



# **Análise de reparação por soldadura de moldes de injeção para termoplásticos**

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

João Pedro dos Santos Rasteiro

Leiria, setembro de 2022





# **Análise de reparação por soldadura de moldes de injeção para termoplásticos**

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

João Pedro dos Santos Rasteiro

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Mário António Simões Correia e da Professora Doutora Milena Maria Nogueira Vieira.

Leiria, setembro de 2022



*“Doubt is the origin of wisdom”*

René Descartes



# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente dissertação é original e elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a sua conceção.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, no ano letivo 2021/2022, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.



# Agradecimentos

Ao Professor Doutor Mário Correia e à Professora Doutora Milena Vieira, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, do Instituto Politécnico de Leiria, pela orientação ao longo de todo o processo.

A todos os intervenientes sem os quais não seria possível a realização do presente trabalho, com especial ênfase para o Engenheiro Albano Nogueira, por toda a ajuda e disponibilidade facultada.

Aos meus pais e irmão, por criarem um ambiente propício ao sucesso escolar e profissional, e à minha namorada por toda a paciência.

Aos amigos e familiares por todas as considerações construtivas.



# Resumo

A crescente demanda de termoplásticos tem exercido pressão na indústria de moldes, exigindo cada vez mais ferramentas com melhores acabamentos, em espaços de tempo mais reduzidos. Durante a produção do molde ou no funcionamento do mesmo, a geometria das zonas moldantes pode ficar comprometida por diversas razões, pelo que é preciso a sua reparação ou substituição. A substituição é uma opção mais demorada e dispendiosa, visto que implica novamente a realização de todas as operações, como maquinação, tratamentos térmicos (se aplicável) e acabamentos. Assim a opção mais comum é a reparação da ferramenta já existente por processos de soldadura, por se tratar de um processo rápido e económico, comparado com a outra solução apresentada.

O processo de soldadura utiliza uma fonte de calor para fundir o material localmente, que seguido da solidificação do banho de fusão, origina a ligação da peça com o material de adição. No entanto, apesar de ser uma solução rápida e com custos associados relativamente baixos, a introdução de calor na ferramenta origina uma zona termicamente afetada, com propriedades diferentes do material base. Estas diferenças podem complicar o processo de polimento, deixando marcas visíveis nas peças plásticas.

Neste trabalho será examinada a influência dos tratamentos térmicos, antes e após a soldadura, em três tipos de aços utilizados na indústria de moldes. O objetivo do presente trabalho reside na identificação da melhor sequência de operações, que resultem numa zona soldada o mais impercetível possível. No decorrer do trabalho serão analisados: um aço pré-tratado, um aço de trabalho a quente, e um aço inoxidável martensítico, soldados a TIG e Laser Nd:YAG.

A análise das amostras preparadas compreende a avaliação visual, seguido da medição de rugosidade, elaboração de perfis de dureza e por fim, após o seccionamento, análise metalográfica. Os resultados obtidos permitem determinar a melhor solução para cada material base.

**Palavras-chave:** Termoplásticos; TIG; Laser Nd:YAG; Tratamento térmico; Polimento;



# Abstract

The increasing demand for thermoplastics has put pressure on the mould industry, demanding more tools with better finishes, in shorter spaces of time. During mould production or in its operation, the geometry of the moulding zones can be compromised for various reasons, requiring it to be repaired, or replaced. Replacement is a more time consuming and expensive option, since it implies performing all operations again, such as machining, heat treatments (if applicable) and finishing. So, the most common option is to repair the existing tool by welding processes, as it is a quick and economical process compared to the other solution presented.

The welding process uses a heat source to melt the material locally, which, followed by the solidification of the fusion bath, causes the connection of the piece with the addition material. However, despite being a fast solution with relatively low associated costs, the introduction of heat into the tool gives rise to a heat affected zone, with different properties to the base material. These differences can complicate the polishing process and leave visible marks on the plastic parts.

In this work, the influence of heat treatments, before and after welding, on three types of steels used in industry of moulds will be examined. The objective of the work lies in identifying the best sequence of operations, which result in a welded zone as imperceptible as possible. In the course of the work, a pre hardened steel, a hot working steel, and a martensitic stainless steel, welded by TIG and Nd:YAG laser will be analysed.

The analysis of the prepared samples comprised visual evaluation, followed by roughness measurement, hardness profile elaboration and finally, after sectioning, metallographic analysis. The results obtained allowed to determine the best solution for each base material.

**Keywords:** “Thermoplastics”; “TIG”; “Nd:YAG Laser”; “Heat Treatment”; “Polishing”



# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos.....</b>	<b>xix</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado de arte.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Produção de aço .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Materiais típicos para as cavidades moldantes .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Processos de Fabrico de Moldes .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4. Termoplásticos .....</b>	<b>7</b>
<b>2.5. Processo de Injeção.....</b>	<b>11</b>
<b>2.6. Vida de cavidades moldantes.....</b>	<b>12</b>
2.6.1. Falhas catastróficas.....	12
2.6.2. Falhas de fabrico.....	13
2.6.3. Falhas de funcionamento .....	13
<b>2.7. Soldadura .....</b>	<b>14</b>
2.7.1. TIG.....	14
2.7.2. Laser Nd:YAG.....	16
2.7.3. Seleção de Material de adição .....	19
<b>2.8. Tratamentos térmicos.....</b>	<b>20</b>
2.8.1. Recozimento .....	21
2.8.2. Têmpera .....	22
2.8.3. Revenido.....	25
2.8.4. Tratamentos pós-soldadura.....	27
<b>2.9. Acabamento.....</b>	<b>28</b>
<b>2.10. Objetivo do trabalho .....</b>	<b>30</b>

<b>3.</b>	<b> Materiais, Métodos e Equipamentos .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.</b>	<b> Corte e Maquinação .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.</b>	<b> Materiais base .....</b>	<b>33</b>
3.2.1.	1.2083 ESR.....	34
3.2.2.	1.2343 ESR.....	34
3.2.3.	1.2738 Mod (SP300) .....	35
<b>3.3.</b>	<b> Tratamentos térmicos .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.</b>	<b> Soldadura .....</b>	<b>37</b>
3.4.1.	TIG .....	37
3.4.2.	Laser Nd-Yag .....	38
3.4.3.	Material de adição .....	39
<b>3.5.</b>	<b> Acabamento .....</b>	<b>41</b>
3.5.1.	Maquinação .....	41
3.5.2.	Retificação.....	41
3.5.3.	Polimento .....	42
<b>3.6.</b>	<b> Análises.....</b>	<b>43</b>
3.6.1.	Avaliação Visual .....	43
3.6.2.	Rugosidade Superficial .....	43
3.6.3.	Perfis de dureza .....	45
3.6.4.	Análise metalográfica.....	46
<b>4.</b>	<b> Resultados e Discussão .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.</b>	<b> Avaliação Visual .....</b>	<b>47</b>
4.1.1.	1.2738Mod .....	50
4.1.2.	1.2343 .....	50
4.1.3.	1.2083 .....	51
4.1.4.	Notas.....	52
<b>4.2.</b>	<b> Rugosidade .....</b>	<b>53</b>
4.2.1.	Ra – Rugosidade Média Aritmética .....	54
4.2.2.	Rz (ISO) – Rugosidade média das alturas máximas .....	57
4.2.3.	Rt – Rugosidade máxima do perfil.....	59
<b>4.3.</b>	<b> Perfis Dureza .....</b>	<b>61</b>
4.3.1.	Perfis com Material Base 1.2738Mod.....	61
4.3.2.	Perfis com Material Base 1.2343 .....	64
4.3.3.	Perfis com Material Base 1.2083 .....	67
<b>4.4.</b>	<b> Metalografia.....</b>	<b>70</b>

<b>5. Conclusões .....</b>	<b>74</b>
<b>6. Trabalhos Futuros .....</b>	<b>77</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>78</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo B.....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo C .....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo D .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo E.....</b>	<b>88</b>
<b>Anexo F .....</b>	<b>94</b>
<b>Anexo G .....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo H .....</b>	<b>97</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Sequência de Produção de Aços Ferramenta (Bohler, 2018).....	3
Figura 2.2 - Classificação dos termoplásticos (Cunha, 2003).....	8
Figura 2.3 - Classificação das causas de falhas .....	12
Figura 2.4 - Processo de Soldadura TIG (Grill, 2021).....	15
Figura 2.5 - Componentes Laser para Soldadura.....	18
Figura 2.6 - Diagrama de Fases Fe-C (Pimenta, 2014).....	21
Figura 2.7 - Ciclos térmicos de Recozimento: (a) Homogeneização; (b) Amaciamento; (c) Isotérmico; (d) Regeneração/ AFINAÇÃO; (e) Redução Tensões; (f) Normalização.....	22
Figura 2.8 - Tempo de estágio em função da espessura (thyssenkrupp Materials, 1997). .....	24
Figura 2.9 – (a) Martêmpera; (b) Austêmpera (Smith, 1998). .....	25
Figura 2.10 - Diagrama de Revenido (a) Aço não ligado TEW1191 ; (b) Aço ligado Thyrotherm 2343 EFS (thyssenkrupp Materials, 1997). .....	26
Figura 2.11 - Ra de acordo com ISO 4287 (Boér & Blaga, 2018). .....	29
Figura 2.12 - Rz, Rz1max e Rt de acordo com ISO 4287(Boér & Blaga, 2018). .....	29
Figura 3.1 – Geometria dos provetes para soldadura TIG e Laser Nd:YAG: (a) Provette após maquinação dos rasgos; (b) Desenho CAD dos rasgos .....	33
Figura 3.2 - INVERTIG.PRO digital 280 AC/DC .....	37
Figura 3.3 - Provette n.º43 após Soldadura TIG.....	38
Figura 3.4 - ALM300 v4.1 .....	38
Figura 3.5 - Provette n.º38 após Soldadura LASER.....	38
Figura 3.6 - Fluxograma de processos dos provetes.....	40
Figura 3.7 - Provette n.º21 após maquinação .....	41
Figura 3.8 - Provette n.º21 após retificação .....	41
Figura 3.9 - Engenho de Agitação .....	42
Figura 3.10 - Aspetto do provete durante Polimento.....	43
Figura 3.11 – Avaliação da rugosidade superficial dos provetes soldados: (a) MarSurf PS10; (b) Zonas de medição de rugosidade num provete soldado.....	43
Figura 3.12 - (a) EMCO Test Duravision20; (b) Exemplo medição de dureza .....	45
Figura 3.13 – (a)Máquina de corte Struers Labotom-3; (b) Polidora Mecânica Struers RotoPol-21; (c) lixas de papel de SiC.....	46

Figura 4.1 - Aspeto visual provete n.º22, classificação 5 .....	48
Figura 4.2 - Aspeto visual provete n.º43, classificação 2 .....	48
Figura 4.3 - Aspeto visual Provete n.º 16, defeitos superficiais .....	48
Figura 4.4 - Provete nº18, soldado a laser para segunda análise visual .....	53
Figura 4.5 - Perfis Dureza de provetes em 1.2738Mod com soldadura laser Nd:YAG .....	61
Figura 4.6 - Perfis Dureza de provetes em 1.2738Mod com soldadura TIG .....	62
Figura 4.7 - Perfis Dureza de provetes em 1.2343 com soldadura laser Nd:YAG .....	64
Figura 4.8 - Perfis Dureza de provetes em 1.2343 com soldadura TIG .....	64
Figura 4.9 - Perfis Dureza de provetes em 1.2083 com soldadura laser Nd:YAG .....	67
Figura 4.10 - Perfis Dureza de provetes em 1.2083 com soldadura TIG .....	67
Figura 4.11 - Diagrama de revenido 1.2083 .....	68
Figura 4.12 - Microestrutura Provete n.º 4: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Nital 5%; Ampliação 60x. ....	71
Figura 4.13 - Microestrutura Provete n.º 24: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Nital 5%; Ampliação 60x. ....	71
Figura 4.14 - Microestrutura Provete n.º 36: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Kalling's nº2; Ampliação 60x.....	71
Figura 4.15 - Microestrutura Provete n.º 44: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Kalling's nº2; Ampliação 60x.....	71

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos principais termoplásticos de grande consumo (Cunha, 2003) .....	9
Tabela 2.2 - Sumário de Parâmetros de soldadura TIG em trabalhos anteriores. ....	16
Tabela 2.3 - Sumário de Parâmetros de soldadura laser Nd:YAG em trabalhos anteriores. ....	19
Tabela 3.1 - Composição química 1.2083 ESR.....	34
Tabela 3.2 - Composição química 1.2343 ESR.....	35
Tabela 3.3 - Composição química 1.2738 Mod.....	35
Tabela 3.4 - Parâmetros soldadura TIG .....	37
Tabela 3.5 - Parâmetros Soldadura laser Nd:YAG.....	39
Tabela 3.6 - Composição química dos materiais de adição .....	40
Tabela 3.7 - Descrição das zonas de medição de rugosidade.....	44
Tabela 4.1 - Classificação obtida por avaliação da superfície dos provetes soldados. ....	49
Tabela 4.2 - Valores de rugosidade média Ra.....	54
Tabela 4.3 - Comparação do desvio médio aritmético Ra e números de grau de rugosidade.....	56
Tabela 4.4 - Atribuição de números de grau de rugosidade segundo o desvio médio aritmético Ra.....	56
Tabela 4.5 - Valores de rugosidade média das alturas máximas Rz.....	58
Tabela 4.6 - Valores de rugosidade máxima do perfil Rt .....	59
Tabela 4.7 - Tratamentos térmicos dos provetes para análise metalográfica.....	70

## Lista de siglas e acrónimos

ABS	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
DIN	<i>Deutsch Institute für Normung</i>
EAF	<i>Eletric Arc Furnace</i>
EFS	<i>Extra Fine Structure</i>
ESR	<i>Eletro Slag Remelting</i>
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
HB	<i>Brinell Hardness</i>
HDPE	Polietileno Alta Densidade
HRC	<i>Rockwell C Hardness</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LDPE	Polietileno Baixa Densidade
NADCA	<i>North American Die Casting Association</i>
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vínil
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
VAR	<i>Vacuum Arc Remelting</i>
VD	<i>Vacuum Degassing</i>
VDG	<i>Verbang Deutscher Glasbäser</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>



# 1. Introdução

A reparação de moldes de injeção por soldadura, quando a geometria das zonas moldantes é comprometida, permite diminuir os atrasos na produção da ferramenta. O processo de soldadura transmite calor à ferramenta para promover a fundição no local, que seguido da solidificação, origina a ligação da ferramenta ao material de adição. Nos processos de soldadura, devido ao calor transmitido, surgem zonas termicamente afetadas junto à zona soldada, com propriedades mecânicas distintas do material base. Neste trabalho pretende-se analisar a influência dos tratamentos térmicos, antes e após a soldadura para determinar a opção mais vantajosa resultando em melhores resultados.

O objetivo do presente trabalho reside na identificação da melhor sequência de operações, de forma que a zona soldada e a zona termicamente afetada sejam o menos visível possível, após a operação de polimento ótico. O polimento ótico é exigido em ferramentas para a injeção de peças transparentes, lentes, entre outros, o que exige uma superfície livre de defeitos. Em muitos casos, a zona termicamente afetada pode ser visualizada, pelo que pode afetar a qualidade da peça termoplástica produzida. Adicionalmente, será feita um estudo da rugosidade superficial, perfis de dureza e análise metalográfica, para verificar se existe alguma relação entre o aspeto superficial e determinadas características do material.

Para solucionar este problema presente na indústria de moldes, foi estudada a influência dos tratamentos térmicos em três aços, usados com frequência nesta indústria, com dois processos de soldadura.

A seleção de materiais para o presente estudo compreende um aço para ferramenta fornecido no estado pré-tratado, um aço para ferramenta de trabalho a quente e com elevada resistência, e um aço inoxidável martensítico utilizado na injeção de materiais mais corrosivos. Os processos de soldadura utilizados foram TIG (*Tungsten Inert Gas*), frequentemente utilizado em reparações de maiores dimensões, e laser Nd:YAG para reparações mais delicadas.

O documento foi organizado em seis capítulos, em que o 1.º é a introdução, onde se encontra exposto o contexto e os objetivos do trabalho.

O 2.º Capítulo incorpora o Estado da arte, onde foi recolhida informação para criar um enquadramento teórico dos assuntos abordados. A informação foi recolhida de documentos publicados de outros autores, que auxiliam para uma melhor compreensão dos capítulos posteriores.

O 3.º Capítulo descreve os materiais, métodos e equipamentos utilizados para a obtenção dos resultados.

O 4.º Capítulo expõe os resultados e discussão das análises realizadas. As análises compreendem a avaliação visual, medição de rugosidade, elaboração de perfis de dureza e análise metalográfica.

No 5.º Capítulo é dada uma reflexão geral sobre o que foi possível assimilar com a elaboração do trabalho.

O 6.º Capítulo apresenta algumas considerações para trabalhos futuros, que complementem os resultados obtidos no presente trabalho.

## 2. Estado de arte

### 2.1. Produção de aço

O processo de produção de aço pode variar nos métodos utilizados e etapas realizadas, consoante o resultado que se pretende obter. No entanto, excluindo casos específicos, a sequência mais comum para a produção de aços ferramenta aparece ilustrada na Figura 2.1. O processo inicia-se pela fusão num EAF (*Electric Arc Furnace*), passando por vários tratamentos especiais para afinar a composição química e melhorar a microestrutura até estar pronto para ser comercializado (Bohler, 2018).

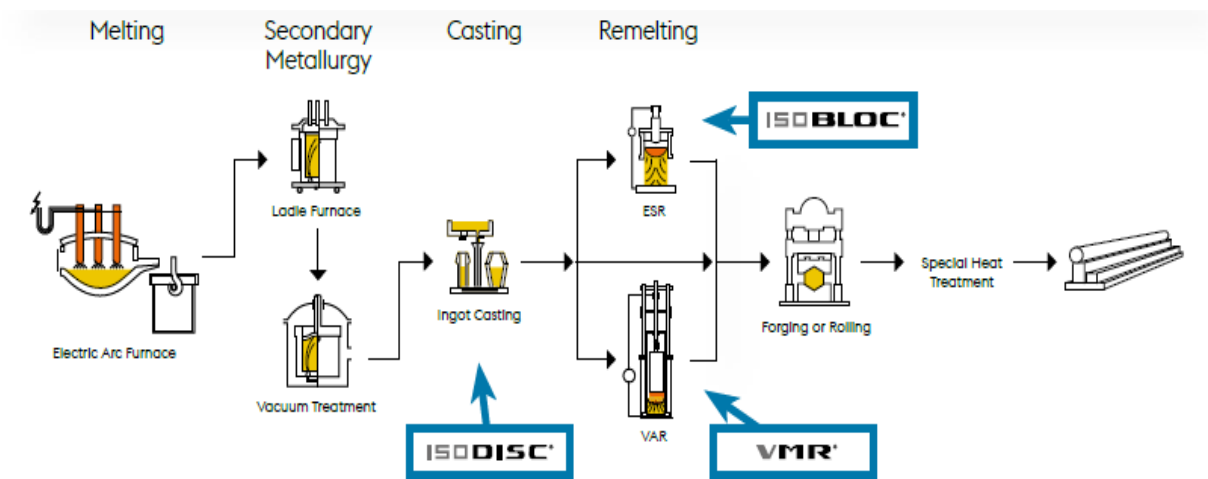


Figura 2.1 - Sequência de Produção de Aços Ferramenta (Bohler, 2018).

Num EAF a sucata é fundida no interior do forno através da energia transmitida pelo arco estabelecido com elétrodos de grafite, no entanto, considerando que numa fase inicial a sucata está no estado sólido, deve ser utilizada uma voltagem intermédia até conseguir submergir o elétrodo no interior da escória. A fusão pode ser facilitada com o uso de combustíveis à base de oxigénio, que promovem reações de combustão, e consequente transmissão de calor por radiação e convecção. Após a fusão total da sucata é retirada uma amostra para análise química, que possibilita a preparação dos elementos de liga a adicionar no acerto da composição química. Com a refinação pretende-se remover os teores excessivos de fósforo, enxofre, alumínio, silício, manganês e carbono do aço, através da adição de diferentes químicos e gases, para promover reações químicas que resultem na remoção destes mesmos elementos não desejados. No final, o aço é vertido para um *ladle furnace* onde é feita a adição de elementos de liga para o acerto de composição química (A. T. Jones,

2007; Singh, 2016). Embora a laminação contínua seja o processo mais usado, para os aços ligados este processo é o utilizado para evitar segregações químicas. O vazamento em lingotes é efetuado pela parte inferior do molde, de forma a evitar defeitos tanto na superfície, como no interior.

Complementarmente, os lingotes podem ser submetidos a tratamentos de refusão com o objetivo de aprimorar a qualidade do aço. Entre os processos de refusão, os mais comuns são o VAR (*Vacuum Arc Remelting*) e ESR (*Eletro Slag Remelting*). No processo de ESR, o lingote é imerso numa escória fundida constituída por óxido de cálcio, óxido de alumínio e fluoreto de cálcio ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaF}_2$ ), sobre a qual é aplicada corrente, resultando na fusão contínua do lingote. O material que se vai fundindo escorre sobre a escória para um molde arrefecido a água, enquanto as inclusões e impurezas ficam retidas nesta, permitindo obter uma estrutura fina, com quantidade de defeitos, segregações e inclusões muito reduzidas (Choudhury, 1992; Seetharaman, 2005; Weber et al., 2009). O processo de VAR tem um funcionamento parecido ao ESR, com a distinção de a refusão ser efetuada através de um arco elétrico em vácuo, esta característica permite melhor desempenho na remoção de gases dissolvidos e de inclusões de óxidos em comparação com o que foi anteriormente mencionado, no entanto, a redução do teor de enxofre e de inclusões não metálicas é inferior (Choudhury, 1992). Posteriormente são efetuados os processos mecânicos nomeadamente a laminação, com o objetivo de conferir a geometria desejada à barra de material. Conforme a liga são efetuados os tratamentos térmicos adequados para o estado de fornecimento (Bohler, 2018).

## **2.2. Materiais típicos para as cavidades moldantes**

A escolha do material para cavidades e buchas moldantes é determinada pelo material a injetar, as propriedades mecânicas necessárias e a vida útil da ferramenta que, na maioria dos casos, é estimada pelo número de ciclos de injeção (Granja et al., 2003). De forma generalizada, o Anexo A indica a escolha mais acertada tendo em conta alguns dos fatores mencionados.

Adicionalmente, existem aspetos a ter em consideração na escolha de um aço, tal como a produção do molde, os tratamentos requeridos, e as dimensões da barra antes de ser maquinada. As barras para zonas moldantes, que são ferramentas sujeitas a elevadas solicitações mecânicas, ou com exigência de polimento ou textura, devem ser desgaseificadas (VD). Complementarmente, para aplicações com exigência de polimento ótico, as barras devem ser sujeitas ao tratamento de refusão em vácuo (VAR) e em aplicações para fundição injetada, o teor em enxofre (S) deve ser inferior a 0,008%, estando de acordo com as exigências da associação de fundição injetada Alemã (VDG) e Norte Americana (NADCA) (Granja et al., 2003). No entanto, como o foco do presente trabalho é na injeção de termoplásticos, estas exigências não serão aprofundadas por não se aplicarem.

Na requisição do material, devem ser previstas as margens necessárias a retirar de sobremetal/ carepa, segundo a norma DIN 7527 – “Forja de aço, diretivas técnicas para entrega, forma e produção de barras forjadas” (excerto no Anexo B). A carepa consiste numa camada exterior descarbonada, com heterogeneidades, fissuras e outros defeitos resultantes do processo de produção da barra de aço (Granja et al., 2003). Para a produção de moldes para termoplásticos, considerando a vida útil normalmente exigida pelo cliente final, as “classes” de aços mais comuns são os aços pré-tratados, os aços de têmpera, e aços inoxidáveis martensíticos pré-tratados e de têmpera.

Os aços pré tratados como o DIN 1.2311 e o DIN 1.2738 apresentam grande relevância em moldes de grande dimensão e elevada complexidade, com os quais é possível atingir vidas até 250.000 ciclos de termoplásticos abrasivos, com cargas ou para termoendurecíveis sem cargas, caso sejam nitrurados. A vida do molde pode ainda ser estendida com a aplicação de revestimentos duros, quando são exigidas produções mais longas. Estes materiais caracterizam-se por combinar boa resistência ao choque, com aptidão à textura e ao polimento (Granja et al., 2003).

Os aços inoxidáveis martensíticos como o DIN 1.2083 combinam excelentes propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão, devido ao elevado teor em cromo na sua composição química. Esta característica torna-o ideal para moldes de injeção de plásticos mais corrosivos, o que permite aumentar a vida útil da ferramenta. A vida útil pode ser aumentada através da aplicação de revestimentos duros como nitreto de cromo e de titânio (CrN, TiN), devido ao aumento da resistência à corrosão e desgaste. Nos aços inoxidáveis, a nitruração reduz a resistência à corrosão, porém melhora outras propriedades, nomeadamente a resistência ao desgaste (Granja et al., 2003; thyssenkrupp Materials, 1997).

Os aços de têmpera apresentam grande versatilidade em termos de propriedades. Materiais como o DIN 1.2767 e DIN 1.2721 são empregues quando é necessária elevada dureza nomeadamente, em moldes com elevada cadência de peças termoplásticas, exceto para materiais abrasivos ou corrosivos. Os aços DIN 1.2343 e DIN 1.2344 têm a mesma aplicação que os anteriormente referidos, no entanto também podem ser utilizados em moldes para a injeção de termoplásticos abrasivos como o nylon e policarbonatos. Ao contrário do DIN 1.2767 e DIN 1.2721, o DIN 1.2343 e DIN 1.2344 podem ser nitrurados e revestidos, o que lhes confere uma vida útil superior (Granja et al., 2003).

### **2.3. Processos de Fabrico de Moldes**

Os processos de alteração de forma resumem-se em três grupos: corte, ligação e enformação. Na indústria de moldes, os processos de alteração de forma com maior importância são os de remoção de material, com especial ênfase para o corte por arranque de aparas, a eletroerosão e a retificação (Granja et al., 2003).

Entre os processos de corte por arranque de aparas, os mais importantes incluem a fresagem, torneamento e furação. A fresagem é uma operação em que a ferramenta de corte roda em torno de um eixo, enquanto a peça se desloca segundo um determinado movimento, linear ou circular. Nos últimos anos tem-se assistido a um grande desenvolvimento na construção de fresadoras e centros de maquinação (CNC), que permitem a execução de várias operações com elevada eficácia e qualidade. O torneamento é um processo de corte, para a produção de formas de revolução. A ferramenta de corte apresenta apenas uma aresta de corte, geralmente sem movimento de rotação, em que o corte se dá pelo movimento da peça a toronar. A furação é o termo utilizado para descrever todos os métodos de execução de furos cilíndricos em peças. O corte compreende um movimento rotativo principal da ferramenta

ou da peça, combinado com um movimento de avanço linear, segundo uma diretriz retilínea coincidente com o eixo de rotação (Granja et al., 2003).

A retificação é um processo tecnológico, em que o material é removido por ação de uma mó abrasiva, obtendo-se bons estados de superfície e tolerâncias dimensionais pequenas. Os materiais mais utilizados para as mós são óxidos de alumínio e carbonetos de silício. A retificação plana é o mais comum, embora possam ser utilizadas mós cilíndricas para a obtenção de formas de revolução (Granja et al., 2003).

A eletroerosão é um processo de corte que utiliza a energia elétrica para a remoção de material de uma peça, através de sucessivas descargas elétricas entre um eléctrodo e a peça, imersos num fluído dielétrico. A forma do eléctrodo é reproduzida negativamente na peça, à medida que o eléctrodo penetra na peça. Cada descarga elétrica gera energia térmica, que provoca a fusão e ebulição dos materiais da peça e do eléctrodo. Durante o processo não ocorre contacto físico, pelo que as forças de corte são nulas (Granja et al., 2003).

## **2.4. Termoplásticos**

Os termoplásticos são materiais constituídos por longas cadeias de átomos de carbono ligados covalentemente, com a possibilidade de a cadeia principal estar também ligada a átomos de azoto, oxigénio ou enxofre consoante o termoplástico em questão. Por sua vez, as diferentes moléculas estão ligadas por ligações secundárias, que podem ser quebradas durante o aquecimento, o que lhes confere a característica de permitirem ser moldados para adquirir determinada forma através do aquecimento e posterior arrefecimento (Smith, 1998). Estes materiais apresentam um processamento relativamente fácil, associado a propriedades como a baixa densidade, e de acordo com o tipo de termoplástico podem apresentar elevada resistência (ao impacto e química), rigidez, transparência e brilho. As classificações mais comuns nos termoplásticos são feitas segundo a estrutura e o arranjo das moléculas, e quanto à importância comercial. Na Figura 2.2 é facultado um resumo dos principais termoplásticos consoante estas classificações, de notar que, além dos mencionadas, existem outras classes de termoplásticos.

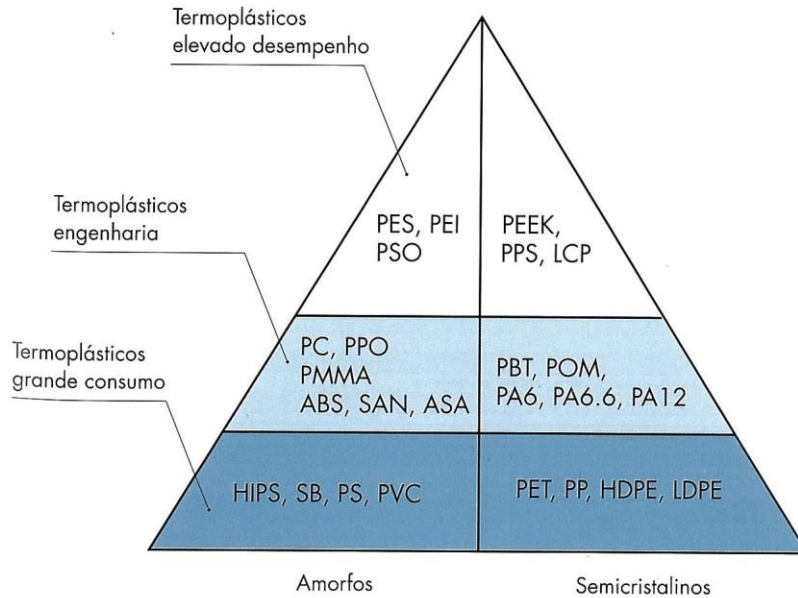


Figura 2.2 - Classificação dos termoplásticos (Cunha, 2003).

Os termoplásticos amorfos não apresentam qualquer organização estruturada das cadeias moleculares, pelo que, a consistência do material e as propriedades mecânicas intrínsecas são resultado do emaranhamento aleatório entre as moléculas. Por esta razão, estes materiais apresentam elevada estabilidade dimensional, não estando suscetíveis a grandes fenómenos viscoelásticos, tal como, a fluência ou a relaxação de tensões, uma vez que a temperatura de serviço é inferior à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). Os termoplásticos semicristalinos combinam zonas com estruturas moleculares ordenadas (cristalites) com fases amorfas. Com a combinação de fases, estes materiais conseguem combinar propriedades como a elevada tenacidade devido à capacidade dissipativa da fase amorfa, com maior resistência química devido às forças intermoleculares associadas às zonas estruturalmente organizadas para as temperaturas de serviço, que se compreendem entre a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e a temperatura de fusão ( $T_f$ ) (Cunha, 2003).

Os termoplásticos de grande consumo correspondem a 90% do consumo global e são utilizados nas áreas de acondicionamento, construção civil, automóvel e utilidades de reduzidas exigências mecânicas, devido ao seu reduzido custo e facilidade de transformação. Entre os mais comuns estão os Polietilenos de alta, baixa densidade e intermédios (HDPE e LDPE), compostos por monómeros de carbono ligado covalentemente e caracterizam-se pela elevada ductilidade e excelente resistência química, no entanto são suscetíveis à degradação por radiação ultravioleta (UV). O Polipropileno (PP) é composto por monómeros com um radical metil ( $\text{CH}_3$ ), o que provoca a torção da cadeia molecular em forma de hélice e confere-lhe zonas cristalinas, obtendo propriedades como rigidez e resistência estrutural

associadas a um baixo grau de compactação molecular. O Poliestireno (PS) apresenta um anel benzênico na sua unidade repetitiva que inibe a cristalização e consequentemente, torna-o um material amorfo e transparente, além disso apresenta elevada rigidez convertendo-o numa excelente opção no uso de embalagens, utilidades domésticas e caixas. O Policloreto de Vinil (PVC) apresenta um átomo de cloro ligado covalentemente ao carbono no monómero, este exibe elevada resistência química e ambiental, aliada a uma grande flexibilidade de outras propriedades, devido à capacidade de absorver grandes quantidades de plasticizadores, no entanto, o seu processamento é acrescido de especial cuidado de forma a inibir a sua degradação, já que a mesma liberta ácido clorídrico. O Poli (tereftalato de etileno), ou vulgarmente denominado PET, pertence à família dos poliésteres é predominantemente utilizado em garrafas e embalagens ocas, devido à baixa velocidade de cristalização o que permite obter um produto transparente se arrefecido rapidamente (Cunha, 2003). Na Tabela 2.1 estão resumidas algumas propriedades mecânicas dos termoplásticos referidos.

**Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos principais termoplásticos de grande consumo (Cunha, 2003)**

Material	Sigla	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Tg/Tm (°C)	Temperatura máxima serviço (°C)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)	Coefficiente de dilatação linear (1/°C)xE5	Rigidez dielétrica (MV/m)
Poliétileno de baixa densidade	LDPE	0,915-0,925	-117	60	0,3	10	1000	20,0	27
Poliétileno de alta densidade	HDPE	0,945-0,965	-124	70	1,1	30	150	12,0	22
Polipropileno	PP	0,901	-174	100-110	1,3	35	100	8,0	22
Policloreto de Vinilo	uPVC	1,40		70	3,0	50	80	6,0	14
	pPVC	1,24-1,34		69	0,01-0,03	10-20	1000	10-16	30
Poliestireno	PS	1,01	100	80	3,0	30	10	8,0	20
	HIPS	1,08	100	80	2,1	42	100	7,0	15
Poli(tereftalato de eliteno)	PET	1,6030	100	150	3,0	60	100	10,0	20

Os termoplásticos de engenharia correspondem a 10% do consumo e incluem uma vasta gama de materiais com elevado desempenho mecânico, térmico e excelente aspeto superficial em termos de brilho e transparência. Dada a ampla quantidade de termoplásticos serão apenas mencionados o ABS, PC e as poliamidas. O ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) apresenta grande versatilidade nas propriedades, consoante as percentagens relativas de cada constituinte, o Acrilonitrilo garante resistência química e resistência à radiação UV, o Butadieno melhora a flexibilidade e a resistência mecânica, por último, o Estireno aumenta a resistência à abrasão, dureza e transparência. O Policarbonato (PC) caracteriza-se pela sua transparência, rigidez, estabilidade dimensional e uma excelente resistência ao impacto. As Poliamidas (PA) contemplam um elevado número de estirpes de interesse e apresentam elevada resistência mecânica, química e ambiental.

Os termoplásticos de elevado desempenho são utilizados em situações muito específicas de elevada exigência, pelo que, não serão exploradas no âmbito deste trabalho.

Na maioria dos casos são adicionados aditivos ao polímero para facilitar o processamento, adicionar cor, ou melhorar as propriedades mecânicas, tais como: plasticizadores, retardadores de chama, estabilizadores, agentes anti estáticos, cargas e agentes de expansão. Os plasticizadores são adicionados para reduzir a viscosidade do material, o que permite utilizar uma temperatura de injeção mais reduzida e conseqüentemente, minimizar o risco de degradação térmica durante o processamento. Considerando que os polímeros são compostos por materiais orgânicos, a grande maioria são inflamáveis, pelo que, é comum a adição de retardadores de chama que reduzem a possibilidade de ocorrer ignição, ou caso ocorra, que a chama não se propague. O polímero também pode degradar-se pela combinação de calor e oxigénio, com a adição de estabilizadores as reações, que conduzem este efeito, podem ser atrasadas, no entanto, não são totalmente evitadas. Os agentes anti estáticos são adicionados para facilitar a descarga elétrica para a atmosfera, uma vez que os polímeros são materiais com baixa condutividade elétrica, pelo que têm tendência a dissipar a energia lentamente. As cargas dividem-se em reforços que têm como objetivo melhorar as propriedades mecânicas, os extensores que servem como enchimento para reduzir a quantidade de plástico necessário, e ainda as cargas adicionadas para melhorar a condutividade térmica do material. Os agentes de expansão são utilizados para produzir polímeros celulares (Osswald, 1998).

## 2.5. Processo de Injeção

Um molde de injeção é uma ferramenta para a produção de componentes, com a geometria correspondente ao espaço vazio compreendido entre a bucha e a cavidade que, com o auxílio de uma máquina de injeção é preenchido (Rees, 1995). Embora na maioria dos casos, os moldes sejam utilizados para a produção de componentes plásticos, podem ser empregues na produção de componentes de compósitos ou de ligas metálicas leves.

O processo de injeção é composto pelo fecho do molde, seguido da injeção de material para a cavidade e ainda com o molde fechado é dado o arrefecimento, resultando na solidificação do componente, no fim o molde é aberto e dá-se a ejeção das peças. O tempo de ciclo é calculado pela soma dos tempos das etapas referidas, desde o fecho do molde, até à mesma etapa do ciclo seguinte. Alternativamente, a produtividade do molde pode ser definida pela quantidade de ciclos efetuados num intervalo de tempo previamente definido (Rees, 1995).

A máquina de injeção é composta por vários sistemas, sendo eles: o sistema de fixação, a unidade de plasticização, a unidade de injeção e a unidade de controlo. O sistema de fixação é responsável pela abertura e fecho do molde durante o ciclo, deve proporcionar força necessária para garantir que o molde se mantém fechado durante a fase de injeção, uma vez que são exercidas grandes pressões sobre o mesmo. A unidade de plasticização tem como função fundir o material e garantir que este apresenta a fluidez necessária à sua injeção, esta é composta por resistências ao longo do fuso que garantem a fluidez do material. A unidade de injeção força o material fundido para o molde, considerando que a pressão necessária para o preenchimento da cavidade depende maioritariamente da espessura do produto, verifica-se que para espessuras maiores a pressão necessária é menor, e para espessuras mais reduzidas a pressão deve ser maior. A unidade de controlo opera a máquina, tendo como funções controlar o módulo de comandos (efetuar operações manuais), a lógica de controlos (executa os parâmetros e monitoriza sensores), a alimentação elétrica, e o controlo térmico (da máquina e do molde) (Rees, 1995).

## 2.6. Vida de cavidades moldantes

Por vida de uma cavidade moldante entende-se o período em que o molde consegue produzir componentes dentro dos requisitos determinados. Considera-se que um molde falhou, quando o seu desempenho é deteriorado devido a alterações de forma, dimensões e propriedades do material, que conduzem a um funcionamento insatisfatório da componente produzida. Os modos de falha podem ser categorizados em defeitos catastróficos, de fabrico e de funcionamento. A Figura 2.3 sumariza as causas de falha (Jhavar et al., 2013; Rees, 1995).

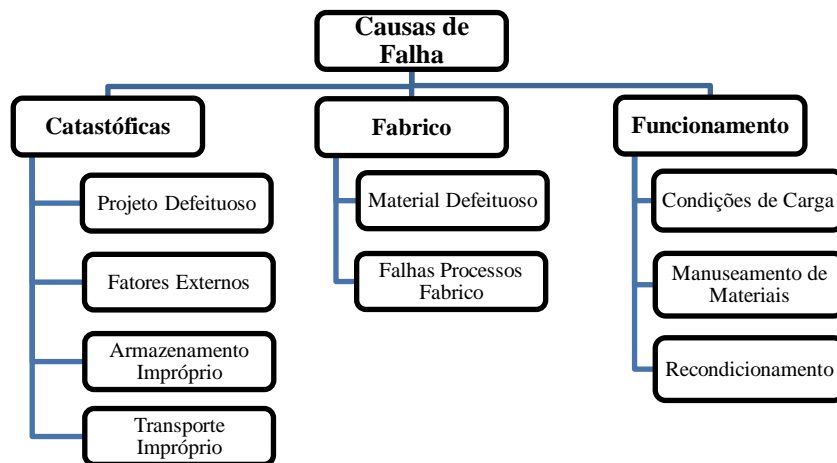


Figura 2.3 - Classificação das causas de falhas

### 2.6.1. Falhas catastróficas

Este tipo de falha é atribuído a projetos defeituosos, fatores externos, armazenamento e transporte impróprio. O projeto defeituoso é um dos aspetos com maior relevância e pode ser facilmente evitado com a eliminação de raios de canto curtos, entalhes, e variações bruscas de massa que podem resultar no aumento dos esforços mecânicos em determinadas zonas, e por sua vez, afetar negativamente o comportamento à fadiga e desgaste da superfície. Os fatores externos incluem falhas imprevisíveis e não controláveis, que ocorrem durante a operação do molde, como por exemplo, a falha de água ou de energia, e ainda catástrofes naturais. Por vezes, a falha dos moldes ocorre apenas devido ao armazenamento em condições não favoráveis, que acabam por o deteriorar devido à corrosão ou oxidação das superfícies. O próprio transporte do molde, de uma estação para outra, pode conduzir a falhas devido a choques térmicos, esforços mecânicos, ou manuseamento incorreto por parte do operador (Jhavar et al., 2013).

### **2.6.2. Falhas de fabrico**

As falhas de fabrico ocorrem devido a não conformidades no material e nos processos de produção utilizados. Mesmo em casos em que a escolha do material seja adequada, as operações de maquinação e as operações pós maquinação, como o tratamento térmico e o acabamento, podem comprometer o molde. Um tratamento térmico deficiente afeta as propriedades mecânicas, e em casos extremos pode resultar em fissuras e fraturas, assim como no processo de polimento, que se não for efetuado adequadamente, pode conduzir a pequenas fissuras e defeitos superficiais. Embora, atualmente, já existam equipamentos para auxiliar a maquinação, a programação desta operação continua suscetível à falha humana, pelo que, deve haver especial atenção, para não comprometer a geometria do molde e minimizar a introdução de tensões (Jhavar et al., 2013). Sinteticamente, para assegurar a correta produção do molde, as operações devem ser acompanhadas, e seguidas de um controlo rigoroso.

### **2.6.3. Falhas de funcionamento**

As falhas devido ao funcionamento do molde são a principal causa de defeito do mesmo. Na maioria das vezes, o mecanismo de falha está diretamente relacionado com a sua aplicação, concretamente os moldes de trabalho a quente estão mais propícios a fissuras, fadiga térmica, deformação plástica e corrosão, devido à exposição de ciclos repetitivos de aquecimento e arrefecimento, além dos esforços mecânicos, enquanto que, nos moldes de trabalho a frio é mais habitual a falha devido às cargas de impacto e iniciação de fissuras de fadiga nas zonas de maior concentração de tensões (Jhavar et al., 2013).

O desgaste ocorre devido à interação entre duas ou mais superfícies, que leva à deformação e eliminação de elementos da superfície, como resultado da ação mecânica e tensões subsequentemente desenvolvidas, sendo que a complexidade geométrica, o material do molde, o tratamento térmico inadequado, as impurezas na superfície, o ambiente de trabalho, a pressão e a temperatura amplificam este fenómeno. As *heat checks* são uma grande quantidade de fissuras geradas por fadiga térmica, devido ao aquecimento e arrefecimento cíclico do molde. Esta exposição constante a ciclos térmicos, conduz a um gradiente térmico, que resulta na geração de tensões térmicas, no entanto, à medida que a distância à superfície aumenta, este efeito térmico cíclico é atenuado, uma vez que, para profundidades maiores, a amplitude térmica não é tão elevada, assim, este efeito verifica-se predominantemente à superfície ou a zonas poucos distantes em ferramentas de trabalho a quente.

Excepcionalmente, o fenómeno produz fissuras com maior profundidade quando a ferramenta está sujeita a tensões locais muito elevadas que, devido à formação de óxidos, expõe estas zonas a tensões elevadas e, subsequente cedência plástica, que aumenta as fissuras durante a fase de arrefecimento. As superfícies com elevada porosidade, cavidades dúcteis, e com vestígios de oxidação estão mais suscetíveis ao aparecimento de fissuras e de desenvolver oxidação no interior das mesmas (Jhavar et al., 2013).

Outro mecanismo de falha deve-se à fadiga mecânica, com origem em diversos defeitos superficiais como inclusões, poros e camadas de oxidação. Estes defeitos propiciam no desenvolvimento de zonas oxidadas, por sua vez, aparecimento e propagação de fissuras. Os mecanismos enumerados, quando combinados ou mesmo separados, conduzem à fratura final do molde e ao fim da sua utilidade (Jhavar et al., 2013).

## **2.7.Soldadura**

### **2.7.1. TIG**

Segundo (Quintino & F. Oliveira Santos, 2003), o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) insere-se na categoria de processo de soldadura por arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungsténio com a peça, envolvido numa atmosfera de proteção de um gás inerte, como o hélio ou o argon. A utilização do tungsténio, como eletrodo não consumível, deve-se à combinação de duas características do elemento: alto ponto de fusão e emissividade, sendo que o primeiro resulta na atenuação do desgaste e o segundo, facilita a ionização e consequentemente, o estabelecimento do arco elétrico. O eletrodo pode ser composto por tungsténio puro, ou tungsténio com adição de tório ou zircónio, e óxido de cério. A adição de tório e zircónio potencia a emissividade do eletrodo e assim uma maior estabilidade do arco elétrico. Em contrapartida, o tório diminui o ponto de fusão do eletrodo, pelo que, não é aconselhada a utilização de eletrodos com este elemento em polaridade inversa, visto que é gerada maior quantidade de calor no eletrodo. A adição de zircónio em quantidade de 0,3% a 0,5% é utilizada em aplicações de corrente alternada.

Por se mostrar adequado para a soldadura de todos os metais e ligas, o gás de proteção mais recorrente é o argon, embora, em alguns casos, este possa ser constituído por uma mistura com hélio, ou em casos pontuais, verificar-se a adição de pequenas quantidades de hidrogénio. A utilização do argon proporciona uma maior estabilidade do arco elétrico e ação de limpeza, enquanto a utilização de hélio permite uma maior penetração e,

consequentemente, maior velocidade no processo. A adição do hidrogénio mostrou especial interesse na soldadura de aços inoxidáveis e ligas de níquel, no entanto, associado à utilização deste gás na mistura advém o risco de explosão. Qualquer que seja a mistura, o grau de pureza mínimo deve ser de 99,99% (Quintino & F. Oliveira Santos, 2003).

Uma vez que o eléctrodo de tungsténio não se consome, a principal função do arco é o fornecimento de calor para a criação de um banho de fusão e consequentemente, fundir o material de adição conforme ilustrado na Figura 2.4. O material de adição deve ser adicionado lateralmente em relação ao banho de fusão, de forma manual ou automática. Outra função do arco eléctrico é a limpeza do banho de fusão e da superfície do material base de possíveis impurezas, por sua vez, a atmosfera inerte impede a contaminação do eléctrodo não consumível, que poderia afetar a qualidade do banho de fusão (Quintino & F. Oliveira Santos, 2003). O tipo de corrente e polaridade mais comum é a corrente contínua com polaridade direta, embora em casos pontuais, o mais adequado seja a utilização de corrente alternada, ou corrente contínua com polaridade inversa. A utilização de polaridade direta torna-se benéfica, uma vez que, sendo gerada uma quantidade menor de calor no eléctrodo, a sua vida útil é prolongada (Quintino & F. Oliveira Santos, 2003).

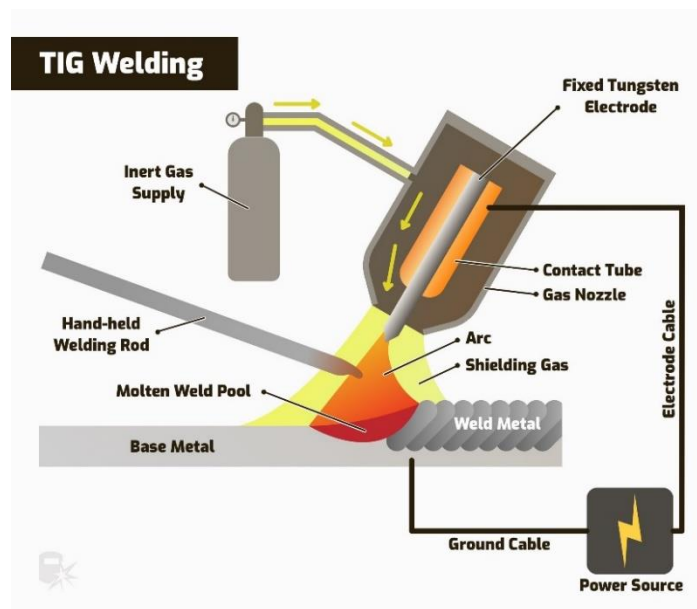


Figura 2.4 - Processo de Soldadura TIG (Grill, 2021)

No processo de soldadura TIG existe uma grande variedade de parâmetros que têm influência no resultado como: a corrente, a velocidade de avanço, o tipo de eléctrodo, o ângulo, o comprimento do arco, o gás de proteção, entre outros. Considerando que, o eléctrodo é sempre o mesmo, os parâmetros mais suscetíveis a ajustes são a corrente (A), a velocidade de avanço (mm/min) e a distância do arco (mm). De forma geral, com o aumento

da corrente está associado o aumento do calor transmitido à peça, aumento da zona termicamente afetada e a penetração da solda. O comprimento do arco elétrico estabelecido é o parâmetro com maior influência, com o aumento do comprimento verifica-se uma diminuição do calor transmitido, da zona termicamente afetada e da penetração da solda. O aumento do avanço está inversamente relacionado com o calor transmitido, a penetração da solda e tem pouca influência sobre a zona termicamente afetada (Vora et al., 2019). Através de revisão bibliográfica foi possível retirar os dados obstantes na Tabela 2.2 relativo aos parâmetros utilizados noutros trabalhos.

**Tabela 2.2 - Sumário de Parâmetros de soldadura TIG em trabalhos anteriores.**

Materiais	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade avanço (mm/s)	Diâmetro fio (mm)	Comprimento Arco (mm)	Referência
AISI P20 AISI H13	90-120	11	1,2-2,5	1	-	(Silva et al., 2013)
AISI P20 VP50IM	88-124	10	1,2-2,4	1,2	4	(Preciado & Bohorquez, 2006)
DIN 1.2311 DIN 1.2083 DIN 1.2343	125	15	1,7	1,6	2,5	(Vedani, 2004)
AISI P20	124	11	1,7	1,2	4	(Suarez et al., 2015)

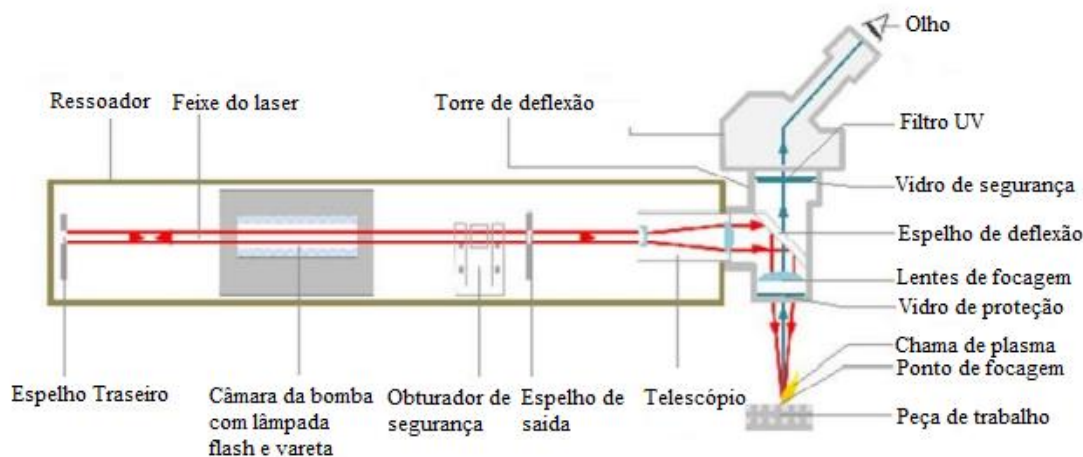
### 2.7.2. Laser Nd:YAG

Em 1917, surgiram os primeiros trabalhos que levaram à invenção do feixe laser, conduzidos por Albert Einstein. Mais tarde, Niels Bohr e Max Planck formularam a teoria mecânica quântica com os seus trabalhos, o que permitiu uma melhor compreensão do funcionamento do feixe laser. Em 1951, Charles Hard Townes sugeriu que a emissão estimulada poderia ser aplicada à amplificação de ondas ultracurtas, e em 1954, a sugestão foi confirmada experimentalmente. Em conjunto com A.L.Schawlow, C.H.Townes fez a primeira

publicação sobre lasers no ano de 1958, que despertou grande curiosidade da comunidade internacional. Theodore Maimann construiu o primeiro laser de estado sólido, de rubi, em julho de 1960, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal. No final desse mesmo ano, foi apresentado o primeiro laser de estado gasoso de He-Ne, desenvolvido por Javan, Harriot e Benett, ao serviço dos laboratórios da AT&T Bell (Quintino & F. Oliveira Santos, 2003).

A palavra Laser é um acrónimo para “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. Segundo (Silfvast, 2004), o laser faz uso de processos que aumentam ou amplificam o sinal de luz, após o sinal ser gerado por outros meios. Entre esses processos estão incluídos a emissão estimulada (um efeito natural, deduzido por considerações relativas ao equilíbrio termodinâmico), e feedback ótico alcançado pela utilização de espelhos. Assim, sucintamente, um laser é composto por um meio amplificador onde ocorre a emissão estimulada, e um conjunto de espelhos que alimenta a luz de volta para o amplificador e promove o crescimento do feixe. O laser utiliza luz, que, em condições normais, seria emitida em todas as direções, e concentra-a numa única direção (Silfvast, 2004). Quando um átomo se encontra no estado excitado, isto é, tem eletrões num estado de maior energia, e é atingido por um fóton, este emite um segundo fóton com comprimento de onda idêntico, baixando o nível de energia do eletrão. Para que este fenómeno ocorra, o comprimento de onda do fóton incidente sobre o átomo, deve corresponder à energia entre os níveis do eletrão (Smith, 1998).

O laser de Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) funciona no espetro das radiações infravermelhas, com um comprimento de onda de 1064nm, pelo que, não é visível ao olho humano que está limitado a comprimentos de onda compreendidos entre 380nm e 780nm. Este tipo de laser enquadra-se no grupo de lasers de estado sólido, isto é, a fonte emissora de energia vai excitar um cristal de Neodímio dopado para a emissão de fótons (Smith, 1998). A constituição de um laser deste tipo encontra-se na Figura 2.5.



**Figura 2.5 - Componentes Laser para Soldadura**

A soldadura por laser funciona por pulsos, o que permite a fusão e solidificação do material entre ciclos. Esta aplicação de energia mais localizada resulta numa menor quantidade de calor transmitida à peça, o que torna o processo ideal para peças suscetíveis a distorções e para a reparação de materiais mais sensíveis termicamente, sem recurso a tratamentos de pré e pós aquecimento. Consequentemente, a zona termicamente afetada será muito menor comparando com outros processos de soldadura, como por exemplo TIG (Malek Ghaini et al., 2007; Vedani, 2004).

Entre os parâmetros com maior influência estão a potência, a duração do pulso, a frequência, o diâmetro do feixe e a forma do pulso. A potência pode ser dada em watts (W), ou sob a forma de tensão (V), quanto maior for a potência, maior será a penetração da solda na peça. A duração do pulso, em milissegundos (ms), consiste no período em que é emitida energia à peça por pulso, assim, quanto maior a duração do pulso, mais acentuado será o aquecimento da peça. A frequência, em Hertz (Hz), indica o número de pulsos disparados por segundo, quanto maior a frequência, maior o aquecimento da peça. O diâmetro do feixe, em milímetros (mm), equivale à área no qual vai incidir o feixe laser, para um diâmetro maior, mais dispersa está a energia e, consequentemente, menor será a concentração desta. A forma do pulso pode ser alterada para evitar choques térmicos, assim em casos mais críticos, podem ser feitos ajustes, como por exemplo, começar com determinada carga energética, e ir enfraquecendo progressivamente ao longo do pulso (Capello & Previtali, 2006). O avanço é controlado pelo operador, e quanto maior o avanço (mm/s) menor será a penetração da soldadura. Através de revisão bibliográfica foi possível retirar os dados contidos na Tabela 2.3 relativo aos parâmetros utilizados noutros trabalhos de soldadura laser Nd:YAG.

Tabela 2.3 - Sumário de Parâmetros de soldadura laser Nd:YAG em trabalhos anteriores.

<b>Materiais</b>	<b>Potência do Pulso (kW)</b>	<b>Diâmetro do fio (mm)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Duração do pulso (ms)</b>	<b>Velocidade de avanço (mm/s)</b>	<b>Referência</b>
DIN 1.2311 DIN 1.2083 DIN 1.2343	1,3-1,7	0,4	9,5-15	4,5	1,5	(Vedani, 2004)
DIN 1.2311 DIN 1.2083	0,4-0,6	0,5	-	3-12	-	(Capello & Previtali, 2006)
AISI H13 AISI P20	-	0,5	6	8	-	(Borrego et al., 2007)
AISI P20 Cromado AISI P20 Nitrurado	0,52-0,76	0,5	7,5-9,0	7,2-8,0	0,65	(Vedani et al., 2007)
AISI H13	0,3	-	6	8	0,5	(Cong et al., 2013)

### 2.7.3. Seleção de Material de adição

A seleção do material de adição para a soldadura é determinante para as propriedades na zona em questão como: a dureza, a tenacidade, resistência ao desgaste, resistência ao revenido, resistência a quente, resistência à corrosão, entre outros. A composição química da zona soldada é determinada pela composição do material consumível e a composição química do aço base na extensão em que o último enumerado é fundido. Considerando a elevada dureza dos aços ferramenta, a zona soldada e a respetiva zona adjacente estão particularmente suscetíveis a fissuras, assim, o consumível deve ter a capacidade de produzir uma soldadura de alta qualidade, livre de inclusões não metálicas e poros, para minimizar o risco desta ocorrência (Böhler, 2008).

A seleção do material de adição depende de, entre vários fatores, a microestrutura do material base e dos tratamentos térmicos realizados. Habitualmente, quando o aço se apresenta no estado recozido, a composição química do material de adição deve ser idêntica à do material base. Com esta escolha, garante-se que, aquando do tratamento térmico, o comportamento será idêntico e as características e propriedades serão semelhantes (Böhler, 2008). Enquanto que, grandes diferenças na composição química entre o material base e o material de adição, intensificam o risco de fissuração na zona de transição de durezas (Uddeholm, 2014).

Devido à grande variedade de aços existentes, nem sempre existe um material de adição com composição química semelhante. Nestas situações é aconselhada a escolha de um material que se aproxime o máximo possível, e que apresente na sua composição química teores mais elevados dos principais elementos de liga dos aços ferramenta, como: o Cr, W, Mo, V, Ni, Mn e Co. Em casos específicos, em que o material base não seja idêntico, a escolha pode residir na aptidão ao polimento ou à textura química, na medida que, deve ter o mesmo comportamento à gravação que o material base, existem ainda outras formas de selecionar um material de adição, como por exemplo, através do carbono equivalente (Ceq). Na soldadura de grandes áreas, ou de elevada profundidade, pode ser aplicado um “material de enchimento” com propriedades mecânicas inferiores, e nas camadas finais é aplicado o material mais compatível (Thompson, 1999).

## **2.8. Tratamentos térmicos**

Tratamento térmico, segundo (Soares, n.d.) entende-se por o ciclo térmico a que um material é submetido com o objetivo de modificar a sua estrutura para melhorar as propriedades mecânicas, sem alterar a composição química. As transformações de estrutura no decorrer do aquecimento são evidenciadas no diagrama de fases Fe-C ilustrado na Figura 2.6, no qual é possível observar diferentes linhas que representam as transformações. Os tratamentos térmicos mais comuns são o recozimento, têmpera e revenido, que serão brevemente descritos de seguida.

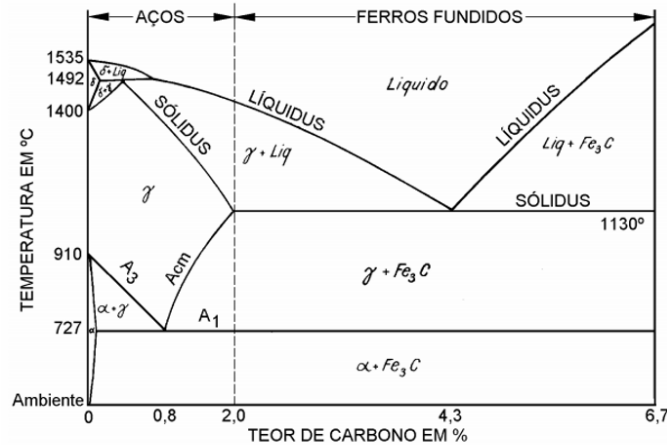


Figura 2.6 - Diagrama de Fases Fe-C (Pimenta, 2014).

### 2.8.1. Recozimento

O tratamento de recozimento tem como objetivos: restituir características do material que foram modificadas devido a tratamentos mecânicos ou térmicos, regularizar estruturas brutas de fusão, reduzir heterogeneidades, eliminar tensões internas, ou obter estruturas favoráveis à maquinação ou deformação a frio (Seabra, 1995).

O aquecimento deve ser o mais uniforme possível de forma a evitar empenos acentuados e a temperatura a atingir depende do tipo de recozimento a realizar e da composição química do material, com especial ênfase para o teor de carbono. O tempo de estágio deve ser suficiente para garantir que todo o material atinge a temperatura desejada e que ocorra a transformação na totalidade. Por sua vez, o arrefecimento deve ser lento (salvo exceções), de forma a permitir a transformação na estrutura final. Consoante o objetivo e os parâmetros utilizados, pode ser feita a divisão em: recozimento completo ou de homogeneização, de amaciamento, isotérmico, de regeneração, redução de tensões, ou de normalização (Seabra, 1995). De forma a não estender desnecessariamente a descrição dos tipos de recozimentos referidos, na Figura 2.7 estão, genericamente, esquematizados os ciclos térmicos correspondentes.

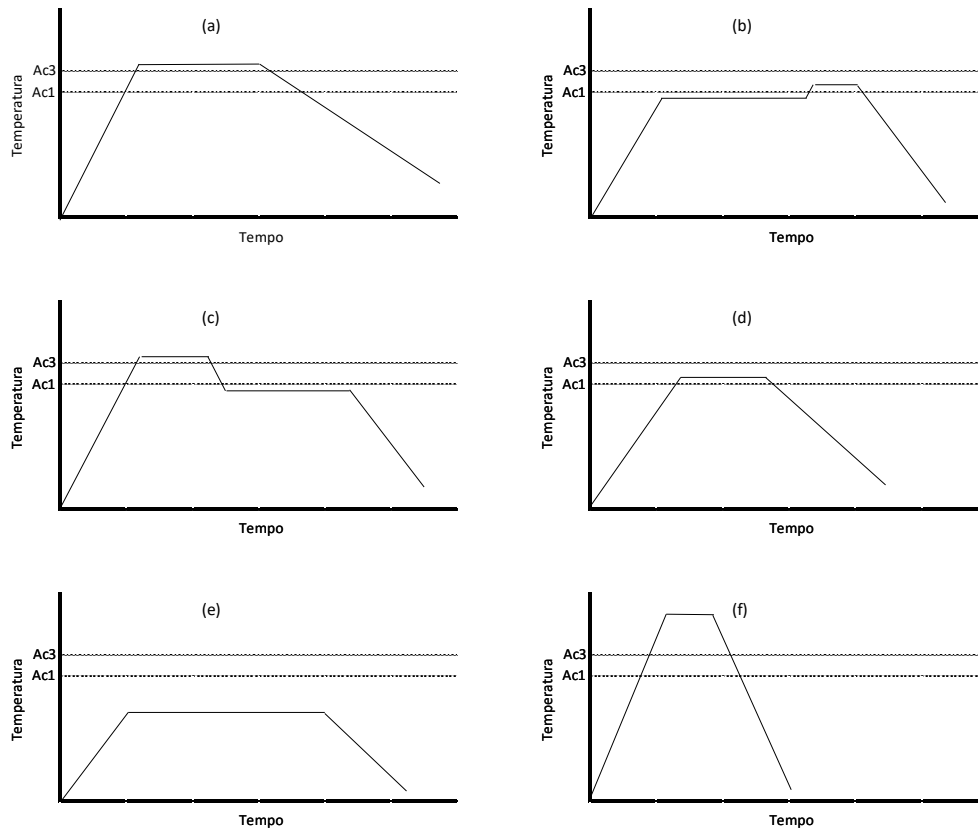


Figura 2.7 - Ciclos térmicos de Recozimento: (a) Homogeneização; (b) Amaciamento; (c) Isotérmico; (d) Regeneração/ Afinação; (e) Redução Tensões; (f) Normalização.

### 2.8.2. Têmpera

À semelhança dos outros tratamentos térmicos, a têmpera é composta por 3 fases: aquecimento, estágio e arrefecimento.

#### Aquecimento

Com o aquecimento pretende-se elevar todo o material acima da temperatura de austenização, para que ocorra a transformação em austenite. Dada a baixa condutibilidade térmica do aço em geral, o aquecimento deve ser feito lentamente para evitar tensões devido à diferença de temperatura, que podem causar distorções, e em casos extremos, fraturas. De forma, a reduzir o gradiente térmico, aconselha-se à execução de pré-estágios antes de atingir a temperatura à qual se dá a transformação de fase. Com o pré-aquecimento consegue-se um aquecimento mais uniforme, evitando-se o sobreaquecimento em arestas, na superfície e em zonas de baixa espessura (Soares, n.d.).

Cada aço apresenta um intervalo de temperatura de austenitização característico, normalmente indicado pelo fornecedor ou produtor, à qual o material deve ser elevado, para que ocorra a transformação. Dentro desse intervalo, deve-se apontar para o limite inferior em peças de pouca espessura ou geometria complicada, e para o limite superior para peças de grandes dimensões e geometria simples. De considerar que, o aumento significativo da temperatura de austenitização resulta no aumento de grão, obtendo-se uma microestrutura grosseira e frágil (Soares, n.d.).

Tal como várias características, a temperatura de austenitização é influenciada pela composição química do aço. Pela observação da Figura 2.6 (anteriormente apresentada), a temperatura de austenitização, correspondente ao limite inferior do domínio da austenite, decresce com o aumento de carbono até ao ponto eutético, no entanto, os restantes elementos de liga também exercem a sua influência nas temperaturas às quais ocorrem transformações (Soares, n.d.). De forma simplificada, os elementos de liga podem influenciar o diagrama de duas formas: expandindo o domínio  $\gamma$  (austenítico) denominados de estabilizadores  $\gamma$ , ou contraindo o domínio  $\gamma$  e promovendo a formação de ferrite ou outras fases, que sucedam à austenite após transformação. Assim, segundo mostra a Figura 2.6, os estabilizadores de ferrite aumentam a temperatura de austenitização, e os estabilizadores de austenite baixam esta mesma temperatura (Honeycombe, 1985).

### **Estágio**

Na fase de estágio pretende-se a transformação da perlite e da ferrite em austenite. No caso dos aços hipoeutéticos consegue-se alcançar ultrapassando a temperatura crítica  $A_{c3}$  em  $50^{\circ}\text{C}$ , enquanto, nos aços hipereutéticos ( $\%C > 0,86$  aproximadamente), a estrutura é composta por perlite e cementite, sendo a última enumerada, uma fase com dureza superior à martensite. Consequentemente, no tratamento térmico de aços hipereutéticos pretende-se exclusivamente a transformação da perlite em austenite, sem a dissolução da cementite, pelo que a linha de referência é  $A_{c1}$ .

Durante o estágio, o aumento de  $50^{\circ}\text{C}$  da temperatura de austenitização é suficiente para dissolver a maior parte dos carbonetos, deixando livre o carbono essencial à formação de martensite no arrefecimento, no entanto, alguns tipos de carbonetos só se dissolvem a temperaturas muito elevadas que podem chegar a  $300^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura de austenitização. O tempo de estágio depende da composição química, dimensões da peça, temperatura de têmpera e do aquecimento exercido. De forma geral, o tempo de estágio

aumenta proporcionalmente com o aumento de quantidade de elementos de liga e da espessura da peça conforme indicado na Figura 2.8. De notar que os valores apresentados na Figura 2.8 estão sujeitos a modificações, visto que, não são considerados todos os influentes mencionados anteriormente (Honeycombe, 1985).

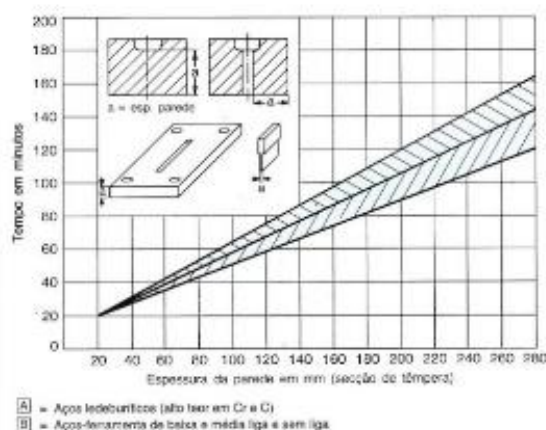


Figura 2.8 - Tempo de estágio em função da espessura (thyssenkrupp Materials, 1997).

## Arrefecimento

Para que o tratamento térmico de têmpera seja completo, a velocidade de arrefecimento deve ser igual ou inferior à velocidade crítica, que consiste na velocidade a partir da qual se evita a transformação de austenite no domínio perlítico. Ao fugir ao domínio perlítico, pretende-se a obtenção de martensite, ou em determinados casos, bainite (Seabra, 1995).

Os meios de arrefecimento mais utilizados são a água, óleo e ar, sendo o primeiro o mais severo e o último o menos. O meio de arrefecimento deve ser selecionado conforme o material a temperar, uma vez que, a velocidade crítica varia de material para material (Seabra, 1995). Considerando que, quanto maior a severidade do meio de arrefecimento, mais tensões são induzidas nas peças, deve ser utilizado, dentro do possível, o meio menos severo (thyssenkrupp Materials, 1997). Outra forma de atenuar o gradiente térmico, que induz tensões e pode resultar em distorções e fraturas, é através de uma têmpera interrompida ou patamar isotérmico. Em alguns materiais, após “passar” o domínio da perlite e ferrite, é possível manter a temperatura constante durante algum tempo, de forma a atenuar a diferença de temperatura entre o interior e o exterior (Soares, n.d.). Com a utilização do patamar isotérmico é possível obter uma microestrutura de martensite ou de bainite, sendo os processos denominados martêmpera e austêmpera, respetivamente (Soares, n.d.).

Na martêmpera, as peças são arrefecidas até uma temperatura superior ao início de formação de martensite ( $M_s$ ), à qual são mantidas durante algum tempo para garantir a homogeneização de temperatura, sem transformação de microestrutura. Posteriormente, as peças são deixadas a arrefecer a ar calmo, ocorrendo a transformação em martensite, aliada a poucas tensões térmicas (Soares, n.d.). A austêmpera é utilizada quando se pretende aprimorar algumas propriedades dos materiais, como a tenacidade e a resistência, o processo é idêntico à martêmpera, com divergência na parte final, em que a peça é mantida a uma temperatura superior a  $M_s$  durante um período longo, favorecendo a formação total em bainite. A diferença entre os dois processos pode ser identificada na Figura 2.9.

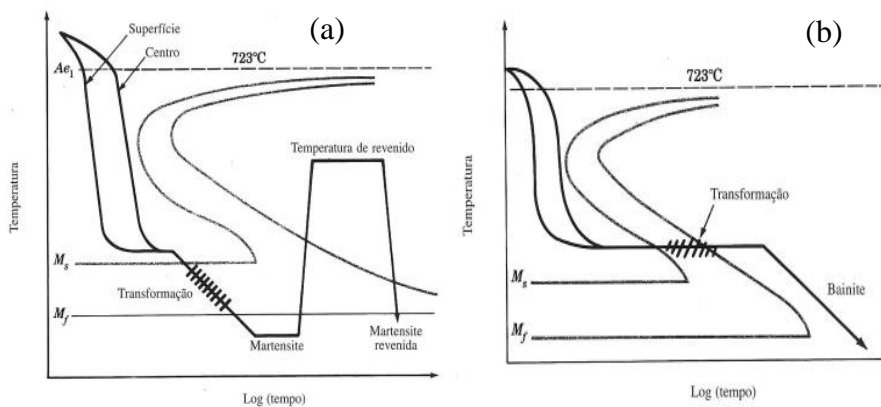


Figura 2.9 – (a) Martêmpera; (b) Austêmpera (Smith, 1998).

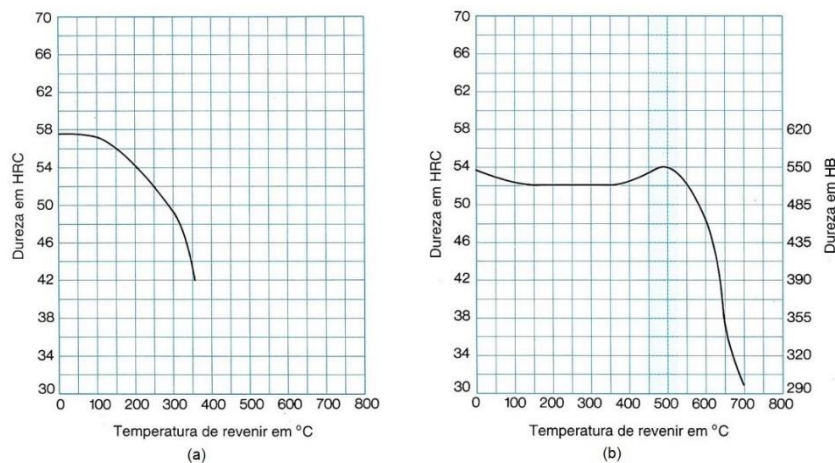
Outro ponto muito importante no arrefecimento relaciona-se com a temperabilidade do material. A temperabilidade traduz a aptidão do material para a transformação martensítica na sua totalidade quando arrefecida a partir da fase austenítica. Esta propriedade depende da composição química, do tamanho de grão austenítico e da homogeneidade da fase austenítica que, por sua vez, depende dos constituintes não dissolvidos e de inclusões não metálicas (Seabra, 1995). Desta forma, é recorrente o uso de ligas com níquel, crómio, manganês, e outros elementos, que aumentam a temperabilidade, permitindo uma estrutura martensítica em peças de grandes dimensões. Além do meio de arrefecimento, a tendência para a fissuração, aumenta com a existência de inclusões não metálicas, cementite maciça, grão grosseiro, arrefecimento irregular, grandes variações de massa, e raios de canto reduzidos que provoquem concentração de tensões (Seabra, 1995).

### 2.8.3. Revenido

O revenido deve ser efetuado imediatamente após a têmpera, uma vez que, a martensite resultante do tratamento de têmpera apresenta elevada fragilidade, por conseguinte, o material está propenso a fissuras e fraturas. Com o revenido pretende-se atenuar as tensões

internas e a fragilidade do material, e conseqüentemente, melhorar a ductilidade, tenacidade e outras propriedades do material, assim como, acertar a dureza para o valor desejado (Honeycombe, 1985; Seabra, 1995). As alterações de propriedades mecânicas durante o revenido devem-se às modificações de estrutura da martensite, promovidas pelo aumento da temperatura. Tal como na têmpera e outros tratamentos térmicos, a composição química define o comportamento do material ao revenido, no entanto, generalizando é possível fazer uma distinção entre o comportamento de aços não ligados e dos aços ligados (Seabra, 1995).

O aumento da temperatura de revenido está associado a quedas de dureza mais acentuadas. No entanto, com a adição de elementos de liga, que na sua maioria têm grande afinidade ao carbono, verifica-se um aumento de dureza entre os 500°C e 550°C devido à precipitação de carbonetos complexos, vulgarmente denominado endurecimento secundário. A temperaturas superiores à zona de precipitação de carbonetos dá-se uma nova queda de dureza acentuada devido à aglomeração de carbonetos (Soares, n.d.). Na Figura 2.10 estão expostos dois diagramas de revenido, correspondente a um aço não ligado (Figura 2.10 (a)) e um aço ligado (Figura 2.10 (b)), com especial ênfase para a presença do intervalo de endurecimento secundário para o aço ligado.



**Figura 2.10 - Diagrama de Revenido (a) Aço não ligado TEW1191 ; (b) Aço ligado Thyrotherm 2343 EFS (thyssenkrupp Materials, 1997).**

Com o aumento da temperatura de revenido verifica-se uma diminuição de resistência à tração e do limite de elasticidade, bem como, uma melhoria da ductilidade e da resiliência, manifestando-se nos aços ligados um conjunto de propriedades mecânicas melhores em comparação com os aços não ligados, devido a uma resistência inicial maior e ao facto das modificações de estrutura ocorrerem a temperaturas mais elevadas. Todavia, dependendo da temperatura de revenido e da composição química do aço, surgem quedas importantes na

tenacidade do material, que podem provocar roturas frágeis, fenómeno designado de fragilidade de revenido (Seabra, 1995).

A seleção da temperatura de revenido deve ser feita em função da dureza que se pretende obter, que pode ser determinada recorrendo ao diagrama de revenido do respetivo material. Tendo em conta que, a temperatura de revenido deve ser sempre superior a 180°C, nunca deve ser inferior à temperatura de trabalho ou à de posteriores tratamentos (nitrução, revestimentos, etc). De forma a evitar variações dimensionais, devem ser aplicados no mínimo dois revenidos para a correta estabilização da microestrutura, devendo a temperatura do segundo revenido ser igual, ou entre 30°C e 50°C inferior à do primeiro. De considerar que, em peças de trabalho a quente é indicada a realização de três revenidos, o primeiro na zona de endurecimento secundário, seguido do revenido de acerto de dureza conforme o diagrama de revenido, e o terceiro a uma temperatura entre 30°C e 50°C abaixo do segundo (thyssenkrupp Materials, 1997).

#### **2.8.4. Tratamentos pós-soldadura**

Nos processos de soldadura em que são transmitidas grandes quantidades de calor ao material base, existe uma dissemelhança de propriedades mecânicas, em comparação com a zona adjacente à solda, e o material de adição. Desta forma, é recorrente o uso de tratamentos térmicos após a soldadura para atenuar estas diferenças e melhorar as propriedades mecânicas. O comportamento a estes tratamentos varia consoante a liga do material base e do material de adição. Em aços que são soldados no estado recozido, o tratamento de têmpera posterior permite obter homogeneidade de dureza, considerando que o material de adição tem o mesmo comportamento durante o tratamento térmico. Consoante o anteriormente referido, na soldadura de materiais recozidos, deve ser utilizado um material com composição química idêntica, ou quando tal não seja possível, o material que melhor se aproxime (Silva et al., 2013).

No entanto, na maior parte dos casos, a peça é soldada após têmpera, uma vez que, grande parte dos problemas surge após o tratamento térmico. Nestes casos, onde não é possível realizar uma têmpera, costumam ser executados os denominados “revenidos de solda”. Este tratamento é realizado em aços pré-tratados e em aços no estado temperado e, tem como principal objetivo atenuar as heterogeneidades nas propriedades mecânicas, simultaneamente, permite reduzir tensões da peça introduzidas no processo de soldadura, que podem comprometer a vida útil do molde. Segundo (Silva et al., 2013) em aços pré-

tratados é possível obter dureza homogênea com os “revenidos de solda”, porém em aços de têmpera como o AISI H13, tal efeito só pode ser alcançado com uma nova têmpera. Um estudo de (Gualco et al., 2010) conclui que, em alguns aços ligados, os “revenidos de solda” transformam a austenite residual em martensite e precipitam carbonetos o que resulta num aumento de dureza nesta zona, no entanto, com a precipitação de carbonetos de cromo, a quantidade de cromo disponível na matriz é reduzida, traduzindo-se numa diminuição da resistência à corrosão do material.

## **2.9. Acabamento**

O crescimento da indústria de plásticos tem-se sentido na produção de linhas cada vez mais automatizadas, bem como, no aumento da complexidade das peças plásticas. De forma a acompanhar este crescimento, as exigências requeridas para os moldes de injeção são cada vez maiores. Aliadas às propriedades mecânicas são exigidas qualidades de superfícies elevadas, livres de defeitos, com brilho e rugosidades na ordem de grandeza dos nanômetros (nm) (Rebeggiani, 2009). Atualmente, o processo de polimento na indústria de moldes é efetuado predominantemente de forma manual, pelo que, o resultado final depende de fatores intrínsecos ao operador, como a experiência e habilidade, além de fatores emocionais do cotidiano como a paciência e a concentração (Fritz Klocke et al., 2011).

A avaliação de uma superfície moldante é caracterizada pela precisão geométrica, e pela qualidade do polimento. Por sua vez, a qualidade do polimento, além dos defeitos como riscos, poros, efeito casca de laranja, mossas e picadas, pode ser quantificada pela rugosidade superficial. Os parâmetros de rugosidade mais utilizados para a quantificação são (Stoeckhert & Mennig, 1998):

- $R_a$  – média aritmética dos desvios em relação à linha média;
- $R_z$  – média da distância de um valor máximo a um valor mínimo, em cinco zonas diferentes;
- $R_t$  – diferença entre o maior pico e maior vale, registados em toda a área medida;

Nas Figura 2.11 e Figura 2.12 estão representados os parâmetros referidos.

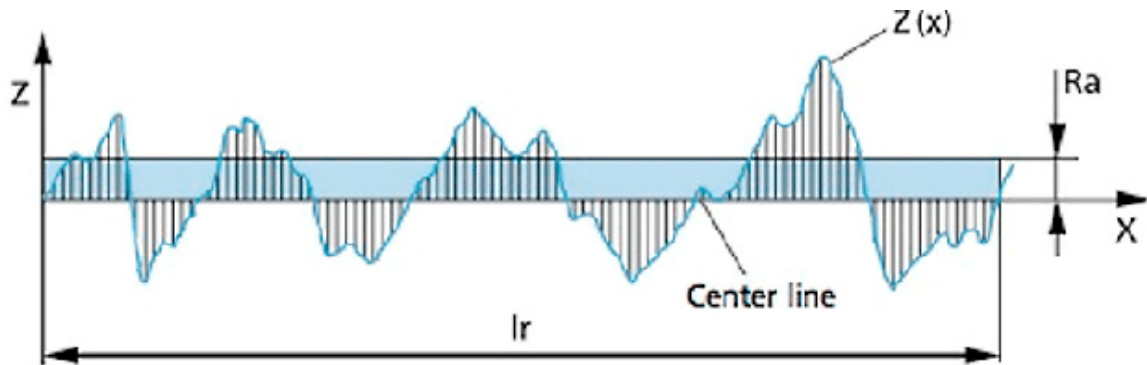


Figura 2.11 - Ra de acordo com ISO 4287 (Boér & Blaga, 2018).

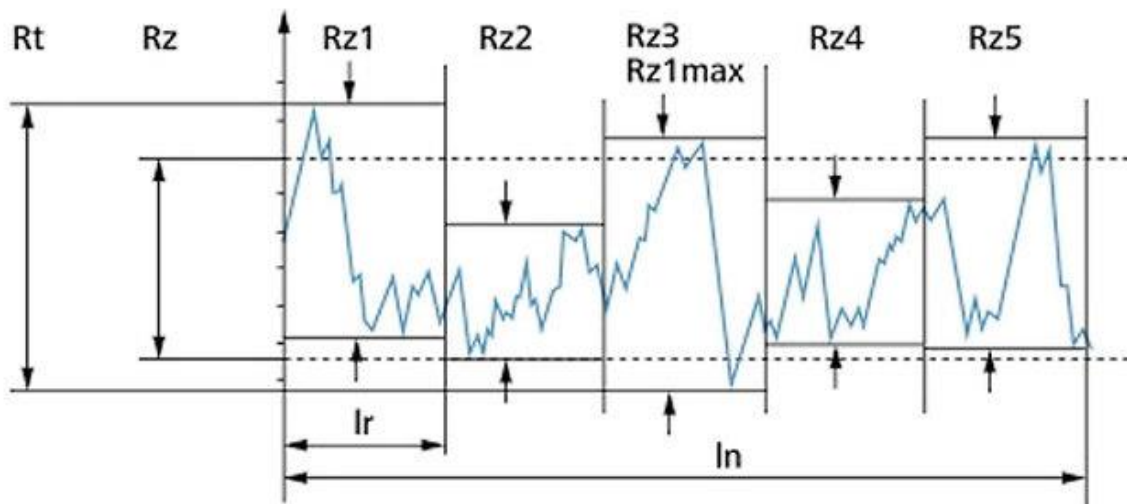


Figura 2.12 - Rz, Rz1max e Rt de acordo com ISO 4287(Boér & Blaga, 2018).

A rugosidade obtida no polimento está restringida, entre outras condicionantes, com os métodos de acabamento. Estes devem ser feitos de forma gradual, começando com tecnologias e materiais para uma rugosidade mais elevada, com progressiva redução até materiais mais macios com os quais é possível obter valores muito reduzidos (Stoekert & Mennig, 1998). No entanto, o fator mais significativo na qualidade do polimento é o material a polir, com especial ênfase na presença de inclusões não metálicas que dificulta a operação devido à diferença de dureza. Durante a operação de polimento, óxidos e carbonetos de elevada dureza, são arrancados da superfície do aço, afetando consideravelmente a qualidade obtida, este efeito pode ser minimizado com a escolha de aços submetidos a tratamentos de refusão e degaseificação, que reduzem a quantidade destas inclusões intermetálicas para valores residuais e permitem um melhor resultado final (Stoekert & Mennig, 1998).

Excluindo as impurezas e outros defeitos de superfície, a operação de polimento é mais fácil quanto maior for a dureza (F. Klocke et al., 2005).

O processo de polimento deve ser progressivo, assim antes de iniciar a operação, a superfície deve ser preparada para atenuar a elevada rugosidade proveniente dos processos de maquinação. A forma mais eficaz, em termos económicos e de tempo, é a retificação com um disco abrasivo de diamante com tamanho de grão entre 80 e 100. No entanto, a utilização destes discos é limitada, desta forma, para reduzir a rugosidade devem ser utilizadas pedras de Carboneto de Silício (SiC), alumina fundida e sulfatada, e limas de óxidos cerâmicos. A sucessão do tamanho de grão das pedras deve ser 180, 240, 320, 400, 600, 1000 e 1200, e cada passagem deve ser perpendicular à antecedente. Quando são exigidas qualidades de polimento mais elevadas, como por exemplo, para superfícies de alto brilho e para acabamento ótico, as peças devem ser acabadas por lapidação. Neste processo são utilizadas ferramentas metálicas não elásticas e não resilientes, para que, os grãos da ferramenta estejam sempre a uma distância precisa da superfície de trabalho. A ação deve ser realizada com o mínimo de pressão possível, de forma, a evitar qualquer remoção de material, assim, o objetivo é passar o mais levemente possível com a ferramenta ao longo da zona em questão. Com o uso de ferramentas elásticas, a rugosidade pode ser ainda mais reduzida, para este efeito são utilizados: plásticos, madeira, fibras duras, borracha dura, entre outros. No entanto, deve-se ter em consideração que, quanto mais prolongado for o uso de ferramentas elásticas e mais grosseira for a estrutura cristalina, mais visível será o efeito de casca de laranja. Pode ainda ser aplicado o polimento com ferramentas macias como feltro, couro ou tecido para a obtenção de uma superfície brilhante (Stoekhert & Mennig, 1998).

## **2.10. Objetivo do trabalho**

Tendo em conta o atual estado da arte, pareceu adequado considerar como principais objetivos deste trabalho de investigação os seguintes tópicos:

- i. Análise dos processos de reparação de cavidades moldantes;
- ii. Análise do aspeto superficial;
- iii. Avaliação de rugosidades;
- iv. Análise dos perfis de dureza nas reparações efetuadas;
- v. Metalografia;

### 3. Materiais, Métodos e Equipamentos

Com o intuito de encontrar soluções para a reparação de moldes por soldadura, sem comprometer o aspeto visual da componente plástica, foram estudados três aços com especial relevância na indústria (DIN 1.2083, DIN 1.2343 e DIN 1.2738Mod). Para cada um deles foi analisado a influência do processo de soldadura, material de adição e ainda tratamentos térmicos antecedentes e sequentes ao processo de soldadura. Por fim, os provetes foram maquinados e retificados, de forma, a retirar o material em excesso e preparar a superfície para o polimento. O processo iniciou-se com a preparação dos provetes, seguindo-se de uma observação do aspeto visual, a medição de rugosidade, a elaboração de perfis de dureza nas zonas soldadas e no material base e por último, a análise metalográfica.

Numa fase inicial foi elaborado um esquema de cada material base, para determinar a quantidade de provetes necessários, visando compreender a influência do processo de soldadura e dos tratamentos térmicos. Considerando que alguns processos divergem consoante o material base, foi efetuada uma descrição da diferença entre os processos (tratamentos térmicos e material de adição) desse mesmo material.

Para o material DIN 1.2083 foram seccionados doze provetes, dos quais dois foram temperados e revenidos a temperaturas diferentes, sem serem submetidos a soldadura para servir de comparação com os restantes provetes. Os provetes para soldadura foram maquinados com dois rasgos (cordão e círculo), com profundidades adaptadas ao processo de soldadura. Foi feita uma separação dos provetes em função do momento do tratamento térmico em relação à soldadura: seis foram temperar antes da soldadura, dos quais dois levaram revenidos para a dureza habitual, e os restantes revenidos a temperaturas mais elevadas. Quanto à soldadura dividiu-se em TIG e Laser (Nd-YAG), com material de adição semelhante a todos os provetes. Dos provetes previamente temperados, os que foram revenidos para a dureza habitual foram submetidos a “revenidos de solda”, e para os provetes revenidos a alta temperatura foi feita uma separação, em que metade foi submetido a “revenidos de solda” e os restantes não levaram qualquer tratamento térmico posterior. Os provetes soldados no estado recozido foram submetidos a uma redução de tensões, seguido de têmpera com divisão na temperatura de revenidos, à semelhança dos provetes temperados antes da soldadura. O acabamento e posteriores operações foram comuns a todos os provetes.

Para o material DIN 1.2343 foram seccionados dez provetes, dos quais dois foram temperados e revenidos a temperaturas diferentes, sem serem submetidos a soldadura, para servir de comparação com os restantes provetes. Os provetes para soldadura foram maquinados com dois rasgos (cordão e círculo), com profundidades adaptadas ao processo de soldadura. Foi efetuada uma separação dos provetes em função do momento do tratamento térmico, em relação à soldadura, cinco foram temperar antes da soldadura com revenidos a alta temperatura, e três foram soldar no estado recozido. Dos provetes temperados, três foram utilizados no processo de soldadura TIG recorrendo a dois materiais de adição distintos, e no processo de soldadura Laser (Nd:YAG) foram utilizados os outros dois provetes temperados, ao qual foi adicionado um outro material de adição. Tal como para os provetes temperados, nos provetes recozidos foram utilizados dois materiais de adição distintos para a soldadura TIG e apenas um para a soldadura Laser. Dos provetes temperados e soldados a TIG, um provete de cada material de adição foi submetido a “revenidos de solda”, e um provete de um dos materiais de adição não foi submetido a quaisquer tratamentos térmicos posteriores. A mesma divisão foi efetuada nos provetes temperados e soldados a laser, como referido anteriormente. Os provetes recozidos, tanto de soldadura TIG como laser, foram submetidos a uma redução de tensões, seguido de têmpera e revenidos a altas temperaturas. O acabamento e posteriores operações foram comuns a todos os provetes.

Para o material DIN 1.2738Mod foram seccionados seis provetes, onde foram maquinados os rasgos (cordão e círculo), com exceção de um provete que seguiu para a retificação e polimento, para servir de comparação com os restantes. Por se tratar de um aço pré-tratado, não foi efetuado qualquer tratamento térmico anterior à soldadura. Quanto ao processo de soldadura, foram utilizados três provetes para TIG e dois provetes para laser, constatando que o material de adição variou consoante o processo de soldadura, mas entre os provetes submetidos ao mesmo processo, o material de adição foi semelhante. Na soldadura TIG, um provete foi soldado sem pré-aquecimento e com posteriores “revenidos de solda”, outro foi soldado com pré-aquecimento e com posteriores “revenidos de solda”, e o terceiro com pré-aquecimento, mas sem “revenidos de solda”. Dos provetes soldados por Laser um provete foi submetido a “revenidos de solda” e o outro não. O acabamento e posteriores operações foram comuns a todos os provetes.

### 3.1. Corte e Maquinação

Os provetes foram fornecidos com uma dimensão mínima de 60x60x20mm. Todos os provetes foram numerados e medidos para controlo das dimensões. Nos provetes em aço pré-tratado, a dureza foi verificada para assegurar que estava conforme com a informação indicada no certificado do aço.

Nos provetes para soldadura TIG foi efetuado um rasgo com comprimento de 25mm, 4mm de largura e 0,6mm de profundidade, e outro rasgo com 20mm de diâmetro e uma profundidade de 1,0mm. Nos provetes para soldadura Laser Nd:YAG foi efetuado um rasgo com comprimento de 25mm, 4mm de largura e 0,2mm de profundidade, e outro rasgo com 20mm de diâmetro e uma profundidade de 0,4mm como se demonstra na Figura 3.1.

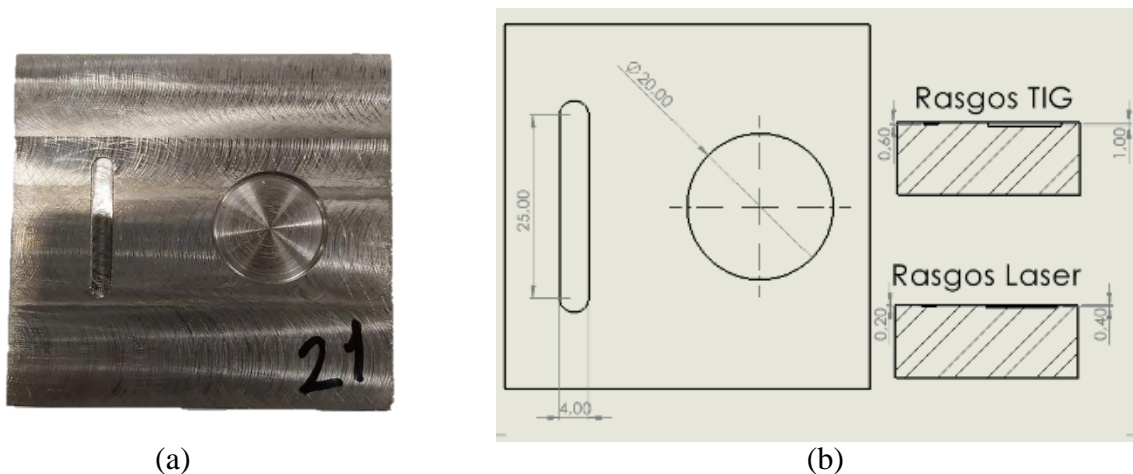


Figura 3.1 – Geometria dos provetes para soldadura TIG e Laser Nd:YAG: (a) Provede após maquinação dos rasgos; (b) Desenho CAD dos rasgos

### 3.2. Materiais base

Conciliando a informação mencionada no subcapítulo “2.2 - Materiais típicos para as cavidades moldantes”, com o conhecimento prático obtido pela execução de atividades profissionais numa empresa de tratamentos térmicos e de endurecimento superficial, culminou na perceção de quais os aços mais utilizados em cavidades de moldes para termoplásticos. Consequentemente, considerou-se essencial o estudo de um aço para ferramenta pré-tratado (DIN 1.2738Mod), um aço para ferramenta de trabalho a quente (DIN 1.2343), e um aço inoxidável martensítico (DIN 1.2083) que embora seja menos utilizado, apresenta especial relevância para a injeção de termoplásticos corrosivos. A designação

utilizada para os materiais base é dada conforme a norma DIN EN 10027-Parte 2 – “Sistema de designação de aço”, considerando que o primeiro dígito representa o grupo do material (neste caso, aços), seguido de dois dígitos referentes ao grupo de aços, e por fim os dois últimos dígitos referentes ao número de ordem (característico). O grupo de aços pode ser consultado na Tabela 1 da norma referida (Deutsches Institut für Normung, 1992). No seguimento do trabalho, os aços serão denominados pelo seu número, sem o sufixo referente à norma DIN.

### 3.2.1. 1.2083 ESR

Os provetes foram obtidos a partir de uma barra retangular, laminada e no estado recozido, com uma dureza de 170HB e tratamento de refusão por escória eletrocondutora (ESR).

A barra é proveniente do Lote n.º 1004523602, detém o certificado n.º T29151 e o n.º 888690 de vazamento. A composição química segundo o certificado do aço consta na Tabela 3.1. O certificado do aço pode ser consultado no Anexo D.

Foram fornecidos dezoito provetes com dimensões de 75x60x25mm, dos quais foram utilizados doze, segundo a distribuição referida no capítulo “3. - Materiais, Métodos e Equipamentos”, salvaguardando alguns provetes para reserva, caso fosse necessário. A designação do material corresponde ao número DIN, equivalente ao X42Cr13 segundo a nomenclatura desta mesma norma, ao AISI420, e Z40C14 segundo a AFNOR.

Tabela 3.1 - Composição química 1.2083 ESR

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
1.2083 ESR	0,390	0,320	0,840	0,220	<0,001	13,010	Bal.

### 3.2.2. 1.2343 ESR

Os provetes foram obtidos a partir de uma barra retangular, forjada e no estado recozido, com uma dureza de 167HB e tratamento de refusão por escória eletrocondutora (ESR).

A barra é proveniente do Lote n.º 1004523634, detém o certificado n.º T29776 e o n.º 850370 de vazamento. A composição química segundo o certificado do aço consta na Tabela 3.2. O certificado do aço pode ser consultado no Anexo D.

Foram fornecidos dezoito provetes com dimensões de 65x60x25mm, dos quais foram utilizados dez, segundo a distribuição referida no capítulo “3. - Materiais, Métodos e

Equipamentos” salvaguardando alguns provetes de reserva, caso fossem necessários. A designação do material corresponde ao número DIN, equivalente ao X38CrMoV5-1 segundo a nomenclatura desta mesma norma, ao H11 segundo a norma AISI, e Z38CDV5 segundo a AFNOR.

**Tabela 3.2 - Composição química 1.2343 ESR**

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo	Fe
1.2343 ESR	0,390	0,940	0,440	0,013	<0,001	5,070	0,470	1,250	Bal.

### 3.2.3. 1.2738 Mod (SP300)

Os provetes foram obtidos a partir de uma barra retangular, forjada e no estado recozido, com uma dureza de 295HB.

A barra é proveniente do Lote n.º 1004524602, detém o certificado n.º T29791 e o n.º 25676 de vazamento. A composição química segundo o certificado do aço consta na Tabela 3.3. O certificado do aço pode ser consultado no Anexo D.

Foram fornecidos doze provetes com dimensões de 60x60x25mm, dos quais foram utilizados seis, segundo a distribuição referida no capítulo “3. - Materiais, Métodos e Equipamentos”, salvaguardando alguns provetes para reserva caso fossem necessários. A designação do material refere o número DIN 1.2738, no entanto, há modificações na composição química pelo que o nome comercial é SP300.

**Tabela 3.3 - Composição química 1.2738 Mod**

	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	Fe
1.2738 Mod	0,266	0,110	1,380	0,002	1,370	0,450	0,310	Bal.

## 3.3. Tratamentos térmicos

Um dos focos de estudo do presente trabalho incide na influência do tratamento térmico no produto final. Os tratamentos térmicos efetuados coincidiram com o que é habitualmente efetuado na indústria de moldes, com determinadas exceções onde foram realizadas experiências atípicas. As têmperas e reduções de tensões dos provetes já soldados foram efetuados em fornos de vácuo. Os revenidos de têmpera, “revenidos de solda”, e pré-

aquecimento dos provetes para soldadura TIG foram efetuados em muflas com atmosfera inerte.

O pré-aquecimento para os provetes destinados à soldadura TIG manteve-se constante à temperatura de 300°C para os três materiais utilizados. A redução de tensões após a soldadura foi efetuada a 630°C, com tempo de estágio de 2 horas, seguido de um arrefecimento lento até aos 300°C.

Para os provetes em 1.2083ESR e 1.2343ESR, a têmpera foi efetuada a 1020°C com tempo de estágio de 30 minutos a essa temperatura, seguido de arrefecimento em azoto à pressão de 3,5bar. A temperatura dos revenidos de têmpera foi selecionada em conformidade com a dureza recomendada de 48-52HRC. Concretamente, para o material 1.2083ESR foram efetuados dois revenidos a 400°C, e para o material 1.2343ESR foram efetuados revenidos a 580°C e 560°C. Adicionalmente, para os provetes em 1.2083ESR, determinados provetes foram revenidos a 540°C seguido de 530°C, e um provete para comparação em 1.2343ESR foi sujeito a dois revenidos a 300°C. Todos os revenidos tiveram uma duração mínima de 3 horas de estágio (Granja et al., 2003).

Os “revenidos de solda”, quando aplicados, foram efetuados a uma temperatura inferior à dos revenidos de têmpera. No caso dos provetes em 1.2738Mod, que não foram sujeitos a mais nenhum tratamento térmico devido ao estado de fornecimento do material, foram aplicados dois revenidos à temperatura de 540°C. A mesma temperatura foi utilizada para os “revenidos de solda” para os provetes em 1.2343ESR, temperados antes da soldadura. Para os provetes em 1.2083ESR temperados antes da soldadura foram efetuados dois revenidos a 500°C nos que previamente tinham revenidos de têmpera a 540°C, e dois revenidos a 350°C nos provetes que previamente foram revenidos a 400°C.

O controlo dos tratamentos térmicos foi efetuado com recurso ao software Demig, que permite monitorizar a temperatura e pressão registadas pelos sensores do forno. Para o registo da temperatura foram utilizados dois termopares do tipo K com classe de exatidão 1, que foram colocados no interior de um bloco com espessura semelhante à dos provetes para o registo da temperatura de interior, e um termopar junto ao exterior para registar a temperatura na superfície.

### 3.4.Soldadura

#### 3.4.1. TIG

O processo de soldadura TIG foi executado por uma máquina de soldar da REHM, modelo INVERTIG.PRO digital 280 AC/DC (Figura 3.2). Os parâmetros utilizados encontram-se resumidos na Tabela 3.4. De notar que a velocidade de avanço (mm/min) e o comprimento do arco elétrico foram estimados por aproximação. Durante o processo de soldadura foi utilizado árgon de laboratório como gás de proteção (pureza 99,999%), com um débito de 8 a 9 litros por minuto. A Figura 3.3 mostra o aspeto de um provete após soldadura TIG.



Figura 3.2 - INVERTIG.PRO digital 280 AC/DC

Tabela 3.4 - Parâmetros soldadura TIG

Nº de Provete	Intensidade de Corrente (A)	Diâmetro fio (mm)	Vel. Avanço (mm/min)	Comprimento Aprox. arco (mm)
6	115	1,0	1,2	1,5-2,0
7	100			
9				
21	90			
22				
24				
25				
27				
39				
41				
43				
44				
46				



Figura 3.3 - Provete n.º43 após Soldadura TIG

### 3.4.2. Laser Nd-Yag

O processo de soldadura Laser Nd-YAG foi executado por uma máquina de soldar da AlphaLaser, modelo ALM300 v4.1 (Figura 3.4). Esta, conta com uma mesa de trabalho de 1420x1600x170mm, potência de 300W, energia de pulso até 90J, potência de pico de 9kW e duração de pulso variável entre 0,5 a 20ms. Auxiliarmente foi utilizada uma máquina laser para limpar a superfície a soldar da Max Photonics, modelo Backpack Laser Cleaning Machine. A Figura 3.5 mostra o aspeto de um provete após soldadura laser.



Figura 3.4 - ALM300 v4.1



Figura 3.5 - Provete n.º38 após Soldadura LASER

Os parâmetros utilizados encontram-se resumidos na Tabela 3.5, considerando que a velocidade de avanço não pôde ser determinada analiticamente, visto ser controlada manualmente por um joystick.

Tabela 3.5 - Parâmetros Soldadura laser Nd:YAG

Nº de Provete	Potência do Pulso (kW)	Tensão (V)	Duração do Pulso (ms)	Frequência (Hz)	Diâmetro de Focagem (mm)	Diâmetro Fio (mm)
1	67,8	234	5,5	11	0,9	0,4
4						
13	125,5	262	6,5		1,3	0,6
16						
19						
31	51,7	220	5,5		0,9	0,4
33						
36						
37						
38						

### 3.4.3. Material de adição

O material de adição foi selecionado consoante o material base a soldar e o processo de soldadura. A escolha residiu no que é habitualmente utilizado na indústria de moldes, e em alguns casos, experiências por iniciativa própria do soldador.

Para o material base 1.2083ESR, o material de adição utilizado foi o Stavax, tanto para os provetes soldados por TIG como para laser. Para o material base 1.2738Mod foi utilizado o material de adição QuFe10 nos provetes para soldadura TIG, enquanto para a soldadura laser foi utilizado o material QuFe15. Para o material base 1.2343ESR foi utilizado o material de adição QuFe21 na soldadura laser, e os materiais de adição QuFe13 e QuFe23 para a soldadura TIG. Na Tabela 3.6 estão indicadas as composições químicas dos materiais de adição utilizados. Os elementos presentes em quantidades residuais não estão indicados, mas podem ser consultados no Anexo E. Na Figura 3.6 está exposto um fluxograma da sequência de operações e materiais utilizados em cada provete.

Tabela 3.6 - Composição química dos materiais de adição

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Ti
QuFe10	0,10	0,65	1,14	-	0,46	-	-	-
QuFe13	0,25	0,4	0,63	4,83	3,60	-	-	0,71
QuFe23	0,37	1,0	0,39	4,87	1,21	0,42	-	-
Stavax	0,38	0,45	0,45	13,5	1,00	-	-	-
QuFe21	0,35	0,43	0,99	6,65	2,10			0,24
QuFe15	0,09	0,55	0,98	2,30	0,98			

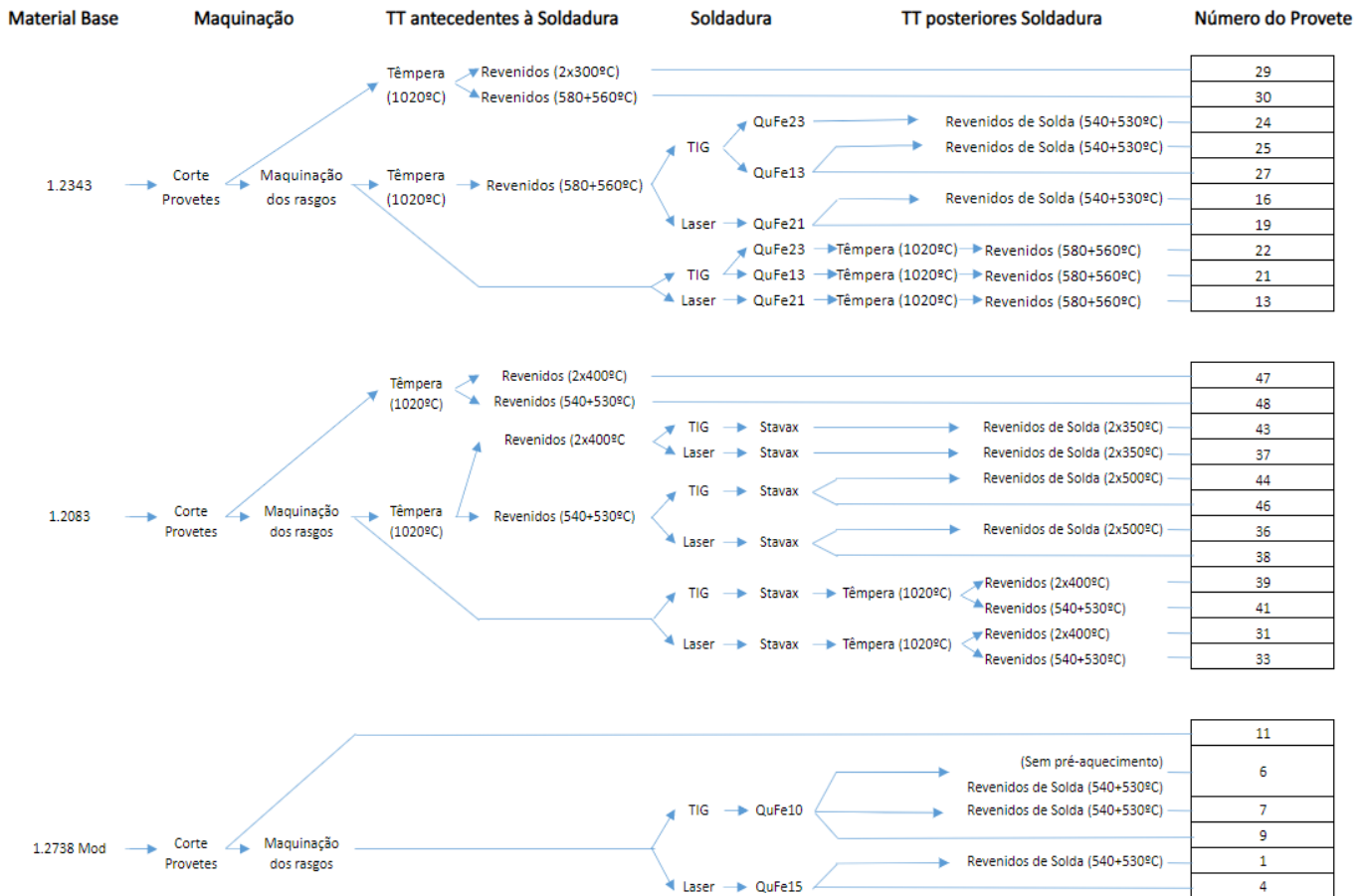


Figura 3.6 - Fluxograma de processos dos provetes

### 3.5.Acabamento

Após a soldadura e a realização dos tratamentos térmicos, os provetes foram preparados para as análises. O acabamento compreendeu três etapas: maquinação, retificação e polimento.

#### 3.5.1. Maquinação

A maquinação foi efetuada numa CNC, para remover o excesso de material resultante do processo de soldadura. Os provetes que não foram soldados, não foram submetidos a esta operação, uma vez que, não tinham material a remover, e já apresentavam a rugosidade característica desta operação. Na Figura 3.7 é possível ver o aspeto de um provete após maquinação.



Figura 3.7 - Provet n°21 após maquinação

#### 3.5.2. Retificação

A retificação foi efetuada numa retificadora, para retirar quaisquer defeitos que pudessem existir da maquinação, reduzindo a rugosidade da superfície, por forma a permitir o seu polimento. Após a operação de retificação, os provetes ficaram com um aspeto semelhante ao ilustrado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Provet n°21 após retificação

### 3.5.3. Polimento

O polimento marca o fim do processo de acabamento dos provetes, com a obtenção do brilho ótico. Para o polimento dos provetes foram utilizados métodos convencionais, que compreenderam o uso de pedras, lixas e pastas. Antes de começar o processo, a superfície a polir foi limpa com diluente para retirar óleo ou outros resíduos que estivessem presentes.

O processo de polimento foi iniciado com pedra de óxido de alumínio branco com granulometrias 400, 600 e 900 *mesh*, e pedra de carboneto de silício verde de granulometria 1200 *mesh*. O provete foi rodado a 90° a cada mudança de pedra, e para facilitar o polimento, foi utilizado um engenho de agitação (Figura 3.9) para a movimentação da pedra sobre o provete. Entre a aplicação da pedra 1200 *mesh* e as pastas diamantadas foi feita uma passagem com lixa P1200 *mesh*, envolvida em torno de uma lâmina de latão para criar uma superfície plana, com o intuito de eliminar os riscos da aplicação de pedra.



Figura 3.9 - Engenho de Agitação

O polimento com pastas iniciou-se com a aplicação de pasta diamantada de 6 $\mu$ m, com o auxílio de uma roda de feltro macia, com a qual foi exercida força, perpendicularmente ao plano da superfície a polir, e uma rotação transmitida pelo engenho de agitação à roda de 3000rpm. Após a primeira passagem, o provete foi limpo com diluente e algodão, para identificar as zonas com riscos, seguindo-se de uma nova passagem da roda, com pasta diamantada de 3 $\mu$ m, rotação de 3000rpm e força perpendicular à superfície a polir. Montou-se a manta no engenho de agitação, e aumentou-se a rotação para 6300rpm para uma passagem sem exercer pressão de pasta diamantada de 3 $\mu$ m. Por fim, foi feita uma última passagem com a manta para retirar as marcas das passagens da roda e manta a 3000rpm. Ao longo do processo de polimento com pastas, utilizou-se um óleo de corte próprio para facilitar o processo e reduzir o aquecimento do provete. A aparência dos provetes, após as diversas passagens, é dada na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Aspeto do provete durante Polimento

### 3.6. Análises

#### 3.6.1. Avaliação Visual

A avaliação do aspeto visual tem como objetivo identificar as diferenças entre o material base, zona soldada e zona adjacente à solda. Neste exercício, as superfícies foram limpas e analisadas sem recurso a equipamentos externos. Para a captação de fotografias foi utilizada uma câmara fotográfica. De notar que, para verificar algumas dissemelhanças na superfície polida, o provete tinha de estar em determinadas posições, pelo que, em muitas das fotografias captadas essas diferenças não são perceptíveis.

#### 3.6.2. Rugosidade Superficial

Na medição da rugosidade foram analisados os parâmetros Ra, Rt e Rz, definidos anteriormente segundo a norma ISO 4287 – “Geometrical Product Specification - Surface texture: Profile method, terms, definitions and surface texture parameters”. A medição foi efetuada com o rugosímetro MarSurf PS10 Set da Mahr (Figura 3.11(a)). As medições foram efetuadas em conformidade com a norma ISO 16610-21 – “Geometrical Product Specification – Filtration”, com um *Cut-off* ( $\lambda_c$ ) de 0,8mm, por cinco intervalos de médias individuais (N), o que resulta num curso de medição ( $\lambda_s$ ) de 4,8mm, tendo em conta que é adicionado um intervalo no início que não é contabilizado para a medição. Em cada provete foram efetuadas 27 medições, segundo as zonas ilustradas na Figura 3.11(b), com exceção dos provetes sem soldadura, em que apenas foi medido o material base.

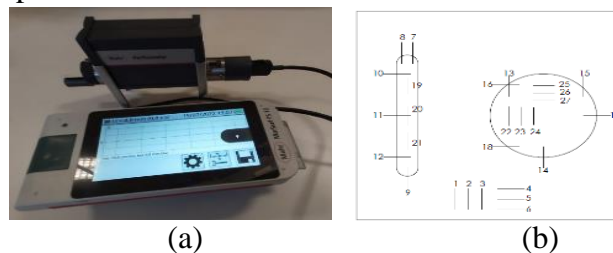


Figura 3.11 – Avaliação da rugosidade superficial dos provetes soldados: (a) MarSurf PS10; (b) Zonas de medição de rugosidade num provete soldado.

As 27 medições efetuadas correspondem a cinco zonas distintas. Cada zona é composta por seis medições (três medições na direção vertical e três medições na direção horizontal), com exceção do material de adição do cordão, onde apenas foram realizadas três medições na vertical, uma vez que, o comprimento do cordão é inferior ao curso da medição. Os valores apresentados no subcapítulo “4.2 - Rugosidade” resultam da média aritmética das medições de cada zona. As descrições das zonas de medição encontram-se na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7 - Descrição das zonas de medição de rugosidade**

<b>Nº de Medição</b>	<b>Zonas</b>	<b>Descrição</b>
1	Material Base	Vertical medição 1
2		Vertical medição 2
3		Vertical medição 3
4		Horizontal medição 1
5		Horizontal medição 2
6		Horizontal medição 3
7	Transição Cordão	Vertical Ponta 1
8		Vertical Meio
9		Vertical Ponta 2
10		Horizontal Ponta 1
11		Horizontal Meio
12		Horizontal Ponta 2
13	Transição Círculo	Vertical Ponta 1
14		Vertical Meio
15		Vertical Ponta 2
16		Horizontal Ponta 1
17		Horizontal Meio
18		Horizontal Ponta 2
19	Material Adição Cordão	Vertical medição 1
20		Vertical medição 2
21		Vertical medição 3
22	Material Adição Círculo	Vertical medição 1
23		Vertical medição 2
24		Vertical medição 3
25		Horizontal medição 1
26		Horizontal medição 2
27		Horizontal medição 3

### 3.6.3. Perfis de dureza

O equipamento utilizado para elaborar os perfis de dureza foi o durómetro EMCO Test Duravision20 (Figura 3.12(a)). A dureza foi avaliada de acordo com o método Vickers. A determinação do comprimento das diagonais é dada automaticamente pelo software do equipamento, que converte para os valores de dureza conforme ilustrado na Figura 3.12(b), com exceção de alguns casos pontuais onde o comprimento das diagonais teve de ser ajustado manualmente, devido a alguma interferência que tenha ocorrido na medição automática.

O espaçamento entre indentações foi de 0,2mm, iniciando as medições na zona soldada e avançando progressivamente para o material base. De forma a respeitar as diretivas indicadas na norma ISO 6507-1, que especifica que a distância entre os centros de duas indentações adjacentes deve ser superior a três vezes o comprimento da média da diagonal, foi efetuado um cálculo prévio para determinar qual a carga máxima a aplicar que cumprisse os requisitos. Para determinar a carga máxima (Kg) utilizou-se a equação (1), considerando a dureza aproximada do material base pré-tratado de 350HV.

$$HV = 0,102 \times \frac{2F \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} = 0,1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

$$F \leq \frac{350 \times \left(\frac{0,2}{3}\right)^2}{0,1891 \times 9,81} \quad (2)$$

$$F \leq 0,8385Kgf \quad (3)$$

Pelo desenvolvimento da equação (1), obteve-se o valor de carga máxima de 0,8385kgf, de forma a cumprir os requisitos da norma ISO 6507-1, pelo que a carga utilizada corresponde a 0,5kgf.

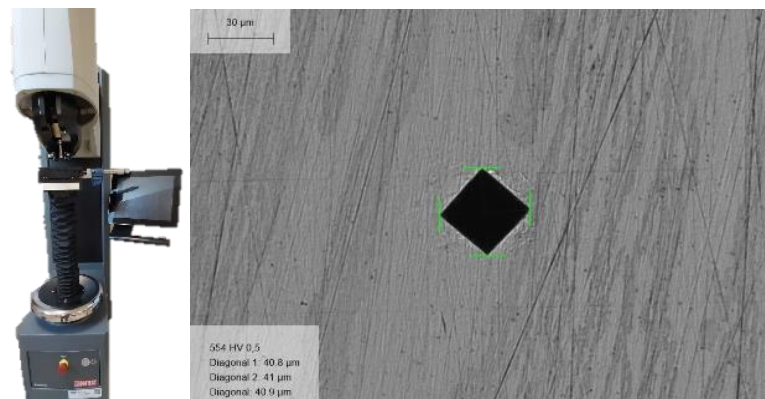


Figura 3.12 - (a) EMCO Test Duravision20; (b) Exemplo medição de dureza

#### 3.6.4. Análise metalográfica

De modo a ser possível realizar a análise metalográfica aos provetes soldados, estes tiveram de ser seccionados, sujeitos a polimento mecânico e com pasta diamantada, e submetidos a ataque químico através de um reagente adequado para a identificação das fases presentes.

O seccionamento foi efetuado na máquina de corte Struers Labotom-3 (Figura 3.13(a)), com discos de corte próprios para aço e aço inoxidável. O processo decorreu a 2800rpm, acompanhado de refrigerante com propriedades anticorrosivas.

O polimento realizou-se na máquina polidora Struers RotoPol-21 (Figura 3.13(b)), a 150rpm. O desbaste mecânico foi efetuado com lixas de SiC de granulometria sucessivamente decrescente até 1200 *mesh* (Figura 3.13(c)). Seguiu-se o polimento com pasta diamantada de granulometria 6 $\mu$ m e 3 $\mu$ m.

O reagente utilizado para o ataque químico aos provetes em 1.2738Mod e 1.2343 foi o Nital a 5% (5ml ácido nítrico; 95ml etanol), enquanto para os provetes em 1.2083 foi utilizado Kalling's No.2 (5g cloreto de cobre (II); 100ml ácido clorídrico; 100ml etanol).

Para a visualização da microestrutura utilizou-se o durómetro EMCO Test Duravision 20 (Figura 3.12(a)).

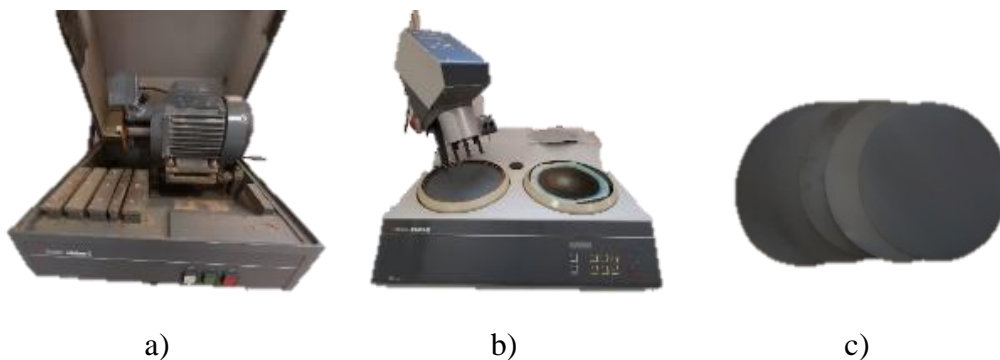


Figura 3.13 – (a)Máquina de corte Struers Labotom-3; (b) Polidora Mecânica Struers RotoPol-21; (c) lixas de papel de SiC

## 4. Resultados e Discussão

No presente capítulo são expostos os resultados obtidos nas análises efetuadas aos provetes, assim como, algumas decisões tomadas durante esse mesmo exercício. Posteriormente, são discutidos os resultados obtidos.

### 4.1. Avaliação Visual

Considerando que, a avaliação visual da superfície dos provetes soldados apresenta subjetividade, foi criada uma escala de classificação de 1 a 5, de forma a ser possível comparar os diferentes provetes, no que respeita à visualização da zona soldada. Na escala de 1 a 5 estabelecida, o valor inferior (1) corresponde ao valor menos satisfatório, que em termos visuais se traduz numa zona soldada bastante perceptível, enquanto o valor superior (5) corresponde ao valor mais satisfatório, em que não é possível distinguir o material base da zona soldada.

Uma vez que, o presente trabalho enfoca na aptidão e qualidade da zona soldada ao polimento, na avaliação do aspeto visual foram desprezados os casos em que, na soldadura laser Nd:YAG, é possível observar defeitos superficiais nos provetes.

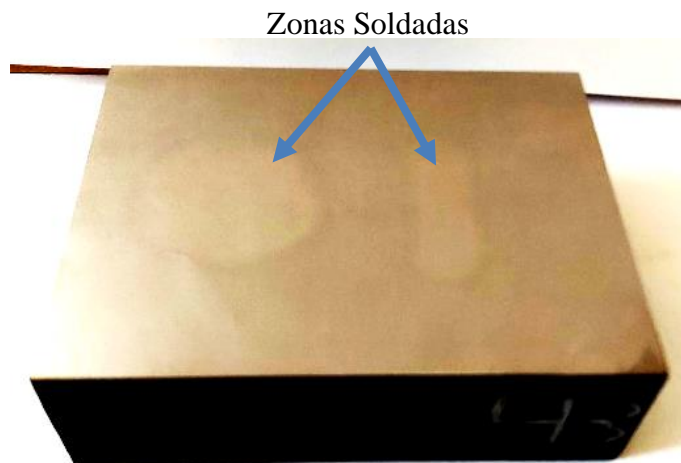
Com o intuito, de reduzir a quantidade de imagens do aspeto visual dos provetes, será dado um exemplo de um provete com classificação 5 (Figura 4.1), um provete com classificação 2 (Figura 4.2), e ainda um provete com os defeitos mencionados no parágrafo anterior (Figura 4.3).

A classificação obtida na Tabela 4.1 representa a média aritmética, das classificações atribuídas pelos intervenientes na produção dos provetes. Assim, além da classificação atribuída pelo autor, foram consideradas igualmente as dos responsáveis pelas operações de maquinação, tratamentos térmicos, soldadura e polimento.

A discussão das classificações atribuídas será feita por material, de forma a apurar a solução que permite obter o melhor resultado.



**Figura 4.1 - Aspecto visual provete n.º22, classificação 5**



**Figura 4.2 - Aspecto visual provete n.º43, classificação 2**



**Figura 4.3 - Aspecto visual Provete n.º 16, defeitos superficiais**

Tabela 4.1 - Classificação obtida por avaliação da superfície dos provetes soldados.

<b>N.º Proвете</b>	<b>Material Base</b>	<b>Classificação</b>
<b>1</b>	<b>1.2738Mod</b>	4
<b>4</b>		2
<b>6</b>		4
<b>7</b>		4
<b>9</b>		2
<b>11</b>		5
<b>13</b>		<b>1.2343</b>
<b>16</b>	4	
<b>19</b>	3	
<b>21</b>	5	
<b>22</b>	5	
<b>24</b>	3	
<b>25</b>	3	
<b>27</b>	3	
<b>29</b>	5	
<b>30</b>	5	
<b>31</b>	<b>1.2083</b>	4
<b>33</b>		3
<b>36</b>		2
<b>37</b>		4
<b>38</b>		2
<b>39</b>		3
<b>41</b>		3
<b>43</b>		2
<b>44</b>		2
<b>46</b>		2
<b>47</b>		5
<b>48</b>	5	

#### **4.1.1. 1.2738Mod**

Para o material base 1.2738Mod foram examinados seis provetes, dos quais os números 1 e 4 correspondem aos provetes soldados a laser Nd:YAG, os números 6, 7 e 9 correspondem aos provetes soldados a TIG, e o provete n.º 11 corresponde ao padrão de comparação com os restantes. Dos provetes soldados o n.º 9 (TIG sem “revenidos de solda”) e o n.º 4 (Laser sem “revenidos de solda”) apresentaram a classificação mais baixa, enquanto os restantes obtiveram uma classificação superior.

Com estes resultados é possível concluir que, a ausência dos “revenidos de solda” contribuí para uma auréola na zona adjacente à solda mais saliente, deixando as marcas do processo de soldadura mais visíveis. Embora o resultado tenha sido idêntico, a ausência de “revenidos de solda” é mais crítico no processo de soldadura TIG, por ser um processo que transmite grande quantidade de calor à peça, e conseqüentemente, a zona termicamente afetada tem maiores dimensões. Comparando os provetes n.º 6 e n.º 7 (TIG com “revenidos de solda”) é possível concluir que, o uso de pré-aquecimento não tem grande influência no resultado, não obstante que o seu uso é aconselhado, principalmente em peças com alguma complexidade, uma vez que, reduz o choque térmico na peça e diminui o risco de fissuras.

#### **4.1.2. 1.2343**

Para o material base 1.2343 foram examinados dez provetes, dos quais os números 13, 16 e 19 correspondem aos provetes soldados a laser Nd:YAG, os números 21, 22, 24, 25, e 27 correspondem aos provetes soldados a TIG, e os números 29 e 30 correspondem ao padrão de comparação com os restantes. Dos provetes soldados a laser, o n.º 19 (sem solda temperada e sem “revenidos de solda”) e o n.º 13 (solda temperada) têm a classificação mais baixa, enquanto o n.º 16 (sem solda temperada e com “revenidos de solda”) apresentam classificação superior. Dos provetes soldados a TIG, os números 24 (sem solda temperada e com “revenidos de solda”), 25 (sem solda temperada e com “revenidos de solda” após a peça arrefecer) e 27 (sem solda temperada e sem “revenidos de solda”) apresentam a mesma classificação que o provete soldado a laser com a classificação mais baixa, enquanto os provetes 21 e 22 (com solda temperada) apresentam uma classificação superior à do melhor resultado dos provetes laser.

Considerando que, o processo de soldadura Laser transmite pouco calor à peça, é de esperar que a zona termicamente afetada, mesmo sem quaisquer tratamentos térmicos posteriores, tenha uma qualidade superior a uma soldadura TIG nas mesmas condições. Por transmitir

pouco calor à peça, o resultado que se consegue obter com a aplicação de “revenidos de solda” é semelhante ao resultado obtido no provete com a zona soldada temperada. Embora fosse expectável que o resultado obtido no provete temperado fosse melhor ou idêntico ao provete com “revenidos de solda”, tal não se verificou. A diferença na composição química entre o material base e o material de adição, pode ter evidenciado alguma diferença de cor, entre as duas regiões, que culminou numa maior dissemelhança visual.

Nos provetes em que foi aplicada soldadura TIG, verificou-se uma diferença de qualidade muito grande entre os provetes com e sem solda temperada. Nos dois provetes (materiais de adição diferentes) com solda temperada, a zona soldada não era perceptível a olho nu, estando equiparável ao aspeto dos provetes sem zona soldada. Em contrapartida, os provetes sem solda temperada, apresentavam uma auréola na zona adjacente à solda muito saliente, não existindo diferenças significativas entre o provete sem “revenidos de solda”, o provete com “revenidos de solda”, e o provete com “revenidos de solda” após a peça arrefecer até à temperatura ambiente. De notar que, o teste conduzido no último provete não é aconselhado, devido ao risco de fissura.

#### **4.1.3. 1.2083**

Para o material base 1.2083 foram examinados doze provetes, dos quais os números 31, 33, 36, 37 e 38 correspondem aos provetes soldados a laser Nd:YAG, os números 39, 41, 43, 44, e 46 correspondem aos provetes soldados a TIG, e os números 47 e 48 correspondem ao padrão de comparação com os restantes.

Dos provetes soldados a laser, os números 36 (sem solda temperada e com “revenidos de solda” a alta temperatura) e 38 (sem solda temperada e sem “revenidos de solda”) têm a classificação mais baixa, seguido do número 33 (com solda temperada e revenidos a alta temperatura), e com a classificação mais alta os números 31 (solda temperada e revenidos a baixa temperatura) e 37 (sem solda temperada com “revenidos de solda” a baixa temperatura). Dos provetes soldados a TIG, os números 43 (sem solda temperada e com “revenidos de solda” a baixa temperatura), 44 (sem solda temperada e com “revenidos de solda” a alta temperatura) e 46 (sem solda temperada e sem “revenidos de solda”) têm a classificação mais baixa, enquanto os números 39 (solda temperada e "revenidos a baixa temperatura) e 41 (solda temperada e revenidos a alta temperatura) têm a mesma classificação que o número 33.

Nos provetes em 1.2083 soldados a laser, os resultados indicam que o fator com maior influência na qualidade visual incide na dureza do material base, seguido do momento da têmpera (com ou sem solda), visto que, das classificações obtidas, os que apresentam valores mais baixos são os números em que o material base foi exposto a revenidos a alta temperatura, e conseqüentemente, a dureza baixou. Com valor intermédio está o provete com revenidos a alta temperatura, porém, devido ao tratamento térmico de têmpera, a auréola na zona adjacente à solda foi atenuada. Por fim, os provetes de laser com melhores resultados são aqueles em que o material base tem dureza mais elevada, não existindo diferenças significativas com o uso de “revenidos de solda”.

Dos provetes soldados a TIG, à semelhança dos provetes com material base 1.2343, verificou-se uma diferença de qualidade muito grande entre os provetes com e sem solda temperada. Nos provetes sem solda temperada, o resultado obtido foi idêntico nos provetes com e sem tratamento térmico posterior à solda, apresentando uma auréola na zona adjacente à solda muito saliente, verificando-se igualmente uma diferença de cor muito acentuada entre o material base e a zona soldada. Os provetes com solda temperada exibiam uma auréola menos perceptível e uma diferença de cor entre o material base e zona soldada menos acentuada, embora fosse possível identificar a última referida.

#### **4.1.4. Notas**

A existência de faltas de material nos provetes soldados a laser, pode ser justificada pelo facto de ser um processo mais moroso, que conduziu a que a sobre espessura dada aos provetes não tenha sido suficiente, culminando na evidência de faltas de material em determinados pontos, após a retificação e polimento. Com o objetivo de determinar se esse efeito poderia ser contornado, foram preparados alguns provetes aos quais foi adicionada uma sobre espessura maior, para prevenir os defeitos mencionados. Conforme ilustrado na Figura 4.4, os provetes preparados posteriormente não apresentavam faltas de material. A avaliação do aspeto visual corresponde aos valores atribuídos nos primeiros provetes (a comparação foi efetuada com provetes submetidos aos mesmos processos), pelo que, as análises seguintes foram efetuadas nos primeiros provetes.

Após a primeira avaliação visual foram selecionados dois provetes (n.º 24 e n.º 43) para efetuar novo polimento, com pastas especiais do polidor, para averiguar se seria possível melhorar o resultado obtido no primeiro polimento. Ao comparar os resultados obtidos no segundo polimento com a primeira avaliação, concluiu-se que a zona termicamente afetada estava menos visível, embora em ambos, ainda fosse possível identificar o material de adição. Com o novo polimento, o provete n.º 24 obteve uma classificação de 4, enquanto o provete n.º 43 obteve uma classificação de 3, devido à diferença de cor entre o material base e o material de adição.



**Figura 4.4 - Provetes n.º18, soldado a laser para segunda análise visual**

## **4.2. Rugosidade**

Através da análise de rugosidade é possível determinar a qualidade de uma superfície. Para a obtenção de peças plásticas de elevada exigência como lentes, a ferramenta deve ter um acabamento ótico, o que em termos quantitativos, representa valores de rugosidade muito reduzidos.

A análise da rugosidade dividiu-se em três partes: numa fase inicial foram comparados os valores obtidos no material base dos provetes soldados, com os valores obtidos nos provetes que não tiveram nenhuma operação de soldadura. Posteriormente foi feita uma comparação entre a rugosidade obtida no material base, no material de adição, e na zona de transição (para verificar se nesta zona houve variações significativas). Com a rugosidade de cada provete analisada foi feita uma comparação entre provetes do mesmo material e processo de soldadura. No Anexo F encontra-se o exemplo de um relatório dado pelo aparelho de medição.

#### 4.2.1. Ra – Rugosidade Média Aritmética

O parâmetro Ra exprime o desvio médio do perfil da linha média. Como o parâmetro utiliza o valor médio, permite uma caracterização geral do perfil, em que defeitos de superfície não influenciam significativamente o resultado. Em contrapartida, como calcula a média, não dispõe de informação quanto à amplitude dos picos e vales, o que pode induzir em erro na caracterização da superfície. Na Tabela 4.2, estão expostos os resultados obtidos da rugosidade média.

Tabela 4.2 -Valores de rugosidade média Ra

n.º Provete	Material Base	Rugosidade (µm)				
		Material Base	Adição Cordão	Adição Círculo	Transição Cordão	Transição Círculo
1	1.2738Mod	0,030	0,035	0,032	0,032	0,036
4		0,035	0,040	0,034	0,043	0,048
6		0,032	0,033	0,037	0,030	0,035
7		0,030	0,031	0,032	0,028	0,025
9		0,027	0,038	0,026	0,034	0,044
11		0,032				
13	1.2343	0,030	0,092	0,046	0,033	0,036
16		0,030	0,049	0,032	0,036	0,035
19		0,031	0,046	0,079	0,039	0,035
21		0,032	0,029	0,029	0,030	0,032
22		0,032	0,032	0,032	0,033	0,032
24		0,031	0,022	0,027	0,039	0,045
25		0,028	0,034	0,033	0,043	0,039
27		0,028	0,031	0,030	0,043	0,037
29		0,022				
30		0,031				
31	1.2083	0,026	0,082	0,036	0,029	0,025
33		0,024	0,036	0,067	0,025	0,029
36		0,022	0,034	0,042	0,034	0,029
37		0,021	0,038	0,049	0,026	0,025
38		0,021	0,047	0,041	0,026	0,032
39		0,021	0,035	0,033	0,025	0,026
41		0,025	0,035	0,042	0,027	0,029
43		0,023	0,033	0,036	0,036	0,041
44		0,020	0,031	0,033	0,044	0,044
46		0,023	0,032	0,032	0,038	0,038
47		0,021				
48		0,016				

Nos provetes soldados a laser, os resultados obtidos na medição de rugosidade no material de adição estão enviesados, devido aos defeitos mencionados no Subcapítulo “4.1 - Avaliação Visual”, uma vez que, nos provetes em pior estado não foi possível desviar o curso de medição e evitar que esses defeitos fossem medidos. Este efeito verificou-se principalmente nos materiais base 1.2343 e 1.2083. Portanto, nestas condições os valores obtidos serão desprezados e será feita apenas a comparação com a zona de transição, em que foi possível desviar desses defeitos.

A semelhança dos valores obtidos nos provetes sem soldadura, com os que foram submetidos a soldadura, permite seguir o estudo da rugosidade assumindo que os provetes foram polidos para a rugosidade que se atingiria, caso não fossem soldados.

Nos provetes em 1.2738Mod, a rugosidade média do material de adição apresenta valores superiores ao material base, embora a diferença não seja significativa. Quanto à zona de transição da zona soldada para o material base, verifica-se que, tanto nos provetes soldados a laser como a TIG submetidos a “revenidos de solda”, os valores de rugosidade média são semelhantes aos do material base e do material de adição. Em contrapartida, nos provetes sem “revenidos de solda” soldados a laser e TIG, a rugosidade média apresenta um valor superior.

Nos provetes em 1.2343, a rugosidade média do material de adição nos provetes com soldadura TIG são idênticos aos valores obtidos no material base. A comparação entre material de adição e material base não será feita nos provetes com soldadura laser pelas razões referidas anteriormente. Os melhores valores de rugosidade na zona de transição foram obtidos nos provetes em que o material de adição foi temperado, apresentando valores muito próximos do material base. Com uma diferença um pouco maior, porém pouco significativa, estão os provetes soldados a laser, sem solda temperada. Com uma diferença mais acentuada estão os provetes soldados a TIG, sem solda temperada.

Nos provetes em 1.2083, a rugosidade média do material de adição nos provetes com soldadura TIG não corresponde aos valores obtidos no material base. O mesmo resultado foi obtido nos provetes com soldadura laser, embora os resultados não sejam considerados de forma a prevenir a indução em erro devido aos defeitos superficiais. À semelhança dos resultados obtidos no material base 1.2343, o melhor resultado de rugosidade média na transição do material de adição para o material base corresponde aos provetes em que o material de adição foi temperado. Com valores muito semelhantes seguem-se os provetes

soldados a laser, sem solda temperada. Os provetes soldados a TIG sem solda temperada, apresentaram valores de rugosidade média muito elevada, que em certos casos correspondia ao dobro da rugosidade obtida no material base. Os “revenidos de solda” não exibiram resultados significativos nos valores obtidos.

A norma ISO 1302:1992 (Tabela 4.3) estabelece uma relação entre os valores de rugosidade Ra com um grau, com o intuito de facilitar a representação do acabamento necessário em desenhos técnicos. Para a produção de peças plásticas transparentes, o acabamento do molde deve ser o denominado na indústria “polimento ótico”, que em termos quantitativos representa o grau N1 ou inferior (N0 ou N01), seguindo a lógica da Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Comparação do desvio médio aritmético Ra e números de grau de rugosidade.**

Valores Rugosidade Ra		Graus de Rugosidade
$\mu\text{m}$	$\mu\text{in}$	
50	2000	N12
25	1000	N11
12,5	500	N10
6,3	250	N9
3,2	125	N8
1,6	63	N7
0,8	32	N6
0,4	16	N5
0,2	8	N4
0,1	4	N3
0,05	2	N2
0,025	1	N1

Na Tabela 4.4 encontram-se confrontados os resultados obtidos nas medições de rugosidade dos provetes estudados, com os graus segundo a norma ISO 1302:1992.

**Tabela 4.4 - Atribuição de números de grau de rugosidade segundo o desvio médio aritmético Ra**

n.º Proвете	Material Base	Graus de Rugosidade		
		Material Base	Material Adição	Zona de Transição
1	1.2738Mod	N2	N2	N2
4		N2	N2	N2
6		N2	N2	N2
7		N2	N2	N2
9		N2	N2	N2
11		N2	-----	-----
13	1.2343	N2	N3	N2
16		N2	N2	N2
19		N2	N3	N2

21	1.2343	N2	N2	N2
22		N2	N2	N2
24		N2	N2	N2
25		N2	N2	N2
27		N2	N2	N2
29		N1	-----	-----
30		N2	-----	-----
31	1.2083	N2	N3	N2
33		N1	N3	N2
36		N1	N2	N2
37		N1	N2	N1
38		N1	N2	N2
39		N1	N2	N1
41		N1	N2	N2
43		N1	N2	N2
44		N1	N2	N2
46		N1	N2	N2
47		N1	-----	-----
48	N1	-----	-----	

Analisando a tabela apresentada é possível verificar, maioritariamente, que os graus obtidos não se coadunam com o acabamento desejado de polimento ótico. No polimento dos provetes foram utilizados os métodos convencionais realizados habitualmente na indústria de molde, no entanto, deve ser mencionado que é possível obter melhores resultados, com o recurso a tecnologias mais recentes, e pastas específicas.

#### 4.2.2. Rz (ISO) – Rugosidade média das alturas máximas

Na caracterização de uma superfície deve ser utilizado mais que um parâmetro, uma vez que, todos têm as suas vantagens e desvantagens. O parâmetro Ra determina a rugosidade média de todo o perfil, no entanto, não indica qualquer informação quanto à amplitude dos picos e vales. Para colmatar estas lacunas selecionou-se o parâmetro Rz para uma melhor perceção dos picos e vales do perfil. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de rugosidade média das alturas máximas Rz

n.º Provete	Material Base	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )				
		Material Base	Adição Cordão	Adição Círculo	Transição Cordão	transição Círculo
1	1.2738Mod	0,270	0,285	0,273	0,264	0,294
4		0,280	0,348	0,279	0,310	0,341
6		0,257	0,285	0,330	0,239	0,299
7		0,253	0,267	0,298	0,231	0,203
9		0,228	0,284	0,269	0,261	0,322
11		0,264				
13	1.2343	0,256	0,664	0,638	0,267	0,292
16		0,249	0,863	0,381	0,308	0,291
19		0,224	0,639	0,475	0,321	0,303
21		0,267	0,249	0,244	0,259	0,271
22		0,266	0,256	0,298	0,272	0,270
24		0,263	0,191	0,241	0,306	0,332
25		0,232	0,284	0,283	0,339	0,301
27		0,241	0,244	0,257	0,310	0,288
29		0,187				
30		0,248				
31	1.2083	0,211	1,463	0,307	0,237	0,206
33		0,207	0,295	0,727	0,221	0,243
36		0,197	0,351	0,424	0,255	0,232
37		0,181	0,314	0,516	0,208	0,206
38		0,179	0,737	0,445	0,218	0,252
39		0,183	0,302	0,280	0,202	0,208
41		0,216	0,288	0,353	0,226	0,230
43		0,191	0,263	0,297	0,254	0,283
44		0,170	0,246	0,271	0,292	0,247
46		0,194	0,256	0,280	0,289	0,254
47		0,178				
48		0,144				

À semelhança da análise do parâmetro Ra, para o parâmetro Rz verificou-se que os valores de rugosidade obtidos nos provetes soldados são semelhantes aos provetes de comparação, sem zona soldada, pelo que se considerou que os provetes estavam todos em paridade para as análises futuras. Adicionalmente, e à semelhança da análise do parâmetro Ra, nos provetes soldados a laser não serão considerados os valores obtidos no material de adição, devido aos defeitos superficiais.

Nos provetes com material base 1.2738Mod, as conclusões retiradas coincidem com o que foi verificado na análise de Ra. Tanto nos provetes soldados a laser, como a TIG, em que foram efetuados “revenidos de solda”, os valores de Rz obtidos são próximos aos valores do material base. Nos provetes em que não foram aplicados “revenidos de solda”, obteve-se valores de Rz mais elevados que o material base, devido à maior heterogeneidade superficial junto à zona soldada.

Nos provetes com material base 1.2343, os melhores resultados obtidos correspondem aos provetes em que a solda foi temperada. Nos provetes sem solda temperada, os resultados obtidos foram semelhantes, sem diferença significativa quanto ao processo de soldadura, nem a aplicação de “revenidos de solda”.

Nos provetes com material base 1.2083, os valores obtidos no parâmetro Rz foram superiores na zona de transição em comparação com os valores do material base. Dos provetes soldados a TIG, os que têm a solda temperada apresentavam valor superior ao material base, mas com uma diferença muito reduzida. Enquanto nos provetes sem solda temperada, foram obtidos valores mais elevados, sem diferença significativa na aplicação de “revenidos de solda”. No processo de soldadura laser, não existe variações significativas em relação ao material base, embora todos apresentem valores mais elevados.

#### 4.2.3. Rt – Rugosidade máxima do perfil

O parâmetro Rt indica o comprimento máximo entre o valor máximo do pico e do vale em todo o perfil. Este parâmetro foi selecionado para a identificação de defeitos no perfil. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores de rugosidade máxima do perfil Rt

n.º Proвете	Material Base	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )				
		Material Base	Adição Cordão	Adição Círculo	Transição Cordão	Transição Círculo
1	1.2738Mod	0,332	0,390	0,384	0,327	0,463
4		0,356	0,478	0,375	0,420	0,485
6		0,300	0,343	0,472	0,281	0,357
7		0,302	0,357	0,490	0,277	0,237
9		0,342	0,426	0,402	0,331	0,401
11		0,304				

13	1.2343	0,291	1,155	1,106	0,370	0,361
16		0,285	1,635	0,635	0,398	0,345
19		0,299	1,447	1,038	0,382	0,352
21		0,299	0,296	0,283	0,320	0,319
22		0,306	0,288	0,396	0,318	0,325
24		0,300	0,248	0,335	0,429	0,516
25		0,271	0,319	0,338	0,526	0,404
27		0,276	0,303	0,357	0,458	0,377
29		0,223				
30		0,284				
31		1.2083	0,242	2,463	0,363	0,297
33	0,236		0,338	1,640	0,276	0,361
36	0,229		0,642	1,019	0,345	0,303
37	0,207		0,363	1,063	0,244	0,240
38	0,238		1,808	0,691	0,278	0,315
39	0,219		0,386	0,353	0,236	0,251
41	0,247		0,345	0,432	0,261	0,283
43	0,238		0,305	0,353	0,355	0,386
44	0,197		0,279	0,339	0,428	0,433
46	0,219		0,321	0,332	0,379	0,350
47	0,206					
48	0,178					

A avaliação do parâmetro  $R_t$  confirmou quantitativamente, o que já tinha sido observado visualmente. Nos provetes soldados a laser existem falhas de material devido à reduzida sobre espessura dos provetes, ou da falta de fusão do material de adição, uma vez que, se trata de um processo de soldadura em que o calor é aplicado localmente, e a fusão completa do material pode não ter sido atingida. Na medição das zonas de transição foi possível desviar desses defeitos, no entanto, o mesmo não foi possível nas medições do material base, o que justifica os valores obtidos nos provetes de soldadura laser, com especial destaque para os materiais base 1.2343 e 1.2083. Com exclusão dos casos acima mencionados, os valores de  $R_t$  obtidos nos materiais base não têm diferenças significativas em relação às medições nas zonas de transição e no material de adição dos provetes soldados a TIG. Conclui-se que nos provetes soldados a TIG não existem defeitos superficiais, ou caso existam, não foram detetados.

### 4.3. Perfis Dureza

Com a elaboração dos perfis de dureza pretende-se verificar as variações de dureza na transição do material de adição para o material base, e conseqüentemente, determinar a zona termicamente afetada pela operação de soldadura. De forma a facilitar a interpretação dos gráficos, a origem do valor das abcissas corresponde à dureza obtida no material de adição, que se prolonga por aproximadamente 1mm. Os perfis foram agrupados por material e processo de soldadura. Numa fase preliminar foram analisados os perfis das duas zonas soldadas do provete (cordão e círculo), concluindo-se que não existiam variações significativas. Neste capítulo, serão apenas analisados os perfis relativos ao cordão, os perfis obtidos na zona soldada circular apresentam-se no Anexo G. Na Figura 4.5, foi efetuada uma divisão entre material base, zona termicamente afetada (ZTA) e material de adição.

A análise dos perfis de dureza obtidos será feita por material de adição. Entre provetes do mesmo material de adição, primeiro serão comparados os perfis dos provetes submetidos ao mesmo processo de soldadura, e posteriormente, os resultados serão comparados entre os dois processos. Os perfis foram acertados, de forma que, desde a origem das abcissas até aproximadamente 1mm corresponda o material de adição, seguido da zona termicamente afetada (caso seja visível), e por fim o material base.

#### 4.3.1. Perfis com Material Base 1.2738Mod

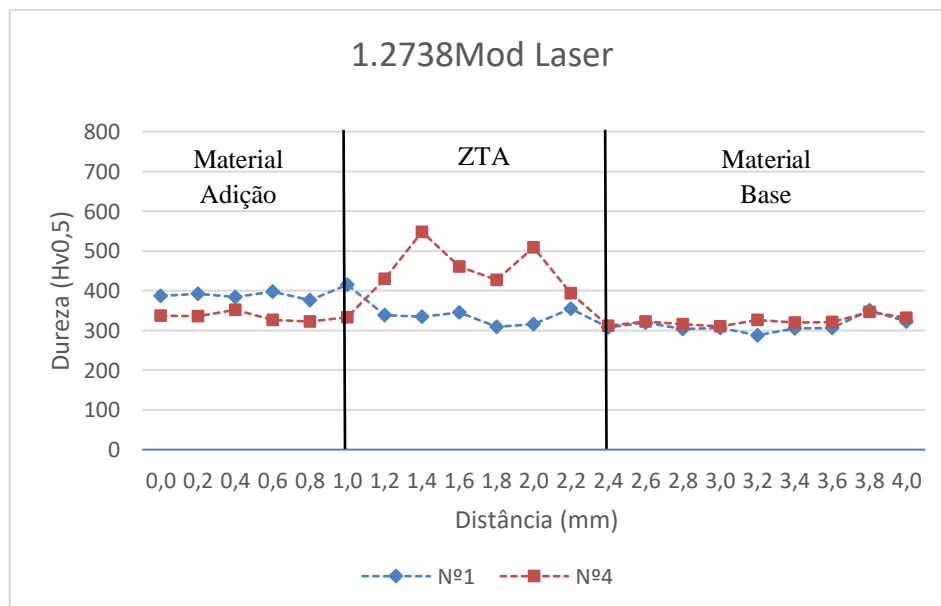


Figura 4.5 - Perfis Dureza de provetes em 1.2738Mod com soldadura laser Nd:YAG

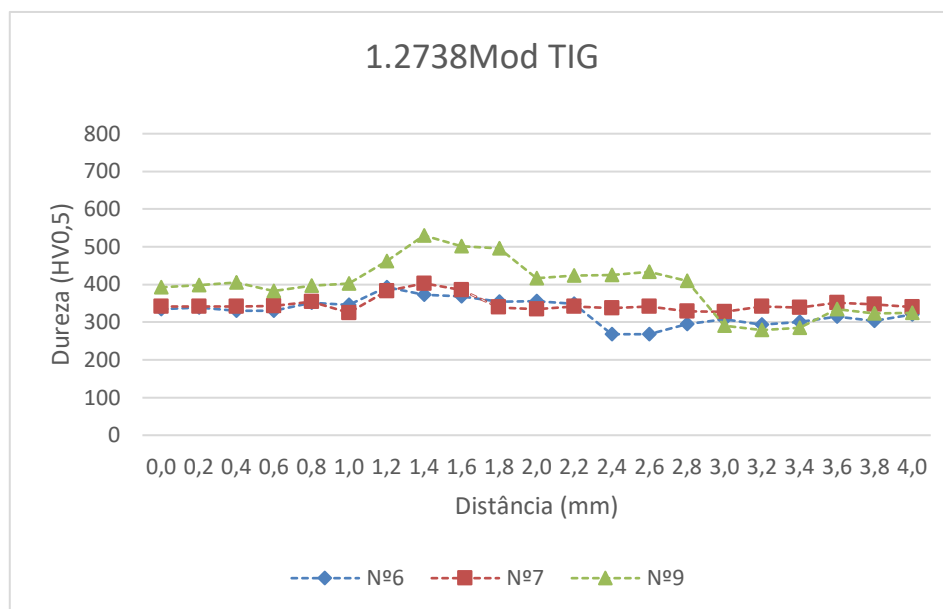


Figura 4.6 - Perfis Dureza de provetes em 1.2738Mod com soldadura TIG

Para o processo de soldadura a laser verifica-se que a dureza obtida no material de adição e no material base não apresenta diferença acentuada. O material é fornecido no estado tratado, que segundo o certificado do aço é fornecido com 295HB, o que corresponde a aproximadamente 300HV, concluindo-se que a dureza do material base não alterou tanto no provete com “revenidos de solda”, como no provete sem “revenidos de solda”.

Na zona termicamente afetada verifica-se que o provete n.º 4 (sem “revenidos de solda”) apresenta um aumento de dureza, devido à austenização provocada pelo processo de soldadura que, seguido de um arrefecimento rápido promove a formação martensítica. Este fenómeno pode ser solucionado com a aplicação de “revenidos de solda”, conforme executado no provete n.º 1. Neste, a zona termicamente afetada consiste na transição de dureza do material de adição para o material base, sem o pico de dureza, como se verifica no caso onde não foram efetuados “revenidos de solda”. A dureza no material de adição deve-se à composição do mesmo, que neste caso tem uma quantidade mais elevada de Mo e Si, pelo que, tem maior resistência ao revenido e retêm mais a dureza, com os revenidos dados a alta temperatura.

À semelhança do sucedido nos provetes soldados a laser, os provetes com soldadura TIG não alteraram a dureza no material base. Conforme concluído nas análises anteriores, a execução de pré-aquecimento na soldadura não tem influência significativa na zona termicamente afetada, caso sejam efetuados os “revenidos de solda”. No provete n.º 9 (sem

“revenidos de solda”), verificou-se um pico de dureza à semelhança do provete soldado a laser, sem tratamentos térmicos posteriores. O aumento de dureza deve-se à austenização do material, que seguido de arrefecimento rápido, formou martensite não revenida. Seguido do aumento de dureza verifica-se uma depressão resultante da zona termicamente afetada que não atingiu a temperatura de austenização, mas foi revenida a alta temperatura, o que fez com que a dureza diminuí-se (Silva et al., 2013). A dureza no material de adição deve-se à composição do mesmo, que neste caso tem uma quantidade mais elevada de Si, pelo que tem maior resistência ao revenido e aguenta mais a dureza, com os revenidos dados a alta temperatura.

Os resultados obtidos entre os perfis dos dois processos de soldadura, com “revenidos de solda”, foram semelhantes. Nos provetes em que não foram efetuados “revenidos de solda”, verificou-se um aumento de dureza. No entanto, para a soldadura TIG a zona termicamente afetada foi muito mais extensa (aproximadamente 2mm), enquanto para a soldadura laser a zona termicamente afetada estendeu-se por 1,2mm. A diferença de extensão nas zonas termicamente afetadas deve-se ao calor transferido às peças. No processo TIG o calor transmitido é muito maior, que resulta numa área maior do provete que atinge a temperatura de austenização, promovendo a têmpera, e conseqüentemente, uma zona termicamente afetada de maiores dimensões. Assim conclui-se que é possível obter um perfil de durezas sem heterogeneidades significativas, em ambos os processos de soldadura, se forem efetuados “revenidos de solda”, e caso estes não sejam aplicados, o processo TIG mostra piores resultados por apresentar uma área termicamente afetada mais extensa.

### 4.3.2. Perfis com Material Base 1.2343

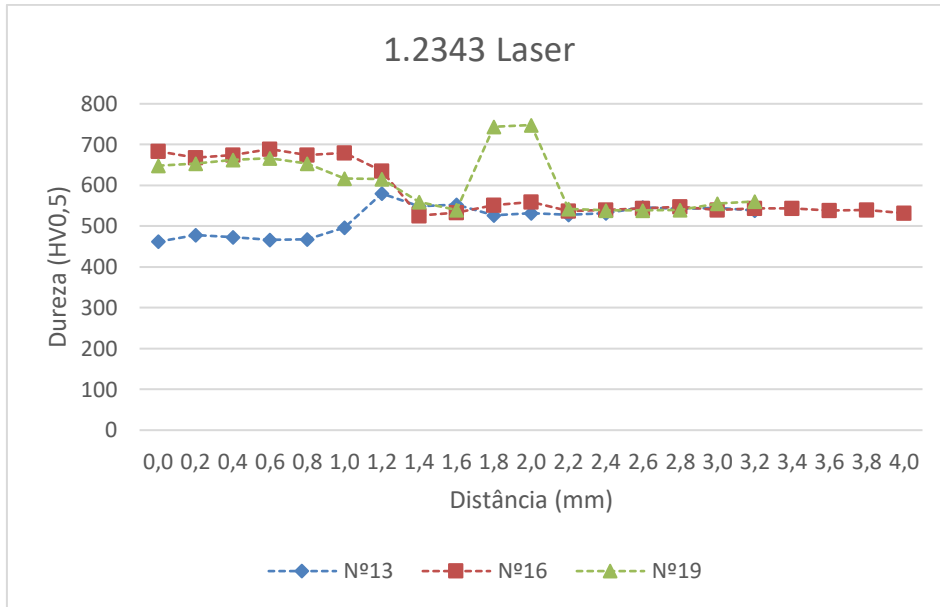


Figura 4.7 - Perfis Dureza de provetes em 1.2343 com soldadura laser Nd:YAG

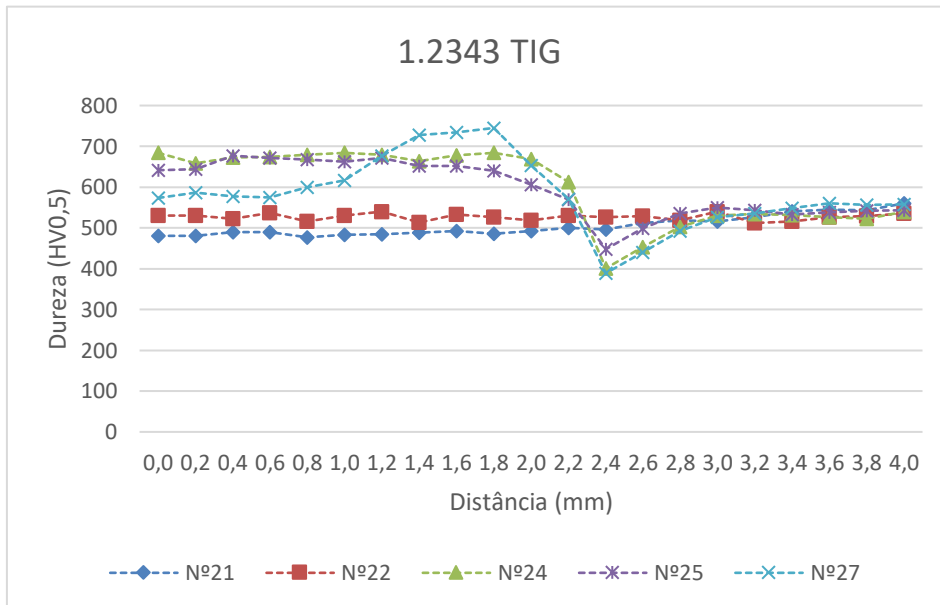


Figura 4.8 - Perfis Dureza de provetes em 1.2343 com soldadura TIG

Nos provetes em 1.2343, tanto para o processo de soldadura laser como TIG, foi feita uma divisão, em que uma parte dos provetes foram temperados e revenidos antes da soldadura, e a outra parte, após esta operação. Em todos os provetes o tratamento térmico foi efetuado de modo a atingir a dureza recomendada de 48-52HRC. Analisando as durezas obtidas nos perfis, verifica-se que em todos os casos, a dureza do material base está compreendida entre os 530-550HV<sub>0,5</sub>, o que equivale a 50-52HRC, pelo que se pode assumir que os tratamentos térmicos de têmpera ocorreram em conformidade.

Dos provetes com soldadura laser, o n.º 16 e n.º 19 apresentam dureza mais elevada no material de adição, uma vez que, como a têmpera foi efetuada antes da soldadura, durante o processo de adição de material, o material foi fundido e atingiu a temperatura de austenitização, pelo que, seguido de um arrefecimento rápido deu origem a martensite, que se foi revenindo com a conseqüente passagem de novos cordões. No provete n.º 19 como não foram aplicados revenidos, na zona adjacente à solda surgiu um pico de dureza, que corresponde a martensite não revenida, enquanto no provete n.º 16, este fenómeno não ocorre devido ao revenido que homogeneiza a dureza na zona termicamente afetada. No provete n.º 13, a solda foi temperada, obtendo dureza mais baixa que o material base, devido à composição química do material de adição. Analisando a composição química do material de adição conclui-se que a diferença de durezas, deve-se ao teor em carbono mais reduzido, embora tenha maior teor de Manganês. Adicionalmente o material de adição tem mais Crómio e Molibdénio, elementos com grande tendência a formar carbonetos, o que reduz a quantidade de carbono livre na matriz para a formação de martensite.

Nos provetes com soldadura TIG, aqueles em que a solda foi temperada, apresentam um perfil de durezas sem grandes variações. No provete n.º 21 verifica-se um aumento de dureza progressivo do material de adição para o material base, uma vez que, o material de adição tem na sua composição química menos percentagem de carbono. No provete n.º 22 foi utilizada uma vareta de material de adição com composição química idêntica ao material base, e assim, apresenta um comportamento idêntico ao tratamento térmico de têmpera e revenidos, culminando na obtenção de um perfil com dureza homogénea, sem apresentar zona termicamente afetada, do ponto de vista das durezas.

Comparando os perfis dos provetes n.º 24 e n.º 25, conclui-se que, à semelhança dos testes conduzidos com o pré-aquecimento, o facto de se efetuar os “revenidos de solda” ainda com a peça quente, ou deixar arrefecer à temperatura ambiente, não tem efeitos significativos nas

durezas e zona termicamente afetada, embora fosse expectável que o provete n.º 25 tivesse menos dureza devido à sua composição química. Tal como o pré-aquecimento, a realização dos “revenidos de solda” ainda com a peça quente é uma boa prática para minimizar o risco de fissuras em componentes de elevada complexidade. Nestes dois provetes, a dureza do material de adição é mais elevada devido às elevadas temperaturas que o material de adição atinge, o que provoca um efeito de “*over-quenching*”, associado a um aumento de tamanho de grão excessivo, e devido à temperatura de revenido, que está compreendido no intervalo de temperaturas onde ocorre endurecimento secundário. Segue-se um decréscimo de dureza que corresponde à zona termicamente afetada pelo processo de soldadura, que não atingiu a temperatura de têmpera e por isso, sofreu um decréscimo de dureza devido ao revenido a altas temperaturas. O provete n.º 27, apresenta dureza no material de adição mais baixa (em comparação com os provetes n.º 24 e n.º 25) devido ao menor teor em carbono. Este provete não teve quaisquer tratamentos térmicos após a soldadura, pelo que a passagem dos sucessivos cordões foi revenindo os anteriores. No entanto, na zona adjacente à solda, não se verificou esse efeito e por isso surge um aumento de dureza, associado à martensite não revenida. A zona termicamente afetada, e à semelhança do provete n.º 24 e n.º 25, compreende ainda um decréscimo de dureza devido ao efeito de revenido a altas temperaturas.

Em suma, para o material base 1.2343, apenas é possível obter um perfil de durezas homogéneo com o uso de um material de adição de composição igual ou parecida, bem como, efetuar o tratamento térmico de têmpera após os dois processos de soldadura. Caso não seja possível temperar o material após a soldadura, os “revenidos de solda” permitem atenuar os picos de dureza na zona adjacente à solda, no entanto, a dureza entre o material base e o material de adição não será semelhante (Silva et al., 2013).

### 4.3.3. Perfis com Material Base 1.2083

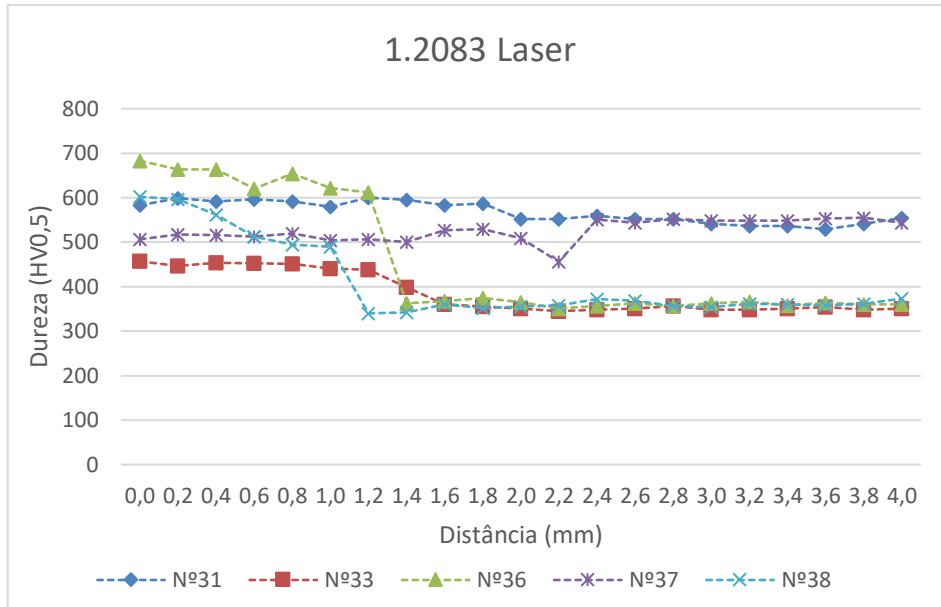


Figura 4.9 - Perfis Dureza de provetes em 1.2083 com soldadura laser Nd:YAG

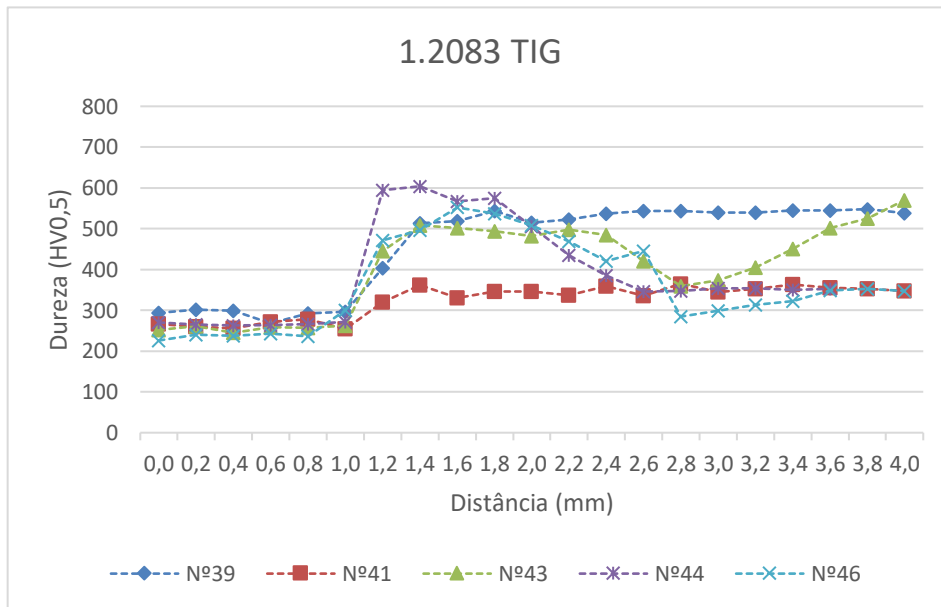


Figura 4.10 - Perfis Dureza de provetes em 1.2083 com soldadura TIG

Nos provetes em 1.2083, tanto para o processo de soldadura laser como TIG, foi feita uma divisão, em que uma parte dos provetes foi temperada antes da soldadura, e a outra parte após esta operação. Adicionalmente, foram utilizadas duas temperaturas de revenido distintas, pelo que, é suposto que a dureza no material base corresponda à expectável segundo o diagrama de revenido, apresentado na Figura 4.11. Nos provetes com revenidos a 400°C, a dureza expectável é de 50-52HRC, enquanto nos provetes com revenidos a 540°C a dureza expectável é de 38-42HRC. Ao analisar as durezas obtidas nos perfis durezas, verifica-se que nos provetes n.º 31, n.º 37, n.º 39 e n.º 43 obteve-se uma dureza de 540-550HV0,5, que corresponde a 50-52HRC. Nos restantes provetes obteve-se uma dureza no material base de 370-380HV0,5, que corresponde a 38-39HRC. Como as durezas no material base correspondem ao expectável, segundo o diagrama de revenido, considera-se que os tratamentos térmicos de têmpera ocorreram em conformidade.

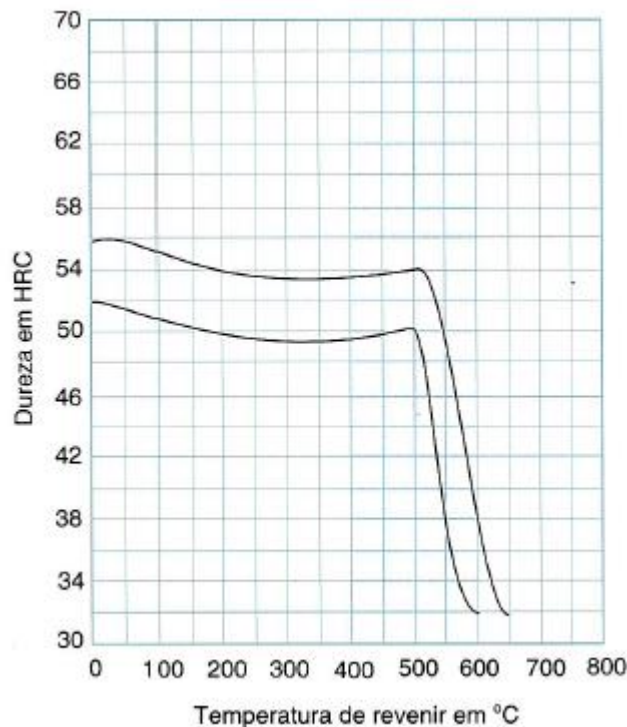


Figura 4.11 - Diagrama de revenido 1.2083

Os provetes com soldadura laser, o provete n.º 31 e o provete n.º 33, foram temperados após o processo de soldadura. Nestes dois provetes a transição de dureza é suave, sem picos na zona termicamente afetada, e a dureza obtida no material de adição deve-se à composição química do mesmo. Nos provetes, em que a têmpera foi realizada antes do processo de soldadura, verifica-se grande discrepância de durezas nos provetes n.º 36 e n.º 38, enquanto

o provete n.º 37 apresenta uma diferença menor. A discrepância de durezas no provete n.º 36 deve-se ao facto de o material base ter sido temperado e revenido a altas temperaturas o que fez baixar a dureza nessa zona. A zona de transição não tem picos de dureza devido ao “revenido de solda”, no entanto, como o “revenido de solda” foi efetuado a 500°C, a dureza do material de adição aumentou por corresponder ao intervalo de temperaturas onde ocorre o endurecimento secundário. No provete n.º 37, os revenidos de solda foram efetuados a 350°C, e a dureza no material de adição depende da composição química do mesmo. No provete n.º 38, como não foram efetuados quaisquer tratamentos térmicos posteriores, a transição do material de adição para o material base é mais irregular e a dureza corresponde à obtida com a têmpera, resultante do processo de soldadura.

Nos provetes com soldadura TIG, os resultados obtidos não corresponderam ao previsto, uma vez, que em nenhum dos provetes se obteve uma dureza superior a 300HV no material de adição. Na análise metalográfica realizada posteriormente será feita uma avaliação mais detalhada para entender o sucedido. Nos provetes, em que a zona soldada foi temperada, verificou-se uma transição suave até atingir a dureza do material base, enquanto nos provetes com têmpera anterior ao processo de soldadura, verificou-se uma variação de durezas mais acentuada, além de apresentarem zonas termicamente afetadas muito extensas, com comprimentos superiores a 2mm. No provete n.º 43 (“revenidos de solda” a 350°C) existe uma zona com dureza de 500HV, correspondente ao material base que sofreu austenização devido ao calor transmitido no processo de soldadura. Posteriormente, com o revenido baixou a dureza para os valores obtidos, seguido de uma zona com dureza mais baixa correspondente ao material que foi afetado termicamente, mas não atingiu a temperatura de austenização. No provete n.º 44 verificou-se um efeito semelhante, no entanto, a dureza na zona do material base que sofreu austenização é superior devido ao revenido a 500°C que promoveu o endurecimento secundário, e a depressão de dureza não é acentuada devido à baixa dureza do material base, uma vez que, foi revenido a 540°C. No provete n.º 46 a transição de dureza é mais irregular devido à falta de tratamentos térmicos posteriores, em que o aumento na zona termicamente afetada deve-se à austenização resultante do processo de soldadura.

#### 4.4. Metalografia

Na análise metalográfica pretende-se identificar e comparar a microestrutura no material de adição, zona termicamente afetada e do material base. De forma a não estender desnecessariamente o trabalho, apenas alguns provetes foram analisados. Para os provetes em 1.2738Mod foram selecionados um provete com “revenidos de solda” e outro sem “revenidos de solda”, para cada um dos processos de soldadura. Para os provetes em 1.2343 foram selecionados dois provetes por processo de soldadura, sem solda temperada, dos quais um teve “revenidos de solda” e o outro não. Para os provetes em 1.2083 a seleção foi semelhante à dos provetes com material base 1.2343, com a adição de um provete por processo de soldadura que foi temperado após a soldadura. Na Tabela 4.7 estão resumidos os dados dos provetes a analisar.

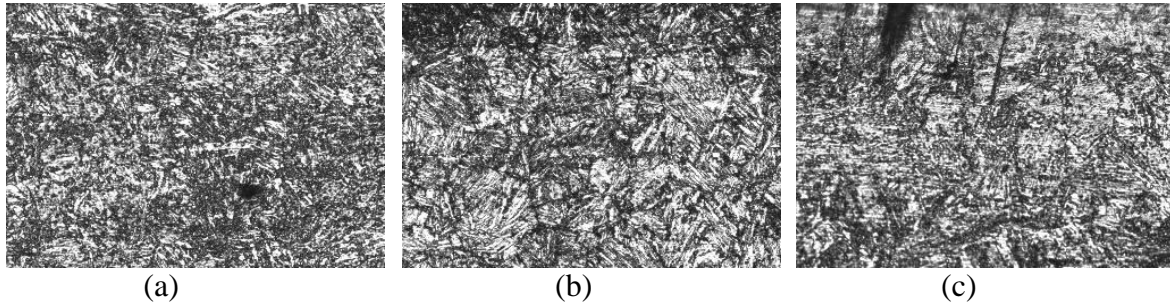
Tabela 4.7 - Tratamentos térmicos dos provetes para análise metalográfica

n.º Provette	Material Base	Material Adição	Processo Soldadura	Tratamentos térmicos
1	1.2738Mod	QuFe15	Laser	a ; d
4				a ; c
7		QuFe10	TIG	a ; d
9				a ; c
16	1.2343	QuFe21	Laser	a ; d
19				a ; c
24		QuFe23	TIG	a ; d
27				QuFe13
33	1.2083	Stavax	Laser	b
36				a ; d
38				a ; c
41			TIG	b
44				a ; d
46				a ; c

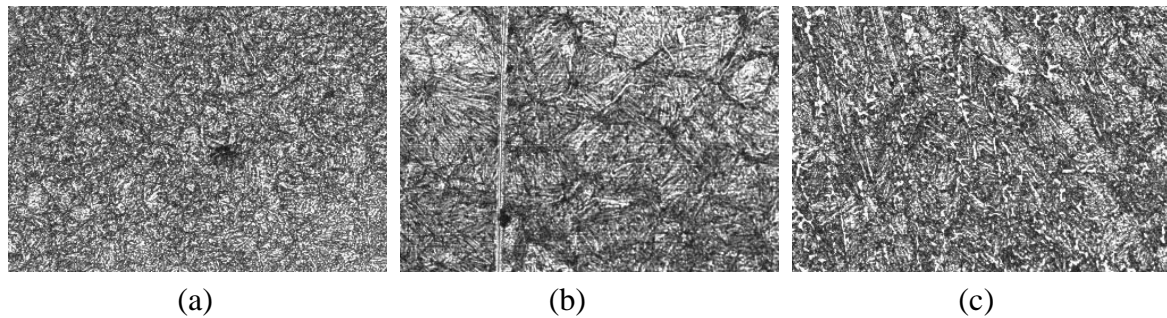
- a) Sem solda temperada;
- b) Com solda temperada;
- c) Sem “revenidos de solda”;
- d) Com “revenidos de solda”;

Dada a semelhança entre as microestruturas visualizadas em muitos dos casos, serão apenas expostos alguns casos observados. A Figura 4.12 corresponde ao provete n.º 4, com material base 1.2738Mod, soldado a laser e sem “revenidos de solda” posteriores. A Figura 4.13 corresponde ao provete n.º 24, com material base 1.2343ESR, soldado a TIG e com “revenidos de solda”. A Figura 4.14 corresponde ao provete n.º 36, com material base

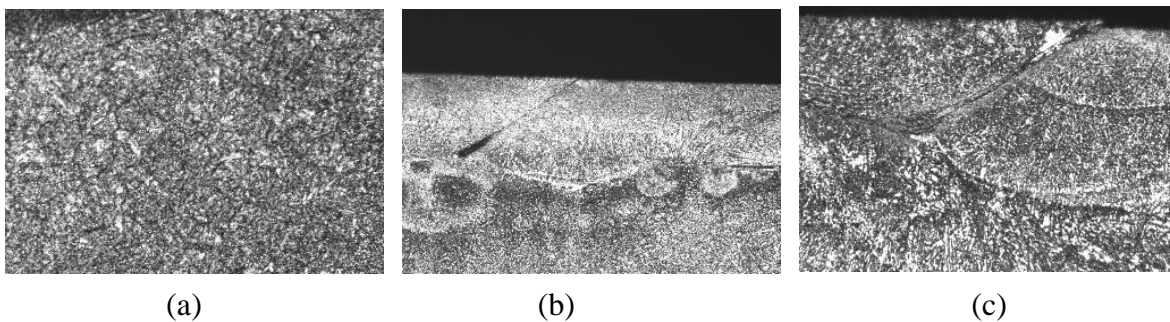
1.2083ESR, soldado a laser e com “revenidos de solda”. A Figura 4.15 corresponde ao provete n.º 44, com material base 1.2083ESR, soldado a TIG e com “revenidos de solda”. Os dados completos da análise metalográfica encontram-se no Anexo H.



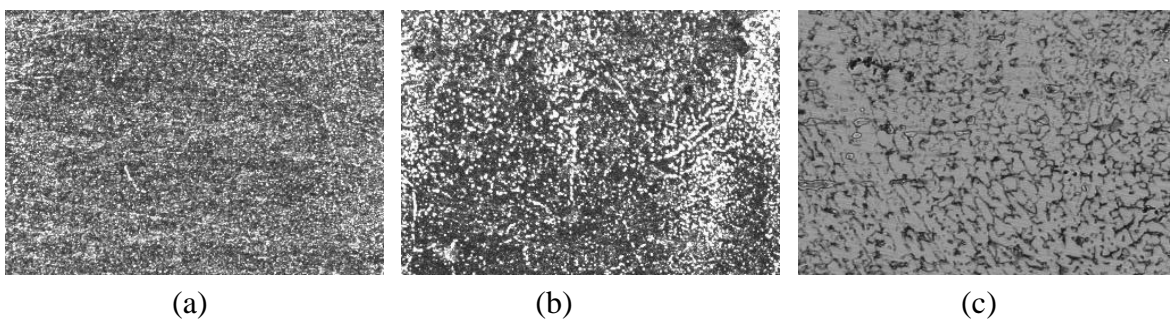
**Figura 4.12 - Microestrutura Provete n.º 4: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Nital 5%; Ampliação 60x.**



**Figura 4.13 - Microestrutura Provete n.º 24: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Nital 5%; Ampliação 60x.**



**Figura 4.14 - Microestrutura Provete n.º 36: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Kalling's nº2; Ampliação 60x.**



**Figura 4.15 - Microestrutura Provete n.º 44: (a) Material Base; (b) Zona Termicamente Afetada; (c) Material Adição; Kalling's nº2; Ampliação 60x.**

Na observação da microestrutura obtida nos provetes 1.2738 e 1.2343 foram retiradas as mesmas conclusões. Com o uso de “revenidos de solda” (números 1, 7, 16 e 24), conseguiu-se obter uma microestrutura idêntica ao material base na zona termicamente afetada, contrariamente nos provetes sem “revenidos de solda” (números 4, 9, 19 e 27) a microestrutura era apresentada sob a forma de grãos mais estreitos, correspondente a martensite não revenida. Quanto ao material de adição verificou-se a tendência de estar menos atacado, devido ao teor em carbono inferior. Nos provetes soldados a TIG, a falta de “revenidos de solda” (números 9 e 27) provoca diferenças mais acentuadas entre o material base e a zona termicamente afetada, sendo que a última referida apresenta lamelas muito estreitas.

Nos provetes em 1.2083, a microestrutura presente diferiu com o processo de soldadura. Nos provetes soldados a laser Nd:YAG (números 33,36 e 38) o material base é composto por martensite com uma grande quantidade de carbonetos de crómio. Com exceção do provete n.º 33, na zona de transição verifica-se uma zona branca resultante da austenite retida no arrefecimento, com grande quantidade de carbonetos. Como este provete foi temperado após a soldadura, com este tratamento térmico, ocorreu a transformação da austenite retida no processo de soldadura. Ainda no provete temperado, o material de adição apresenta uma fase menos atacada devido ao carbono que se liga para a formação de carbonetos de crómio, o que resulta numa menor quantidade de carbono livre na matriz, resultando numa martensite menos rica em carbono. Nos provetes que não foram temperados (números 36 e 38), verificam-se umas manchas brancas correspondentes à austenite residual, contida numa matriz martensítica, com forte presença de carbonetos.

Nos provetes com material base 1.2083 e soldados a TIG verificou-se uma dissemelhança muito acentuada entre o material base e o material de adição. Segundo os autores (Cardoso et al., 2003; Köse & Kaçar, 2014; Oñoro, 2006), o arrefecimento rápido, após o processo de soldadura, pode resultar na presença de delta ferrite e austenite residual, retida numa matriz martensítica. A presença de delta ferrite, quando em quantidades significativas, afeta as propriedades mecânicas, incluindo o amaciamento do material, e conseqüentemente, uma redução da dureza, conforme verificado no subcapítulo “4.3.3 - Perfis com Material Base 1.2083”, para os provetes soldados pelo processo TIG. Embora em todos os materiais base, as temperaturas atingidas no processo de soldadura TIG sejam extremamente elevadas ao ponto de criar fusão, apenas para o material base 1.2083 é que a formação de  $\delta$ -ferrite foi substancial, que é visível entre os grãos de martensite, sob a forma de manchas pretas de

pequena dimensão. Este efeito deve-se à composição química dos materiais. O crómio, sendo um elemento alfacéneo, o efeito que promove no diagrama de fases é a diminuição do domínio austenítico (Honeycombe, 1985). A diminuição deste domínio faz com que a transformação de  $\delta$ -ferrite para austenite, e posteriormente martensite seja mais rápida, resultando numa maior quantidade de  $\delta$ -ferrite e austenite retida na matriz martensítica.

## 5. Conclusões

Os objetivos definidos no início do trabalho foram atingidos, tendo em conta que, para cada material base, foram encontradas soluções que permitem uma zona soldada pouco perceptível após o polimento. Em função dos objetivos definidos no Subcapítulo “2.10 - Objetivo do trabalho”, concluiu-se que:

- i. No decorrer da preparação dos provetes, constatou-se que a reparação de cavidades moldantes pelo processo de soldadura Laser Nd:YAG trata-se de um processo mais moroso, em comparação com o processo de soldadura TIG. Este fenómeno deve-se ao facto de ser transmitido menos calor à peça, pelo que o banho de fusão é mais localizado, exigindo que sejam utilizadas varetas de material de adição com diâmetros mais pequenos, que por sua vez exige que sejam efetuadas um maior número de passagens para preencher a zona a soldar. Desta forma, e no seguimento dos resultados retirados nas seguintes conclusões, o processo de soldadura TIG mostra-se mais vantajoso nas reparações de grande dimensão, enquanto o processo de soldadura Laser Nd:YAG se coaduna com as reparações delicadas;
- ii. Quanto à avaliação visual conclui-se que, ao realizar o processo de soldadura quando o material base se encontra no estado recozido, e posteriormente efetuar o tratamento térmico de têmpera, é possível obter uma zona termicamente afetada menos perceptível, ou em alguns casos não perceptível. No entanto, na maioria dos casos reais, os acidentes ou alterações da zona moldante surgem numa altura em que a ferramenta já está temperada. Nestes casos, a realização de “revenidos de solda” permite atenuar as dissemelhanças na zona termicamente afetada, melhorando o aspeto visual geral do provete. Nos provetes em aço ferramenta fornecido no estado pré-tratado, verificou-se que é possível obter bons resultados do aspeto superficial, apenas com o uso de “revenidos de solda”;
- iii. Com a análise da rugosidade concluiu-se que, para o parâmetro Ra, não se verificou diferenças significativas de rugosidade entre o material base, zona de transição e material de adição nos provetes em que a solda foi temperada, ou no caso do aço ferramenta no estado pré-tratado, quando foram aplicados “revenidos de solda”. Verificou-se que, sem a aplicação de “revenidos de

solda”, a rugosidade na zona de transição apresenta valores mais elevados. Com os parâmetros Rz e Rt confirmou-se a presença de pequenos defeitos superficiais que provocaram picos de rugosidade, e assim não permitiram uma análise fiável destes parâmetros.

- iv. Na análise dos perfis de dureza constatou-se que para o aço ferramenta fornecido no estado pré-tratado, a aplicação de “revenidos de solda”, em ambos os processos de soldadura utilizados, permite obter um perfil de dureza consideravelmente homogéneo, enquanto que, aquando da não aplicação dos “revenidos de solda”, a zona de transição do material base para o material de adição apresentava um pico de dureza, sendo este efeito mais prolongado no processo de soldadura TIG, devido à maior quantidade de calor transmitido durante a operação de soldadura.

Para o aço ferramenta de trabalho a quente, verificou-se que, com a aplicação de “revenidos de solda” não se obteve um perfil de durezas homogéneo, existindo diferenças de dureza entre o material de adição e o material base. No entanto, ao contrário do observado nos provetes sem “revenidos de solda”, não existe pico de dureza na zona de transição. Nos provetes soldados antes do tratamento térmico de têmpera, seguidos deste mesmo tratamento, apresentaram perfis de dureza consideravelmente homogéneos, em que as diferenças de dureza entre o material base e o material de adição ocorreram devido à diferença da composição química, e assim diferentes comportamentos ao tratamento térmico de têmpera.

Nos provetes em aço inoxidável martensítico verificaram-se comportamentos distintos em função do processo de soldadura. Enquanto os resultados obtidos nos provetes soldados pelo processo de Laser Nd:YAG correspondem ao enunciado no parágrafo anterior, nos provetes soldados pelo processo TIG, os resultados não corresponderam ao expectável. Nos provetes soldados pelo último processo mencionado, o material de adição apresentou sempre durezas inferiores a 300HV, pelo que se seguiu para a análise metalográfica para tentar justificar o sucedido. Excluindo a dureza do material de adição, os restantes fenómenos foram semelhantes ao verificado nos outros provetes em aço de têmpera, sendo que, sem a presença de “revenidos de solda” se verificou um pico de dureza na zona de transição do material base para o material de adição.

- v. A análise metalográfica dos materiais 1.2738Mod e 1.2343 foi idêntica, no sentido que, nos provetes sem “revenidos de solda”, a microestrutura era apresentada sob a forma de grãos mais estreitos, correspondente a martensite não revenida, enquanto a microestrutura dos provetes com “revenidos de solda” não apresentava grandes diferenças.

Nos provetes em 1.2083, soldados a laser, a microestrutura observada era constituída por martensite, carbonetos de cromo e austenite. Com exceção do provete em que a solda foi temperada, na zona de transição verificou-se grandes quantidades de austenite sob a forma de zonas brancas, e grande presença de carbonetos. Nos provetes soldados a TIG, observou-se uma matriz martensítica, com austenite residual e quantidades significativas de  $\delta$ -ferrite, resultante das elevadas temperaturas atingidas durante o processo de soldadura que, seguido de um arrefecimento rápido faz com que esta não se consiga transformar, ficando retida na matriz.

## 6. Trabalhos Futuros

A análise metalográfica compreendeu uma observação visual da microestrutura. De forma a complementar as conclusões retiradas em relação à microestrutura, seria relevante efetuar uma análise de difração de raios-X (XRD), sobretudo, nos provetes em aço inoxidável, soldados a TIG.

Conforme mencionado anteriormente, embora idealmente o material de adição deva ter uma composição química idêntica ao material base, em muitos casos, tal não é possível. Entre as varetas disponibilizadas por vários fornecedores, são selecionadas as varetas com composições químicas que melhor se assemelhem, e verifica-se o aspeto visual e perfil de dureza, para determinar a melhor solução, em termos de material de adição.

A temperatura dos “revenidos de solda” costuma estar contido num intervalo de 30°C a 50°C abaixo da temperatura de revenido mais alta, de forma a evitar variações dimensionais. Adicionalmente, poderá ser conduzido um estudo incidente na temperatura dos “revenidos de solda”, considerando as temperaturas “comuns” segundo o intervalo mencionado, uma temperatura abaixo do intervalo, e outra acima. Outra forma de aprofundar o estudo, recai nas temperaturas de revenido após têmpera utilizadas, embora as propriedades mecânicas como a dureza sejam afetadas com o uso de revenidos de têmpera a outras temperaturas.

Associado aos processos de soldadura, existe uma grande quantidade de parâmetros que podem ser modificados consoante o material a soldar. Os parâmetros influenciam a qualidade da solda, na medida que regulam a quantidade de calor transmitido à peça. Para o processo de TIG seria interessante um estudo sobre a influência da Corrente (A) no resultado, enquanto para o processo Laser o principal ponto a analisar recairia na Potência do Pulso (kW).

## Bibliografia

- A. T. Jones, J. (Nupro C. (2007). *Electric Arc Furnace Steelmaking*. 1–8.  
<http://www.dpteknik.com/Steelmaking - Electric Arc Furnace.pdf>
- Boér, J., & Blaga, P. (2018). Reducing production costs by monitoring the roughness of raw product surfaces. *Procedia Manufacturing*, 22(January), 202–208.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.031>
- Bohler. (2018). Hot Work Tool Steel. In *Hot Work Tool Steel* (Vol. 1, Issue 1).
- Böhler. (2008). *Welding in tool making*.
- Borrego, L. P., Pires, J. T. B., Costa, J. M., & Ferreira, J. M. (2007). Fatigue behaviour of laser repairing welded joints. *Engineering Failure Analysis*, 14(8 SPEC. ISS.), 1586–1593. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.054>
- Capello, E., & Previtali, B. (2006). The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 174(1–3), 223–232.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.01.005>
- Cardoso, P. H. S., Kwietniewski, C., Porto, J. P., Reguly, A., & Strohaecker, T. R. (2003). The influence of delta ferrite in the AISI 416 stainless steel hot workability. *Materials Science and Engineering A*, 351(1–2), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01740-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01740-3)
- Choudhury, A. (1992). State of the Art of Superalloy Production for Aerospace and other Application using VIM/VAR or VIM/ESR. *ISIJ International*, 32(5), 563–574.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.563>
- Cong, D., Zhou, H., Yang, M., Zhang, Z., Zhang, P., Meng, C., & Wang, C. (2013). The mechanical properties of H13 die steel repaired by a biomimetic laser technique. *Optics and Laser Technology*, 53, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.04.024>
- Cunha, A. (2003). *Manual do Projetista para moldes de Injeção de Plástico - Moldação por Injecção e Materiais Plásticos* (A. J. Pontes & A. M. Brito (Eds.); 1ª Edição). Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Molde e Ferramentas Especiais e Plásticos.
- Deutsches Institut für Normung. (1992). *DIN EN 10027-Teil 2 Bezeichnungssysteme für Stähle*. European Committee for Standardization. <https://doi.org/669.14:620.2:62-777>
- Granja, D., Henriques, S., Selada, A., Pontes, A. J., & Brito, A. M. (2003). *Manual do Projetista para moldes de injeção de plástico - Materiais para moldes e técnicas de fabrico* (Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Molde e Ferramentas Especiais e Plásticos (Ed.); 1ª Edição). Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Molde e Ferramentas Especiais e Plásticos.
- Grill, J. (2021). *MIG vs TIG Welding: The Main Differences*. <https://weldguru.com/mig-vs-tig-welding/>

- Gualco, A., Svoboda, H. G., Surian, E. S., & Vedia, L. A. d. (2010). Effect of welding procedure on wear behaviour of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit. *Materials and Design*, 31(9), 4165–4173. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.026>
- Honeycombe, R. W. K. (1985). *Aços - Microestrutura e Propriedades* (M. Amaral Fortes & A. Cabral Ferro (Eds.); 1ª Edição). Fundação Calouste Gulbenkian.
- Jhavar, S., Paul, C. P., & Jain, N. K. (2013). Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis*, 34, 519–535. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>
- Klocke, F., Dambon, O., & Filho, G. G. C. (2005). Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened and unhardened steel. *Wear*, 258(11–12), 1794–1803. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.015>
- Klocke, Fritz, Dambon, O., & Behrens, B. (2011). Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels. *Production Engineering*, 5(5), 475–483. <https://doi.org/10.1007/s11740-011-0301-6>
- Köse, C., & Kaçar, R. (2014). The effect of preheat & post weld heat treatment on the laser weldability of AISI 420 martensitic stainless steel. *Materials and Design*, 64, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.044>
- Malek Ghaini, F., Hamed, M. J., Torkamany, M. J., & Sabbaghzadeh, J. (2007). Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding. *Scripta Materialia*, 56(11), 955–958. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.02.019>
- Oñoro, J. (2006). Martensite microstructure of 9-12%Cr steels weld metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1–3), 137–142. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.05.014>
- Osswald, T. O. (1998). *Polymer Processing Fundamentals* (1ª Edição). Hanser/Gardner Publications.
- Pimenta, P. V. de C. L. (2014). *Simulação Termomecânica do processo de Lingotamento contínuo utilizando o método de volumes finitos baseado em elementos* [Universidade Federal do Ceará]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2997.3926>
- Preciado, W. T., & Bohorquez, C. E. N. (2006). Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1–3), 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.101>
- Quintino, L., & F. Oliveira Santos, J. (2003). *Processos de Soldadura* (2ª Edição). ISQ.
- Rebeggiani, S. (2009). *Polishability of tool steels : Characterisation of high gloss polished tool steels*. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?parentRecord=diva2:239407&pid=diva2:357987>
- Rees, H. (1995). *Mold Engineering* (1st Editio). Hanser/Gardner Publications.
- Seabra, A. V. de. (1995). *Metalurgia Geral* (2ª Edição). Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- Seetharaman, S. (Ed.). (2005). *Fundamentals of metallurgy*. Woodhead Publishing.
- Silfvast, W. T. (2004). *Laser Fundamentals* (2nd Editio). Cambridge University Press.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511616426](https://doi.org/10.1017/CBO9780511616426)
- Silva, B., Pires, L., Quintino, L., & Miranda, R. (2013). New Welding Procedures for Repairing H13 and P20 Tool Steels.  
<https://Fenix.Tecnico.Ulisboa.Pt/DownloadFile/3779571902294/Congresso%20Luso-Mocambicano%20.Pdf>, 1–10.
- Singh, R. (2016). Production of Steel. In *Applied Welding Engineering* (pp. 37–55). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804176-5.00005-0>
- Smith, W. F. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais* (M. E. Rosa, M. A. Fortes, L. Guerra-Rosa, & M. de F. Vaz (Eds.); 3ª Edição). McGraw-Hill.
- Soares, P. (n.d.). *Aços para Ferramentas* (6ª Edição). Publindústria.
- Stoekhert, K., & Mennig, G. (1998). *Mold-Making Handbook* (G. Mennig (Ed.); 2nd Editio). Hanser Publishers.
- Suarez, S. A., Suarez, A. M., & Preciado, W. T. (2015). Arc welding procedures on steels for molds and dies. *Procedia Engineering*, 100(January), 584–591.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.408>
- Thompson, S. (1999). *Handbook of mold, tool and die repair welding* (1st Editio). William Andrew Publishing.
- thyssenkrupp Materials. (1997). *Catálogo - Aços Ferramenta* (p. 125). thyssenkrupp Materials.
- Udholm. (2014). *Welding of Tool Steel*.
- Vedani, M. (2004). Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding. *Journal of Materials Science*, 39(1), 241–249.  
<https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000007750.16970.4e>
- Vedani, M., Previtali, B., Vimercati, G. M., Sanvito, A., & Somaschini, G. (2007). Problems in laser repair-welding a surface-treated tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4518–4525. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.051>
- Vora, J. J., Abhishek, K., & Srinivasan, S. (2019). Attaining optimized A-TIG welding parameters for carbon steels by advanced parameter-less optimization techniques: with experimental validation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(6), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1765-0>
- Weber, V., Jardy, A., Dussoubs, B., Ablitzer, D., Rybéron, S., Schmitt, V., Hans, S., & Poisson, H. (2009). A Comprehensive model of the electroslag remelting process: Description and validation. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 40(3), 271–280.  
<https://doi.org/10.1007/s11663-008-9208-9>



## Anexo B

### INFORMAÇÃO

#### NORMA DIN 7527

(REMOÇÃO DO SOBREMETAL PARA OS AÇOS-FERRAMENTA)  
PARA VARÕES, SEXTAVADOS E OCTOGONAIS

Medidas em bruto	Medidas finais	Medidas em bruto	Medidas finais
10	8	100	94
12	10	110	103
14	12	120	113
15	12,5	130	123
16	13,5	140	132
18	15,5	150	142
20	17,5	160	151
22	19,5	170	161
25	22,5	180	170
30	27	190	180
35	32	200	189
40	36,5	210	199
45	41,5	220	209
50	46	230	218
55	51	240	228
60	55,5	250	237
65	60,5	260	247
70	65	300	285
75	70	350	333
80	75	400	380
85	80	450	428
90	84	500	476
		600	571



THYSSEN AÇOS FINOS, LDA.

PARA BARRAS PLANAS

Medidas em bruto		Medidas finais		Medidas em bruto		Medidas finais		Medidas em bruto		Medidas finais	
Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.
20	10		7,5	160	30		24	500	100		83
20	15	17,5	12,5	160	40		33	500	110		93
25	10		7,5	160	50	151	43	500	130	476	113
25	15	22,5	12,5	160	60		53	500	140		122
				160	70		63	500	150		132
30	10		7,5	160	80		72	500	160		142
30	15	27	12,5	200	30		23	550	40		24
30	20		17	200	40		32	550	50		33
40	10		7	200	50	189	42	550	60		43
40	15	36,5	12	200	60		52	550	70		53
40	20		17	200	70		62	550	80		63
40	30		26,5	200	80		71	550	90		72
				250	30		21	550	100	524	82
50	10		7	250	40		31	550	110		92
50	15		12	250	50	237	41	550	130		111
50	20	46	16	250	60		51	550	140		121
50	25		21,5	250	70		60	550	150		131
50	30		26,5	250	80		70	550	160		141
50	40		36	250	90		80				
				300	30		20	600	40		22
60	15		11,5	300	40		30	600	50		32
60	20	55,5	16,5	300	50	285	40	600	60		42
60	25		21,5	300	60		49	600	70		52
60	30		26	300	70		59	600	80		61
60	40		36	300	80		69	600	90		71
				300	90		79	600	100	571	81
80	15		11	300	100		88	600	110		91
80	20		16					600	130		110
80	25	75	21	350	30		19	600	140		120
80	30		25,5	350	40		29	600	150		130
80	40		35,5	350	50	333	38	600	160		139
80	60		55	350	60		48	600	200		178
				350	70		58	700	50		30
100	15		10,5	350	80		68	700	60		39
100	20	94	15,5	350	90		77	700	80		59
100	25		20,5	350	100		87	700	90		69
100	30		25	400	30		18	700	100		78
100	50		45	400	40	380	27	700	120	687	98
100	60		54	400	50		37	700	140		117
				400	60		47	700	150		127
120	20		15	400	70		57	700	160		137
120	30	113	25	400	80		66	700	200		176
120	40		34	400	90		76	700	250		225
120	50		44	400	100		86				
120	60		54	400	110		96	800	90		66
				400	130		115	800	100		76
150	20		14	450	40		28	800	120		95
150	30	142	24	450	50		36	800	150	762	125
150	40		34	450	60		46	800	200		173
150	50		43	450	70		55	800	250		222
				450	80		65	800	300		271
				450	90	428	75	900	100		73
				450	100		85	900	120		93
				450	110		94	900	150		122
				450	130		114	900	200	868	171
				450	150		133	900	250		220
								900	300		268
				500	40		25	900	400		366
				500	50	476	35	1000	150		120
				500	60		44	1000	200		168
				500	70		54	1000	250	953	217
				500	80		64	1000	300		263
				500	90		74	1000	400		363

## Anexo C

Material	Sigla	Densidade	Tg/Tm (°C)	Temperatura a máxima serviço (°C)	Módulo (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Izod (J/m)	Coefficiente de dilatação linear (1/°C)xE5	Rigidez dielétrica (MV/m)
Poliétileno de baixa densidade Poliétileno de alta densidade	LDPE	0,915-0,925	-/117	60	0,3	10	1000	20,0	27
	HDPE	0,945-0,965	-/124	70	1,1	30	150	12,0	22
Polipropileno	PP	0,901	-/174	100-110	1,3	35	100	8,0	22
Policloreto de Vinilo	uPVC	1,40		70	3,0	50	80	6,0	14
	pPVC	1,24-1,34		69	0,01-0,03	10-20	1000	10-16	30
Poliestireno	PS	1,01	100	80	3,0	30	10	8,0	20
	HIPS	1,08	100	80	2,1	42	100	7,0	15
Poli(tereftalato de eliteno)	PET	1,6030	100	150	3,0	60	100	10,0	20

## Anexo D



thyssenkrupp

thyssenkrupp Materials Ibérica, S.A.U. – Sucursal em Portugal

Cópia do Certificado 3.1

N° T29151 Data Imp. 15.12.21

Segundo EN 10 204

Guia de Remessa n° 2402588804

Seu n° artigo: AMOSTRAS 2083ESU

Dimensão (Dimension) TS 2083 PB- 24,00 60,00 73,00 ESU-A RestLote TKMI Portugal 1004523602

Quantidade (Quantity) 18,000 ST

Produto (Product) 1.2083 ESU  
UMGESCHMOLZEN, GEWALZT,  
GERICHTET

Medida Original (Dimension) 150 X 1100 X 4200 MM

Vazamento (Cast) n° 888690

Comp. Química (Chemical Analyse) % :

C	Si	Mn	P	Cr
0,390	0,320	0,840	0,022	13,010

S  
<0,001

Características Mecânicas, outros ensaios.  
(Mechanical properties, additional tests.)

Dureza  
(Hardness)

HB 170

DIE LIEFERUNG WURDE 100% US GEPRÜFT  
DIE LIEFERUNG WURDE AUF IDENTITÄT GEPRÜFT (OPTISCHE EMISS.)  
DIE LIEFERUNG WURDE BESICHTIGT UND AUF MASS KONTROLLIERT

Product Manager  
Javier Fernández

thyssenkrupp Materials Ibérica, S.A.U. Sucursal em Portugal, Apartado 32, Quinta do Peixoto, 2584-908 Carregado, Portugal  
T: +351 263 850 100, F: +351 263 850 102, www.thyssenkrupp.com  
Tratamentos Térmicos e Superficiais: Apartado 230, Pero Neto, 2431-903 Marinha Grande, T: +351 244 573 460  
Metais Não Ferrosos: Apartado 445, Rua 1 da Zona Ind. De Rio Meão, N° 265, 4524-907 Rio Meão, T: +351 256 780 650  
Management Board: Martin Koelink (CEO), Alex Gancedo (CFO)  
Contribuinte n° PT: 980494958, Matriculada na Cons. do Reg. Com. de Alenquer.  
BST 0018.0001.0020885736.06, BCO 0033.0000.00007638671.51, BES 0007.0218.00195890006.74





thyssenkrupp

thyssenkrupp Materials Ibérica, S.A.U. – Sucursal em Portugal

Cópia do Certificado 3.1

Nº T29776 Data Imp. 15.12.21

Segundo EN 10 204

Guia de Remessa nº 2402588804

Seu nº artigo: AMOSTRAS 2343ESU

Dimensão (Dimension) TS 2343 PB- 20,00 60,00 65,00 ESU-FA ResLote TKMI Portugal 1004523634

Quantidade (Quantity) 18,000 ST

Produto (Product) 1.2343 ESU  
GESCHMIEDET, GROBBEARBEIT  
GERICHTET

Medida Original (Dimension) 939 X 200 X 4775 MM

Vazamento (Cast) nº 850370

Comp. Química (Chemical Analyse) % :

C	Si	Mn	P	Cr	V	Mo
0,390	0,940	0,440	0,013	5,070	0,470	1,250

S  
<0,001

Características Mecânicas, outros ensaios.  
(Mechanical properties, additional tests.)

Dureza  
(Hardness)

HB 167

DIE LIEFERUNG WURDE 100% US GEPRÜFT  
DIE LIEFERUNG WURDE AUF IDENTITÄT GEPRÜFT (OPTISCHE EMISS.)  
DIE LIEFERUNG WURDE BESICHTIGT UND AUF MASS KONTROLLIERT

Product Manager  
Javier Fernández

thyssenkrupp Materials Ibérica, S.A.U. Sucursal em Portugal, Apartado 32, Quinta do Peixoto, 2584-908 Carregado, Portugal  
T: +351 263 850 100, F: +351 263 850 102, www.thyssenkrupp.com  
Tratamentos Térmicos e Superficiais: Apartado 230, Pero Neto, 2431-903 Marinha Grande, T: +351 244 573 460  
Metais Não Ferrosos: Apartado 445, Rua 1 da Zona Ind. De Rio Meão, Nº 265, 4524-907 Rio Meão, T: +351 256 780 650  
Management Board: Martin Koelink (CEO), Alex Gancedo (CFO)  
Contribuinte nº PT: 980494958, Matriculada na Cons. do Reg. Com. de Alenquer.  
BST 0018.0001.0020885736.06, BCO 0033.0000.00007638671.51, BES 0007.0218.00195890006.74





thyssenkrupp

thyssenkrupp Materials Ibérica, S.A.U. - Sucursal em Portugal

Cópia do Certificado 3.1

Nº T29791 Data Imp. 15.12.21

Segundo EN 10 204

Guia de Remessa nº 2402588804

Seu nº artigo: AMOSTRAS 2738MOD/SP300

Dimensão (Dimension) TS 2738MOD PB- 20,00 60,00 60,00 FHT ResLote TKMI Portugal 1004524602

Quantidade (Quantity) 12,000 ST

Produto (Product) 1.2738 MOD (SP300)  
QUENCHING, TEMPERING

Medida Original (Dimension) 316 X 2000 X 2250 MM

Vazamento (Cast) nº 25676

Comp. Química (Chemical Analyse) % :

C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo
0,266	0,110	1,380	0,002	1,370	0,310	0,450

Características Mecânicas, outros ensaios.  
(Mechanical properties, additional tests.)

Dureza  
(Hardness)

HB 295

Product Manager  
Javier Fernández

thyssenkrupp Materials Ibérica, S.A.U. Sucursal em Portugal, Apartado 32, Quinta do Peixoto, 2584-908 Carregado, Portugal  
T: +351 263 850 100, F: +351 263 850 102, www.thyssenkrupp.com  
Tratamentos Térmicos e Superficiais: Apartado 230, Pero Neto, 2431-903 Marinha Grande, T: +351 244 573 460  
Metais Não Ferrosos: Apartado 445, Rua 1 da Zona Ind. De Rio Meão, Nº 265, 4524-907 Rio Meão, T: +351 256 780 650  
Management Board: Martin Koelink (CEO), Alex Gancedo (CFO)  
Contribuinte nº PT: 980494958, Matriculada na Cons. do Reg. Com. de Alenquer.  
BST 0018.0001.0020885736.06, BCO 0033.0000.00007638671.51, BES 0007.0218.00195890006.74



# Anexo E



## Abschrift von Abnahmeprüfzeugnis EN 10204 3.1 Transcription of Inspection Certificate EN 10204 Type 3.1

Prüf-Nr./check-no.: 4328/22  
Vom/from: 17.08.2022  
Lieferschein/delivery note:

Chargen-Nr. / Batch-No.	Artikel-Nr. / Article No.	Werkstoff-Nr. / Material No.	Bezeichnung / Designation
20121	QuFe10	1.5424	WIG wire QuFe10

### Chemische Zusammensetzung in % Chemical composition in %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti
0,100	0,650	1,140	0,010	0,007	0,080	0,460	0,040	0,002	0,0010
Al	Zr								
0,006	0,0012								

### Mechanische Eigenschaften Mechanical properties

Ø	Festigkeit / Tensile Strength (Depending on heat treatment)	Dehnung des Drahtes vor Schweißung Expansion of the wire before welding	AL 100 AL 100
1,6			

Härte/ Hardness	Yield Strength (Depending on heat treatment)

Diese Angaben sind teilweise aus dem Werkzeugeignis unseres Vormaterial-Lieferanten übernommen.  
Partial of the above information has been taken over from our raw material supplier certificate.

Datum/Date:	Unterschrift/Signature
17.08.2022	

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist gem. EN 10204 ohne Unterschrift rechtsverbindlich.  
This certificate was generated by data system acc. to EN 10204 it needs not to be signed for validity.



**Abschrift von Abnahmeprüfzeugnis EN 10204 3.1**  
**Transcription of Inspection Certificate EN 10204 Type 3.1**

Prüf-Nr./Check-No. 4329/22  
 vom /dtd. 17.08.2022  
 Lieferscheinnr./ delivery no.

Chargen-Nr. / Batch-No.	Artikel-Nr./ Article No.	Werkstoff-Nr. / Material No.	Bezeichnung / Designation
19089	QuFe13	1.2367	WIG wires QuFe13

**Chemische Zusammensetzung in %**  
**Chemical composition in %**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Al	Cu
0,253	0,400	0,630	0,019	0,002	4,830	3,600	0,070	0,7080	0,019	0,170

**Mechanische Eigenschaften**  
**Mechanical properties**

Ø	Festigkeit / Tensile Strength (Depending on heat treatment)	Dehnung des Drahtes vor Schweißung Expansion of the wire before welding	AL 100 AL 100
1,6			

Härte/ Hardness	Yield Strength (Depending on heat treatment)

Diese Angaben sind teilweise aus dem Werkszeugnis unseres Vormaterial-Lieferanten übernommen.  
 Partial of the above information has been taken over from our raw material supplier certificate.

Datum/Date:	Unterschrift/Signature
17.08.2022	

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist gem. EN 10204 ohne Unterschrift rechtsverbindlich.  
 This certificate was generated by data system acc. to EN 10204 it needs not to be signed for validity.

quada V+F Laserschweißdraht GmbH  
 Hellestr. 40 • D - 58675 Hemer  
 Geschäftsführer: Swen Freeth

Tel. +49 23 72 - 55 64 1 -0  
 Fax +49 23 72 - 55 64 1 -10  
 Email: info@quada-office.com

Amtsgericht Iserlohn HRB 9247  
 USt-IdNr. DE 243829093  
 St.-Nr. 5328/5841/1076



**Abschrift von Abnahmeprüfzeugnis EN 10204 3.1**  
**Transcription of Inspection Certificate EN 10204 Type 3.1**

**Prüf-Nr./check-no.:** 4325/22  
**Vom/from:** 17.08.2022  
**Lieferschein/delivery note:**

Chargen-Nr./ Batch-No.	Artikel-Nr./ Article No.	Werkstoff-Nr./ Material No.	Bezeichnung/ Designation
16106	QuFe15	1.7384	Laser welding wire QuFe15

**Chemische Zusammensetzung in %**  
**Chemical composition in %**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	
0,09	0,55	0,98	0,012	0,009	2,3	0,94	
Ni	Ti	Al	Cu	V	Zr	As	Sn
0,04	0,001	0,005	0,17	0,008	0,0007	0,0003	0,005

**Mechanische Eigenschaften**  
**Mechanical properties**

Ø	Festigkeit / Tensile Strength (Depending on heat treatment)	Dehnung des Drahtes vor Schweißung Expansion of the wire before welding	AL 100 AL 100
0,4			

Härte/ Hardness	Streckfestigkeit / Yield Strength (Depending on heat treatment)

Diese Angaben sind teilweise aus dem Werkszeugnis unseres Vormaterial-Lieferanten übernommen.  
 Partial of the above information has been taken over from our raw material supplier certificate.

Datum/Date:	Unterschrift/Signature
17.08.2021	

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist gem. EN 10204 ohne Unterschrift rechtsverbindlich.  
 This certificate was generated by data system acc. to EN 10204 it needs not to be signed for validity.

quada V+F Laserschweißdraht GmbH  
 Hellestr. 40 • D - 58675 Hemer  
 Geschäftsführer: Swen Freeth

Tel. +49 23 72 - 55 64 1 -0  
 Fax +49 23 72 - 55 64 1 -10  
 Email: info@quada-office.com

Amtsgericht Iserlohn HRB 9247  
 USt-IdNr. DE 243829093  
 St.-Nr. 5328/5841/1076



**Abschrift von Abnahmeprüfzeugnis EN 10204 3.1**  
**Transcription of Inspection Certificate EN 10204 Type 3.1**

**Prüf-Nr./check-no.:** 4326/22  
**Vom/from:** 17.08.2022  
**Lieferschein/delivery note:**

Chargen-Nr./ Batch-Nr.	Artikel-Nr./ Article No.	Werkstoff-Nr./ Material No.	Bezeichnung / Designation
1152301	QuFe21	Special Alloy	Laser welding wire QuFe21

**Chemische Zusammensetzung in %**  
**Chemical composition in %**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	AL	Cu
0,345	0,430	0,990	0,019	0,003	6,650	2,10	0,2360	0,010	0,050

**Mechanische Eigenschaften**  
**Mechanical properties**

Ø	Festigkeit / Tensile Strength (Depending on heat treatment)	Dehnung des Drahtes vor Schweißung Expansion of the wire before welding	AL 100 AL 100
0,4			

Härte/ Hardness	Streckfestigkeit / Yield Strength (Depending on heat treatment)

Diese Angaben sind teilweise aus dem Werkszeugnis unseres Vormaterial-Lieferanten übernommen.  
 Partial of the above information has been taken over from our raw material supplier certificate.

Datum/Date:	Unterschrift/Signature
17.08.2022	

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist gem. EN 10204 ohne Unterschrift rechtsverbindlich.  
 This certificate was generated by data system acc. to EN 10204 it needs not to be signed for validity.

quada V+F Laserschweißdraht GmbH  
 Hellestr. 40 • D - 58675 Hemer  
 Geschäftsführer: Swen Freeth

Tel. +49 23 72 - 55 64 1 -0  
 Fax +49 23 72 - 55 64 1 -10  
 Email: info@quada-office.com

Amtsgericht Iserlohn HRB 9247  
 USt-IdNr. DE 243829093  
 St.-Nr. 5328/5841/1076



**Abschrift von Abnahmeprüfzeugnis EN 10204 3.1**  
**Transcription of Inspection Certificate EN 10204 Type 3.1**

**Prüf-Nr./Check-No.** 4330/22  
**vom /dtd.** 17.08.2022  
**Lieferschein Nr./delivery note:**

Chargen-Nr. / Batch-No.	Artikel-Nr. / Articiel No.	Werkstoff-Nr. / Material No.	Bezeichnung / Designation
49021	QuFe23	1.2343	WIG wire QuFe23

**Chemische Zusammensetzung in %**  
**Chemical composition in %**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,367	1,00	0,39	0,020	0,0017	4,87	1,21	0,42

**Mechanische Eigenschaften**  
**Mechanical properties**

Ø	Festigkeit / Tensile Strength (Depending on heat treatment)	Dehnung des Drahtes vor Schweißung Expansion of the wire before welding	AL 100 AL 100
1,6			

Härte/ Hardness	Streckfestigkeit / Yield Strength (Depending on heat treatment)

Diese Angaben sind teilweise aus dem Werkszeugnis unseres Vormaterial-Lieferanten übernommen.  
 Partial of the above information has been taken over from our raw material supplier certificate.

Datum/Date:	Unterschrift/Signature
17.08.2022	

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist gem. EN 10204 ohne Unterschrift rechtsverbindlich.  
 This certificate was generated by data system acc. to EN 10204 it needs not to be signed for validity.



**Abschrift von Abnahmeprüfzeugnis EN 10204 2.1**  
**Transcription of Inspection Certificate EN 10204 Type 2.1**

**Prüf-Nr./Check-No.** 4327/22  
**vom /dtd.** 17.08.2022  
**Lieferschein Nr./delivery note:**

Chargen-Nr. / Batch-No.	Artikel-Nr./ Article No.	Werkstoff-Nr. / Material No.	Werkstoff-Nr. / Material No.
L049579	QuStavax	1.2083	Laser welding wire Stavax

**Chemische Zusammensetzung in %**  
**Chemical composition in %**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38	0,45	0,45	max. 0,030	max. 0,020	13,50	1,00

**Mechanische Eigenschaften**  
**Mechanical properties**

Ø	Festigkeit / Tensile Strength (Depending on heat treatment)	Dehnung des Drahtes vor Schweißung Expansion of the wire before welding	AL 100 AL 100
0,5			

Härte/ Hardness	Yield Strength /Streckgrenze (Depending on heat treatment)
Approx. 54 HRC*	

\*According to Uddeholm data sheet

Diese Angaben sind teilweise aus dem Werkzeugeignis unseres Vormaterial-Lieferanten übernommen.  
 Partial of the above information has been taken over from our raw material supplier certificate.

Datum/Date:	Unterschrift/Signature
17.08.2022	


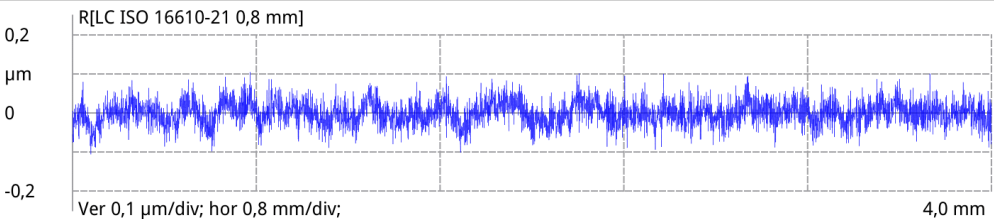
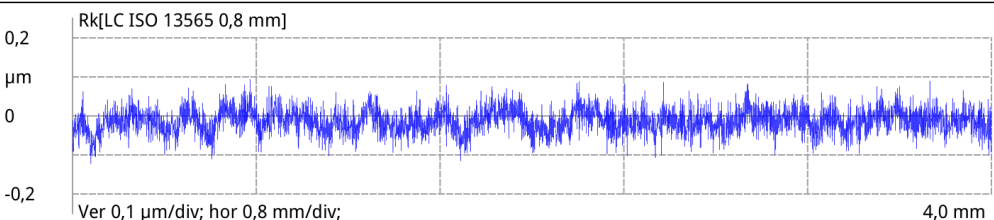
Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist gem. EN 10204 ohne Unterschrift rechtsverbindlich.  
 This certificate was generated by data system acc. to EN 10204 it needs not to be signed for validity.

quada V+F Laserschweißdraht GmbH  
 Hellestr. 40 • D - 58675 Hemer  
 Geschäftsführer: Swen Freeth

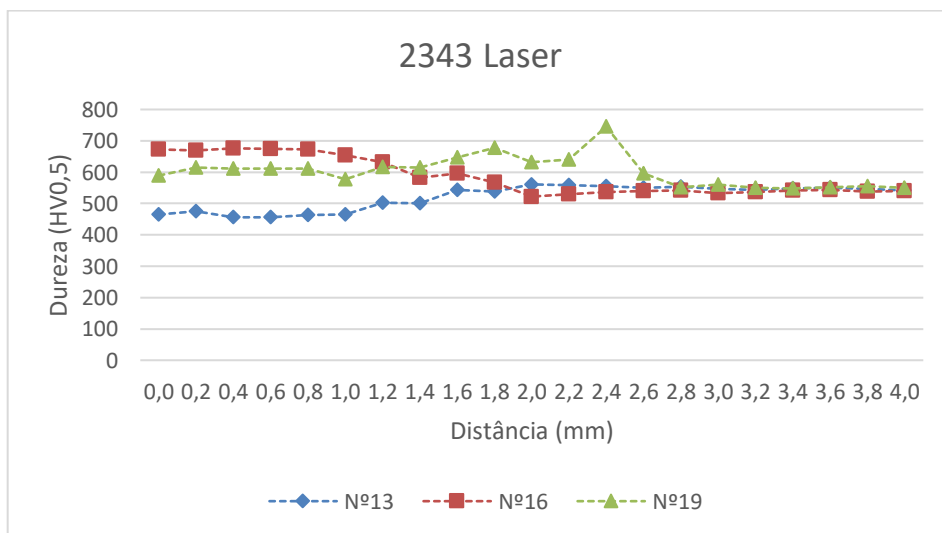
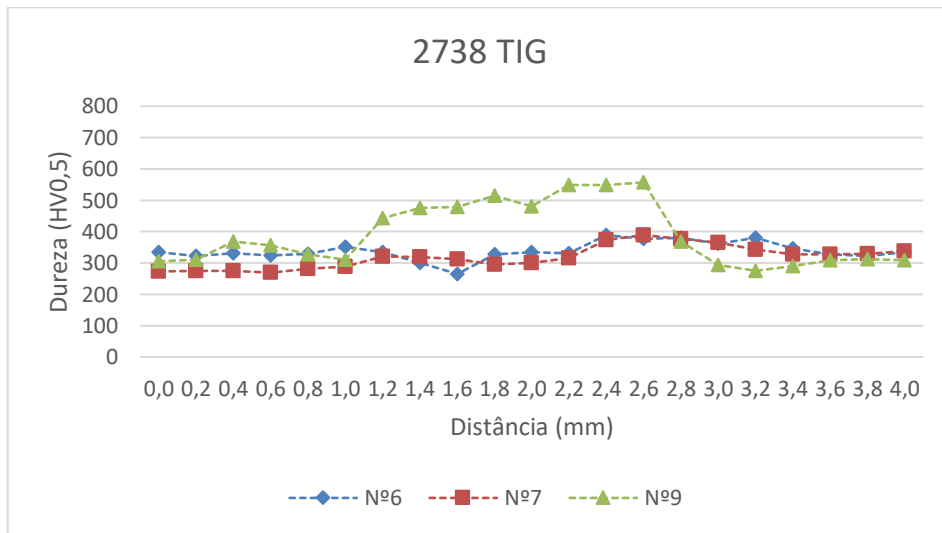
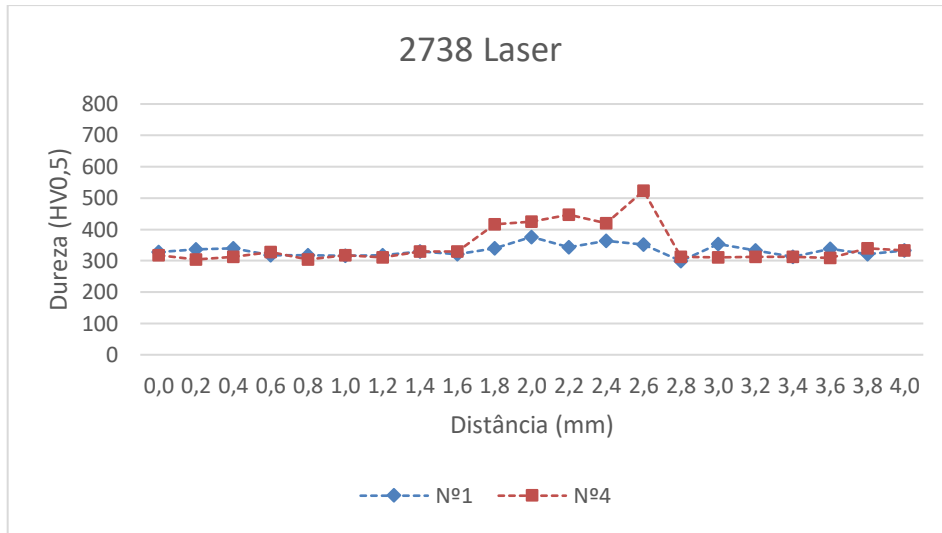
Tel. +49 23 72 - 55 64 1 -0  
 Fax +49 23 72 - 55 64 1 -10  
 Email: info@quada-office.com

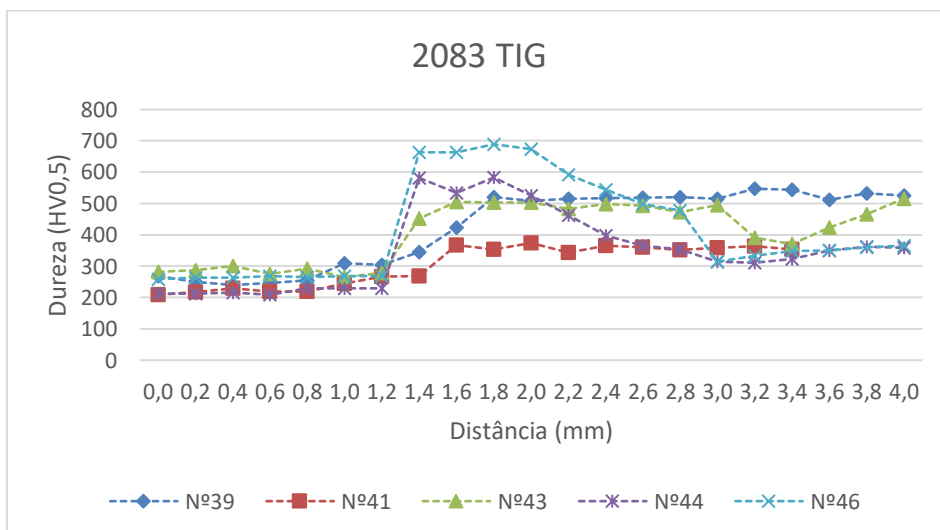
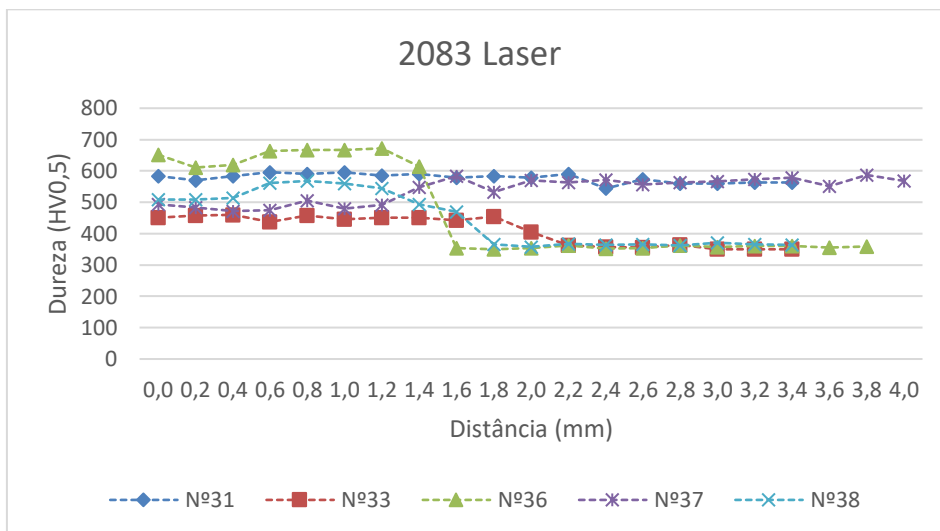
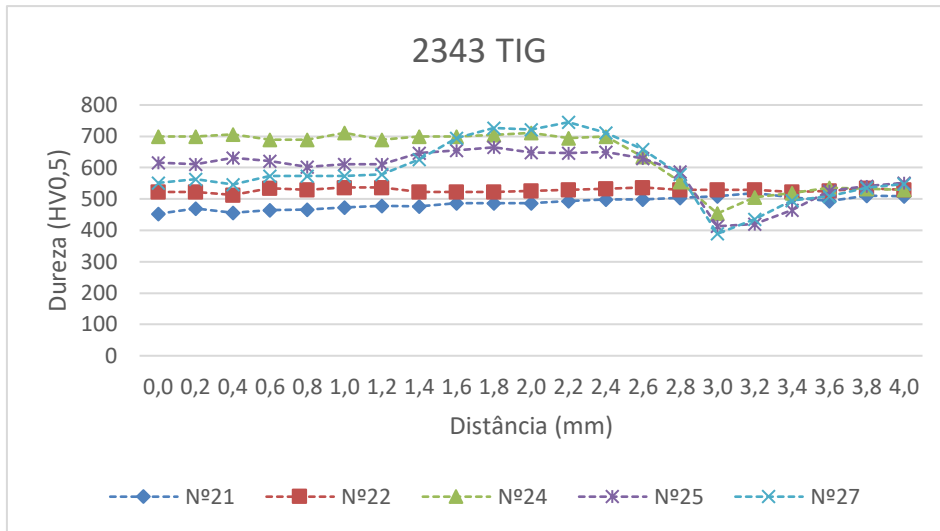
Amtsgericht Iserlohn HRB 9247  
 USt-IdNr. DE 243829093  
 St.-Nr. 5328/5841/1076

# Anexo F

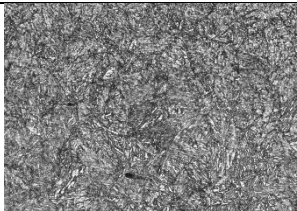
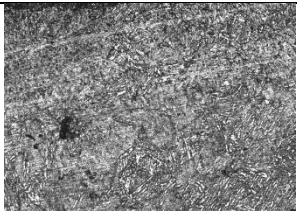
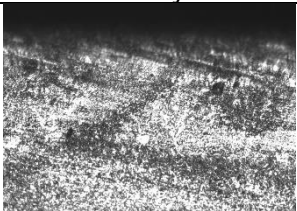
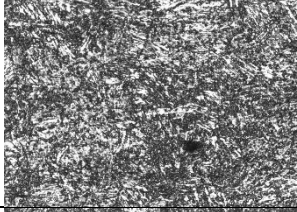
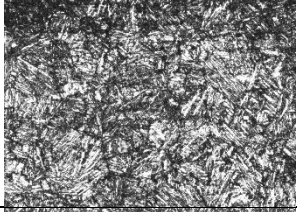
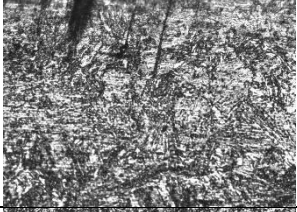
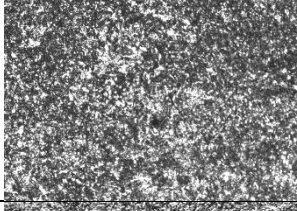
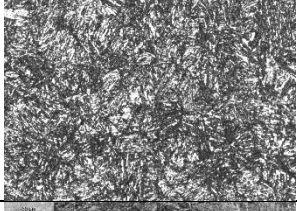
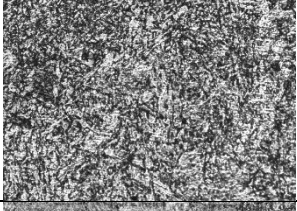
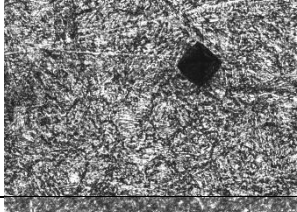
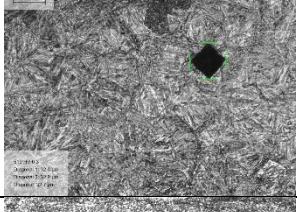

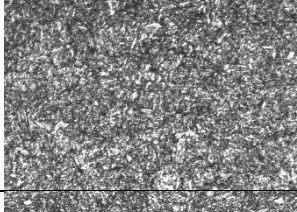
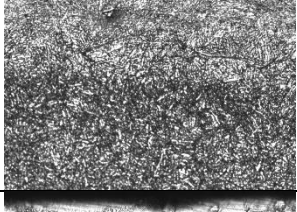

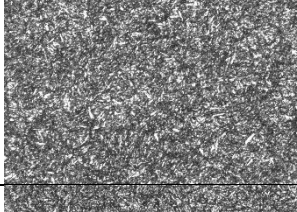

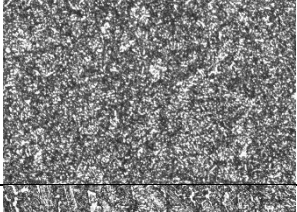
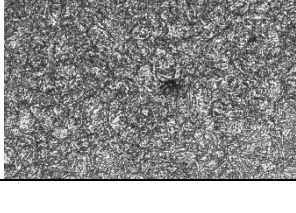
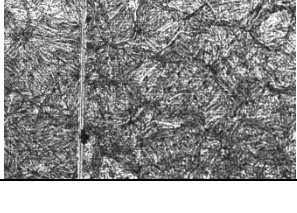
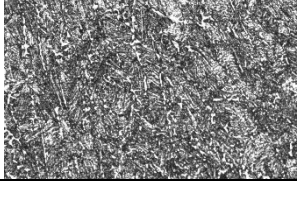
		MarSurf PS 10 1.00-16	
Data de criação:	22/06/2022 19:33	Lt:	4,8 mm
Dispositivo:	MarSurf PS 10 (4527)	Ls:	2,5 µm
Apalpador:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Pontos:	9600
 <p>R[LC ISO 16610-21 0,8 mm] Ver 0,1 µm/div; hor 0,8 mm/div; 4,0 mm</p>			
 <p>Rk[LC ISO 13565 0,8 mm] Ver 0,1 µm/div; hor 0,8 mm/div; 4,0 mm</p>			
<b>R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]</b>			
Ra	0,025 µm		
Rz	0,203 µm		
Rmax	0,220 µm		
Rt	0,220 µm		
<b>Rk[LC ISO 13565 0,8 mm]</b>			
Rk (7!)	0,083 µm		
Mr1 (7!)	9,56 %		
Mr2 (7!)	90,25 %		

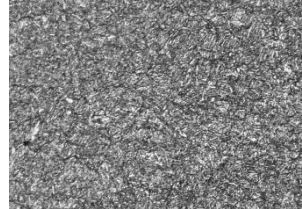
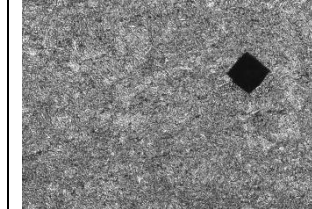

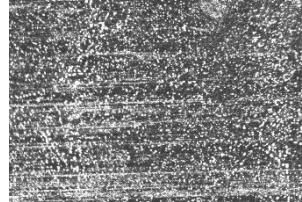
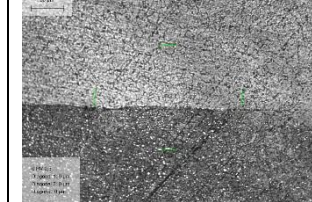
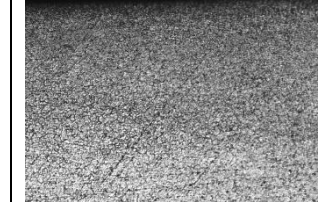
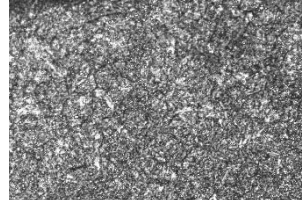
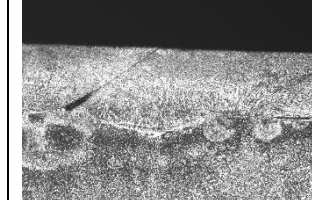
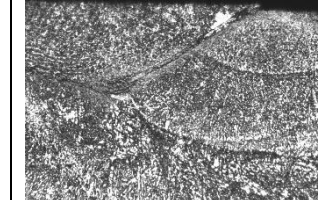
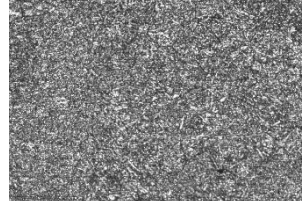
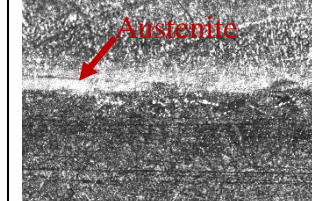
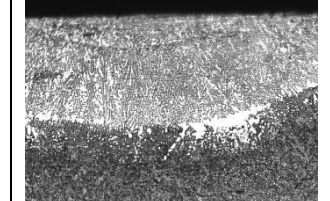
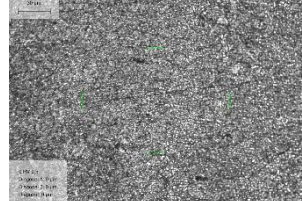
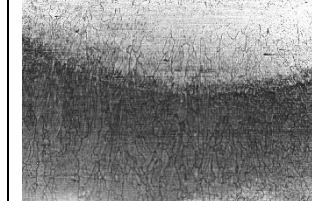
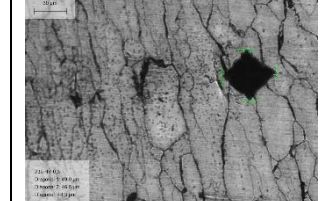

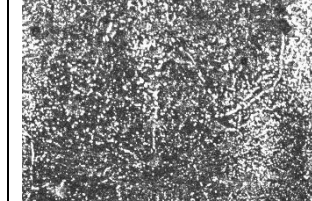
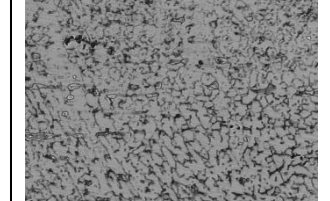
# Anexo G





## Anexo H

NºProvete/ Descrição	Material Base	ZTA	Material Adição
n.º 1 1.2738Mod Laser “Revenidos solda”			
n.º 4 1.2738Mod Laser Sem “revenidos solda”			
n.º 7 1.2738Mod TIG “Revenidos solda”			
n.º 9 1.2738Mod TIG Sem “revenidos solda”			
n.º 16 1.2343 Laser “Revenidos solda”			
n.º 19 1.2343 Laser Sem “revenidos solda”			
n.º 24 1.2343 TIG “Revenidos solda”			

<p>n.º 27 1.2343 TIG Sem “revenidos solda”</p>			
<p>n.º 33 1.2083 Laser Solda temperada</p>			
<p>n.º 36 1.2083 Laser “Revenidos solda”</p>			
<p>n.º 38 1.2083 Laser Sem “revenidos solda”</p>			
<p>n.º 41 1.2083 TIG Solda temperada</p>			
<p>n.º 44 1.2083 TIG “Revenidos solda”</p>			
<p>n.º 46 1.2083 TIG Sem “revenidos solda”</p>	