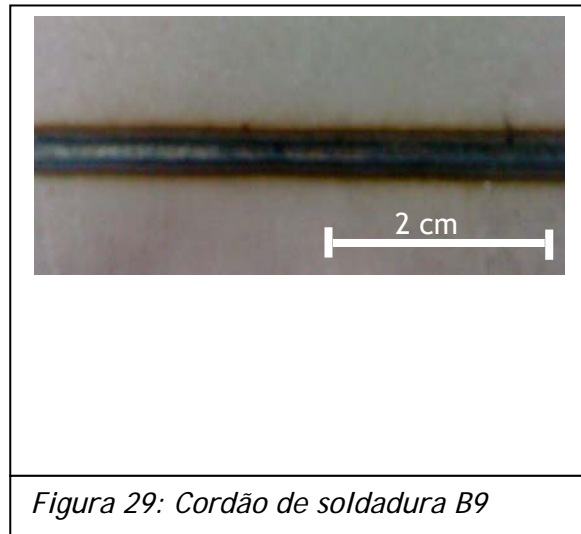
Materiais: DC 04/DC 04  
 Espessuras: 1mm/1mm  
 Processo utilizado: Fibre laser  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 65  
 Potência do laser (W): 1000



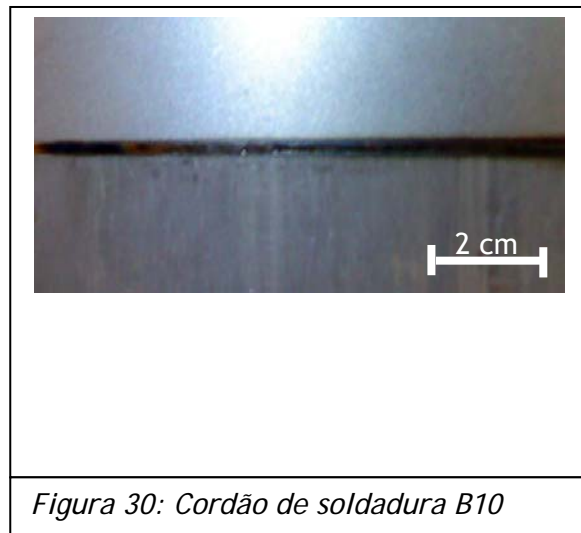
*Figura 28: Cordão de soldadura B8*

*Principais parâmetros da ligação B9:*

Materiais: QSTE340/QSTE340  
 Espessuras: 2mm/2mm  
 Processo utilizado: Fibre laser  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 20  
 Potência do laser (W): 1000

*Principais parâmetros da ligação B10:*

Materiais: DC 04/QSTE340  
 Espessuras: 1mm/2mm  
 Processo utilizado: Fibre laser  
 Gás de protecção: 100% Árgon  
 Velocidade de soldadura (mm/s): 30  
 Potência do laser (W): 1000



## 7.2 Ensaios realizados

### 7.2.1 Preparação de amostras

As amostras utilizadas para a realização dos exames macrográficos, micrográficos e microdurezas foram montadas em resinas fenólica ou epoxídica a partir de secções transversais (Figura 31) a cada um dos cordões de soldadura fornecidos. Foram utilizadas duas técnicas de montagem de amostras diferentes, algumas amostras foram montadas a quente e as restantes montadas a frio, esta distinção deveu-se apenas a factores de tamanho dos cordões de soldadura a serem montados, uma vez que a máquina utilizada na montagem a quente apenas permite a realização de montagens com um diâmetro de 25 mm.

O equipamento utilizado para a realização das montagens a quente foi uma máquina da marca BUEHLER, modelo Simplimet 1000. Para este tipo de montagens foi utilizada uma resina fenólica (Bakelite) da marca BUEHLER (cor vermelha).

As montagens a frio foram efectuadas com recurso a uma resina epoxídica da marca Mécaprex (Mécaprex MA 2) e a um endurecedor da mesma marca, na proporção de 100 partes de resina para cada 12 partes de endurecedor. A mistura, depois de bem homogeneizada, ficou em repouso durante cerca de 12 horas à temperatura ambiente. A figura 32 apresenta uma amostra montada a quente e uma amostra montada a frio.

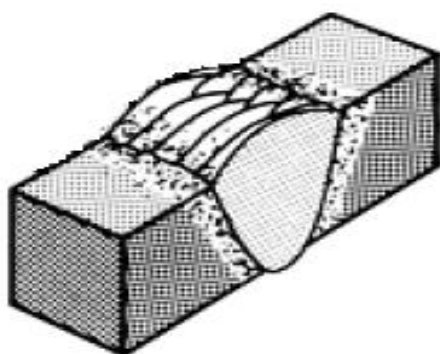


Figura 31: Esquema representativo da secção transversal ao cordão de soldadura. Figura 32: Exemplo de uma montagem a quente e uma montagem a frio.

Cada uma das amostras passou posteriormente pelas habituais etapas de desbaste (série de lixas de granulometria decrescente, desde 180 a 600 mesh) e polimento com recurso a soluções de partículas de diamantes com 6 e 1  $\mu\text{m}$  de tamanho.

### 7.2.2 Exame Macrográfico

Um exame macrográfico consiste essencialmente na observação da superfície de uma peça, ou amostra dessa peça, à vista desarmada ou com uma ampliação inferior a 5x. No caso de essa observação ser executada sobre uma amostra da peça, esta deve ser representativa da mesma e fornecer o maior número possível de informações relevantes, não sendo, no entanto, de descurar a complementaridade desta técnica com outros tipos de exames, como: micrografia, análise química e ensaios mecânicos, entre outros [2].

A utilização deste tipo de exames em soldadura é de enorme importância, permitindo uma correcta identificação das diferentes zonas da junta, o que facilita a sua posterior observação em exames micrográficos. Para além disso, o exame macrográfico permite ainda identificar diversas heterogeneidades (defeitos) ao longo do cordão de soldadura efectuado, tais como:

- Heterogeneidades de natureza química: inclusões, segregações, zonamentos, etc;
- Heterogeneidades de natureza estrutural: diferentes zonas da junta soldada;
- Heterogeneidades de natureza física: porosidades, inclusões não metálicas, fissuras, rechupes, etc;
- Heterogeneidades de natureza geométrica: desalinhamentos, falta ou excesso de penetração, bordos queimados, falta de fusão, defeitos de simetria, etc [2].

Para que as diferentes heterogeneidades possam ser correctamente identificadas, é necessária uma correcta preparação das amostras (desbaste, polimento e contrastação).

A etapa de contrastação é utilizada para evidenciar a macroestrutura do material utilizando um reagente químico que actua por dissolução selectiva dos diferentes constituintes, evidenciando as diversas zonas da junta soldada pelas diferenças de nível e orientação criadas [2].

Para a contrastação dos cordões de soldadura do tipo A foi utilizada uma solução conhecida como reagente de Tucker e para os cordões de soldadura tipo B foi utilizada uma solução de ácido nítrico. A tabela 9 apresenta as diferentes quantidades de cada um dos reagentes das soluções utilizadas, bem como as suas respectivas recomendações de utilização [20].

*Tabela 9: Reagentes de ataque para realização de exames macrográficos [20].*

Ligações	Solução	Recomendações
Tipo A	45 ml HCl + 15 ml HNO <sub>3</sub> + 15 ml HF (48%) +25 ml H <sub>2</sub> O	Imersão da amostra durante alguns minutos, à temperatura ambiente.
Tipo B	15 ml HNO <sub>3</sub> + 85 ml H <sub>2</sub> O + 5 ml etanol	Esfregar com algodão durante vários segundos, à temperatura ambiente, seguida de uma lavagem suave em água corrente.

Após a etapa de contrastação, as amostras foram observadas com recurso a uma lupa da marca Nikon, modelo SMZ-2T e as suas imagens recolhidas com recurso ao software de aquisição de imagens PAQI.

### 7.2.3 Exame Micrográfico

A metalografia é uma técnica que estuda as características estruturais ou de constituição de um metal ou liga, relacionando-as posteriormente com as suas propriedades físicas e mecânicas [2]. Neste tipo de exame, são utilizadas ampliações bastante superiores às utilizadas em exames macrográficos, permitindo realizar um maior número de análises, tais como:

- Identificação e caracterização das fases presentes;
- Identificação de heterogeneidades, como: inclusões não metálicas, segregações, etc;
- Avaliação qualitativa e de forma aproximada da composição química;
- Quantificação de tamanho médio de grão, fracção volumétrica das fases e dimensão/distribuição de inclusões [2].

Os exames micrográficos realizados aos cordões de soldadura fornecidos foram efectuados sobre superfícies polidas, como foi descrito anteriormente, e contrastadas. No caso dos exames micrográficos a contrastação depende não só do tipo de material em análise mas também da informação que se pretende obter. Sendo assim, utilizou-se uma solução de reagente de Keller para as ligações do tipo A e uma solução de nital a 2% para as ligações do tipo B [20]. A tabela 10 apresenta os diferentes constituintes de cada uma das referidas soluções, recomendações de utilização e as principais informações possíveis de obter com ataques químicos efectuados com recurso a estas soluções.

*Tabela 10: Reagentes de ataque para realização de exames micrográficos [20].*

Ligações	Solução	Recomendações	Informações
Tipo A	2 ml HF(48%) + 3 ml HCl + 5 ml HNO <sub>3</sub> + 190 ml H <sub>2</sub> O	Imersão da amostra durante 8 a 15 segundos.	Identificação de fronteiras e tamanho de grão.
Tipo B	2 ml HNO <sub>3</sub> + 98 ml H <sub>2</sub> O	Imersão da amostra durante poucos segundos, lavagem e secagem suaves.	Revelação geral da estrutura do metal.

### 7.2.4 Ensaio de Tracção

O ensaio de tracção é um dos ensaios mais utilizado quer na indústria, para controlo da qualidade, quer em investigação, para quantificação de propriedades mecânicas com vista à selecção de materiais. A larga utilização deste tipo de ensaios deve-se sobretudo à sua facilidade de execução e reprodutibilidade, bem como à elevada quantidade de informação que se pode extrair destes [21].

O ensaio de tracção consiste na aplicação de uma força tractiva uniaxial continuamente crescente a um provete de geometria adequada, registando com recurso a instrumentação apropriada a força e o alongamento sofrido pela marcação de referência inscrita no provete. Os ensaios de tracção solicitados aos provetes de soldadura fornecidos foram realizados seguindo a norma para ensaios destrutivos de soldaduras em materiais metálicos - ensaio de tracção transversal (NP EN 895 - 2002), tendo recaído o interesse deste ensaio apenas sobre a localização da rotura e resistência máxima suportada, pelo que não foram registados valores de alongamento para estes ensaios [21,22].

Os ensaios de tracção foram realizados à temperatura ambiente com uma máquina de tracção da marca SHIMADZU modelo AG.A25. A figura 33 a) representa o modelo de provetes, retirados transversalmente aos cordões de soldadura efectuados por processos GMAW, e a figura 33 b) representa o modelo de provetes utilizado para os cordões de soldadura laser. O excesso de ondulações presentes das chapas soldadas não permitiu que os provetes retirados fossem maquinados de acordo com a norma referenciada, sob pena de se comprometer a sanidade dos cordões efectuados. No entanto, a mesma relação comprimento/largura foi utilizada para os dois tipos de provetes, relação esta de 10/1. As espessuras dos provetes de tracção utilizados são as espessuras referentes às diferentes ligações tipo A e tipo B.

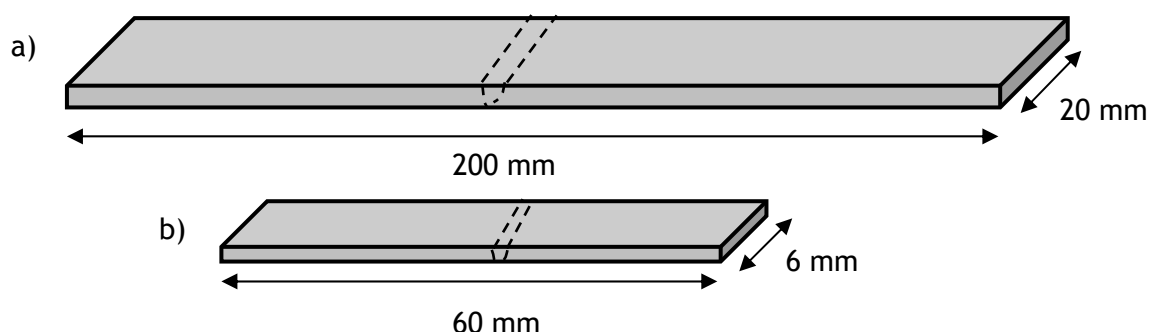


Figura 33: Modelo de provetes de tracção utilizados e respectivas dimensões. a) Provetes retirados das soldaduras efectuadas por processos GMAW; b) Provetes retirados das soldaduras laser.

### 7.2.5 Microdurezas

Fisicamente, o conceito de dureza pode ser descrito como a resistência que um material oferece à penetração ou à deformação permanente da sua superfície. Os ensaios de determinação de dureza são bastante aplicados na indústria, quer no controlo de qualidade dos materiais como no controlo de qualidade dos processos [21].

A utilização destes ensaios nos cordões de soldadura fornecidos, prende-se sobretudo com a necessidade de verificar a influência dos processos de soldadura utilizados no endurecimento ou amaciamento das diferentes zonas dos provetes soldados, assim como para identificação dos diferentes constituintes microestruturais presentes na ligação efectuada. Para tal, foram efectuadas microdurezas Vickers ao longo de uma linha recta (representação esquemática na figura 34), registando os diferentes valores de dureza apresentados pelo material de base, zonas termicamente afectadas e cordão de soldadura, de cada uma das ligações efectuadas.

Os ensaios foram realizados com recurso a um microdurímetro da marca SHIMADZU tipo M, nº 87433. Foi utilizada uma carga de 0,98 N em cada ensaio, e a carga foi aplicada durante um tempo de 15 segundos.

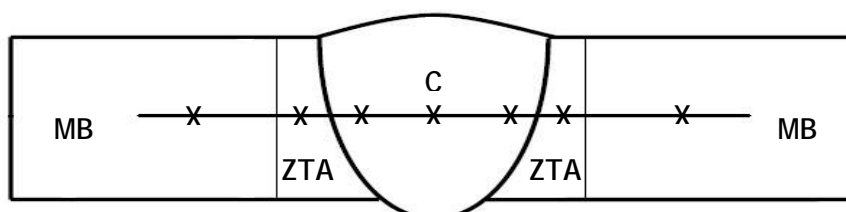


Figura 34: Esquema representativo dos ensaios de microdurezas realizados

Legenda: C - Cordão de soldadura

MB - Material de Base

ZTA - Zona Termicamente Afectada

X - Indentação

Nas soldaduras efectuadas por processos GMAW ao aço DC 04, surge o aparecimento de uma segunda zona termicamente afectada, facilmente distinguida da primeira zona termicamente afectada e do material de base pelo tamanho de grão mais reduzido que

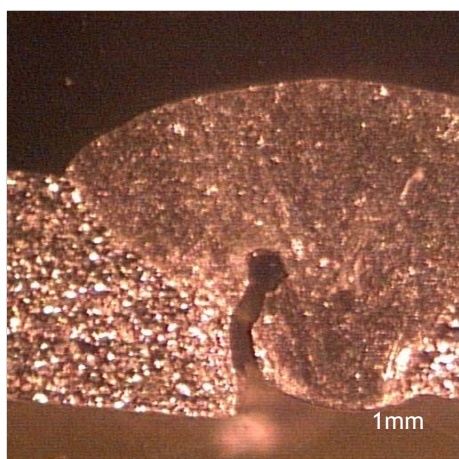
apresenta. Esta segunda zona termicamente afectada será designada futuramente na apresentação de resultados pela nomenclatura de ZTAp.

## 8. Apresentação e discussão de resultados

### 8.1 Macrografias

As macrografias apresentadas são representativas dos cordões de soldadura. No entanto, os dados apresentados com as características de cada soldadura resultam de uma análise mais exaustiva. A cada ligação foram retiradas várias macrografias e, embora não sejam apresentadas, todas foram utilizadas para a discussão das características de soldadura observadas.

*Cordão de soldadura A1:*

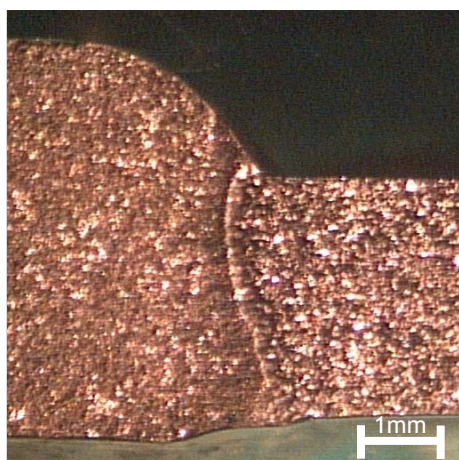


Características da soldadura

Largura do cordão	5,1 mm
Altura do cordão	1,2 mm
Penetração	1,6 / 2,9 mm
ZTA	4,2 mm

Observações: desalinhamento lateral das chapas soldadas, penetração total apenas obtida em uma das chapas, fractura observada no cordão de soldadura efectuado, escorrimento lateral.

*Cordão de soldadura A2:*

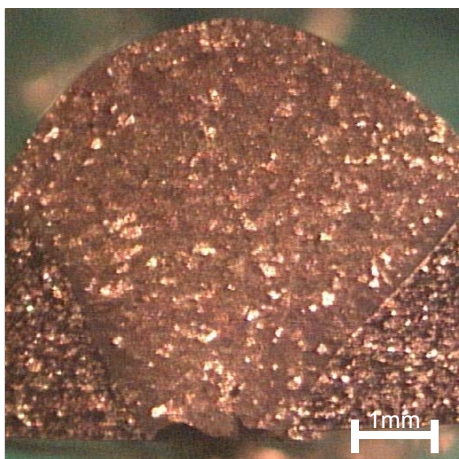


Características da soldadura

Largura do cordão	7,0 mm
Altura do cordão	1,5 mm
Penetração	3,6 mm
ZTA	4,6 mm

Observações: fissuras observadas na zona de fusão.

*Cordão de soldadura A3:*

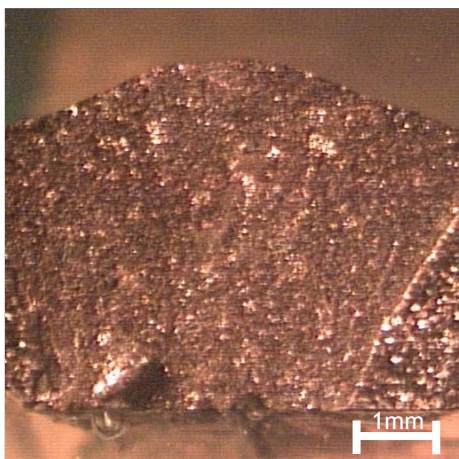


Características da soldadura

Largura do cordão	7,1 mm
Altura do cordão	2,3 mm
Penetração	3,0 mm
ZTA	4,6 mm

Observações: observados alguns poros no interior do cordão, bem como concavidades na raiz da soldadura efectuada.

*Cordão de soldadura A4:*

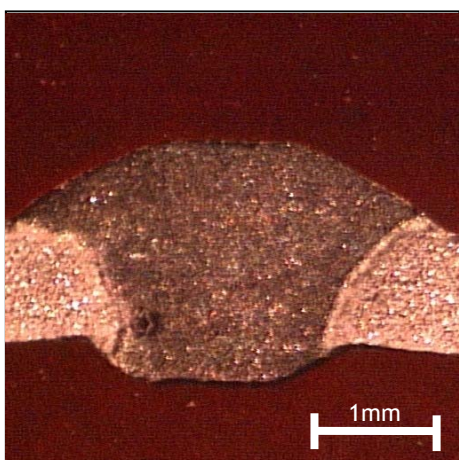


Características da soldadura

Largura do cordão	7,5 mm
Altura do cordão	1,5 mm
Penetração	3,0 mm
ZTA	5,5 mm

Observações: desalinhamento linear e angular, identificação de cavidades e concavidades na raiz do cordão, existência de fissuras na zona de fusão.

*Cordão de soldadura A5:*

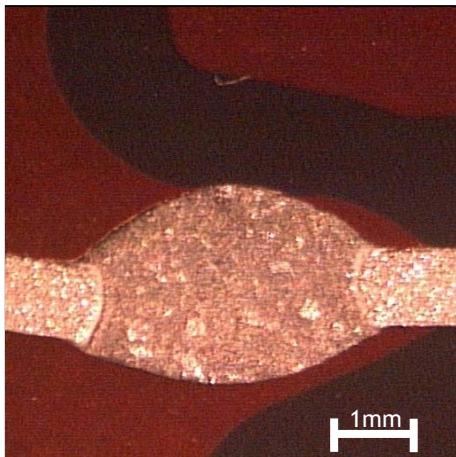


Características da soldadura

Largura do cordão	3,5 mm
Altura do cordão	0,7 mm
Penetração	1,2 mm
ZTA	1,6 mm

Observações: desalinhamento angular das chapas soldadas e penetração excessiva.

*Cordão de soldadura A6:*

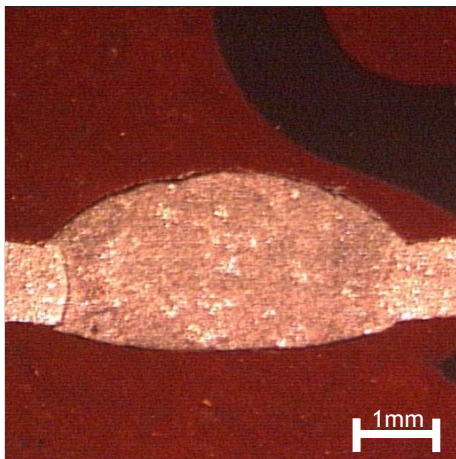


Características da soldadura

Largura do cordão	3,5 mm
Altura do cordão	0,6 mm
Penetração	1,3 mm
ZTA	1,8 mm

Observações: desalinhamento angular.

*Cordão de soldadura A7:*

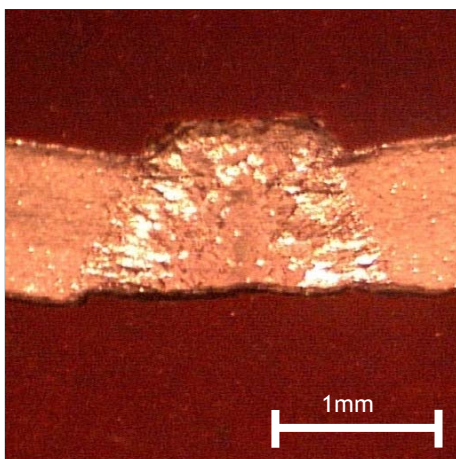


Características da soldadura

Largura do cordão	4,5 mm
Altura do cordão	0,9 mm
Penetração	1,3 mm
ZTA	2,1 mm

Observações: desalinhamento angular.

*Cordão de soldadura A8:*



Características da soldadura

Largura do cordão	1,3 mm
Altura do cordão	0,2 mm
Penetração	0,8 mm
ZTA	–

Observações: desalinhamento angular e lateral, que levou à falta de penetração em uma das chapas soldadas, identificação de micro salpicos.

De uma forma geral, os cordões de soldadura efectuados ao alumínio apresentam quer à vista desarmada, quer em ampliação macroscópica, alguns defeitos que poderiam ter sido evitados. O mais facilmente observável, e com maior taxa de incidência, é o desalinhamento, angular e lateral, existente praticamente em todos os cordões efectuados. Este tipo de problemas pode ser eliminado com uma melhor preparação e fixação das chapas a soldar, evitando a ocorrência de penetração completa num dos lados da ligação e parcial no outro, como acontece, por exemplo, na ligação A1, acabando mesmo por fissurar devido às fortes tensões acumuladas naquela zona da ligação [4,23,24].

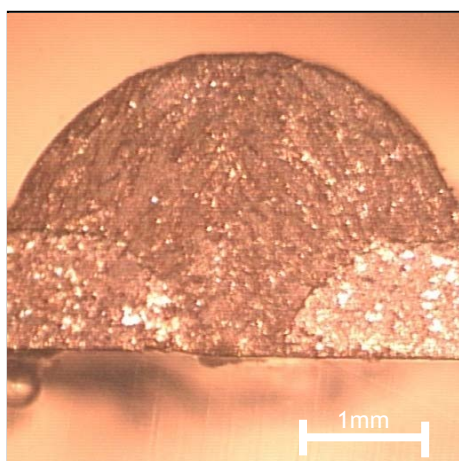
Algumas macrografias mostraram a presença de porosidade nos cordões efectuados, como foi o caso da ligação A3 e A4. Ao longo das etapas de desbaste e polimento foram-se observando também a existência de poros de vários tamanhos em praticamente todos os cordões de soldadura efectuados. No caso do alumínio, normalmente é referido que o principal culpado pela presença de poros é o hidrogénio. O hidrogénio contém elevada solubilidade no alumínio líquido, mas essa solubilidade baixa drasticamente (cerca de 20 vezes) à medida que o alumínio solidifica. Esta drástica redução torna extremamente difícil a realização de cordões de soldadura em alumínio, livres de porosidade. No entanto, a densidade de porosidade observada não foi muito elevada, factor que poderá estar relacionado com as baixas velocidades de soldadura utilizadas. Para reduzir a densidade de poros encontrada poderia ter sido utilizada uma liga de Al-Mg como material de adição (dado a liga EN AW 5052 ser uma liga de Al-Mg), uma vez que o magnésio aumenta a solubilidade do hidrogénio no alumínio sólido e reduz a absorção do mesmo. A utilização de uma liga Al-Si não terá sido a melhor opção dado o silício ter efeito contrário ao magnésio no que respeita a solubilidade do hidrogénio no alumínio sólido [4,24].

Outros dos potenciais defeitos observados foram algumas fissuras que se estendem ao longo da zona de fusão. Estas fissuras podem ocorrer devido à existência de óxidos à superfície das chapas soldadas. O óxido de alumínio (alumina) forma-se espontaneamente na superfície do alumínio, o que lhe garante uma excelente protecção contra a corrosão. No entanto, ao contrário do que acontece com os óxidos que se formam da maior parte dos metais, estes fundem a uma temperatura bastante superior à do alumínio puro (2060 °C). A existência destes óxidos aquando da soldadura do alumínio pode levar à criação de alumínio líquido enclausurado numa fina camada de óxido, levando a falta de fusão e consequentes problemas de ligação entre os materiais a soldar. Contudo, a utilização de processos GMAW com o eléctrodo ligado ao pólo positivo da fonte de alimentação promove um fenómeno de limpeza catódica do filme de óxido, a partir da troca de electrões e iões produzida entre o eléctrodo e a peça de trabalho. Os electrões saem da peça de trabalho

em direcção ao eléctrodo, com iões a fazerem o percurso em sentido inverso e a bombardearem a película de óxido, arrancando-o da superfície do material a soldar [24]. A existência de algumas fissuras na zona de fusão observada nas macrografias poderá dever-se à corrosão provocada pelo reagente de contrastação utilizado para revelação das diferentes zonas dos cordões de soldadura produzidos.

Na ligação efectuada por soldadura laser, existe falta de penetração em uma das extremidades soldadas, facto que poderá ser corrigido com o melhor alinhamento da união, ou com uma ligeira redução na velocidade de soldadura utilizada de forma a aumentar a energia de soldadura aplicada. A soldadura laser do alumínio encontra graves entraves para se afirmar na indústria, devido à elevada condutividade térmica do alumínio e às suas propriedades reflectoras [4], não tendo sido possível a realização de ligações de ligas de alumínio com espessuras de 3mm devido a insuficiência de potência por parte do equipamento disponível.

*Cordão de soldadura B1:*

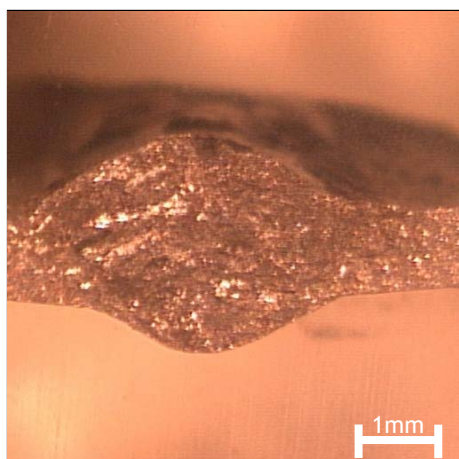


Características da soldadura

Largura do cordão	4,3 mm
Altura do cordão	1,5 mm
Penetração	1,0 mm
ZTA	2,8 mm

Observações: identificação de fissuras ao longo da zona de fusão.

*Cordão de soldadura B2:*

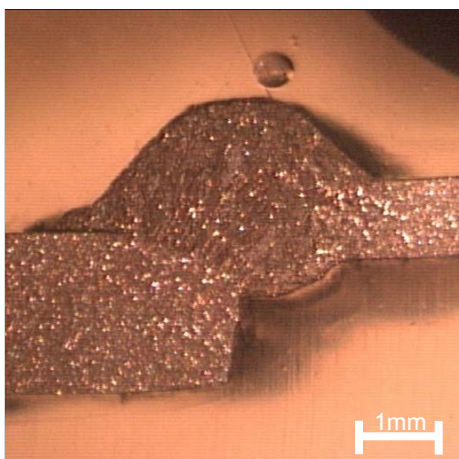


Características da soldadura

Largura do cordão	4,4 mm
Altura do cordão	0,9 mm
Penetração	1,7 mm
ZTA	1,4 mm

Observações: penetração excessiva.

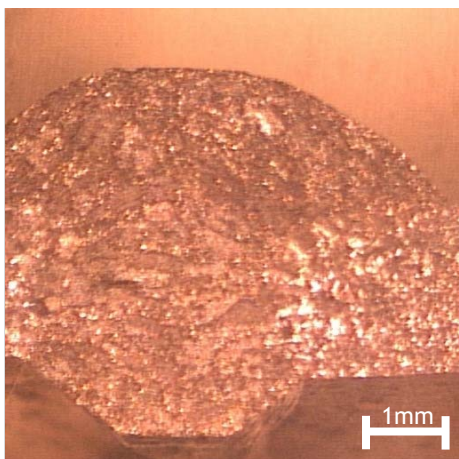
*Cordão de soldadura B3:*



Características da soldadura	1mm	2mm
Largura do cordão	1,7 mm	2,2 mm
Altura do cordão	1,1 mm	1,6 mm
Penetração	1,0 mm	0,8 mm
ZTA	1,4 mm	0,9 mm

Observações: desalinhamento lateral das chapas soldadas, penetração quase inexistente no material de maior espessura e falta de fusão que proporcionou o surgimento de uma linha de fractura.

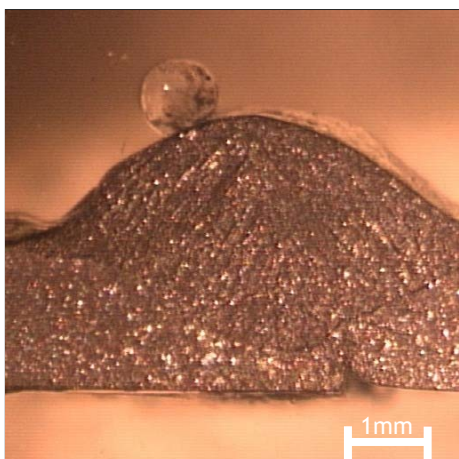
*Cordão de soldadura B4:*



Características da soldadura	
Largura do cordão	6,7 mm
Altura do cordão	1,7 mm
Penetração	2,9 mm
ZTA	2,4 mm

Observações: penetração excessiva.

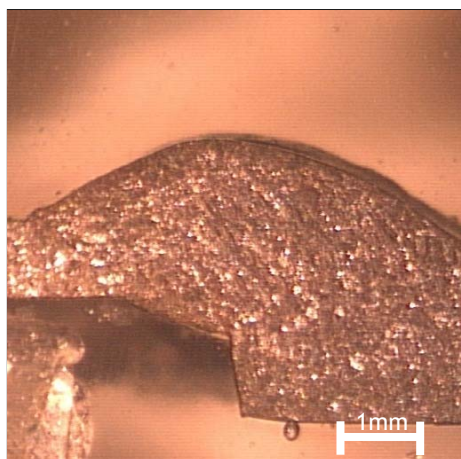
*Cordão de soldadura B5:*



Características da soldadura	
Largura do cordão	5,8 mm
Altura do cordão	1,6 mm
Penetração	1,4 mm
ZTA	1,8 mm

Observações: penetração incompleta, escorrimento lateral, presença de fissuras na zona de fusão.

*Cordão de soldadura B6:*



Características da soldadura	1mm	2mm
Largura do cordão	2,6 mm	3,7 mm
Altura do cordão	1,0 mm	1,6 mm
Penetração	1,0 mm	0,9 mm
ZTA	2,3 mm	3,1 mm

Observações: desalinhamento lateral das chapas soldadas, penetração parcial no material de maior espessura.

*Cordão de soldadura B7:*

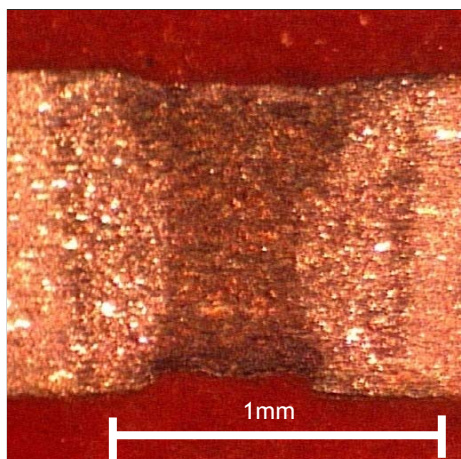


Características da soldadura

Largura do cordão	4,5 mm
Altura do cordão	1,4 mm
Penetração	2,6 mm
ZTA	2,7 mm

Observações: desalinhamento lateral, excesso de penetração.

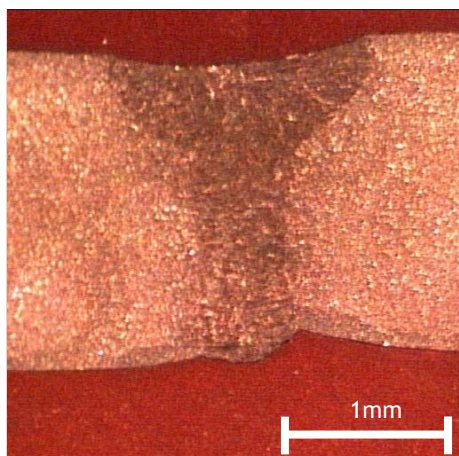
*Cordão de soldadura B8:*



Características da soldadura

Largura do cordão	0,8 mm
Altura do cordão	–
Penetração	0,9 mm
ZTA	0,3 mm

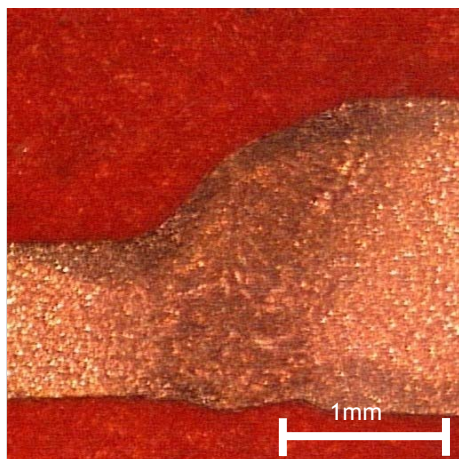
Observações: penetração parcial, identificação de pequenos salpicos.

*Cordão de soldadura B9:*

Características da soldadura

Largura do cordão	1,5 mm
Altura do cordão	–
Penetração	1,8 mm
ZTA	0,6 mm

Observações: ligeiro desalinhamento lateral e identificação de salpicos.

*Cordão de soldadura B10:*

Características da soldadura	1mm	2mm
Largura do cordão	1,3	
Altura do cordão	–	–
Penetração	1,0	2,0
ZTA	0,3	0,3

Observações: identificação de salpicos.

A maioria dos defeitos identificados nas ligações do tipo B é idêntica às apresentadas pelas ligações do tipo A, como é o caso do desalinhamento lateral e angular e da falta ou excesso de penetração, que poderá ser corrigida com modificações na corrente ou velocidade de soldadura utilizadas. No cordão de soldadura B5 observa-se algum escorrimento lateral que poderá ter ocorrido devido a um mau posicionamento das chapas a soldar ou do eléctrodo.

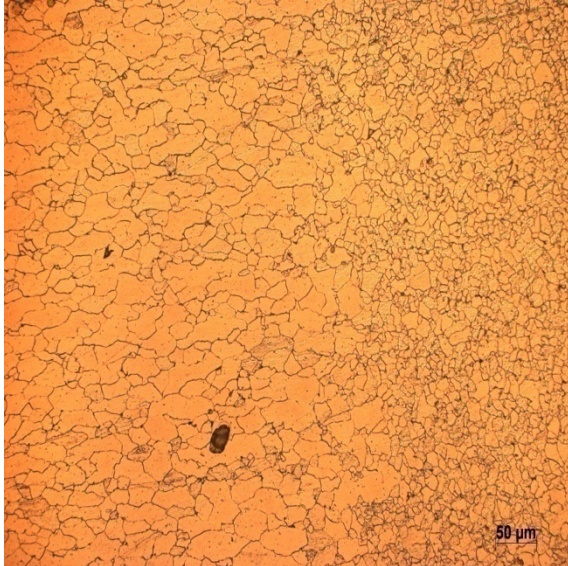
A observação de fissuras na zona de fusão de alguns cordões, poderá dever-se principalmente a algum excesso da exposição dos mesmos à corrosão aplicada pelo reagente de contrastação [4,23].

Nas ligações efectuadas por soldadura laser observa-se a presença de uma quantidade apreciável de salpicos de reduzidas dimensões, possivelmente provenientes de um mau controlo da velocidade a que a soldadura foi realizada [4,23].

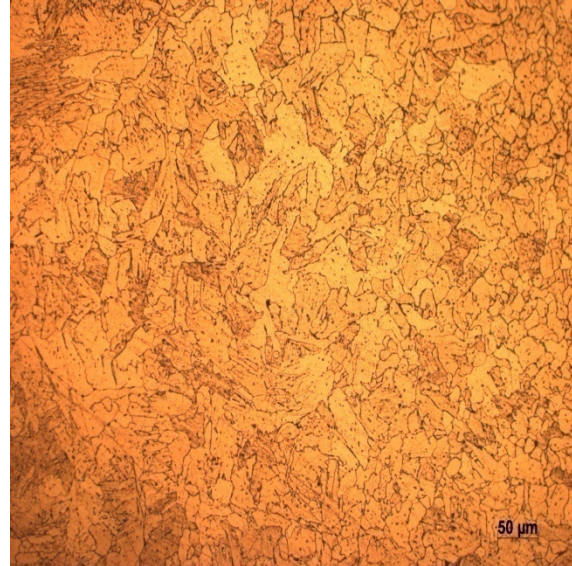
## 8.2 Micrografias

### 8.2.1 Ligações do tipo B

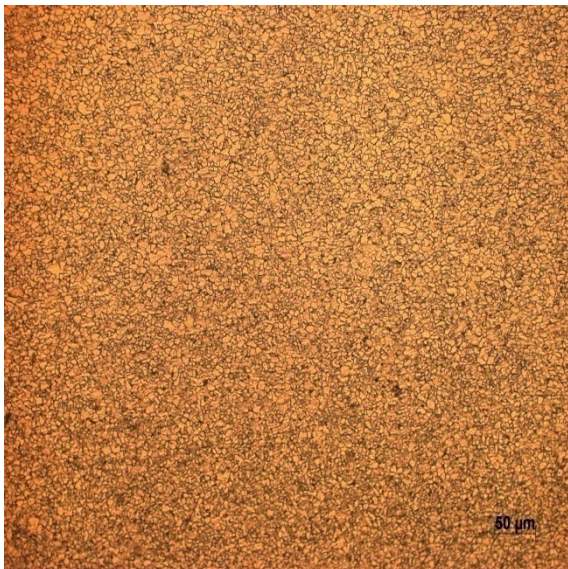
As seguintes fotomicrografias mostram a microestrutura de cada um dos materiais de base utilizados nas ligações do tipo B e respectivas zonas termicamente afectadas, formadas aquando da união por processos de soldadura GMAW.



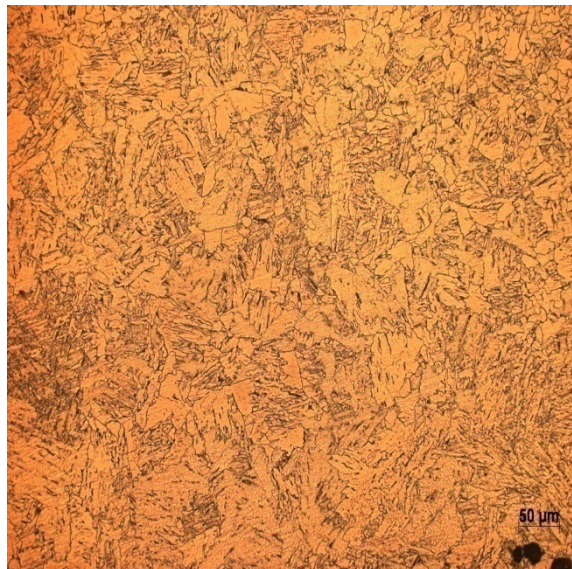
*Figura 35 - MB e ZTAp do aço DC 04 soldado por processos GMAW. Nital 2%.*



*Figura 36 - ZTA do aço DC 04 soldado por processos GMAW. Nital 2%.*



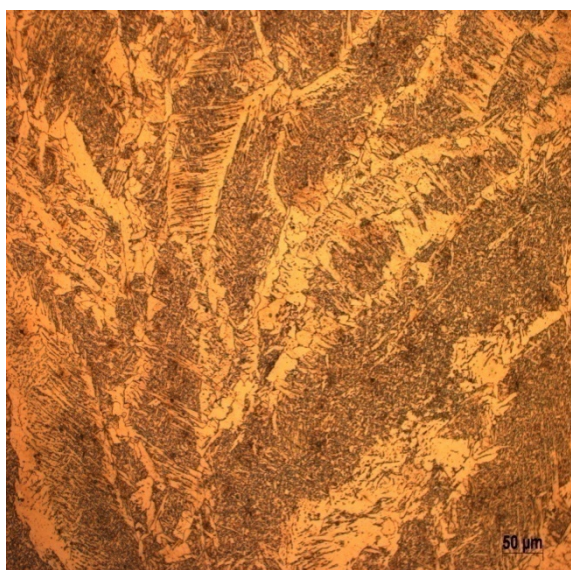
*Figura 37 - MB do aço QSTE 340. Nital 2%.*



*Figura 38 - ZTA do aço QSTE 340 soldado por processos GMAW. Nital 2%.*

A estrutura inicial apresentada pelos aços utilizados para este tipo de ligações, é uma estrutura típica de aços hipoeutectóides, cujo teor em carbono não ultrapassa os 0,1%, ou

seja, trata-se de uma estrutura quase inteiramente ferrítica, formada por grãos de ferrite onde se encontram dispersas pequenas “ilhas” de perlite. O tamanho de grão evidenciado, mostra o tratamento mecânico previamente aplicado a estes materiais. O aço DC 04 apresenta uma estrutura de grão alongada, típica dos aços deformados a frio, enquanto o aço QSTE 340 apresenta uma estrutura de grão bastante refinada, típica da recristalização ocorrida durante o processo de deformação a quente. As zonas termicamente afectadas (ZTA) apresentadas por estes materiais mostram a coexistência de ferrite e perlite, e um crescimento de grão bastante acentuado devido a terem sido atingidas naquelas zonas, temperaturas bastante superiores à temperatura de recristalização. No aço DC 04 é visível ainda a existência de uma segunda zona termicamente afectada (ZTAp), esta zona apresenta uma estrutura de grãos ferríticos idêntica ao material de base, com a particularidade de a temperatura a que essa zona esteve sujeita promover a recristalização a baixa temperatura da fase  $\alpha$  deformada. As figuras 39 e 40 mostram a microestrutura apresentada na zona do cordão de soldadura efectuado por processos GMAW. Estas apresentam uma estrutura coalescida de grãos perlíticos envoltos em ferrite proeutectóide, em algumas zonas identifica-se ainda a existência de uma pequena quantidade de pequenos grãos ferríticos [2,20,25,26].



*Figura 39 - Zona de fusão do aço DC 04 soldado por processos GMAW. Nital 2%.*



*Figura 40 - Zona de fusão do aço QSTE 340 soldado por processos GMAW. Nital 2%.*

As figuras 41 e 42 apresentam as microestruturas evidenciadas pelos cordões de soldadura e zonas termicamente afectadas, das ligações realizadas por soldadura laser. Os valores de

dureza obtidos nos ensaios realizados a estes cordões de soldadura, evidenciaram a possível presença de bainite superior e martensite [27].



*Figura 41 - Zona de fusão e ZTA do aço DC 04 soldado por Fibre Laser. Nital 2%.*



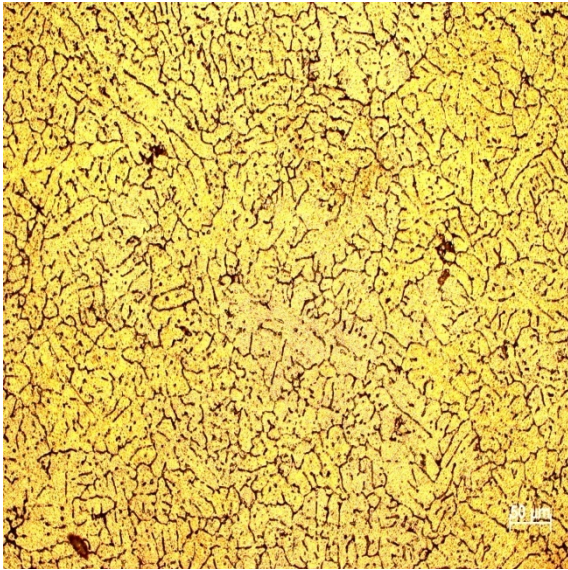
*Figura 42 - Zona de fusão do aço QSTE 340 soldado por Fibre Laser. Nital 2%.*

### 8.2.2 Ligações do tipo A

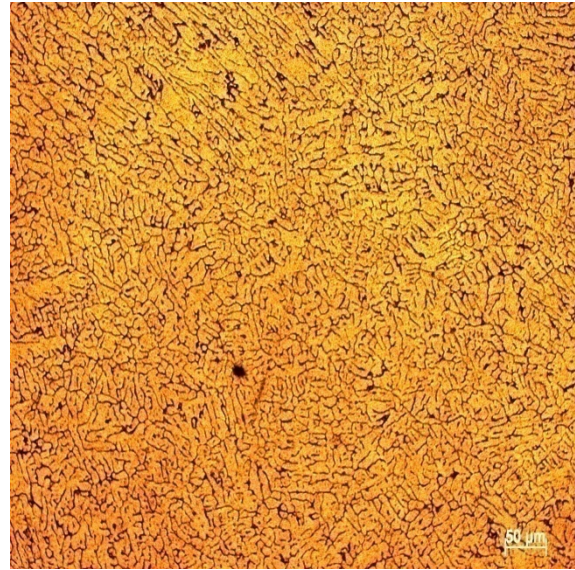
As microestruturas geralmente apresentadas pelos cordões de soldadura realizados em alumínio não apresentam grandes modificações em relação à estrutura inicial, isto devido, principalmente, aos rápidos ciclos térmicos que caracterizam os processos de ligação por soldadura [20].

As figuras 43 a 46 apresentam as zonas de fusão e o início das zonas termicamente afectadas, conseguidas a partir da observação em microscopia óptica das ligações de tipo A, realizadas por soldadura GMAW. Não foi possível, no entanto, comparar estas zonas com as estruturas inicialmente apresentadas pelas ligas de alumínio utilizadas, devido a limitações nas técnicas metalográficas existentes, como por exemplo, a falta de microscópio com luz polarizada. O principal interesse recaiu, portanto, na realização de ataques químicos que evidenciassem as diferenças no tamanho de grão existentes.

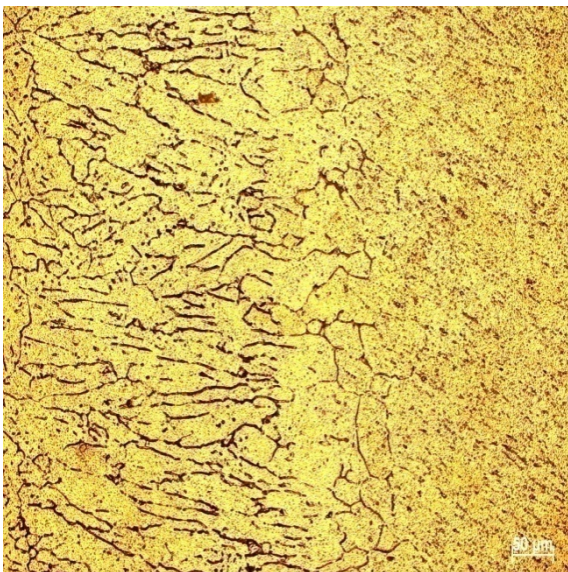
As micrografias mostram um crescimento colunar de grão na zona de fusão, com este a alongar-se pela zona termicamente afectada. A extensão da zona termicamente afectada e a possível existência de zonas recristalizadas mais próximas da zona não afectada, não conseguiram ser observadas, uma vez que apenas o material de adição conseguiu ser correctamente atacado e visualizado [2].



*Figura 43 - Zona de fusão da liga de alumínio EN AW 5052 ligada por soldadura GMAW. Reagente de Keller.*



*Figura 44 - Zona de fusão da liga de alumínio EN AW 1050A ligada por soldadura GMAW. Reagente de Keller.*



*Figura 45 - Zona de fusão e ZTA da liga de alumínio EN AW 1050 ligada por soldadura GMAW. Reagente de Keller.*







*Figura 46 - Zona de fusão e ZTA da liga de alumínio EN AW 5052 ligada por soldadura GMAW. Reagente de Keller.*








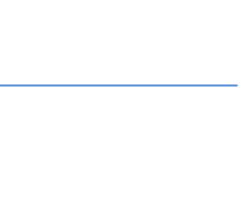
As ligações efectuadas com recurso a tecnologia de soldadura laser não foram observadas, uma vez que não se conseguiu visualizar as ligas de base e esta técnica não utiliza material de adição para a ligação.








### 8.3 Ensaio de tracção

Os resultados obtidos pelos ensaios de tracção efectuados serão apresentados de acordo com o relatório de ensaio presente no anexo A da norma NP EN 895-2002. Os provetes serão designados com a mesma nomenclatura utilizada para descrever a ligação efectuada, acrescido do número do provete ensaiado (ex: A1\_1 - provete 1 da ligação A1). A tabela 11 apresenta as principais informações recolhidas dos ensaios de tracção realizados. Nos provetes referentes às ligações em que são utilizados materiais de espessuras diferentes, as dimensões apresentadas (a - espessura, b - largura) são referentes ao material de menor espessura, devido à forte probabilidade da rotura ocorrer nesse lado do provete [22]. Na secção de observações são apresentadas as imagens das roturas de cada tipo de ligações.

Tabela 11: Resultados dos ensaios de tracção efectuados aos cordões fornecidos [22].

Provetes	Dimensões		F. máx (KN)	Rm (MPa)	Localização da rotura	Observações
	Alumínio	a (mm)				
A1_1	2,99	20,21	3,78	63	Cordão	
A1_2	2,99	20,21	3,89	64	Cordão	
A2_1	2,96	20,06	4,82	81	ZTA	
A2_2	2,98	20,15	4,82	80	ZTA	
A3_1	2,98	20,03	4,52	76	ZTA	
A3_2	3,02	20,11	4,68	77	ZTA	
A4_1	2,99	20,18	4,40	73	ZTA	
A4_2	2,97	20,17	5,15	86	ZTA	
A4_3	2,96	20,09	4,71	79	ZTA	

A5_2	1,01	20,04	2,78	96	Cordão/Zona de fusão	
A5_3	0,98	19,85	2,24	115	Cordão/Zona de fusão	
A6_2	1,00	20,10	3,02	150	ZTA/Zona de fusão	
A6_4	1,00	20,00	3,12	156	ZTA/Zona de fusão	
A7_1	1,00	19,95	3,14	157	ZTA/Zona de fusão	
A7_2	1,00	19,90	3,09	155	ZTA/Zona de fusão	
A7_4	1,00	20,05	3,18	159	ZTA/Zona de fusão	
A8_1	1,00	6,01	0,72	120	Cordão	
A8_2	1,00	5,99	0,89	150	Cordão	
Aço						
B1_1	1,00	20,00	6,02	301	Material de base	
B1_2	1,00	19,95	6,23	312	Material de base	
B2_1	1,00	19,90	6,08	306	Material de base	
B2_2	1,00	19,90	5,81	292	Material de base	
B3_1	1,01	19,90	5,99	298	Material de base	
B3_2	1,01	19,95	5,9	295	Material de base	

B4_1	2,03	20,03	17,96	442	Material de base	
B4_2	2,02	19,97	17,92	444	Material de base	
B5_1	2,03	20,03	14,11	347	Material de base	
B5_2	2,05	20,01	14,21	346	Material de base	
B6_1	1,02	20,03	5,69	279	Material de base	
B6_3	1,08	20,05	5,94	274	Material de base	
B6_4	1,04	20,04	6,05	290	Material de base	
B7_1	1,98	19,91	14,03	356	Material de base	
B7_2	2,03	19,98	14,56	359	Material de base	
B8_1	1,01	5,98	2,00	331	Material de base	
B8_2	1,04	5,97	2,07	333	Material de base	
B9_1	2,00	6,01	5,73	477	Material de base	
B9_2	1,98	6,00	5,87	499	Material de base	
B10_1	1,00	6,04	2,04	338	Material de base	
B10_2	1,01	6,03	2,34	384	Material de base	

Os ensaios de tracção realizados aos provetes das ligações tipo A mostraram, uma vez mais, a escolha imprópria de metal de adição. Os provetes da ligação A1 já se encontravam

fissurados, à partida, na zona do cordão de soldadura, como se pode observar na respectiva macrografia, fracturando pelo cordão de soldadura a um valor resistência à ruptura bastante inferior ao apresentado normalmente para o material de base. De facto, o material de adição contém um valor de tensão de ruptura inferior (75 MPa) aos materiais de base seleccionados (EN AW 1050A - 90 a 100 MPa; EN AW 5052 - 210 a 225 MPa), este factor resultou numa perda de propriedades da ligação na zona do cordão e na zona termicamente afectada, como se verifica pelos valores de RM apresentados e pelas respectivas zonas em que a ruptura aconteceu. Quanto maior a diferença de tensão de ruptura entre o material de base e o material de adição, mais junto ao cordão ocorreu a ruptura da ligação. A ligação efectuada por soldadura laser, embora não utilize material de adição, apresentava falta de penetração em uma das extremidades da ligação, o que pode ter contribuído para a sua ruptura pelo cordão efectuado. Mecanicamente as ligações tipo A não correspondem às exigências solicitadas a uma ligação por soldadura, sendo necessário corrigir principalmente o material de adição utilizado, de forma a garantir a resistência mecânica necessária para as solicitações a que estes materiais irão estar sujeitos futuramente.

Nas ligações do tipo B, foi utilizado um material de adição com tensão de ruptura superior (560 MPa) à apresentada pelos materiais de base (QSTE 340 - 420 a 540; DC 04 - 270 a 350), dando origem a ligações mais resistentes que o material de base envolvido, como se pode verificar pelo local onde ocorreram todas as rupturas.

## 8.4 Microdurezas

### 8.4.1 Microdurezas das ligações Tipo B

#### 8.4.1.1 Ligações DC 04 - DC 04 por processos GMAW

Ao longo da realização dos ensaios de microdurezas aos cordões de soldadura fornecidos, não pode ser utilizado um padrão de ensaio comum a todos os cordões devido às várias ligações diferentes efectuadas. Como tal, serão descritos separadamente os valores de microdurezas das diferentes ligações, bem como o procedimento de ensaio realizado. A figura 47 apresenta os valores das microdurezas observados para os cordões de soldadura efectuados para ligar o Aço DC 04 entre si, recorrendo aos processos de soldadura GMAW. Para este tipo de ligações foram efectuadas medições em 3 locais diferentes de cada zona da ligação descritas na secção 7.2.5.

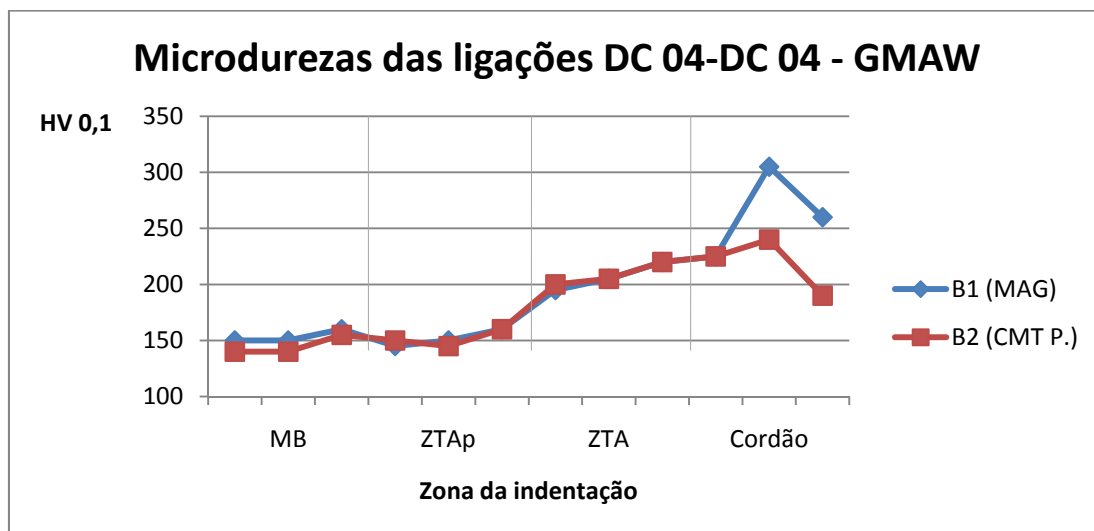


Figura 47 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas à soldadura GMAW do aço DC 04.

As microdurezas obtidas dão conta da existência de um aumento da dureza na zona termicamente afectada, excepto na zona termicamente afectada onde a recristalização ocorreu sem crescimento de grão, onde a dureza registada foi igual ou inferior à apresentada pelo material de base. O máximo de dureza é obtido na zona de fusão, podendo ainda observar-se um maior endurecimento obtido através da soldadura MAG.

#### 8.4.1.2 Ligações DC 04 - DC 04 por soldadura Laser

O facto de neste tipo de soldaduras não ser perceptível a existência de duas zonas termicamente afectadas diferentes (ZTA e ZTAp), como acontece com as microestruturas evidenciadas pelas soldaduras GMAW deste tipo de materiais, fez com que se torne necessária a apresentação separada das suas microdurezas. A figura 48 apresenta-nos os valores de microdurezas obtidos para este tipo de ligações pelo processo de soldadura Fibre laser. Nesta ligação foram realizadas três indentações em cada uma das zonas de soldadura apresentadas.

A análise às durezas apresentadas pela soldadura laser do aço DC 04, segue o mesmo padrão das obtidas anteriormente com processos de soldadura GMAW, exceptuando o facto de o endurecimento observado ser maior para este tipo de ligação.

A dureza obtida na zona de fusão (à volta de 360 HV), mostra a possível existência de bainite superior nos cordões de soldadura efectuados por soldadura laser [27].

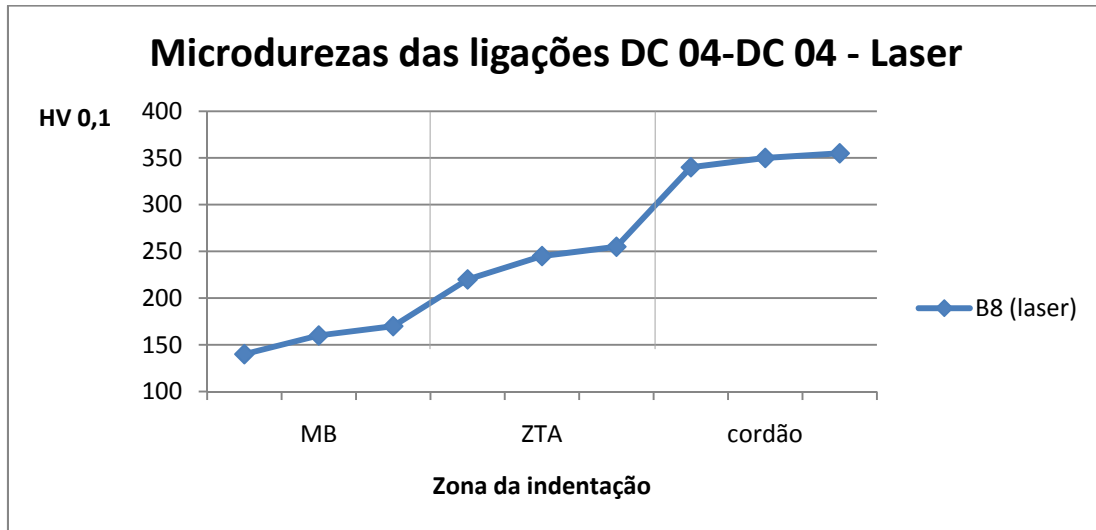


Figura 48 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas à soldadura Laser do aço DC 04.

#### 8.4.1.3 Ligações QSTE 340 - QSTE 340

Ao contrário do que acontece com o Aço DC 04, o aço QSTE 340 apenas apresenta um tipo de zona termicamente afectada, quer tenha sido ligado pelos processos de soldadura GMAW, quer tenha sido por soldadura Laser. Esta homogeneidade de zonas estruturais permitiu a apresentação conjunta dos valores de dureza observados em todos os cordões de soldadura realizados para este tipo de ligações. Mais uma vez foram realizadas três indentações em cada zona de soldadura, e os valores retirados das microdurezas efectuadas encontram-se apresentados na figura 49.

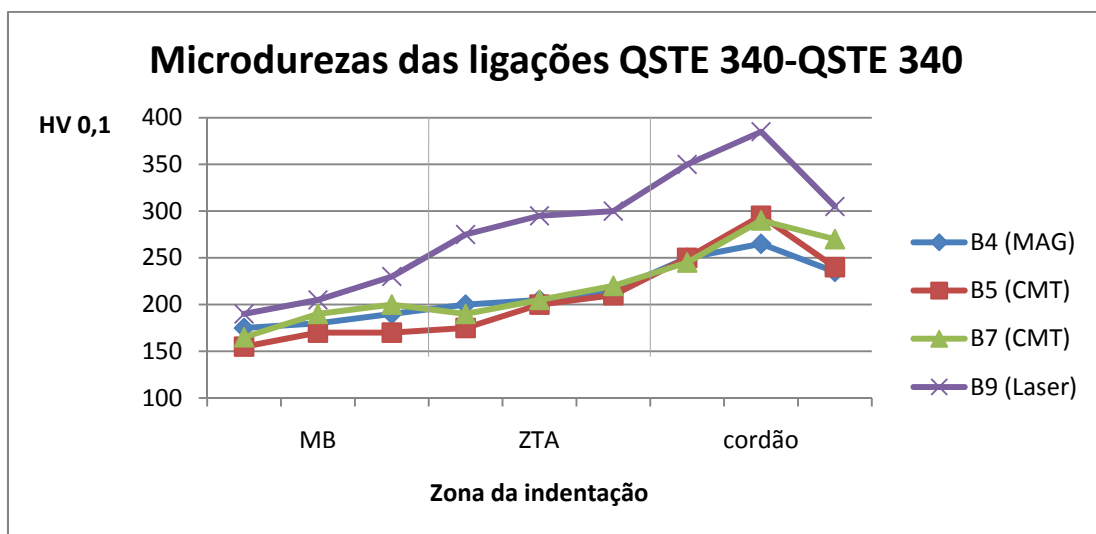


Figura 49 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas às soldaduras efectuadas ao aço QSTE 340.

As durezas registadas para as diferentes ligações do aço QSTE 340 confirmam a anterior tendência de aumento de dureza na zona termicamente afectada, atingindo um máximo nas zonas próximas ao centro do cordão de soldadura. Uma vez mais se nota o maior poder endurecedor dos processos laser, com a dureza a atingir valores perto dos 380 HV. No entanto, e ao contrário do que se observou nas ligações do aço DC 04, aqui foram as ligações CMT a endurecer mais que a soldadura MAG.

#### 8.4.1.4 Ligações DC 04 - QSTE 340 por processos GMAW

A figura 50 apresenta-nos as microdurezas efectuadas na ligação do aço DC 04 ao aço QSTE 340 por processos de soldadura GMAW. Neste tipo de ligações foram efectuadas duas indentações na zona não afectada pelo calor do aço DC 04 e do aço QSTE 340, designadas por MB1 e MB2 respectivamente, e em cada uma das zonas dos respectivos materiais afectadas pelo calor (ZTA1 e ZTA2). Para além destas, foram ainda realizadas duas indentações na zona termicamente afectada secundária do aço DC 04 (ZTAp) e três indentações no cordão de soldadura efectuado.

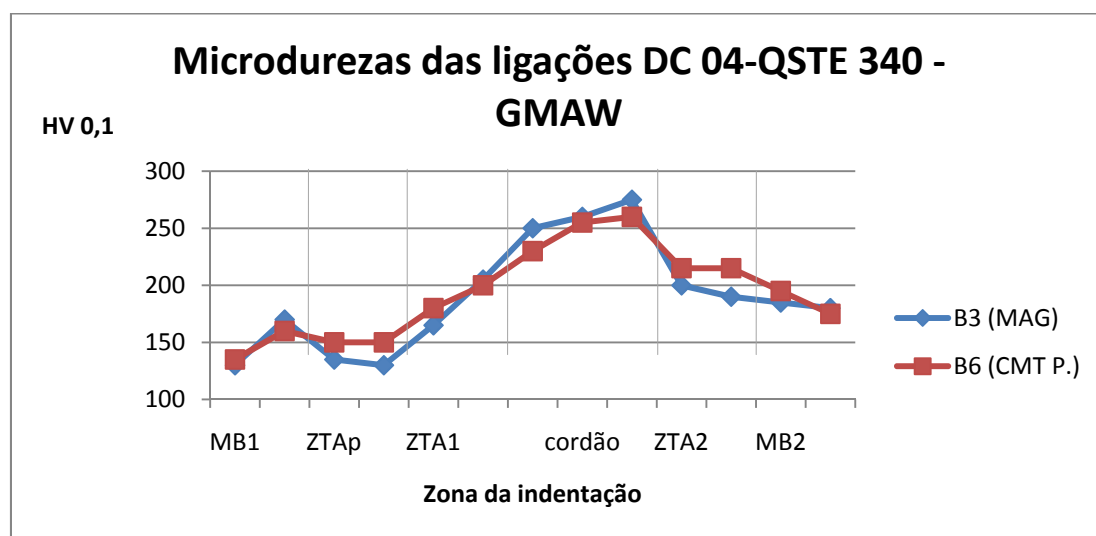


Figura 50 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas às ligações do aço DC 04 com o aço QSTE 340 por processos de soldadura GMAW.

Os valores observados mostram-se de acordo com os anteriormente relatados, com a particularidade de se observar uma maior perda de dureza na zona ZTAp criada por soldadura CMT.

#### 8.4.1.5 Ligações DC 04 - QSTE 340 por soldadura Laser

Uma vez mais, devido ao não aparecimento de uma segunda zona termicamente afectada na estrutura do aço DC 04 soldado por soldadura laser, o valor das durezas obtidas será

apresentado à parte. O procedimento adoptado para a realização das microdurezas nesta ligação foi bastante idêntico ao utilizado anteriormente, exceptuando o facto de não existirem indentações na zona ZTAp, devido a não ser visível a sua existência. A figura 51 apresenta os valores de dureza obtidos para cada uma das diferentes indentações efectuadas neste tipo de ligações.

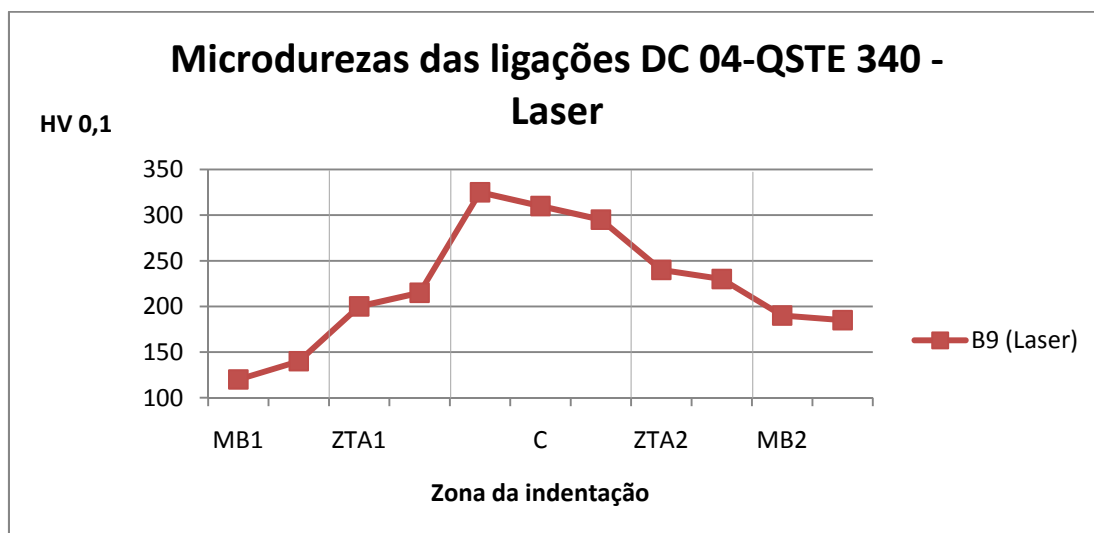


Figura 51 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas à ligação do aço DC 04 com o aço QSTE 340 por soldadura laser.

#### 8.4.2 Microdurezas das ligações Tipo A

##### 8.4.2.1 Ligações EN AW 1050A - EN AW 1050A

As microdurezas efectuadas nos cordões de soldadura realizados para ligar entre si a liga de alumínio EN AW 1050A, foram realizadas em três zonas distintas da soldadura; material de base, zona termicamente afectada microscopicamente visível e cordão de soldadura. Os valores de dureza obtidos através da realização de três indentações em cada zona encontram-se apresentados na figura 52.

As durezas observadas para as ligações da liga de alumínio 1050A não mostraram grande aumento provocado pelos processos de soldadura. As durezas variam entre 25 a 60 HV, com as durezas máximas a serem observadas na zona termicamente afectada. No entanto, e visto a deficiente identificação microestrutural das diferentes zonas deste tipo de ligações, as indentações realizadas na zona termicamente afectada foram aplicadas em zonas bastante perto do cordão de soldadura. Neste tipo de ligações, a soldadura CMT mostrou ser a menos endurecedora das técnicas utilizadas.

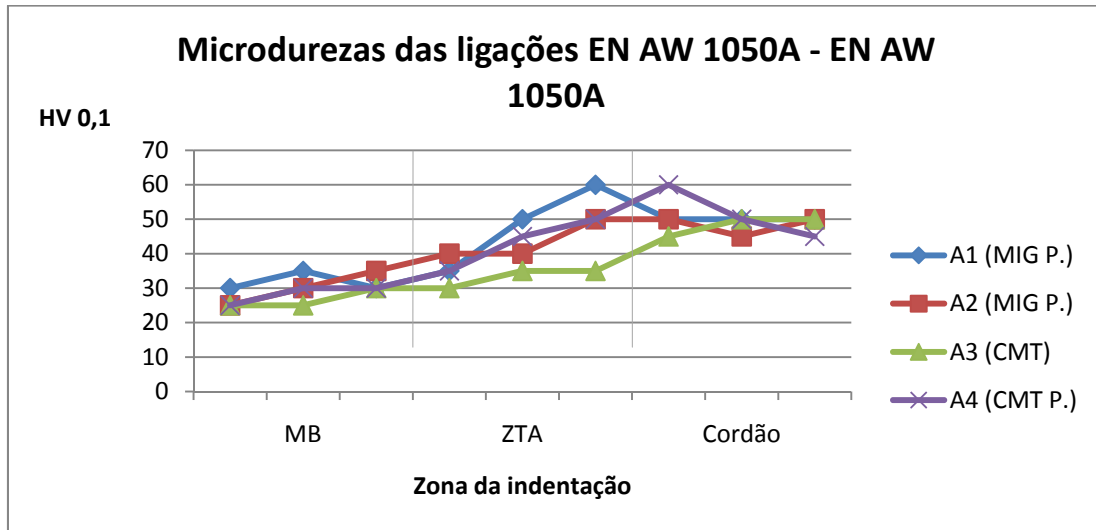


Figura 52 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas às soldaduras da liga de alumínio EN AW 1050A.

#### 8.4.2.2 Ligações EN AW 5052 - EN AW 5052

A figura 53 apresenta-nos os valores obtidos para as microdurezas efectuadas aos diferentes cordões de soldadura realizados para ligar entre si a liga de alumínio EN AW 5052. O procedimento utilizado para estes ensaios foi o mesmo utilizado para as ligações anteriormente descritas, tendo sido realizadas três indentações em cada uma das distintas zonas das soldaduras efectuadas.

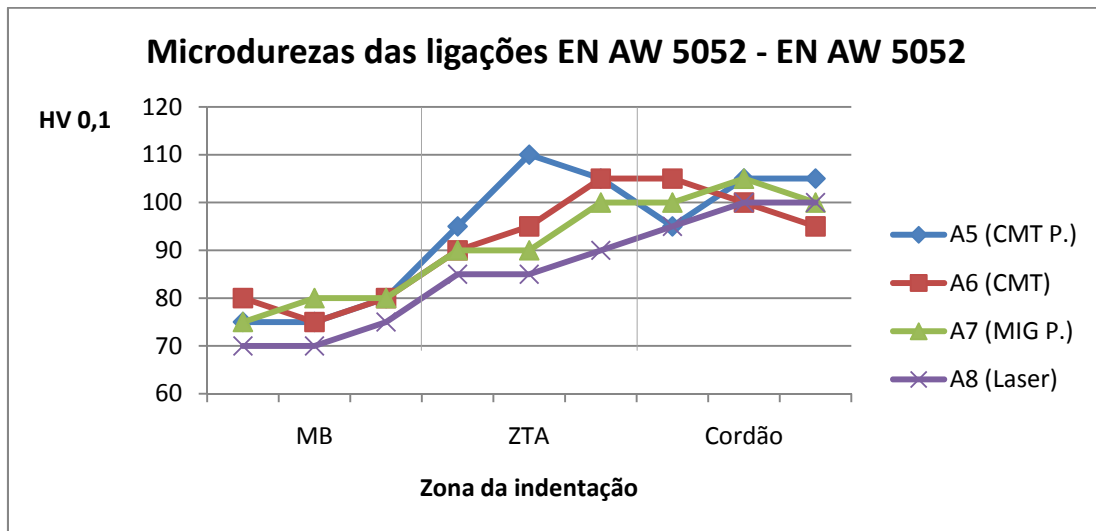


Figura 53 - Gráfico representativo das microdurezas efectuadas às soldaduras da liga de alumínio EN AW 5052.

Uma vez mais, não se observaram alterações muito elevadas dos valores de dureza, tal como já foi discutido anteriormente para as ligas EN AW 1050A. Nas ligações de alumínio a soldadura laser mostrou ser a menos endurecedora.


### 8.5 Comparação Económica

Ao escolher entre a utilização dos diferentes processos de soldadura apresentados, importa não só conhecer a resposta dada pelas diferentes soldaduras efectuadas, mas também o investimento inerente à implementação industrial dos diferentes processos. Nesse sentido, a tabela 12 pretende apresentar de uma forma geral e meramente comparativa os diversos factores a ter em conta no estudo de rentabilidade de cada um dos processos de soldadura utilizados na realização deste trabalho.

*Tabela 12: Comparação económica entre os processos de soldadura MIG/MAG, CMT e Fibre Laser.*

Processo	Custo do equipamento	Utilização de consumíveis	Velocidade de soldadura	Produtividade	Formação de operadores
MIG/MAG	Baixo	Gás de protecção e material de adição.	Média	Média	Normal
CMT	Médio	Gás de protecção e material de adição.	Média Alta	Média	Normal
Fibre Laser	Alto	Gás de protecção.	Elevada	Alta	Alta

Legenda:

Bom	
Mediano	
Mau	

## 9 Conclusões

A realização deste trabalho possibilitou a obtenção das seguintes conclusões:

- Os dados fornecidos sobre os cordões de soldadura GMAW mostraram-se insuficientes para uma melhor comparação entre o processo de soldadura MIG/MAG e o processo CMT. Dados como a intensidade de corrente de soldadura e tensão do arco estabelecido seriam úteis para estimar a entrega térmica fornecida a cada cordão de soldadura realizado, relacionando-a com as propriedades posteriormente apresentadas.
- As soldaduras GMAW efectuadas não revelaram grandes diferenças no que respeita a velocidades de soldadura e consumos de metal de adição, pese embora o processo CMT evidencie em alguns casos uma maior velocidade de soldadura comparativamente ao processo MIG, como é o caso das ligações da liga EN AW 5052 entre si. No entanto, tal facto poderá ter sido influenciado por erro humano intrínseco à realização de soldaduras semi-automáticas.
- O processo Laser mostrou, em qualquer dos casos, velocidades de soldadura extremamente mais elevadas que os processos GMAW. Embora seja conhecida a supremacia da soldadura laser em termos de velocidades de soldadura conseguidas, o facto de ter sido o único processo efectuado de forma completamente automática terá contribuído para a elevada diferença observada.
- No que respeita ao gás de protecção utilizado nos processos GMAW, os cordões efectuados mostraram a possibilidade de utilização de 100% CO<sub>2</sub> na soldadura CMT de aço, sem que se observem salpicos ao longo do cordão de soldadura. Tal facto acarreta diversas vantagens, uma vez que a utilização sozinha de dióxido de carbono como gás de protecção dá origem a maiores valores de tensão no arco eléctrico estabelecido, possibilitando a utilização de elevadas velocidades de soldadura. Em soldadura MAG a utilização de 100% CO<sub>2</sub> não é aconselhada devido à elevada densidade de salpicos produzida pela instabilidade que se cria no arco eléctrico estabelecido.
- As macrografias efectuadas mostraram-se uma ferramenta importante na identificação de possíveis defeitos de soldadura presentes nos cordões fornecidos. As principais discontinuidades observadas foram: desalinhamento lateral e angular, porosidades de diversos tamanhos, fissuras, escorrimento lateral e pequenos salpicos nos cordões provenientes de soldadura laser.
- Identificou-se uma incorrecta escolha de material de adição para as ligações tipo A, sendo recomendável a futura utilização de ligas Al-Mg para este tipo de soldaduras.

- Mecanicamente as ligações tipo B mostraram-se bem concebidas, resistindo a cargas superiores às suportadas pelo material de base. As ligações tipo A apresentaram ruptura a cargas inferiores às suportadas pelo material de base, fracturando em zonas próximas ao cordão de soldadura, sendo que algumas apresentaram rupturas no próprio cordão de soldadura realizado.
- As microestruturas obtidas para as ligações do tipo B mostraram-se idênticas nas diferentes zonas das soldaduras efectuadas por processos GMAW. Alterações mais intensas foram observadas nos cordões realizados por soldadura laser.
- As durezas efectuadas mostram a possível existência de banite superior e pequenas quantidades de martensite nos cordões de soldadura realizados pelo processo Fibre Laser.
- As microdurezas efectuadas às ligações tipo B não mostraram grande diferença entre o endurecimento provocado por soldadura CMT e MAG, o que já não se verificou nas ligações tipo A em que o CMT foi claramente menos endurecedor que o processo MIG.
- O processo de soldadura Fibre Laser mostrou-se bastante endurecedor no que respeita a soldadura de aço, e pouco endurecedor em soldadura de alumínio.

## 10 Bibliografia

[1] [www.sodecia.com](http://www.sodecia.com) (acedido a 23 de Junho de 2009).

[2] Dias Lopes, E. M.; Miranda, R. M.; Metalurgia Da Soldadura; ISQ - Edições técnicas do Instituto de soldadura e qualidade; 1993.

[3] Lima, A. A.; Cunha, A. P.; Tecnologia de Soldadura; A. Jorge Lima,Lda. 2004.

[4] ASM Metals HandBook Volume 6 - Welding, Brazing, and Soldering; 1993

[5] Zeemann, A.; Emygdio, P. R. O.; Básico De Soldagem; Tecmetal; Abril 2001.

[6] Ikeagu, C. R.; Evaluating the effect of different welding processes on the distortion of 4mm thick DH38 ship panels; Cranfield University; MSC Thesis; September 2007.

[7] Dias, J. R.; Terminologia da soldadura em português europeu; Confluências; Maio 2005; pp. 112 - 148.

[8] Figueiredo, K. M.; Tecnologia da Soldagem; Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão; São Luís; 2005.

- [9] Oliveira Santos, J. F.; Quintino, L.; Processos de soldadura; ISQ - Edições técnicas do instituto de soldadura e qualidade; 1993.
- [10] Fronius; CMT: Cold Metal Transfer; Brochure; 2004.
- [11] Rosado, T.; Almeida, P.; Pires, I.; Miranda, R.; Quintino, L.; Innovations in arc welding; 5º congresso Luso-Moçambicano de Engenharia; Maputo; 2-4 Setembro 2008.
- [12] Costa, S. C.; Ribeiro, L. G.; Optimização dos parâmetros de pulso de um processo de soldagem MIG através de análise fatorial em dois níveis; Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção.
- [13] Pickin, C. G.; Young, K.; Evaluating of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy; Science and Technology of Welding and Joining; 2006; Vol. 11; nº 5; pg: 583 - 585.
- [14] Gimenez, L.; Ramalho, F.P.; Soldagem Laser; Infosolda.
- [15] Hamill, J. A.; Wirth, P.; Laser Welding P/M For Automotive Applications; SAE International Congress and Exposition; 28 Fevereiro - 3 Março; 1994; Detroit; Michigan; USA.
- [16] Catálogo CSN - Companhia Siderúrgica Nacional; Laminados a quente.
- [17] Catálogo Rautaruukki Corporation; Cold rolled steel sheets and coils. Formable Steels; 2007.
- [18] [www.aluminium.matter.org.uk](http://www.aluminium.matter.org.uk) (acedido a 27 de maio de 2009).
- [19] ESAB - Catálogo geral de produtos.
- [20] ASM Metals Handbook volume 9 - Metallography and Microstructures; 1985.
- [21] Davim, J. P.; Magalhães, A. G.; Ensaio Mecânicos e Tecnológicos; Julho 2004; Publindústria - Edições Técnicas; 2004.
- [22] NP EN 895 - 2002 - Ensaio destrutivos das soldaduras em material metálico. Ensaio de tracção transversal.
- [23] Drapinski, J.; Elementos de soldagem: Manual prático de oficina; McGraw-Hill; Brasil 1979.
- [24] Mathers, G.; The welding of aluminium and its alloys; CRC; 2002.

[25] AWS Welding Handbook volume 4 - Metals and their Weldability; 1972.

[26] Cardozo, F. I. B.; Previsão da dureza em junta soldada de um aço ASTM A516 grau 60 sujeito à corrosão sob tensão com H<sub>2</sub>S; Universidade Federal de Pernambuco; Dissertação de mestrado; Fevereiro 2003.

[27] Krauss, G.; Steels: heat treatment and processing principles; ASM International; 1990.