



Flávio Silva    **Soldadura Robotizada com  
Tecnologia CMT**

Dissertação de Mestrado  
em Engenharia de Produção

Março 2015

# Resumo

A soldadura é um processo fundamental na indústria, permitindo união de diferentes componentes. Cada vez mais existe uma preocupação com a segurança e controlo de qualidade dos automóveis. Um dos parâmetros a penetração da soldadura é essencial para manter a integridade estrutural dos componentes soldados, para tal foram analisados alguns processos aplicados na indústria automóvel. Aprofundando os conhecimentos de soldadura expondo o seu desenvolvimento ao longo dos anos e caracterizando em pormenor a soldadura TIG, MIG/MAG e CMT, nomeadamente os seus princípios de funcionamento, parametrização, vantagens e desvantagens.

Foi efetuado ensaio experimental de modo a verificar as suas potencialidades e cumprimento dos requisitos necessários para soldadura de componentes a utilizar na indústria automóvel. Para tal foram efetuadas análises de macrográfica a cordões de soldadura com diferentes parâmetros, de modo a verificar a penetração da soldadura. Tendo sido também efetuada análise de micro durezas nas juntas soldadas.

**Palavras-chave:** Soldadura, TIG, MIG/MAG, Cold Metal Transfer, Defeitos de Soldadura, Indústria Automóvel, Penetração da Soldadura, Dureza

# Abstract

Welding is a critical process in the industry, allowing the joining of different components. Increasingly there is a concern for safety and quality control in the automotive industry. One of the parameters of the weld, its penetration is essential for maintaining the structural integrity of the welded components, for that matter will be analysed some processes applied in the automotive industry. It is was developed the welding knowledge exposing its development over the years and featuring in detail the TIG welding, MIG / MAG and CMT, including its principles of operation, parameterization, advantages and disadvantages.

It was performed experimental testing in order to verify their potential and fulfilment of the requirements for components welded to be applied in the automotive industry. For this analysis will was made a macrographic analysis to the weld beads with different parameters, in order to check penetration of the weld. Also was performed a micro hardness analysis to the welded joints.

**Key words:** Welding, TIG, MIG/MAG, Cold Metal Transfer, Weld Defects, Automotive Industry, Weld Penetration, Hardness

# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de Siglas e Acrónimos</b> .....	<b>ix</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Introdução e âmbito do trabalho</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
<b>Capítulo 2 - Soldadura</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. Evolução Histórica</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Processos de Soldadura</b> .....	<b>5</b>
<i>2.2.1. Tipos de Juntas</i> .....	<i>7</i>
<b>2.3. Soldadura TIG</b> .....	<b>9</b>
<i>2.3.1. Componentes</i> .....	<i>10</i>
<i>2.3.2. Modos de Transferência</i> .....	<i>11</i>
<b>2.4. Soldadura MIG/MAG</b> .....	<b>13</b>
<i>2.4.1. Componentes</i> .....	<i>14</i>
<i>2.4.2. Modos de Transferência</i> .....	<i>15</i>
<i>2.4.3. Parâmetros do Processo</i> .....	<i>16</i>
<i>2.4.3.1. Tensão, corrente e velocidade</i> .....	<i>16</i>
<i>2.4.3.2. Extensão do eléctrodo</i> .....	<i>17</i>
<i>2.4.3.3. Posição da tocha</i> .....	<i>18</i>
<i>2.4.3.4. Eléctrodo</i> .....	<i>19</i>
<i>2.4.3.5. Gases de Protecção</i> .....	<i>20</i>
<b>2.5. Soldadura CMT</b> .....	<b>23</b>
<i>2.5.1. Componentes</i> .....	<i>24</i>
<i>2.5.2. Modos de Transferência</i> .....	<i>25</i>
<i>2.5.2.1. CMT Advanced</i> .....	<i>26</i>
<i>2.5.2.2. CMT Pulse</i> .....	<i>27</i>
<i>2.5.2.3. CMT Advanced Pulse</i> .....	<i>27</i>
<i>2.5.3. Parâmetros do Processo</i> .....	<i>28</i>

2.5.3.1. Ignição .....	28
2.5.3.2. Arco Elétrico.....	28
2.5.3.3. Fim do Cordão.....	31
<b>2.6. Defeitos de Soldadura .....</b>	<b>32</b>
2.6.1. Porosidades .....	33
2.6.2. Inclusões .....	34
2.6.3. Falta de Fusão .....	35
2.6.4. Fendas.....	35
2.6.5. Defeitos de Forma .....	36
2.6.6. Falta de Penetração.....	37
<b>Capítulo 3 - Soldadura CMT Robotizada .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. Robots Industriais.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Ensaio Experimental .....</b>	<b>41</b>
3.2.1. Equipamentos.....	42
3.2.2. Parâmetros.....	43
3.2.3. Análise Macrográfica .....	44
3.2.3.1. Resultados.....	46
3.2.4. Análise de Dureza.....	50
3.2.4.1. Resultados.....	51
<b>Capítulo 4 - Conclusões .....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>57</b>
<b>Análise Macrográfica .....</b>	<b>57</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Evolução histórica dos processos de Soldadura [3].....	4
Figura 2.2 - Configurações básicas de juntas [4] .....	7
Figura 2.3 - Juntas usualmente utilizadas em soldadura [4] .....	8
Figura 2.4 – Perspetiva esquemática da soldadura TIG [5] .....	9
Figura 2.5 – Influência da polarização do elétrodo de soldadura TIG [7].....	11
Figura 2.6 – Taxa de deposição vs energia do arco, a quente e a frio [8].....	11
Figura 2.7 – Esquema de uma máquina de soldadura MIG/MAG [9].....	14
Figura 2.8 - Processo de soldadura MIG/MAG [9] .....	14
Figura 2.9 – Modos de transferência.....	15
Figura 2.10 – Influência da penetração vs corrente de soldadura [10].....	16
Figura 2.11 – Corrente vs velocidade de alimentação vs diâmetro [9].....	17
Figura 2.12 – Extensão do elétrodo [9] .....	17
Figura 2.13 – Influência da tocha na largura e penetração do cordão [11] .....	18
Figura 2.14 - Energia de dissociação e ionização dos gases [13].....	20
Figura 2.15 – Condutividade térmica dos gases [13] .....	21
Figura 2.16 – Formato do cordão e penetração com diferentes gases [9].....	21
Figura 2.17 – Movimento do fio CMT [16] .....	23
Figura 2.18 – CMT configuração automatizada [16] .....	24
Figura 2.19 - CMT configuração manual [16].....	24
Figura 2.20 - Transições elétricas de um ciclo CMT [15] .....	25
Figura 2.21 – Comparação dos diversos modos de transferência [18] .....	26
Figura 2.22 – Combinação CMT negativo e positivo [18].....	26
Figura 2.23 – Combinação ciclos CMT e pulsados [18] .....	27
Figura 2.24 - Ciclos pulsados no CMT [19] .....	27
Figura 2.25 – Combinação CMT negative e ciclos pulsados [18].....	27
Figura 2.26 - Parâmetros característicos do CMT [20].....	29
Figura 2.27 - Parâmetros característicos do CMT Pulse [20].....	30
Figura 2.28 – Acidente do navio Schenectady e da ponte em Hasselt [22] .....	32
Figura 2.29 – Defeitos de Soldadura.....	33
Figura 2.30 – Porosidades no interior da soldadura [23].....	34
Figura 2.31 – Inclusões de escória [23] .....	34
Figura 2.32 - Falta de fusão [23] .....	35

Figura 2.33 - Fendas [23].....	35
Figura 2.34 – Falta de penetração [23] .....	37
Figura 3.1 – Robot de manipulação ABB [27] .....	39
Figura 3.2 – Robot de soldadura Kuka [28].....	40
Figura 3.3 - Cordão de soldadura 3D.....	41
Figura 3.4 – ABB IRB 2600ID .....	42
Figura 3.5 – Fronius TPS 3200 CMT .....	42
Figura 3.6 - Fronius Robacta Drive CMT .....	42
Figura 3.7 – Amostra de soldadura .....	44
Figura 3.8 – Struers LaboPol-1 e Laboforce-3 .....	44
Figura 3.9 – Sistema de lixas MD .....	45
Figura 3.10 – StruersWelding Expert 5 .....	45
Figura 3.11 – Resultado Amostra #07.....	46
Figura 3.12 – Gráfico Penetração vs Corrente.....	47
Figura 3.13 - Gráfico Corrente vs Entrega Térmica .....	49
Figura 3.14 - Gráfico Penetração vs Entrega Térmica .....	49
Figura 3.15 - Shimadzu Micro Hardness Tester.....	50
Figura 3.16 – Indentação efetuada .....	50
Figura 3.17 – Zonas do cordão de soldadura.....	51
Figura 3.18 – Resultados do ensaio de dureza.....	51
Figura 3.19 – Diagrama de distribuição da Dureza processo MAG [32] .....	52
Figura A.0.1 – Amostra #01 .....	57
Figura A.0.2 – Amostra #02 .....	58
Figura A.0.3 – Amostra #03 .....	58
Figura A.0.4 – Amostra #04 .....	59
Figura A.0.5 – Amostra #05 .....	59
Figura A.0.6 – Amostra #06 .....	60
Figura A.0.7 – Amostra #07 .....	60
Figura A.0.8 – Amostra #08 .....	61
Figura A.0.9 – Amostra #09 .....	61
Figura A.0.10 – Amostra #10 .....	62
Figura A.0.11 – Amostra #11 .....	62

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Processos de soldadura por fusão .....	5
Tabela 2.2 - Processos de soldadura no estado sólido.....	6
Tabela 2.3 – Corrente, elétrodos e gás de proteção para soldadura TIG [3] ....	10
Tabela 2.4 – Diâmetro do eletrodo em transferência por Spray [12].....	19
Tabela 2.5 - Diâmetro do eletrodo em transferência por Curto-Circuito [12].....	20
Tabela 2.6 – Defeitos de forma [24] .....	36
Tabela 3.1 – Principais características dos robots [26] .....	39
Tabela 3.2 - Composição química ST37-2 [30].....	41
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas ST37-2 [30] .....	41
Tabela 3.4 – Parâmetros para os ensaios de soldadura.....	43
Tabela 3.5 – Resultados da penetração .....	47
Tabela 3.6 – Cálculo da Entrega Térmica.....	48

# Lista de Siglas e Acrónimos

ASB	-	<i>Automation Solutions Business</i>
CA	-	Corrente elétrica alternada
CC	-	Corrente elétrica contínua
DCEN	-	<i>Direct current electrode negative</i>
DCEP	-	<i>Direct current electrode positive</i>
GMAW	-	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	-	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	-	Metal Inert Gas
SHA	-	Soldadura Hidrogénio Atómico
TIG	-	<i>Tungsten Inert Gas</i>
CO <sub>2</sub>	-	Dióxido de Carbono
CMT	-	<i>Cold Metal Transfer</i>
IIW	-	<i>International Institute of Welding</i>
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
HV	-	<i>Hardness Vickers</i>
ZTA	-	Zona termicamente afetada

# Capítulo 1

## Introdução

Pretende-se neste capítulo apresentar o projeto, identificando diferentes processos de soldadura com especial enfoque nos processos de soldadura por fusão TIG, MIG/MAG e CMT, bem como o âmbito do projeto e os seus objetivos.

## **1.1. Introdução e âmbito do trabalho**

Este projeto resulta de uma crescente dificuldade em cumprir os requisitos dos clientes da empresa Automation Solutions Business (ASB) que desenvolve soluções automatizadas para diferentes ramos, nomeadamente para indústria automóvel. Nesta indústria os padrões de qualidade são elevados, os tempos de processos são reduzidos devido ao elevado fluxo de produção e elevada complexidade das peças. Os critérios de qualidade das peças passam pela geometria da peça e a qualidade da soldadura.

Para que seja possível cumprir as quantidades de produção pretendidas é necessário uma otimização dos processos e parâmetros da soldadura, de forma a atingir os padrões de qualidade do cliente, um dos quais a penetração da soldadura.

Na fase atual será efetuado um estudo dos diferentes processos de soldadura e a sua evolução histórica. É dado uma maior atenção aos processos de soldadura TIG, MIG/MAG e CMT, devido ao facto de estes processos serem mais usuais na indústria automóvel pela complexidade das peças a soldar e a necessidade de automatização do processo quando possuem uma elevada taxa de produtividade.

## **1.2. Objetivos**

No presente projeto pretende-se fazer uma revisão bibliográfica sobre processos de soldadura que são atualmente aplicados na indústria automóvel, expondo a sua evolução histórica e o seu desenvolvimento ao longo dos anos. Identificar os diferentes tipos de soldadura e os processos que atualmente são aplicados na indústria.

Deste modo, pretende-se aprofundar a pesquisa nos processos TIG, MIG/MAG e CMT, nomeadamente os seus princípios de funcionamento, parametrizações e comparar as suas vantagens e desvantagens. O objetivo final será concluir qual o mais indicado para uma aplicação a desenvolver futuramente para a indústria automóvel, onde a automatização será um fator fundamental devido aos tempos de ciclo e complexidade do processo.

# Capítulo 2

## Soldadura

Neste capítulo serão apresentados alguns processos de soldadura e o seu princípio de funcionamento, sendo identificadas as suas características e a evolução histórica dos processos de soldadura, dando ênfase à tecnologia TIG, MIG/MAG e CMT que é a mais utilizada na indústria automóvel para a soldadura de peças de geometria complexa, quando não é possível aplicar soldadura por pontos.

## 2.1. Evolução Histórica

Os primórdios da soldadura começaram há mais de 3000 anos, onde o ferreiro forjava os metais de forma a obter uma soldadura. Na Figura 2.1 é apresentada uma evolução histórica dos vários processos de soldadura. E em 1885 foi registado por N. Benardos e S. Olszewski a patente para um processo de soldadura por fusão através do calor gerado pelo arco estabelecido entre o eléctrodo de carvão e a peça. O eléctrodo de carvão veio a ser substituído por um fio metálico e o aquecimento passou a ser acompanhado da deposição de metal fundido proveniente do fio, [1].

A descoberta efetuada por Edmund Davy do gás acetileno permitiu que no início do século XX fosse desenvolvida a soldadura oxiacetilénica por Foresche e Picard, onde chamas de elevada temperatura criavam a fusão localizada de determinados metais, [2].

Apenas nos anos 30 surgiu a designação “soldadura por eléctrodo revestido” e deu-se início a pesquisas de proteção do arco elétrico da contaminação atmosférica, de onde surgiu o Tungsten Inert Gas (TIG). Neste processo é utilizado um eléctrodo não consumível de tungsténio e proteção através de gás inerte. Devido à necessidade de soldar ligas de alumínio e ligas não ferrosas o eléctrodo de tungsténio foi substituído por um eléctrodo de alimentação contínua e proteção gasosa de argon ou hélio de onde surgiu o processo Metal Inert Gas (MIG) ou Gas Metal Arc Welding (GMAW). Com a utilização de dióxido de carbono como gás de proteção surgiu o Metal Active Gas (MAG), [3].

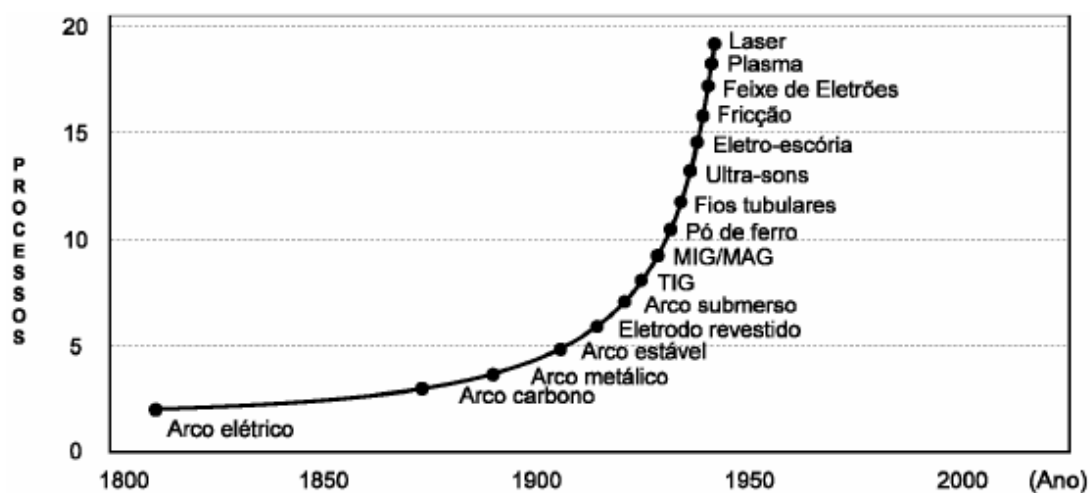


Figura 2.1 - Evolução histórica dos processos de Soldadura [3]

## 2.2. Processos de Soldadura

Atualmente existe uma grande diversidade de processos de soldadura, adaptados às diferentes necessidades e abrangendo uma variedade de materiais. Pode-se dividir os processos de soldadura em três grandes grupos, soldadura por fusão, no estado sólido e corte térmico. A soldadura por fusão é caracterizada pela fusão do metal, que poderá ser o próprio material ou material de adição na forma de fio-eléctrodo, de forma a criar ligação física entre as peças a serem soldadas, e solidificam quando é retirada a fonte de calor. Na Tabela 2.1 estão identificados processos de soldadura por fusão, [3].

Tabela 2.1 – Processos de soldadura por fusão

<b>Soldadura por Fusão</b>	
<u>Elétrica</u>	<u>Química</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Arco:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- TIG</li> <li>- MIG/MAG</li> <li>- Plasma</li> <li>- Eléctrodo carvão</li> <li>- SHA</li> <li>- Eléctrodo nú</li> <li>- Eléctrodo revestido</li> <li>- Arco submerso</li> <li>- Fios fluxados</li> <li>- Faíscamento</li> <li>- Percursão</li> <li>- Pernos</li> </ul> </li> <li>• <i>Resistência:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Electroescória</li> <li>- Resistência por pontos ou roletes</li> <li>- Resistência Topo-a-topo</li> </ul> </li> <li>• <i>Radiação:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Feixes de electrões e laser</li> </ul> </li> <li>• <i>Condução</i></li> <li>• <i>Indução</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Chama:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxiacetilénico</li> <li>- Oxihidrogénio</li> <li>- Ar acetileno</li> <li>- Pressão de gás</li> </ul> </li> <li>• <i>Reagentes sólidos:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Térmica</li> </ul> </li> </ul>

Na soldadura em estado sólido a união das peças ocorre através de deformação ou difusão atômica pela pressão que é criada entre as peças em contato. Na Tabela 2.2 estão identificados processos de soldadura no estado sólido, [3].

Tabela 2.2 - Processos de soldadura no estado sólido

<b>Soldadura no Estado Sólido</b>		
<u>Elétrica</u>	<u>Química</u>	<u>Mecânica</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Radiação:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pressão a quente</li> <li>- Forja</li> <li>- Difusão</li> </ul> </li> <li>• <i>Indução:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indução</li> </ul> </li> <li>• <i>Resistência:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistência à alta frequência</li> <li>- Resistência pontos</li> <li>- Resistência roletes</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Chama:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pressão gás</li> </ul> </li> <li>• <i>Radiação:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Difusão</li> <li>- Forja</li> </ul> </li> <li>• <i>Explosão</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Fricção:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fricção</li> <li>- Ultra-sons</li> </ul> </li> <li>• <i>Frio</i></li> </ul>

Por fim, a soldadura por efeito térmico permite fundir a peça com o objetivo de unir ou separar. Atualmente é bastante aplicado para o corte de determinados materiais. Os processos da soldadura por efeito térmico são:

- Oxicorte
- Plasma
- Arcair
- Feixe de laser

### 2.2.1. Tipos de Juntas

A junta a soldar pode ser de diversas formas, no entanto devem cumprir os requisitos da montagem final da peça, como também permitir a aplicação do cordão de soldadura.

O formato da junta depende primeiramente dos requisitos de serviço da peça soldada, mas também varia consoante o processo de soldadura a utilizar, a técnica de fabricação anteriormente a soldadura e a quantidade de componentes a soldar, [4].

Na Figura 2.2 estão representados as configurações básicas de juntas utilizadas em aplicações de soldadura, [4]:

- a) Lap Joint (Juntas Sobrepostas) – Recomendado utilizar sempre que possível porque oferece a melhor possibilidade de obter a resistência máxima, utilizado por exemplo na soldadura de chapas e tubagem.
- b) Lock Seam Joint - usualmente utilizadas na soldadura de chapa
- c) Butt Joint (Juntas de Topo) – devem ser evitadas sempre que possível
- d) Pipe joint

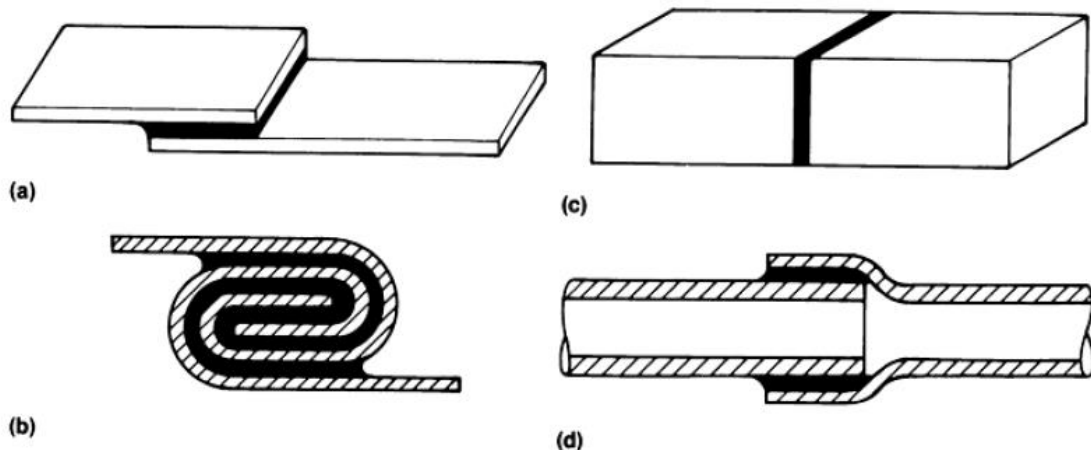


Figura 2.2 - Configurações básicas de juntas [4]

Deverá existir espaçamento suficiente entre as peças a soldar para que a soldadura seja atraída para a junta por ação de capilaridade, mas mantendo espaço suficiente para que a soldadura possa preencher a junta e para tal em alguns casos recorre-se a chanfros nas peças. A distância entre as peças a soldar varia entre 0,075 até 0,150 mm de forma a obter a força ótima, no entanto existem variações em alguns casos, [4].

Adicionalmente às configurações básicas de juntas, na Figura 2.3 estão visíveis outros tipos de juntas vulgarmente utilizadas em operações de soldadura.

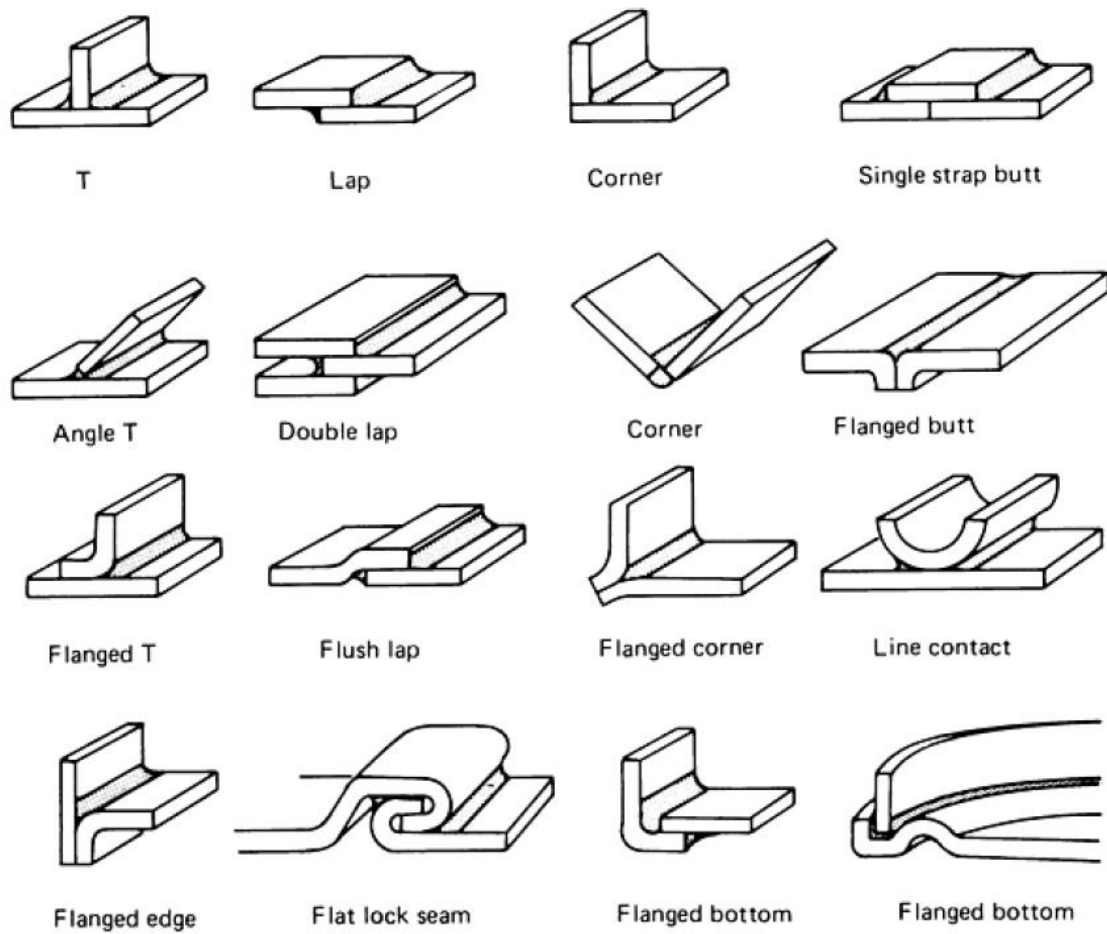


Figura 2.3 - Juntas usualmente utilizadas em soldadura [4]

## 2.3. Soldadura TIG

O processo de soldadura TIG foi patenteado em 1942 por Russell Meredith. Na Figura 2.4 é apresentado o esquema utilizado na patente. Foi aplicado um elétrodo de tungsténio em que o arco elétrico era protegido por hélio, e magnésio como material de adição. Inicialmente desenvolvido para realizar soldaduras em metais resistentes a corrosão e materiais de difícil soldabilidade como o magnésio, aço inoxidável e alumínio. Atualmente é largamente utilizado para soldar diversos materiais na indústria, onde a soldadura está visível e com boa qualidade, [2].

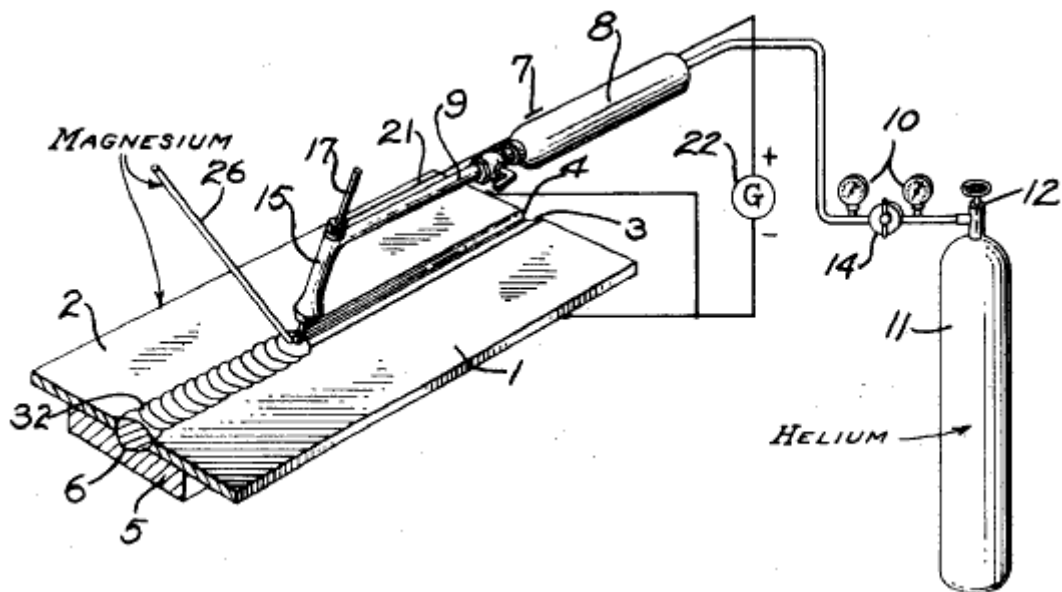


Figura 2.4 – Perspetiva esquemática da soldadura TIG [5]

O princípio de funcionamento atual é ainda de acordo com o desenvolvido por Russel Meredith, em que o arco elétrico é estabelecido através de elétrodo não consumível de tungsténio e a peça numa atmosfera de proteção de gás inerte árgon ou hélio. O objetivo do arco elétrico é o fornecimento de calor de forma a criar o banho de fusão e fundir o material de adição e a proteção da superfície do banho de fusão e do metal base de óxidos superficiais.

O motivo pelo qual é utilizado o elétrodo de tungsténio deve-se ao seu elevado ponto de fusão 3422 °C, o mais elevado entre os metais puros, permitindo a redução do desgaste do elétrodo e facilitando a ionização.

### 2.3.1. Componentes

Uma instalação de soldadura TIG consiste em uma fonte de alimentação, sistema de arrefecimento, alimentação do gás de proteção e a tocha de soldadura. A escolha do tipo de corrente da fonte de alimentação é baseado no tipo de material e espessura a soldar, podendo ser utilizada corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA) conforme indicado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Corrente, elétrodos e gás de proteção para soldadura TIG [3]

Tipo de Metal	Espessura	Corrente	Eléctrodo	Gás Protecção
Alumínio	Todas	CA	Puro ou com zircónio, toriado	Ar ou Ar-He
	> 3mm	CC -	Toriado ou com zircónio	Ar ou Ar-He
	< 3mm	CC +		Ar
Cobre e suas ligas	Todas	CC -	Toriado	He
	< 3mm	CA	Puro ou com zircónio	Ar
Ligas de magnésio	Todas	CA	Puro ou com zircónio	Ar
	< 3mm	CC +	Toriado ou com zircónio	Ar
Níquel e suas ligas	Todas	CC -	Toriado	Ar
Aços carbono e de baixa liga	Todas	CC -	Toriado	Ar ou Ar-He
	< 3mm	CA	Puro ou com zircónio	Ar
Aço inoxidável	Todas	CC -	Toriado	Ar ou Ar-He
	< 3mm	CA	Puro ou com zircónio	Ar
Titânio	Todas	CC -	Toriado	Ar

A fonte de alimentação geralmente utiliza um pulso de alta frequência de forma a iniciar o arco eléctrico, este pulso de energia em conjunto com a tensão elevada provoca interferências eléctricas, afetando o funcionamento de sensores e equipamentos de medição nos processos automatizados.

### 2.3.2. Modos de Transferência

A maioria das aplicações utiliza corrente contínua com elétrodo negativo (DCEN), em que 70% do calor gerado pelo arco elétrico é aplicado à peça a soldar, realizando uma soldadura com menor espessura e mais penetração relativamente as aplicações com corrente contínua e elétrodo positivo (DCEP), ver Figura 2.5, [6].

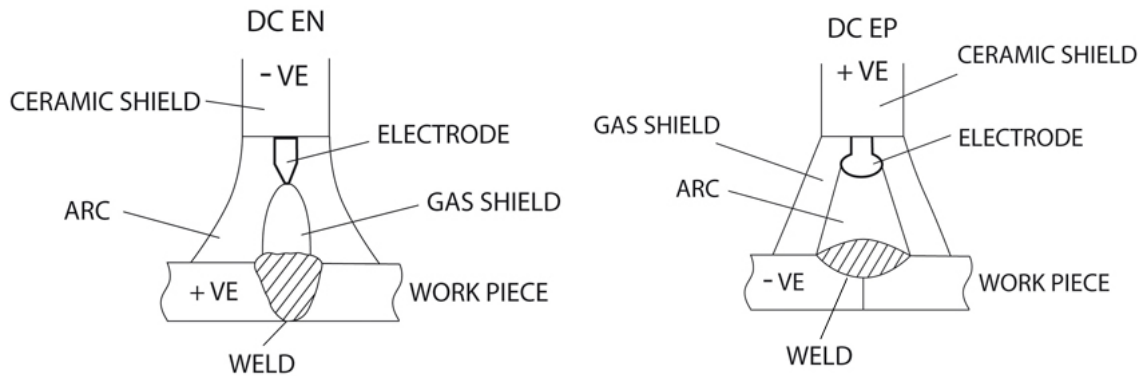


Figura 2.5 – Influência da polarização do elétrodo de soldadura TIG [7]

Atualmente existem duas formas convencionais de adicionar material, adição de fio a frio em que o material de adição é diretamente aplicado ao arco elétrico, ou adição de fio a quente em que o material de adição é aquecido através de uma fonte de alimentação externa, na Figura 2.6 é possível comparar a taxa de deposição com a forma aplicada na adição de material.

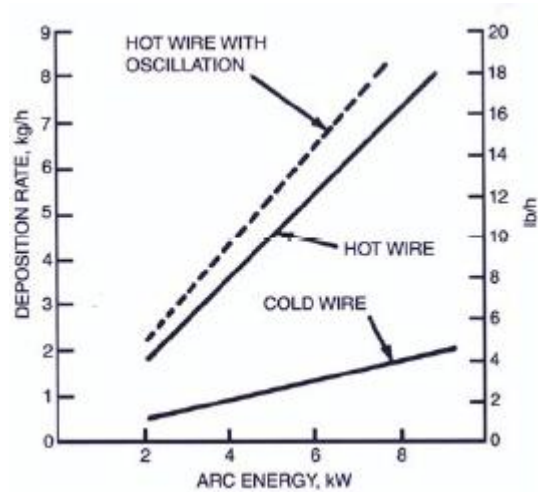


Figura 2.6 – Taxa de deposição vs energia do arco, a quente e a frio [8]

Vantagens do processo de soldadura TIG, [2]:

- Possibilita a soldadura de diversos materiais;
- Utilização de corrente contínua ou alternada;
- Possibilidade de automatização do processo;
- Controlo da penetração;
- Permite soldar em diversas posições;
- Baixa formação de escória.

Desvantagens do processo de soldadura TIG, [2]:

- Relativamente pouca penetração da soldadura;
- Baixa produtividade;
- Sensibilidade às correntes de ar;
- Elevado custo dos gases de proteção;
- Baixo rendimento  $\leq 0,5$  Kg/h;

## 2.4. Soldadura MIG/MAG

Durante o final dos anos 40 verificou-se a necessidade de melhorar o processo TIG, de forma a possibilitar a alimentação automática do material de adição e aumentar o rendimento do processo de soldadura. Foram realizadas tentativas de alimentação automática do material de adição no arco elétrico formado pelo arco de tungsténio mas sem sucesso, especialmente quando era necessário uma elevada taxa de deposição. Para tal o eléctrodo de tungsténio foi substituído por um eléctrodo consumível, [3].

A industrialização do processo MIG deu-se na década de 50 onde eram utilizados como gases inertes de proteção o Hélio, Árgon ou mistura de ambos. A introdução do CO<sub>2</sub> com gás de proteção ativo, permitiu tornar o processo mais económico e consequentemente verificou-se um aumento da sua aplicação na indústria. Atualmente o processo MIG/MAG é largamente aplicado na indústria tendo uma diversidade de aplicações.

Podendo soldar através de soldadura semi-automática, em que a tocha é manipulada por um operador ou em automático em que a tocha é manipulada por um robot de soldadura. O processo permite soldar uma grande variedade de materiais, sendo apenas limitado pelas características de transferência do metal do fio para a peça.

### 2.4.1. Componentes

Os equipamentos básicos que constituem um sistema de soldadura MIG/MAG convencional, estão identificados na Figura 2.7. E consistem na tocha de soldadura, fonte de alimentação, sistema de alimentação automática do eletrodo, bobine do eletrodo, regulador de gás e a sua alimentação.

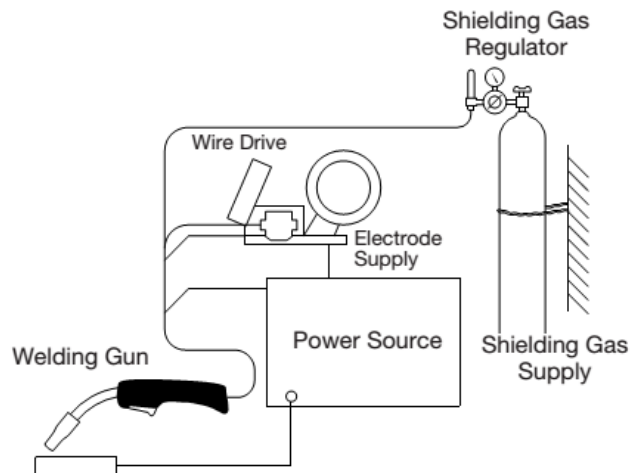


Figura 2.7 – Esquema de uma máquina de soldadura MIG/MAG [9]

Na tocha de soldadura o fio consumível é alimentado de forma a estabelecer o arco elétrico entre a peça e o eletrodo. O fio é continuamente alimentado e fundido para a poça de fusão. O gás de proteção flui através da tocha de forma a proteger o arco elétrico, conforme a ilustração da Figura 2.8.

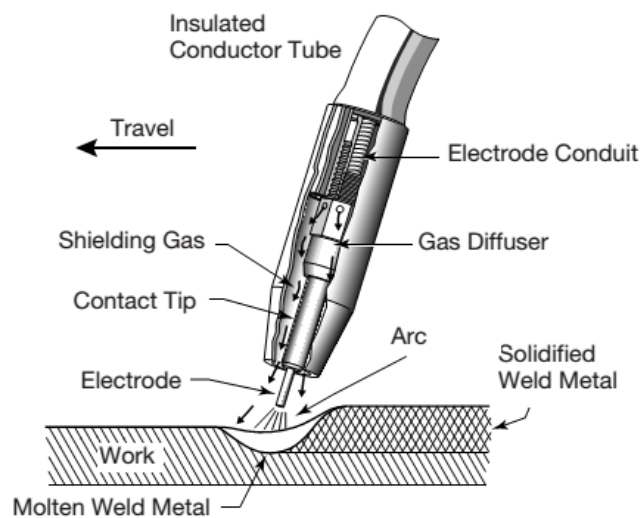


Figura 2.8 - Processo de soldadura MIG/MAG [9]

### 2.4.2. Modos de Transferência

O método como o material de adição que é transferido do eletrodo até a peça tem influência em diversos fatores que influenciam a qualidade da soldadura. Existem dois métodos básicos de transferência de material de adição, [2]:

- Transferência em voo livre
- Transferência por curto-circuito

Na transferência em voo livre é criado e mantido o arco elétrico e o metal fundido do eletrodo é separado do mesmo, e move-se através do arco elétrico e por fim depositado na junta a soldar, podendo-se separar em quatro métodos (Figura 2.9), [2]:

- Transferência em “spray”
- Transferência em “spray” pulsada
- Transferência globular
- Transferência guiada por parede de fluxo

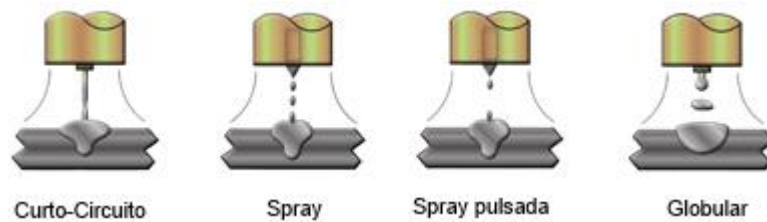


Figura 2.9 – Modos de transferência

### 2.4.3. Parâmetros do Processo

A qualidade final do cordão de soldadura é bastante influenciada pelos parâmetros utilizados para o processo MIG/MAG, sendo que os principais parâmetros são, [10, 9]:

- Intensidade da corrente
- Tensão do arco
- Velocidade de soldadura
- Velocidade de alimentação do fio
- Extensão do eletrodo
- Posição da tocha
- Material e diâmetro do eletrodo
- Tipo de gás de proteção

#### 2.4.3.1. Tensão, corrente e velocidade

A corrente do arco elétrico é o parâmetro que mais influencia a geometria do cordão de soldadura. A penetração da soldadura aumenta com o aumento da corrente e diminui quando a tensão é diminuída, e dependendo da potência do arco elétrico a sua distância até a peça influencia a penetração. Através da Figura 2.10 é possível verificar o efeito da tensão e corrente do arco elétrico na penetração da soldadura. Pode-se concluir neste caso que a corrente que permite obter maior penetração é 210 A, independentemente da velocidade de alimentação do fio, [10].

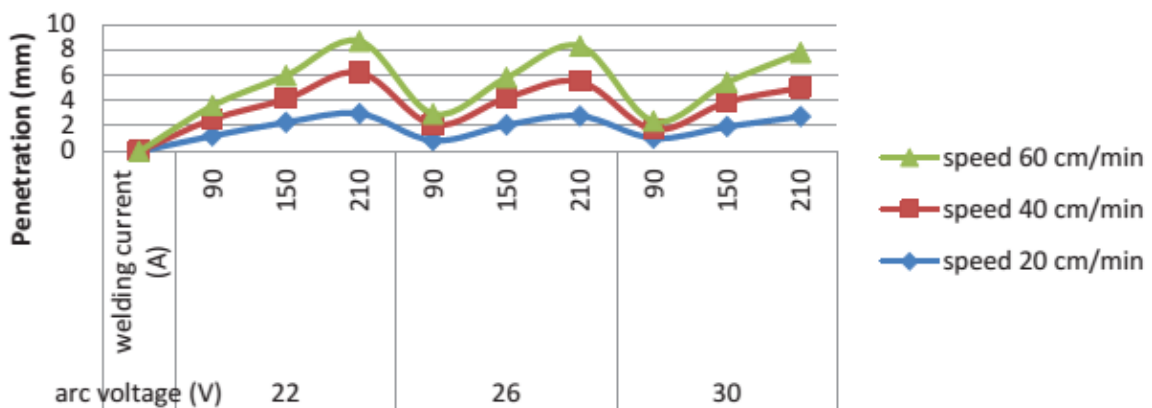


Figura 2.10 – Influência da penetração vs corrente de soldadura [10]

Alguns destes parâmetros já são previamente determinados consoante o tipo de material base e composição do eléctrodo. Sendo que a maioria dos fabricantes de máquinas de soldar recomendam a utilização de alguns parâmetros, como exemplificado na Figura 2.11, onde é recomendada a corrente e velocidade de alimentação do fio para diversos diâmetros do eléctrodo.

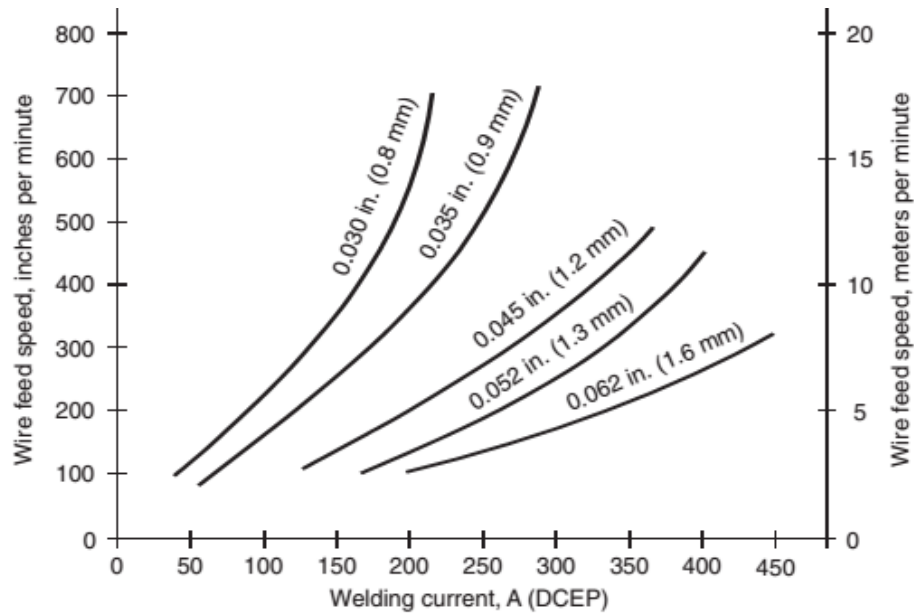


Figura 2.11 – Corrente vs velocidade de alimentação vs diâmetro [9]

#### 2.4.3.2. Extensão do eléctrodo

A extensão do eléctrodo que poderá ser desde a tocha até ao arco eléctrico ou da tocha até a peça (Figura 2.12) é controlada pelo operador. Quando é aumentada a extensão do eléctrodo e proporcionalmente a distância entre a tocha e a peça a soldar, resulta no aumento da resistência no fluxo de corrente no eléctrodo, diminuindo a corrente no arco eléctrico. Quando a extensão do eléctrodo é reduzida ocorre o oposto, ou seja, aumenta a corrente no arco eléctrico.



Figura 2.12 – Extensão do eléctrodo [9]

### 2.4.3.3. Posição da tocha

A posição da tocha em relação à junta a soldar, influencia o formato do cordão e a sua penetração, em alguns casos, mais do que a velocidade e tensão do arco elétrico.

Quando o eletrodo aponta para a direção de deslocamento, refere-se à direita “forehand” com ângulo a empurrar o banho de fusão (Figura 2.13), este tipo de técnica produz um cordão mais largo mas com menos penetração. A penetração máxima é obtida quando é utilizada a técnica à esquerda “backhand” em relação a peça a soldar, onde o banho de fusão é arrastado e produz um arco elétrico mais estável, menos chispas e largura inferior.

Quando são realizadas soldaduras de canto deve-se aplicar uma inclinação de 45°.

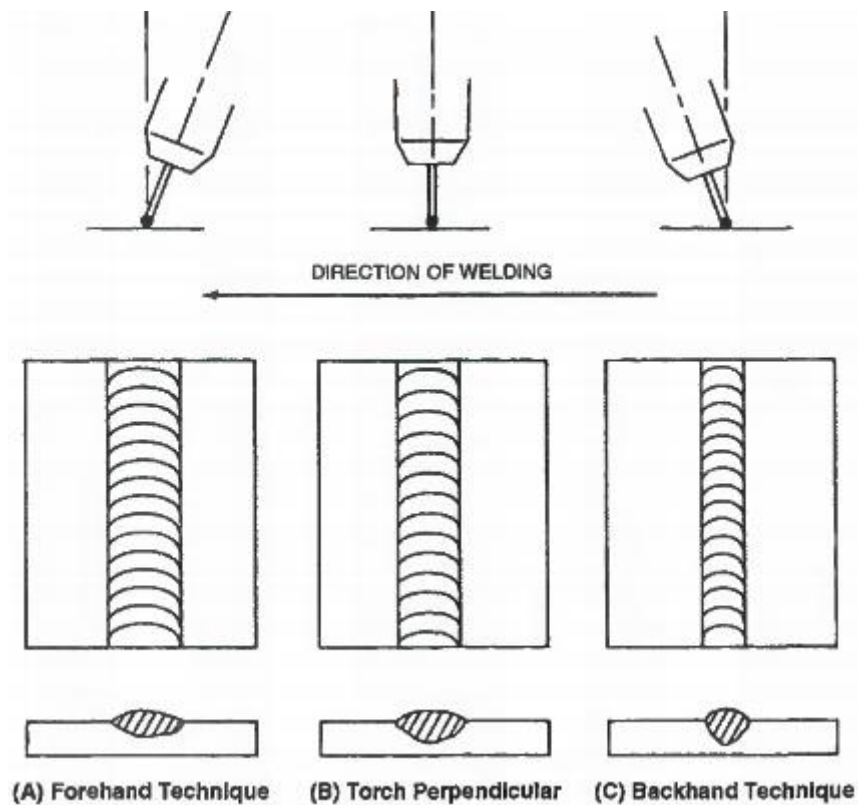


Figura 2.13 – Influência da tocha na largura e penetração do cordão [11]

#### 2.4.3.4. Eléttrodo

A seleção do eléttrodo de adiçãoo é fundamentada tendo em mente a obtenção de um cordão com propriedades físicas e mecânicas semelhantes ou superiores ao metal base, possibilitando controlar diversas propriedades da soldadura. O eléttrodo permite a desoxidação da poça de fusão e promove a estabilidade do arco, bem como as características de transferência de metal desejadas, atingindo um cordão com a qualidade pretendida. A escolha do diâmetro do fio é baseada em função da espessura da chapa, posições de soldadura, potência de soldadura e modo de transferência. Sendo que eléttrodos com diâmetros superiores implicam a utilização de intensidades de corrente superiores criando elevadas taxas de fusão de fio, possibilitando depósitos mais fluidos com maior penetração. Através da tabela 2.4 e 2.5 é possível analisar diferentes tipos de eléttrodo e diâmetros, para modos de transferência por spray e curto-circuito, [12].

Tabela 2.4 – Diâmetro do eléttrodo em transferência por Spray [12]

Modo de transferência	Material do Eléttrodo	Diâmetro do Eléttrodo	Corrente
Spray	Aço Carbono	0,76 mm	150 A
		0,89 mm	165 A
		1,10 mm	220 A
		1,30 mm	240 A
		1,60 mm	275 A
	Aço Inoxidável	0,89 mm	170 A
		1,10 mm	225 A
		1,60 mm	285 A
	Alumínio	0,76 mm	95 A
		1,19 mm	135 A
		1,60 mm	180 A
	Cobre desoxidado	0,89 mm	180 A
		1,10 mm	210 A
		1,60 mm	310 A
	Bronze ao silício	0,89 mm	165 A
		1,10 mm	205 A
		1,60 mm	270 A

Tabela 2.5 - Diâmetro do eletrodo em transferência por Curto-Circuito [12]

Modo de transferência	Material do Eletrodo	Diâmetro do Eletrodo	Corrente
Curto-Circuito	Aço Carbono	0,76 mm	300 A
		0,89 mm	320 A
		1,10 mm	370 A
		1,30 mm	395 A
		1,60 mm	430 A
	Alumínio	0,76 mm	175 A
		0,89 mm	195 A
		1,10 mm	225 A
		1,60 mm	290 A

#### 2.4.3.5. Gases de Proteção

A escolha do gás de proteção é fundamental para a qualidade final da soldadura, a proteção realizada pelo gás pode ser inerte ou ativa.

Os gases inertes utilizados são o Hélio e o Árgon, porque não reagem quimicamente com a poça de fusão, no entanto, para se tornarem gases condutivos necessitam de ser ionizados. A energia de ionização do Árgon é inferior à do Hélio conforme ilustrado na Figura 2.14, daí ser mais facilitado o início do arco elétrico através da utilização de Hélio, [9].

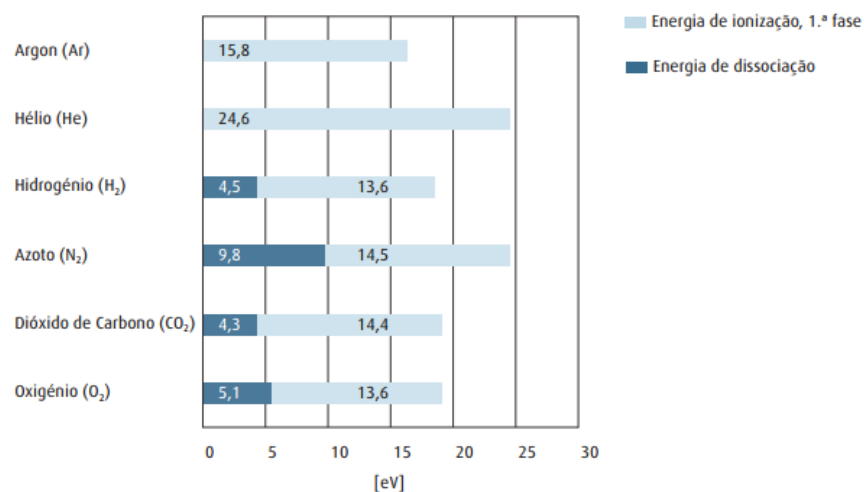


Figura 2.14 - Energia de dissociação e ionização dos gases [13]

A condutividade térmica prende-se com a capacidade do gás transferir energia térmica. Este é um fator importante a considerar na escolha do gás, pois afeta a forma do arco elétrico e a distribuição da temperatura na zona a soldar. O Árgon têm uma condutividade térmica inferior ao Hélio (Figura 2.15), deste modo a condutividade térmica mais elevada do Hélio proporciona uma zona de penetração mais abrangente mas com menor penetração conforme ilustrado na Figura 2.16, [9].

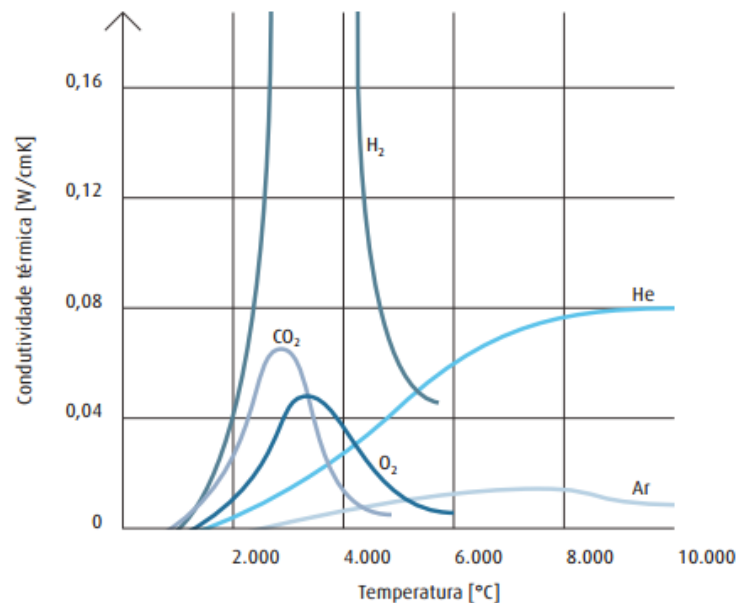


Figura 2.15 – Condutividade térmica dos gases [13]

O gás ativo utilizado é o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), que reage quimicamente com a poça de fusão devido à energia do arco elétrico, no qual as moléculas de CO<sub>2</sub> se desassociam e a posterior recombinação das moléculas é o que forma uma soldadura ampla e com penetração. Na Figura 2.16 estão ilustradas as características da utilização do CO<sub>2</sub>, [9].

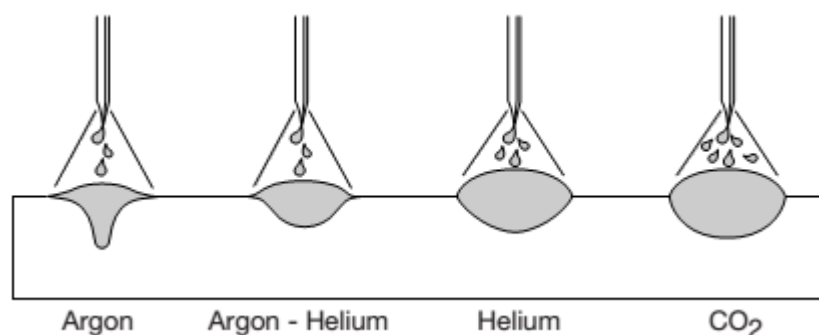


Figura 2.16 – Formato do cordão e penetração com diferentes gases [9]

Vantagens do processo de soldadura MIG/MAG, [2]:

- Permite soldar em todas as posições;
- Possibilita a soldadura de todos os metais;
- Facilidade em automatização do processo;
- Alimentação contínua e automatizada do eletrodo
- Controlo da penetração;
- Alta velocidade de deposição de material e da soldadura;
- Facilidade de operação;

Desvantagens do processo de soldadura MIG/MAG, [2]:

- Sensibilidade às correntes de ar;
- Custo dos gases de proteção;
- Risco de inclusões de CO<sub>2</sub>;
- Regulação dos parâmetros do processo complexa;
- Produção de respingos;

## 2.5. Soldadura CMT

O processo Cold Metal Transfer (CMT) foi desenvolvido por Manfred Schorghuber através da empresa Fronius em 2005, sendo uma variação da soldadura MIG/MAG, em que a sua principal inovação é o controlo da movimentação do arame do eléctrodo durante a transferência metálica e a sua integração no controlo do processo de soldadura, [14].

A soldadura CMT utiliza um sistema inovador de alimentador de fio integrado a um controlador digital de alta velocidade, de modo a permitir controlar não apenas o arco eléctrico durante a soldadura mas também o método de transferência de material e quantidade de entrega térmica transferida para o material base. Os processos de soldadura que utilizam o método de transferência pulsada, permitem controlar o arco eléctrico quando ocorre o curto-circuito, este é efetuado apenas eletricamente. O processo CMT controla a transferência de material como também o início e a duração do curto-circuito, alimentado mecanicamente o eléctrodo em direção a poça de fusão e retirando-o após um período de tempo definido (Figura 2.17), [15].

A frequência com a qual o fio é alimentado pode variar entre 1 Hz até 150 Hz, sendo preferível utilizar entre 30 – 70 Hz. A utilização de frequência mais baixa é indicada para redução de salpicos, uma vez que, a oscilação natural da poça de fusão é largamente reduzida. A utilização de frequências mais elevadas provocam maior oscilação na poça de fusão sendo recomendado para aumentar o preenchimento das juntas a soldar, [14].

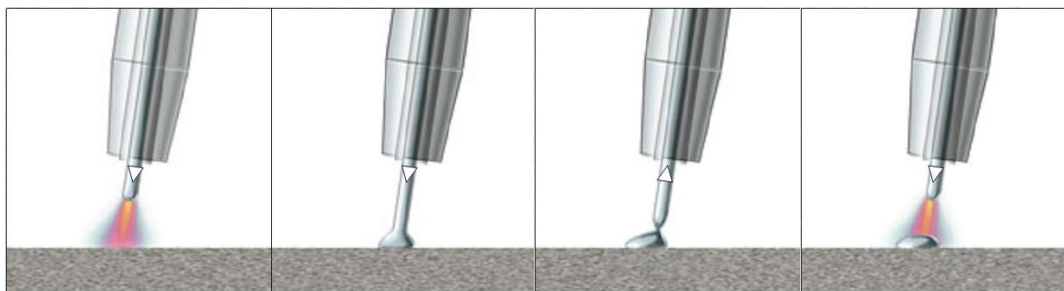


Figura 2.17 – Movimento do fio CMT [16]

Incorporando o movimento mecânico no controle eléctrico, o ponto de curto-circuito consegue ser detetado e a corrente pode ser reduzida de forma a diminuir a entrega térmica para o material base, [15].

### 2.5.1. Componentes

O processo CMT está preparado para ser utilizado de forma automatizada (Figura 2.18) com auxílio de um braço robótico ou de forma manual (Figura 2.19).

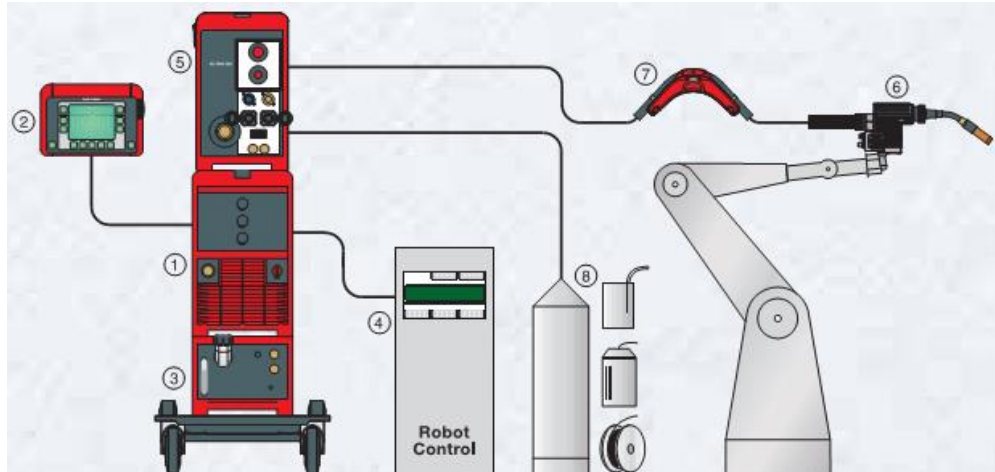


Figura 2.18 – CMT configuração automatizada [16]

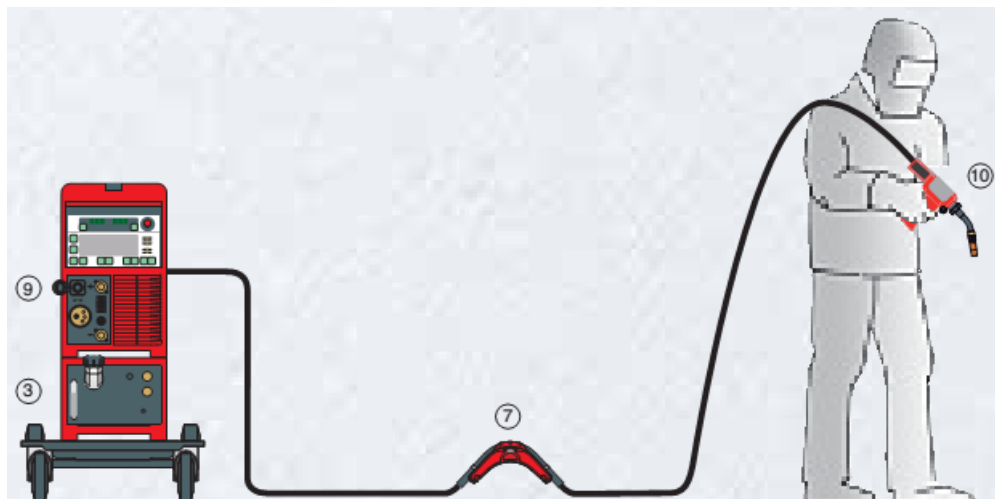


Figura 2.19 - CMT configuração manual [16]

- |                             |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 1. Fonte de alimentação CMT | 6. Tocha de Soldadura              |
| 2. Controlador              | 7. Buffer de Fio                   |
| 3. Unidade de Arrefecimento | 8. Alimentação de Fio              |
| 4. Interface com Robot      | 9. Fonte de alimentação CMT Manual |
| 5. Alimentador do Fio       | 10. Tocha de Soldura Manual        |

## 2.5.2. Modos de Transferência

Um ciclo de CMT consiste no período necessário para a deposição de material na poça de fusão, sendo caracterizado por duas fases de operação distintas conforme ilustrado na Figura 2.20, [15].

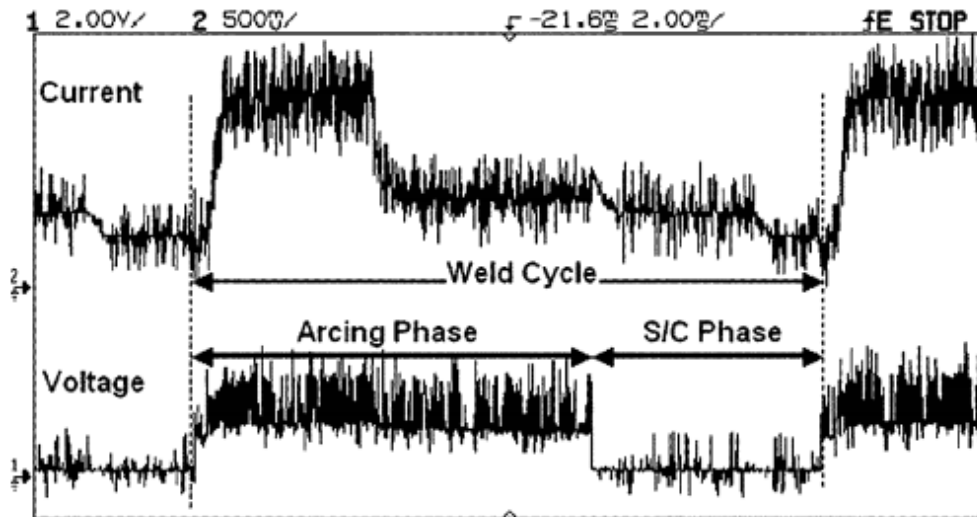


Figura 2.20 - Transições elétricas de um ciclo CMT [15]

Em que na primeira fase *Arcing* é representada por uma tensão constante e um elevado pulso inicial de corrente que gera o arco elétrico entre o eletrodo e o material base. Posteriormente a corrente é reduzida para que a gota não vá diretamente para o material base, mas sim que se crie um globo de material fundido ainda fixo à ponta do eletrodo e a poça de fusão é criada, [15].

Na fase do curto-circuito o eletrodo é alimentando em direção a poça de fusão iniciando um curto-circuito elétrico representado pela redução da tensão do arco. Quando a gota atinge o contacto com a poça de fusão, é enviado um sinal para o alimentador do fio que altera o sentido de movimento do fio. Criando uma força de retração no fio que auxilia a libertação da gota e o seu fluxo para a poça de fusão, [17]. Em soldadura MIG/MAG convencional esta fase resulta num aumento rápido da corrente que funde a extremidade do eletrodo, quebrando o contacto com o material base. No caso do CMT quando é detetado o ponto de curto-circuito a corrente é reduzida ao mínimo extinguindo o arco elétrico e limitando a entrega térmica transferida ao material base, [15]. Como a corrente de curto-circuito é bastante reduzida, não ocorre o fenómeno da explosão elétrica na transferência do material, reduzindo a formação de salpicos de soldadura na superfície, [17].

Posteriormente foram desenvolvidas evoluções do modo de transferência CMT, o CMT Advanced, CMT Pulse e CMT Advanced Pulse. Estes modos de transferência surgiram de forma a auxiliar a soldadura de cordões com maior complexidade e requisitos especiais. Na Figura 2.21 encontra-se a comparação entre a tensão e a corrente dos diversos modos de transferência, [18].

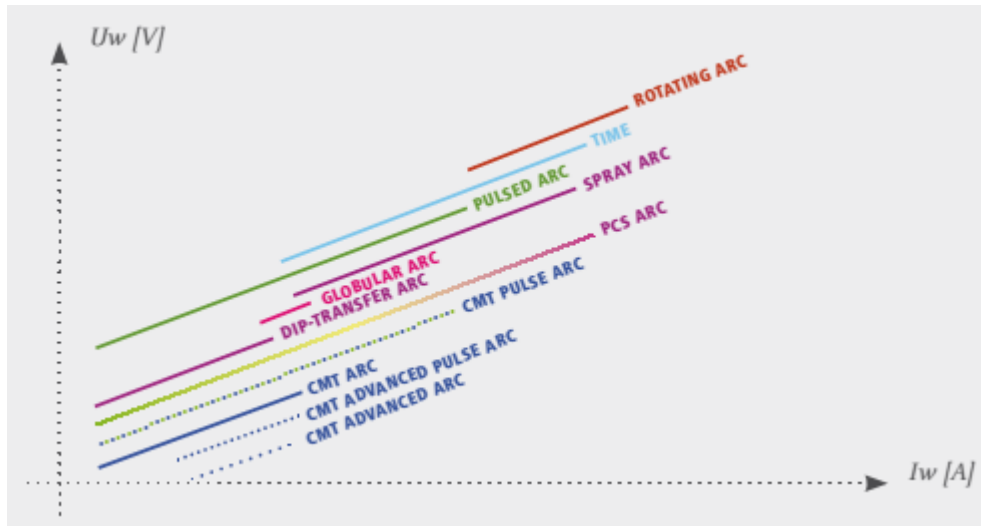


Figura 2.21 – Comparação dos diversos modos de transferência [18]

### 2.5.2.1. CMT Advanced

A polaridade da corrente de soldadura é constituída com parte integral do processo de controlo. A inversão da polaridade ocorre na fase do curto-circuito, garantindo a estabilidade do processo CMT. Resultando numa entrega térmica controlada, maior capacidade de preencher fendas, temperatura mais baixa que o CMT e taxa de deposição até 60% mais elevada (Figura 2.22), [18].

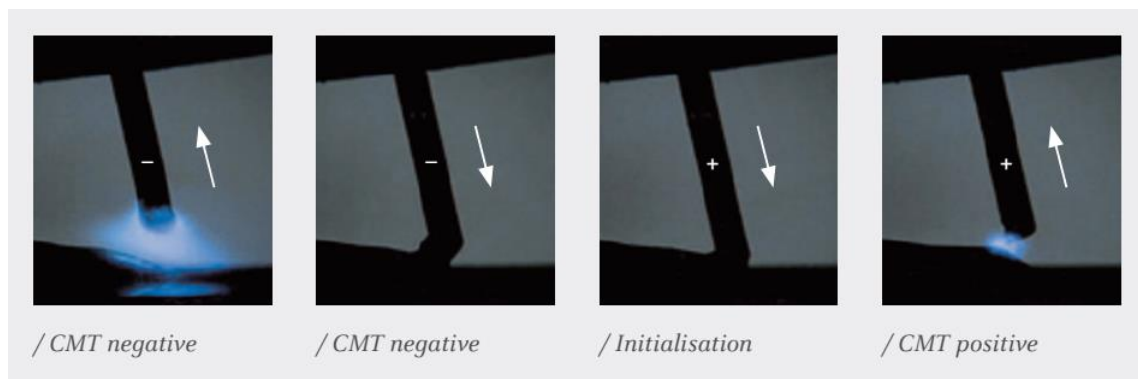


Figura 2.22 – Combinação CMT negativo e positivo [18]

### 2.5.2.2. CMT Pulse

A combinação da soldadura CMT com o método convencional de deposição pulsado unifica as vantagens de ambos os processos, criando um arco bastante estável e elevada performance da potência de soldadura pulsada (Figura 2.23), [16].

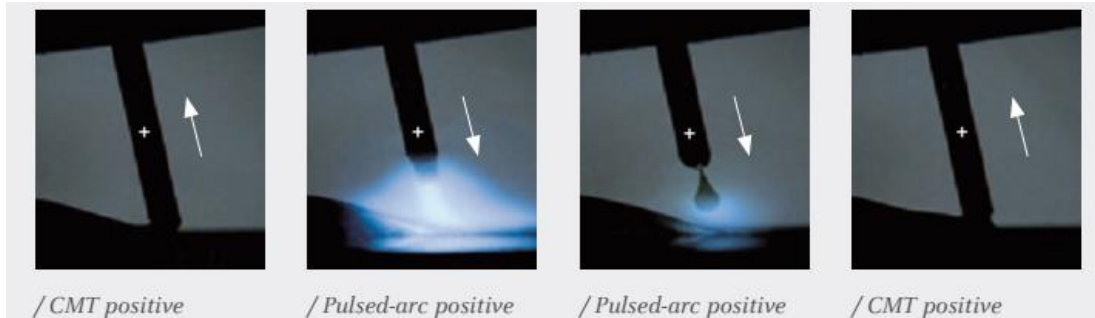


Figura 2.23 – Combinação ciclos CMT e pulsados [18]

O método CMT Pulse é caracterizado por uma penetração otimizada, criando um processo bastante estável e reduzida entrega térmica característica do CMT. Ajustando o número de ciclos pulsados que ocorrem entre o ciclo de CMT é possível controlar a penetração (Figura 2.24), [19].

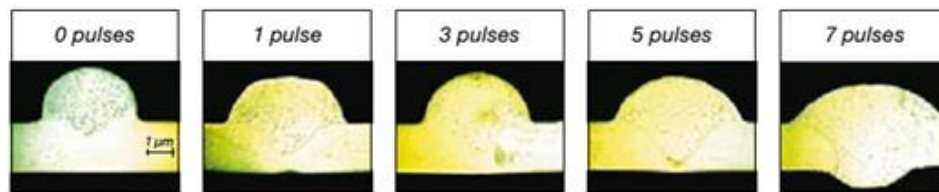


Figura 2.24 - Ciclos pulsados no CMT [19]

### 2.5.2.3. CMT Advanced Pulse

Através da combinação do polo negativo dos ciclos CMT e o polo positivo dos ciclos pulsados, atinge-se uma precisão absoluta e um elevado manuseamento do arco (Figura 2.25), [18].

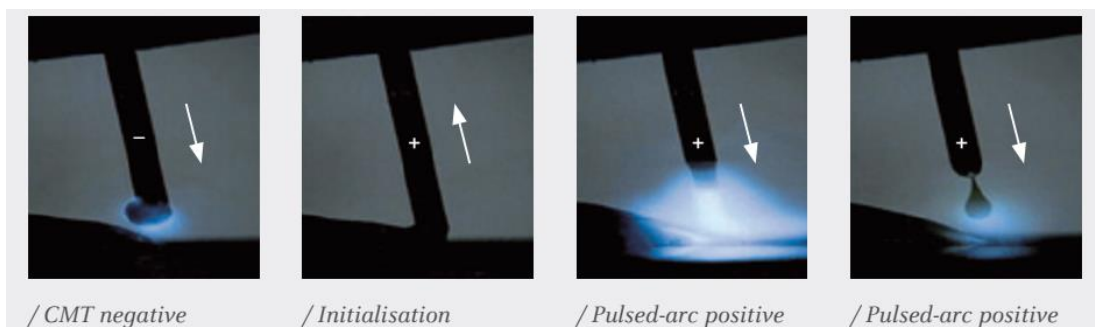


Figura 2.25 – Combinação CMT negative e ciclos pulsados [18]

### 2.5.3. Parâmetros do Processo

O processo pode ser parametrizado em diversos detalhes devido a capacidade do controlador CMT, podendo separar a parametrização em três fases:

- Fase de ignição
- Arco elétrico
- Fim do cordão.

#### 2.5.3.1. Ignição

Na fase inicial da ignição, o arco elétrico é geralmente iniciado com parâmetros pré estabelecidos de forma a eliminar os salpicos. No entanto, podem ser alterados parâmetros para a tensão e corrente de ignição, podendo-se variar a sua duração e a sua potência, [20].

A corrente de ignição depende do material de adição e da sua espessura, em que no caso de se aplicar corrente de ignição demasiado baixa o material de adição não será pré-aquecido o suficiente. Caso a corrente de ignição seja demasiado elevada o material de adição será demasiado pré-aquecido, [20].

#### 2.5.3.2. Arco Elétrico

A velocidade de alimentação do fio é medida em m/min, a influência de uma velocidade demasiado elevada provoca um arco elétrico demasiado curto, causando a falta de fusão no fio e salpicos na soldadura porque o fio penetra o material base. Uma velocidade de alimentação do fio demasiado baixa produz um arco elétrico demasiado longo, podendo aparecer salpicos ao redor do cordão de soldadura, [20].

A corrente de base garante uma correta transferência de metal, sendo que quando esta é demasiado elevada são formadas gotas de deposição demasiado grandes. Em oposição, caso a corrente seja demasiado baixa o arco elétrico acaba por ser interrompido, [20].

A tensão controla o arco elétrico, quando é aplicada demasiada tensão o arco elétrico é demasiado longo, podendo aparecer salpicos ao redor do cordão de soldadura e causando uma baixa frequência de curto-circuito. A influência de uma tensão baixa produz um instabilidade no arco elétrico porque passa a ser demasiado curto provocando a falta de fusão no fio e salpicos na soldadura porque o fio penetra o material base, [20].

➤ CMT:

Parametrização específica do processo CMT (Figura 2.26)

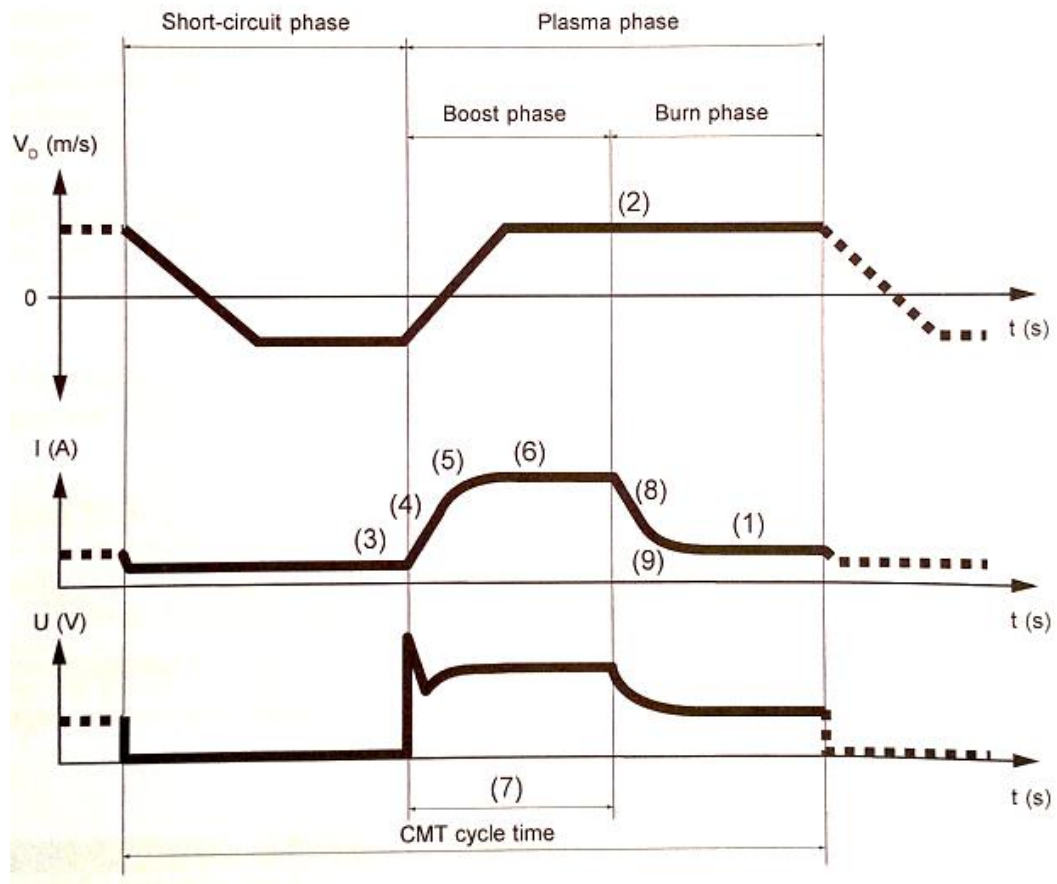


Figura 2.26 - Parâmetros característicos do CMT [20]

- 1)  $I_{sc\_wait}$  – corrente após a fase de *Boost*
- 2)  $vd_{sc\_wait}$  – velocidade do fio após a fase de *Boost* até a deposição da gota na poça de fusão
- 3)  $I_{sc2}$  – corrente para o curto-circuito
- 4)  $d_{boostup}$  – aumento linear na corrente no início da fase de *Boost*
- 5)  $\tau_{boostup}$  – aumento não linear na corrente no início da fase de *Boost*
- 6)  $I_{boost}$  – corrente durante a fase de *Boost*
- 7)  $t_{I_{boost}}$  – duração da fase de *Boost*
- 8)  $d_{boostdown}$  - decréscimo linear na corrente após a fase de *Boost*
- 9)  $\tau_{boostdown}$  - decréscimo não linear na corrente após a fase de *Boost*

➤ CMT Pulse:

Parâmetros que caracterizam o processo CMT Pulse (Figura 2.27)

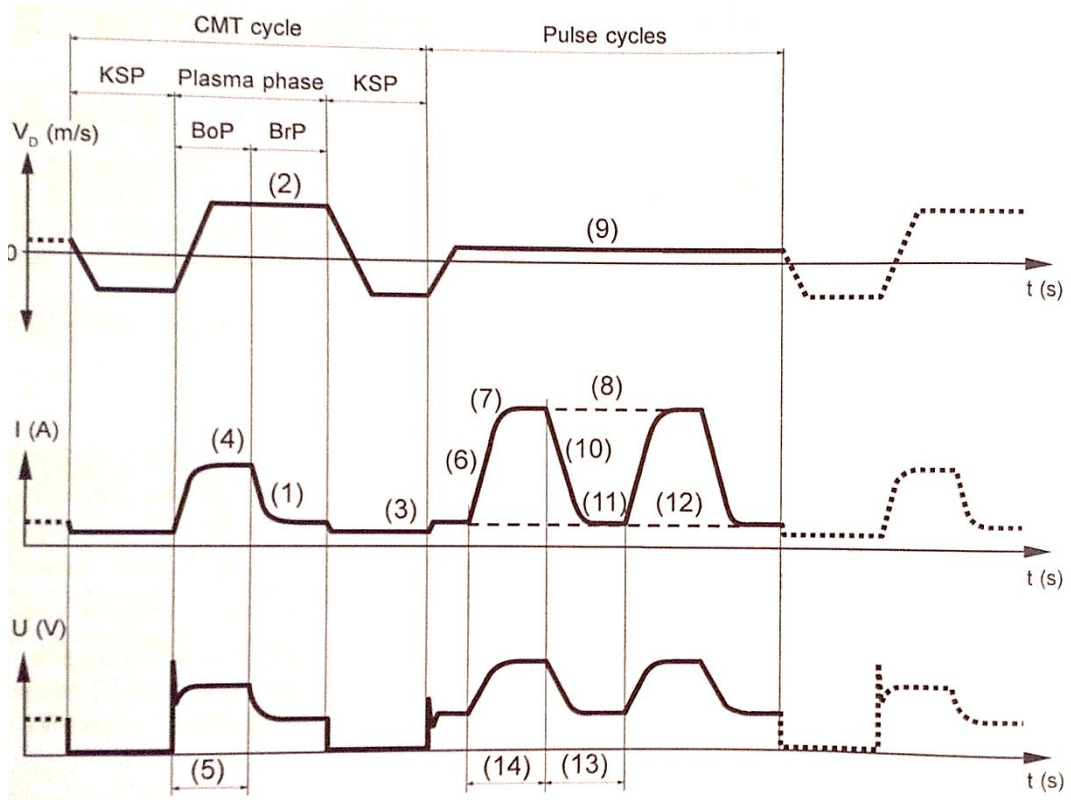


Figura 2.27 - Parâmetros característicos do CMT Pulse [20]

- 1) **I\_sc\_wait** – corrente após a fase de *Boost*
- 2) **vd\_sc\_wait**– velocidade do fio após a fase de *Boost* até a deposição da gota na poça de fusão
- 3) **I\_sc2** – corrente para o curto-circuito
- 4) **I\_boost** – corrente para a fase de *Boost*
- 5) **t\_I\_boost** - duração da fase de *Boost*
- 6) **d\_pulsup** – aumento linear da corrente pulsada
- 7) **t\_pulsup** - aumento não linear da corrente pulsada
- 8) **I\_p1** – corrente para a fase pulsada
- 9) **vd\_pulscycle** – velocidade do fio para a fase pulsada
- 10) **d\_pulswon** – decréscimo linear da corrente da corrente pulsada
- 11) **tau\_pulsdwn** - decréscimo não linear da corrente da corrente pulsada
- 12) **I\_base** – corrente para a fase de corrente base
- 13) **t\_base** – duração da fase da corrente base
- 14) **t\_p1** – duração da fase da corrente pulsada

### 2.5.3.3. *Fim do Cordão*

A valor da corrente e a sua duração no fim do arco elétrico influencia a formação da gota de soldadura, e a sua libertação para a poça de fusão através do auxílio da retração do fio, [20].

Vantagens do processo de soldadura CMT, [21].

- Baixa transferência de calor;
- Soldadura de baixa corrente de forma controlada;
- Capacidade de soldar chapa fina com pouca deformação;
- Junção de aço com alumínio;
- Soldadura quase isenta de salpicos;

Desvantagens do processo de soldadura CMT:

- Regulação dos parâmetros do processo complexa;
- Sensibilidade às correntes de ar;
- Custo dos gases de proteção;
- Custo do equipamento elevado;

## 2.6. Defeitos de Soldadura

A soldadura é considerada diversas vezes como o elemento mais fraco de uma construção, desde o início dos processos de soldadura. No entanto, os defeitos ou descontinuidades de soldaduras tiveram maior importância a partir dos anos 30 com a introdução dos novos processos de soldadura por fusão, [22].

Entre 1930 e 1950 ocorreram diversos acidentes graves em construções com juntas soldadas por fusão, devido à falta de informação sobre a qualidade e defeitos da soldadura. Alguns desses acidentes são por exemplo a ponte em Hasselt na Bélgica em 1938 e o navio Schenectady em 1943 (Figura 2.28), em que os acidentes foram causados maioritariamente por combinação de defeitos de soldaduras e aços inadequados às condições que estavam submetidos, [22].

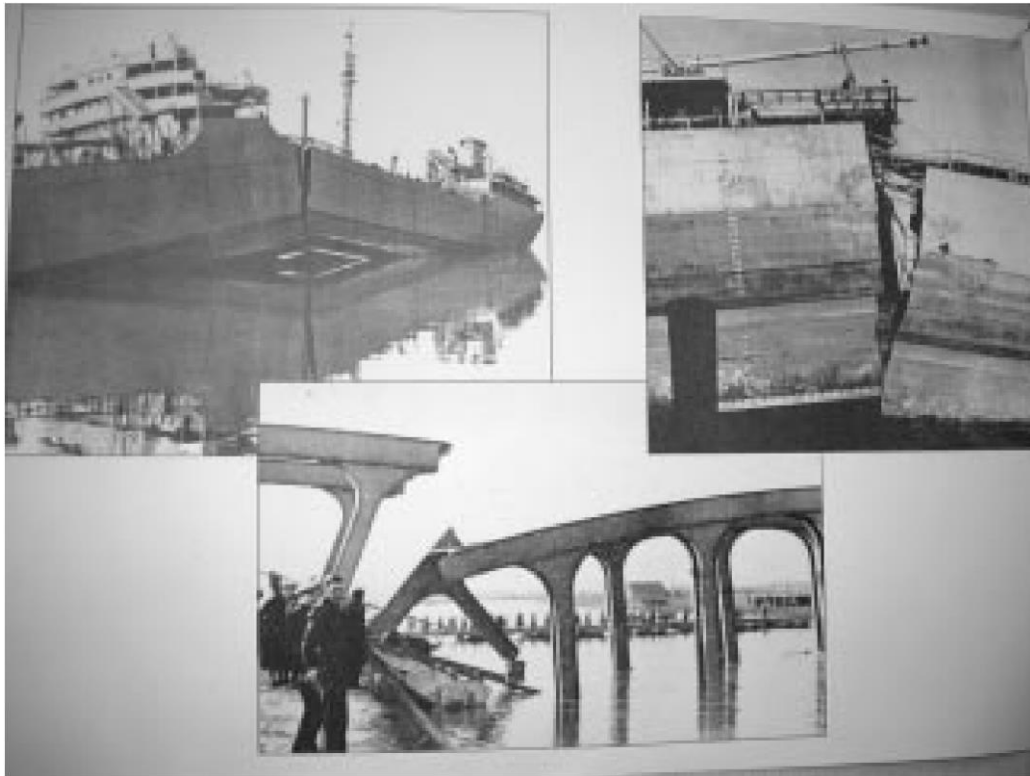


Figura 2.28 – Acidente do navio Schenectady e da ponte em Hasselt [22]

Através da experiência destes e de outros acidentes, no fim da década dos anos 40 diversas entidades como o International Institute of Welding (IIW) começaram os estudos para criação das normas para a qualidade da soldadura, resultando em diversas normas nacionais e internacionais. Sendo que a tendência é a aplicação das normas da International Organization for Standardization (ISO), [22].

A qualidade da soldadura, as discontinuidades e os critérios de aceitação variam consoante o tipo de aplicação. Podendo os critérios de aceitação ir mais além das normas ISO. No caso dos fabricantes de automóveis, estes possuem as suas normas internas de soldadura, nas quais são discriminados os critério de aceitação das diversas discontinuidades e assim se define o seu conceito de qualidade. Os requisitos do produto e a sua soldadura são definidos em fase de projeto, tendo os fornecedores que cumprir os requisitos do projeto e as suas normas.

Os defeitos de soldadura podem separar-se em dois grupos, os planares e os não planares, na Figura 2.29 estão identificados os defeitos que posteriormente serão caracterizados consoante as suas características e possíveis causas.

Os defeitos planares são os que não apresentam um volume mensurável enquanto os não planares possuem forma volúmica e dimensões no plano em que está o defeito, apresentando uma dimensão insignificante no plano que lhe é perpendicular, [11].

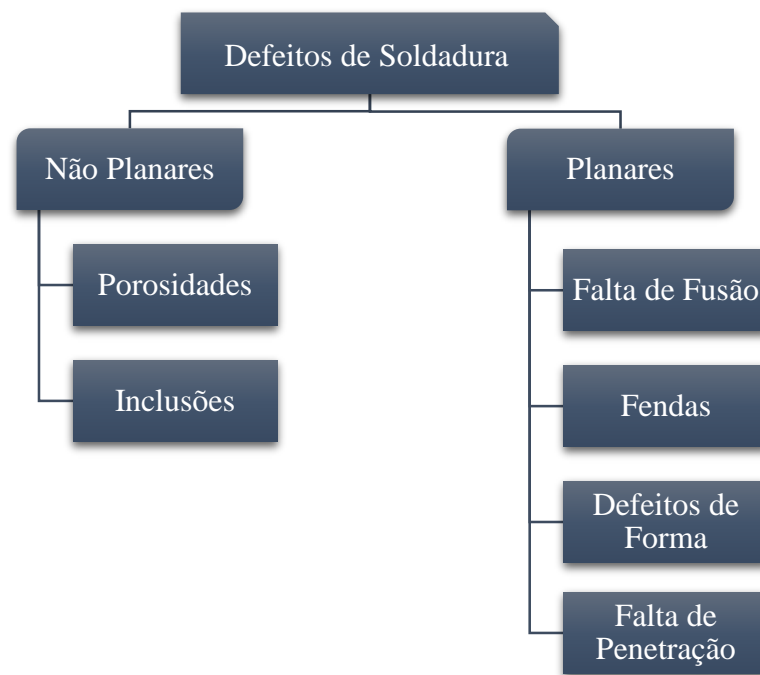


Figura 2.29 – Defeitos de Soldadura

### 2.6.1. Porosidades

As porosidades na soldadura são o resultado das bolhas de gás que ficam retidas no metal que está a solidificar, podendo ser causadas por técnicas de soldadura incorretas, materiais defeituosos, má limpeza da junta ou arco elétrico inadequado, [23].

Este tipo de descontinuidade pode ser encontrado a superfície da soldadura ou no seu interior conforme ilustrado na Figura 2.30, têm pouca influência na força da junta soldada, algum impacto na ductilidade mas bastante prejudicial para a resistência a fadiga, [23].

Os poros podem ser classificados quanto à forma e quanto à sua disposição, relativamente à forma podem ser esféricos ou alongados, quanto a disposição podem ser alinhados, uniformemente distribuídos ou em ninhos.

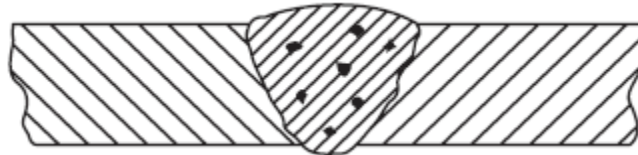


Figura 2.30 – Porosidades no interior da soldadura [23]

A porosidade é uma imperfeição não planar, daí a existência de poros serem permitidos, chegando a ser aceitável até 5% de poros do comprimento do cordão, [23].

### 2.6.2. Inclusões

As inclusões são partículas que ficam retidas no interior da soldadura (Figura 2.31), ocorrendo com mais frequência às inclusões de escória, no entanto poderão surgir inclusões de óxidos e inclusões metálicas.

As inclusões surgem geralmente quando não se aplica as técnicas de soldadura adequadas para que a escória suba para a superfície da poça de fusão, dificuldades de acesso à zona da junta e a falta de limpeza das superfícies da junta, podendo esta estar contaminada com impurezas que irão dar origem a inclusões, [23].

No caso específico da soldadura TIG é que ainda podem ocorrer inclusões de tungstênio, devido ao contacto direto entre o eletrodo e a poça de fusão ou corrente de soldadura demasiado elevada, [23].

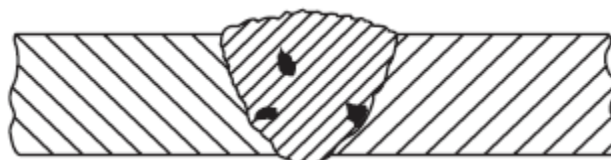


Figura 2.31 – Inclusões de escória [23]

### 2.6.3. Falta de Fusão

A falta de fusão consiste na falta de ligação entre o material de adição e o material base (Figura 2.32), ou caso não exista material de adição entre as duas peças a soldar. Este tipo de descontinuidade surge de técnicas de soldadura inadequadas, falta de preparação do material base, erro no formato da junta, falta de corrente de soldadura, falta de limpeza das juntas e o difícil acesso à junta. Uma vez que é uma zona de concentrações de tensões que em grande parte dos casos inicializa fendas, [23].

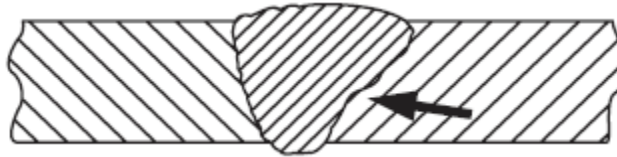


Figura 2.32 - Falta de fusão [23]

### 2.6.4. Fendas

As fendas podem ocorrer no material de adição ou no material base quando a tensão de rotura do material é atingida (Figura 2.33). Geralmente estão associadas a concentrações de tensões junto às descontinuidades na soldadura e ao material base ou pela própria geometria do cordão de soldadura, [23].

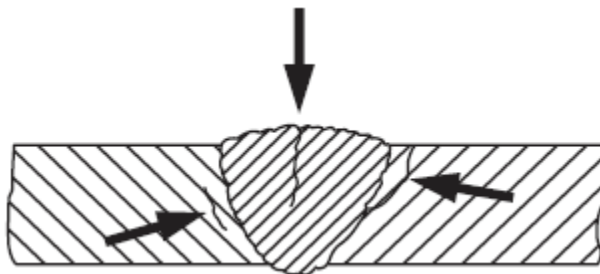


Figura 2.33 - Fendas [23]

Podendo ser classificadas como quentes ou frias dependendo do momento do processo em que ocorrem. As fendas quentes surgem a elevadas temperaturas durante ou imediatamente após a solidificação, apenas surgem na zona de fusão ou de fronteira com o material base nos limites de grão. As fendas frias desenvolvem-se após a solidificação resultando da concentração de tensões, propagando-se através e entre os grãos, [23].

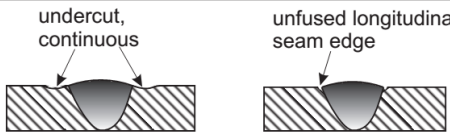
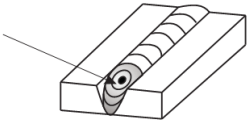
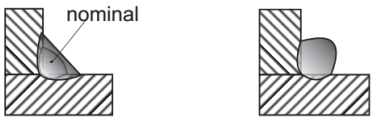
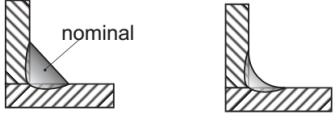
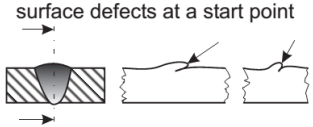
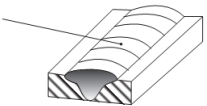
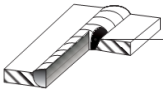
As fendas podem ser longitudinais ou transversais em relação à soldadura, podendo ser de vários tipos consoante a sua orientação, localização e geometria. As fendas longitudinais estão associadas a velocidades de soldadura elevadas que surgem durante o

processo de solidificação do metal. As fendas transversais são perpendiculares ao eixo de soldadura geradas pelas tensões longitudinais de contração do material. Fendas irradiantes são formadas pela interrupção repentina do arco e as fendas de raiz surgem na raiz da soldadura, [23].

### 2.6.5. Defeitos de Forma

Os defeitos de forma consistem nas falhas geométricas do cordão com o perfil da peça a soldar. Podendo surgir em diversos tipos de processo de soldadura, na Tabela 2.6 encontram-se exemplificados os defeitos de forma.

Tabela 2.6 – Defeitos de forma [24]

<b>undercut</b>	
<b>open end crater</b>	
<b>weld reinforcement</b>	
<b>too small throat thickness</b>	
<b>start defects</b>	
<b>excessive seam width</b>	
<b>burn through</b>	

### 2.6.6. Falta de Penetração

A falta de penetração ocorre quando a penetração do cordão de soldadura é inferior ao especificado, ocorre geralmente na raiz da junta dando origem a um espaço vazio entre os dois bordos da junta (Figura 2.34). Na soldadura por arco elétrico, o arco é estabelecido com a parte mais próxima do metal base e o eletrodo, todas as outras zonas do metal recebem calor principalmente por condutividade térmica, o que nos casos em que a raiz está distante do eletrodo a condutividade térmica poderá não ser suficiente para atingir a temperatura de fusão na raiz da junta, [25].

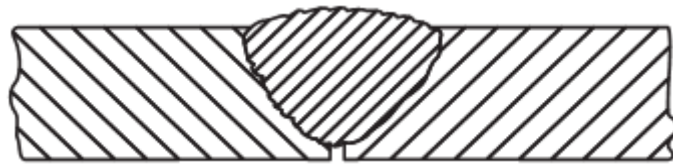


Figura 2.34 – Falta de penetração [23]

Tal como na falta de fusão, a falta de penetração é uma zona de concentrações de tensões que em grande parte dos casos inicializa fendas, e com carregamentos cíclicos origina falhas catastróficas da soldadura por falta de penetração. Este tipo de descontinuidade é influenciado por diversos fatores como o tipo de gás, a entrega térmica, o formato da junta e incorreta manipulação da tocha e do arco, [23].

# Capítulo 3

## Soldadura CMT Robotizada

A automatização de processos de soldadura é fundamental para cumprir com os requisitos da indústria atual, para tal a utilização de robots industriais têm sido fundamentais para atingir esses objetivos. Serão apresentadas algumas das aplicações mais comuns para os robots e as suas características, e de seguida o ensaio experimental com a utilização de um robot para soldadura CMT.

E comprovação da qualidade das juntas soldadas através de análise macrográfica e dureza.

### 3.1. Robots Industriais

Os robots industriais são componentes essenciais nas fábricas atuais e ainda mais nas fábricas do futuro. A aplicação de sistemas com robots deve-se muito ao seu potencial, flexibilidade e a capacidade de realizar tarefas de forma repetitiva a custos aceitáveis e com qualidade, [26]. As suas capacidades variam mediante as necessidades de aplicação, através da Tabela 3.1 é possível verificar as principais características dos robots.

Tabela 3.1 – Principais características dos robots [26]

<b>Repeatability</b>	Up to 0.03 mm (0.1 mm is common)
<b>Velocity</b>	Up to 5 m/s
<b>Acceleration</b>	Up to 25 m/s <sup>2</sup>
<b>Payload</b>	From around 2-3kg up to ~750 kg
<b>Weight/Payload</b>	Around 30-40
<b>Axis</b>	6
<b>Communications</b>	<i>Profibus, can, devicenet, ethernet</i> and serial channels (RS232 and RS485)
<b>IO Capabilities</b>	PLC like capabilities to handle digital and analog IO

A indústria que mais aplica robots nas suas fábricas é a indústria automóvel, realizando tarefas de montagem, soldadura e transporte de material (Figura 3.1), [26].

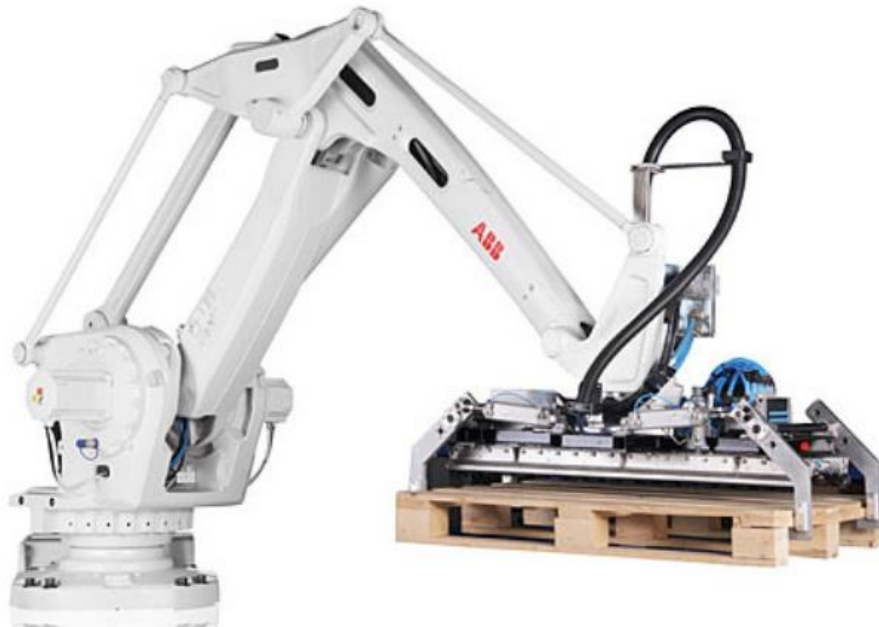


Figura 3.1 – Robot de manipulação ABB [27]

Por motivos de competitividade nas indústrias modernas, a soldadura manual têm vindo a ser reduzida, devido aos tempos necessários de setup, condições de segurança e custos. Robots de soldadura (Figura 3.2) foram desenvolvidos de modo a satisfazer a necessidade de soldaduras de alta qualidade em tempos de ciclo reduzido, deste modo a soldadura robotizada é fundamental para automatização da soldadura, sendo estimado que 25% de todos os robots industriais sejam utilizados em tarefas de soldadura, [26].



Figura 3.2 – Robot de soldadura Kuka [28]

No entanto surgem dificuldades na automação de processos de soldadura com a introdução de robots, porque aumenta a complexidade do processo produtivo e requer pessoas qualificadas para efetuar a programação e manutenção, [26].

## 3.2. Ensaio Experimental

O ensaio a efetuar consiste na realização de uma junta de topo em um dos componentes do automóvel, onde a segurança é fundamental visto ser um tubo onde irá posteriormente fazer parte estrutural do interior da cabine onde é montado o volante. E a penetração da soldadura ser fundamental para uma boa soldadura será utilizada a técnica à esquerda “backhand”.

O tubo tem um diâmetro de 70mm e 1,7mm de espessura, feito a partir de chapa de aço ST37-2 laminado a quente. Na Tabela 3.2 e 3.3 é possível verificar a composição química e as propriedades mecânicas do aço ST37.

O conhecimento da dureza do material é fundamental para efetuar uma correta preparação da amostra, no caso do aço ST37-2 normalizado têm valores de dureza entre os 140-150 Hardness Vickers (HV), [29].

Tabela 3.2 - Composição química ST37-2 [30]

Chemical elements	C≤ 16mm max	C>16mm max	Si max	Mn max	P max.	S max.
%,by mass	0.17	0.17	--	1.40	0.045	0.045

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas ST37-2 [30]

thickness	Yield StrengthReH[N/mm <sup>2</sup> ] transv.min.	TensileStrengthRm[N/mm <sup>2</sup> ]transv.	Fracture Elongation[%]transv. min.	Notch Impact Energy1)Ch Vcomplete samplelongitud. min [J]
t ≤ 16mm t > 16mm	235 225			Degree: 0 AV: 27J
t < 3mm t ≥ 3mm		360-510 340-470		
Up to 1.5mm			16	
1.51-2.00mm			17	
2.01-2.50mm			18	
2.51-2.99mm ≥ 3mm			19 24	

O cordão de soldadura a efetuar terá um comprimento de 100mm conforme ilustrado na Figura 3.3.

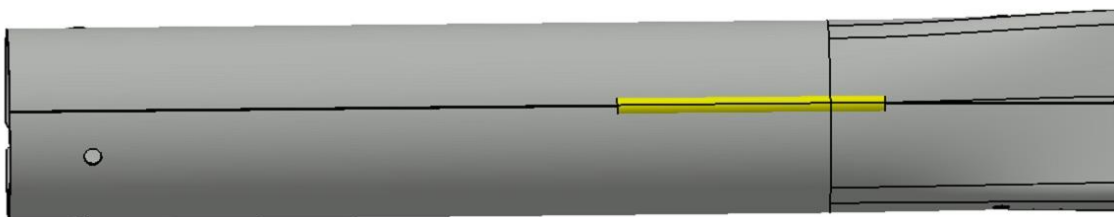


Figura 3.3 - Cordão de soldadura 3D

### 3.2.1. Equipamentos

Além de diversos acessórios e componentes secundários que são necessários para a automatização de um processo de soldadura, estes são os equipamentos primários utilizados que definem o ensaio experimental:

- Robot – ABB IRB 2600ID (Figura 3-4);
- Fonte de alimentação de soldadura – Fronius TPS 3200 CMT (Figura 3-5);
- Tocha de soldadura – Fronius Robacta Drive CMT (Figura 3-6);
- Fio de soldadura – Lincoln Electric G3Si1 (1mm);
- Gás de protecção – 100% CO<sub>2</sub>.



Figura 3.4 – ABB IRB 2600ID



Figura 3.5 – Fronius TPS 3200 CMT

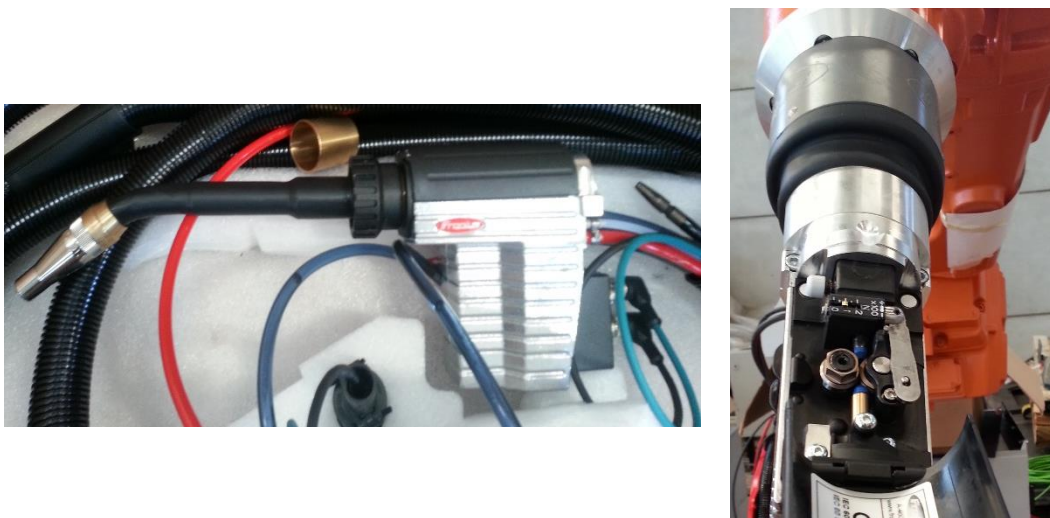


Figura 3.6 - Fronius Robacta Drive CMT

### 3.2.2. Parâmetros

A parametrização do processo de soldadura CMT é bastante complexo e com diversos parâmetros e exige um extenso conhecimento do processo, daí ser recomendado pelo fabricante utilizar a tabela sinérgica fornecida com o equipamento previamente preparada para o tipo de material a soldar e o setup a utilizar.

Após uma extensa análise efetuada durante a revisão bibliográfica os autores obtinham melhores resultados através da variação da velocidade de soldadura, no entanto neste tipo de aplicação que consiste numa célula de robotizada existem limitações, nomeadamente em tempos de ciclo que são necessários cumprir para que seja possível responder as necessidades de produção prevista. Desta forma a velocidade de soldadura será constante 12mm/s e pretende-se otimizar a corrente e tensão de modo a obter uma soldadura com qualidade. Conforme verificado por Ibrahim, Mohamat, Amir e Ghalib no ensaio efetuado de diferentes parâmetros para o processo MAG espera-se que ao aumentar a corrente exista um aumento da penetração, [10].

Deste modo foram efetuados 11 ensaios com os seguintes parâmetros Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros para os ensaios de soldadura

#	Velocidade Soldadura (mm/s)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade Fio (m/min)
1	12	43	10,3	1,0
2	12	72	11,3	2,5
3	12	111	12,9	4,0
4	12	141	13,9	5,5
5	12	169	15,4	7,0
6	12	192	17,0	8,0
7	12	195	18,0	8,5
8	12	197	19,0	9,0
9	12	204	20,4	10,0
10	12	210	21,0	11,0
11	12	213	22,4	11,2

### 3.2.3. Análise Macrográfica

Após efetuados os ensaios foram preparadas amostras de soldadura de cada um dos ensaios de modo a efetuar uma análise macrográfica uma vez que visualmente os cordões não apresentavam qualquer tipo de defeito conforme Figura 3.7.

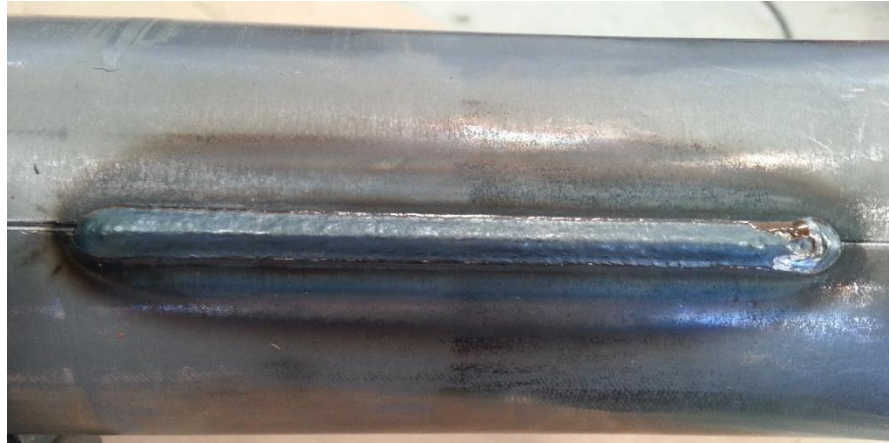


Figura 3.7 – Amostra de soldadura

Para preparação das amostras foram efetuados cortes transversais aos cordões, seguindo-se de um processo de embutição a frio de modo a possibilitar a preparação mecânica das amostras.

A preparação das amostras foi realizado com o auxílio da lixadeira rotativa Struers LaboPol-1 e sistema de fixação de amostras Struers LaboForce-3 (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Struers LaboPol-1 e Laboforce-3

O primeiro passo da preparação mecânica consiste no lixamento após a embutição da amostra, para tal foi utilizado o sistema de lixas MD (Figura 3.9). Durante 2 min e com uma força de 40N o MD-Piano 120 e lubrificação á água. Os seguintes passos consistem em processos de polimento sendo primeiramente utilizado o pano de polimento MD-Allegro durante 3 min com uma força de 30N e suspensão de diamante Diapro e para finalizar o polimento final através do pano MD-Plus durante 4 min com uma força de 20N e suspensão de diamante Diapro.

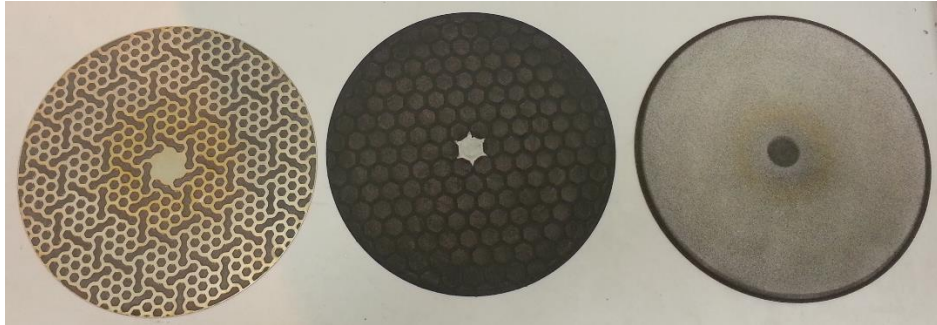


Figura 3.9 – Sistema de lixas MD

Obtendo deste modo uma superfície da amostra espelhada, sendo necessário realizar ataque químico de modo a obter contraste entre o material base e a soldadura, efetuado com uma mistura de ácido nítrico (3%) e álcool etílico.

Procedeu-se à análise macrográfica utilizando o equipamento Welding Expert 5 (Figura 3.10) e foram medidos os valores de penetração obtidos, conforme Anexo I.



Figura 3.10 – StruersWelding Expert 5

### 3.2.3.1. Resultados

A Figura 3.11 mostra o resultado da macrografia efetuada a Amostra #07, onde é possível verificar a penetração de 1,70 mm da soldadura, obtendo deste modo a penetração total das juntas a soldar.

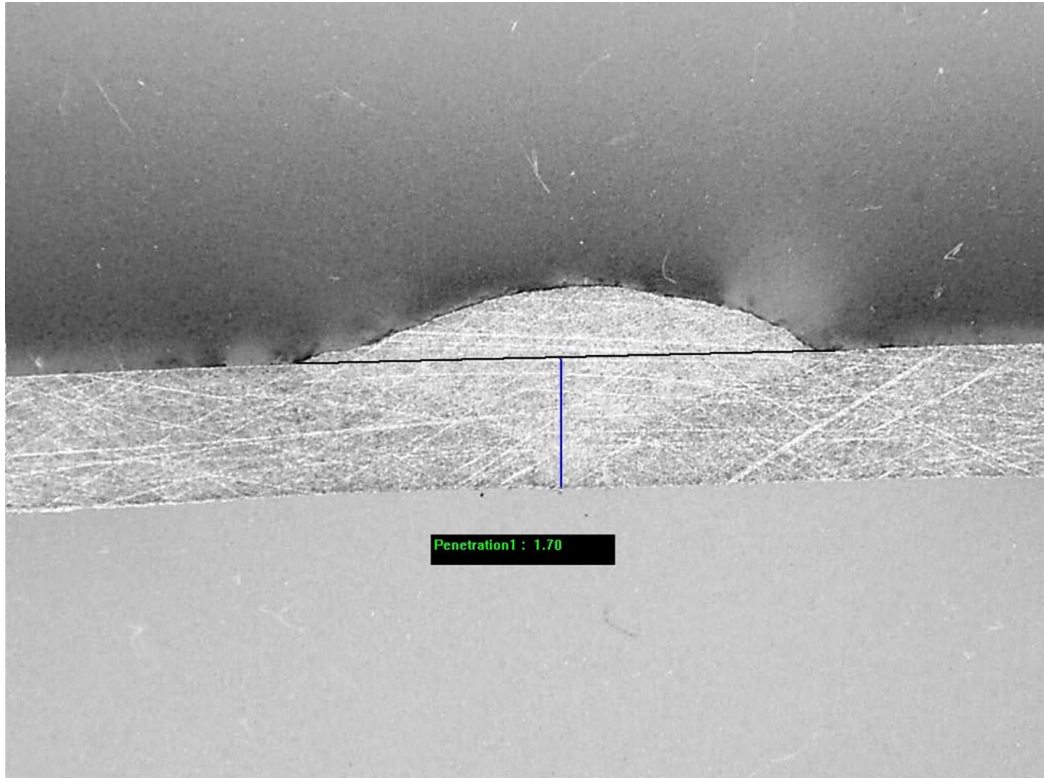


Figura 3.11 – Resultado Amostra #07

Com base nos seguintes resultados obtidos (Tabela 3.5) comprova-se o efeito da corrente na penetração da soldadura CMT, ou seja, o aumento da penetração com o aumento da corrente de soldadura (Figura 3.12), conforme analisado por Ibrahim, Mohamat, Amir e Ghalib [10] para a soldadura MAG.

Tabela 3.5 – Resultados da penetração

#	Velocidade Soldadura (mm/s)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade Fio (m/min)	Penetração (mm)
1	12	43	10,3	1,0	0,41
2	12	72	11,3	2,5	0,73
3	12	111	12,9	4,0	0,92
4	12	141	13,9	5,5	1,27
5	12	169	15,4	7,0	1,60
6	12	192	17,0	8,0	1,67
7	12	195	18,0	8,5	1,70
8	12	197	19,0	9,0	1,94
9	12	204	20,4	10,0	2,00
10	12	210	21,0	11,0	2,25
11	12	213	22,4	11,2	2,36

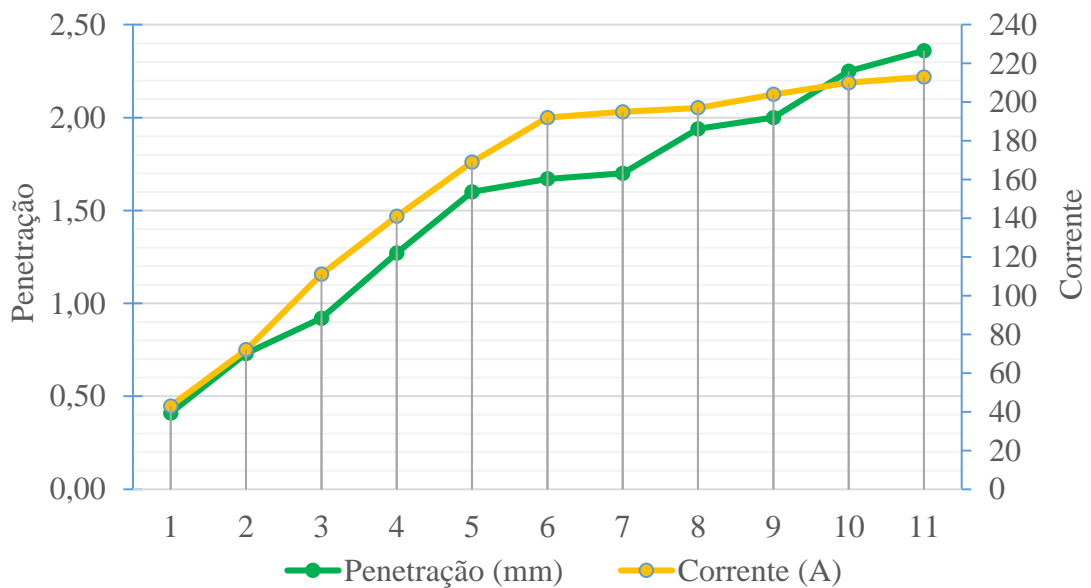


Figura 3.12 – Gráfico Penetração vs Corrente

No entanto a utilização de correntes de soldadura superiores a 195 A neste caso são desnecessárias uma vez que ultrapassam a espessura da chapa a soldadura (1,70 mm), e apenas irão causar um aumento da temperatura.

É possível analisar esse aumento de temperatura calculando a entrega térmica (Tabela 3.6) através da seguinte fórmula, [31].

$$\text{Entrega Térmica} = \frac{(\text{Tensão (V)} \times \text{Corrente (A)} \times 60)}{1000 \times \text{Velocidade Soldadura (m/min)}}$$

Tabela 3.6 – Cálculo da Entrega Térmica

#	Velocidade Soldadura (mm/s)	Corrente (A)	Tensão (V)	Entrega Térmica (J/mm)
1	12	43	10,3	36,9
2	12	72	11,3	67,8
3	12	111	12,9	119,3
4	12	141	13,9	163,3
5	12	169	15,4	216,9
6	12	192	17,0	272,0
7	12	195	18,0	292,5
8	12	197	19,0	311,9
9	12	204	20,4	346,8
10	12	210	21,0	367,5
11	12	213	22,4	397,6

Através da Figura 3.13 é possível analisar o efeito do aumento da corrente na entrega térmica, sendo o aumento da corrente proporcional ao aumento da entrega térmica, possuindo uma correlação direta.

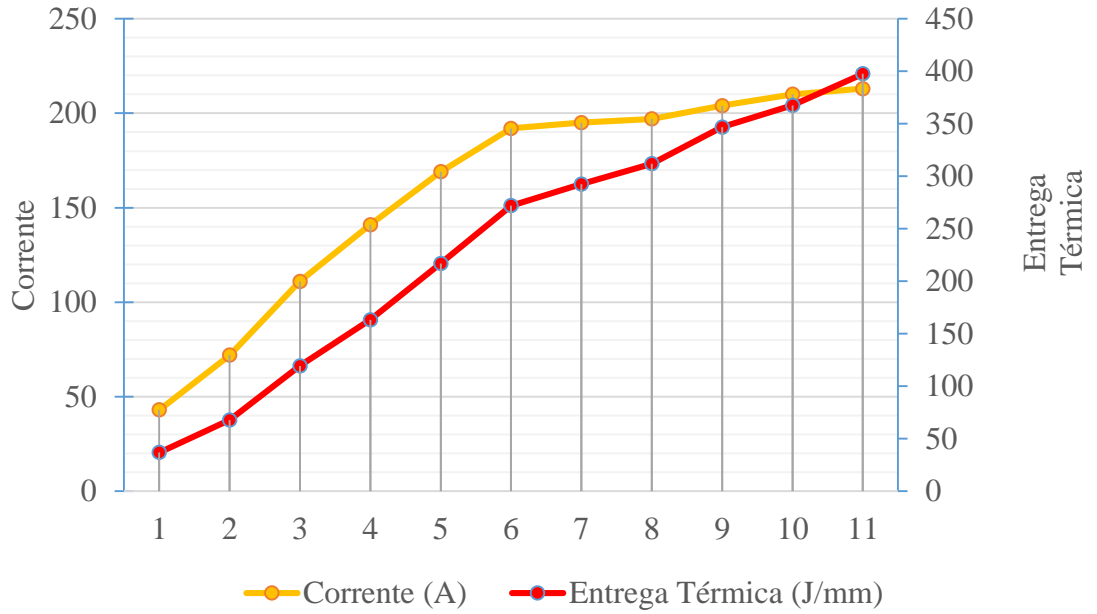


Figura 3.13 - Gráfico Corrente vs Entrega Térmica

Com o aumento da entrega térmica ao material base é visível o aumento da penetração da soldadura (Figura 3.14).

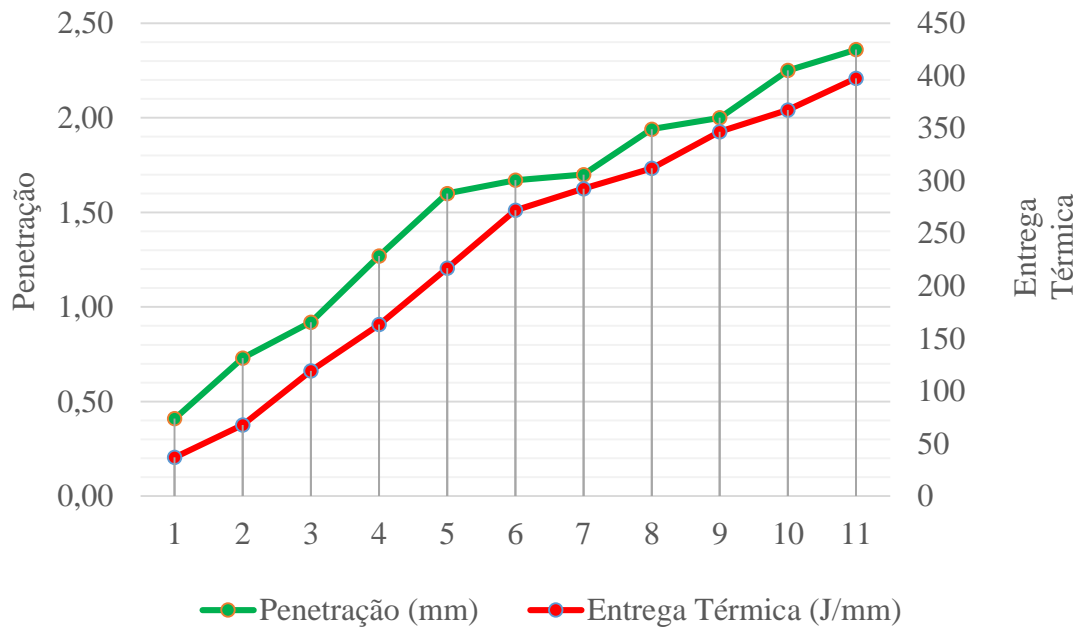


Figura 3.14 - Gráfico Penetração vs Entrega Térmica

### 3.2.4. Análise de Dureza

Foi utilizado o seguinte equipamento para efetuar o ensaio de dureza, Shimadzu Micro Hardness Tester (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Shimadzu Micro Hardness Tester

A metodologia para determinação da dureza de vickers nas amostras de soldadura foi através da aplicação de uma carga de 1Kg nas zonas específicas da amostra onde se pretende medir a dureza. Com base na medição da indentação (Figura 3.16) obtém-se o valor de HV através da lista de correspondência entre a dimensão da indentação e o valor de dureza correspondente.

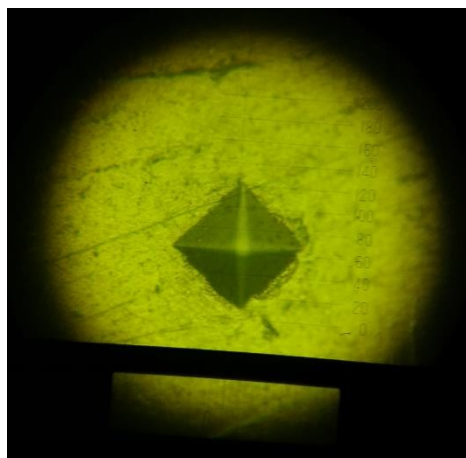


Figura 3.16 – Indentação efetuada

Através da análise de dureza pretende-se avaliar a influência do aumento da entrega térmica na dureza do cordão e da zona termicamente afetada (ZTA). Para tal foram efetuadas análises de micro dureza a 3 amostras de soldadura nas zonas indicadas na Figura 3.17.

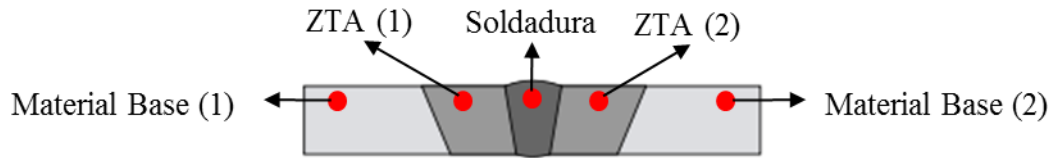


Figura 3.17 – Zonas do cordão de soldadura

### 3.2.4.1. Resultados

Com base nos resultados obtidos na Figura 3.18 verificou-se um aumento geral da dureza na ZTA e especialmente na zona de fusão do cordão, os valores de dureza mais elevados verificou-se na amostra 7, onde se obteve os valores de penetração da espessura da chapa.

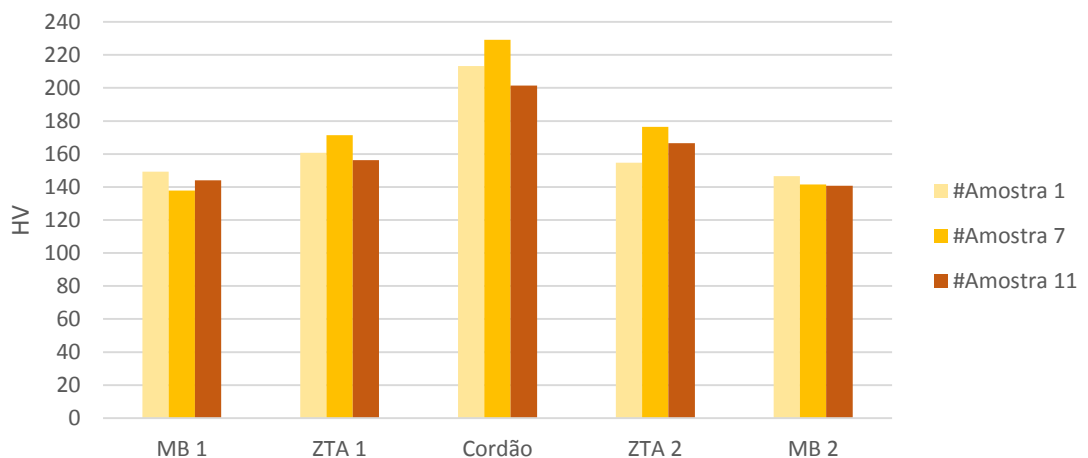


Figura 3.18 – Resultados do ensaio de dureza

O efeito do aumento da dureza no cordão em comparação com o material base assume-se que se deve pelo facto que o material de adição possuir uma dureza superior ao material base.

No caso da ZTA verificou-se diferenças de dureza na ordem dos 13% entre a ZTA e o material base, esta diferença considera-se que se deve pelo facto do processo CMT permitir soldar a temperaturas mais baixas e provocar uma menor alteração de dureza na ZTA. Porque em comparação com o processo MAG convencional o estudo realizado por Fakić, Burić, Muminović e Tomašević [32] foi detetado um aumento da dureza na ZTA na ordem dos 37%, conforme identificado na Figura 3.19.

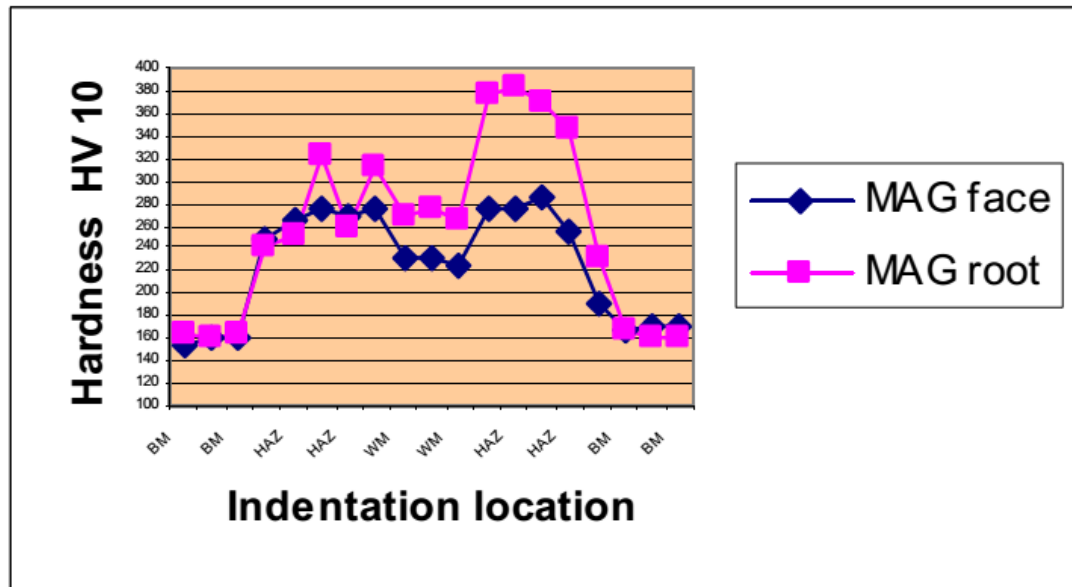


Figura 3.19 – Diagrama de distribuição da Dureza processo MAG [32]

# Capítulo 4

## Conclusões

A soldadura tem sofrido constantes evoluções ao longo das décadas de forma a satisfazer as necessidades da indústria. Para a indústria automóvel, devido à crescente necessidade de reduzir os consumos dos mesmos tem existido cada vez mais uma maior utilização de alumínio e aços com menor espessura, de forma a reduzir o peso dos automóveis e consequentemente baixar os seus consumos. De modo a satisfazer as necessidades do mercado é fundamental a otimização dos processos de forma a garantir o elevado volume de produção e redução de custos.

Entre as soldaduras analisadas a CMT é que apresenta melhores características para aplicar na automatização de processos de soldadura de peças com geometria complexa, em que é fundamental a baixa entrega térmica de modo a diminuir a deformação na peça e a isenção de salpicos.

De acordo com o ensaio experimental, para a soldadura de topo em chapa de aço ST37-2 com uma espessura de 1,70 mm o parâmetro que mais influenciou a penetração foi a corrente, que com 195 A obtém-se uma junta soldada com 1,70 mm de penetração.

A soldadura com o processo CMT cumpre os requisitos para a indústria automóvel e a sua necessidade de produção com velocidades de soldadura elevadas, no entanto não se recomenda para espessura de chapa superiores a 3 mm.

# Bibliografia

- [1] N. Bernardos and S. Olszewski, "Process of and Apparatus for Working Metals by the Direct Application of the Electric Current". US Patent 363320, 17 Maio 1887.
- [2] R. J. Sacks and E. R. Bohnart, *Welding Principles and Practices*, Third Edition ed., McGraw-Hill, 2005.
- [3] J. F. O. Santos and L. Quintino, *Processos de Soldadura*, vol. Volume I, Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade, 1998.
- [4] M. M. Schwartz, "Fundamentals of Soldering," in *Welding Brazing and Soldering*, vol. 6, ASM International, Ed., 1993.
- [5] R. Meredith, "Welding Torch". United States of America Patent 2274631, 1942.
- [6] J. S. Chen, Y. Lu, X. R. Li and M. Zhang, "Gas Tungsten Arc Welding Using an Arcing Wire," *Welding Journal*, Outubro 2012.
- [7] K. Wilkinson, "Modes of TIG Welding - DC," 26 Junho 2013. [Online]. Available: <http://www.trade-equip.co.uk/blog/?p=158>.
- [8] R. R. Irving, "Tig quality, MIG speed combined in hot wire welding process.," *Iron Age*, 1966.
- [9] J. Nadzam, *GMAW Welding Guide*, Lincoln Electric, 2006.
- [10] I. A. Ibrahim, S. A. Mohamat, A. Amir and A. Ghalib, "The Effect of Gas Metal Arc Welding processes on diferrent welding parameters," *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, 2012.
- [11] *Welding Handbook: Welding Processes*, Ninth Edition ed., Vols. 2 - Welding Processes, Part 1, American Welding Society, 2004.
- [12] K. H. Kim, *Welding Handbook: Filler materials for manual and automatic welding*, vol. Fifth Edition, ESAB.
- [13] "Catálogo de Gases de Soldadura," *Linde*.

- [14] M. Schorghuber , "Cold-Metal-Transfer Welding Process and Welding Installation". United States Patent US2009/0026188 A1, 29 Jan 2009.
- [15] C. G. Pickin and K. Young, "Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, 2006.
- [16] Fronius, "MIG/MAG dip-transfer process for automated applications," in *CMT: Cold Metal Transfer*.
- [17] J. Feng, H. Zhang and P. He, "The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding," *Materials and Design*, vol. 30, 2009.
- [18] Fronius, "Cold Metal Transfer: The Technology," 2012.
- [19] Fronius, *Welding Technology Magazine*, vol. 21, Setembro 2008.
- [20] Fronius, RCU 5000 i - Operating Instructions, Remote Control, 2007.
- [21] Fronius, CMT 4000 Advanced - Manual de instruções, Fonte de alimentação MIG/MAG, 2010.
- [22] K. Weman and G. Lindén, *MIG Welding Guide*, Cambridge: The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2006.
- [23] R. Singh, *Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards*, Elsevier, 2012.
- [24] *Welding Defects*, Aachen: ISF, 2002.
- [25] *Welding Inspection Handbook*, vol. Third Edition, American Welding Society, 2000.
- [26] J. N. Pires, A. Loureiro and G. Bolmsjo, *Welding Robots: Technology, System Issues and Applications*, London: Springer, 2006.
- [27] D. Liu, "FlexGripper - palletizing grippers," *ABB Group*, 2011.
- [28] K. R. GmbH, "Industry Brochure Arc Welding".
- [29] I. Kleis and P. Kulu, *Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control*, Springer, 2007.
- [30] "Henan BEBON International," [Online]. Available: <http://www.steel-plate-sheet.com/pdf/St37-2.pdf>. [Accessed 05 Setembro 2014].

- [31] R. S. Funderburk, "Key Concepts in Welding Engineering," in *Welding Innovation*, vol. XVI, 1999.
- [32] B. Fakić, A. Burić, B. Muminović and S. Tomašević, "Change of Physical-Metallurgical Properties of Low Alloy Steel 16Mo3 in the Heat Affected Zone in Welding Processes MMA AND MAG," *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, September 2011.
- [33] A. W. Society, *Welding Handbook: Welding Processes*, Ninth Edition ed., Vols. 2 - Welding Processes, Part 1, 2004.

# ANEXO I

## Análise Macrográfica

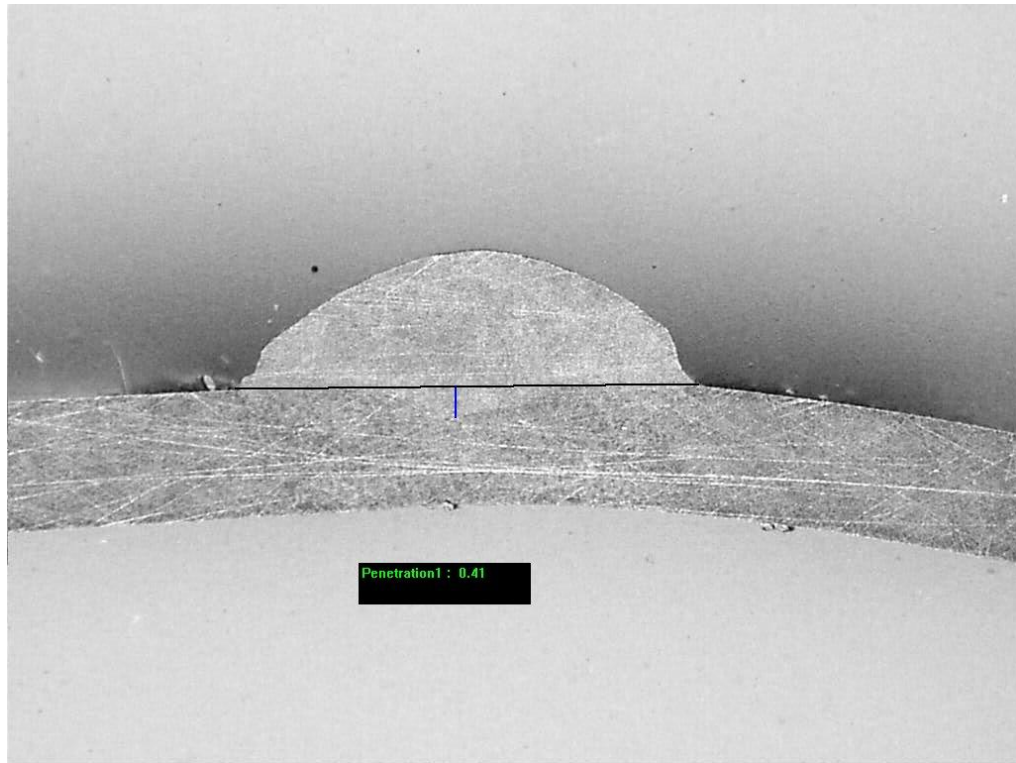


Figura A.0.1 – Amostra #01

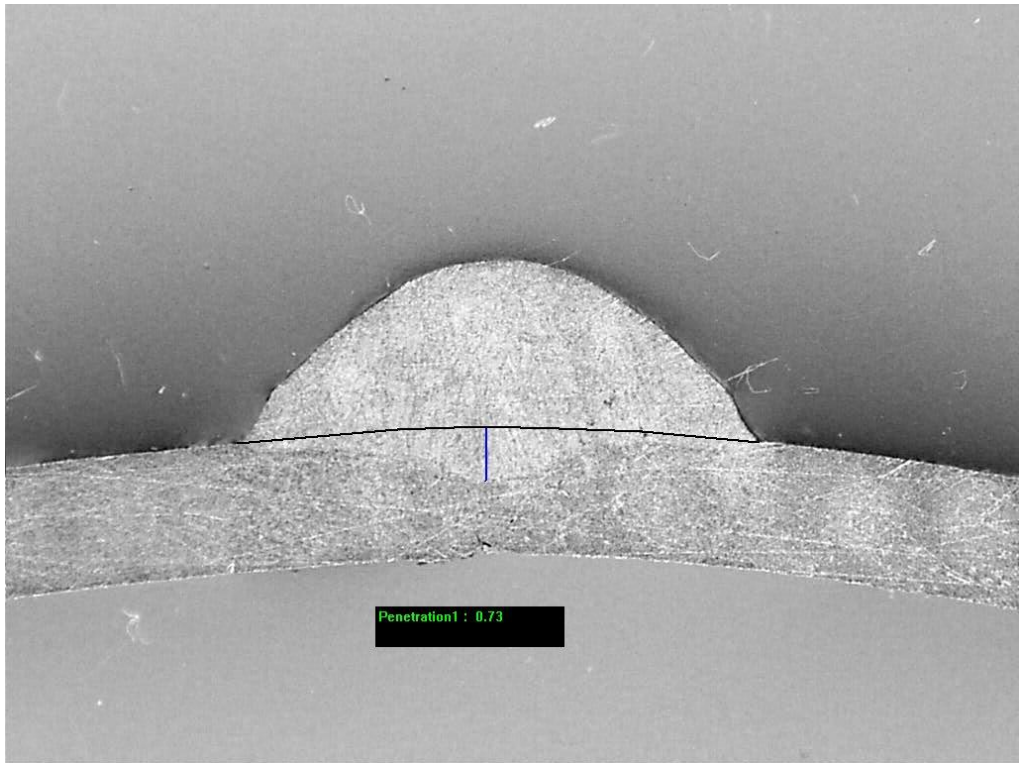


Figura A.0.2 – Amostra #02

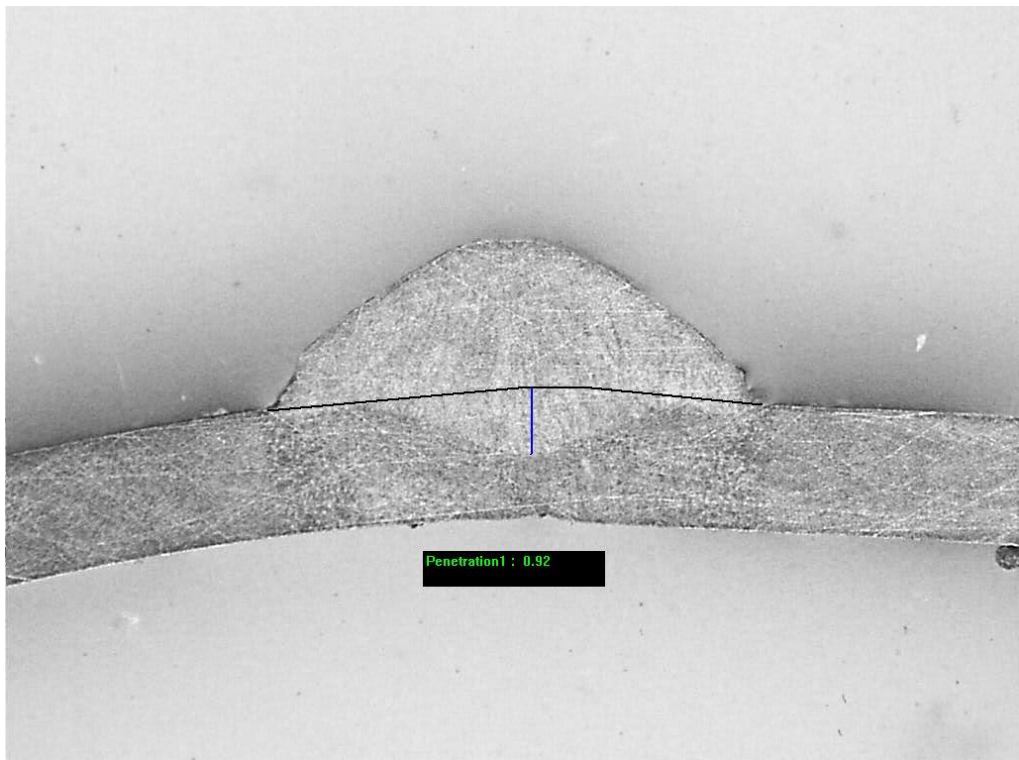


Figura A.0.3 – Amostra #03

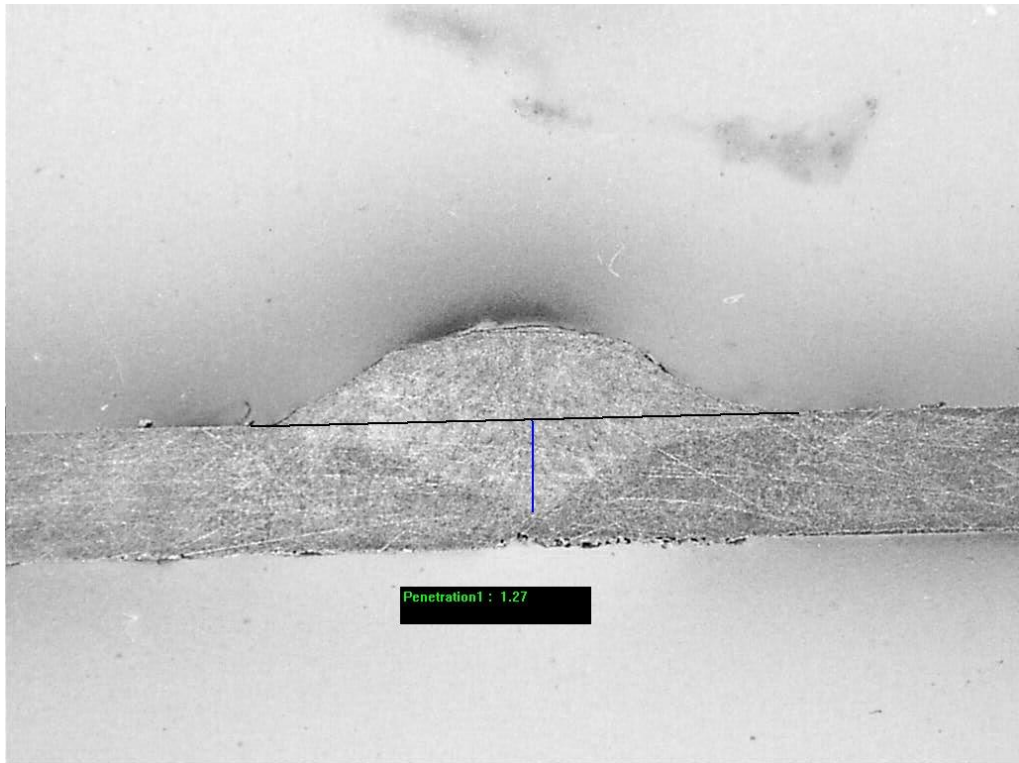


Figura A.0.4 – Amostra #04

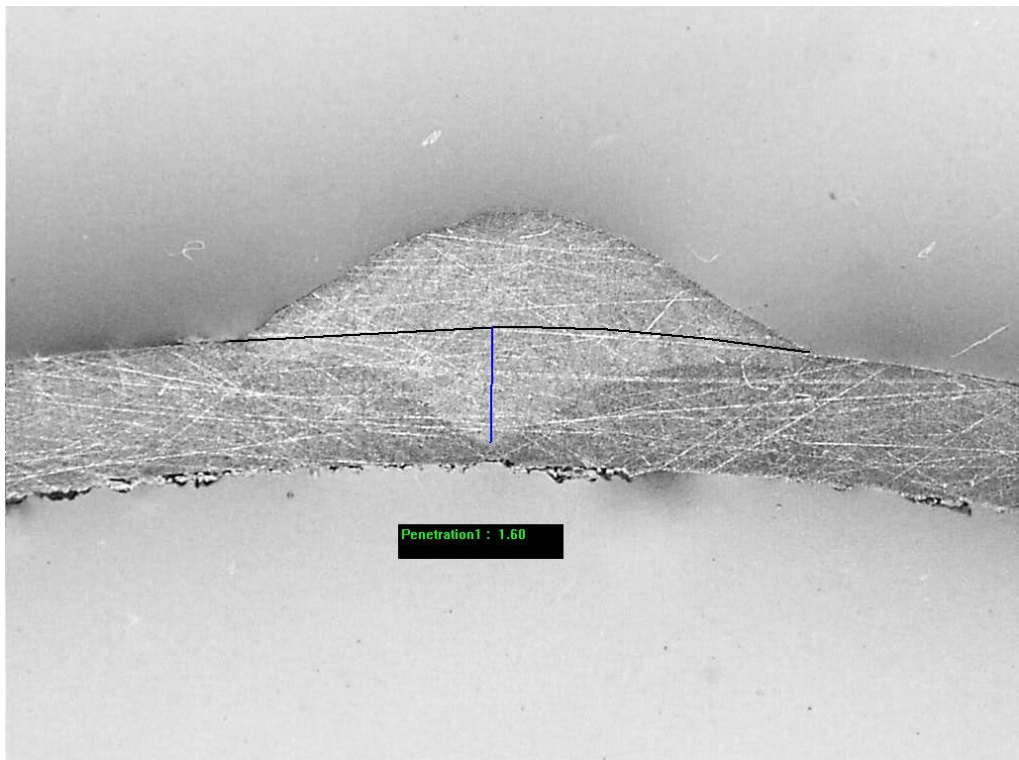


Figura A.0.5 – Amostra #05

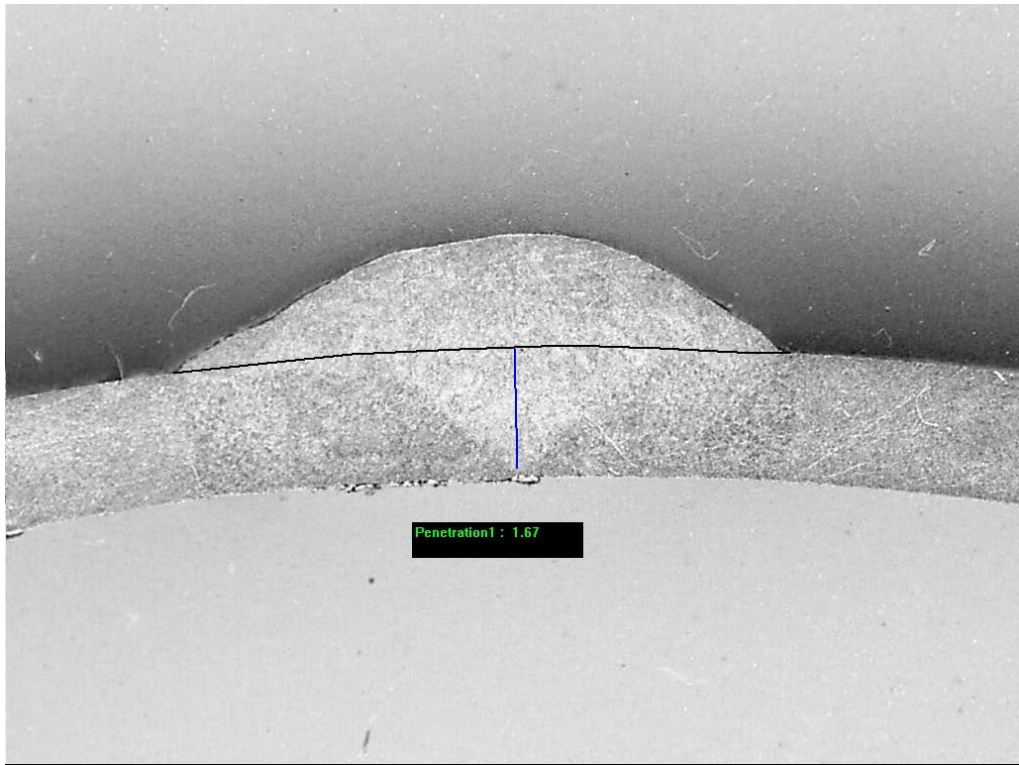


Figura A.0.6 – Amostra #06

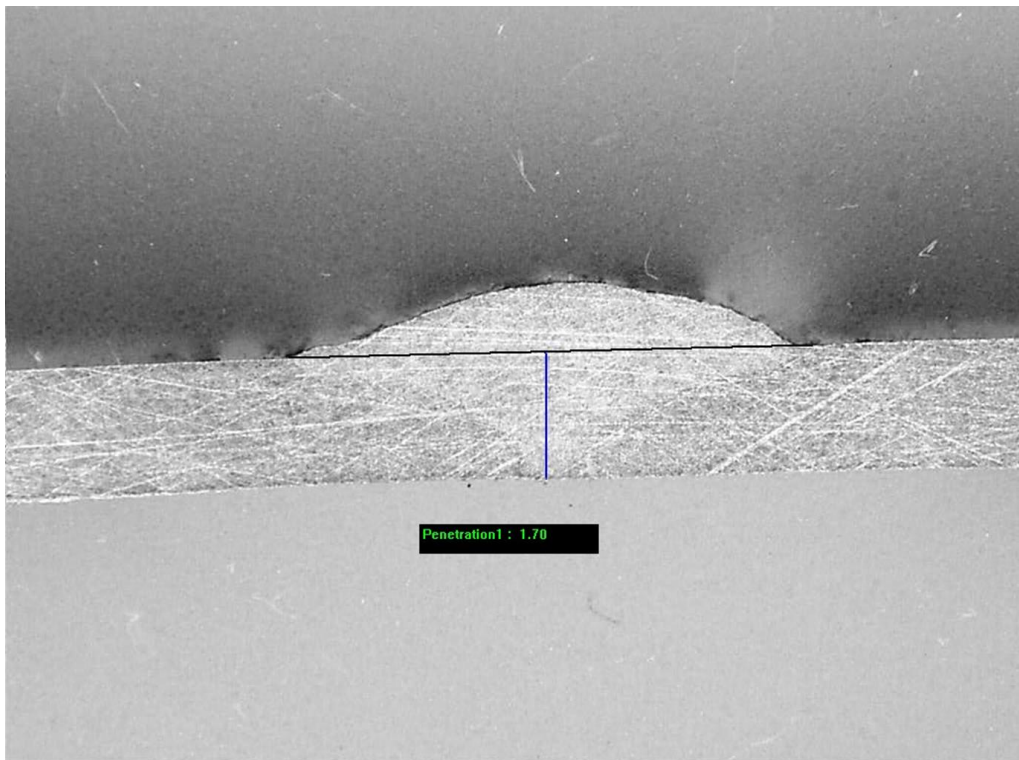


Figura A.0.7 – Amostra #07



Figura A.0.8 – Amostra #08

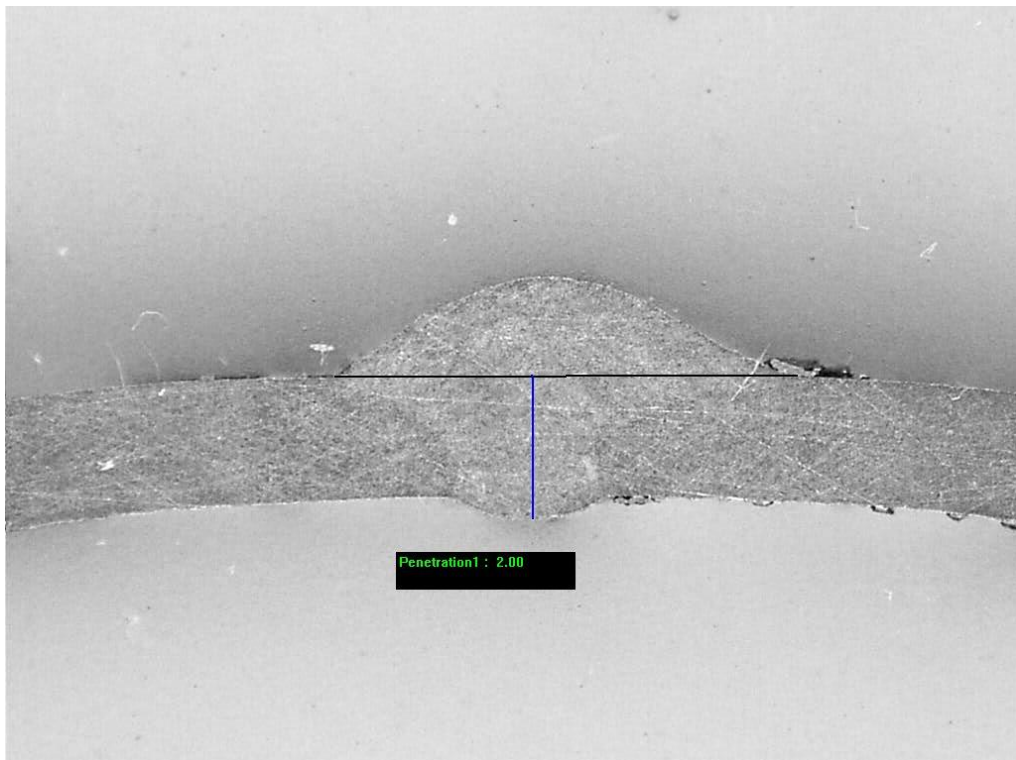


Figura A.0.9 – Amostra #09

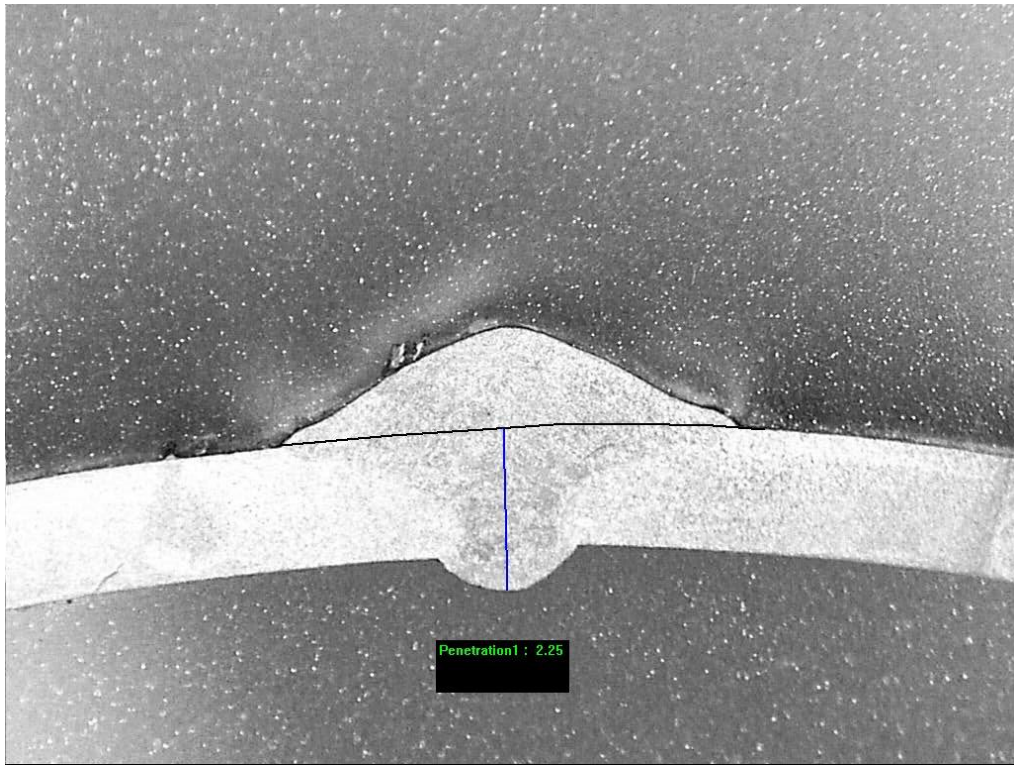


Figura A.0.10 – Amostra #10

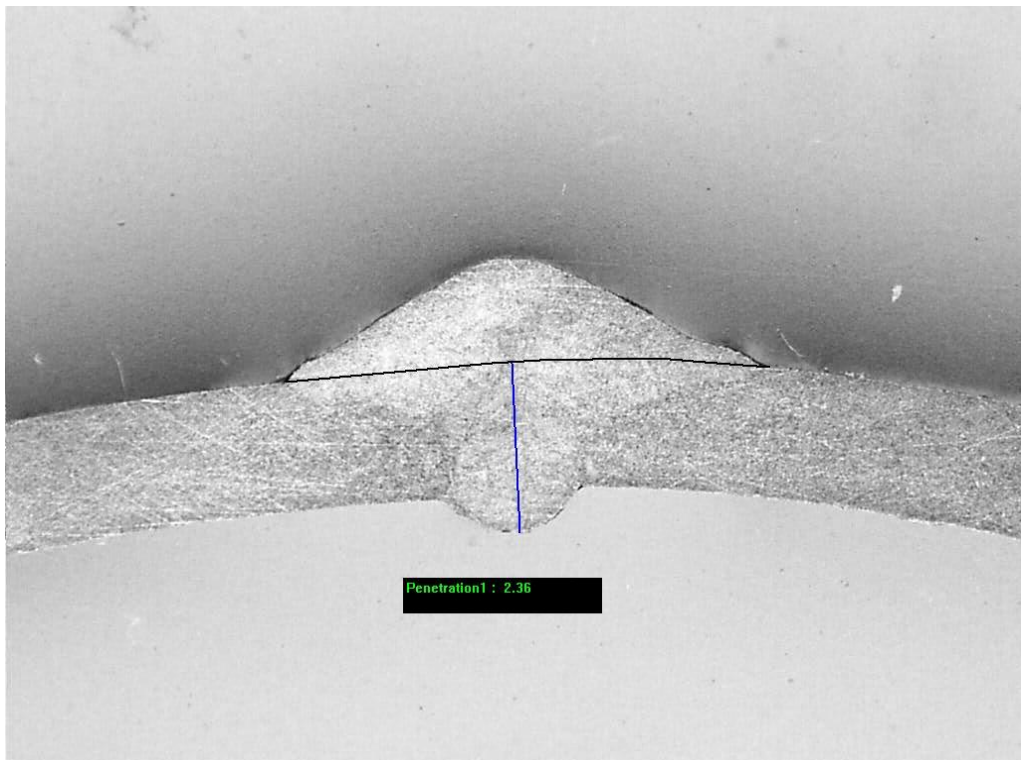


Figura A.0.11 – Amostra #11