



**Politécnico  
de Viseu**

Escola Superior  
de Tecnologia  
e Gestão de Viseu

# **Estudo e Aplicação da Soldadura Laser**

Gonçalo Pereira Dias Coelho

## **Dissertação**

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Adelino Mendes Cabral Trindade

Fevereiro de 2023





**Politécnico  
de Viseu**

Escola Superior  
de Tecnologia  
e Gestão de Viseu

# **Estudo e Aplicação da Soldadura Laser**

Gonçalo Pereira Dias Coelho

## **Dissertação**

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Adelino Mendes Cabral Trindade

Fevereiro de 2023



## RESUMO

A soldadura laser é um método de soldadura recente que revela um conjunto de vantagens quando comparado a outros métodos de soldadura convencionais. Consiste na fusão de matérias através da utilização de um feixe de radiação resultando numa ligação soldada. Este estudo é focado na avaliação de uma gama de parâmetros de soldadura e na tentativa de implementação da soldadura pulsada por laser num contexto industrial.

O objetivo predominante é o estabelecimento de um modelo compreensivo que auxilie na seleção de parâmetros de soldadura ao estabelecer um guia prático. Isto é conseguido ao avaliar os resultados da variação de uma gama de variáveis individualmente segundo um conjunto definido de critérios, particularmente direcionados à soldadura em modo *keyhole*.

Ao expor a influência de parâmetros individuais e conectando-os, individualmente ou em combinação, à aparência, qualidade, propriedades e a presença de defeitos no cordão de soldadura, este estudo permite o discernimento no que diz respeito à viabilidade e adequabilidade da aplicação desta técnica num contexto industrial, potencialmente auxiliando a identificação de mecanismos de formação de defeitos, conduzindo a seleção de parâmetros e resolução de problemas.

Esta tese tem como objetivo central, a avaliação dos efeitos da variação de parâmetros e a modalidade de soldadura por meio de laser nas propriedades das juntas. Este estudo vai revolver, em particular, em torno de parâmetros tais como: a potência de soldadura, altura focal, potência de pico, frequência, potência média e a relação de duração de pulso/período. A avaliação dos resultados será realizada em termos de aparência, qualidade do cordão de soldadura, resistência mecânica, medições de dureza e temperatura. Estes, por sua vez, irão fundamentar a seleção de combinações de parâmetros ideais para a soldadura laser.



## ABSTRACT

*Laser Welding is a fairly recent joining technique that offers numerous advantages over conventional welding methods. It employs a high energy beam to fuse materials together, resulting in a welded joint. This study is focused on evaluating a select range of welding parameters and an attempt at implementing pulsed laser welding in an industrial setting.*

*The overarching goal is the establishment of a comprehensive model that aids in the selection of welding parameters by laying out a practical guide. This was achieved by evaluating the results of the variation of a range of variables individually based on set criteria, particularly aimed at keyhole welding.*

*By laying out the influence of individual parameters and linking them, either individually or in combination, to the appearance, quality, properties, and the presence of defects in the welded joint, this study grants insight into the feasibility and suitability of the application of these techniques in an industrial setting, potentially aiding in the identification of defect formation mechanisms, steering parameter selection and troubleshooting.*

*This thesis has as a central objective, the evaluation of the effects due to the variation of welding parameters and laser welding modalities in the properties of the joints. This study will revolve around parameters such as: welding power, focal height, peak power, frequency, average power and the relation between pulse duration/period. The evaluation of the results will be done based on the appearance, weld bead quality, mechanical resistance, hardness measurements and temperature. These will serve as foundation in the selection of ideal welding parameters.*



## **PALAVRAS-CHAVE**

Soldadura

Laser

Nd:YAG

Parametrização

Qualidade

Soldadura Contínua

Soldadura Pulsada

*Keyhole*



## **KEYWORDS**

*Welding*

*Laser*

*Nd:YAG*

*Parameterization*

*Quality*

*Continuous Welding*

*Pulsed Welding*

*Keyhole*



## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer, em primeiro lugar, à minha família pelo apoio inabalável durante todo o meu percurso académico. Este trabalho, e a oportunidade de o realizar, é um reflexo direto da paciência, compreensão e incentivo que demonstraram para comigo.

Ao Professor Doutor Adelino Mendes Cabral Trindade, o meu orientador, pela disponibilidade e prontidão na partilha de conhecimento. A sua experiência e opiniões foram instrumentais na definição da direção e foco deste trabalho.

Agradeço a ajuda do Eng.º Nelson Santos na construção do gabari e a sua paciência para me ensinar a operar os equipamentos das oficinas.

Um obrigado ao Eng.º André Guimarães que me guiou dentro da Iprom e ao Sr. Nuno pelo conhecimento técnico na execução das soldaduras. Mostraram-se sempre dispostos a ajudar fora de horas e foram essenciais na realização deste trabalho.

Não podia deixar à parte um agradecimento à Iprom, pela oportunidade de me permitirem o desenvolvimento da componente prática desta dissertação nas suas instalações, pelo voto de confiança e pela disponibilidade para trabalhar lado a lado com instituições de ensino pelo avanço científico.

Por último, um obrigado à ESTGV e ao IPV, pelo papel que desempenham no ensino superior no interior.



## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	I
ABSTRACT .....	III
PALAVRAS-CHAVE .....	V
KEYWORDS .....	VII
AGRADECIMENTOS .....	IX
ÍNDICE GERAL .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIX
ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XXI
SIMBOLOGIA.....	XXIII
1. Introdução .....	1
1.1. Fundamentos dos Lasers.....	2
1.1.1. Cavidade Ótica Ressonante .....	4
1.1.2. Absorção da Radiação .....	5
1.2. Tipos de Laser Utilizados na Soldadura.....	6
1.2.1. Lasers de Disco.....	7
1.3. Focagem.....	8
1.4. Caracterização da Onda de Potência.....	13
1.5. Regimes Operacionais .....	15
1.6. Dinâmica e Características do Cordão .....	16
1.7. Defeitos da Soldadura Laser .....	17
1.7.1. Deformações ou Distorções.....	17
1.7.2. Acabamento Superficial .....	18
1.7.3. Mordeduras ou “ <i>Undercutting</i> ” .....	19
1.7.4. Protuberâncias .....	20
1.7.5. Fusão ou <i>Melt Through</i> .....	20
1.7.6. Fissuração.....	20
1.7.7. Porosidade .....	21
1.7.8. Penetração e ou Fusão Incompleta .....	21
1.7.9. Inclusões .....	22
1.7.10. Degradação das Propriedades Químicas e Mecânicas.....	22

2. Materiais e Métodos .....	23
2.1. Material de Estudo .....	23
2.2. Definição das Variáveis de Estudo – Etapas do Processo Experimental.....	25
2.3. Objetos de Estudo .....	29
2.4. Preparação de Provetes para Análise.....	30
2.5. Ataque Químico .....	32
2.6. Microscopia.....	32
2.7. Ensaio de Tração .....	33
2.8. Medições de Dureza .....	34
2.9. Medição de Temperatura .....	35
2.9.1. Preparação dos Termopares .....	35
2.9.2. Fixação dos termopares .....	36
2.10. Equação de Rosenthal.....	37
2.11. Gerador do Feixe Laser .....	38
2.12. Célula de Soldadura.....	39
2.13. Robot .....	40
2.14. Ótica de Focagem.....	40
2.15. Gabari de Fixação.....	42
3. Resultados e Discussão .....	45
3.1. Medição de Temperatura .....	45
3.1.1. Aplicabilidade das Equações de Rosenthal .....	47
3.2. Avaliação da Influência da Variação da Potência.....	49
3.3. Avaliação da Influência da Variação da Altura de Foco.....	57
3.4. Definição da Frequência de Soldadura por Laser Pulsado.....	62
3.5. Influência da Variação da Razão Duração de Pulso/Período e Potência de Pico .....	67
3.6. Tentativas de Otimização da Soldadura Pulsada .....	75
3.7. Medição da Dureza.....	81
4. Conclusões e Estudo Futuro.....	83
4.1. Conclusões .....	83
4.2. Estudo Futuro .....	84
5. Referências Bibliográficas .....	85
ANEXO 1 – Amostra 1.....	89
ANEXO 2 – Amostra 2.....	90

ANEXO 3 – Amostra 3.....	91
ANEXO 4 – Amostra 4.....	92
ANEXO 5 – Amostra 5.....	93
ANEXO 6 – Amostra 6.....	94
ANEXO 7 – Amostra 7.....	95
ANEXO 8 – Amostra 8.....	96
ANEXO 9 – Amostra 9.....	97
ANEXO 10 – Amostra A .....	98
ANEXO 11 – Amostra B .....	99
ANEXO 12 – Amostra C .....	100
ANEXO 13 – Amostra D .....	101
ANEXO 14 – Amostra E .....	102
ANEXO 15 – Amostra F .....	103
ANEXO 16 – Amostra G.....	104
ANEXO 17 – Amostra H.....	105
ANEXO 18 – Amostra I.....	106
ANEXO 19 – Amostra J.....	107
ANEXO 20 – Amostra K.....	108
ANEXO 21 – Amostra L.....	109
ANEXO 22 – Amostra M.....	110
ANEXO 23 – Amostra N.....	111
ANEXO 24 – Amostra O.....	112
ANEXO 25 – Amostra P .....	113
ANEXO 26 – Amostra Q.....	114
ANEXO 27 – Amostra R.....	115
ANEXO 28 – Amostra S .....	116



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama representativo da emissão estimulada (Vladislav, 2008).....	2
Figura 2 - Gráfico da dispersão da população exemplificativo de uma inversão (Siegman, Anthony E., 1986).....	3
Figura 3 - Imagem ilustrativa da distinção entre luz coerente, em baixo, e luz incoerente, em cima (Siegman, Anthony E., 1986). ....	4
Figura 4- Representação gráfica da variação da absorção da radiação de acordo com o comprimento de onda (Trindade, 2020).....	5
Figura 5 - Diagrama do funcionamento dos lasers de disco com gráfico de distribuição de temperatura (Katayama, 2013).....	7
Figura 6 - Esquema de lasers de disco de várias cavidades copuladas (Löffler, 2013). ...	8
Figura 7- Configuração básica do dispositivo de focalização ótica de soldadura(Trumpf, 2020).....	8
Figura 8 – Representação da variação da distância focal por meio da alteração da distância de colimação (Trumpf, 2020).....	9
Figura 9 - Diagrama de propagação de um feixe Gaussiano .....	10
Figura 10 - Perfil de irradiação de um feixe Gaussiano (Chapman, 2022).....	12
Figura 11 - Representação 3D do perfil de irradiação (Siegman, 1998) .....	13
Figura 12 - Soldadura contínua e soldadura com laser pulsado à esquerda e direita respetivamente (Carl Magnus, 2012).....	14
Figura 13 - Interface de modulação de pulsos na TruDisk 6602 (TRUMPF, 2009). .....	15
Figura 14 - Soldadura por condução, mista e keyhole à esquerda, centro e direita respetivamente (Katayama, 2013).....	16
Figura 15 - Formação de plasma e nuvem metálica com diferentes gases protetores (Katayama, 2013).....	17
Figura 16 - Abertura do topo do keyhole com auxílio dos gases protetores (Katayama, 2013).....	19
Figura 17 - Mecanismo de formação poros (Katayama, 2013). ....	21
Figura 18 - Representação 3D de um provete soldado.....	23
Figura 19 - Detalhe do corte em guilhotina .....	24
Figura 20 – Detalhe do corte por laser .....	24
Figura 21 - Representação 3D de um provete maquinado. ....	25
Figura 22 - Fluxograma do encadeamento experimental e temático.....	26
Figura 23 – Esquema do planeamento da avaliação dos parâmetros de soldadura com laser contínuo.....	27
Figura 24 - Planeamento para a avaliação dos parâmetros de soldadura pulsada. ....	28
Figura 25 - Representação de um provete com linhas de corte para seccionamento.....	30

Figura 26 - Esquema da sequência de montagem. ....	31
Figura 27 – Algumas das montagens polidas. ....	31
Figura 28 - Equipamento de polimento Struers LaboPol-21.....	32
Figura 29 – Microscópio Axiotech 100 equipado com a câmara Axiocam 2008 color .....	33
Figura 30 - Preparação de um ensaio de tração.....	33
Figura 31 – Durómetro Shimadzu HMV 200 .....	34
Figura 32 Exemplo da realização de uma medição de dureza.....	34
Figura 33 - Representação das diagonais após uma medição de dureza (adaptação de Tekateki, 2022).....	35
Figura 34 - Dispositivo de fixação dos termopares desde o modelo 3D até ao estado final. ....	37
Figura 35 Fonte do feixe laser Trumpf TruDisk 6602.....	38
Figura 36 - Célula de Soldadura TruLaser Robot 5020.....	39
Figura 37 Robot e mesa central de fixação. ....	40
Figura 38 Mesa rotativa de fixação.....	40
Figura 39 - Robot com ótica de focagem.....	41
Figura 40 - Ótica de focagem aquando da programação da trajetória. ....	41
Figura 41 - Variação do raio do feixe laser segundo o eixo z.....	41
Figura 42 - Modelo 3D do gabari de fixação.....	43
Figura 43 - Topo móvel do gabari.....	43
Figura 44 – Vista superior de um cordão de soldadura com a depressão visível no final do cordão .....	45
Figura 45 – Medições de temperatura para soldadura com laser contínuo (superior) e pulsado (inferior). ....	46
Figura 46 - Medições de temperatura para soldadura de laser pulsado com 3000 W de potência de pico. ....	47
Figura 47 – Distribuição de temperaturas para $t=0,8s$ (esquerda) e $t=1,2s$ (direita).....	48
Figura 48 - Ciclo térmico para 8, 13 e 18 mm, segundo o modelo 2D (preenchido) e 3D (sem preenchimento) de Rosenthal.....	49
Figura 49 - Provetes das amostras 5 a 1, da esquerda para a direita respetivamente, utilizados nos ensaios de tração.....	50
Figura 50 - Superfície inferior das amostras 3 a 5 da esquerda para a direita respetivamente.....	50
Figura 51 – Faces superiores, a e c, e inferiores, b e d, das amostras 1 e 2 respetivamente.....	51
Figura 52 – Gráfico relativo à tensão de cedência e tensão última em função da potência (W), das amostras 1 a 5, com desvio padrão. ....	52

Figura 53 – Cordões de soldadura com laser contínuo com potência de 200, 400, 600, 800, 1000 e 1400W da esquerda para a direita. ....	52
Figura 54 – Perfil transversal do cordão da amostra 1, a), e gráfico vetorial representativo das correntes metálicas no interior do cordão, b) (Schäfer, 2018). ....	53
Figura 55 - Perfil da poça de fusão de cordão de soldadura para 2,4 e 2,7 e 2,7 kW com perfil de radiação uniforme, I a III respetivamente (Schäfer, 2018). ....	54
Figura 56 -D defeitos detetados no perfil longitudinal da amostra 1.....	55
Figura 57 – Perfil transversal do cordão da amostra 2.....	55
Figura 58 – Perfis transversais das amostras 3, 4 e 5 da esquerda para a direita. ....	56
Figura 59 – Evolução da largura da ZTA no seu ponto mais largo.....	56
Figura 60 – Amostras 9 a 6 e A a D da esquerda para a direita respetivamente. ....	57
Figura 61 – Superfície inferior de provetes das amostras 6 a A.....	58
Figura 62 – Superfícies superior e inferior dos cordões da amostra B e C. ....	58
Figura 63 – Superfície superior e inferior do cordão de soldadura da amostra D.....	58
Figura 64 - Tensão de cedência e última para os provetes 6 a A, em função da altura de foco. ....	59
Figura 65 - Perfis transversais do cordão das amostras 6 e 7. ....	60
Figura 66 - Perfis transversais do cordão das amostras 8 e 9. ....	60
Figura 67 – Perfil longitudinal do cordão de soldadura da amostra 7.....	60
Figura 68 - Perfis transversais dos cordões das amostras A e B.....	61
Figura 69 – Perfis transversais dos cordões das amostras C e D.....	61
Figura 70 - Variação da largura da ZTA para as amostras 6 a D.....	62
Figura 71 – Superfície superior do cordão das amostras N, O e P da esquerda para direita respetivamente. ....	63
Figura 72 – Provetes submetidos aos ensaios de tração para as amostras N, O e P.....	63
Figura 73 – Perfis transversais do cordão de soldadura das amostras N e O.....	64
Figura 74 – Perfil longitudinal do cordão da amostra O. ....	64
Figura 75 – Perfil longitudinal do cordão da amostra N. ....	65
Figura 76 – Perfis transversal e longitudinais do cordão da amostra P.....	65
Figura 77 – Tensões de cedência e última para os provetes das amostras N, O e P, em função da frequência.....	66
Figura 78 - Esquema utilizado para determinar uma equação para o valor de sobreposição (esquerda), comparado ao esquema simplificado usado anteriormente (direita).....	67
Figura 79 - Superfícies superiores e inferiores, acima e em baixo, das amostras E, F e G, respetivamente.....	68

Figura 80 – Modo de rutura nos provetes da amostra E.....	69
Figura 81 – Superfície inferior do cordão da amostra H.....	69
Figura 82 – Superfície superior das amostras H, I e J, da esquerda para a direita respetivamente.....	69
Figura 83 – Superfície superior, acima, e inferior, em baixo, dos cordões das amostras K, L e M, da esquerda para a direita respetivamente.....	70
Figura 84 – Perfil transversal do cordão da amostra E.....	70
Figura 85 – Perfil longitudinal do cordão da amostra E.....	71
Figura 86 – Perfis transversais dos cordões das amostras F e G da esquerda para a direita respetivamente.....	71
Figura 87 – Perfil transversal do cordão da amostra H.....	72
Figura 88 – Perfis transversais do cordão das amostras I e J da esquerda para a direita respetivamente.....	72
Figura 89 – Perfil transversal do cordão da amostra K.....	73
Figura 90 – Perfil transversal do cordão de soldadura da amostra L.....	74
Figura 91 – Perfil transversal do cordão de soldadura da amostra M.....	74
Figura 92 – Evolução da largura da ZTA das amostras E a M no seu ponto mais largo.....	75
Figura 93 – Tensão de cedência e máxima, em função da potência e duração do pulso, para as amostras E a M.....	75
Figura 94 – Detalhe das gotículas depositadas e respingado para a soldadura por laser pulsado com altura focal negativa e potência de pico de 3000 W.....	76
Figura 95 - Alguns dos ensaios de soldadura realizados.....	76
Figura 96 – Provetes das amostras Q, R e S submetidos a ensaio de tração.....	77
Figura 97 – Superfície superior do cordão das amostras Q, R e S da esquerda para a direita respetivamente.....	77
Figura 98 – Perfil transversal do cordão da amostra Q.....	78
Figura 99 – Perfil longitudinal do cordão da amostra R.....	78
Figura 100 – Perfil transversal do cordão da amostra R.....	79
Figura 101 – Perfil longitudinal do cordão da amostra R.....	79
Figura 102 – Perfil transversal do cordão da amostra S.....	79
Figura 103 – Perfil longitudinal do cordão da amostra S.....	80
Figura 104 – Tensões de cedência e última das amostras Q, R e S.....	80
Figura 105 – Evolução da largura da ZTA para as amostras Q, R e S.....	80
Figura 106 – Perfil de dureza Vickers para as amostras D e G.....	81
Figura 107 – Perfil tridimensional de dureza Vickers nas amostras D e G.....	82

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Equipamentos laser e principais características.....	6
Tabela 2 – Composição química e propriedades mecânicas da liga de aço S235 JR. Valores em [%].....	23
Tabela 3 – Tabela de correspondência das amostras 1 a 5.....	49
Tabela 4 – Correspondência das amostras 6 a 9 e A a D à parametrização. ....	57
Tabela 5 – Tabela de correspondência de parametrização das amostras N, O e P.....	62
Tabela 6 – Tabela de correspondência da parametrização às amostras E a M. ....	68
Tabela 7 – Correspondência entre a parametrização e as amostras Q, R e S.....	76



## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>AWS</b>	<i>American Welding Society</i>
<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Design</i>
<b>CAM</b>	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
<b>CNC</b>	Controle Numérico por Computador
<b>CW</b>	<i>Continuous Welding</i>
<b>EN</b>	<i>European Standards</i>
<b>ESTGV</b>	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
<b>FWHM</b>	<i>Full Width at Half Maximum</i>
<b>HRL</b>	<i>Hughes Research Laboratories</i>
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>LASER</b>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i>
<b>LLK</b>	<i>Laserlichtkabel</i>
<b>MAG</b>	<i>Metal Active Gas</i>
<b>MIG</b>	<i>Metal Inert Gas</i>
<b>Nd:YAG</b>	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet</i>
<b>PID</b>	Proporcional-Integral-Derivativo
<b>PVC</b>	Policloreto de Polivinila
<b>PW</b>	<i>Pulsed Welding</i>
<b>SI</b>	<i>Système International</i>
<b>TIG</b>	<i>Tungsten Inert Gas</i>
<b>ZTA</b>	Zona Termicamente Afetada



## **SIMBOLOGIA**

$\alpha$  – Difusidade térmica

$A$  – Área

$B$  – Diâmetro do feixe laser na cintura

$b$  – Profundidade focal

$C_p$  – Calor específico

$c$  – Velocidade da luz

$c_{v\u00e1cuo}$  – Velocidade da luz no vácuo

$D_E$  – Densidade energética

$D_Z$  – Altura de foco

$d$  – Comprimento da diagonal

$d_k$  – Diâmetro do cabo de fibra ótica

$E$  – Amplitude do campo elétrico

$F$  – Força

$f$  – Frequência

$f_c$  – Distância de colimação

$f_f$  – Distância Focal

$I$  – Intensidade ou irradiância

$I_0$  – Intensidade ou irradiância no centro do feixe na cintura

$K_0$  – Função modificada de Bessel

$k$  – Condutividade térmica

$L$  – Comprimento da cavidade de ressonância

$\Delta l$  – Variação de comprimento

$M^2$  – Fator de propagação do feixe

$n$  – Índice de refração

$n_n$  – Número de nós

$\eta$  – Impedância característica

$\theta$  – Divergência do feixe

$t_p$  – Duração do pulso

$\rho$  – Densidade

$Q$  – Energia transferida para a peça

$T_0$  – Temperatura inicial

$T$  – Período\*

$T$  – Temperatura\*

$T_p$  – Temperatura de pico (Máxima)

$T_c$  – Temperatura crítica (Temperatura de transição de fase)

$t$  – Tempo

$t_{sh}$  – Espessura da chapa

$t_p$  – Duração do pulso

$t_b$  – Duração do intervalo entre pulsos, tempo de base

$\tau$  – Espessura relativa

$v_s$  – Velocidade de soldadura

$\bar{x}$  – Centroide segundo  $x$

$P$  – Potência do feixe laser

$P_p$  – Potência de pico

$P_m$  – Potência média

$\omega_0$  – Raio do feixe laser na cintura do feixe

$\omega_R$  – Raio do feixe para a distância de Rayleigh

$\omega_{(z)}$  – Raio do feixe laser segundo o eixo de propagação  $z$

$r$  – Distância radial até ao centro do feixe

$r_0$  – Distância do ponto à origem

$\lambda$  – Comprimento de onda

$Z_R$  – Distância de Rayleigh

\* A temperatura e o período são designados pela letra  $T$  pelo facto desta notação ser a mais comum e reconhecível na literatura científica. Como são utilizados em contextos distintos e nunca em simultâneo, não foi feita a distinção entre o símbolo de ambas as grandezas.

## 1. Introdução

A soldadura desempenha um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico e em aplicações industriais, devido à necessidade de unir materiais através da fusão e às características que as ligações deste tipo apresentam. A qualidade de uma ligação soldada é inteiramente dependente do processo selecionado e dos parâmetros utilizados em função das propriedades dos materiais a unir. A soldadura laser, sendo um desenvolvimento recente na área das ligações permanentes, apresenta um promissor campo de estudo, em particular no que diz respeito à área da parametrização devido à quantidade de fatores que estão envolvidos. Como tal, é essencial desenvolver a percepção entre as variáveis envolvidas num processo de soldadura e o seu impacto na qualidade do componente final.

Esta tese tem como objetivo central, a avaliação dos efeitos da variação de parâmetros e a modalidade de soldadura por meio de laser nas propriedades das juntas. Este estudo vai revolver, em particular, em torno de parâmetros tais como: a potência de soldadura, altura focal, potência de pico, frequência, potência média e a relação de duração de pulso/período. A avaliação dos resultados será realizada em termos de aparência, qualidade do cordão de soldadura, resistência mecânica, medições de dureza e temperatura. Estes, por sua vez, irão fundamentar a seleção de combinações de parâmetros ideais para a soldadura laser.

Espera-se que as conclusões deste estudo contribuam para o entendimento deste processo e proporcionem indicadores para a sua aplicação prática e elementos para pesquisa futura. Pretende-se que os resultados auxiliem a seleção de parâmetros e otimização do processo de soldadura ao se refletirem numa melhoria da qualidade dos produtos e uma redução de custos de produção.

A empresa onde foi realizada a componente experimental deste trabalho dedica-se à construção de componentes metálicos. Tem ao seu dispor vários equipamentos de corte, quinagem, soldadura e acabamento que lhes permitem ajustar o desenho dos produtos, processar as matérias-primas e entregar equipamentos acabados ao consumidor final.

Uma percentagem significativa do seu volume de negócios consiste na produção de equipamentos constituídos por chapas com espessuras inferiores a 4 mm. Ainda que tenham ao seu dispor métodos convencionais de soldadura como o TIG e MIG/MAG estes, por norma, não são os mais adequados à soldadura de chapas finas. Para tal efeito recorrem à utilização da soldadura laser robotizada, que lhes permite obter uma qualidade de soldadura elevada com uma elevada cadência de produção mantendo a flexibilidade de poder ajustar projetos existentes ou recorrer à criação de novos que se adequem às necessidades dos seus clientes.

Na tentativa de explorar opções de melhoria no processo de soldadura foi-me concedida a oportunidade de desenvolver este estudo em parceria com esta empresa. A componente laboratorial foi desenvolvida recorrendo aos equipamentos disponíveis na ESTGV.

### 1.1. Fundamentos dos Lasers

No decurso do presente trabalho, por uma razão de simplicidade e familiaridade, vai-se fazer uso do termo laser, derivado do acrónimo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para fazer referência aos equipamentos e ao feixe de radiação, por ser mais comum na documentação técnica e de mais fácil compreensão.

O principal fator distintivo dos diferentes tipos de equipamentos laser é o meio ativo. Este é o componente responsável pela amplificação ótica, vulgarmente referido como ganho ótico. O ganho ótico é explicado por um fenómeno denominado de emissão estimulada. Neste processo, fótons interagem com eletrões em estados excitados que provocam a libertação de energia ao emitir novos fótons resultantes do decaimento dos eletrões para um nível de energia mais baixo. O diagrama da figura 1 faz uma representação gráfica simplificada deste fenómeno (Fain & Milonni, 1987; Maiman, 1960; Siegman, Anthony E., 1986).

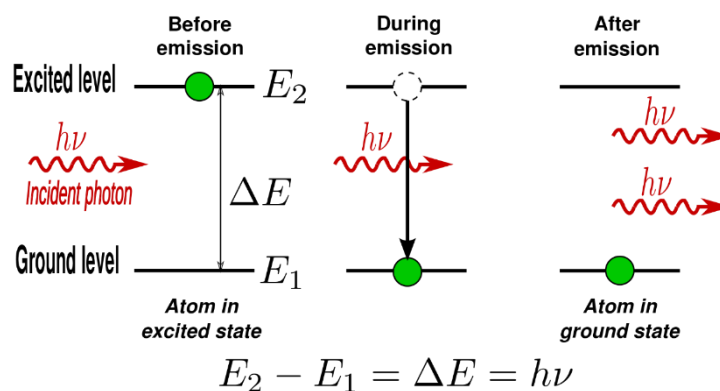


Figura 1 - Diagrama representativo da emissão estimulada (Vladislav, 2008).

O fenómeno de emissão estimulada foi teorizado no livro “*Zur Quantentheorie der Strahlung*” de Einstein escrito em 1917, e serviu de fundamento para o desenvolvimento dos primeiros dispositivos laser (Amorim, 2016). O primeiro laser funcional foi desenvolvido por Theodore H. Maiman nos laboratórios HRL em maio de 1960 e utilizava um cristal de rubi sintético bombeado por uma lâmpada de arco elétrico (Maiman, 1960).

Na emissão estimulada, a energia do fóton incidente tem de ser igual à energia de excitação, isto verifica-se porque o fóton incidente é também ele resultante do decaimento ao nível de energia de equilíbrio dos átomos, moléculas, iões ou semicondutores circundantes. Deste modo é possível formar uma reação em cadeia análoga àquela que, por exemplo, se verifica na fissão de Urânio 235 (Siegman, Anthony E., 1986). No entanto, para assegurar este encadeamento é necessário que uma determinada razão, dependendo do material, da população do meio ativo esteja num estado energético superior ao estado fundamental. Se isto não se verificar, os fótons emitidos por emissão estimulada serão simplesmente absorvidos, o que irá interromper a cadeia e não se verificará o ganho ótico necessário. Quando esta situação se verifica, o sistema apresenta uma inversão de população (Svelto, 2010). O gráfico da figura 2 ilustra esta dicotomia. As barras a cinzento representam a distribuição da totalidade da população num determinado meio ativo em funcionamento. A emissão de fótons é resultado do decaimento de estado de energia dos átomos e como tal está representado pela seta entre as duas barras uma vez que a emissão de um fóton resulta na diminuição da população num estado excitado e vice-versa. Nos sistemas naturais é comum que a

maior parte de uma determinada população se encontre num estado baixo de energia e como tal qualquer caso contrário pode ser definido como inversão de população. No gráfico abaixo isto é evidenciado pela linha tracejada com declive positivo. Nas figuras 1 e 2 este princípio encontra-se explicado de modo simplificado, na realidade, existem vários patamares de energia estáveis nos quais os átomos se podem encontrar e nem todos resultam na emissão de radiação no espectro desejado. Tais propriedades vão ter influência na eficiência e na propagação de calor num determinado meio ativo.

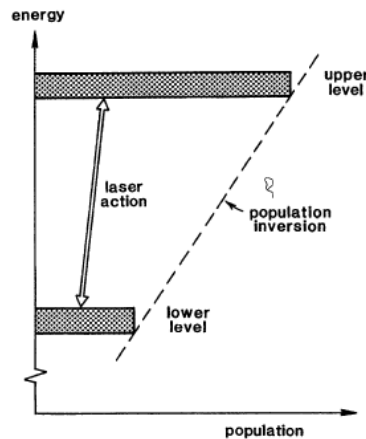


Figura 2 - Gráfico da dispersão da população exemplificativo de uma inversão (Siegman, Anthony E., 1986).

De modo a conseguir a inversão de população é necessário excitar o meio ativo, o processo utilizado para conseguir isto é denominado de bombeamento laser ou *laser pumping*. Este processo consiste na transferência de energia a partir de uma fonte externa ao meio e depende do modo de funcionamento que se pretende obter, do tipo de meio utilizado e do comprimento de onda do feixe. Os métodos mais comuns de bombeamento de energia normalmente recorrem à corrente elétrica ou radiação. No entanto existem mais processos que demonstraram a capacidade de bombear energia de modo eficaz (Siegman, Anthony E., 1986):

- Descargas elétricas em gases, operadas por corrente contínua, frequências rádio e pulsos. Alguns exemplos são descargas elétricas incandescentes que formam plasma, lâmpadas de cátodo oco e descargas de arco.
- Bombeamento elétrico direto através de feixes de eletrões de elevada diferença de potencial dirigidos a células de gás a alta pressão e injeção de corrente elétrica em lasers de semicondutores de injeção.
- Bombeamento ótico, utilizando lâmpadas de arco elétrico, lâmpadas de arco, lâmpadas de tungsténio, LEDs, explosões ou fios explosivos, outros lasers, combustão de gás e até mesmo luz solar.
- Reações químicas como fotólise por flash. Estes podem atingir várias centenas de kW de *output* contínuo de laser.
- Bombeamento nuclear de gases por fragmentos de fissão nuclear.
- Expansão supersónica de gases normalmente pré aquecidos por reações químicas ou descargas elétricas através de bocais de expansão supersónica, criando lasers dinâmicos de gás.

- Bombeamento de plasma em plasmas densos e quentes, criado por estrangulamento do plasma causado por pulsos de lasers de alta potência ou pulsos elétricos.

### 1.1.1. Cavidade Ótica Ressonante

Um meio ativo com bombeamento suficiente para assegurar uma inversão de população por si só não é capaz de produzir um feixe de radiação característico dos equipamentos laser, é necessário garantir que a radiação emitida tenha o mesmo comprimento de onda e direção. Sem a existência da cavidade ressonante a radiação sairia do meio ativo em todas as direções e não seria monocromática. Na física esta radiação pode se caracterizar como sendo incoerente e aquela que partilha de uma direção e comprimento de onda idênticas como coerente, figura 3, (Halliday et al., 2005).

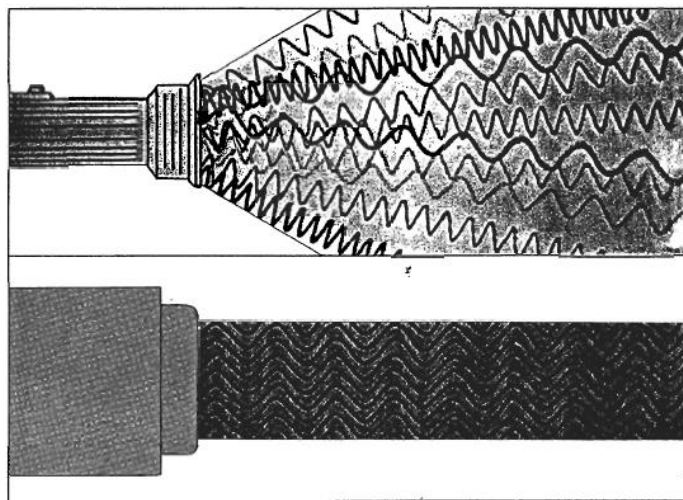


Figura 3 - Imagem ilustrativa da distinção entre luz coerente, em baixo, e luz incoerente, em cima (Siegman, Anthony E., 1986).

A cavidade ressonante consiste essencialmente em duas superfícies espelhadas sendo que uma delas não reflete a totalidade da radiação para permitir a saída do feixe laser, ou seja, é parcialmente permeável. Tendo por base um exemplo de dois espelhos perfeitamente paralelos, resulta que a reflexão da radiação perpendicular a estes é mantida dentro do meio ao invés de ser refletida para o exterior. Para além disso, as cavidades têm a função de definir a frequência da radiação emitida. Embora o tipo de meio imponha restrições no espectro eletromagnético, o que ultimamente define o comprimento de onda é o comprimento desta cavidade segundo a seguinte relação (Halliday et al., 2005):

$$f = \frac{n_n * c}{2L} \quad Eq. 1$$

Na equação acima,  $f$  representa a frequência da radiação pretendida,  $L$  representa o comprimento da cavidade de ressonância,  $c$  é a velocidade que neste caso é a velocidade da luz através do meio em questão e por último  $n_n$  que é a quantidade de nós na onda estacionária. Sendo definidos como “nós” todos os pontos nos quais a sobreposição de ondas eletromagnéticas resulte num valor estacionário. A existência de uma onda estacionária está implícita na denominação de cavidade ótica de ressonância,

pois o princípio de funcionamento desta é o de interferência construtiva de ondas. Completando o ciclo teórico, a onda estacionária copulada ao fenômeno de emissão estimulada previamente mencionado resulta na amplificação da radiação, de natureza coerente.

### 1.1.2. Absorção da Radiação

Para que se dê a soldadura é necessário que a radiação do feixe laser seja absorvida pelos metais a soldar. O valor da absorção, ou a razão de energia absorvida pelo material, varia sobretudo de acordo com o coeficiente de absorção do material em relação ao comprimento de onda da radiação. No entanto este valor pode variar dependendo do acabamento de superfície das peças, da constituição das mesmas e da temperatura.

Como o comprimento de onda depende da seleção do tipo de meio e cavidade ressonante, a seleção do equipamento deve ser feita em função dos materiais a soldar.

A partir da figura 4, que representa graficamente a variação do coeficiente de absorção dos principais metais de acordo com o comprimento de onda, pode-se concluir que a absorção depende do comprimento de onda da radiação. Isto deve-se em parte ao facto da dispersão ser inversamente proporcional ao comprimento de onda (Trindade, 2020). Na figura encontram-se duas linhas verticais que marcam o comprimento de onda dos lasers Nd:YAG e de CO<sub>2</sub>, a maior eficiência do Nd:YAG em utilizações com os metais mais comuns na indústria é responsável pela predominância deste tipo de equipamento. Os equipamentos Nd:YAG tradicionais são caracterizados por uma reduzida eficiência elétrica de, da ordem de 4%, que relaciona a potência elétrica do equipamento com a potência do feixe, enquanto que os laser de disco podem operar com uma eficiência energética de 25-30% (Katayama, 2013).

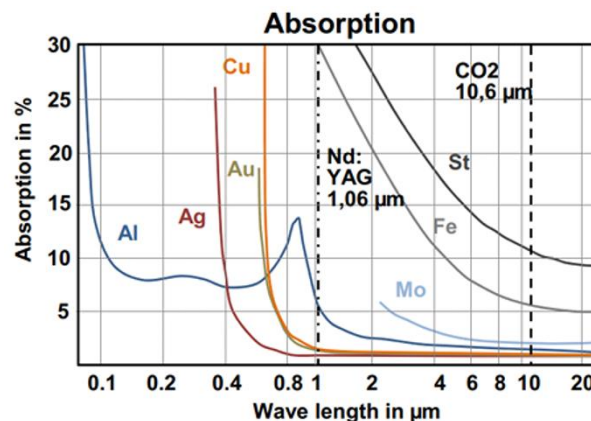


Figura 4- Representação gráfica da variação da absorção da radiação de acordo com o comprimento de onda (Trindade, 2020).

## 1.2. Tipos de Laser Utilizados na Soldadura

### 1.2. Tipos de Laser Utilizados na Soldadura

Na tabela 1, encontram-se descritos os principais tipos de laser com aplicações industriais bem como algumas das suas principais características.

*Tabela 1 - Tipos de equipamentos laser e principais características*

Tipo de Laser	Características do Laser
Laser CO <sub>2</sub>	Comprimento de onda: 10,6 μm - Infravermelho longo Meio do Laser: Mistura gasosa de CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He Potência Média (Potência Máxima) [CW]: 1-15 kW (50 kW)
Laser YAG bombardeado por lâmpada	Comprimento de onda: 1,06 μm - Infravermelho curto Meio do Laser: Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (sólido) Potência Média (Potência Máxima) [CW]: 50 W-7 kW (10 kW)
Díodo Laser	Comprimento de onda: 0,8-1,1 μm - Infravermelho curto Meio do Laser: InGaAsP (sólido) Potência Média (Potência Máxima) [CW]: 10 kW (15 kW)
Laser estado sólido bombardeado por díodo	Comprimento de onda: 1 μm - Infravermelho curto Meio do Laser: Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (sólido), etc. Potência Média [CW]: 13,5 kW Potência Média [PW]: 6 kW
Laser de Disco	Comprimento de onda: 1,03 μm - Infravermelho curto Meio do Laser: Yb <sup>3+</sup> :YAG ou YVO <sub>4</sub> (sólido), etc. Potência Média [CW]: 16 kW
Laser de Fibra	Comprimento de onda: 1,07 μm - Infravermelho curto Meio do Laser: Yb <sup>3+</sup> :SiO <sub>2</sub> (sólido), etc. Potência Média [CW]: 100 kW

### 1.2.1. Lasers de Disco

O laser de disco é, atualmente, o mais utilizado em soldadura de metais. Antes do aparecimento dos primeiros equipamentos laser de disco, em 2003, o mercado dos lasers com meio ativo sólido era dominado pelo uso de monocristais cilíndricos. Esta forma devido à sua baixa razão de área de superfície para o volume significa que a temperatura demonstra um perfil parabólico com o ponto mais quente situado no centro do cilindro, pois a transferência de calor para o exterior é realizada a partir da área exterior do meio, o que limita a potência do laser e a qualidade do feixe (Löffler, 2013). A principal inovação do laser de disco, é a colocação de uma lâmina fina como meio ativo acoplada a permutadores que realizam a dissipação eficaz do calor, o que permite um aumento da potência do equipamento. Dada a espessura reduzida da lâmina de meio ativo, cerca de 0,2 mm, o feixe de radiação de bombeamento não é totalmente absorvido em apenas uma passagem pelo meio, assim, é refletido com o auxílio de um espelho na interface do meio ativo e do dissipador atravessando-o várias vezes. Como a dissipação de calor é realizada maioritariamente com direção axial, representado na figura 5, isto significa que o perfil de temperatura é constante através do diâmetro do disco, o que implica um feixe com uma qualidade superior, quando comparado a lasers que utilizam monocristais cilíndricos devido à expansão térmica equivalente por todo o meio ativo, que evita a criação de distorções no feixe laser (Löffler, 2013; TRUMPF, 2009).

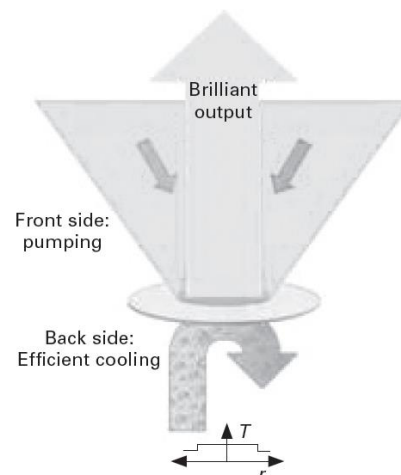


Figura 5 - Diagrama do funcionamento dos lasers de disco com gráfico de distribuição de temperatura (Katayama, 2013).

Os lasers de disco são, por norma, excitados com recurso a um laser de díodo, que são mais eficientes quando comparados a outros métodos de bombeamento.

Para aplicações que necessitem de potências mais elevadas é possível acoplar várias cavidades recorrendo a apenas um laser de bombeamento ao refleti-lo entre cavidades com recurso a espelhos que conectam as cavidades opticamente, figura 6 (Löffler, 2013).

### 1.3. Focagem

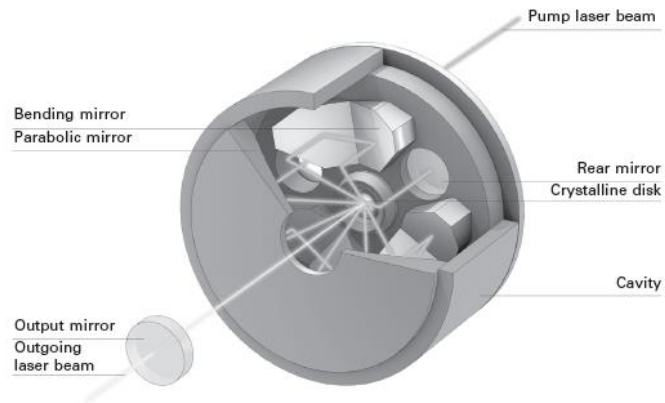


Figura 6 - Esquema de lasers de disco de várias cavidades copuladas (Löffler, 2013).

### 1.3. Focagem

As óticas de focagem são um dos elementos principais dos sistemas de soldadura laser, são o último elemento ótico na trajetória ótica do feixe. É no final deste sistema que se localiza o conjunto de lentes de focagem do feixe. Estas lentes são responsáveis por concentrar o feixe laser segundo os parâmetros recomendados.

A maior parte das óticas de focagem têm uma configuração com os seguintes elementos básicos, figura 7:

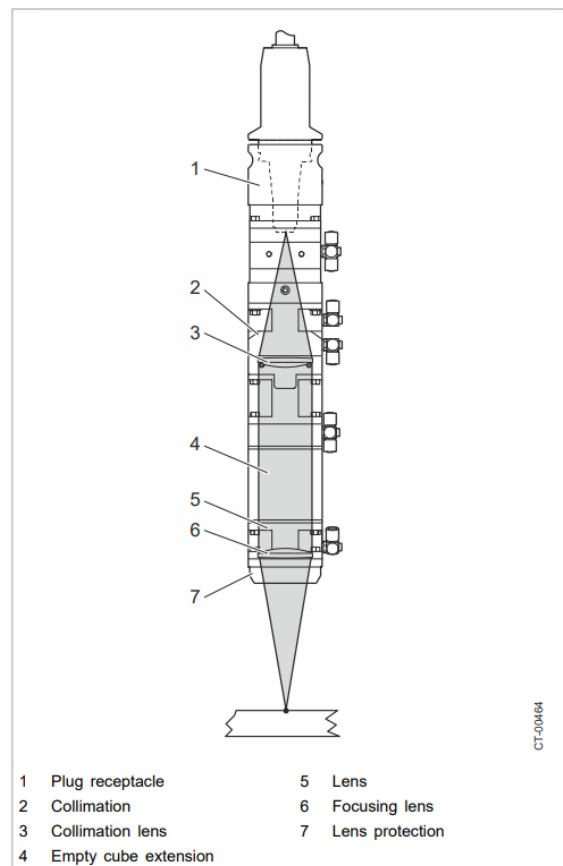


Figura 7- Configuração básica do dispositivo de focagem ótica de soldadura(Trumpf, 2020).

- Identificado com o número 3 na figura 7, está a lente do colimador. A lente biconvexa do colimador é responsável por receber os raios laser diretamente da fibra ótica e permite o seu tratamento. A colimação é responsável por melhorar as características óticas do feixe.
- A lente de focagem identificada pelo número 6, é responsável por focar o feixe colimado.

A lente ou lentes, dependendo da forma das mesmas, podem focar o feixe numa forma anelar, linear, circular de topo plano, entre outros. No entanto a forma de focagem mais comum e mais simples é num ponto, embora este seja um conceito meramente teórico. A distância focal depende da forma da lente e da distância entre a lente de focagem e lente de colimação, figura 8. A distância focal corresponde à distância entre a lente de focagem e o ponto focal.

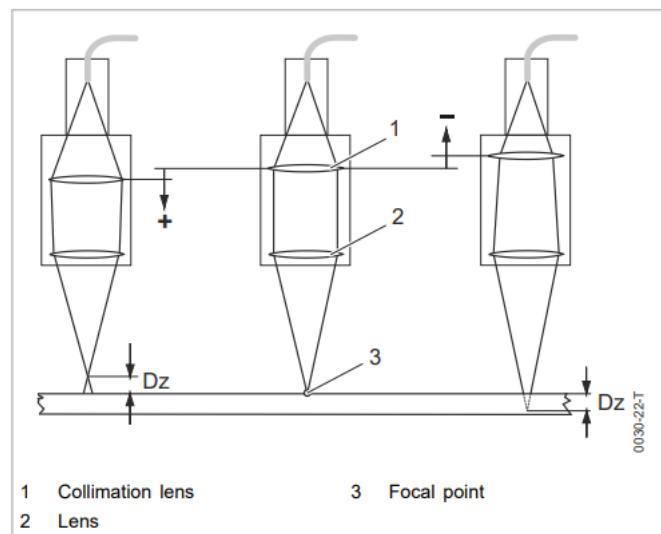


Figura 8 – Representação da variação da distância focal por meio da alteração da distância de colimação (Trumpf, 2020).

No ramo da ótica é impossível focar um feixe de radiação num único ponto devido a diversos fatores tais como:

- Aberrações óticas;
- Dispersão do feixe;
- O limite de difração;

A implicação teórica de um feixe focado num ponto infinitamente pequeno resultaria numa densidade energética infinita, o que é fisicamente impossível. Por essa razão, a radiação monocromática quando focada num “ponto” apresenta uma amplitude no eixo transversal ao feixe que pode ser dada por uma função gaussiana, figura 9. Estes feixes podem ser designados por feixes gaussianos.

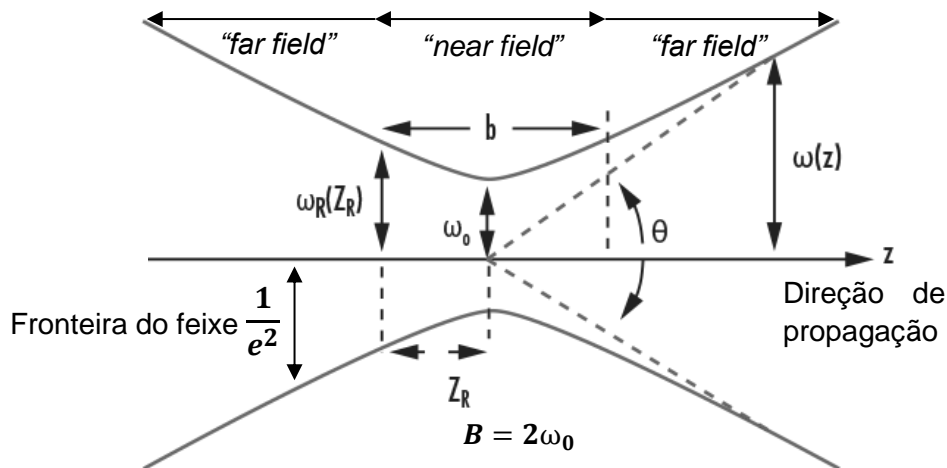


Figura 9 - Diagrama de propagação de um feixe Gaussiano

O perfil de irradiação,  $I$ , pode ser descrito a partir da seguinte equação (Edmund Optics, 2022; Mizuyama, 2016), em que  $E$ , corresponde à amplitude do campo elétrico:

$$I(r, z) = \frac{|E(r, z)|^2}{2\eta} = I_0 \left( \frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 e^{\left( \frac{-2r^2}{\omega(z)^2} \right)} \quad \text{Eq. 2}$$

O perfil de irradiação,  $I_0$ , na cintura do feixe pode ser obtido da seguinte forma:

$$I_0 = \frac{2P}{\pi\omega_0^2} \quad \text{Eq. 3}$$

A distância de Rayleigh ( $Z_R$ ) é definida como aquela, segundo o eixo  $z$ , na qual a área de secção do feixe é o dobro da área de secção na cintura do feixe. O valor mínimo do diâmetro do feixe,  $B = 2\omega_0$ , é um dos indicadores da qualidade do feixe (Siegman, 1998).

O valor da distância de Rayleigh é dado pela seguinte equação:

$$Z_R = \frac{\pi\omega_0^2 n}{\lambda} \quad \text{Eq. 4}$$

O valor de  $n$ , o índice de refração, depende da relação entre a velocidade da luz no vácuo e no meio em análise:

$$n = \frac{c}{c_{\text{vácuo}}} \quad \text{Eq. 5}$$

O cálculo do raio do feixe para valores de  $z$  maiores do que a distância de Rayleigh, *far field*, pode ser definido com precisão segundo o ângulo de dispersão ( $\theta$ ) uma vez que o valor do raio varia de forma proporcional ao aumento do valor de  $z$ . O valor do ângulo de dispersão entre o eixo  $z$  e a fronteira do feixe é determinado através da seguinte equação:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi n \omega_0} \quad \text{Eq. 6}$$

Deste modo o raio do feixe, pode ser determinado através da aplicação das relações trigonométricas:

$$\omega(z) = z \tan(\theta) \quad Eq. 7$$

No entanto, a equação acima não é válida para valores de  $z$  inferiores ao valor da distância de Rayleigh, *near field*. O valor do raio do feixe pode ser determinado segundo a equação 8. Como esta é uma função hiperbólica, o raio do feixe é descrito com precisão.

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad Eq. 8$$

Substituindo  $Z_R$  pela equação 4, vem que:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi n \omega_0}\right)^2} \quad Eq. 9$$

No entanto as equações acima apenas são válidas para um feixe gaussiano ideal.

A distância focal tem um papel determinante no diâmetro do feixe ao longo do eixo de propagação. Sendo que o diâmetro mínimo do feixe é menor quanto menor for a distância focal, no entanto, tem um maior ângulo de divergência pelo que tem uma profundidade focal, definida como duas vezes a distância de Rayleigh, mais reduzida.

De modo a adaptar as equações, é utilizado o fator  $M^2$ , que é um fator adimensional, denominado por fator de propagação, este pode ser calculado da seguinte forma. Tendo em conta que o ângulo de divergência dependente do design da ótica de focagem (Siegman, 1998):

$$M^2 = \frac{\pi \omega_0 \theta}{\lambda} \quad Eq. 10$$

Deste modo, a distância de Rayleigh fica:

$$Z_R = \frac{\pi \omega_0^2 n}{M^2 \lambda} \quad Eq. 11$$

E o raio do feixe, segundo o eixo de propagação, pode ser determinado segundo a seguinte equação:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z M^2}{\pi \omega_0}\right)^2} \quad Eq. 12$$

Sendo que o ângulo de divergência é uma constante da lente de focagem. Para a ótica em questão este valor é de  $34^\circ$ , sabendo que na equação tem de ser utilizado o valor em radianos.

### 1.3. Focagem

Por convenção existem três métodos de definir o diâmetro de um feixe, uma vez que não existe um limite claro para a fronteira do feixe. Estes três métodos são:

- FWHM (*Full Width at Half Maximum*): Tal como o nome indica, este método baseia-se no valor de pico e define o diâmetro como aquele que compreende uma irradiância superior a metade do valor de pico, figura 10.
- $1/e^2$ : Apesar de parecer um valor arbitrário, este valor resulta da simplificação na equação 2, no caso de  $r=\omega(z)$ . É medido de modo semelhante à FWHM, no entanto é contabilizado o diâmetro para o qual a radiância seja superior a aproximadamente 13,5% ou  $1/e^2$ . Como é medido de modo semelhante ao FWHM e parte do perfil de distribuição gaussiano é possível relacioná-lo a este valor ao resolver a equação da irradiância para 50% do seu valor em ordem ao raio, da qual resulta:

$$2\omega(z) = \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} FWHM \approx 1,699 FWHM \quad Eq. 13$$

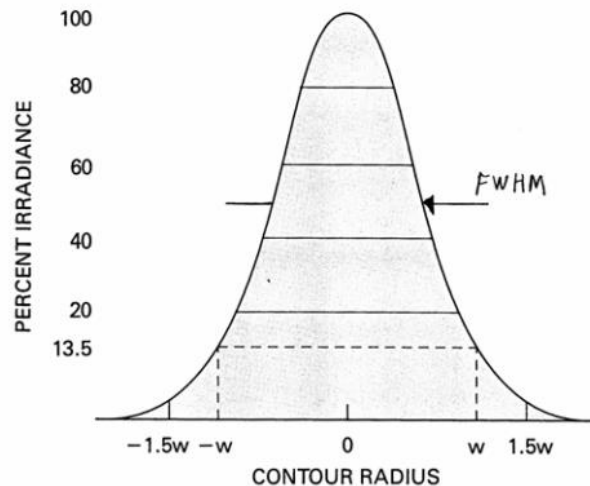


Figura 10 - Perfil de irradiação de um feixe Gaussiano (Chapman, 2022).

- $D4\sigma$  ou *Second Moment Width*: Enquanto os métodos anteriores são aplicáveis a feixes com perfis de intensidade gaussianos, este é aplicável a perfis com diversas formas e múltiplos picos. Isto é porque este método se baseia no desvio padrão da distribuição da intensidade de radiação, ou segundo momento. Desta universalidade parte a sua utilidade e é a razão pela qual foi eleito pela ISO como método normalizado de definição do diâmetro de feixes. No caso específico de feixes gaussianos ambas as definições,  $D4\sigma$  e  $1/e^2$ , resultam em valores de diâmetro idênticos.

O  $D4\sigma$  é, por norma, determinado por métodos analíticos, no qual um “*profiler*” do feixe converte os valores lidos por um sensor numa grelha com uma determinada resolução e é consequentemente calculado, figura 11.

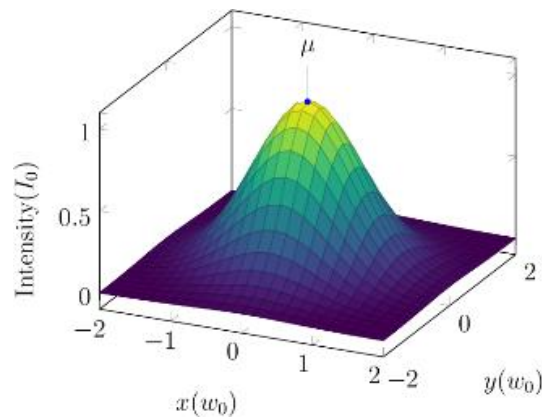


Figura 11 - Representação 3D do perfil de irradiação (Siegman, 1998)

Este valor é representado matematicamente, segundo o eixo  $x$ , da seguinte forma, tendo por base o referencial descrito na imagem acima:

$$D4\sigma = 4\sigma = 4 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y)(x - \bar{x}) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y) dx dy}} \quad \text{Eq. 14}$$

O valor de  $\bar{x}$  é o centroide do perfil de intensidade segundo o eixo  $x$ :

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y)x dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y) dx dy} \quad \text{Eq. 15}$$

#### 1.4. Caracterização da Onda de Potência

A soldadura por laser distingue-se em duas modalidades principais no que diz respeito à entrega de energia que pode ser controlada através da modulação da potência empregue. As duas modalidades são a soldadura laser com onda contínua e com onda pulsada.

A soldadura com onda contínua é caracterizada pela entrega de uma potência constante às peças a soldar. É a modalidade de soldadura que se emprega nos processos de soldadura convencionais e pode ser utilizada em modo de condução ou em modo *keyhole*.

A soldadura contínua, figura 12 no gráfico do lado esquerdo, é útil para ligações que necessitem de um cordão que atinja uma profundidade de forma consistente, para unir materiais que tenham tendência a formar fraturas resultantes da exposição a elevados gradientes de temperatura e em aplicações de elevada cadência que possam beneficiar da maior velocidade de soldadura associada a esta modalidade.

O único parâmetro intrínseco que nos é permitido alterar é a potência entregue às peças. O estabelecimento deste parâmetro está intimamente ligado à velocidade de soldadura de modo a obter uma relação de energia por unidade de comprimento que seja conducente à formação de um cordão com boas características, dependendo das peças a ligar. É de notar a influência que a condutividade térmica dos materiais desempenha na dissipação de calor e o impacto que se faz sentir na qualidade do cordão de soldadura, pelo que se espera que a entrega térmica, ou energia de soldadura, ideal não

## 1.4. Caracterização da Onda de Potência

assuma um valor constante no espectro de velocidades de soldadura (X. G. Cui et al., 2018).

A soldadura com laser pulsado é caracterizada pela modulação da onda correspondente à entrega de potência em relação ao tempo, isto é, a entrega de energia não é realizada de modo constante, gráfico direito da figura 12.

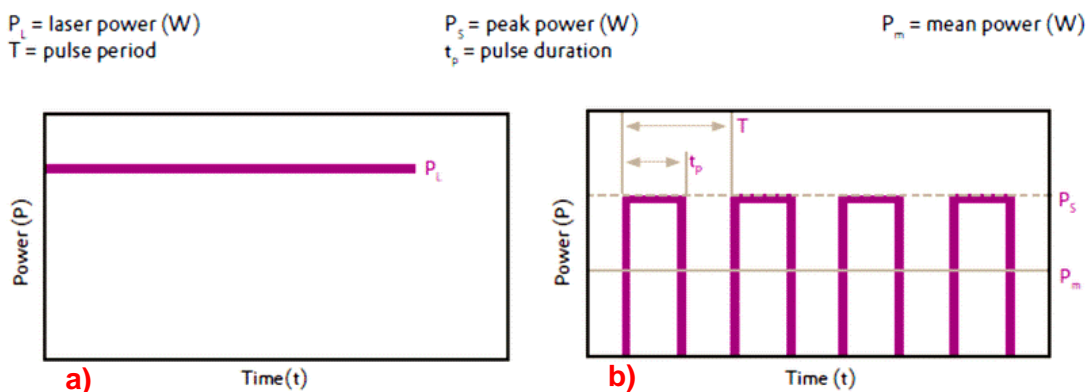


Figura 12 - Soldadura contínua, (a), e soldadura com laser pulsado, (b) (Carl Magnus, 2012).

Como é possível ver pelo gráfico da soldadura com laser pulsado é realizada a modulação da potência do laser de modo a formar impulsos, de curta duração com elevada potência, normalmente superior à que seria utilizada no modo de soldadura contínua, seguida de um período de potência reduzida ou nula.

Os principais parâmetros sobre os quais se tem controlo no caso específico da soldadura com laser pulsado são:

- A duração do pulso ( $t_p$ );
- A duração do intervalo entre pulsos ( $t_b$ );
- A potência de pico ( $P_p$ ).

De modo a obter um maior controlo sobre a qualidade da soldadura e aumentar a capacidade de mitigação da formação de defeitos de soldadura, existem mais opções de modelação do pulso tais como a sua subdivisão em pulsos de duração mais curta, permitindo aumentar e ou diminuir a potência gradualmente em degraus ou a aplicação de rampas no início e ou no fim do impulso, figura 13 (Katayama, 2013; Trumpf, 2009).

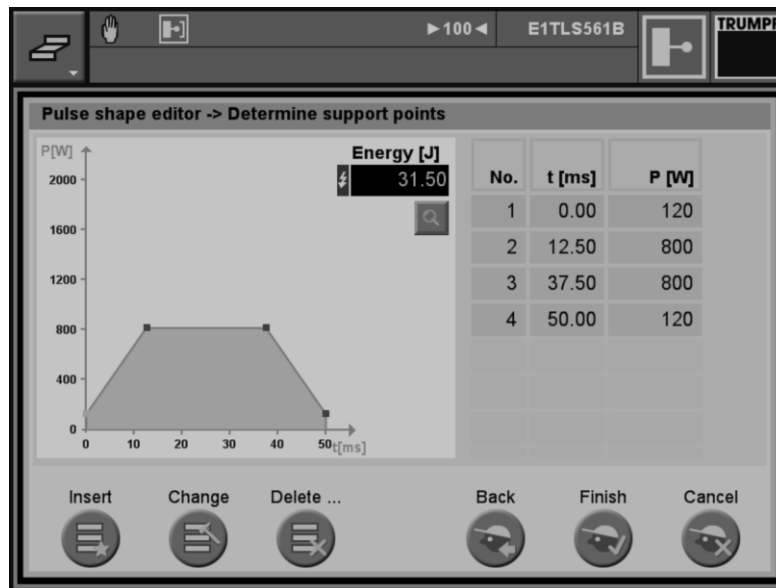


Figura 13 - Interface de modulação de pulsos na TruDisk 6602 (TRUMPF, 2009).

A principal vantagem da soldadura com laser pulsado é a possibilidade de soldar duas peças com menor introdução de calor em relação à soldadura contínua, o que resulta numa redução da zona termicamente afetada ou ZTA. Esta redução implica geralmente uma melhoria das propriedades mecânicas da peça soldada.

A redução da introdução de calor característica da soldadura com laser pulsado também permite a soldadura de peças de perfil fino, a realização de cordões em zonas de alta sensibilidade à temperatura e em metais com uma elevada refletividade (Katayama, 2013).

### 1.5. Regimes Operacionais

A soldadura laser é caracterizada por dois regimes operacionais distintos, que se distinguem pela densidade energética aplicada.

É denominada de soldadura por condução toda aquela que é realizada com uma densidade energética que não é suficiente para causar a ebulição dos metais. É um método de soldadura preciso e de controlo fácil não carecendo de uma elevada precisão no que diz respeito à focagem e é propício à formação de uma poça de fusão estável. No entanto, não é adequado à soldadura de elevada profundidade e resulta numa maior entrega de calor e consequentemente uma ZTA de maior dimensão (Katayama, 2013; Moradi et al., 2018).

O modo de soldadura mista, ou regime de transição, dá-se quando a densidade energética é suficiente para provocar uma ligeira depressão no metal fundido, mas não é suficiente para aumentar significativamente a profundidade de soldadura. Frequentemente, a soldadura neste regime é resultado de uma parametrização ineficiente ou seleção errónea dos gases de proteção, com consequente redução na eficiência da absorção que pode causar o colapso do orifício de *keyhole* transitando para este regime (Katayama, 2013).

O modo *keyhole* é caracterizado pela vaporização dos metais a ligar, a formação de vapor e plasma causa uma depressão sobre a superfície do metal fundido, devido à sua expansão, o que permite que o feixe de laser atinja uma maior profundidade. Este fenômeno é transversal ao processamento a laser de metais e é descrito como pressão de recuo ou efeito pistão (Katayama, 2013; Semak & Matsunawa, 1997). Devido às múltiplas reflexões dentro do orifício formado verifica-se uma elevada absorção da radiação pelo que se pode considerar um método de soldadura eficiente (Katayama, 2013). Na figura 14 encontram-se representados os dois regimes de soldadura e o regime de transição.

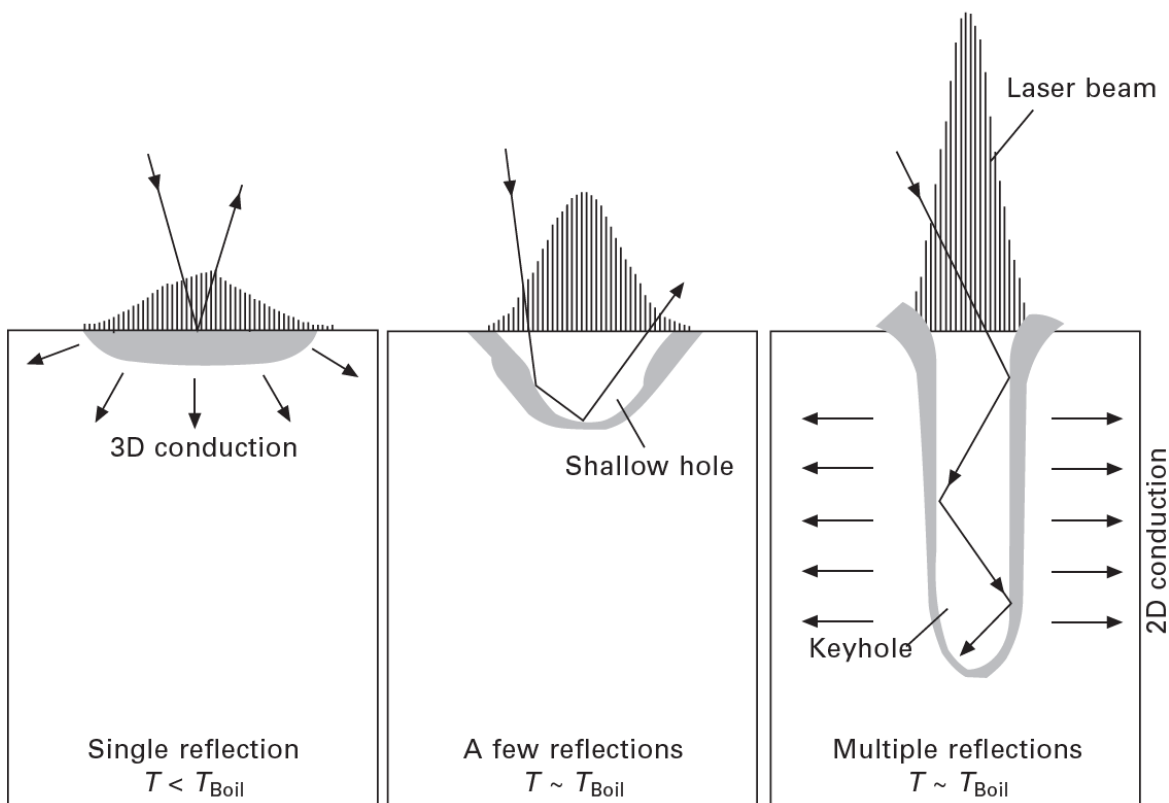


Figura 14 - Soldadura por condução, mista e keyhole à esquerda, centro e direita respetivamente (Katayama, 2013)

### 1.6. Dinâmica e Características do Cordão

No regime de soldadura *keyhole*, dependendo do comprimento de onda do feixe laser, do tipo de gás de proteção utilizado e densidade energética, pode verificar-se a formação de plasma no orifício como é possível verificar na figura 15, este absorve energia e reduz a penetração do feixe (Katayama, 2013). O plasma é formado devido ao fenômeno da radiação de travagem, ou absorção *bremstrahlung* inversa, na qual os fótons são absorvidos por elétrons durante o processo de colisão com um ião ou com outro elétron. O nível energético do elétron é elevado e, após vários eventos de absorção, a energia absorvida pelos elétrons manifesta-se no aumento da temperatura do plasma (Firouzi Farrashbandi & Eslami-Kalantari, 2020; Sharifian et al., 2017). O efeito deste fenômeno é da ordem de 100 vezes maior no caso da soldadura  $CO_2$  do que na de YAG. Por esta razão na soldadura YAG frequentemente apenas se verifica a formação de uma nuvem metálica composta de partículas metálicas (Katayama, 2013).

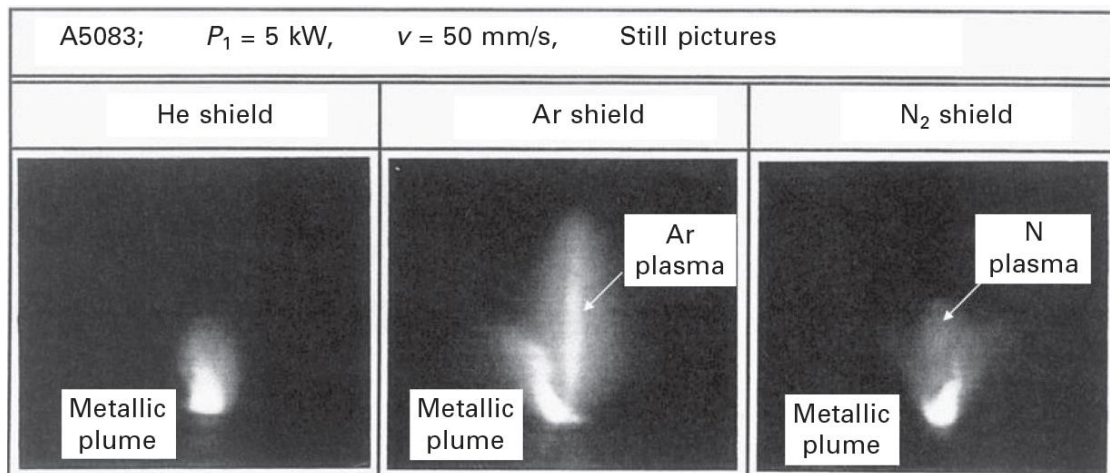


Figura 15 - Formação de plasma e nuvem metálica com diferentes gases protetores (Katayama, 2013).

### 1.7. Defeitos da Soldadura Laser

Os defeitos na soldadura por laser dependem do tipo de metais a ligar, da sua composição e dos parâmetros de soldadura tais como a utilização ou não de gases de proteção e o tipo de fixação das peças a soldar.

Os defeitos podem-se caracterizar sob duas categorias distintas (Katayama, 2013; Matsunawa et al., 1992):

- De aparência ou geometria;
- Internos ou invisíveis.

#### 1.7.1. Deformações ou Distorções

As deformações e distorções são defeitos geométricos e acontecem porque o processo de soldadura sujeita os metais a ciclos térmicos, particularmente no espetro que vai desde a temperatura de fusão dos metais até à temperatura ambiente, na maior parte dos casos. Os ciclos térmicos implicam a variação do volume devido à expansão e contração térmica e estas são responsáveis pela distorção, tensões residuais ou fraturas na soldadura.

As chapas finas, particularmente as de aços com coeficientes de expansão elevados, são suscetíveis à deformação. No entanto, a soldadura laser, devido à menor transferência de calor e cordão de perfil estreito, não deforma os metais tanto quanto outros métodos de soldadura convencionais de arco elétrico como MIG, TIG ou soldadura com elétrodo revestido (Katayama, 2013).

Os principais fatores que podem potenciar as deformações são a maior entrega térmica, a existência de uma grande quantidade de metal fundido e uma diferença entre as dimensões do topo e do fundo do cordão de soldadura. Dependendo da espessura das chapas verifica-se uma maior propensão a diferentes tipos de deformação (Silva, 2020; Weman, 2012).

Algumas das técnicas que podem mitigar a distorção são (Katayama, 2013):

- A utilização de gabari rígido para a fixação das peças;
- O arrefecimento rápido ou a têmpera do cordão de soldadura imediatamente após a solidificação do metal fundido;
- Manter a peça soldada fixa no gabari até atingir a temperatura ambiente;
- Fazer um cordão com as dimensões superiores e inferiores semelhantes com penetração total.

### 1.7.2. Acabamento Superficial

O mau acabamento de superfície é um defeito de aparência. As suas causas mais comuns são a oxidação, a deposição de partículas ultrafinas, fumos e detritos e a fixação de salpicos de solda ou “*spatter*”. A utilização adequada de gases protetores previne a formação de óxidos na zona de soldadura, figura 16. No entanto o calor pode difundir-se para a área circundante e a superfície oxida e provoca alterações na cor do metal. Seria dispendioso proteger também a superfície circundante à soldadura e a extensão de cordão recém-formado com gases de proteção ou com um fluxo suficiente de modo a eliminar completamente a formação de óxidos. Uma solução mais prática seria a soldadura num ambiente de vácuo, embora mais dispendiosa ou mesmo impraticável.

O vapor metálico, formado na zona de incidência do feixe laser, condensa e pode-se fixar na superfície circundante. A forma mais eficaz de evitar a sua fixação é a alteração do sentido de fluxo do gás de proteção ou a utilização de vários bocais de modo a ejetar as partículas fundidas e evitar a sua fixação.

A formação de vapor também é responsável pela ejeção de gotas de metal fundido da poça de fusão, isto é mais comum na soldadura em regime *keyhole*, pelas razões referidas na descrição do regime. Para evitar a ejeção destas gotas é recomendado que se utilize soldadura por condução ou com um feixe focado sob a superfície do metal. Na soldadura contínua é possível mitigar este fenómeno ao alterar a velocidade de soldadura dado que os valores de velocidade compreendidos entre 9 a 11 *m/min*, por exemplo, são conducentes à formação de jatos de metal líquido. Ao inclinar-se o laser para o sentido da soldadura, o sentido do fluxo do gás de proteção também pode auxiliar na redução da formação de salpicos pois ao abrir o orifício do *keyhole* evita a formação e o rebentamento de bolsas de gás retidas na poça de metal fundido. Na soldadura com laser pulsado, a maneira mais eficaz de mitigar a formação de salpicos é a modulação da curva de potência de modo a atingir o pico de potência gradualmente, assim, permitir a evacuação de bolsas de gás. Em ambos os casos, é recomendada a realização da soldadura num ambiente de vácuo (Bordatchev et al., 2014; Katayama, 2013).

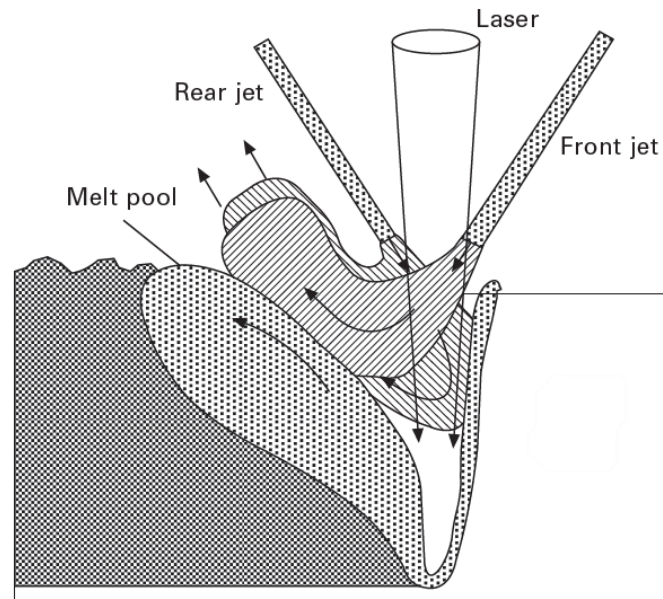


Figura 16 - Abertura do topo do keyhole com auxílio dos gases protetores (Katayama, 2013).

### 1.7.3. Mordeduras ou “Undercutting”

As mordeduras são caracterizadas pela existência de sulcos num ou em ambos os lados de um cordão de soldadura. Aqui a velocidade de soldadura também desempenha um papel decisivo no modo de soldadura *keyhole*. Entre as velocidades de 12 e 19  $m/min$ , para um determinado conjunto de parâmetros, verifica-se uma redução de penetração quando em comparação a velocidades de soldadura inferiores, em contrapartida verifica-se um aumento da velocidade de fluxo do metal líquido em torno do orifício. Para além disso, o aumento da velocidade causa uma inclinação do orifício do *keyhole* no sentido contrário ao sentido de soldadura, o que aumenta a velocidade do fluxo de metal fundido segundo a parede frontal do orifício. Este fluxo central, quando combinado com os fluxos laterais, causam uma elevação do metal no centro do cordão e com base na conservação de volume resulta na formação sulcos em ambos os lados do cordão.

Dependendo do acabamento da junta, poderá ser necessário o emprego de metal de adição de maneira a preencher o volume em falta para que não se forme uma depressão no cordão relativamente à superfície das peças. A soldadura de metais revestidos com zinco também é propensa à existência de depressões devido à formação de salpicos e conseqüente ejeção de metal, resultante da evaporação do zinco.

Na execução de cordões largos, a própria tensão de superfície do metal é capaz de formar estes sulcos. Se se tratar de uma superfície vertical isto pode-se dever simplesmente à ação da gravidade (Katayama, 2013).

### 1.7.4. Protuberâncias

Pelos mesmos motivos por detrás da existência das mordeduras, no caso da soldadura por *keyhole* contínua, com velocidades de soldadura superiores a  $19 \text{ m/min}$ , a dinâmica do fluxo de metal fundido em situações de penetração parcial resulta em episódios periódicos de formação de protuberâncias com sulcos mais profundos, do que as mordeduras, e de altura mais pronunciada.

A solução para este tipo de defeito passa pela focagem do feixe laser sob a superfície das peças e ou pelo ajuste da velocidade da soldadura (Katayama, 2013).

### 1.7.5. Fusão ou *Melt Through*

A soldadura de penetração total com uma alta entrega de calor em metais de perfil fino com uma baixa tensão superficial, pode resultar na diminuição da poça de metal fundido e na formação de elevações na superfície oposta à da soldadura. Se se recorrer a metal de adição este pode ser pré-aquecido para limitar a entrega de calor através do laser. A utilização de gás de proteção pela superfície oposta e a utilização de um cobre-junta previnem a formação destes defeitos (Katayama, 2013).

### 1.7.6. Fissuração

As fissuras podem ser classificadas segundo duas categorias. Acima de  $300^\circ\text{C}$  são classificadas como fissuras a quente e, após os ciclos térmicos da soldadura, são classificadas como fissuras a frio ou fissuração por hidrogénio.

A fissuração a quente pode ocorrer tanto na ZTA, denominadas de fraturas de liquação, como no próprio cordão, chamadas de fissuras de solidificação.

As fissuras a quente formam-se durante as últimas etapas da solidificação, a tensão resultante da contração aumenta gradualmente. A presença de contaminantes como o enxofre e o fósforo reduzem a temperatura de fusão e permite a formação de uma película líquida na fronteira intergranular, esta película potencia a formação das fraturas que se expandem para aliviar tensões (Katayama, 2013).

A redução de calor aplicado e o aquecimento das peças a soldar abrandam a taxa de arrefecimento e como tal, previne a formação de fraturas especialmente em aços com um conteúdo elevado de carbono, no caso de se utilizar metal de adição, também é possível alterar a geometria do chanfro das peças a ligar.

A fissuração a frio é explicada pela presença de hidrogénio presente no banho de fusão, este forma ligações entre si, o que causa tensões no aço. O arrefecimento rápido do cordão e ZTA são propícios à formação de martensite, caracteristicamente frágil. Conjugada com as tensões geradas formam fraturas. Para mitigar a formação deste tipo de fissuras deve-se procurar eliminar fontes de hidrogénio que normalmente provêm ou do método de soldadura ou do material de adição e o seu revestimento. Isto é inerentemente simplificado na soldadura por laser assim como pela possibilidade da realização da soldadura num ambiente de vácuo (Katayama, 2013).

### 1.7.7. Porosidade

A soldadura por condução não é, normalmente, conducente à formação de poros porque o metal fundido é estável, a menos que se verifique a existência de contaminantes ou revestimentos que evaporem quando expostos a elevadas temperaturas. Como o zinco por exemplo, pelo que, a preparação da junta é essencial. Na soldadura em modo *keyhole*, o fluxo do metal é conducente à retenção de bolhas no interior do cordão pelo que é necessário ajustar bem os parâmetros de soldadura.

Tanto na soldadura por laser pulsado como na contínua seria benéfica a utilização de uma atmosfera em vácuo. O mecanismo de formação de bolhas é o colapso do orifício na extremidade do mesmo ou captação de poros devido à captação por correntes metálicas, figura 17. Se se melhorar a estabilidade do orifício é possível reduzir ou eliminar a formação destes defeitos, o que pode ser feito ao soldar com a parametrização de potência e focagem corretas. A soldadura com duplo feixe reduz a formação de porosidade (Katayama, 2013; Katayama et al., 2007).

Na soldadura por laser pulsado, a interrupção rápida do feixe colapsa o orifício o que pode resultar na captação de bolhas de ar no fundo do orifício. Isto é remediável através da modulação da curva de potência de modo a permitir um colapso controlado (Katayama, 2013).

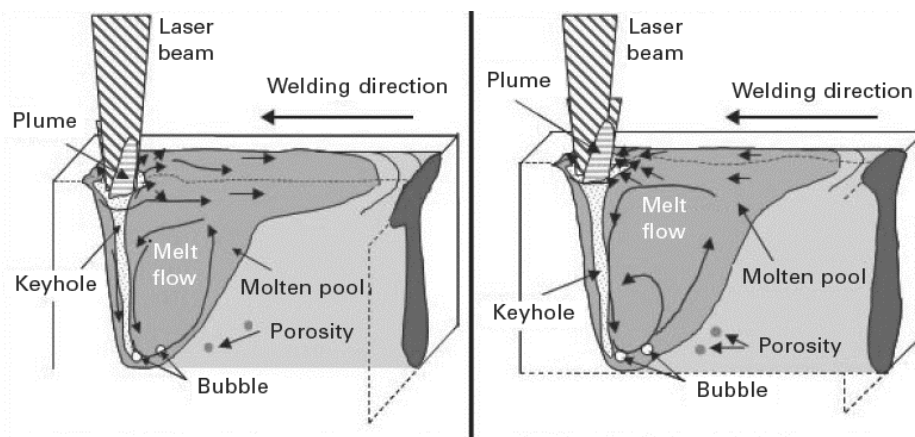


Figura 17 - Mecanismo de formação poros (Katayama, 2013).

### 1.7.8. Penetração e ou Fusão Incompleta

Nos materiais com elevada refletividade e elevada condutividade térmica, como é o caso do alumínio, é possível que ocorram transições entre o regime *keyhole* e o regime de condução. Os lasers Nd:YAG neste caso são preferíveis uma vez que apresentam maior absorção nestes metais quando em comparação a lasers de CO<sub>2</sub>, por exemplo (Katayama, 2013). A solução passa pelo aumento da potência.

### 1.7.9. Inclusões

As inclusões são por norma compostas por óxidos, ou contaminantes. O método mais eficaz para evitar a formação deste tipo de defeito é a prevenção da formação de óxidos e a remoção de contaminantes, através de uma boa limpeza da junta e a aplicação correta de gases de proteção (Katayama, 2013).

### 1.7.10. Degradação das Propriedades Químicas e Mecânicas

A presença de defeitos no cordão de soldadura implica uma redução da resistência das juntas. Para além disto, em aços temperados e revenidos, as propriedades do metal do cordão e da ZTA vão ser inferiores às do metal base, isto porque a exposição a elevadas temperaturas e rápido arrefecimento altera as suas propriedades e estrutura cristalina. Nos casos de metais como o alumínio e o cobre, que sofrem de encruamento, o recozimento na ZTA tornam a zona mais dúctil e reduzem a resistência à tração. No caso de aços inoxidáveis austeníticos, dá-se o fenómeno de corrosão intergranular na ZTA resultante da precipitação de carbonetos, o que resulta na perda de propriedades de resistência à corrosão e de resistência mecânica (C. y. ( 1 ) Cui et al., 2014; Kumar et al., 2018; Moradi et al., 2018).

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Material de Estudo e Amostras

O objetivo fulcral desta dissertação foi a implementação da soldadura por laser pulsado em ambiente industrial. O metal de base foi selecionado segundo o critério da quantidade processada. Tendo por base este critério, selecionou-se a liga de aço S235 JR, designação segundo a norma EN 10025-2. É um aço estrutural laminado a quente de uso geral com uma baixa percentagem de carbono, cuja composição química se encontra na tabela 2, e que devido às suas propriedades, no que diz respeito à sua transformação, apresenta boa soldabilidade e aptidão para a quinagem. É utilizado, de um modo generalizado, em aplicações não críticas. No caso em específico da empresa é frequentemente utilizado na construção de elementos de fixação e gestão de cabos para armários de servidores ou “*Server Racks*”.

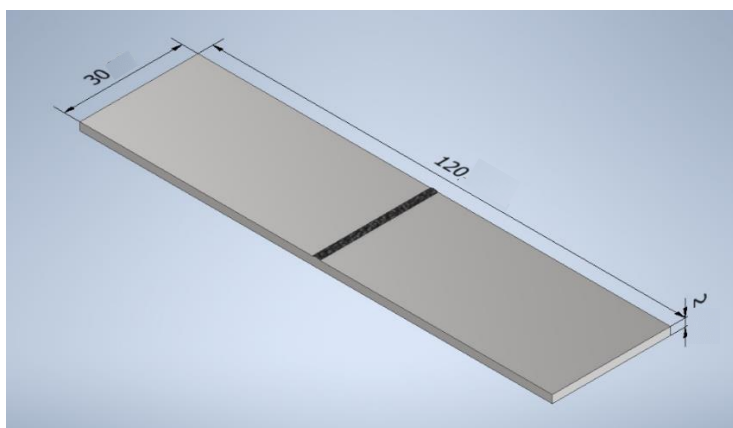
*Tabela 2 – Composição química e propriedades mecânicas da liga de aço S235 JR. Valores em [%]*

C	Mn	Si	S	P	Cu	Al	V	Cr	Ni	Mo	N
0,040	0,540	0,030	0,003	0,004	0,040	0,051	0,001	0,010	0,020	0,002	0,05

Propriedades mecânicas para uma espessura de 2 mm

Tensão de cedência [MPa]	302	Tensão máxima [MPa]	407
--------------------------	-----	---------------------	-----

A dimensão das amostras, donde se constituíram os provetes, foi definida em função do equipamento de testes e com o intuito de reduzir a influência dos fatores de acumulação de tensões resultantes da sua maquinagem. A preparação dos provetes por fresagem com fluido de corte implica algumas correções de imperfeições, tais como a formação de rebarba ou qualidade de acabamento. Para além disto, as dimensões foram ajustadas de modo que o provete se ajustasse nas garras da máquina de ensaios de tração e com uma área de secção suficiente de modo a obter uma curva tensão-deformação com uma elevada resolução. Deste modo foi definida uma dimensão de provetes de modo que após a soldadura ficassem com as dimensões assinaladas na figura 18.



*Figura 18 - Representação 3D de um provete soldado*

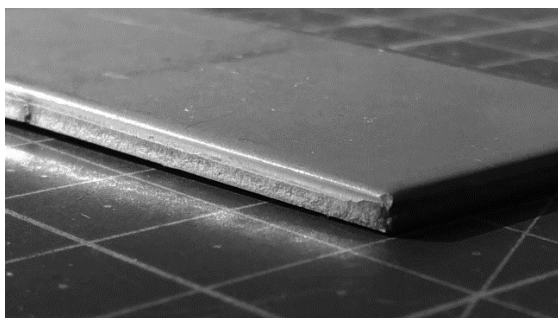
## 2.1. Material de Estudo e Amostras

---

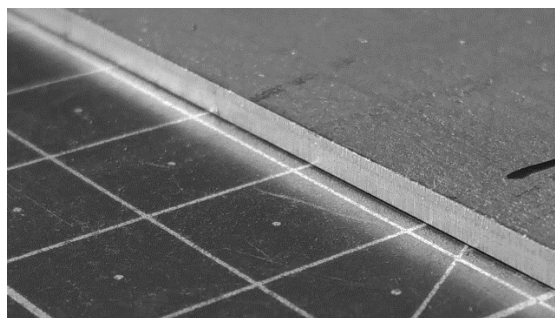
A matéria-prima vinha em forma de chapa plana, pelo que não foi necessária nenhuma etapa de endireitamento da chapa, se esta porventura fosse adquirida em bobines.

O corte das metades de provete foi tentado numa guilhotina hidráulica, no entanto, e apesar de ter uma lâmina nova instalada, esta deformava significativamente a chapa e deixava uma pequena rebarba, como é possível comprovar pela figura 19. Isto dificultava a obtenção de uma boa precisão dimensional, uma vez que esta máquina está adaptada a realizar cortes em peças de maior dimensão. Estes fatores conjugados resultam numa folga entre ambas as metades, o que não permitia a realização de um cordão neste material com esta ordem de espessura sem a necessidade de material de adição. De modo a reunir os requisitos acima mencionados, recorreu-se à puncionadora e máquina de corte laser Trumatic 6000.

Esta é comandada por CNC de modo a guiar a cabeça de corte laser com precisão e permite obter um bom acabamento na superfície de corte, como é possível ver na figura 20. No entanto, devido à ação do laser, que expõe as amostras a uma elevada temperatura e um rápido arrefecimento, o metal base do provete sofre um tratamento térmico, ou ZTA, junto da superfície de corte. Existe também a formação de uma pequena camada de escória na face inferior, mas como esta não se situa na superfície de corte não influencia a folga entre as metades do provete na soldadura de topo. É de dimensões tão reduzidas que é dificilmente perceptível a olho nu.



*Figura 19 - Detalhe do corte em guilhotina*



*Figura 20 - Detalhe do corte por laser*

Na figura 20, a chapa é apresentada com a face inferior virada para cima onde se pode ver a existência da faixa de escória, derivada do corte laser.

Por norma, em contexto industrial, tal como na empresa, as peças processadas que não o requeiram expressamente não são alvo de facejamento do cordão de soldadura. Quando muito, são objeto de uma etapa de tratamento abrasivo para garantir uma melhor adesão do respetivo revestimento, quando este se aplica, ou remover a camada de óxido que se possa formar sobre o cordão e desta maneira melhorar o seu aspeto. Por esta razão não se optou por tratar os cordões de soldadura uma vez que a qualidade da superfície do cordão pode influenciar a resistência do mesmo quando este é exposto a esforços. No entanto, de modo a evitar que o início e o fim do cordão de soldadura tivessem algum impacto nos resultados por meio de acumulação de tensões, nos ensaios de tração, recorreu-se à fresagem com fluído de corte em ambos os lados do provete. Deste modo, removeram-se as extremidades do cordão pois se determinou que estas não eram representativas da qualidade da soldadura.

Tendo isto em consideração e a sua forma original, os provetes foram planeados, com a forma e dimensões apresentadas no desenho da figura 21. Com esta forma e dimensões, atua-se no sentido de prevenir a rotura dos provetes pelo local onde a garra da máquina de ensaios de tração fixa o provete.

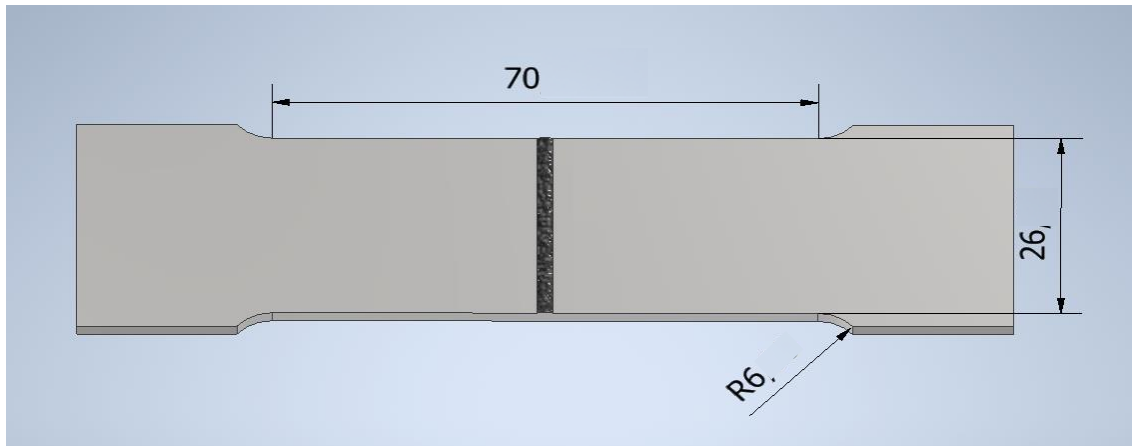


Figura 21 - Representação 3D de um provete maquinado.

## 2.2. Definição das Variáveis de Estudo – Etapas do Processo Experimental

A figura 22 apresenta um fluxograma com o encadeamento planeado para a execução desta dissertação.

Os parâmetros de soldadura padrão recomendados foram retirados do manual de soldadura laser da máquina, de acordo com as especificações do equipamento e do metal que se pretende soldar. Os parâmetros de soldadura correspondem à soldadura com laser contínuo. No entanto, não é especificado o regime de soldadura. Para a soldadura de topo com laser contínuo em chapa de aço com baixo teor de carbono, os parâmetros de soldadura recomendados são: potência de 2000 W, velocidade de soldadura de 2,25 m/min, altura de foco de 2 mm acima da superfície da chapa e um fluxo de argon de 15 l/min. Dos parâmetros de soldadura para chapas com características semelhantes, nos quais é feita a distinção entre soldadura de condução e o modo *keyhole*, pode-se concluir que os valores de potência e de velocidade são superiores e a altura de foco inferior àqueles que se esperam na soldadura por condução. No entanto, é necessário confirmar este pressuposto com base na análise das secções dos cordões de soldadura.

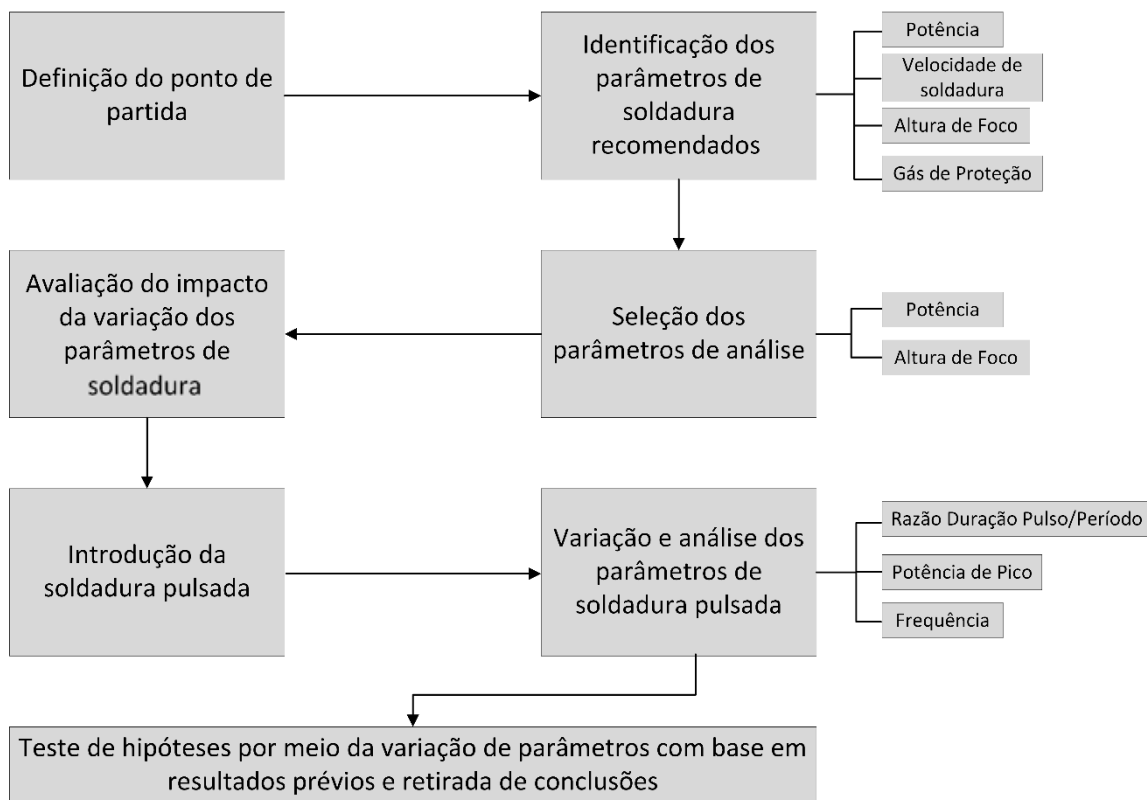


Figura 22 - Fluxograma do encadeamento experimental e temático.

De modo a ser possível formatizar conclusões e fazer alterações fundamentadas aos parâmetros de soldadura foi necessário isolar as variáveis em estudo. No entanto, a conjugação de todas as variáveis resultaria numa quantidade de cenários possíveis que não seria possível testar na escala temporal de realização desta dissertação. Então foi tomada a decisão de manter inalterados alguns dos parâmetros de soldadura em todos os ensaios, que foram:

- Gás de Proteção: Optou-se por não realizar ensaios com gases ou misturas gasosas distintas porque, apesar de o custo do argon se encontrar numa gama intermédia, produz cordões de soldadura com boa qualidade, ainda que com perfis de penetração mais largos, e previne a oxidação a valores de caudal inferiores. A utilização de hélio ou mistura argon/hélio é considerada como sendo superior ao argon. No entanto, devido à conjugação de um custo mais elevado e à necessidade de um fluxo superior para prevenir a formação de óxidos, este tipo de gás de proteção é reservado para propósitos mais críticos pois o custo inviabiliza o seu uso (PrimaPower, 2022).

O uso de azoto pode causar a fragilização de algumas ligas. O CO<sub>2</sub>, apesar de ser o mais barato, está associado à formação de porosidade.

No contexto específico, com um ponto de vista de gestão dos recursos, como o Argon já é utilizado na soldadura MIG e TIG nas instalações da fábrica, a aquisição de garrafas de gases específicos para a soldadura laser, mesmo que para fins de teste, não se justifica.

- Velocidade de soldadura: Apesar de desempenhar um papel crítico na dinâmica do movimento do metal fundido e na manutenção do *keyhole*, não se realizaram ensaios com o objetivo de avaliar a influência deste parâmetro. Determinou-se apenas que este impacto poderia, dentro de uma gama limitada, ser contabilizado ao determinar a densidade energética do feixe na superfície das peças a soldar.

Antes de tentar a soldadura com laser pulsado, foram realizados ensaios de soldadura contínua, tal como se encontra descrito no diagrama da figura 23. Isto permitiu comprovar a influência da alteração da potência de soldadura e da altura de foco, independentemente. Para além disto, os ensaios de soldadura contínua permitiram estabelecer um termo de comparação em relação ao valor de potência média dos ensaios de soldadura com laser pulsado.

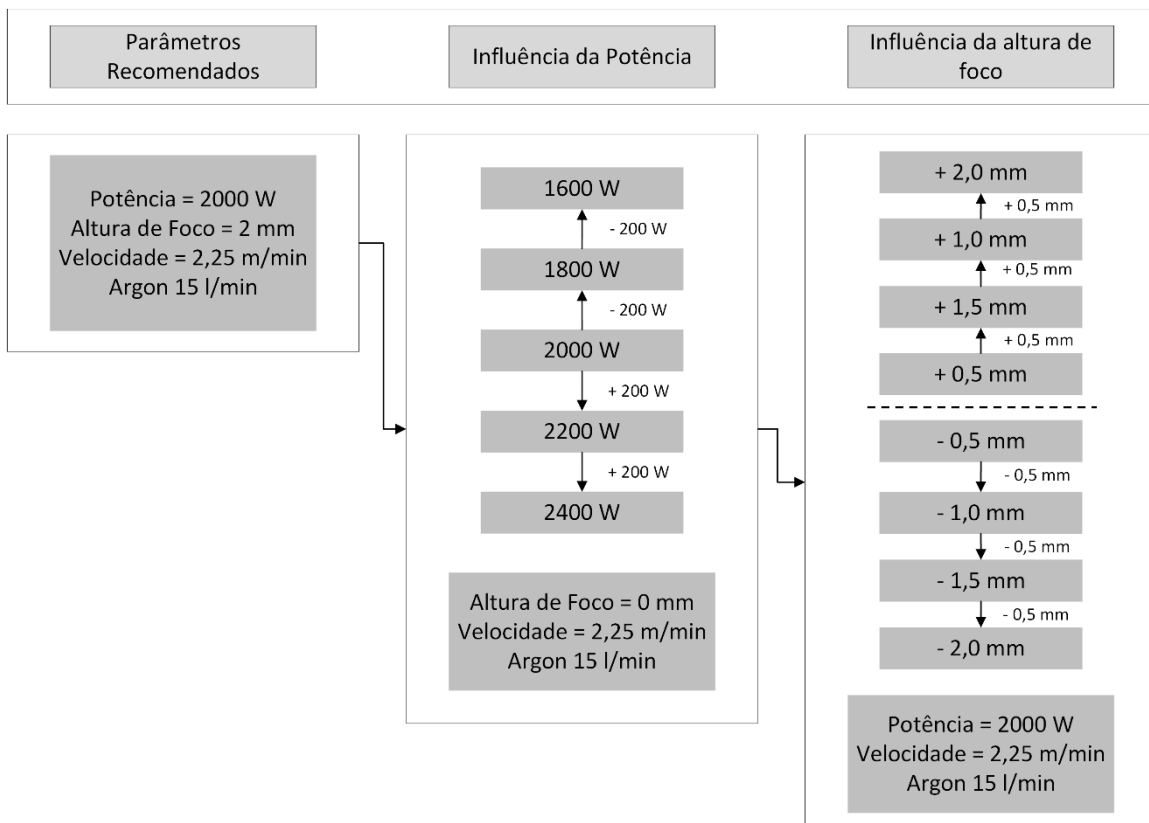


Figura 23 – Esquema do planeamento da avaliação dos parâmetros de soldadura com laser contínuo.

A partir dos parâmetros recomendados avaliou-se a influência da potência de soldadura ao serem realizados 5 ensaios com potências distintas entre os valores de 1600 W e 2400 W em intervalos de 200 W definidos arbitrariamente.

A influência da altura de foco foi determinada ao alterar este valor na gama de -2,0 a +2,0 mm em intervalos de 0,5 mm. O intervalo de valores foi determinado tendo por referência o manual de parâmetros de soldadura, mas em materiais e tipos de junta distintos. Na maioria dos casos, o valor de altura focal recomendada está compreendido neste espectro, com a exceção dos exemplos de soldadura por condução nos quais os valores da altura do foco recomendada se situam entre os 4 e os 18 mm.

Para avaliar a influência da frequência na qualidade da soldadura pulsada realizaram-se três ensaios compreendidos entre 40 e 120 Hz, em intervalos de 40 Hz. De modo a

## 2.2. Definição das Variáveis de Estudo – Etapas do Processo Experimental

poder avaliar mais facilmente a influência da frequência na sobreposição através da visualização da secção longitudinal do cordão de soldadura, utilizou-se uma razão de duração do pulso/período de 40% que resultou num cordão de soldadura com penetração parcial.

O valor de sobreposição recomendado situava-se entre 60% e 80% e pode ser determinado segundo a seguinte equação (Amada Weld Tech, 2020):

$$\text{Sobreposição [\%]} = \frac{v_s}{2w_0 * f} \quad \text{Eq. 16}$$

Sem valores de referência para os parâmetros de soldadura pulsada, definiram-se patamares de potência de pico acima do valor recomendado em intervalos de 200 W até aos 2600 W. De modo a estabelecer um parâmetro que varia de acordo com a frequência, utilizou-se a razão de duração de pulso/período para definir a duração do pulso, dado que o período se pode definir em função da frequência obtendo-se assim uma equação que relaciona ambos os parâmetros.

$$\frac{t_p}{T} (\%) \Leftrightarrow \frac{t_p}{f^{-1}} * 100 \quad \text{Eq. 17}$$

Para cada patamar de potência de pico realizaram-se 3 ensaios, com uma razão compreendida entre 40% e 80% em intervalos de 20%. Posteriormente foram alterados estes valores uma vez que alguns destes não eram compatíveis com a formação de um cordão de soldadura com penetração total no material. A figura 24 contém os conjuntos e progressão de parâmetros programados para avaliar o seu impacto.

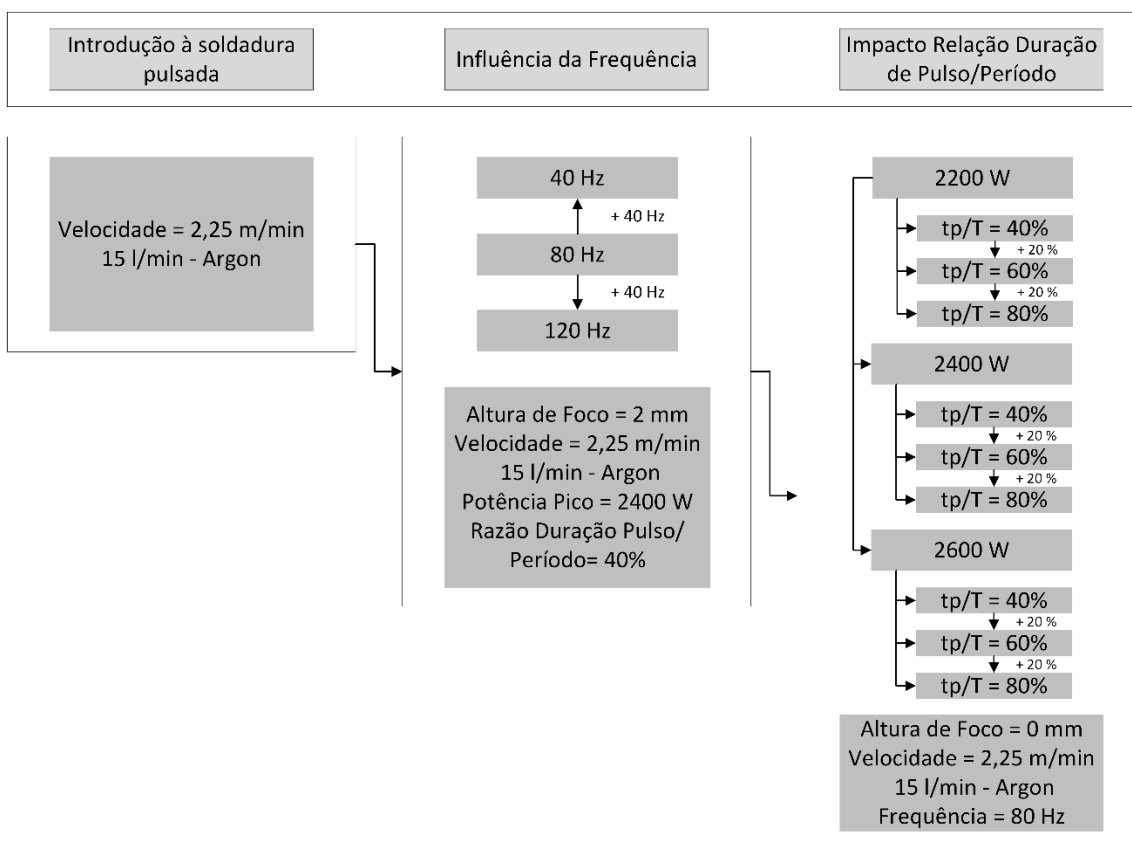


Figura 24 - Planeamento para a avaliação dos parâmetros de soldadura pulsada.

A partir dos resultados dos ensaios programados realizaram-se mais três ensaios com o objetivo de selecionar parâmetros que resultassem num cordão de soldadura com um melhor acabamento superficial, com penetração total, inexistência de defeitos, uma redução da potência média e da ZTA.

De modo a poder avaliar a transferência de calor para as peças realizaram-se mais 2 ensaios, um em soldadura contínua com 2000  $W$  e outro em soldadura por laser pulsado com valor de pico de 2600  $W$  e com uma razão  $t_p/T$  de 76,9% de modo que a potência média fosse de 2000  $W$ . Deste modo, partindo de um valor de potência média de soldadura idêntica, mas com metodologias de soldadura distintas, seria possível avaliar se o modo de soldadura tem influência na transferência de calor já que a formação de plasma a maiores temperaturas pode absorver alguma radiação do feixe. Face aos resultados obtidos foi realizado um novo ensaio com recurso à soldadura com laser pulsado com uma potência média superior a 2000  $W$ .

No total, planearam-se e realizaram-se um total de 115 provetes, sendo que 28 serviram para seccionamento e análise da microestrutura, 84 foram utilizados na realização de ensaios de tração e 3 foram realizados com o intuito de obter medições de temperatura. Para além destes, foram realizados alguns ensaios com diferentes propósitos, como o teste de diferentes materiais e familiarização com os equipamentos.

### 2.3. Objetos de Estudo

A avaliação das características dos cordões de soldadura dividiu-se em quatro vertentes principais.

A análise visual revelou ser uma das mais importantes por se poder retirar as primeiras conclusões sobre a qualidade da soldadura de maneira imediata. No entanto, esta análise limita-se ao aspeto superficial do cordão e pode não apresentar indícios sobre a existência de defeitos no interior do cordão. Para poder verificar o seu interior foi soldado um provete de prova para cada caso de estudo que permitisse a visualização das secções perpendicular e longitudinal do cordão de soldadura. Defeitos tais como a porosidade, formação de fissuras, inclusões ou fusão incompleta só são visíveis através da análise destas secções. Para além disso, estas também permitem observar a forma do cordão e a dimensão da ZTA que servem como pontos de comparação entre ensaios.

A realização de ensaios de tração nos provetes permitiu formalizar conclusões sobre as propriedades mecânicas de cada provete: como a tensão última e a tensão de cedência. No entanto, não se pode afirmar nem assegurar com toda a confiança a repetibilidade dos valores retirados a partir de apenas um ensaio de tração. A variação destes valores permite obter conclusões adicionais sobre a qualidade da soldadura. Por esta razão, foram destinados um mínimo de três provetes de cada ensaio à realização de ensaios de tração. Foi considerado este número mínimo para estabelecer um balanço entre a confiança nos resultados, a otimização da utilização de tempo útil, já que cada ensaio dura entre 10 e 15 minutos e também devido ao desperdício de metal.

A medição da dureza foi feita nas montagens preparadas para a avaliação da forma do cordão e análise da microestrutura. Esta medição não foi realizada nas montagens correspondentes a todos os ensaios. Foi feita para testar duas hipóteses: a primeira assentou na realização de medições em pontos segundo a linha média da espessura

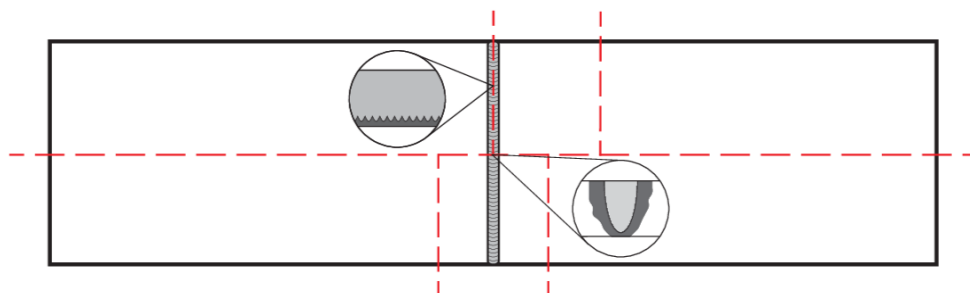
## 2.4. Preparação de Provetes para Análise

dos provetes no plano perpendicular ao cordão de soldadura e equidistantes entre si com intervalos de  $0,1\text{ mm}$ . Este valor de distância mínima entre leituras foi estabelecido segundo a norma ASTM E92 e foi realizado em amostras de ensaios de soldadura com laser contínuo e pulsado, com valores de potência média idênticos. Pretendia avaliar se esta modalidade influencia a dureza e dimensão da ZTA, apesar de não haver diferenças a nível da energia de soldadura. A segunda pretendia avaliar se é possível estabelecer uma correspondência entre a análise da microestrutura e a variação da dureza de uma maneira fiável através da realização de medições em pontos sistemáticos. Estas distribuem-se no formato de uma grelha de medições 5 por 3, o necessário para abranger metade do cordão já que deve ser simétrico. Assim garantindo que as medições não interferem entre si e são equidistantes, com uma distância de  $0,36\text{ mm}$  entre eles.

Foi também medida a temperatura por meio de três sensores termopares em simultâneo, com o objetivo de analisar os ciclos térmicos e verificar a aplicabilidade das relações de Rosenthal à soldadura laser. Os três sensores foram colocados a distâncias distintas de modo a verificar a existência, ou não, de correlação entre os resultados experimentais e os valores teorizados.

### 2.4. Preparação de Provetes para Análise

De cada amostra foi selecionado um provete antes da etapa de fresagem para que pudesse ser seccionado. A representação esquemática da figura 25, corresponde a um provete soldado com os planos de corte assinalados por meio de linhas vermelhas de traço interrompido. A linha que percorre o comprimento do provete divide-o ao meio para permitir a obtenção de dois espécimes para análise. Na metade superior realiza-se um corte ao longo do cordão de soldadura, com uma tolerância que permita a realização dos processos de lixagem e polimento. O outro corte serve para assegurar que o espécime não tem um tamanho excessivo e facilita a restante preparação pelo que não é uma dimensão crítica. Da metade inferior retira-se o espécime para observação da secção transversal do cordão de soldadura, com uma largura idêntica ao superior. Os desenhos detalhados apresentam os perfis longitudinais e transversais que seriam de esperar de um cordão de soldadura obtido por laser pulsado sem penetração completa.



*Figura 25 - Representação de um provete com linhas de corte para seccionamento.*

Os provetes foram cortados com uma serra de fita horizontal semiautomática Carif-260. O método de corte que mais se adequaria a esta aplicação seria a utilização de disco abrasivo lubrificado. O corte por arranque de aparas resulta numa precisão dimensional

mais reduzida e alguma rugosidade na superfície de corte. Estes problemas foram mediados realizando os cortes com uma baixa pressão de corte, com o fluido de corte abundante e com um pequeno excesso dimensional em relação à secção pretendida, sendo retiradas as rebarbas com uma lima. Uma propriedade importante do fluido lubrificante é o seu calor específico e condutividade térmica elevados, resultantes da elevada percentagem de água que o constitui. Ao retirar, eficazmente, energia térmica do provete evita que este fique sujeito a elevadas temperaturas que possam causar alterações às propriedades microestruturais dos espécimes nas montagens e, deste modo, alterar o cordão de soldadura.

No seu estado inicial, os espécimes eram difíceis de manusear eficazmente na lixadora e, como tal foi efetuada a sua montagem em resina de epóxido. O procedimento iniciou-se com a fixação dos espécimes, recorrendo a cianoacrilato, com as faces que se pretendiam observar voltadas para baixo a uma superfície plana revestida com filme adesivo, figura 26, com um espaço entre eles de 3 a 5 mm, para que se pudessem facilmente separar. Aqui teve-se o cuidado de assegurar que o espécime para análise com o cordão de soldadura transversal se situasse no lado da face superior da amostra com o cordão de soldadura longitudinal, deste modo foi possível identificar o lado superior de ambas os espécimes facilmente sem recorrer a nenhum tipo de marcação que pudesse ser apagado no processo seguinte.

Para poder conter a resina de epóxido utilizaram-se secções de tubo PVC de 25 mm de diâmetro, com 25 mm de altura, as quais foram coladas à mesma superfície onde se fixaram os espécimes. Para garantir que a ligação não vertesse resina, os tubos foram vedados e fixados com recurso a adesivos termoplásticos “cola quente”, vulgarmente conhecidos como “hot melt”. Em retrospectiva, este não é o tipo de adesivo mais indicado pois é propício à formação de fugas por perda de adesão e tinha a tendência para aderir às lixas de polimento danificando a mesma e projetando as secções de tubo.

A figura 27, contém algumas das montagens polidas.

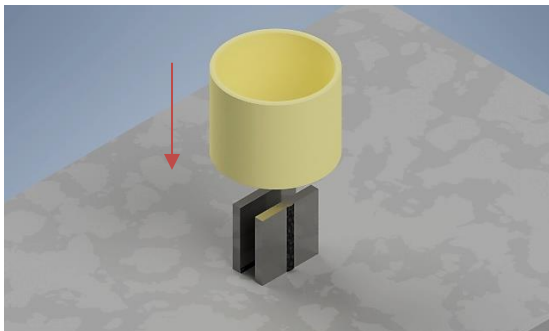


Figura 26 - Esquema da sequência de montagem.

Figura 27 – Algumas das montagens polidas.

Para assegurar o polimento até ao plano médio do cordão, na sua secção longitudinal, realizaram-se duas incisões, com recurso a uma serra manual, em cada extremidade do espécime no sentido perpendicular à direção de soldadura. Assim, quando estas deixavam de ser visíveis significaria que o ponto intermédio do cordão de soldadura tinha sido atingido.

## 2.5. Ataque Químico

---

As montagens foram polidas progressivamente com recurso a uma máquina de polimento Struers LaboPol-21, figura 28, incrementando a granulometria da lixa de 80 até 2400 obtendo um acabamento espelhado.



*Figura 28 - Equipamento de polimento Struers LaboPol-21*

### 2.5. Ataque Químico

Antes de poder analisar a estrutura interna do cordão de soldadura é necessário realizar um ataque químico para revelar a microestrutura. Alguns tipos de reagentes atuam segundo a oxidação seletiva nos quais a fronteira de grão, devido ao desalinhamento da sua estrutura cristalina, é mais suscetível à corrosão e como tal formam um relevo na superfície do metal. Para ligas ferrosas é recomendada uma solução de “nital”, composta por 1 a 10% de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e 90 a 99% de álcool etílico ou metanol (Seabra, 1985).

A solução foi depositada num vidro de relógio onde eram mergulhadas as montagens durante um período de 30 segundos. Decorrido esse tempo colocaram-se os provetes sob água corrente para parar a reação e remover a solução da montagem e foram enxaguadas em álcool etílico (96% v/v) ou acetona para reduzir a possibilidade da formação de óxidos na superfície dos espécimes. Por fim as suas faces foram secas recorrendo a algodão e toalhas de papel que não libertam fibras de celulose.

### 2.6. Microscopia

A análise microscópica das montagens foi realizada através da utilização do microscópio ótico de luz refletida, *Axiotech 100*, equipado com a câmara *Axiocam 208 color*, ambos os equipamentos da marca *Zeiss*, figura 29.



Figura 29 – Microscópio Axiotech 100 equipado com a câmara Axiocam 2008 color

As medições e captação de imagens foram realizados através do software ZEN 3.6 (blue edition), e a junção e correção de cor das imagens foi feita no Adobe Photoshop, edição de 2022.

### 2.7. Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no equipamento Instron, modelo 4206-006, com uma célula de carga capaz de operar até cargas de 100 kN.



Figura 30 - Preparação de um ensaio de tração.

Antes de realizar os ensaios de tração, foi necessário colocar as garras adequadas à espessura dos provetes. Todos os provetes foram fixados nas garras, devendo ter uma área de contacto suficiente com os provetes para estes não deslizarem.

De modo a poder obter dados de tensão com boa precisão, todos os provetes foram medidos previamente de forma individual em três pontos sistematicamente posicionados na secção maquinada recorrendo a um peclise digital, sendo registado o menor valor.

Os dados são exportados em unidades imperiais pelo que foi necessário convertê-los para unidades SI segundo os seguintes fatores de conversão:

$$F[N] = F[lb] * 4,448 \quad Eq. 18$$

$$\Delta l[mm] = \Delta l[in] * 25,4 \quad Eq. 19$$

### 2.8. Medições de Dureza

A realização dos ensaios de dureza e medição dos respectivos valores foram efetuados no microdurómetro *Shimadzu HMV-200*, figura 31. O teste de dureza Vickers é amplamente utilizado por poder ser utilizado em qualquer material, e porque tem uma das escalas mais abrangentes. Na comparação a testes como o Brinell, que utilizam um indentador esférico, tem a vantagem de os cálculos de dureza serem independentes do tamanho do indentador.

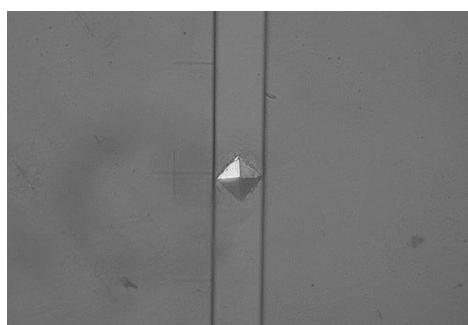
O microdurómetro utiliza um indentador Vickers de diamante. Este tem a forma de pirâmide de base quadrada, as faces do diamante apresentam um ângulo de  $22^\circ$  em relação ao plano horizontal.



*Figura 31 – Durómetro Shimadzu HMV 200*

O procedimento de medição, inicia-se com a seleção do local do espécime que se pretende analisar. É necessário definir a carga aplicada durante o teste, e a duração do ensaio. Para o material em questão, determinou-se que a carga de 500 gf era suficiente para obter indentações com uma boa resolução para medição com uma duração de 15 s, por se tratar de um valor padrão.

Após o ensaio é possível efetuar a leitura da dureza ao posicionar as duas linhas paralelas no exterior dos vértices da indentação, segundo ambos os eixos.



*Figura 32 Exemplo da realização de uma medição de dureza.*

A dureza Vickers é determinada ao dividir a força aplicada pela área projetada da indentação. Este valor não deve ser confundido com a pressão, pois esta é o resultado entre a força aplicada e a área normal, ou a projeção da indentação no plano horizontal, enquanto a área da indentação residual corresponde à área da superfície do material deformado plasticamente. A figura 33 tem a representação das diagonais utilizadas na determinação da área da superfície deformada.

A área pode ser determinada tendo por base as dimensões das diagonais. Na qual  $d$  é a média entre as duas diagonais.

$$A = \frac{d^2}{2\sin\left(\frac{136}{2}\right)} \quad \text{Eq. 20}$$

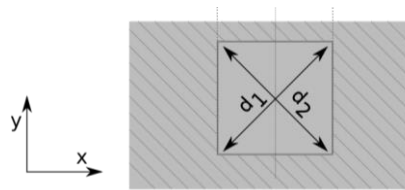


Figura 33 - Representação das diagonais após uma medição de dureza (adaptação de Tekateki, 2022)

Se um teste for realizado de maneira apropriada, a dimensão das diagonais não deve variar significativamente. No caso de haver uma diferença significativa é provável que a amostra não esteja bem fixa, esteja fixa com uma inclinação excessiva ou que a rugosidade da superfície seja demasiado elevada para a dimensão do indentedor.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \text{Eq. 21}$$

Deste modo, a dureza Vickers é dada pela seguinte equação:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\sin\left(\frac{136}{2}\right)}} \Leftrightarrow \frac{2F\sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} \approx \frac{1,8544F}{d^2} \quad \text{Eq. 22}$$

## 2.9. Medição de Temperatura

### 2.9.1. Preparação dos Termopares

Para realizar as medições da evolução da temperatura recorreu-se a termopares do tipo k, que operam numa gama de temperaturas entre  $-270^{\circ}\text{C}$  e  $1370^{\circ}\text{C}$ . Devido ao seu tamanho reduzido os termopares têm um tempo de resposta curto o que faz deles o melhor método de medição de temperatura nesta situação. No entanto, ficam aquém da medição por meio de radiação infravermelhos com uma elevada taxa de aquisição.

Os termopares são obtidos em bruto, sob a forma de fio. De modo a poder realizar medições, é necessário completar algumas etapas de preparação que consistem em descarnar o par de fios em ambas as extremidades e soldá-las. Neste caso, recorreu-se à soldadura por resistência elétrica em banho de mercúrio. As outras extremidades são ligadas ao conector.

## 2.9. Medição de Temperatura

---

Antes de poder utilizar os termopares, foi necessário certificar que estes estavam corretamente conectados e que a soldadura foi bem-sucedida. Isto foi feito ao submergí-los em água em ebulição, dado que, dependendo da altitude, este valor permanece constante. Nestas condições, determinou-se que os termopares mediram a temperatura da água com um erro médio de  $0,3^{\circ}\text{C}$  em relação ao valor teórico, num intervalo de  $1,2^{\circ}\text{C}$  entre os termopares.

### 2.9.2. Fixação dos termopares

Devido às elevadas temperaturas envolvidas não é possível recorrer a fita adesiva de polipropileno ou PVC, no entanto o seu uso seria vantajoso na fixação dos termopares uma vez que, devido aos valores reduzidos de capacidade térmica e condutividade térmica, não iriam afetar, de modo significativo, o valor das medições. Uma possível alternativa seria a utilização de fita adesiva de poliamida, que normalmente é utilizada em aplicações de isolamento elétrico e fixação de circuitos sujeitos a elevadas temperaturas de até  $500^{\circ}\text{C}$  ou fita de alumínio utilizada na selagem ou impermeabilização de condutas. Apesar disto, a utilização de qualquer uma destas alternativas implica um grau de imprecisão no momento de fixação dos termopares e, no caso específico da fita de alumínio, a elevada condutividade e capacidade térmica iria afetar a inércia térmica do conjunto e alterar as medições. Por estas razões determinou-se ser necessária a construção de um elemento de fixação dos termopares.

Para o material em contacto com os termopares seleccionou-se um cartão de juntas *Flexoid* de  $0,8\text{ mm}$  de espessura, apesar de ser inflamável e apenas ser capaz de aguentar uma temperatura máxima de operação de  $120^{\circ}\text{C}$  é capaz de aguentar temperaturas de pico acima deste valor sem carbonizar ao ponto de comprometer a integridade do mesmo.

Foram utilizados três termopares fixos em intervalos de  $5\text{ mm}$  entre eles, ou seja, a  $8$ ,  $13$  e  $18\text{ mm}$  do cordão de soldadura através de orifícios na primeira camada de cartão de juntas. Os fios dos termopares foram conduzidos através de ranhuras recortadas na segunda camada de cartão e de modo a fornecer alguma rigidez e forçar os termopares contra a superfície do metal, foi colocada uma chapa de aço inoxidável de  $0,5\text{ mm}$  em cima de todas as camadas de cartão. Para garantir que os termopares se encontrariam sempre na mesma localização realizaram-se três furos na chapa de inox, por onde saíam os fios. Isto permite encostar a chapa contra os elementos de fixação. O cartão e chapa de inox foram colados com adesivo de juntas de elevada temperatura.

Os termopares foram testados novamente em água em ebulição, no entanto, e apesar da utilização de cartão para reduzir a interferência por transferência de calor, verificou-se uma medição após um intervalo de 1 segundo com uma diferença de  $10^{\circ}\text{C}$  abaixo do valor teórico, provavelmente pelo isolamento provocado pelo cartão. Apesar disto decidiu-se que seria possível retirar conclusões a partir das medições efetuadas tendo em consideração que esta diferença, assumindo uma proporção de erro linear, pode ser contabilizada.

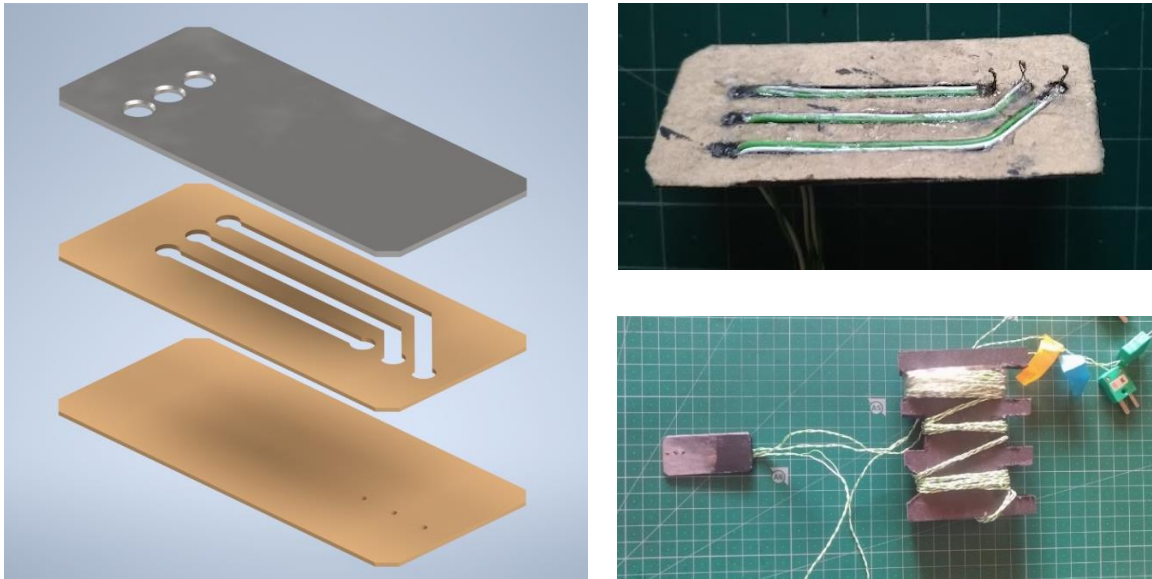


Figura 34 - Dispositivo de fixação dos termopares desde o modelo 3D até ao estado final.

### 2.10. Equação de Rosenthal

Para poder fundamentar conclusões sobre as medições de temperatura obtidas experimentalmente, estas tiveram de ser comparadas a valores teóricos.

A equação de Rosenthal resulta do balanço da transferência de calor por condução. Assume uma fonte de calor pontual e que as propriedades do material são independentes da temperatura. As perdas de calor por convecção, radiação e mudanças de fase são consideradas desprezáveis.

A equação de Rosenthal apresenta duas variantes. Uma que se aplica a chapas grossas e permite obter a temperatura segundo três dimensões e outra que se adequa a chapas finas limitando-se a duas dimensões (Adams, 1958; Rosenthal, 1941; Trindade, 2022).

Do balanço de transferência de calor resulta a equação 3D de Rosenthal, com o Calor,  $Q$ , condutividade térmica,  $k$ , e a difusividade térmica,  $\alpha$  :

$$\frac{2\pi k r_0 (T - T_0)}{Q} = e^{\left(\frac{-v_s(r_0-x)}{2\alpha}\right)} \quad Eq. 23$$

Enquanto a equação 2D de Rosenthal é, na qual  $t_{sh}$  representa a espessura da chapa:

$$\frac{2\pi k t_{sh} (T - T_0)}{Q} = e^{\left(\frac{v_s x}{2\alpha}\right)} * K_0 \left(\frac{v_s * r_0}{2\alpha}\right) \quad Eq. 24$$

Sendo que  $r_0$  representa a distância à origem, da fonte de calor:

$$r_0 = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} \quad Eq. 25$$

## 2.11. Gerador do Feixe Laser

---

A espessura relativa,  $\tau$ , é, segundo a AWS, o critério de diferenciação entre a aplicabilidade das duas variações da equação de Rosenthal. Sendo que para valores inferiores a 0,6 considera-se chapa fina e chapa grossa para valores superiores a 0,9. A gama compreendida entre estes dois valores é definida como região de transição sendo sugerido a divisão intermédia de 0,75.

O valor da espessura relativa, é definido segundo a seguinte equação:

$$\tau = t_{sh} \sqrt{\frac{\rho C_p (T_c - T_0)}{Q}} \quad \text{Eq. 26}$$

Sendo que o valor crítico,  $T_c$  pode ser obtido através do diagrama de fases do metal utilizado.

### 2.11. Gerador do Feixe Laser

A fonte do feixe laser é o *Trumpf TruDisk 6602*. Este é baseado num laser de disco *Nd:YAG*, capaz de produzir até 6600 W de potência. Este feixe pode-se dividir em dois canais de fibra ótica, denominados de caminhos óticos, podendo assim ser utilizados em mais do que um equipamento em simultâneo, embora na figura 35 só esteja dedicado a um equipamento. O laser é conduzido até aos equipamentos que o utilizam por meio de um cabo de fibra ótica LLK com um núcleo de 600  $\mu\text{m}$  de diâmetro.



Figura 35 Fonte do feixe laser Trumpf TruDisk 6602.

O feixe de laser produzido por este gerador tem um comprimento de onda de 1030  $\text{nm}$  e um ângulo de divergência no acoplamento de fibra ótica de 8  $\text{mm} * \text{mrad}$ . O gerador de laser é controlado por meio do software *TruControl*, desenvolvido pela *Trumpf* para comandar estes equipamentos. É através da interface deste software que é possível fazer a alocação de potência pelos diversos caminhos óticos, alterar alguns dos parâmetros de soldadura e fazer a seleção entre os modos de soldadura contínua ou

com laser pulsado. A definição dos parâmetros de soldadura é uma tarefa dividida entre o *TruControl* e o software de controlo do robot de soldadura em que alguns dos parâmetros, como é o caso da potência, podem ser definidos em ambos os softwares sem uma posição de precedência bem definida. Isto pode levar a situações em que, por exemplo, é definida a soldadura pulsada no *TruControl* mas o robot poderá realizar cordões com soldadura contínua no caso de haver alguma configuração divergente neste.

### 2.12. Célula de Soldadura

A célula de soldadura é uma estrutura fechada onde se realiza o processo de soldadura, é aqui que se localizam as mesas de soldadura e o robot.

A célula, *TruLaser Robot 5020*, é uma célula destinada à soldadura laser e é comercializada em configurações distintas, tendo em conta a cadência e a natureza das peças a soldar, figura 36.



*Figura 36 - Célula de Soldadura TruLaser Robot 5020.*

A configuração desta célula possui duas estruturas standardizadas, mesas de soldadura, com a finalidade de fornecer um elemento dimensionalmente estável, com superfícies planas e com ancoragem sólida, de modo a permitir a fixação das peças a soldar ou de gabaris de fixação. As mesas de soldadura têm um padrão quadrado de orifícios de 16 mm de diâmetro dispostos com dimensão de 50x50 mm. Estes, permitem a inserção de grampos, esquadros de soldadura ou outros tipos de elementos de fixação, figuras 37 e 38, para posicionamento e fixação rápida.



*Figura 37 Robot e mesa central de fixação.*



*Figura 38 Mesa rotativa de fixação.*

A mesa central está destinada a uma menor cadência de produção ou para montagens que requeiram uma maior flexibilidade por parte do braço robot, como peças de grandes dimensões, por exemplo. Esta mesa dispõe de um controlador de rotação e inclinação que permite a realização de cordões de soldadura em locais de difícil acesso em apenas uma fixação.

A outra mesa, na figura 38, assenta sobre um elemento rotativo que permite a fixação de peças a soldar no exterior em concorrência com o funcionamento do robot no interior, o que permite um aumento da cadência de processamento.

### **2.13. Robot**

O Robot, da marca *KUKA*, figura 39, contém a ótica de focagem laser e o adaptador de gás de proteção de modo a seguir a trajetória programada e assim realizar os cordões de soldadura. O robot conta com 6 eixos de liberdade e é comandado pelo controlador *KRC 02*.

### **2.14. Ótica de Focagem**

Na extremidade do robot encontra-se o sistema ótico de focagem *BEO D70*, figura 40. Esta ótica está equipada com altura de foco motorizada programável controlada através da alteração da distância de colimação e com uma câmara de monitorização auxiliar que permite uma programação mais agilizada do trajeto de soldadura.

Foi utilizado um bocal de gás de proteção unidirecional simples. Para uma maior proteção é possível utilizar um bocal linear, aerador ou um bocal de múltiplos tubos. No entanto, estes aumentam consideravelmente o gasto de gás de proteção, razão pela qual não foram utilizados.



Figura 39 - Robot com ótica de focagem.

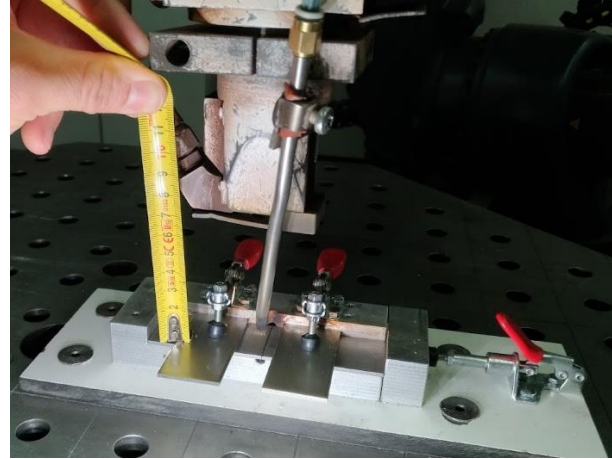


Figura 40 - Ótica de focagem aqundo da programação da trajetória.

Segundo o manual fornecido pela Trumpf para um modelo semelhante o diâmetro focal mínimo pode ser determinado segundo a seguinte relação (Trumpf, 2020):

$$B = 2w_0 = \frac{f_f}{f_c} d_k \quad \text{Eq. 27}$$

Este modelo está configurado com uma distância focal de  $100 \text{ mm}$  e uma distância de colimação de  $150 \text{ mm}$ , pelo que o diâmetro mínimo do feixe tem uma dimensão de  $0,4 \text{ mm}$  segundo o método  $1/e^{-2}$ . Este valor foi confirmado ao realizar vários pulsos de teste, com uma potência reduzida e medindo o seu diâmetro com recurso ao microscópio. Utilizando as equações 10 e 12 para determinar o diâmetro do feixe analisadas anteriormente, é agora possível dispor graficamente a variação deste segundo o eixo de propagação, figura 41, com origem na cintura do feixe.



Figura 41 - Variação do raio do feixe laser segundo o eixo  $z$

A ligeira mudança de declive para  $z=0,001 \text{ m}$ , correspondente a uma altura de foco de  $1 \text{ mm}$ , é resultado da simplificação da transição entre os regimes *far field* e *near field*. Com

estes valores, a determinação da densidade energética do feixe pode ser simplificada ao considerar uma distribuição uniforme de energia pela área de secção.

$$D_E = \frac{P}{A_{feixe}} = \frac{P}{\pi\omega_0^2} \quad Eq. 28$$

### 2.15. Gabari de Fixação

O gabari de fixação foi desenhado para permitir a imobilização dos elementos do provete de modo consistente e rápido, de modo a não interferir com o processo produtivo da empresa.

No desenvolvimento do projeto do gabari foram tomadas decisões com o objetivo de otimizar o processo de soldadura que estão assinaladas nas figuras 42 e 43.

1. Foi realizado um orifício no canto da área de apoio dos provetes, uma vez que estes são propícios ao amontoamento de poeiras, óleo e respingado. Este detalhe faz com que a colocação dos provetes seja mais consistente ao encostar as faces dos provetes contra as paredes do gabari, sem interferência dos cantos.
2. Foram utilizados três grampos de aperto rápido. Dois verticais, modelo GH-201, responsáveis pela fixação do provete no gabari e garantir que as metades do provete se encontram perfeitamente paralelas com a sua base e, conseqüentemente, o alinhamento das faces do provete na face de soldadura. O grampo horizontal, modelo GH-301-AM, responsável por forçar as metades do provete uma contra a outra, reduzindo a folga entre as mesmas e reduzindo a probabilidade de criação de defeitos. A fixação do provete também auxilia na prevenção da distorção do provete soldado, no entanto, este valor não foi medido.
3. A base do gabari é uma placa de um material compósito com quatro orifícios de 16 mm de diâmetro, localizados nos vértices de um retângulo com 50 mm de largura e 200 mm de comprimento de modo a ser compatível com o padrão de orifícios presente em ambas as mesas de fixação. Estes orifícios têm o objetivo de, para além de permitir a fixação nas mesas, localizar o gabari na mesa de soldadura por meio da inserção de pinos de fixação para que deste modo não fosse necessário reprogramar o robot entre sessões.
4. Foi realizado um furo que atravessa o gabari, imediatamente na zona inferior ao cordão de soldadura. Este furo tem duas funções, por um lado evita que o provete fique soldado ao gabari e evita que se danifique o gabari com o objetivo de remover os provetes. Por outro lado permite a passagem de algum gás de proteção na face inferior do provete. No entanto, o bocal de gás de proteção, por ser direcionado à superfície superior do provete, não é o mais adequado. O fluxo de gás na face inferior poderia ser solucionado pela utilização de um bocal linear ou pela utilização de um tubo dedicado à introdução de gás diretamente no gabari na face traseira, algo levado a cabo em trabalhos semelhantes (Amorim, 2016). Estas alterações não foram realizadas pelo que será possível verificar a formação de oxidação da face inferior dos provetes.

5. O topo do gabari desloca-se sobre dois pinos de guiamento, figura 43, que estão fixos ao topo (5) por meio de uma ligação roscada. Os pinos inserem-se no corpo do gabari (4) através de dois orifícios sobre os quais os pinos deslizam. Para facilitar a remoção dos provetes inseriram-se duas molas nos orifícios dos pinos.

Este topo móvel, para além de acelerar o processo de fixação dos provetes faz com que a carga concentrada, que é exercida pelo grampo, seja uniformemente distribuída pela superfície da face do provete e os pinos não permitem que o provete se incline.

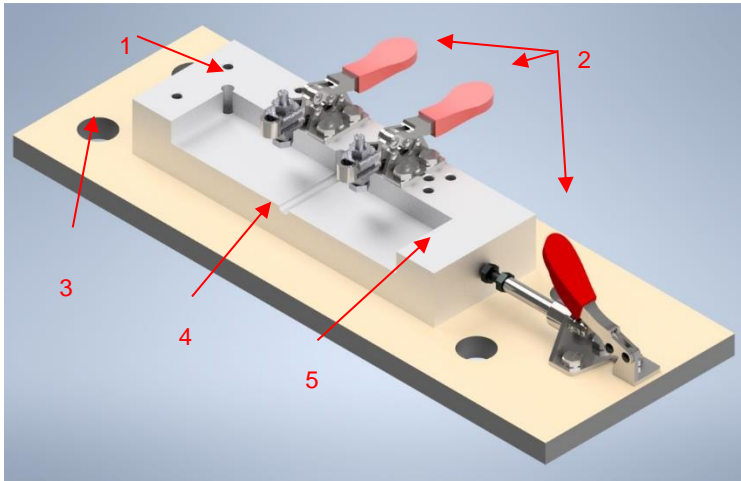


Figura 42 - Modelo 3D do gabari de fixação.

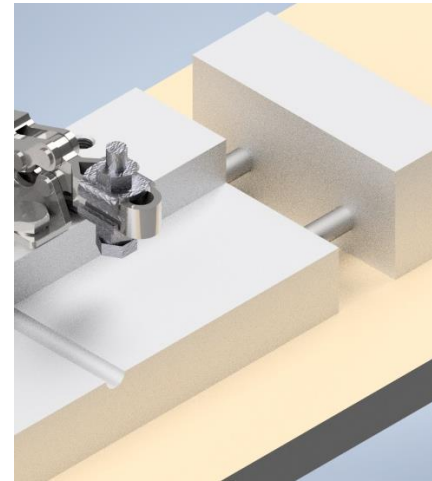


Figura 43 - Topo móvel do gabari.

Todos os elementos constituintes do gabari foram desenhados e otimizados em CAD, à exceção dos grampos e elementos de ligação por se tratarem de elementos estandardizados. A sua construção foi realizada recorrendo a software CAM.



### 3. Resultados e Discussão

Os resultados dos ensaios de tração e principais imagens da microscopia para cada conjunto de provetes, estão catalogados nos Anexos por meio de tabelas, sendo identificados pelo código utilizado durante a realização do procedimento experimental e contêm os parâmetros de soldadura, os diagramas tensão-deformação, as imagens das secções transversais e longitudinais do cordão de soldadura, a densidade energética, energia de soldadura e valores de tensão de cedência e tensão última de cada ensaio de tração. Para facilitar a referência foi feita a correspondência dos códigos a nomes desde Amostra 1 a 9 e A a S.

Todos os provetes apresentam uma depressão que é comum no fim do cordão de soldadura. Esta é, em parte, resultado da contração do metal à medida que este solidifica mas deve-se principalmente à folga entre as metades dos provetes, justificado pela conservação de volume. O facto da soldadura não ter sido realizada com material de adição também contribui para a formação desta depressão. À medida que o cordão é feito, o metal de base preenche a folga entre as metades. Assim que se conclui o cordão o metal na poça de metal fundido não é suficiente para nivelar o cordão pela superfície do provete. Pelo que, o acabamento da face de corte, a folga entre as peças e consequentemente a fixação das peças são fatores determinantes no que diz respeito à mitigação deste defeito. Este defeito é, por norma, mais significativo na face superior sendo, nos cordões com penetração total, visível em ambas a faces. A etapa de fresagem na preparação dos provetes para os ensaios de tração remove este defeito.



*Figura 44 – Vista superior de um cordão de soldadura com a depressão visível no final do cordão*

#### 3.1. Medição de Temperatura

Inicialmente foi registada a temperatura em dois provetes, um recorrendo à soldadura com laser contínuo e outro pulsado. Ambos os ensaios foram realizados com uma altura focal de 2 mm. A soldadura com laser contínuo foi realizada a 2000 W e a pulsada com uma potência de pico de 2600 W e uma razão de duração de pulso/período de aproximadamente 80% de modo que a potência média seja equivalente aos 2000 W da soldadura contínua.

Os provetes soldados com o propósito da realização de medições de temperatura foram soldados sobre uma camada de cartão de juntas de modo que a condução de calor

### 3.1. Medição de Temperatura

fosse mitigada. Isto foi feito para que as condições experimentais se aproximassem do modelo bidimensional de Rosenthal.

Os registos de temperatura encontram-se descritos na figura 45. Apesar da potência média ser igual ao valor da potência utilizada na soldadura com laser contínuo, o provete soldado com recurso à soldadura contínua registou valores de temperatura máxima superiores nos três termopares.

Estas medições estão em concordância com as observações que se têm feito no decurso deste trabalho. A utilização de um feixe de laser pulsado, como assenta na utilização de uma potência de pico superior àquela utilizada na soldadura contínua, sujeita o metal a temperaturas mais elevadas, o que dá lugar a uma maior taxa de produção de gás e plasma. O plasma não tem condições de continuar nesse estado fora do cordão, mas transfere a energia térmica em si contida por meio de radiação e para o ambiente que o rodeia. Os gases são deslocados pela nova formação de gases no centro da poça de fusão e são removidos pelo fluxo contínuo de gás de proteção, arrastando consigo uma determinada quantidade de energia térmica. Deste modo, e ainda que a radiação do feixe laser seja efetivamente absorvida pelo metal base, há uma maior percentagem de calor, e de massa, rejeitado para o meio envolvente. Podendo-se tratar como uma redução do coeficiente de absorção, o que explica a diferença nas medições de temperatura realizadas.

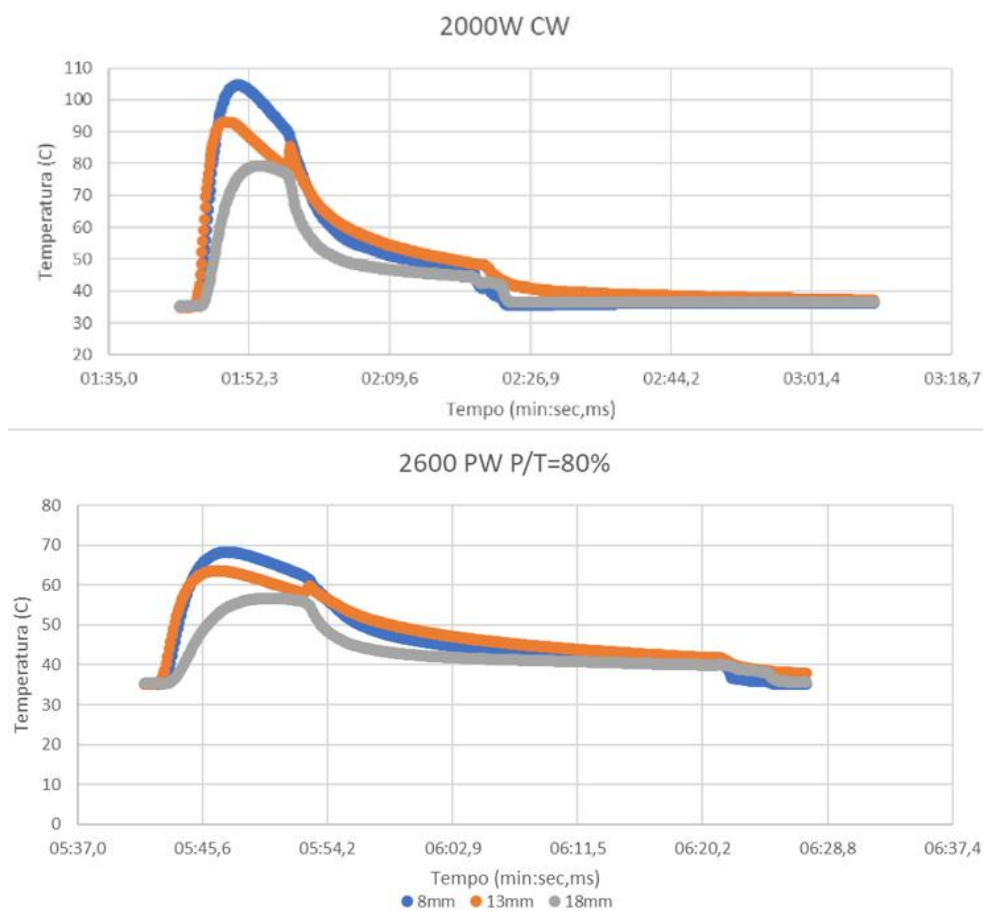


Figura 45 – Medições de temperatura para soldadura com laser contínuo (superior) e pulsado (inferior).

Foi ainda realizada a medição de temperatura num outro provete soldado com laser pulsado com uma potência de pico de 3000 W sendo todos os outros parâmetros idênticos. E, mesmo com uma potência média superior a 2000 W, foram registados valores de temperatura inferiores àqueles registados na soldadura com laser contínuo, figura 46.

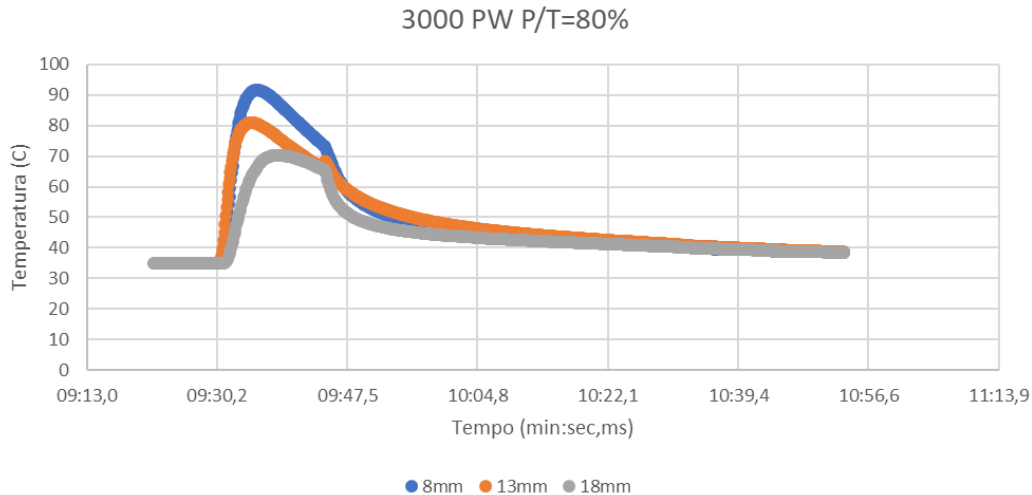


Figura 46 - Medições de temperatura para soldadura de laser pulsado com 3000 W de potência de pico.

Os valores de temperatura medidos devem ser considerados como estando associados a margens de erro significativas pois não foram contabilizados os valores da resistência térmica de contacto nem o isolamento do cartão de juntas onde se encontravam inseridos os termopares. Mas, apesar disto, sendo a preparação experimental idêntica em todas as medições, os resultados têm validade em termos comparativos.

### 3.1.1. Aplicabilidade das Equações de Rosenthal

No caso específico dos provetes e segundo os critérios utilizados pela AWS, deve ser considerada a equação de Rosenthal adaptada a 2D que se aplica a chapas finas. A equação de Rosenthal baseia-se na transferência de calor numa peça metálica semi-infinita de pequena espessura, e a utilização da equação tridimensional implica uma transferência de calor segundo o eixo da espessura que não se verifica no caso da soldadura de chapas finas descrevendo uma queda da temperatura demasiado acentuada com o aumento da distância da junta de soldadura.

Como a equação de Rosenthal considera uma chapa infinita, permite a determinação da temperatura em qualquer ponto e em qualquer instante. Com o valor da velocidade de soldadura é possível estabelecer uma relação proporcional com o tempo, obtendo assim a variação do valor de temperatura em função do tempo, permitindo realizar uma comparação com os valores medidos experimentalmente. A figura 47 representa o modelo teórico de distribuição de temperatura baseado na equação 24, para uma potência de 2000 W, no final da realização do cordão numa metade de um provete com as dimensões padronizadas, do lado esquerdo, e 0,4 segundos após a conclusão da realização do cordão, do lado direito. É de notar que o eixo da temperatura não está à mesma escala. O coeficiente de absorção utilizado foi retirado do gráfico apresentado na figura 4, na interceção entre a curva correspondente às ligas ferrosas e o comprimento de onda característico dos equipamentos Nd:Yag.

### 3.1. Medição de Temperatura

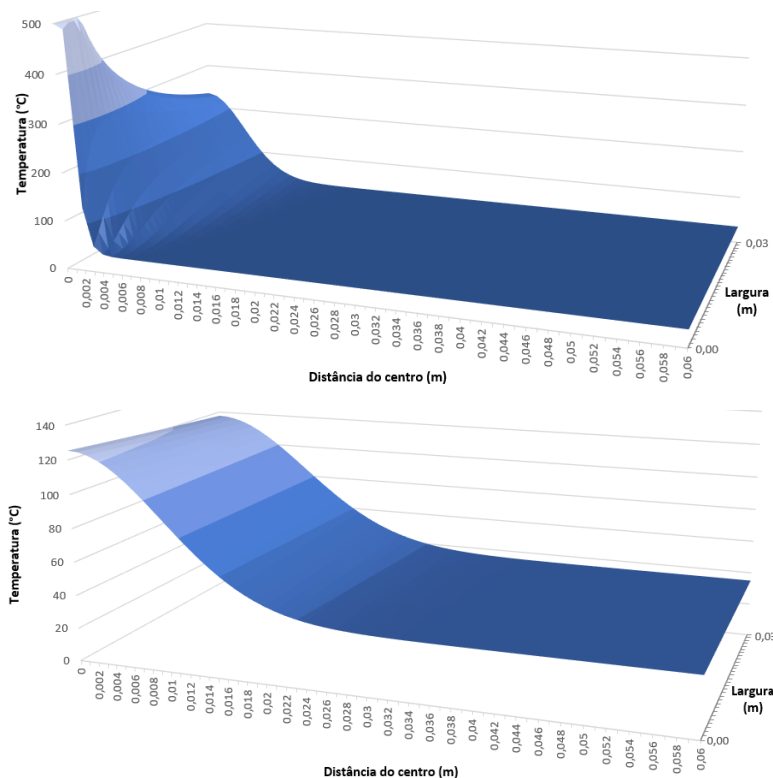


Figura 47 – Distribuição de temperaturas para  $t=0,8s$  (cima) e  $t=1,2s$  (baixo).

Ao intercalar o plano tempo-distância do centro, para as distâncias às quais foram realizadas as medições experimentais, obtém-se o gráfico da figura 48 que traduz a variação da temperatura a uma determinada distância de acordo com o tempo decorrido. As séries de dados sem preenchimento correspondem ao mesmo exercício com a utilização da equação tridimensional de Rosenthal, equação 23, para servir como termo de comparação.

A equação de Rosenthal tridimensional não se enquadra com as medições realizadas. Segundo este modelo a temperatura máxima a  $8\text{ mm}$  do cordão seria  $50^{\circ}\text{C}$ . As medições realizadas para a soldadura contínua a  $2000\text{ W}$  registaram um valor de  $105^{\circ}\text{C}$  para a mesma distância. Na realidade, pelas razões mencionadas previamente, este valor é inferior ao real. Como a equação de Rosenthal tridimensional supõe a existência de uma peça de dimensões semi-infinitas segundo os três eixos, o calor entregue pelo raio laser dissipa-se rapidamente e não provoca o aumento de temperatura verificado experimentalmente à medida que aumenta a distância do cordão.

O modelo tridimensional resulta em valores de temperatura muito inferiores aos medidos na soldadura com laser pulsado e com laser contínuo pelo que não pode ser justificado pelo erro de medição dos termopares, indo deste modo ao encontro das recomendações da AWS.

Para o modelo bidimensional, no entanto, a imprecisão de medição dos termopares não impossibilita os valores medidos experimentalmente. Sendo possível enquadrar esta discrepância com a hipótese do aumento do coeficiente de absorção, sugerida para justificar a diferença entre os valores experimentais registados na soldadura contínua e pulsada com o valor de potência média equivalente. A soldadura em modo *keyhole* com laser contínuo é caracterizada pela reflexão do feixe no interior do orifício o que se

reflete num coeficiente de absorção superior àquele retirado graficamente. A soldadura pulsada, por sua vez, tem uma potência de pico superior à potência de soldadura contínua que resulta numa maior taxa de formação de gás e plasma, que se traduz numa redução do coeficiente de absorção. Por outro lado, a interrupção do feixe resulta no colapso do orifício pelo que o feixe não é absorvido através de múltiplas reflexões no interior do mesmo.

O modelo pode ser facilmente ajustado para fazer refletir os resultados experimentais, no entanto, a relação entre o coeficiente de absorção e a potência de pico não é clara. Para além disto, o modelo ainda assume a existência de uma chapa infinita. O uso destas equações nunca resultaria na mesma precisão que se esperaria de um modelo diferencial com condições de fronteira definidas que para além da condução considerasse a transmissão de calor à superfície por meio de radiação e convecção. No entanto, resultou em valores aproximados daqueles verificados experimentalmente e pode facilmente ser ajustado.

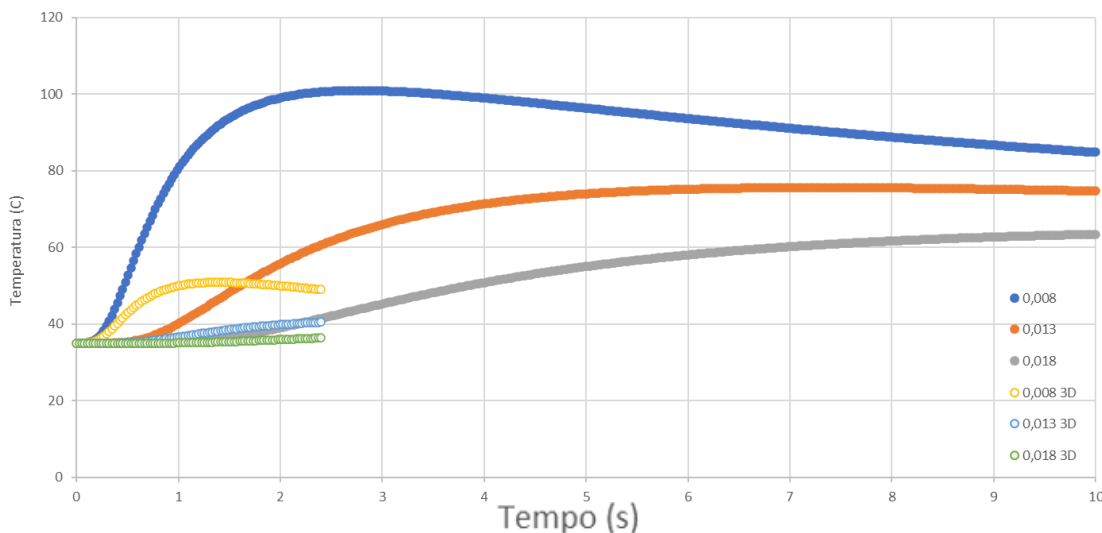


Figura 48 - Ciclo térmico para 8, 13 e 18 mm, segundo o modelo 2D (preenchido) e 3D (sem preenchimento) de Rosenthal.

### 3.2. Avaliação da Influência da Variação da Potência

As amostras 1 a 5 compreendem o universo de amostras utilizadas na avaliação da influência da potência nas características do cordão de soldadura. A correspondência com a parametrização encontra-se na tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de correspondência das amostras 1 a 5.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Modalidade de soldadura	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua
Potência [W]	1600	1800	2000	2200	2400
Altura focal [mm]	0	0	0	0	0

### 3.2. Avaliação da Influência da Variação da Potência

Nenhum dos ensaios de tração das amostras 1 a 5 resultou na rotura dos provetes pelo cordão de soldadura, figura 49.



Figura 49 - Provetes das amostras 5 a 1, da esquerda para a direita respetivamente, utilizados nos ensaios de tração.

Apesar do valor de potência recomendado ser de 2000 W, verificou-se penetração total do cordão em todas as amostras testadas.

É de notar que se verificou a deposição de partículas oxidadas na face inferior das amostras 3 a 5, inclusive, figura 50. A presença de oxidação na face inferior dos provetes parece ser resultado do fluxo reduzido ou nulo de gás de proteção nesta face, como foi previamente mencionado no que diz respeito ao design do gabari de fixação. Também é possível que a falta de gás de proteção nesta face tenha desempenhado um papel potenciador na ejeção de partículas. A presença deste defeito nos provetes da amostra 3 era expectável uma vez que, apesar da potência ser a recomendada pelo fabricante. O facto de a altura de foco ser de 0 mm, resulta num aumento da densidade energética de 835% face à densidade energética para uma altura de foco de 2 mm, consequência da diminuição da área do feixe.



Figura 50 - Superfície inferior das amostras 3 a 5 da esquerda para a direita respetivamente.

As amostras 1 e 2, figura 51, resultaram em cordões de soldadura com um bom aspeto exterior. Apesar de se verificar a formação de oxidação, evidenciada pela descoloração

em gradiente de cores, característica da exposição do aço a elevadas temperaturas em atmosferas oxidantes, não existe a deposição de partículas em nenhuma das faces. Este facto corrobora a hipótese de que o mecanismo principal por detrás da ejeção de partículas seja a densidade energética elevada.

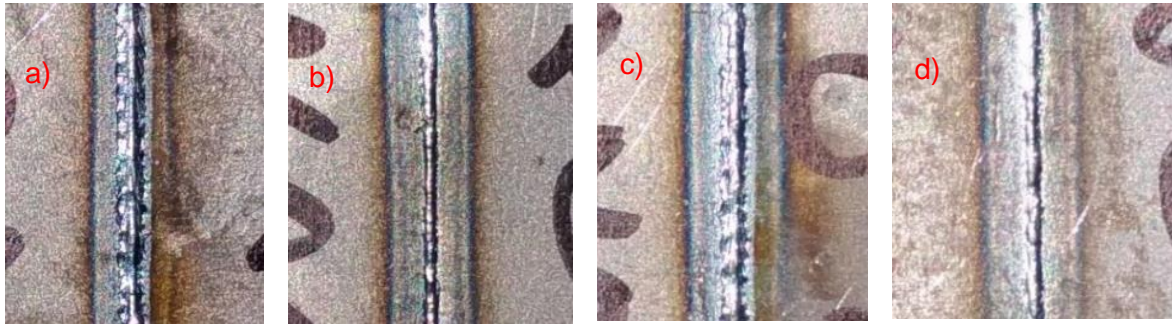


Figura 51 – Faces superiores, a e c, e inferiores, b e d, das amostras 1 e 2 respetivamente.

A amostra 1, correspondente à soldadura contínua a 1600 W, foi a que apresentou o maior valor de tensão de cedência com 315,815 MPa, apenas 330 kPa acima do valor obtido para os provetes da amostra 2. No entanto, as amostras seguintes demonstraram uma tendência decrescente, à exceção da amostra 4. Apesar de não se encaixar na linha de progressão das restantes amostras, pelo valor médio, apresenta um aumento do desvio padrão em concordância com o expectável, na figura 52 é possível verificar os valores de tensão de cedência e tensão última para as respetivas amostras com o respetivo desvio padrão.

Os resultados dos ensaios de tração podem não ser totalmente conclusivos uma vez que não existe uma variação de valores entre amostras significativa. Todos os provetes falharam por estiramento e o número de provetes em cada amostra é reduzido. No entanto, a tendência decrescente da tensão de cedência com o aumento de potência de soldadura pode dever-se ao aumento da energia de soldadura. Uma vez que, desde que no mesmo regime de soldadura, existe uma relação proporcional entre o aumento de potência e a temperatura, alterando deste modo as propriedades mecânicas do material.

Ainda que a amostra 1 apresente valores de tensão de cedência superiores à amostra 2 também tem um desvio padrão superior. No caso dos parâmetros de soldadura se situarem no limite inferior do regime *keyhole*, isto pode dever-se à instabilidade do orifício. A parametrização da amostra 2, tem uma melhor relação entre o desvio padrão e a tensão de cedência e aparenta ser a potência mais adequada para as respetivas variáveis fixas.

A tensão última mantém-se estável em todas as amostras. A amostra 5 apresenta o menor valor, 391 MPa, mas permanece em linha com as outras amostras.

### 3.2. Avaliação da Influência da Variação da Potência

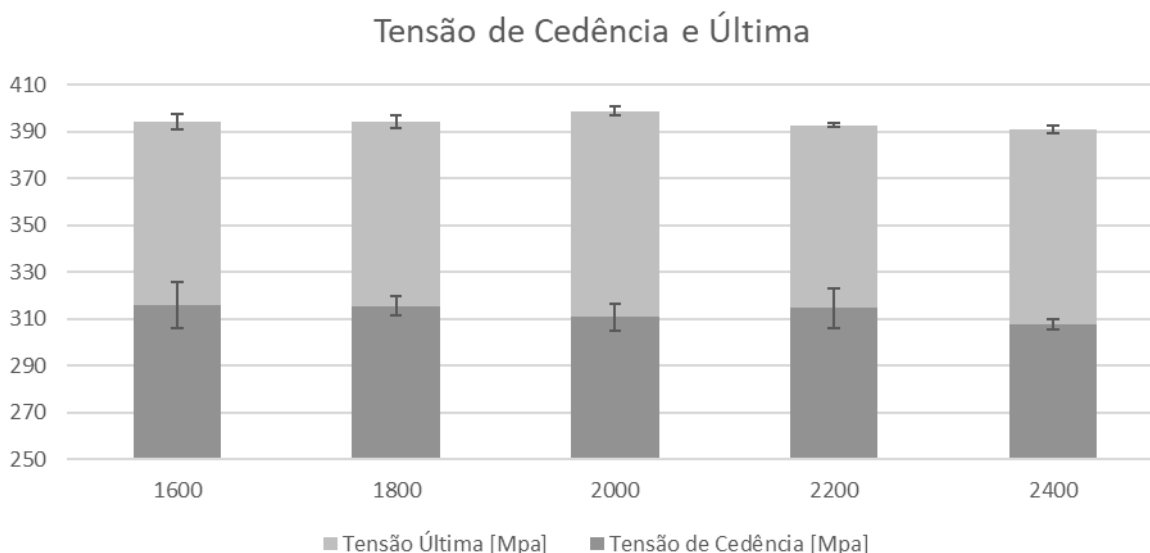


Figura 52 – Gráfico relativo à tensão de cedência e tensão última em função da potência (W), das amostras 1 a 5, com desvio padrão.

A figura 53 contém a secção transversal de vários ensaios realizados entre as potências de 200 e 1400 W. Estes testes foram realizados para que fosse possível definir os patamares de densidade energética do feixe laser que separam as modalidades de soldadura visando a confirmação da suposição no que diz respeito aos parâmetros recomendados pelo fabricante do equipamento se situarem no regime de *keyhole*.

Os ensaios realizados com uma potência compreendida entre 200 e 800 W, que correspondem a uma densidade energética de 1591,55 W/mm<sup>2</sup> e 4774,65 W/mm<sup>2</sup>, resultaram num cordão representativo da soldadura por condução. É possível que o cordão feito a 800 W se localize no início da região de transição, devido à alteração da forma.

Para as potências de 1000 e 1200 W, correspondentes a uma densidade energética de 7957,75 e 9549,30 W/mm<sup>2</sup> respetivamente, verificou-se um aumento considerável da penetração, no entanto, a forma não tem uma razão entre a profundidade e a largura que se enquadre totalmente na modalidade *keyhole*. No último ensaio, realizado a 1400 W com uma densidade energética de 11140,84 W/mm<sup>2</sup>, a profundidade aumentou excedendo a proporcionalidade estabelecida nos dois testes anteriores sugerindo que este se situa na gama superior do regime de transição ou em pleno regime *keyhole*.

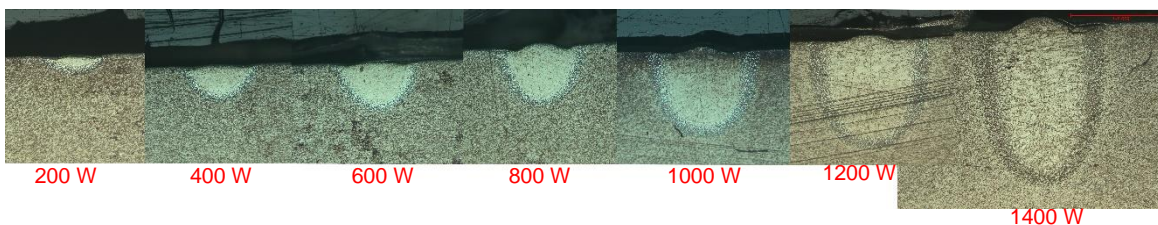


Figura 53 – Cordões de soldadura com laser contínuo com potência de 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1400W da esquerda para a direita.

A metalografia dos cordões demonstra a estrutura colunar dos grãos metálicos característica de um cordão de soldadura. Os grãos tomam esta forma devido ao sentido

da frente de solidificação na poça de fusão e por se encontrarem limitados na sua expansão pelos grãos que o rodeiam.

Ao analisar a microestrutura do perfil transversal ao cordão da amostra 1, figura 54 a), é claro que foi realizado na modalidade de soldadura *keyhole*, devido à forma do cordão e rácio entre profundidade e a largura. Sendo que esta é a amostra com valor de potência de soldadura mais baixo, no que diz respeito à avaliação da influência da variação da potência de soldadura, é de esperar que o resto das amostras se vão relegar à soldadura laser em regime de *keyhole*, tal como confirmado pelos ensaios anteriores.

O cordão apresenta a forma aproximada de uma hipérbole, sendo que tem uma largura mais reduzida na metade inferior. Apesar desta forma, a ZTA no seu ponto mais largo é a mais pequena do conjunto das amostras 1 a 5, com 75% da largura da ZTA da amostra 5, a mais larga, correspondente à soldadura contínua com 2400 W de potência.

A forma do cordão pode levar a crer que o feixe laser esteja focado no centro da chapa, pois o raio do feixe laser apresenta uma forma semelhante segundo o eixo de propagação. No entanto, esta forma pode ser explicada pelas correntes de metal fundido laterais ao orifício característico da soldadura *keyhole*. Sendo que a potência de soldadura é 400 W inferior à potência recomendada. É possível que os parâmetros de soldadura se situem ligeiramente acima do limite do regime de transição entre os modos condução e de *keyhole*. Neste caso, a energia de soldadura não é suficiente para fundir e sustentar uma corrente de metal lateral de modo uniforme ao longo da profundidade da chapa, verificando-se a diminuição do diâmetro da poça de fusão de acordo com o aumento da profundidade. Na face inferior da chapa, o cordão volta a alargar ligeiramente devido à corrente de metal fundido vertical no fundo do orifício, para além disso, o aumento da inclinação da parede frontal no fundo do orifício aumenta, resultando numa maior absorção devido às múltiplas reflexões do feixe (Schäfer, 2018). Na imagem 54 b) estão identificadas três correntes distintas para um caso específico. Identificada pelo número II está representada a corrente responsável pelo alargamento do cordão na sua extremidade.

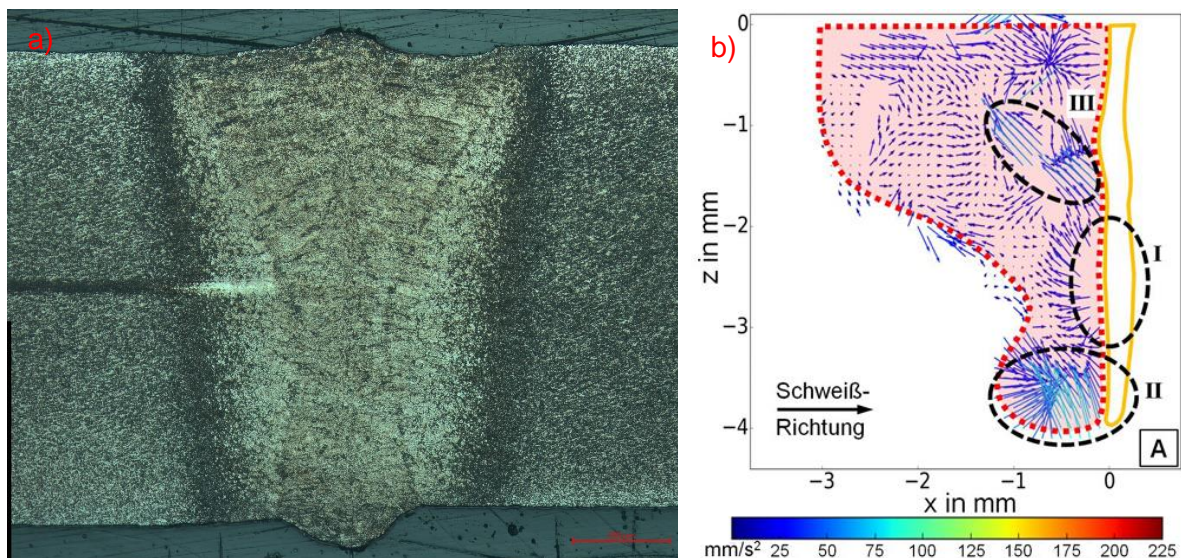


Figura 54 – Perfil transversal do cordão da amostra 1 a) e gráfico vetorial representativo das correntes metálicas no interior do cordão, b) (Schäfer, 2018).

### 3.2. Avaliação da Influência da Variação da Potência

Na figura 55, está identificado pelo número I um cordão de soldadura com uma parametrização semelhante à da amostra 1.

Na situação identificada pelo número III o perfil da poça de metal fundido não é resultado de uma única corrente circular, o metal flui em sentidos opostos encontrando-se a meio da poça. No entanto, estes complementam-se numa forma aproximadamente retangular. Na primeira situação (I), a energia de soldadura não é suficiente para conseguir criar uma corrente de metal consolidada no fundo do orifício, dividindo-se em duas regiões distintas, estrangulando a poça de fusão imediatamente acima da corrente do fundo do orifício. Este estrangulamento faz com que o metal aqui solidifique antes do que aquele no fundo do orifício, enquanto num cordão com penetração total isto se manifeste como uma mera depressão na face oposta, num cordão com penetração parcial é potenciada a formação de fraturas no fundo do cordão devido à acumulação de tensões provocadas pela contração resultado da solidificação. Apesar disto, não foram encontrados defeitos deste tipo nesta amostra.

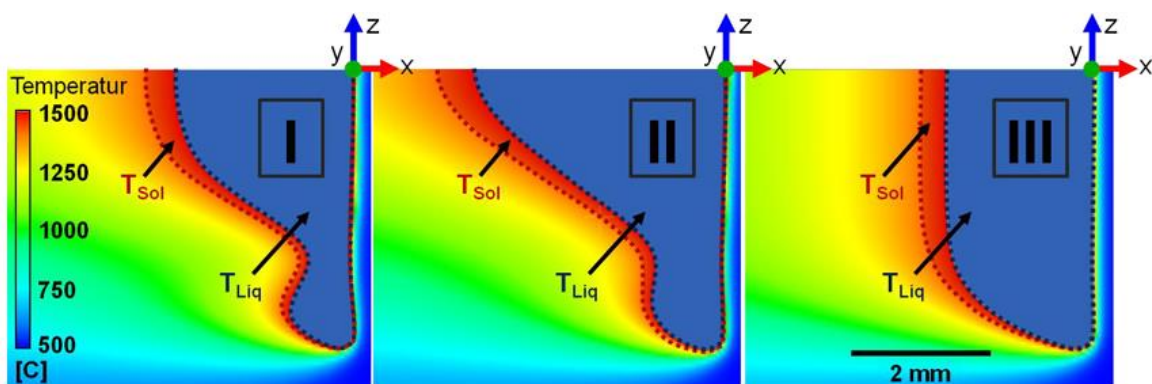


Figura 55 - Perfil da poça de fusão de cordão de soldadura para 2,4 kW, I e 2,7 kW, II e 2,7 kW com perfil de radiação uniforme III (Schäfer, 2018).

Nas imagens da figura 56 é possível ver os defeitos encontrados na secção longitudinal do cordão. O da figura 56 a) tem uma forma esférica e é consistente com um defeito de porosidade, este é de dimensões reduzidas e pontual não tendo sido encontrado outro deste tipo. O defeito apresentado na figura 56 b) também não é consistente com uma fissura. Para além de também ser pontual situava-se no fim do cordão e a sua dimensão e forma levam a crer que se trata de uma inclusão sólida devido a uma limpeza ineficaz das metades de provete embora esta tenha sido feita com o máximo cuidado. As chapas de S235JR são revestidas por um filme de óleo residual do seu processamento e para prevenir a sua oxidação. Antes de soldar os provetes, as metades foram limpas utilizando um solvente industrial, também utilizado na limpeza de discos de travão, a sua evaporação sem remoção mecânica resultaria no depósito de óleo na junta e a formação de gases pode ser resultado da sua decomposição devido à exposição a uma elevada temperatura, esta aparenta ser a causa mais provável deste defeito.

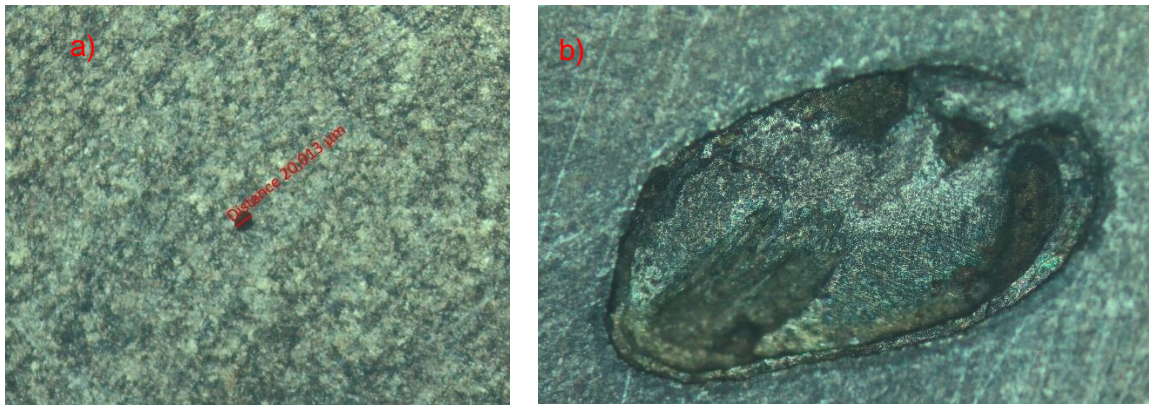


Figura 56 -Defeitos detetados no perfil longitudinal da amostra 1.

A existência destes dois defeitos não implica, pelas razões descritas anteriormente, que estes parâmetros resultam na formação de defeitos *per se*.

A análise do perfil transversal do cordão da amostra 2, figura 57, correspondente à soldadura contínua com 1800 W, corrobora a hipótese do mecanismo por detrás da forma do cordão da amostra 1. Isto porque com um incremento da potência de soldadura foi possível criar uma poça de fusão com paredes aproximadamente paralelas. Apesar do aumento da potência de soldadura ser de 12,5% face à amostra 1, de 1600 W, a ZTA apenas aumentou cerca de 7,5 %.

Ainda que a área da ZTA seja superior à da amostra 1, este cordão é objetivamente superior aos outros deste conjunto. O facto de a poça de fusão ter paredes paralelas é benéfico na medida em que a contração do material na superfície superior e inferior será igual. Isto significa que a chapa é menos propensa ao desenvolvimento de distorções durante a solidificação.

Além disso, as superfícies superiores e inferiores têm um bom aspeto sem que haja pontos de acumulação de tensões ou outro tipo de defeitos.

Não se verificou a existência de nenhum defeito. Por estas razões, para o laser focado à superfície, este valor de potência aparenta ser o mais adequado.

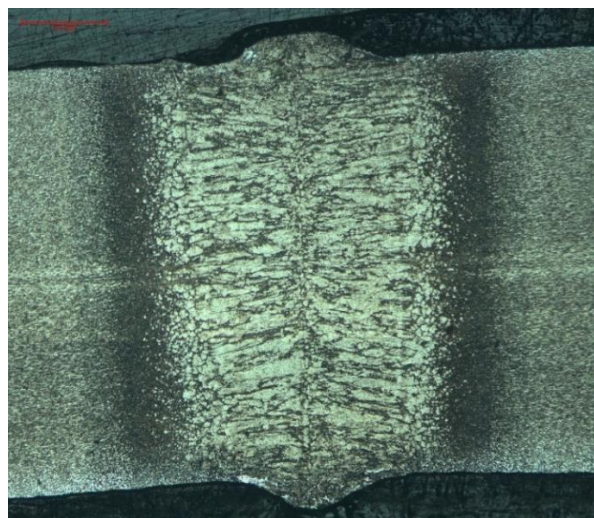


Figura 57 – Perfil transversal do cordão da amostra 2.

### 3.2. Avaliação da Influência da Variação da Potência

O perfil transversal ao cordão da amostra 3, figura 58, demonstra novamente a forma de uma hipérbole que se vai intensificando nas amostras seguintes, de acordo com o aumento da potência. Aqui a forma não é explicada pelo mesmo mecanismo que está por detrás da forma do cordão da amostra 1. No entanto, enquadra-se num modelo fundamentado nas correntes de metal transversal ao feixe laser. Estas podem provocar a deformação do provete durante a solidificação. E a possibilidade de uma menor retenção de gases, reduzindo a probabilidade da formação de porosidade. Na superfície inferior também se encontra um defeito do tipo de mordedura, que provavelmente se deve a uma folga entre as metades do provete durante a sua fixação ou pela ejeção de material evidenciado pela formação de respingado. A formação de respingado é capturada no perfil transversal da amostra 4 na face inferior na qual, por acaso, se fixou uma gotícula de metal ejetada na secção de corte. Nas amostras 3, 4 e 5, como é evidenciado na figura 58, verificou-se o ligeiro escoamento ou afundamento do cordão no sentido da superfície inferior. Isto vai em linha com os restantes indícios que indicam uma potência de soldadura elevada.

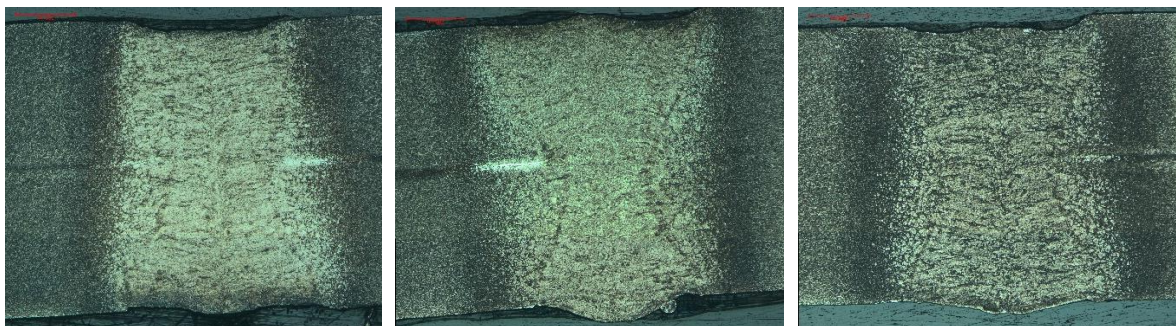


Figura 58 – Perfis transversais das amostras 3, 4 e 5 da esquerda para a direita.

As amostras demonstraram um aumento da ZTA proporcional ao aumento da potência de soldadura como é possível comprovar pelo gráfico da figura 59.

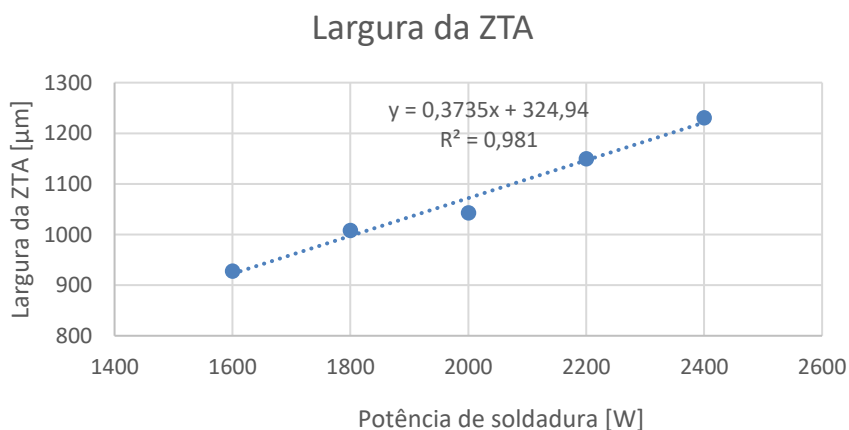


Figura 59 – Evolução da largura da ZTA no seu ponto mais largo.

Apesar da amostra 2, 1800 W, ter apresentado os melhores resultados de resistência, utilizou-se a potência de 2000 W na avaliação da variação da altura de foco devido à elevada densidade energética nos ensaios com uma altura de foco de 0 mm e também por se tratar do valor de potência recomendado pelo manual do fabricante. No caso de

se utilizar a potência de 1800 W, sabendo que o incremento ou diminuição da distância focal invariavelmente irá diminuir a densidade energética do feixe na superfície do metal, resultaria num cordão pior, não permitindo assim a retirada de conclusões abrangentes.

### 3.3. Avaliação da Influência da Variação da Altura de Foco

A avaliação da influência da variação da altura de foco compreende as amostras 6 a 9 e A a D, conforme discriminadas na tabela 4.

Tabela 4 – Correspondência das amostras 6 a 9 e A a D à parametrização.

	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8	Amostra 9	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D
Modalidade de soldadura	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua	Contínua
Potência (W)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Altura focal (mm)	-2	-1,5	-1	-0,5	0,5	1	1,5	2

Todas os provetes falharam por estrição fora do cordão de soldadura, figura 60.

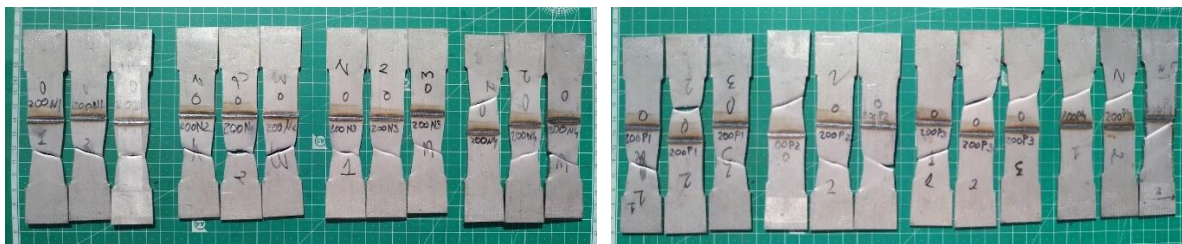


Figura 60 – Amostras 9 a 6 e A a D da esquerda para a direita respetivamente.

Os parâmetros de soldadura das amostras 6 até à A resultaram na formação de respingado na face inferior dos provetes, sendo mais pronunciado nos provetes 7, 8 e 9, figura 61. É clara a relação entre a proximidade do ponto focal e a superfície inferior com a formação de respingado, mas esta não se aplica à amostra 6. Há duas hipóteses que podem explicar este facto. O ponto focal, estando localizado acima da superfície inferior, origina a formação de bolsas de gás que ao acompanharem a corrente de metal fundido aproximam-se da face inferior e a erupção destas bolsas resultam na expulsão de gotículas de metal fundido. Se o ponto focal se situar na face inferior é provável que o orifício se estenda até esta. Ao mesmo tempo, se o ponto focal for coincidente com a face inferior, significa que o feixe terá um maior diâmetro quando atravessa a face superior, logo uma menor densidade energética e será absorvido por mais material ao longo da espessura da chapa.



Figura 61 – Superfície inferior de provetes das amostras 6 a A.

As amostras B e C, figura 62, demonstraram um bom acabamento em ambas as faces com penetração total.



Figura 62 – Superfícies superior e inferior dos cordões da amostra B e C.

Apesar de se utilizar a parametrização recomendada pelo fabricante na amostra D, os cordões de soldadura demonstram que a distância do ponto focal à superfície dos provetes é demasiado elevada, não se obtendo uma penetração completa, figura 63.



Figura 63 – Superfície superior e inferior do cordão de soldadura da amostra D.

Os valores de tensão última e de cedência, figura 64, obtidos através dos ensaios de tração demonstram que os valores são relativamente próximos entre as amostras 8 a B, sendo inferior para as amostras com uma altura focal superior ou inferior a 1 mm. A amostra 6 deve a sua diferença em relação às restantes amostras, devido a um único provete, provavelmente causado por um erro na calibração dos equipamentos ou defeito na chapa, pelo que os valores apresentados não são representativos.

Ainda que a rutura não tenha ocorrido pelo cordão em nenhum provete, é provável que a distribuição do feixe laser numa área maior tenha resultado num maior coeficiente de absorção. Apesar de nenhum provete ter falhado pelo cordão de soldadura é possível que a deformação diferencial entre cordões, devido à parametrização diferente, resulte numa acumulação de tensões para além da ZTA. Ainda assim não é possível comprovar esta suposição devido à consistência dos resultados. Ainda assim, a amostra que apresenta melhores resultados, é a amostra B.

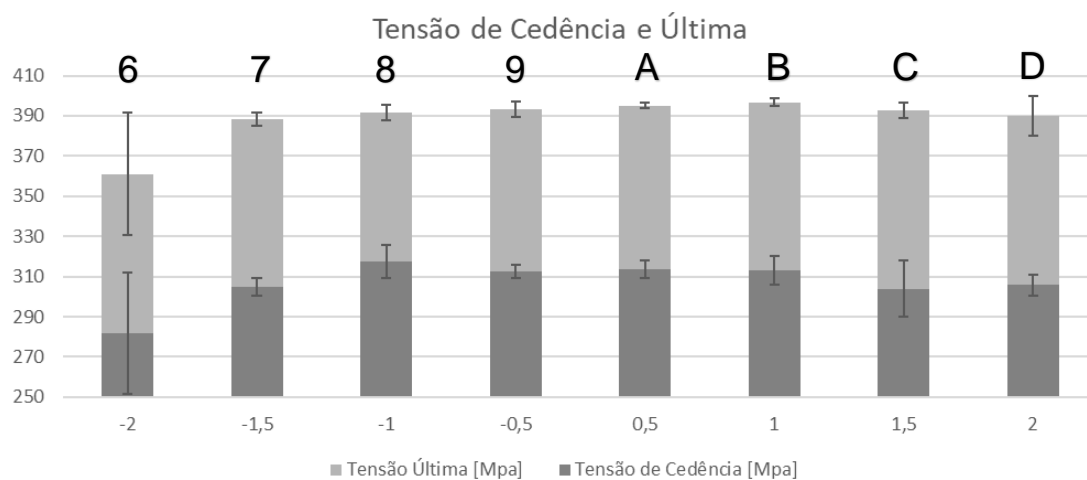


Figura 64 - Tensão de cedência e última para os provetes 6 a A, em função da altura de foco.

A partir da análise do perfil transversal dos cordões das amostras 6 a 9 é possível observar que estes têm uma forma de hipérbole sendo mais acentuada à medida que a distância focal se aproxima da superfície superior da chapa, figuras 65 e 66, facto explicado pela forma do feixe laser ao longo da espessura da chapa.

A amostra 7 apresenta um defeito do tipo de mordeduras junto da superfície superior. Devido à reduzida dimensão deste defeito, não é possível afirmar se a sua existência percorre toda ou grande parte do comprimento do cordão. É possível que se trate de um defeito pontual, no entanto, é claro o decaimento do cordão segundo a superfície superior ao longo do comprimento do cordão, o que indica uma potência de soldadura ou coeficiente de absorção demasiado elevados. Do conjunto de amostras 6 a 9, apenas a amostra 6 não apresenta esta depressão. Este defeito é mais claramente visível nas amostras 8 e 9, figura 66. Está associado à existência de respingado, um indicador de uma elevada concentração energética devido à reduzida área de secção do feixe laser.

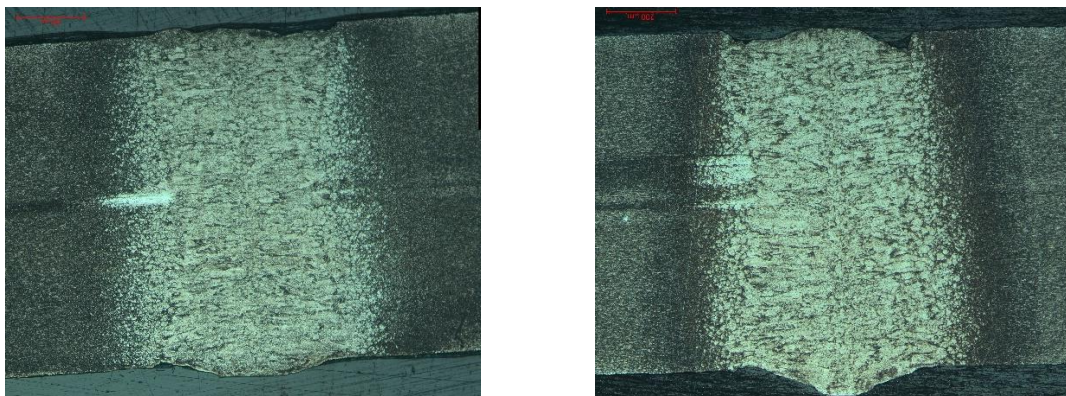


Figura 65 - Perfis transversais do cordão das amostras 6 e 7.

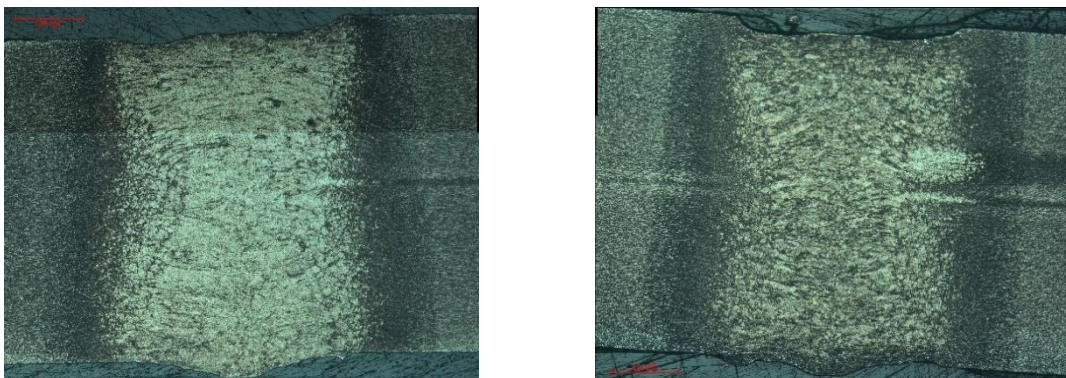


Figura 66 - Perfis transversais do cordão das amostras 8 e 9.

Foram encontrados alguns poros, junto à superfície inferior da amostra 7, na análise do perfil longitudinal ao cordão de soldadura, figura 67. A localização dos poros corrobora o mecanismo por detrás da formação do respingado.



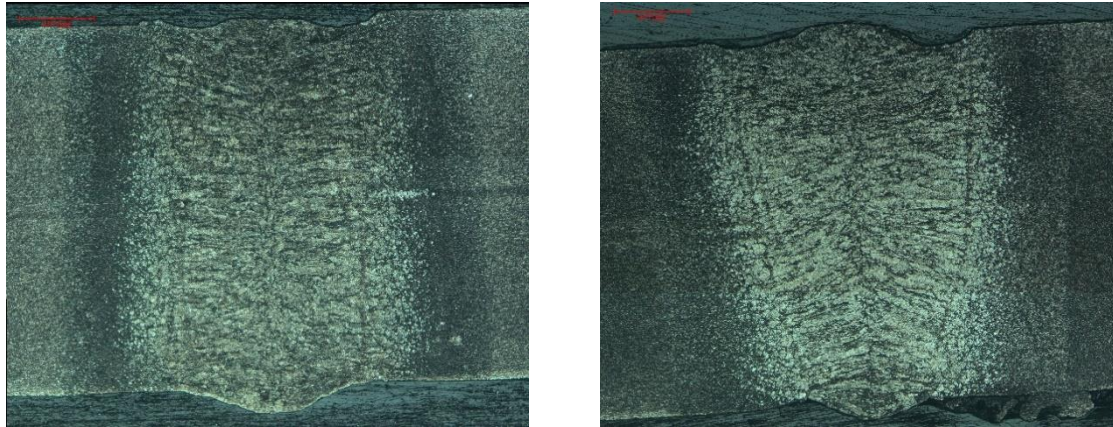
Figura 67 – Perfil longitudinal do cordão de soldadura da amostra 7.

O cordão da amostra A, figura 68, também apresenta um ligeiro afundamento do cordão de soldadura, o que mais uma vez vai em concordância com os resultados de algumas amostras anteriores que indicam uma densidade energética elevada ou elevado coeficiente de absorção.

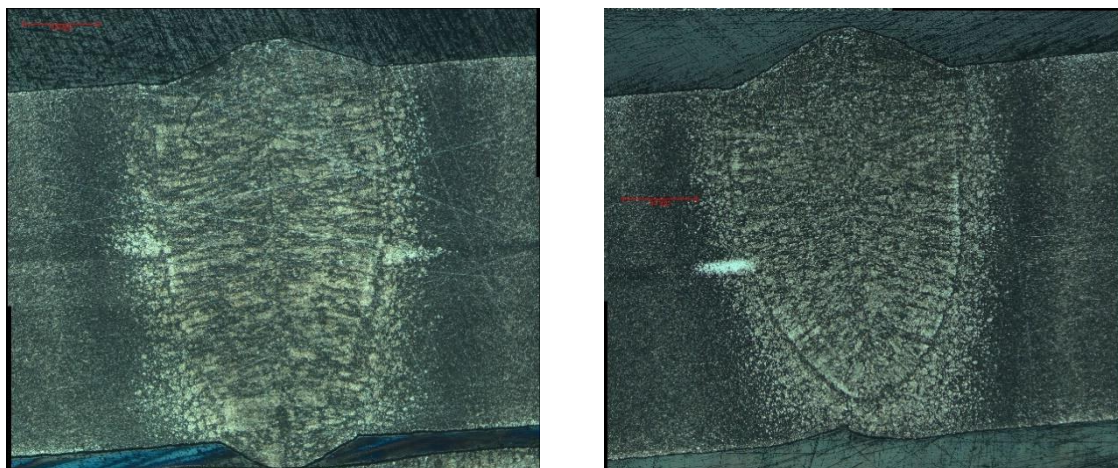
As amostras B e C resultaram nos melhores cordões do conjunto de avaliação da influência da variação da altura de foco. Ainda que exista uma diferença entra a largura do cordão junto da face superior e inferior, pode causar o empenamento das peças soldadas. A amostra C apresentou uma fissura no seu perfil transversal. No entanto, este

tipo de defeito não foi encontrado no perfil longitudinal do cordão e como tal foi tratado como um defeito pontual, figuras 68 e 69.

A parametrização da amostra D, provou ser incapaz de penetrar a totalidade da espessura dos provetes apesar de se tratar da parametrização recomendada pelo fabricante do equipamento. Dada a progressão dos ensaios, a única explicação prende-se a uma reduzida densidade energética, figura 69.



*Figura 68 - Perfis transversais dos cordões das amostras A e B.*



*Figura 69 – Perfis transversais dos cordões das amostras C e D.*

Ainda que a densidade energética dos pares 6-D, 7-C, 8-B e 9-A seja a mesma, pois a área de seção do laser na superfície superior dos provetes é a mesma, as amostras nas quais a altura focal é negativa demonstram uma maior capacidade de penetração. Este facto é intuitivo pois enquanto nas amostras nas quais a altura focal é positiva, os provetes encontram-se do lado divergente do feixe laser o que implica que a densidade energética diminua ao longo da espessura, nas amostras com altura focal negativa verifica-se a situação inversa. Apesar do aumento da penetração, a utilização de uma altura focal negativa é contrabalançada pela deterioração do acabamento superficial e a propensão à formação de porosidade no interior do cordão.

### 3.4. Definição da Frequência de Soldadura por Laser Pulsado

Ainda que a posição do ponto de maior largura da ZTA varie, o seu valor permanece relativamente constante, independentemente da altura do ponto focal, ainda que demonstre simetria em relação à origem do referencial, figura 70.

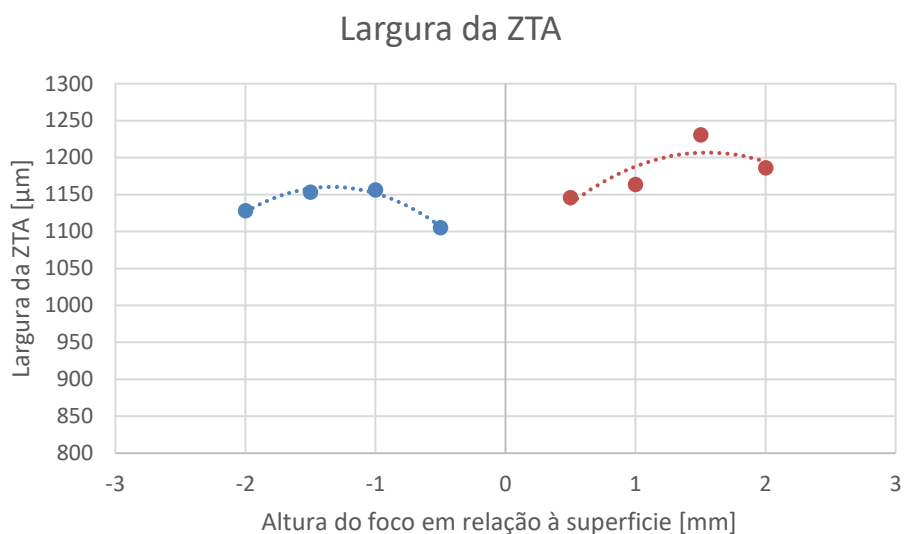


Figura 70 - Variação da largura da ZTA para as amostras 6 a D.

### 3.4. Definição da Frequência de Soldadura por Laser Pulsado

A partir da equação 16, que relaciona a frequência com a sobreposição, velocidade de soldadura e diâmetro do feixe, determinou-se a frequência tendo por base um cordão de soldadura estanque com o valor de sobreposição recomendado mais alto, 80%, amostra N. Posteriormente foram adicionados dois valores de frequência inferiores de modo a avaliar o efeito progressivo da variação da frequência, as amostras O e P. A tabela 5 discrimina as amostras segundo a sua parametrização.

Tabela 5 – Tabela de correspondência de parametrização das amostras N, O e P.

	Amostra N	Amostra O	Amostra P
Modalidade de soldadura	Pulsada	Pulsada	Pulsada
Potência de Pico [W]	2400	2400	2400
Altura do foco [mm]	2	2	2
Frequência [Hz]	120	80	40
Duração do pulso [ms]	3,33	5	10
Razão $t_p/T$	40%	40%	40%
Potência média [W]	960	960	960

Todas as amostras resultaram num bom acabamento superficial, figura 71. Nas amostras O e P é possível identificar o efeito dos pulsos individuais enquanto na amostra N isto só é possível com auxílio de algum tipo de dispositivo de ampliação.

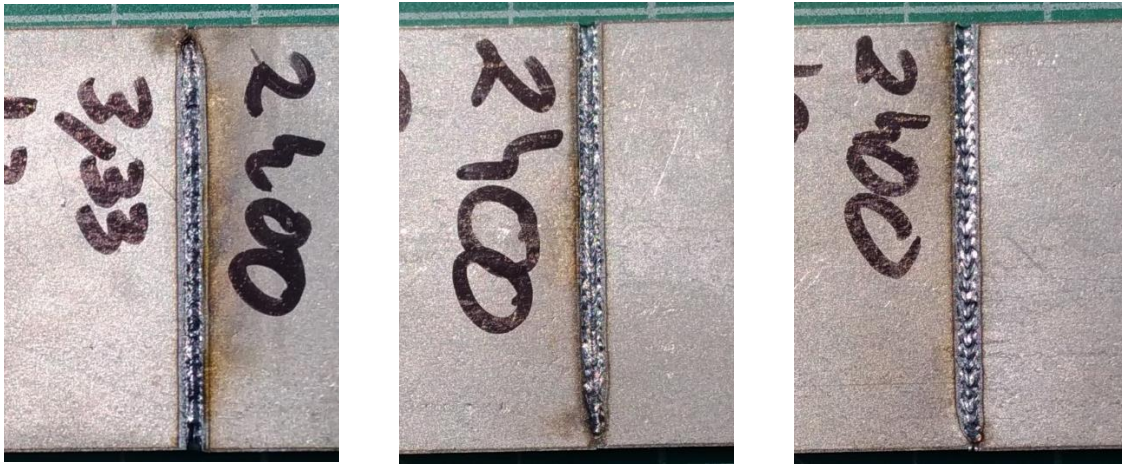


Figura 71 – Superfície superior do cordão das amostras N, O e P da esquerda para direita respetivamente.

Ao contrário das amostras anteriores, os parâmetros de soldadura foram intencionalmente selecionados, ao utilizar uma potência média de 960 W, de modo que não se obtivesse uma penetração completa e os provetes fraturassem pelo cordão para que os resultados fossem mais conclusivos.

Ao contrário do esperado todos estes provetes sofreram rutura pelo metal de base, na região da ZTA. Ainda que, pela figura 72, possa aparentar que a rutura se deu no próprio cordão.



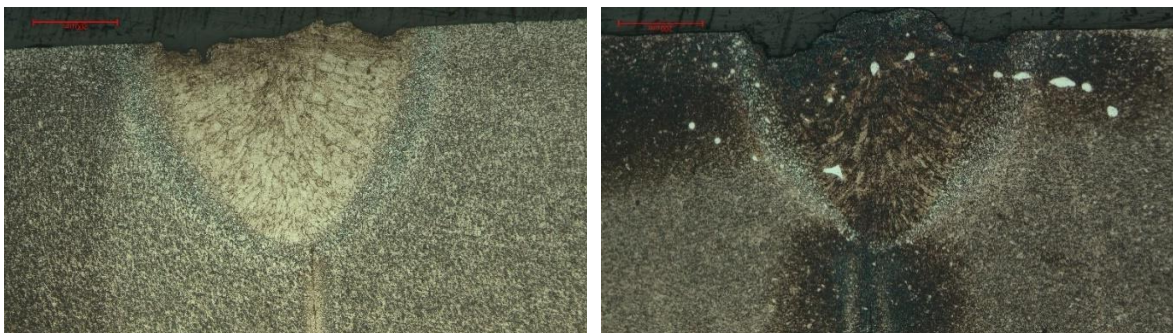
Figura 72 – Provetes submetidos aos ensaios de tração para as amostras N, O e P.

A coloração distinta da amostra O deve-se à oxidação da superfície. As amostras N a O foram preparadas num dia posterior às restantes e, por motivos ambientais ou de contaminação do reagente utilizado no ataque químico, as amostras demonstraram uma maior facilidade em oxidar, figura 73.

O perfil transversal do cordão da amostra O, apresenta algumas mordeduras. Este defeito não é visível a olho nu apesar de ser tão pronunciado na imagem obtida através do microscópio. Um defeito desta dimensão seria perceptível visualmente, por esta razão é provável que se trate apenas de um defeito pontual. Apesar da descoloração, ambas as amostras apresentam formas de cordão semelhantes com uma penetração idêntica. Ainda que na inspeção visual o acabamento da superfície aparente ser bom, as imagens de microscópio indicam uma elevada rugosidade.

### 3.4. Definição da Frequência de Soldadura por Laser Pulsado

---



*Figura 73 – Perfis transversais do cordão de soldadura das amostras N e O*

A amostra O apresenta um perfil consistente com o esperado na soldadura pulsada e é possível identificar os pulsos individuais. Apesar de ser possível distinguir o pico dos pulsos individuais, a penetração efetiva, medida no ponto onde se cruzam os pulsos, é congruente com um valor de sobreposição elevado, entre 70 e 90%. Este facto é suportado pela semelhança entre a forma e penetração do cordão de soldadura em ambas as amostras. Isto leva a crer que a equação de cálculo da sobreposição perde validade para velocidades de soldadura típicas da soldadura em *keyhole*, que são mais elevadas que as de soldadura por condução.

No perfil longitudinal da amostra O, figura 74, está assinalada (com auxílio de um círculo vermelho) a localização de um poro, no ponto de interseção entre pulsos. Este trata-se de um defeito pontual de pequenas dimensões.



*Figura 74 – Perfil longitudinal do cordão da amostra O.*

A observação do perfil longitudinal ao cordão revelou que a parametrização da amostra N resultou num cordão semelhante ao que se esperaria da soldadura com laser contínuo, indicando que o valor da sobreposição é superior ao pretendido de 80% pelo que não é possível identificar os picos de penetração característicos da soldadura laser, figura 75.

Na zona inicial do cordão a penetração é superior devido ao controlador PID integrado do robot que tem o propósito de proporcionar uma aceleração controlada.

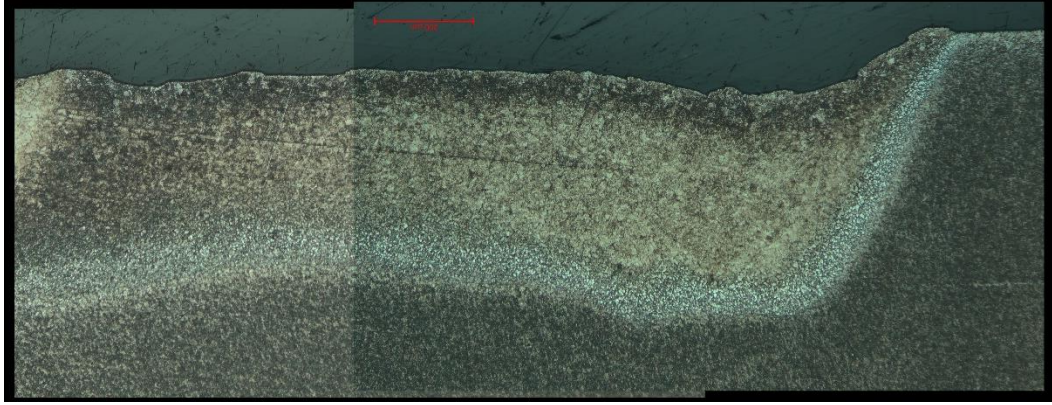


Figura 75 – Perfil longitudinal do cordão da amostra N.

A amostra P,  $f = 40 \text{ Hz}$ , no perfil transversal ao sentido do cordão, apresentou uma cavidade de dimensões consideráveis, figura 76, ao ponto da tensão superficial do metal fundido não ser capaz de conferir-lhe uma forma esférica. A profundidade máxima é superior à demonstrada pelas amostras N e O, o que se deve ao facto de cada pulso ter o dobro da duração em relação à amostra O permitindo o melhor desenvolvimento do orifício de *keyhole*. Este facto é a causa mais provável da formação de porosidade, quando o feixe é interrompido dá-se o colapso do orifício capturando no seu interior uma bolsa de gás.

A imagens obtidas através do perfil longitudinal ao sentido do cordão revelam que a formação de porosidade não se tratou de um evento singular. De facto, a porosidade é visível a olho nu. Este é um defeito frequentemente encontrado na bibliografia de estudos equivalentes ao aqui apresentado. Assim, o cordão demonstra uma forma consistente com o que se espera da soldadura pulsada sendo visíveis os pulsos individuais.

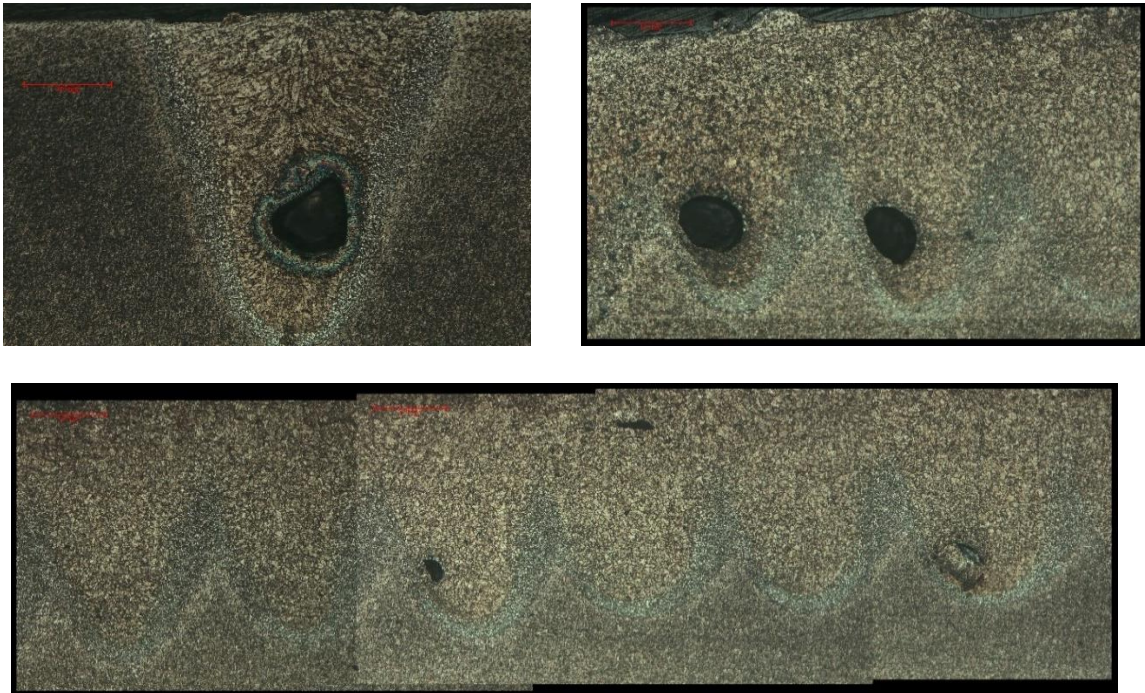


Figura 76 – Perfis transversal e longitudinais do cordão da amostra P.

### 3.4. Definição da Frequência de Soldadura por Laser Pulsado

Os resultados dos ensaios de tração, figura 77, aparentam indicar que a amostra que demonstra piores resultados é a N. No entanto, isto não é uma caracterização representativa do desempenho dos provetes como se pode ver pelo elevado desvio padrão. Nos anexos encontram-se tabelas resumo com os principais dados de cada amostra, a partir do gráfico tensão deformação é possível verificar que um dos provetes falhou prematuramente. Dado que o cordão de soldadura não penetrou a chapa totalmente a junta atuou como um ponto de acumulação de tensões e agilizou a rutura do provete. Como o cordão é praticamente indistinguível de cordão realizado com soldadura com laser contínuo, a rutura propagou-se ao longo da junta. Isto não aconteceu nos provetes das outras amostras pois os intervalos claros entre pulsos serviram como pontos de interrupção da propagação da rutura de um modo análogo ao da interrupção das deslocções entre grãos de metal ao nível da microestrutura.

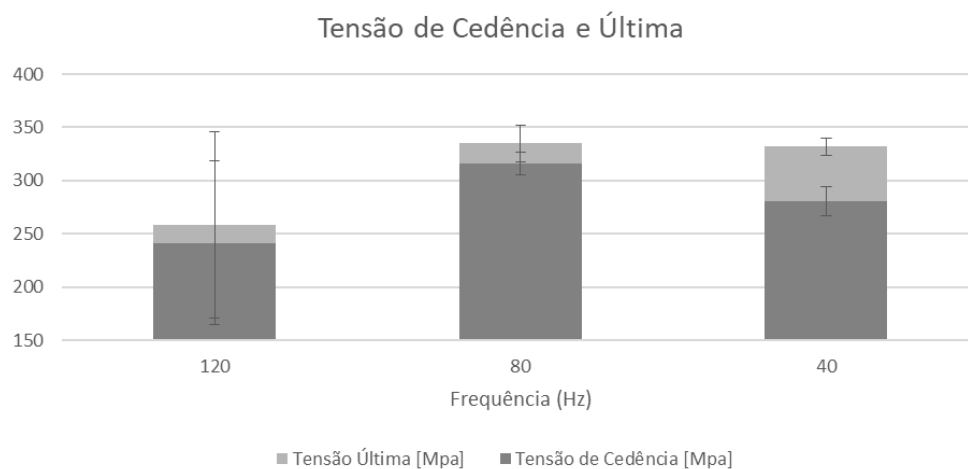


Figura 77 – Tensões de cedência e última para os provetes das amostras N, O e P, em função da frequência.

A equação 16 também não permitiu obter valores que se aproximassem aos resultados demonstrados experimentalmente. A equação é válida para a soldadura por condução com velocidades de soldadura inferiores àquelas testadas. No entanto quando aplicada em soldadura modo *keyhole* perde precisão. Esta equação assume que na duração do pulso, o feixe, ou não se move sobre a superfície do metal ou a velocidade é tão reduzida que esta deslocção se pode considerar negligenciável, comprovado pela utilização do diâmetro na equação. Quando isto se verifica, é possível comprovar a existência clara de pontos de fusão individuais com uma forma circular. No entanto, para a velocidade de  $0,0375\text{ m/s}$ , mesmo utilizando uma razão de duração de pulso/ período de apenas 5% estes já apresentam uma forma alongada.

A relação entre os parâmetros da equação e o valor da sobreposição também não reflete a realidade. Segundo a mesma, para uma velocidade de soldadura e diâmetro de feixe constantes, uma redução no valor de sobreposição implica um aumento da frequência, que se trata do inverso da realidade. Para além disto, esta relação inversa, resulta no facto desta equação não ter aplicabilidade para casos nos quais a sobreposição é de 0, que constitui uma utilização válida da soldadura pulsada.

A utilização do diâmetro do feixe também não é apropriada em utilizações de soldadura pulsada, uma vez que o calor transferido pelo feixe e pela convecção provocada pela movimentação do metal líquido é suficiente para fundir o material que o rodeia. Deste

modo é necessário recorrer à determinação do diâmetro da poça de fusão. A determinação mais precisa desta dimensão recorrendo a utensílios metrológicos comuns como a utilização de um paquímetro ou micrómetro, é difícil e imprecisa uma vez que o ajuste terá de ser feito a olho nu. Um método mais eficaz revolverá à volta da utilização de equipamentos de amplificação ótica calibrados de modo que seja possível determinar esta dimensão. Alguns equipamentos de soldadura laser, como os utilizados neste trabalho, permitem a realização de um pulso individual de curta duração, facilitando a medição.

O esquema da figura 78, foi desenvolvido no sentido de representar a diferença entre as duas abordagens. A partir desta, é possível determinar uma equação de cálculo da sobreposição que colmate as questões levantadas.

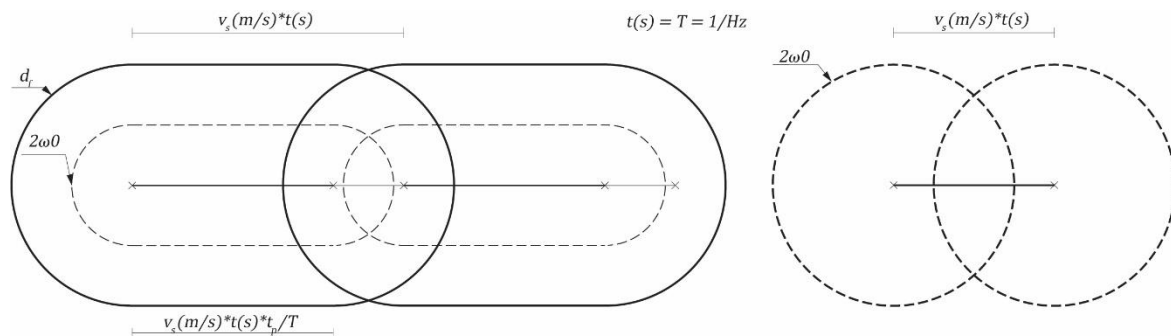


Figura 78 - Esquema utilizado para determinar uma equação para o valor de sobreposição (esquerda), comparado ao esquema simplificado usado anteriormente (direita)

Resulta que:

$$\text{Sobreposição}[\%] = \frac{d_f + v_s * t * t_p/T - v_s * t}{v_s * t} = \frac{d_f + v_s * t * t_p/T}{v_s * t} - 1,$$

na qual  $d_f + v_s * t * t_p/T$ , corresponde à soma do diâmetro do cordão ou poça de fusão com a distância percorrida durante a duração do pulso e  $v_s * t$  corresponde à distância total percorrida. Se se substituir  $t$  pelo período obtém-se uma equação geral, que se pode simplificar ao dividir o numerador e denominador pelo mesmo valor. O que resulta na seguinte equação:

$$\text{Sobreposição}[\%] = \frac{d_f * freq + v_s * t_p/T}{v_s} - 1, \quad \text{Eq. 29}$$

Esta equação verifica a relação de proporcionalidade entre o valor calculado e os parâmetros que se verificam na realidade, é universal uma vez que se a duração do pulso for curta a ponto que se possa considerar negligenciável ou o equipamento pare aquando da realização dos pulsos pode-se simplesmente simplificar com  $t_p/T = 0$  e é válida para uma sobreposição nula.

### 3.5. Influência da Variação da Razão Duração de Pulso/Período e Potência de Pico

A partir do conjunto de parâmetros testados na avaliação da soldadura contínua, selecionaram-se aqueles que resultaram nos melhores cordões de soldadura, tirando

### 3.5. Influência da Variação da Razão Duração de Pulso/Período e Potência de Pico

influência essencialmente da amostra 2 e O, realizaram-se as alterações necessárias para os requisitos específicos da soldadura com laser pulsado.

Na soldadura dos provetes da amostra E, aplicou-se o guia de planeamento descrito na metodologia e definição de variáveis de estudo. No entanto, chegou-se à conclusão que na maioria das amostras não iria ser possível obter uma penetração total dos provetes, pois a potência média e consequentemente a energia de soldadura, é demasiado baixa. A partir desta conclusão ajustaram-se os valores da razão entre a duração dos pulsos e o período. A tabela 6 contém a correspondência das amostras à respetiva parametrização.

Tabela 6 – Tabela de correspondência da parametrização às amostras E a M.

	Amostra E	Amostra F	Amostra G	Amostra H	Amostra I	Amostra J	Amostra K	Amostra L	Amostra M
Modalidade de soldadura	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada
Potência (W)	2200	2200	2200	2400	2400	2400	2600	2600	2600
Altura focal (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frequência (Hz)	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Duração do pulso (ms)	5	10	11	9	10	11	7,5	9	10
Razão $t_p/T$	40%	80%	88%	72%	80%	88%	60%	72%	80%
Potência média (W)	880	1760	1936	1728	1920	2112	1560	1872	2080

A amostra E apresentou um bom acabamento superficial, sem oxidação, o que vai ao encontro com o esperado, tendo em consideração que se trata da amostra com o valor de potência média mais baixa. No entanto é possível verificar que não houve penetração total do cordão nos provetes, figura 79. O aumento da ZTA de acordo com o aumento da duração de pulso é perceptível entre as amostras. Nas amostras F e G verificou-se a presença de defeitos do tipo de mordeduras e uma protuberância no centro do cordão que percorre o seu comprimento.

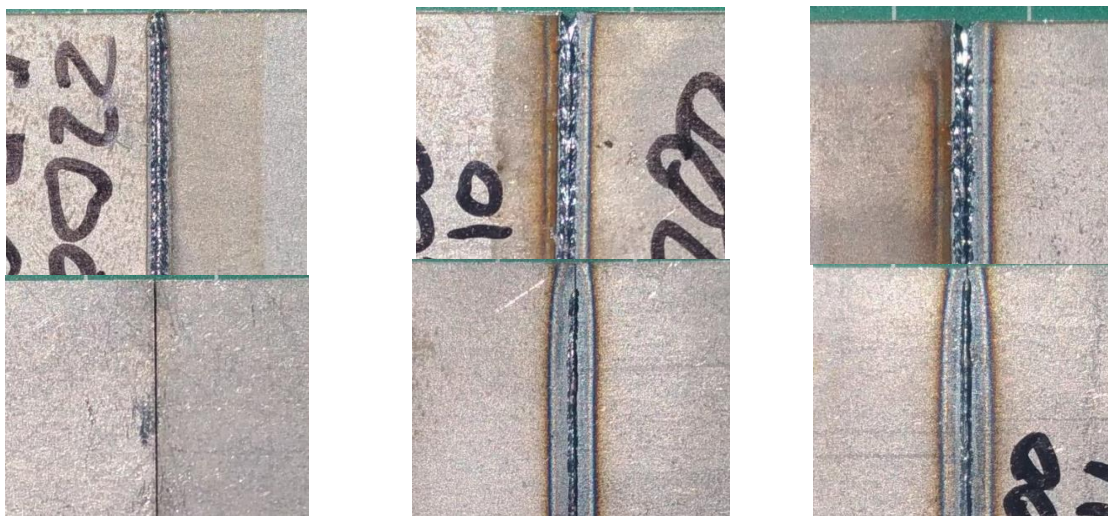


Figura 79 - Superfícies superiores e inferiores, acima e em baixo, das amostras E, F e G, respetivamente.

De modo semelhante à rutura das amostras N, O e P, a amostra E, ao demonstrar apenas penetração parcial, falhou pela ZTA, figura 80. As amostras F e G, falharam por estiramento fora da zona do cordão de soldadura.

Um dos provetes da amostra E sofreu rutura durante o manuseamento, outro aquando da fixação na máquina de ensaios de tração, dada a falta de penetração, pelo que não serão apresentados resultados dos ensaios de tração.



Figura 80 – Modo de rutura nos provetes da amostra E.

O cordão da amostra H não demonstrou uma penetração total, como é possível comprovar pela imagem da superfície inferior, figura 81, apesar da proximidade do valor de potência média da potência de soldadura à da amostra 2. É possível comprovar a existência de mordeduras e de protuberâncias ao longo do comprimento do cordão de soldadura nas amostras H, I e J, figura 82. Nestas amostras é perceptível o aumento da ZTA de acordo com ao aumento da duração do pulso.

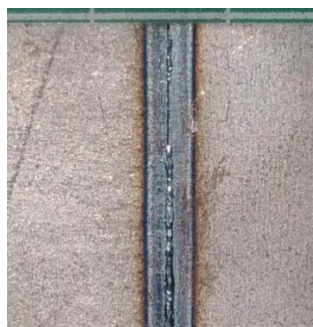


Figura 81 – Superfície inferior do cordão da amostra H.



Figura 82 – Superfície superior das amostras H, I e J, da esquerda para a direita respetivamente.

A parametrização da amostra K não proporcionou as condições necessárias à obtenção de um cordão com penetração total, como é possível verificar na figura 83. A potência

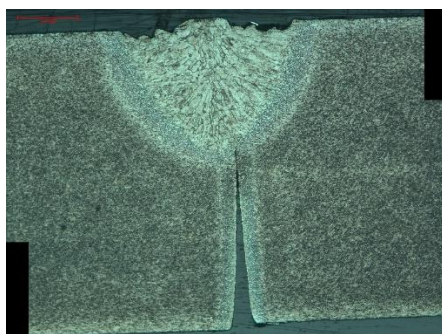
### 3.5. Influência da Variação da Razão Duração de Pulso/Período e Potência de Pico

média, ainda assim, é superior à potência de soldadura da amostra 1. Os resultados da amostra K e H indicam que a soldadura pulsada não é capaz de replicar os valores de penetração obtidos através da soldadura contínua em modo *keyhole* para potências equivalentes em termos de valor médio.



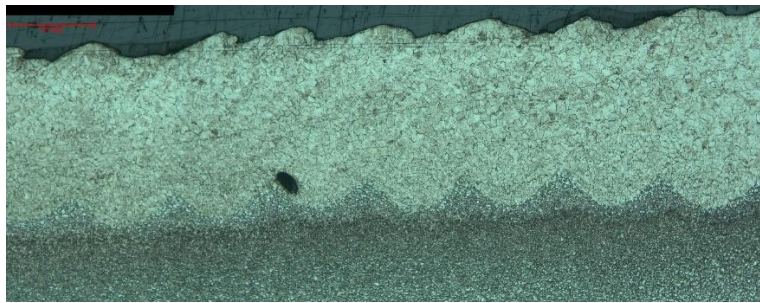
*Figura 83 – Superfície superior, acima, e inferior, em baixo, dos cordões das amostras K, L e M, da esquerda para a direita respetivamente.*

O perfil transversal ao cordão da amostra E comprova a penetração parcial, figura 84. Na secção da junta não afetada pela soldadura é possível ver a zona afetada pelo corte por laser, referenciado na preparação dos provetes, e o tipo de acabamento deixado. A folga verificada junto da superfície inferior deve-se, na sua maioria, à contração do cordão de soldadura que, ao causar a flexão do provete provoca o afastamento desta parte do provete. Ainda que o cordão apresente um bom aspeto visual, a rugosidade visível na secção transversal pode ser considerada como um defeito.



*Figura 84 – Perfil transversal do cordão da amostra E.*

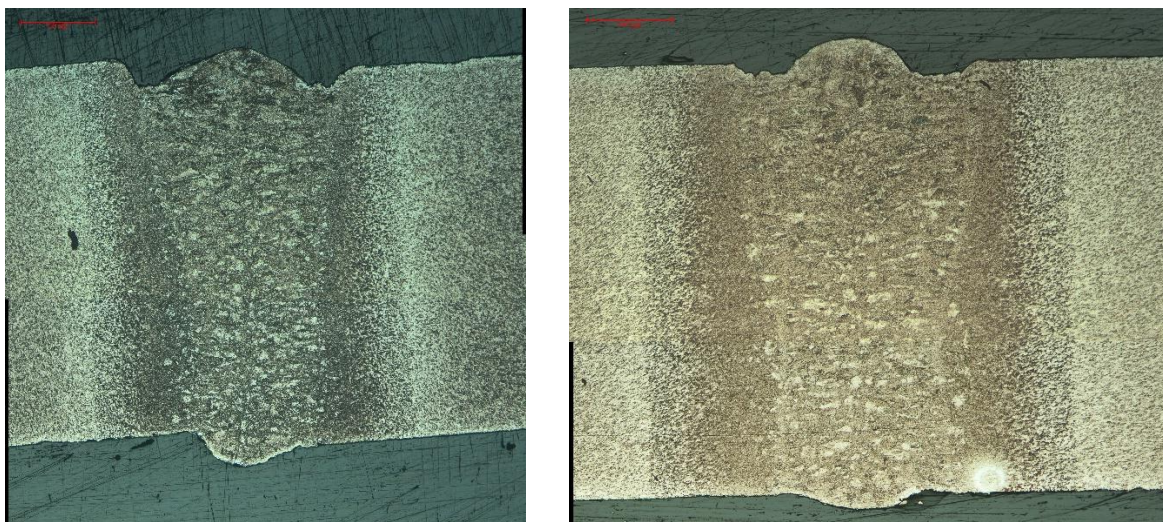
A análise da microscopia do perfil longitudinal, figura 85, revelou ser mais clara no que diz respeito à distinção dos pulsos individuais, causada pela sobreposição, na área de penetração efetiva do cordão. Também foram identificadas duas instâncias de porosidade ainda que na figura 85 só esteja visível uma.



*Figura 85 – Perfil longitudinal do cordão da amostra E.*

A amostra F apresenta mordeduras, figura 86. A superfície do cordão da amostra G apresenta uma protuberância significativa no centro do cordão. Na amostra F é possível comprovar a existência de um defeito fora da ZTA, pelo que é possível que este tenha tido origem na chapa. Embora não se identifique com o arrancamento lamelar é possível que este se trate de outro defeito que foi revelado pela distorção causada pela contração do cordão de soldadura, figura 86.

Ainda que os cordões apresentem mordeduras, as paredes da ZTA são paralelas e o cordão mantém uma espessura consistente, diminuindo à medida que aumenta a profundidade. Dado que a hipótese que explica a forma hiperbólica dos cordões, realizados com soldadura contínua, sustenta-se nas correntes de metal líquido laterais transversais ao feixe laser, que são dependentes da estabilidade do orifício de keyhole e da continuidade do cordão de soldadura. O perfil verificado nas amostras F e G dá credibilidade a esta explicação uma vez que os pulsos individuais não criam as condições necessárias ao desenvolvimento da forma.



*Figura 86 – Perfis transversais dos cordões das amostras F e G da esquerda para a direita respetivamente.*

A amostra H, figura 87, exhibe mordeduras junto da superfície superior. Na secção utilizada, na microscopia, verifica-se que foi obtida uma penetração completa e que não se estende à totalidade do cordão.

O cordão tem uma forma de cunha, diminuindo de largura à medida que aumenta a profundidade, ainda que as paredes do cordão tenham uma inclinação reduzida. É

### 3.5. Influência da Variação da Razão Duração de Pulso/Período e Potência de Pico

possível que esta forma cause algum empenamento das peças soldadas com esta parametrização. As fronteiras da ZTA são paralelas.



Figura 87 – Perfil transversal do cordão da amostra H.

A amostra I exibe mordeduras e a superfície da amostra J tem uma protuberância no centro do cordão. Ambos os defeitos são menos pronunciados que nas amostras F e G. Isto indica que os defeitos podem estar correlacionados à razão de duração de pulso e período ainda que com um aumento da potência média o tempo de solidificação aumenta e os defeitos são atenuados, figura 88.

Ainda que a ZTA tenha fronteiras paralelas, o cordão apresentado por ambas as amostras é em cunha na metade superior. A amostra J apresenta um poro ou fissura na fronteira da ZTA do lado esquerdo e junto da superfície inferior, ambos assinalados a vermelho. Na amostra F, que tinha um defeito semelhante, teorizou-se que se poderia tratar de um defeito da matéria-prima. No entanto, a presença em duas amostras do mesmo grupo pode indicar que se trata de fissuras resultantes da contração diferencial do cordão junto da fronteira da ZTA.

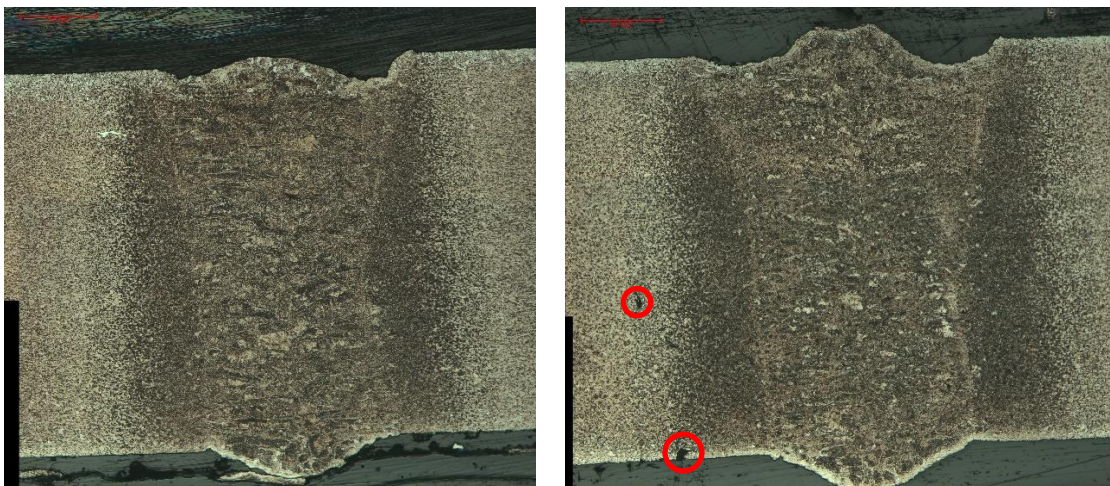
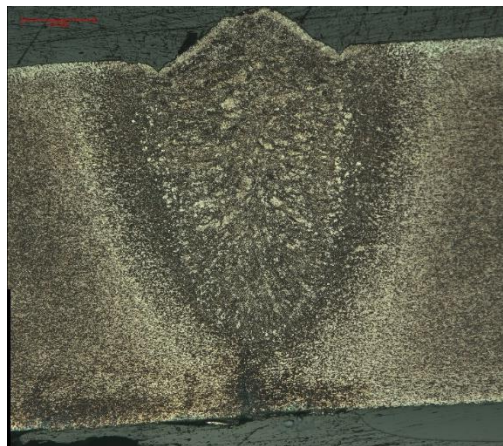


Figura 88 – Perfis transversais do cordão das amostras I e J da esquerda para a direita respetivamente.

A parametrização da amostra K não permitiu obter uma penetração completa, a forma alongada do cordão leva a crer que só não foi possível dada a curta duração do pulso, figura 89. A amostra 1, soldada de forma contínua com uma potência próxima da média correspondente à da amostra K, reforça a conclusão de que a soldadura com laser contínuo em *keyhole* tem uma penetração superior à pulsada com uma potência média

equivalente. Esta amostra apresenta a maior protuberância do conjunto ao longo de todo o seu comprimento. Dada a potência de pico, este defeito pode ser explicado por um efeito “ressalto” da poça de fusão consequente da interrupção do feixe laser. A depressão causada na superfície da poça de metal fundido, resultado da taxa elevada de formação de gás, é responsável pela formação do orifício que potencia a penetração. Quando o feixe é interrompido cessa a formação de gás, o que causa uma redução da pressão no interior do orifício. Isto permite que a tensão de superfície retorne o metal a uma posição estável, de uma menor razão de superfície por volume, que no caso de um cordão num metal soldável se trata do nivelamento pela superfície superior da peça a soldar. Considerando o elevado rácio profundidade/diâmetro do orifício é natural que o metal adquira uma reação considerável e se eleve para além da superfície estável e solidifique nesta posição. O ressalto é análogo àquele provocado pela queda de uma gota em água estável.

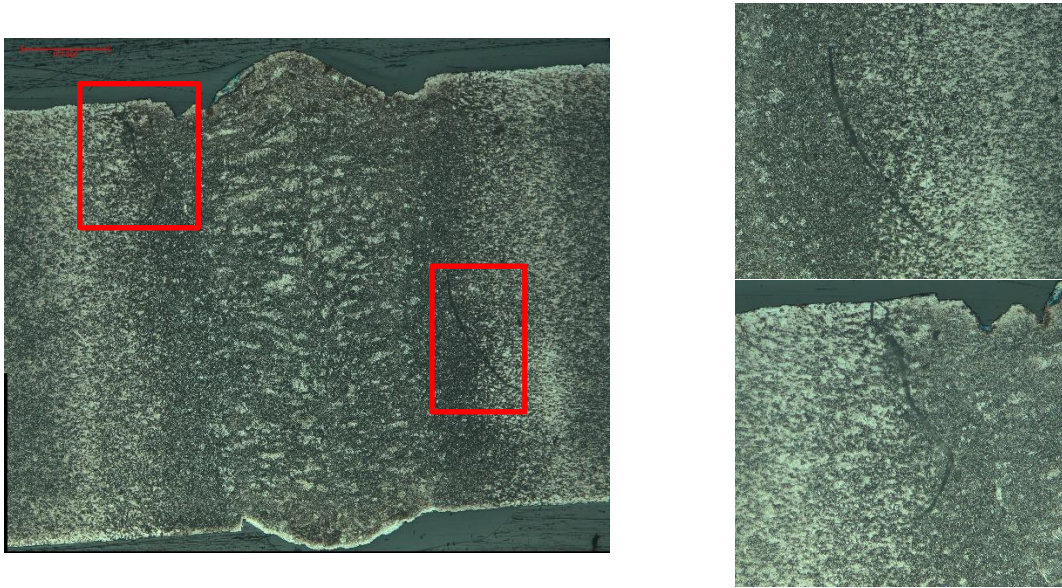


*Figura 89 – Perfil transversal do cordão da amostra K.*

Em concordância com o que se verificou na amostra I, a amostra L também manifesta a formação de mordeduras junto da superfície superior. Foram encontradas duas fissuras, assinaladas por meio de retângulos vermelhos, que atravessam a ZTA quase na sua totalidade, figura 90. Apesar de terem uma forma mais alongada que os defeitos encontrados nas amostras F e J estes reforçam a noção de que o mecanismo por detrás da formação destes defeitos é a contração derivada do arrefecimento rápido característico da soldadura pulsada, também agravado pelo aumento da potência de pico.

Uma possível maneira de mitigar este defeito é o isolamento da chapa dos dispositivos de fixação, uma vez que ao abrandar a transferência de calor, o ciclo térmico é prolongado, permitindo a dissipação de tensões. O facto destes provetes terem sido fixados diretamente ao alumínio, devido à sua elevada condutividade térmica pode ter potenciado a formação deste tipo de defeitos.

### 3.5. Influência da Variação da Razão Duração de Pulso/Período e Potência de Pico

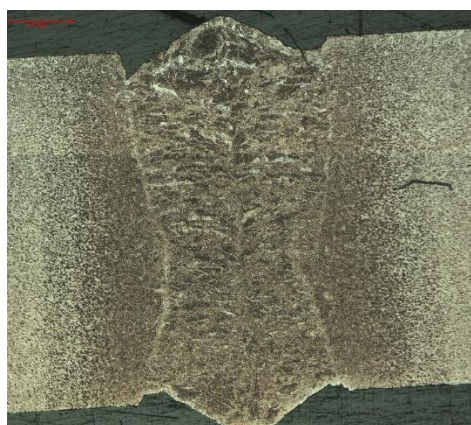


*Figura 90 – Perfil transversal do cordão de soldadura da amostra L.*

A amostra M também apresentou uma fissura, no entanto esta está disposta na horizontal, e, por este motivo não pode ser diretamente atribuída à contração do cordão de soldadura, a não ser que o gradiente de temperatura segundo a direção da espessura seja suficiente para gerar tensões de corte na direção perpendicular à do cordão, figura 91.

A ZTA revelou ser mais larga junto da superfície inferior e o cordão tem novamente uma forma hiperbólica. Aqui a forma do cordão pode indicar que a duração do pulso permite que uma percentagem do material permaneça fundido ou pode simplesmente dever-se à forma do feixe laser.

As mordeduras verificam-se em ambas as superfícies e foram acompanhadas de uma protuberância que podem ser explicadas por um excesso de velocidade de soldadura ou pelo efeito de “ressalto”.



*Figura 91 – Perfil transversal do cordão de soldadura da amostra M.*

A ZTA aumentou de acordo com o aumento da duração do pulso, de modo proporcional ao aumento da potência média, figura 92. De forma geral, a ZTA não verificou nenhuma variação quando em comparação com as amostras soldadas no regime contínuo com potência equivalente à potência média. Isto associado ao facto de que a soldadura

pulsada não é capaz de reproduzir a penetração verificada na soldadura contínua em modo *keyhole*, significa que esta modalidade não possui esta vantagem face aos métodos convencionais.

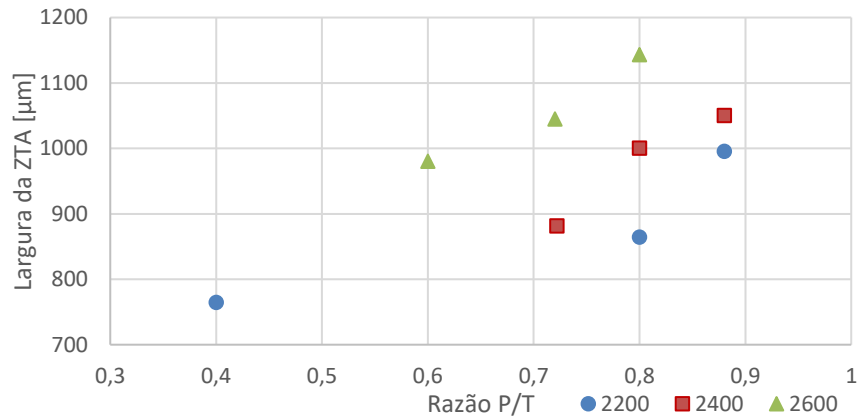


Figura 92 – Evolução da largura da ZTA das amostras E a M no seu ponto mais largo.

Os resultados dos ensaios de tração não permitem fazer nenhuma observação conclusiva. Apesar das amostras H e K não exibirem uma penetração completa do cordão não sofreram rutura pelo cordão de soldadura, em ambos os casos permitiram obter tensões de cedência e de rutura superiores às amostras com a mesma potência de pico e uma duração de pulso superior, figura 93. Embora esta relação seja ténue, dá credibilidade à hipótese da deformação do cordão de soldadura desempenhar um papel no modo de rutura.

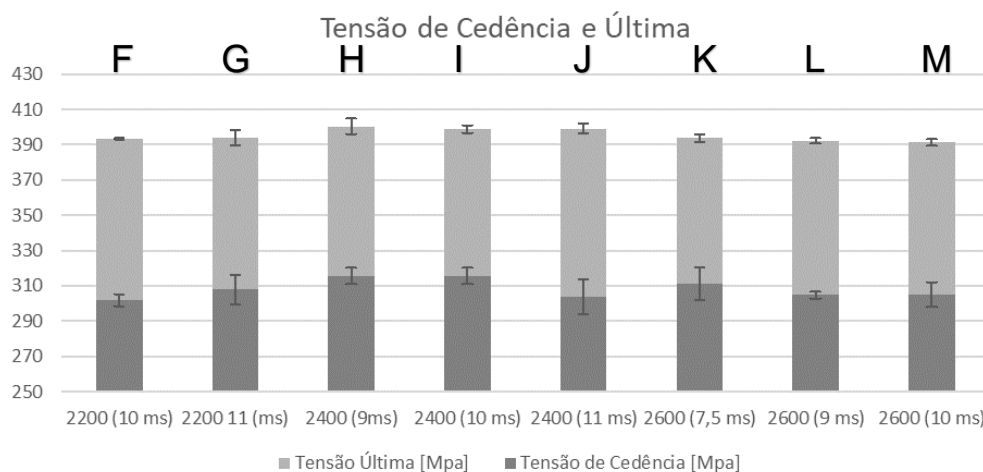


Figura 93 – Tensão de cedência e máxima, em função da potência e duração do pulso, para as amostras F a M.

### 3.6. Tentativas de Otimização da Soldadura Pulsada

As tentativas de melhoria da soldadura consistiram na utilização de potências de pico superiores e uma duração de pico mais curta, com o intuito de obter uma penetração superior com uma ZTA de dimensões inferiores.

A distância focal foi aumentada para 1 mm para reduzir a tendência de formação de respingado. Em ensaios individuais a combinação de uma potência de pico elevada com

### 3.6. Tentativas de Otimização da Soldadura Pulsada

uma altura focal negativa resultaram na ejeção de gotículas de metal, provavelmente devido à rápida formação de gás no ponto focal, figura 94 e 95. Para potências superiores a 4000W verificou-se a formação de respingado, alargamento da ZTA, deposição de óxidos e fusão excessiva.



Figura 94 – Detalhe das gotículas depositadas e respingado para a soldadura por laser pulsado com altura focal negativa e potência de pico de 3000 W.



Figura 95 - Alguns dos ensaios de soldadura realizados

A tabela 7 contem a correspondência entre as amostras e a sua parametrização.

Tabela 7 – Correspondência entra a parametrização e as amostras Q, R e S.

	Amostra Q	Amostra R	Amostra S
Modalidade de soldadura	Pulsada	Pulsada	Pulsada
Potência (W)	4000	3500	3000
Altura focal (mm)	1	1	1
Frequência (Hz)	80	80	80
Duração do pulso (ms)	4,38	5	5,83
Razão $t_p/T$	35%	40%	47%
Potência média (W)	1401,6	1400	1399,2

Todos os provetes tracionados resultaram na cedência por estiramento fora da zona do cordão de soldadura, figura 96.

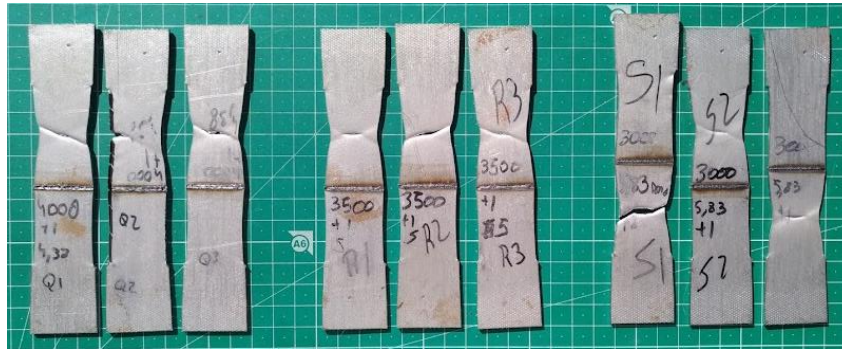


Figura 96 – Provetes das amostras Q, R e S submetidos a ensaio de tração.

A amostra S demonstrou um bom acabamento superficial. Com o aumento da potência de pico verificou-se a formação de respingado e protuberâncias na amostra R e a ejeção de gotículas na amostra Q o que indica que, apesar do aumento da altura focal em relação à superfície, a densidade energética é demasiado elevada para potências de pico superiores a 3000 W, figura 97.

Nenhuma das amostras revelou uma penetração completa, confirmando os resultados obtidos na avaliação da razão de pico/periódodo.



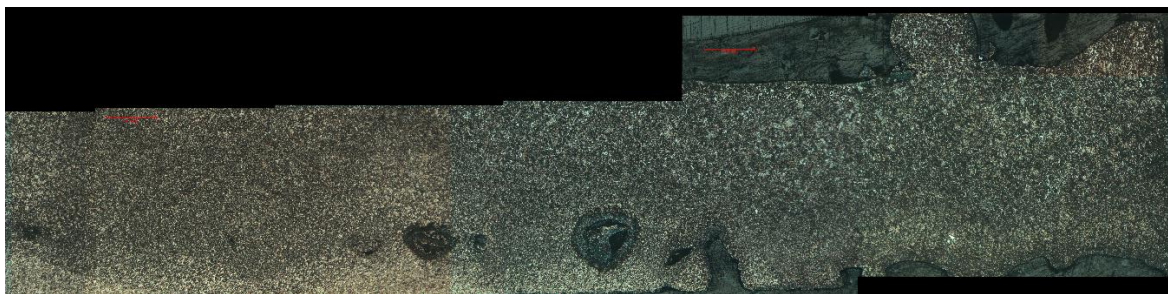
Figura 97 – Superfície superior do cordão das amostras Q, R e S da esquerda para a direita respetivamente.

O perfil transversal do cordão da amostra Q é semelhante ao da K, figura 98. No entanto, apresentou a existência de um poro no fundo do cordão o que leva a crer que o aumento da altura de foco na tentativa de mitigar este tipo de defeito foi em vão. O defeito assinalado a vermelho não tem um formato característico de uma fissura, ainda que o possa ser, é possível que se trate de oxidação por utilização imprópria da solução de ácido, de manuseamento da amostra polida impróprio ou um defeito no metal de base. O facto de não ser representativo da rugosidade superficial comprovada na figura 97 deve-se simplesmente à não existência de defeitos na secção de corte do provete.



*Figura 98 – Perfil transversal do cordão da amostra Q.*

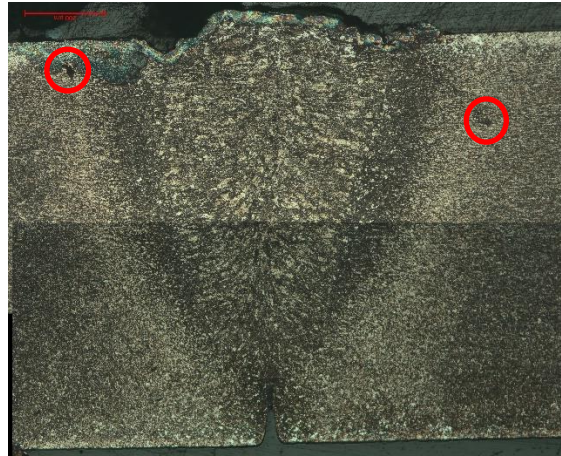
O corte longitudinal da amostra acusou a presença de poros de grandes dimensões no fundo do cordão, figura 99. A presença dos poros evidencia a rapidez de solidificação da poça de fusão, a instabilidade do orifício criado e a elevada taxa de formação gases.



*Figura 99 – Perfil longitudinal do cordão da amostra Q.*

O cordão da amostra R também é semelhante ao da amostra K, isto indica que apesar do aumento da potência de pico e diminuição da duração dos pulsos a penetração não foi afetada e está relacionada com o valor da potência média de soldadura, figura 100.

Verificou-se a presença de duas fissuras, assinaladas a vermelho na fronteira da ZTA. A formação desta fissura aparenta estar correlacionada à velocidade de solidificação da poça de fusão que está dependente da duração do pulso.



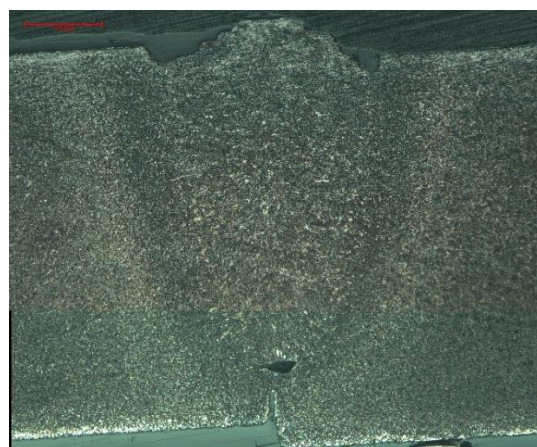
*Figura 100 – Perfil transversal do cordão da amostra R.*

A partir da análise do perfil longitudinal ao cordão, retira-se que a parametrização da amostra R resultou na formação de porosidade mais frequente e de maior dimensão, sendo visível a olho nu, figura 101.



*Figura 101 – Perfil longitudinal do cordão da amostra R.*

A amostra S, representada na figura 102, tem um cordão de forma semelhante aos precedentes, no entanto exibe mordeduras e uma protuberância mais acentuadas. De modo semelhante à amostra K, um possível efeito de ressalto justifica esta forma. Como a duração do pulso é mais longa do que nas amostras Q e R, a formação de menos poros e de menor dimensão deve-se, em parte, à estabilidade da poça de fusão permitindo a libertação de bolsas de gás.



*Figura 102 – Perfil transversal do cordão da amostra S.*

### 3.6. Tentativas de Otimização da Soldadura Pulsada

A análise do perfil longitudinal, figura 103, revela que esta se trata da amostra com a menor incidência de porosidade do conjunto, o que provavelmente também se deve à menor potência de pico o que implica uma taxa de produção de gás mais reduzida.

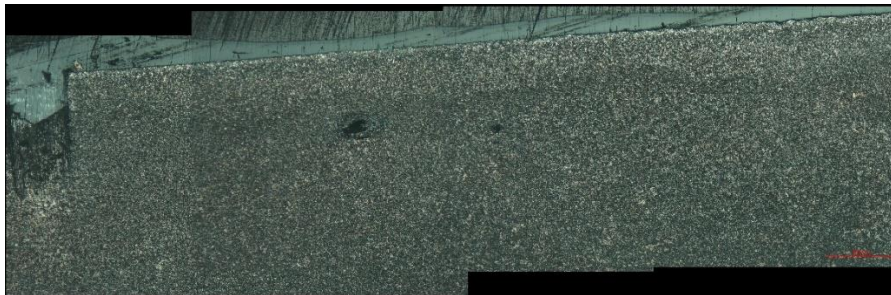


Figura 103 – Perfil longitudinal do cordão da amostra S.

Os resultados dos ensaios de tração, figura 104, não permitem estabelecer nenhuma correlação e não correspondem à qualidade dos cordões, uma vez que os cordões Q e R que apresentam uma maior frequência de porosidade, fissuras e uma pior qualidade superficial excederam os resultados da amostra S. Ainda assim, existe a sobreposição de valores no intervalo correspondente ao desvio padrão entre todas as amostras.

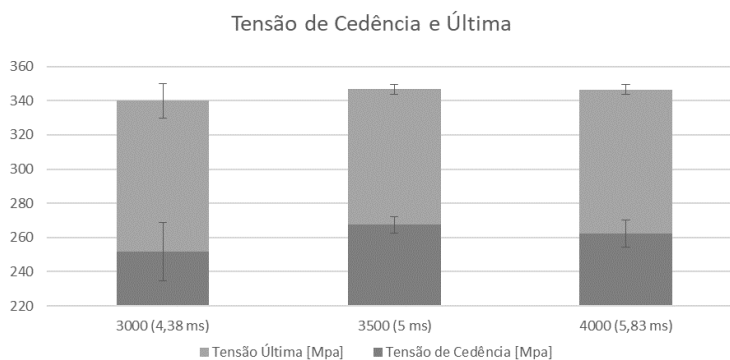


Figura 104 – Tensões de cedência e última das amostras Q, R e S.

A largura da ZTA permaneceu constante entre as amostras, indicando que esta não está dependente da potência de pico e duração de pulso, mas sim do valor de potência média, suportado pelos resultados da avaliação da ZTA nos conjuntos de amostras anteriores, figura 105.

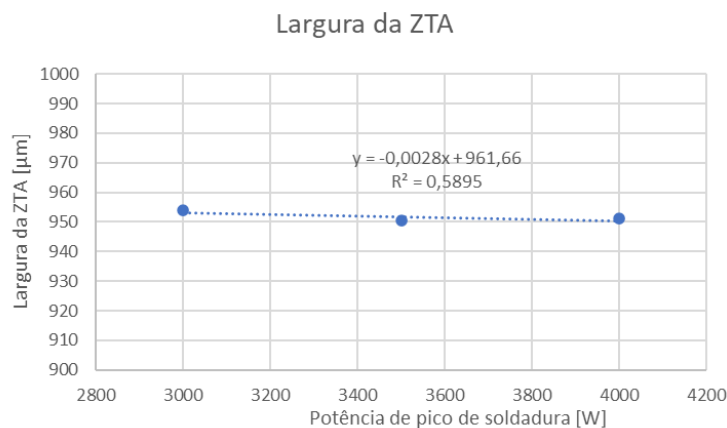


Figura 105 – Evolução da largura da ZTA para as amostras Q, R e S.

### 3.7. Medição da Dureza

As medições de dureza foram realizadas nas amostras D e G. A D foi selecionada, apesar de ter uma altura focal superior à da G, por se tratar da parametrização recomendada pelo fabricante do equipamento de soldadura e a G por ser, entre as amostras de soldadura pulsada, a amostra que tem um valor de potência média mais aproximado à potência de soldadura contínua.

Uma outra comparação possível seria entre as amostras 3 e G, que partilham a mesma altura focal. No entanto, apesar da diferença na largura máxima da ZTA verificada através da microscopia entre as amostras D e G, esta é idêntica à profundidade onde foram realizadas as medições de dureza.

O gráfico apresentado na figura 106 descreve a variação da dureza a partir do centro do cordão. A amostra D demonstra valores de dureza superiores ao da amostra G na totalidade da largura do cordão e da ZTA. Não era esperada uma variação tão significativa entre as duas amostras nem que a soldadura com laser contínuo registasse uma dureza superior em toda a largura. No entanto, a parametrização da amostra D também resulta num arrefecimento rápido quando comparado com a soldadura por condução, o que explica o valor. A rápida solidificação resulta na formação de uma microestrutura composta essencialmente de martensite no cordão e na zona interior da ZTA, apesar do teor baixo de carbono. Ainda assim a solidificação é por norma mais rápida quando se utiliza o feixe de laser pulsado. A dureza reduzida da amostra G pode ser explicada pela exposição do metal a temperaturas mais elevadas, causada pela potência de pico superior, o que pode resultar na alteração química do aço, nomeadamente a perda de elementos da liga.

Os valores de dureza também aparentam ser mais elevados na fronteira entre o cordão e a ZTA, em ambas as amostras. A solidificação inicia-se nesta fronteira e progride até ao centro do cordão, neste processo, e o número de pontos de nucleação, são a razão pela qual os grãos que constituem a área do cordão apresentam uma forma colunar até ao centro do mesmo. Isto significa que o ciclo térmico de sobreposição da temperatura de austenitização e arrefecimento dá-se num intervalo de tempo mais curto e a percentagem de martensite será superior neste ponto. A presença de martensite é evidente na metade inferior do cordão da amostra G atravessando a interface entre a ZTA e o cordão em alguns pontos.

O facto de os valores convergirem para a dureza do metal base à mesma distância do centro dão credibilidade à comparação.

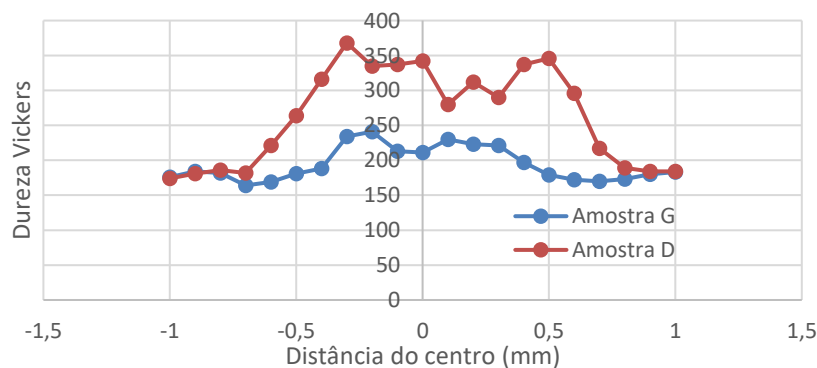


Figura 106 – Perfil de dureza Vickers para as amostras D e G.

### 3.7. Medição da Dureza

A disposição das medições de dureza no formato de grelha encontra-se no formato tridimensional na figura 107. O perfil verificado na figura 106 encontra-se presente na análise tridimensional, caracterizado por um valor de dureza ligeiramente inferior no centro do cordão em relação ao valor na fronteira que separa o cordão da ZTA, apesar da baixa resolução.

Esta distinção permite estabelecer uma relação entre a forma do cordão e o perfil tridimensional da dureza. No entanto, apesar da microestrutura aparentar ser idêntica no que diz respeito às estruturas cristalinas, é difícil avaliar a predominância percentual de fases constituintes para além da aparência distinta que estas podem tomar devido aos instrumentos óticos utilizados ou método de ataque químico e como tal é difícil fazer uma quantificação do valor da dureza ao observar a microestrutura.

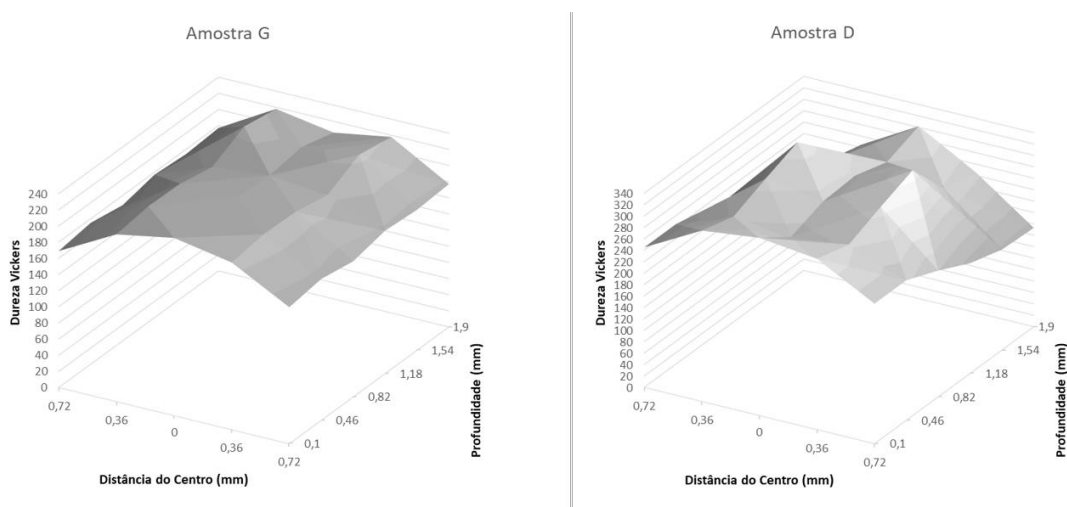


Figura 107 – Perfil tridimensional de dureza Vickers nas amostras D e G.

Também foi realizada a medição da dureza na amostra 1 na qual era possível desconstruir a forma do cordão com base nos valores de dureza. A amostra 1 exibiu um valor de dureza máximo de 375 HV, junto da fronteira entre o cordão e a ZTA superior ao máximo registado na amostra D. Este facto vai em concordância com a bibliografia de ciência de materiais e com as observações realizadas na comparação entre as amostras D e G, uma vez que uma potência de soldadura inferior implica uma menor energia de soldadura e tem como consequência um tempo de solidificação mais rápido, aumentando a percentagem de martensite formada, evidenciado por um aumento da dureza.

---

## 4. Conclusões e Estudo Futuro

### 4.1. Conclusões

A investigação dos parâmetros de soldadura nesta dissertação estabeleceu alguns dos princípios fundamentais do funcionamento da soldadura por laser contínuo e por pulsado e demonstrou o potencial de otimização destas variantes.

Enquanto as únicas preocupações na parametrização da soldadura contínua em modo *keyhole* se resumiam à obtenção ou não de penetração total e evitar a formação de defeitos, sendo a resolução de problemas, até certo ponto, intuitiva. Na soldadura pulsada o número de parâmetros com um impacto determinante aumenta. A relação entre eles não é proporcional, aumentando a probabilidade de erro de parametrização e formação de defeitos. Alguns destes defeitos não são visíveis por inspeção visual, necessitando de outros métodos de análise interior do cordão de soldadura.

É possível que a espessura da chapa utilizada não seja a mais indicada para a utilização da soldadura por laser pulsado em modo *keyhole*.

Na soldadura de chapas com menor espessura, a necessidade de recorrer ao método *keyhole* não se justifica, já que aqui o problema não passa pela obtenção de penetração total. Pelo contrário, é a fusão excessiva do metal de base que pode causar defeitos ao longo da junta do tipo “*melt-through*”. Aqui a soldadura por laser pulsado é pertinente por outro motivo, uma vez que a potência mínima do feixe laser é muitas vezes excessiva, não sendo assim viável o recurso à soldadura contínua. A utilização do laser pulsado reduz a potência média de soldadura. Consequentemente a entrega de energia na soldadura será menor o que impede que o metal de base se funda demasiadamente e que se formem furos “*burn-through*” na junta soldada devido à tensão superficial do metal fundido.

Nas juntas de maiores dimensões, nas quais os parâmetros de soldadura utilizados estejam direcionados à obtenção de uma maior penetração, a utilização de laser pulsado pode auxiliar na redução da ZTA, ainda que esta tenha demonstrado uma relação de proporcionalidade com o valor de potência média. A soldadura com laser pulsado não revelou a obtenção de uma penetração proporcional ao valor da potência de pico. Ainda assim, a alteração de parâmetros, como a duração do pulso, podem permitir que o orifício se desenvolva no sentido de aumentar o valor da penetração.

A utilização de uma altura de foco negativa em relação à superfície da junta, está correlacionada com a formação de porosidade no interior do cordão nos casos sem penetração completa. Este parece ser um dos principais mecanismos de formação de defeitos. Nos casos onde se obteve uma penetração total não se verificou a formação deste tipo de defeito o que indicia a expulsão de gases pela superfície inferior. No entanto, a utilização de uma altura de foco negativa está associada com valores de penetração superiores. O facto da cintura do feixe se situar dentro da espessura da chapa requer uma parametrização cuidada devido à maior taxa de formação e retenção de gás e propensão para a formação de respingado.

A utilização da razão entre a duração de pulso e o período, ainda que não seja de uso comum no que diz respeito à literatura científica deste tema, revelou ser útil pois basta

multiplicá-la pelo valor da potência de pico para obter a potência média e relaciona duas variáveis, simplificando deste modo a seleção de parâmetros.

Também é importante na determinação da sobreposição de material que fundiu na constituição do cordão por laser pulsado, uma vez que foi utilizada na teorização da equação seguinte. Esta equação enquadra-se melhor com os resultados obtidos, verificando-se uma relação de proporcionalidade entre os parâmetros e a realidade.

$$\text{Sobreposição}[\%] = \frac{d_f * freq + v * t_p / T}{v_s} - 1$$

A forma do cordão revelou ser influenciada pela obtenção ou não de penetração total devido à dinâmica da poça de fusão. Aqui, a soldadura por laser pulsado não permite o estabelecimento destas correntes de metal líquido, resultando em cordões e ZTA com fronteiras relativamente paralelas.

Uma conclusão fundamental é a de que, na soldadura por laser contínuo em modo *keyhole*, a parametrização é simples e capaz de atingir bons níveis de penetração. No entanto, a soldadura por laser pulsado requer uma afinação de parâmetros cuidada, nos casos específicos em que possa ser necessária.

De modo global as conclusões deste trabalho vão de encontro com os objetivos traçados, embora tenha um escopo limitado devido à dimensão e complexidade do tema abordado.

### 4.2. Estudo Futuro

Um dos vários aspetos que não foram abordados neste estudo foi a viabilidade da utilização da soldadura por laser pulsado em materiais com um elevado coeficiente de refletividade como é, por exemplo, o caso do alumínio. A refletividade introduz a variável da inclinação do feixe por razões de segurança.

Neste trabalho, também não foi utilizada a modulação de pulsos. Com esta técnica, é possível mitigar a formação de porosidade interna ao permitir que o *keyhole* feche gradualmente por meio da redução da potência. Isto permite que a parte superior do orifício não solidifique antes do interior e permita a libertação de gás. A variação da velocidade de soldadura também poderia ter um efeito idêntico.

A definição de uma velocidade de soldadura constante entre todos os ensaios resulta apenas numa gama limitada de conjuntos de parâmetros que resultam em cordões com boas características. A velocidade é um parâmetro determinante na dinâmica do cordão de soldadura. Como tal é essencial repetir este estudo para velocidades distintas e determinar a influência da variação desta.

A utilização de outros metais, com dimensões distintas, também é essencial para obter uma melhor compreensão da sua interação com o feixe laser, devido às suas propriedades distintas.

---

## 5. Referências Bibliográficas

- Adams, J. (1958). Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding. *Welding J. (N.Y.)*, Vol: 37. <https://www.osti.gov/biblio/4329473>
- Amada Weld Tech. (2020). *Laser Welding Fundamentals*. <https://amadaweldtech.com/wp-content/uploads/2019/12/Laser-Welding-Fundamentals.pdf>
- Amorim, J. P. P. de S. (2016). *Soldadura laser do aço dual-phase 1000* [Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro]. <https://ria.ua.pt/handle/10773/17954>
- Bordatchev, E., Hafiz, A., & Tutunea-Fatan, O. (2014). Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1–4), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5761-3>
- Carl Magnus. (2012). *Continuous wave mode laser and pulse mode laser*. [https://www.researchgate.net/figure/Continuous-wave-mode-laser-and-pulse-mode-laser-69\\_fig26\\_328190911](https://www.researchgate.net/figure/Continuous-wave-mode-laser-and-pulse-mode-laser-69_fig26_328190911)
- Chapman, G. (2022). *Gaussian Beam*. <http://www.sfu.ca/~gchapman/e894/e894l12g.pdf>
- Cui, C. y., Cui, X. g., Ren, X. d., Qi, M. j., Hu, J. d., & Wang, Y. m.. (2014). Surface oxidation phenomenon and mechanism of AISI 304 stainless steel induced by Nd:YAG pulsed laser. *Applied Surface Science*, 305, 817–824. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.025>
- Cui, X. G., Wang, X. H., Yin, G. C., Xia, C. D., Fang, C., Zhang, W. F., & Cui, C. Y. (2018). Three-dimensional (3-D) Temperature Distribution Simulation of Fiber Laser Butt Welding of AISI 304 Stainless Steel. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 39(3–6), 355–377.
- Edmund Optics. (2022). *Gaussian Beam Propagation*. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>
- Fain, B., & Milonni, P. W. (1987). Classical stimulated emission. *JOSA B*, 4(1), 78–85. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.4.000078>

## 5. Referências Bibliográficas

---

- Firouzi Farrashbandi, N., & Eslami-Kalantari, M. (2020). Inverse bremsstrahlung absorption in laser-fusion plasma. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 14(3), 261–264. <https://doi.org/10.1007/s40094-020-00375-4>
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2005). *Fundamentals of physics (7ª Edição)*. Wiley.
- Katayama, S. (2013). *Handbook of Laser Welding Technologies*. Elsevier.
- Katayama, S., Uchiumi, S., Mizutani, M., Wang, J.-B., & Fujii, K. (2007). Penetration and porosity prevention mechanism in YAG laser-MIG hybrid welding. *Welding International*, 21, 25–31. <https://doi.org/10.1533/wint.2007.3680>
- Kumar, N., Sahoo, P., & Bandyopadhyay, A. (2018). Effect of Process Parameters on Bead Geometry, Microstructure and Hardness of a Pulsed Nd:YAG Laser Welded AISI 304 Stainless Steel Sheet. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 40(1–3), 65–93.
- Löffler, K. (2013). 4—Developments in disk laser welding. Em S. Katayama (Ed.), *Handbook of Laser Welding Technologies* (pp. 73–102). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.73>
- Maiman, T. H. (1960). Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, 187(4736), 493–494. <https://doi.org/10.1038/187493a0>
- Matsunawa, A., Katayama, S., Ikeda, H., & Nishizawa, K. (1992). Effect of pulse shaping on defect reduction in pulsed laser welding. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 1992(1), 547–556. <https://doi.org/10.2351/1.5058527>
- Mizuyama, Y. (2016). Understanding the Paraxial Gaussian Beam Formula. *COMSOL*. <https://www.comsol.com/blogs/understanding-the-paraxial-gaussian-beam-formula/>
- Moradi, M., Ghoreishi, M., & Khorram, A.. (2018). Process and outcome comparison between laser, tungsten inert gas (TIG) and laser-TIG hybrid welding. *Lasers in Engineering*, 39(3–6), 379–391.
- PrimaPower. (2022). *Selecting and Delivering Shield Gas in Laser Welding*. <https://www.primapowerlaserdyne.com/selecting-and-delivering-shield-gas-in-laser-welding/>

- Rosenthal, D. (1941). Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting. *Welding Journal*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Mathematical-Theory-of-Heat-Distribution-during-and-Rosenthal/589ce78a8ab8d5e52cf50411a428a5b3c6039455>
- Schäfer, M. (2018). *Laser in der Materialbearbeitung*. [https://www.ifsw.uni-stuttgart.de/dokumente/dissertationen\\_und\\_habilitationen/dissertationen/Schaefer\\_978-3-8316-4742-2.pdf](https://www.ifsw.uni-stuttgart.de/dokumente/dissertationen_und_habilitationen/dissertationen/Schaefer_978-3-8316-4742-2.pdf)
- Seabra, A. (1985). *Metalurgia Geral—Metalografia* (Vol. 3). Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Semak, V., & Matsunawa, A. (1997). The role of recoil pressure in energy balance during laser material processing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30, 2541. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/30/18/008>
- Sharifian, M., Ghozeisi, F., & Firouzi Farrashbandi, N. (2017). Inverse Bremsstrahlung absorption in under-dense plasma with Kappa distributed electrons. *AIP Advances*, 7(5), 055107. <https://doi.org/10.1063/1.4983475>
- Siegman, A. E. (1998). How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality. *DPSS (Diode Pumped Solid State) Lasers: Applications and Issues (1998), Paper MQ1*, MQ1. <https://doi.org/10.1364/DLAI.1998.MQ1>
- Siegman, Anthony E. (1986). *Lasers* (1ª Edição).
- Silva, M. C. (2020). *Numerical simulation of strains and stresses in welding*. <https://ria.ua.pt/handle/10773/31335>
- Svelto, O. (2010). *Principles of Lasers*. Springer Science & Business Media.
- Tekateki, E. (2022). Vickers hardness test.
- Trindade, A. (2020). *Ligações soldadas - Desenvolvimentos e novos processos associados às liogações soldadas - Elementos de estudo da UC de Tecnologia das Ligações*.
- Trindade, A. (2022). *Tecnologia da Soldadura - Apresentação didática da UC Tecnologia Mecânica II*.
- TRUMPF. (2009). *Manual de Instruções TruDisk 5302, TruDisk 6602, Trudisk 8002*.

## 5. Referências Bibliográficas

---

Trumpf. (2020). *BEO D50 Manual*. <https://fcc.report/FCC-ID/2AQUY-PGM001/4846325.pdf>

Weman, K. (2012). 18—Welding residual stress and distortion. Em K. Weman (Ed.), *Welding Processes Handbook (Second Edition)* (pp. 185–189). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095183.185>

## ANEXO 1 – Amostra 1

P-CON160N0000001-4 – “Amostra 1”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	1600 W			
Altura de Foco	0			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
12732,40	42,67			
Gráfico Tensão/Deformação				
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
304,18	315,19	328,08		
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
390,68	392,83	398,50		
394,00 $\pm$ 3,30				
Notas:				

**ANEXO 2 – Amostra 2**

P-CON180N0000001-4 – “Amostra 2”				
Tipo de Soldadura		Soldadura Contínua		
Potência		1800 W		
Altura de Foco		0		
Velocidade de Soldadura		2,25 m/min		
Frequência		-		
Razão Duração Pulso Período		-		
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]		Energia de soldadura [J/mm]		
14323,94		48,00		
Tensão de Cedência [Mpa]		Gráfico Tensão/Deformação		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
309,61	318,48	318,37	315,48 $\pm$ 4,16	
Tensão Última [Mpa]		Microestrutura Perfil Perpendicular		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
392,93	397,71	391,64	394,09 $\pm$ 2,61	
Microestrutura Perfil Longitudinal		<p><i>Notas: A imagem correspondente à microestrutura na amostra longitudinal corresponde à zona de início do cordão da soldadura.</i></p>		

## ANEXO 3 – Amostra 3

P-CON200N0000001-4 – “Amostra 3”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2000 W			
Altura de Foco	0			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
15915,49	53,33		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
302,65	314,61	315,22		
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
397,50	401,39	397,37		
<i>Notas: A imagem correspondente à microestrutura na amostra longitudinal corresponde à zona de início do cordão da soldadura. Na zona de transição entre o material virgem e fundido apresenta-se uma fratura.</i>				

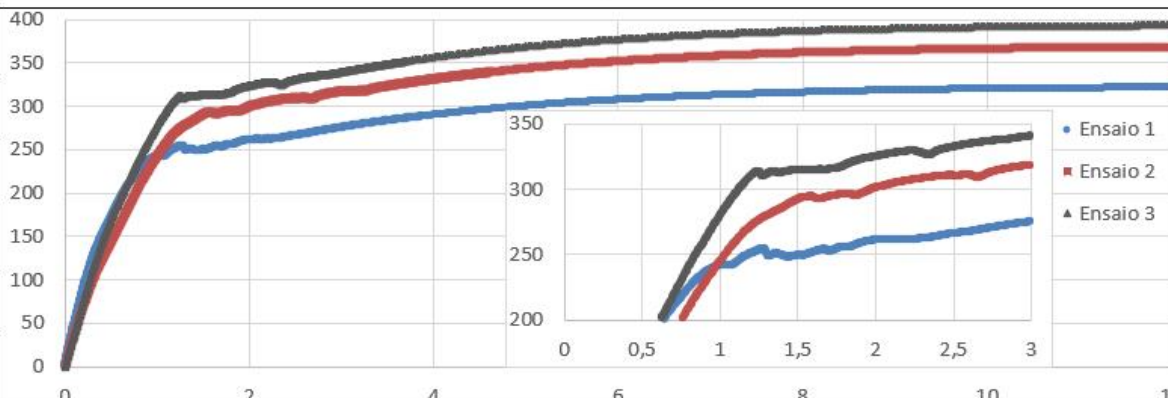
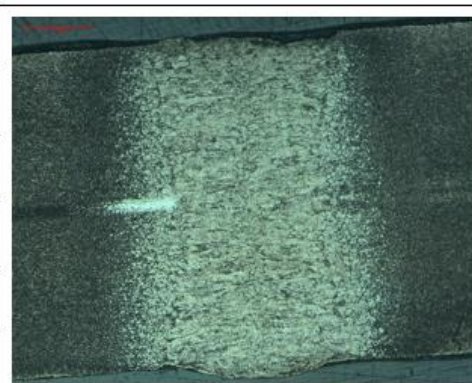
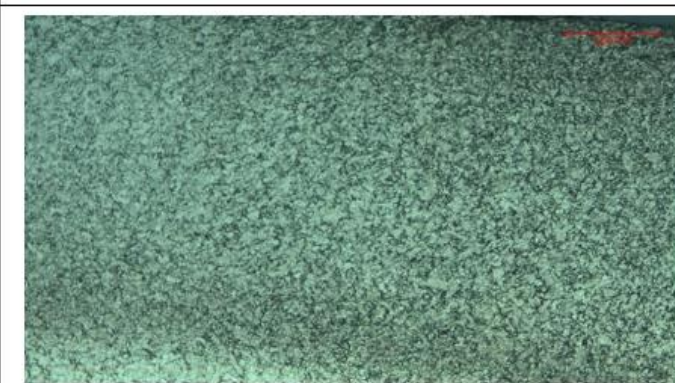
**ANEXO 4 – Amostra 4**

P-CON220N0000001-4 – “Amostra 4”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2200 W			
Altura de Foco	0			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
17507,04	58,67		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
302,81	318,31	322,29		
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
392,28	394,06	391,88		
<p>Notas: Durante o polimento da amostra longitudinal foi retirado demasiado material e como tal passou-se do plano central do cordão, podendo-se comprovar pela linha pela linha clara no meio da amostra que é um resíduo do arrefecimento do processo de laminagem a quente.</p>				

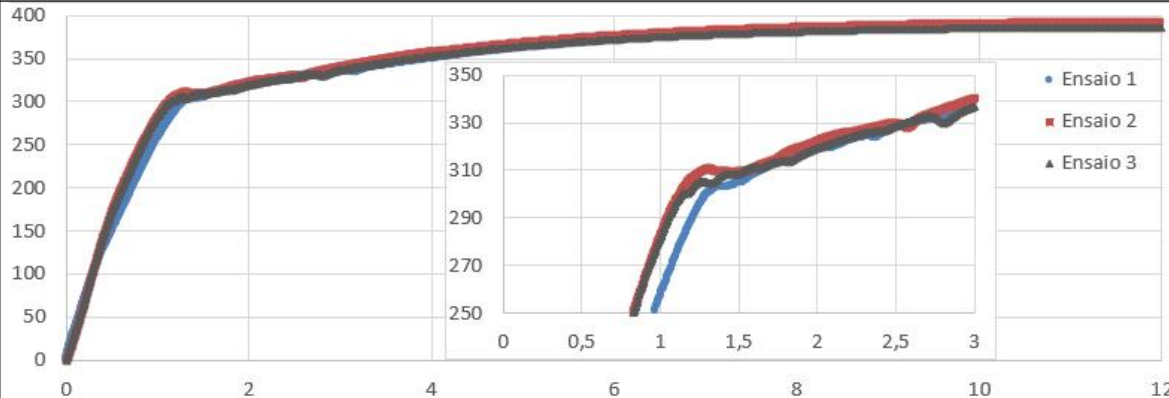
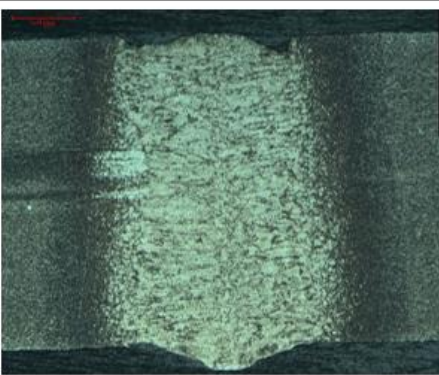
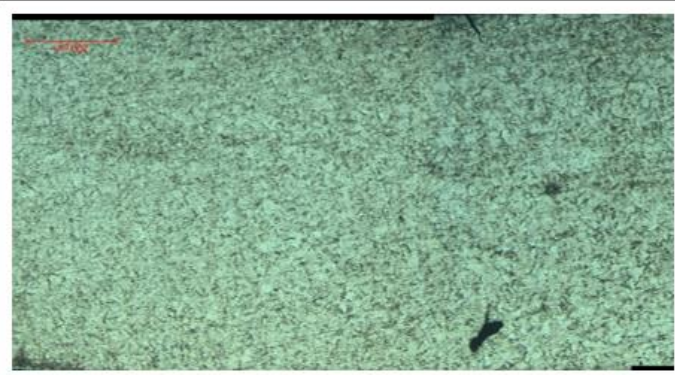
## ANEXO 5 – Amostra 5

P-CON240N0000001-4 – “Amostra 5”				
Tipo de Soldadura		Soldadura Contínua		
Potência		2400 W		
Altura de Foco		0		
Velocidade de Soldadura		2,25 m/min		
Frequência		-		
Razão Duração Pulso Período		-		
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]		Energia de soldadura [J/mm]		
19098,59		64,00		
Gráfico Tensão/Deformação				
Tensão de Cedência [Mpa]		Microestrutura Perfil Perpendicular		Microestrutura Perfil Longitudinal
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
310,40	307,41	304,70		
Média $\bar{\sigma}_{pad}$				
307,50 $\pm$ 2,33				
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
389,39	-	392,79		
Média $\bar{\sigma}_{pad}$				
391,09 $\pm$ 1,70				
Notas:				

**ANEXO 6 – Amostra 6**

P-CON200N4000001-4 – “Amostra 6”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	-2,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
1702,72	53,33			
Tensão de Cedência [Mpa]			Gráfico Tensão/Deformação	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
240,76	292,61	312,47		
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
320,60	369,23	393,56		
Média $\bar{\sigma}_{pad}$			Microestrutura Perfil Longitudinal	
281,95 $\mp$ 30,23				
Média $\bar{\sigma}_{pad}$				
361,13 $\mp$ 30,33				
Notas:				

## ANEXO 7 – Amostra 7

P-CON200N3000001-4 – “Amostra 7”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	-1,5mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
3027,05	53,33			
Tensão de Cedência [Mpa]			Gráfico Tensão/Deformação	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
302,83	310,71	300,33		
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
386,62	393,24	385,82		
Média $\bar{\sigma}_{pad}$				
388,56 $\pm$ 3,33				
Notas:				

**ANEXO 8 – Amostra 8**

P-CON200N2000001-4 – “Amostra 8”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	-1,0mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
6810,86	53,33			
Tensão de Cedência [Mpa]			Gráfico Tensão/Deformação	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
318,38	306,87	327,22		
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
388,06	389,89	396,74		
Média ± σ <sub>pad</sub>			Microestrutura Perfil Longitudinal	
317,49 ± 8,33				
Notas:				

## ANEXO 9 – Amostra 9

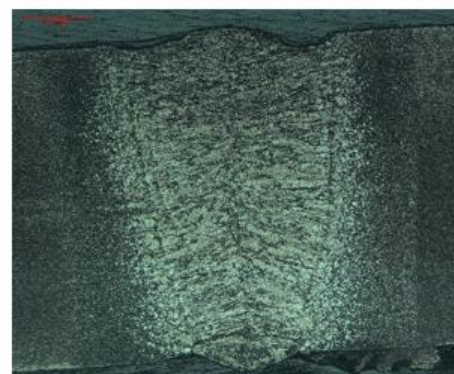
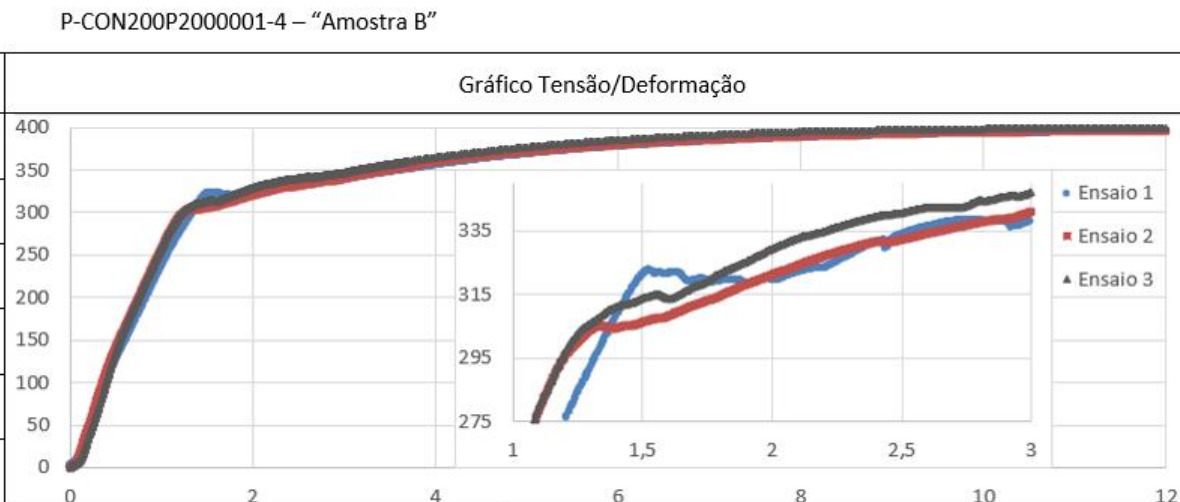
P-CON200N1000001-4 – “Amostra 9”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	-0,5mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
10266,64	53,33			
Gráfico Tensão/Deformação				
Microestrutura Perfil Perpendicular			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
307,55	315,25	314,70	312,49 $\pm$ 3,51	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
390,57	390,12	398,74	393,14 $\pm$ 3,96	
Notas:				

**ANEXO 10 – Amostra A**

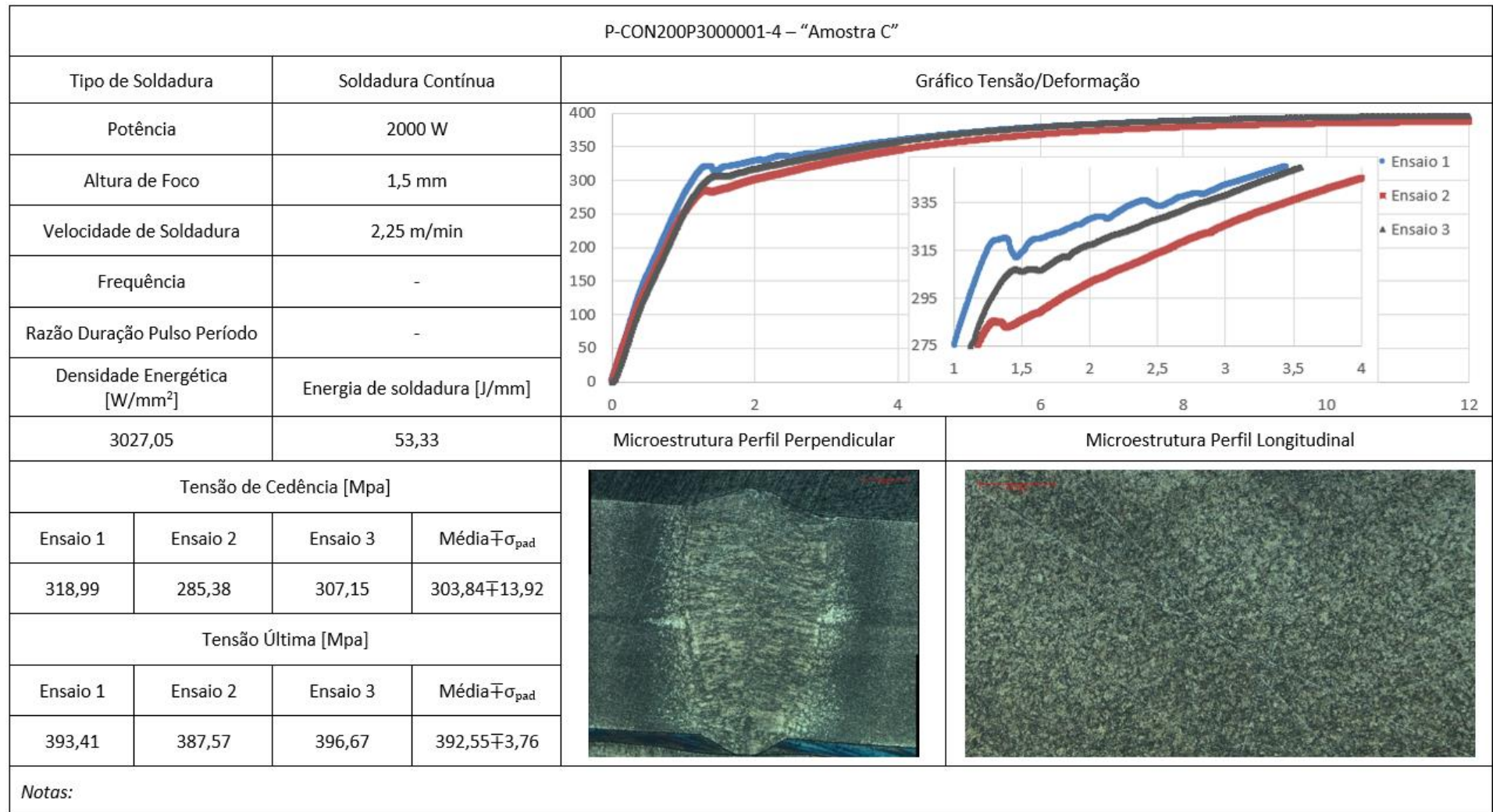
P-CON200P1000001-4 – “Amostra A”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	0,5 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
10266,64	53,33			
Gráfico Tensão/Deformação				
Microestrutura Perfil Perpendicular			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
307,55	318,24	315,26	313,68 $\pm$ 4,50	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
396,75	395,34	393,3	395,13 $\pm$ 1,42	
Notas:				

## ANEXO 11 – Amostra B

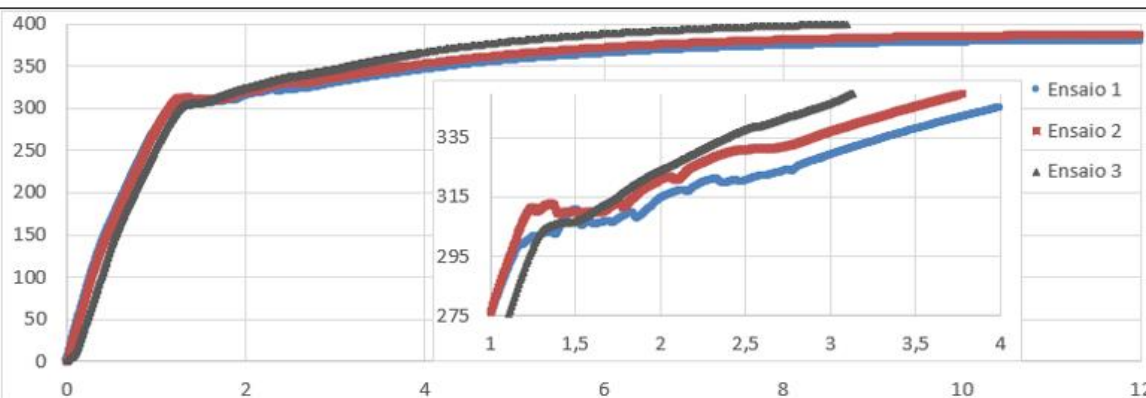
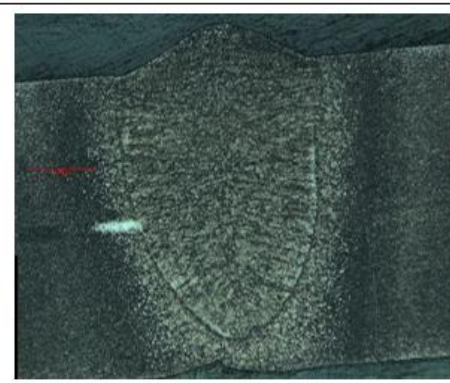

P-CON200P2000001-4 – “Amostra B”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	1,0mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
6810,86	53,33			
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
322,23	305,05	311,88	313,05 $\pm$ 7,06	
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
394,74	396,13	399,49	396,78 $\pm$ 2,00	
Notas:				



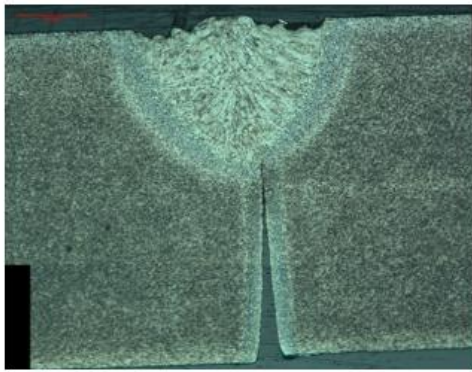
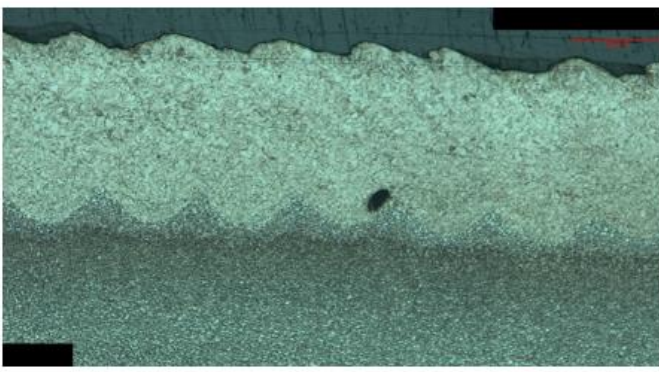
**ANEXO 12 – Amostra C**



## ANEXO 13 – Amostra D

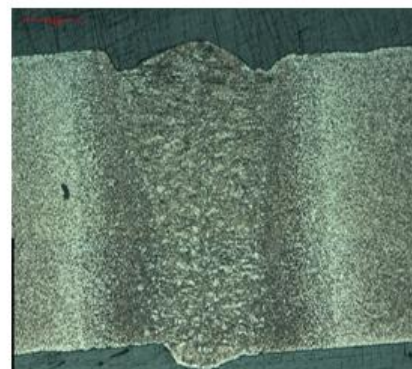
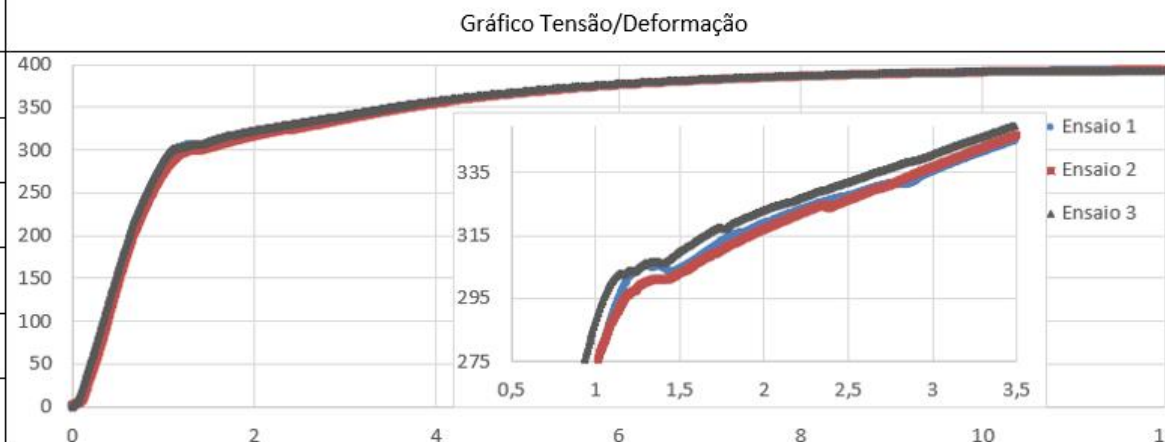
P-CON200P4000001-4 – “Amostra D”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Contínua			
Potência	2000 W			
Altura de Foco	2,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	-			
Razão Duração Pulso Período	-			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura [J/mm]			
1702,72	53,33			
Tensão de Cedência [Mpa]			Gráfico Tensão/Deformação	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
298,91	311,61	306,64		
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
379,73	387,08	403,55		
Média $\pm \sigma_{pad}$				
305,72 $\pm$ 5,23				
Média $\pm \sigma_{pad}$				
390,12 $\pm$ 9,96				
Notas:				

**ANEXO 14 – Amostra E**

P-PUL220P4080501-4 – “Amostra E”				
Tipo de Soldadura		Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação
Potência		2200 W		
Altura de Foco		0 mm		
Velocidade de Soldadura		2,25 m/min		
Frequência		80 Hz		
Razão Duração Pulso Período		40 %		
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]		Energia de soldadura (média) [J/mm]		
17507,04		58,67 (23,47)		
				Microestrutura Perfil Perpendicular
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
				Microestrutura Perfil Longitudinal
				
Notas:				

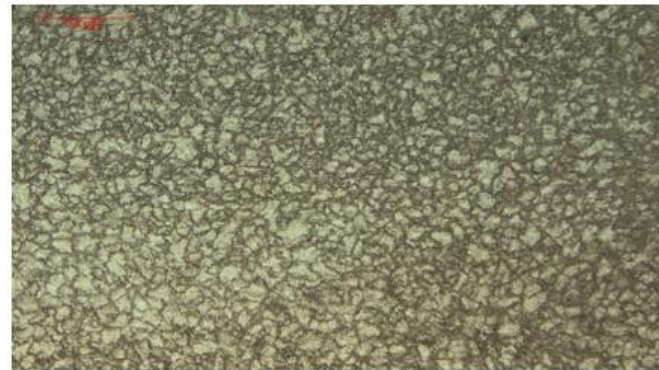
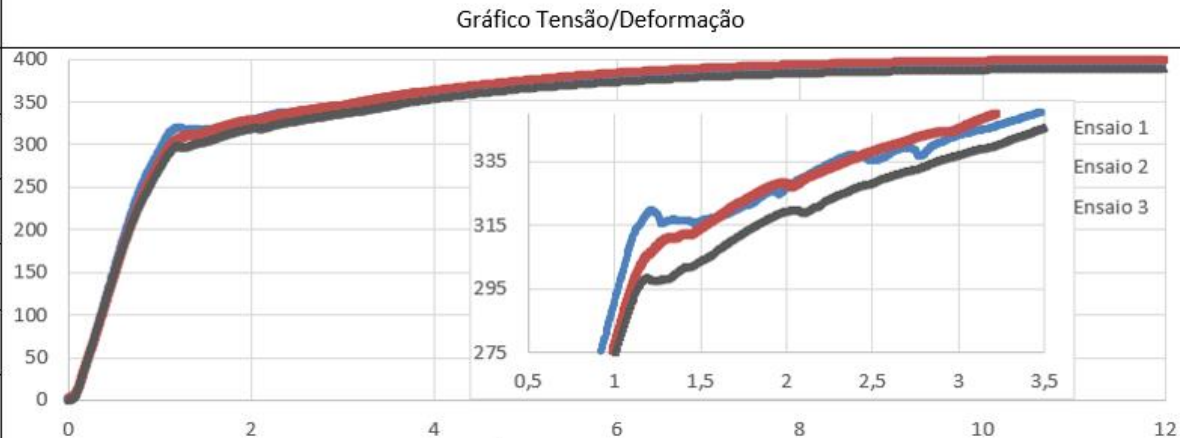
## ANEXO 15 – Amostra F

P-PUL220P4081001-4 – “Amostra F”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada			
Potência	2200 W			
Altura de Foco	0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	80 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
17507,04	58,67 (46,93)			
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
305,14	297,25	302,91	301,76 $\mp$ 3,32	
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
393,45	394,00	392,85	393,44 $\mp$ 0,47	
Notas:				



**ANEXO 16 – Amostra G**

P-PUL220P4081101-4 – “Amostra G”				
Tipo de Soldadura		Soldadura Pulsada		
Potência		2200 W		
Altura de Foco		0 mm		
Velocidade de Soldadura		2,25 m/min		
Frequência		80 Hz		
Razão Duração Pulso Período		88 %		
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]		Energia de soldadura (média) [J/mm]		
17507,04		58,67 (51,63)		
Tensão de Cedência [Mpa]		Microestrutura Perfil Perpendicular		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	Microestrutura Perfil Longitudinal
319,10	305,87	298,42	307,80 $\mp$ 8,55	
Tensão Última [Mpa]		Microestrutura Perfil Perpendicular		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	Microestrutura Perfil Longitudinal
393,39	399,68	388,88	393,98 $\mp$ 4,43	
Notas:				



## ANEXO 17 – Amostra H

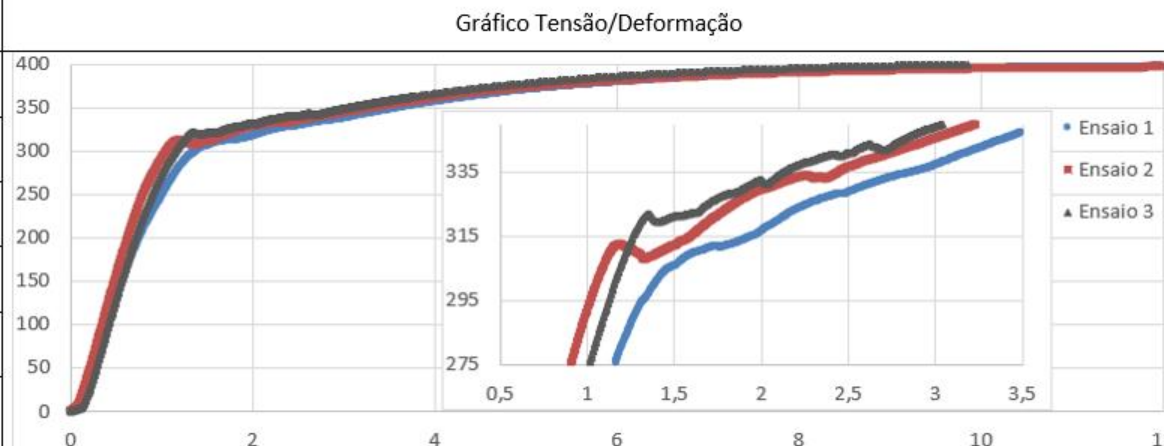
P-PUL240P4080901-4 – “Amostra H”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2400 W			
Altura de Foco	0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	72 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
19098,59	64,00 (46,08)		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ opad	
318,59	309,00	319,16	315,58 $\pm$ 4,66	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ opad	
402,43	394,09	404,48	400,33 $\pm$ 4,49	
Notas:				

**ANEXO 18 – Amostra I**

P-PUL240P4081001-4 – “Amostra I”				
Tipo de Soldadura		Soldadura Pulsada		
Potência		2400 W		
Altura de Foco		0 mm		
Velocidade de Soldadura		2,25 m/min		
Frequência		80 Hz		
Razão Duração Pulso Período		80 %		
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]		Energia de soldadura (média) [J/mm]		
19098,59		64,00 (51,20)		
Gráfico Tensão/Deformação				
Tensão de Cedência [Mpa]		Microestrutura Perfil Perpendicular		Microestrutura Perfil Longitudinal
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
311,55	312,55	321,98	315,36 $\pm$ 4,70	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
397,51	396,92	401,96	398,80 $\pm$ 2,25	
Notas:				

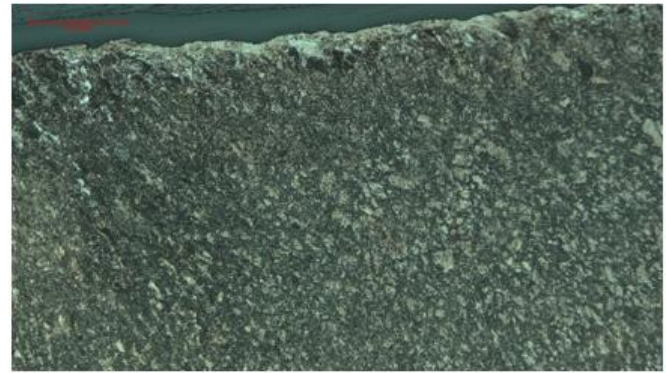
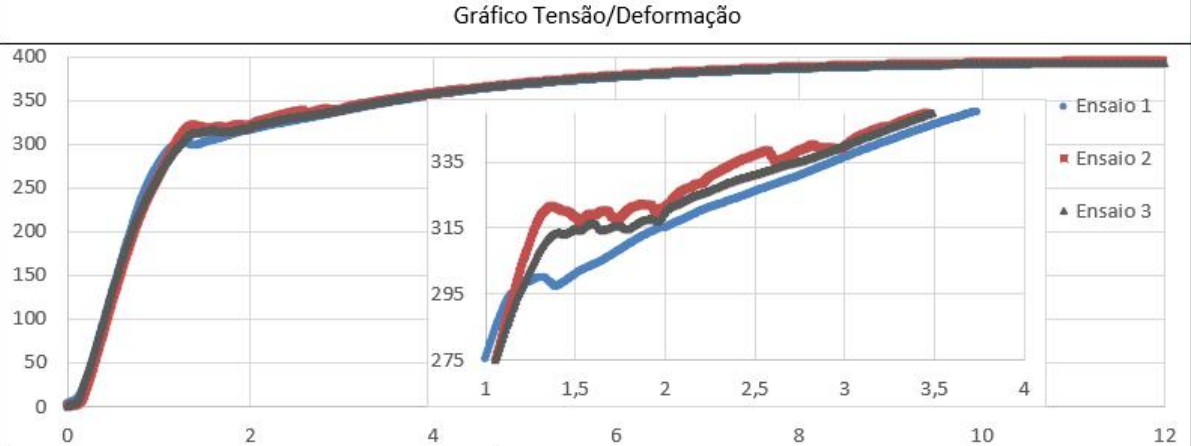
## ANEXO 19 – Amostra J

P-PUL240P4081101-4 – “Amostra J”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada			
Potência	2400 W			
Altura de Foco	0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	88 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
19098,59	64,00 (56,32)			
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
290,08	313,33	307,65	303,69 $\bar{x}$ 9,90	
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
396,17	403,03	398,34	399,18 $\bar{x}$ 2,86	
Notas:				



**ANEXO 20 – Amostra K**

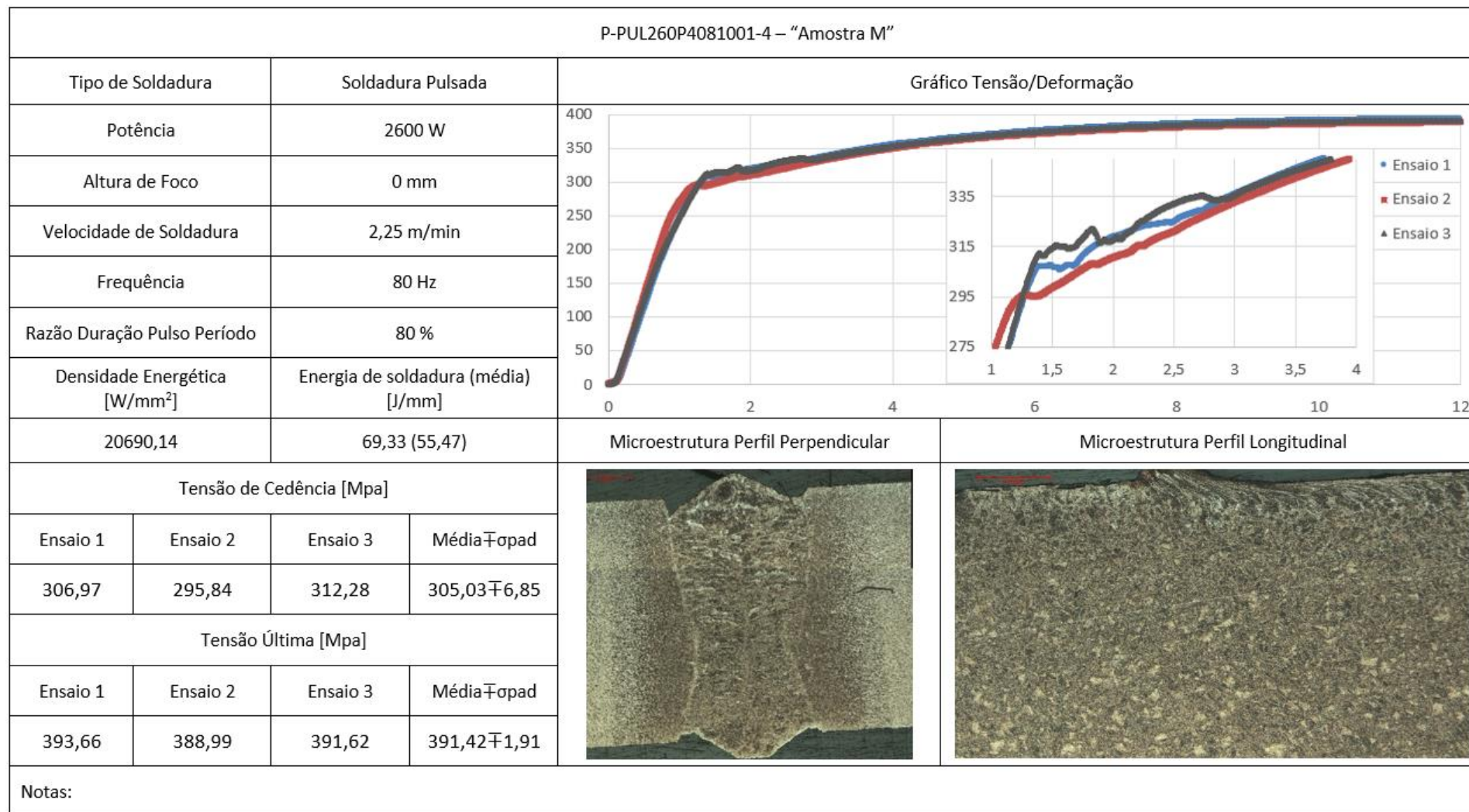
P-PUL260P4080751-4 – “Amostra K”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada			
Potência	2600 W			
Altura de Foco	0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	60 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
20690,14	69,33 (41,60)			
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média ± σ <sub>pad</sub>	
298,56	313,60	321,48	311,21 ± 9,51	
Tensão Última [Mpa]			Microestrutura Perfil Longitudinal	
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média ± σ <sub>pad</sub>	
391,23	396,46	393,29	393,66 ± 2,15	
Notas:				



## ANEXO 21 – Amostra L

P-PUL260P4080901-4 – “Amostra L”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2600 W			
Altura de Foco	0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	72 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
20690,14	69,33 (49,92)		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ Opad	
306,24	306,14	301,85	304,74 $\pm$ 2,04	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ Opad	
391,11	394,57	391,41	392,36 $\pm$ 1,57	
Notas:				

**ANEXO 22 – Amostra M**



## ANEXO 23 – Amostra N

P-PUL240P4120331-4 – “Amostra N”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2400 W			
Altura de Foco	+2,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	120 Hz			
Razão Duração Pulso Período	40 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
2043,26	64,00 (25,60)		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ $\sigma_{pad}$	
134,18	279,69	311,12	241,66 $\pm$ 77,08	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ $\sigma_{pad}$	
134,18	316,86	322,86	257,96 $\pm$ 87,57	
Notas:				

**ANEXO 24 – Amostra O**

P-PUL240P4080501-4 – “Amostra O”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2400 W			
Altura de Foco	+2,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	40 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
2043,26	64,00 (25,60)			
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ opad	
326,69	320,18	301,59	316,15 $\pm$ 10,64	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ opad	
358,78	324,77	320,86	334,81 $\pm$ 17,03	
Notas:				

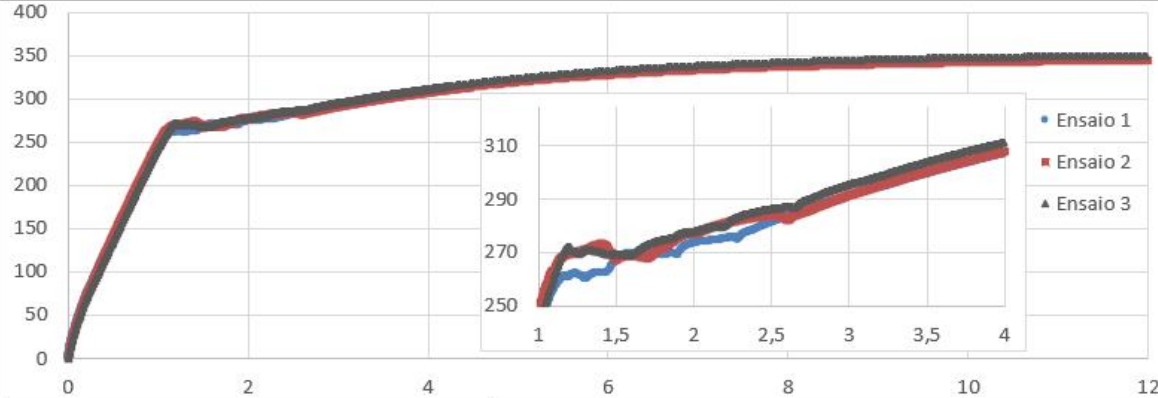
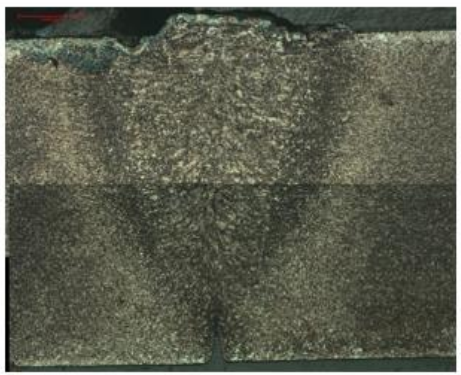

## ANEXO 25 – Amostra P

P-PUL240P4040101-4 – “Amostra P”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	2400 W			
Altura de Foco	+2,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	40 Hz			
Razão Duração Pulso Período	40 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
2043,26	64,00 (25,60)			
Tensão de Cedência [Mpa]			Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{\sigma}_{pad}$	
299,83	274,90	267,83	299,41 $\pm$ 19,84	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		
332,33	342,95	323,49	332,92 $\pm$ 7,95	
Notas:				

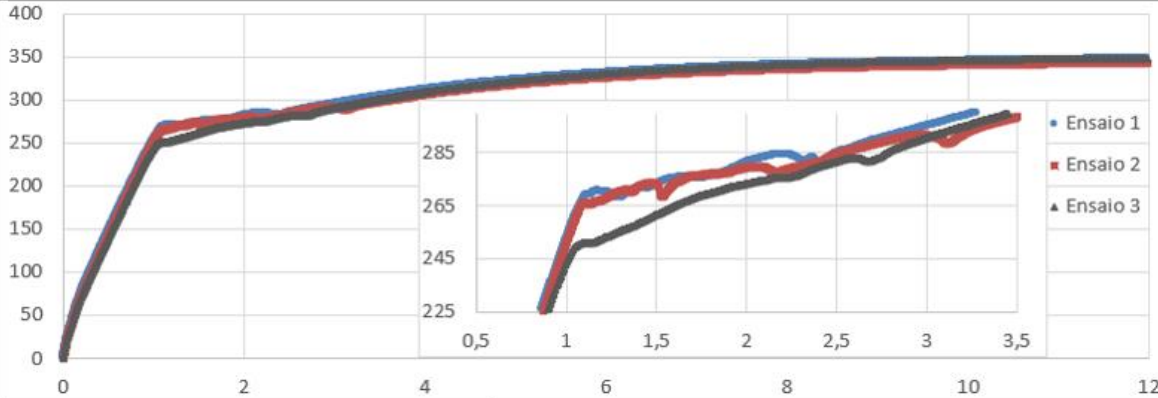
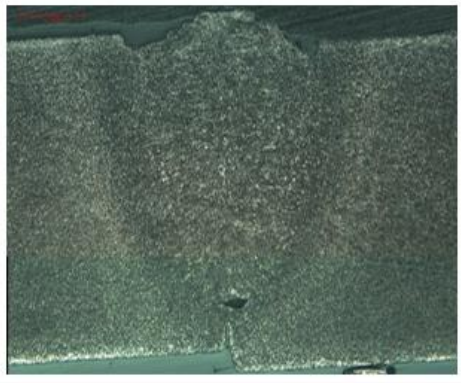
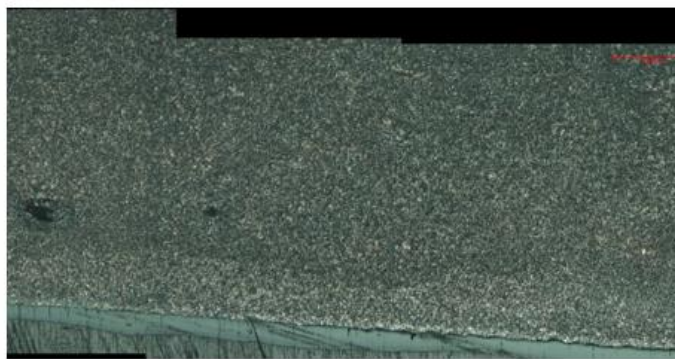
**ANEXO 26 – Amostra Q**

P-PUL400P2080441-4 – “Amostra Q”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	4000 W			
Altura de Foco	+1,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	35 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
13621,72	106,67 (37,33)		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
257,22	228,63	269,03	251,63 $\mp$ 16,96	
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
343,84	325,9	350,08	339,94 $\mp$ 10,94	
Notas:				

## ANEXO 27 – Amostra R

P-PUL350P2080501-4 – “Amostra R”					
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação		
Potência	3500 W				
Altura de Foco	+1,0 mm				
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min				
Frequência	80 Hz				
Razão Duração Pulso Período	40 %				
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]				
11919,01	93,33 (37,33)		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal	
Tensão de Cedência [Mpa]					
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ $\sigma_{pad}$		
260,88	269,22	272,18	267,43 $\pm$ 4,78		
Tensão Última [Mpa]					
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\pm$ $\sigma_{pad}$		
344,19	345,37	350,73	346,77 $\pm$ 2,85		
Notas:					

**ANEXO 28 – Amostra S**

P-PUL300P2080581-4 – “Amostra S”				
Tipo de Soldadura	Soldadura Pulsada		Gráfico Tensão/Deformação	
Potência	300 W			
Altura de Foco	+1,0 mm			
Velocidade de Soldadura	2,25 m/min			
Frequência	80 Hz			
Razão Duração Pulso Período	47 %			
Densidade Energética [W/mm <sup>2</sup> ]	Energia de soldadura (média) [J/mm]			
10216,29	80,00 (37,60)		Microestrutura Perfil Perpendicular	Microestrutura Perfil Longitudinal
Tensão de Cedência [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	 	
269,23	266,14	251,19		
Tensão Última [Mpa]				
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média $\bar{x}$ $\sigma_{pad}$	
348,03	342,79	349,00	346,61 $\bar{x}$ 2,73	
Notas:				