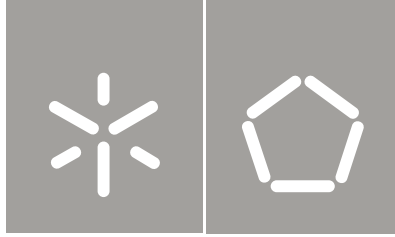


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Miguel Sampaio Meira

Aplicação de ultrassons
durante a soldadura de aços de construção:
caracterização microestrutural dos cordões



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Miguel Sampaio Meira

Aplicação de ultrassons
durante a soldadura de aços de construção:
caracterização microestrutural dos cordões

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Joaquim Barbosa

Outubro de 2012

Em memória do meu avô Joaquim ...

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho desta dimensão exige sempre um grande esforço e dedicação. Após a sua conclusão, olhamos para trás e verificamos que aprendemos muito mais do que aquilo que demos. No final desta etapa, a todos aqueles que permitiram a realização deste trabalho, não poderia terminar sem lhes prestar um agradecimento sincero.

Ao meu orientador, Professor Joaquim Barbosa, pela sua disponibilidade e orientação prestada ao longo da realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Lamela, pela sua disponibilidade em ceder as instalações da empresa Ribalde para a realização do procedimento experimental.

Ao Miguel Abreu, responsável pelo laboratório de metalurgia, e ao Vítor Neto, responsável pelas oficinas do DEM, pelo auxílio e conhecimento prestado na execução de algumas etapas experimentais.

Ao professor, Hélder Puga, pela colaboração na presente dissertação na parte de utilização do equipamento de ultrassons.

A todos os meus colegas de curso, em especial ao Desterro, ao Areias, ao Vítor Hugo, e ao Cristiano pela ajuda, comentários e troca de ideias bastante proveitosa.

Porque os últimos são sempre os primeiros, às pessoas mais importantes da minha vida. Aos meus Pais por todo o apoio, compreensão, incentivo e, por todo o sacrifício que fizeram ao longo destes anos para me darem um futuro. À minha Irmã que apesar de estar longe sempre esteve comigo e que sempre verei como um exemplo a seguir. À Sara por mostrar ao longo deste percurso que é mais do que uma namorada, e sim uma verdadeira companheira para os bons e maus momentos. Aos meus verdadeiros amigos, em especial ao Jordan pelo apoio, compreensão e distração que me proporcionaram durante este período.

Todos aqui mencionados, contribuíram em algo para que este trabalho fosse executado e, vou levar comigo todos os ensinamentos prestados para a nova etapa da minha vida.

A todos, MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A realização deste trabalho teve como objectivo principal o estudo do possível efeito ao nível microestrutural de vibrações ultrassónicas na soldadura. Para isso, foi usado um sistema (soldadura + ultrassons) em que ao mesmo tempo que uma peça é soldada são transmitidas vibrações de uma determinada frequência.

Nos provetes de aço C1, com uma secção rectangular 200x100 e espessura 8 mm, efectuou-se um rasgo na parte central onde foi depositado o cordão de soldadura. Além desse rasgo foi realizado um furo roscado em todos os provetes que permite a sua fixação à unidade transmissora de ultrassons. De forma a evitar dissipação de energia no momento da soldadura, construiu-se um suporte que permite fixar o conjunto *transdutor - waveguide* a uma determinada altura.

A soldadura dos provetes foi realizada na empresa Ribalde, sendo o processo executado por um robô de soldadura MIG. O equipamento de ultrassons usado foi o Mastersonic MSG 2000, um transdutor e um waveguide. Foram utilizados 6 provetes divididos em três grupos, sendo que nestes um dos provetes foi soldado normalmente e o outro com os ultrassons ligados. A intensidade e alimentação do fio foram alterados nos três testes sendo a velocidade de soldadura mantida constante. Pretendia-se que a frequência e potência dos ultrassons fossem iguais nos três testes, contudo no último teste, não foi possível manter o mesmo valor de frequência, sendo o seu valor ligeiramente diferente.

Após a soldadura dos provetes, retirou-se uma amostra de cada um para efectuar a sua caracterização e respectiva avaliação do efeito da vibração. Esta fez-se através de uma análise macro e microestrutural, avaliação da microdureza e tamanho de grão. Os resultados obtidos permitem concluir que as ondas ultrassónicas não alteraram os constituintes presentes na microestrutura resultante da soldadura. No entanto, provocaram ligeiras melhorias em relação as características geométricas do cordão, ao tamanho de grão e microdureza do produto final.

ABSTRACT

This project was conducted as an intent to study of the effect, at a microstructural level, of the ultrasonic vibration in the welding process. For that purpose, a system was used (welding +ultrasonic) where in while a specimen is welded, vibrations are transmitted in a given frequency.

For the steel specimens C1, with a rectangular section of 200x100 and a thickness of 8mm, was produced a groove on the central part where it was deposited weld bead. Besides this groove, a threaded hole was performed on all specimens which enables the fixation of the ultrasonic on the specimens. It is through this link between the waveguide and the specimen that vibrations are transmitted during welding. It was necessary to build a support allowing the support of the ultrasonic at a certain height to avoid power dissipation.

The welding of the test pieces was performed in the company Ribalde by a MIG welding robot. The ultrasonic equipment used was the Mastersonic MSG 2000, a transducer and a waveguide. Six test specimens were used, divided into three groups in which one of the specimens was typically welded and the other with the ultrasonic connected. The current was altered in three tests but the weld speed was kept constant. The frequency and power of the ultrasound were the same in the three tests. However, due to small problem, there was a light difference in the frequency from the last test.

After welding the specimens, one sample was removed from each one for performing the characterization and study of the effect of the ultrasonic, respectively. This was executed through a macro and microstructural analysis and evaluation of hardness and grain size. The results obtained allows us to conclude that the vibration does not change the resulting microstructure of the weld, however, leads to improvements compared to the grain size and hardness of the final product.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE NOMENCLATURA GERAL	xxi
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUANDRAMENTO	1
1.2 OBJECTIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 SOLDADURA MIG/MAG	5
2.1.1 Equipamento de soldadura	8
2.1.2 Vantagens/desvantagens	8
2.2 METALURGIA DA SOLDADURA	9
2.2.1 Cordão	10
2.2.2 Zona termicamente afectada	10
2.2.3 Material base	10
2.2.4 Microestrutura do cordão	11
2.2.4.1 Microconstituintes	13
2.2.5 Grãos	14
2.2.5.1 Solidificação	15
2.2.5.2 Solidificação na soldadura	16

2.2.5.3 Tamanho de grão e as propriedades mecânicas	17
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO	18
2.4 VIBRAÇÃO	19
2.4.1 Ondas mecânicas	20
2.4.2 Classificação das ondas	21
2.4.3 Geração de ondas ultrassônicas	22
2.4.3.1 Tipos de transdutores	22
2.4.3.2 Waveguide	23
2.5 ULTRASSONS NA SOLDADURA	24
2.5.1 Origem	24
2.5.2 Algumas investigações efectuadas	25
2.5.3 Princípio de funcionamento	26
2.5.4 Metodologias usadas	27
2.5.5 Vantagens	30
2.5.6 Limitações	31
CAPÍTULO III: MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	33
3.1 PROVETES	33
3.1.1 Material	33
3.1.2 Geometria	34
3.1.3 Fabrico	34
3.2 SUPORTE PARA OS ULTRASSONS	36
3.3 APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO NA SOLDADURA	38
3.3.1 Equipamento de soldadura	40
3.3.2 Equipamento de ultrassons	41
3.3.3 Parâmetros utilizados	43

3.3.4 Execução prática	44
3.4 ANÁLISE METALOGRAFICA	45
3.4.1 Corte	45
3.4.2 Lixamento	46
3.4.3 Polimento	46
3.4.4 Ataque químico	47
3.5 EXAME MACROGRÁFICO	47
3.6 EXAME MICROGRÁFICO	48
3.5.1 Tamanho de grão	49
3.5.2 Microdureza	50
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	53
4.1 CORDÕES DE SOLDADURA	53
4.2 MACROGRAFIA	54
4.2.1 Provete 1 vs Provete 2	54
4.2.2 Provete 3 vs Provete 4	55
4.2.3 Provete 5 vs Provete 6	55
4.2.4 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6	56
4.3 MICROESTRUTURA	57
4.3.1 Material base	57
4.3.2 Provete 1 vs provete 2	57
4.3.2.1 Zona termicamente afectada	58
4.3.2.2 Cordão	59
4.3.3 Provete 3 vs provete 4	60
4.3.3.1 Zona termicamente afectada	60
4.3.3.2 Cordão	61

4.3.4 Provete 5 vs provete 6	61
4.3.4.1 Zona termicamente afectada.....	62
4.3.4.2 Cordão	62
4.3.5 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6.....	62
4.4 TAMANHO DE GRÃO	63
4.4.1 Provete 1 vs provete 2	63
4.4.2 Provete 3 vs provete 4	64
4.4.3 Provete 5 vs provete 6	65
4.4.4 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6.....	65
4.5 MICRODUREZA.....	66
4.5.1 Material base	66
4.5.2 Provete 1 vs provete 2	66
4.5.3 Provete 3 vs provete 4	67
4.5.4 Provete 5 vs provete 6	68
4.5.5 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6.....	69
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES GERAIS	71
5.1 CONCLUSÃO.....	71
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS.....	75
ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO AÇO.....	79
ANEXO B – DESENHOS TÉCNICOS	83
ANEXO C - MICROGRAFIAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Soldadura por fusão [2].	6
Figura 2. 2 - Soldadura MIG/MAG [9].....	6
Figura 2. 3 - Esquema representativo da soldadura MIG/MAG [10].	7
Figura 2. 4 - Equipamento usado no processo MIG/MAG [10].	8
Figura 2. 5 - Zonas resultantes da soldadura [5].....	9
Figura 2. 6 - Ciclo térmico presente na ZTA [10].	10
Figura 2. 7 - Diagrama de equilíbrio aços [14].....	11
Figura 2. 8 - Microestrutura típica de um aço hipoeutectóide (ferrite + perlite) [15].	12
Figura 2. 9 - Microestrutura de Widmanstätten [15].....	12
Figura 2. 10 - Microestrutura martensítica e banítica [16].....	14
Figura 2. 11 - Grão e fronteira de grão [12].....	14
Figura 2. 12 - Curva de arrefecimento [17].	15
Figura 2. 13 - Etapas de Solidificação de um metal fundido [17].	15
Figura 2. 14 - Estrutura de grãos grosseiros e finos [17].....	16
Figura 2. 15 - Representação dos grãos resultantes da soldadura [5]	17
Figura 2. 16 - Variação das propriedades mecânicas com o tamanho de grão [12].	17
Figura 2. 17 - Tratamento térmico [18]	18
Figura 2. 18 - Características de uma onda periódica [21].....	20
Figura 2. 19 - Espectro de frequências [21].	21
Figura 2. 20 - Transdutor monocristal [22].....	23
Figura 2. 21 - Esquema representativo do processo [39].....	26
Figura 2. 22 - Equipamento utilizado [40].	26
Figura 2. 23 - Posicionamento das almofadas de carga [44].....	28
Figura 2. 24 - Sistema físico de vibração [23].....	28
Figura 2. 25 - Fenómeno de ressonância [45].	29

Figura 2. 26 - Velocidades de leitura diferentes [44].	30
Figura 3. 27 - Aço C1 100x8.	33
Figura 3. 28 - Geometria dos provetes.	34
Figura 3. 29 - Corte dos provetes no serrote mecânico.	34
Figura 3. 30 - Execução do rasgo no provete.	35
Figura 3. 31 - Esquema representativo da ligação do waveguide ao provete.	35
Figura 3. 32 - Execução do furo roscado e provete definido.	36
Figura 3. 33 - Esquema representativo do suporte.	36
Figura 3. 34 - Suporte para segurar o conjunto <i>transdutor - waveguide</i> .	37
Figura 3. 35 - Componentes seccionados no serrote mecânicos.	37
Figura 3. 36 - Execução do furo de 85mm no torno mecânico.	38
Figura 3. 37 - Suporte para segurar o conjunto <i>transdutor - waveguide</i> .	38
Figura 3. 38 - Esquema representativo do procedimento usado.	39
Figura 3. 39 - Esquema representativo da propagação das ondas ultrassónicas.	39
Figura 3. 40 - Empresa Ribalde.	40
Figura 3. 41 - Instrumentação usada.	40
Figura 3. 42 - Robô de soldadura MIG.	41
Figura 3. 43 - Mastersonic MSG 2000.	41
Figura 3. 44 - Transdutor e waveguide utilizados.	42
Figura 3. 45 - Software de controlo Mastersonic.	42
Figura 3. 46 - Esquema representativo dos componentes que geram os ultrassons.	43
Figura 3. 47 - Soldadura com os ultrassons activos.	45
Figura 3. 48 - Seccionamento das amostras.	45
Figura 3. 49 - Equipamento de corte (Discotom).	46
Figura 3. 50 - Polideira Mecapol.	46
Figura 3. 51 - Reagente Nital 5%.	47
Figura 3. 52 - Medição através do <i>Image Pro Plus</i> .	48

Figura 3. 53 - Esquema representativo das zonas de medição do cordão.....	48
Figura 3. 54 - Microscópio óptico e máquina fotográfica.....	49
Figura 3. 55 - Esquema representativo das amostras analisadas.....	49
Figura 3. 56 - Cálculo da área e do número de grãos pelo <i>ImageJ</i>	50
Figura 3. 57 - Microdurímetro.....	51
Figura 3. 58 - Esquema representativo da linha de microdureza analisada.....	51
Figura 3. 59 - Medição das diagonais do indentador.....	52
Figura 4. 60 - Cordões de soldadura dos provetes.....	53
Figura 4. 61 - Amostra do provete 1.....	54
Figura 4. 62 - Amostra do provete 2.....	54
Figura 4. 63 - Amostra do provete 3.....	55
Figura 4. 64 - Amostra do provete 4.....	55
Figura 4. 65 - Amostra do provete 5.....	56
Figura 4. 66 - Amostra do provete 6.....	56
Figura 4. 67 - Microestrutura do aço C1.....	57
Figura 4. 68 - Zonas da soldadura amostra do provete 1.....	58
Figura 4. 69 - Microestrutura da zona termicamente afectada provete 1 e 2.....	58
Figura 4. 70 - Microestrutura da zona recristalizada provete 1 e 2.....	59
Figura 4. 71 - Microestrutura do cordão provete 1 e 2.....	59
Figura 4. 72 - Zona termicamente afecta de recristalizada do provete 3.....	60
Figura 4. 73 - Microestrutura da zona termicamente afectada provete 3 e 4.....	60
Figura 4. 74 - Microestrutura do cordão provete 3 e 4.....	61
Figura 4. 75 - Zonas resultantes da soldadura (metal base, ZTA e cordão).....	61
Figura 4. 76 - Microestrutura da zona termicamente afectada provete 5 e 6.....	62
Figura 4. 77 - Microestrutura do cordão provete 3 e 4.....	62
Figura 4. 78 - Diâmetro médio da secção do grão provete 1 e 2.....	63
Figura 4. 79 - Diâmetro médio da secção do grão provete 3 e 4.....	64

Figura 4. 80 - Diâmetro médio da secção do grão provete 5 e 6.	65
Figura 4. 81 - Dureza Provete 1 vs Provete 2.	66
Figura 4. 82 - Dureza Provete 3 vs Provete 4.	67
Figura 4. 83 - Dureza Provete 5 vs Provete 6.	68
Figura C. 1 - Zonas de soldadura provete 1.	99
Figura C. 2 - Zonas de soldadura provete 2.	99
Figura C. 3 - ZTA provete 3.	100
Figura C. 4 - Microestrutura do cordão provete 4.	100
Figura C. 5 - Transição da ZTA provete 5.	101
Figura C. 6 - ZTA provete 6.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Tratamento térmico vs Aplicação de vibração [23]	31
Tabela 3. 2 - Composição química do aço C1 [49]	33
Tabela 3. 3 - Parâmetros dos 3 testes.....	44
Tabela 4. 4 - Resultados macrografia provete 1 vs provete 2.	54
Tabela 4. 5 - Resultados macrografia provete 3 vs provete 4.	55
Tabela 4. 6 - Resultados macrografia provete 5 vs provete 6.	56

LISTA DE NOMENCLATURA GERAL

Abreviaturas

MIG - Metal Inert Gas

MAG - Metal Active Gas

TIG - Tungsten Inert Gas

SER - Soldadura por eléctrodo revestido

SAS - Soldadura por arco submerso

ZTA - Zona termicamente afectada

ZTA_r - Zona termicamente afectada recristalizada

ZTA_e - Zona termicamente afectada do lado esquerdo

ZTA_d - Zona termicamente afectada do lado direito

P1 - Provete 1

P2 - Provete2

P3 - Provete 3

P4 - Provete 4

P5 - Provete 5

P6 - Provete 6

HV - Vickers

Hz - Hertz

Símbolos

A - Amplitude da onda

λ - Comprimento de onda

T - Período

f - Frequência

V - Velocidade de propagação

ρ - Densidade do meio

m - Massa

k - Rigidez

c - Coeficiente de amortecimento

\bar{d} - Diâmetro médio da secção do grão

\bar{A} - Área média da secção do grão

A_t - Área total de teste

N - Número total de grãos

d1 , d2 - Diagonais resultantes da indentação

F- Carga aplicada

Z - Impedância

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

1.1 ENQUANDRAMENTO

O projecto de uma estrutura ou componente implica a existência de um conhecimento sobre os materiais e ligações a utilizar. Desde sempre a parte crítica das estruturas são as ligações entre os diferentes componentes que a constituem. Essa problemática ganhou ainda mais força devido à evolução dos conceitos e ao uso de elementos estruturais de geometria complexa. Por essa razão, é necessário efectuar uma análise rigorosa das ligações de uma estrutura em cada projecto. O desempenho e durabilidade da estrutura é totalmente dependente da forma como são ligados os elementos que a constituem.

A soldadura é um processo de ligação permanente bastante utilizado pela indústria hoje em dia. Em conjunto com as ligações aparafusadas, as ligações soldadas são a forma mais eficiente de efectuar a ligação de estruturas, equipamentos, entre outros. A escolha do tipo de ligação depende do projectista, das condições de montagem, aplicação em causa e outros aspectos. Ou seja, não existe o melhor tipo de ligação, mas sim o mais adequado numa determinada situação [1].

Este processo de ligação tem um campo de aplicação bastante alargado desde o fabrico à recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Pode ser usado em pequenos componentes electrónicos e até em grandes estruturas (pontes, navios). Existem vários processos de soldadura diferentes, como por exemplo: MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas), TIG (Tungesten Inert Gas). A escolha do processo mais adequado é efectuada consoante a aplicação em causa [1,2].

A soldadura é um processo de ligação bastante atractivo uma vez que, apresenta como vantagens a sua versatilidade e o facto de ser um processo económico e simples. No entanto, é um processo delicado devido ao ciclo térmico associado, necessitando de uma correcta execução tendo em conta vários parâmetros envolvidos. Uma soldadura de qualidade não é garantida apenas pela ligação dos componentes, mas sim se no final do processo for mantida a integridade do conjunto soldado [2,3].

Este processo de ligação envolve muitos fenómenos metalúrgicos como a fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e até mesmo tensões de contracção, que podem causar muitos problemas práticos. O grande problema da soldadura está relacionado com o ciclo térmico que ocorre durante o processo. Este induz nos materiais alterações de carácter metalúrgico localizadas numa zona restrita onde estão adjacentes variações de propriedades e microestrutura (zona termicamente afectada, cordão). Além disso, podem criar-se tensões locais, devido ao aquecimento na zona do cordão que tende a dar origem a uma dilatação. Esta é dificultada pelo resto do componente que se encontra a uma temperatura inferior. Este fenómeno dá origem à criação de tensões residuais, distorções, podendo até originar deformações plásticas [4,5].

Sejam de carácter metalúrgico ou mecânico, estas alterações por vezes são aceitáveis, em relação ao comportamento para a aplicação desejada. Nessas situações os conjuntos soldados são utilizados no seu estado bruto de soldadura. No entanto, noutras situações é necessário ou até mesmo obrigatório, intervir com o objectivo principal de reduzir esses efeitos prejudiciais e melhorar as propriedades finais, garantindo dessa forma a integridade em serviço das ligações soldadas [4,5].

Parte destes inconvenientes da soldadura são solucionados pela indústria através da aplicação de métodos que envolvem um tratamento térmico. No final da soldadura, o componente/estrutura é levado a um forno para ser aquecido a uma determinada temperatura sendo posteriormente arrefecido. Contudo, a aplicação de tratamentos térmicos apresenta algumas limitações como o tamanho das peças, o custo do processo e a poluição ambiental gerada [6].

Devido às limitações apresentadas pelo tratamento térmico, voltou-se a pensar no uso da vibração como uma possível alternativa a este método. Isto é, durante a execução da soldadura fornecer energia sob a forma de vibrações ao componente soldado, sendo o objectivo principal a melhoria do produto final da soldadura. Esta alternativa permitiria uma ausência de poluição ambiental, poupar energia, bem como reduzir as horas de trabalho [7].

Apesar de conseguir potencialmente resolver alguns problemas do tratamento térmico, o uso da vibração na soldadura está longe de ser consensual. Várias são as pesquisas efectuadas até ao momento, mas ainda não existe uma teoria coerente e concordante sobre o seu efeito. Alguns estudos afirmam que este método é eficaz e dá origem a melhores resultados que o tratamento térmico, por outro lado, existem estudos em que se concluiu exactamente o oposto. A falta de conhecimento e

informação qualitativa sobre a eficácia deste conceito (aplicação de vibração durante a soldadura) leva a que a maior parte da indústria continue a aplicar o tratamento térmico no final da soldadura [6,7].

1.2 OBJECTIVOS

Esta dissertação tem como objectivo principal a avaliação do efeito da aplicação de vibração durante a soldadura na microestrutura dos cordões. Ou seja, pretende-se verificar a presença ou ausência de melhorias/alterações nas características microestruturais, após a aplicação de vibrações ultrassónicas no componente soldado.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos:

No presente **capítulo 1**, realiza-se um enquadramento, apresentam-se os objectivos bem como a estrutura da dissertação.

No **capítulo 2**, efectua-se uma revisão bibliográfica sobre o tema sendo abordado o processo de soldadura MIG/MAG, a metalurgia da soldadura e os métodos usados para reduzir os efeitos prejudiciais da soldadura (tratamento térmico e aplicação de vibrações).

No **capítulo 3**, referem-se os materiais e procedimentos utilizados na execução deste trabalho.

No **capítulo 4**, mostram-se e analisam-se os resultados obtidos na análise macro e micrográfica, avaliação do tamanho de grão e microdureza dos provetes soldados.

No **capítulo 5**, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDADURA MIG/MAG

A soldadura é um processo de ligação permanente entre duas peças metálicas, sendo que nessa ligação é mantida a continuidade metálica com propriedades mecânicas idênticas ou superiores ao material base. Numa soldadura ideal não seria possível distinguir o cordão do material base, no entanto, isso não é possível devido à complexidade das variáveis envolvidas. Porém, isso não significa que não se consigam obter ligações soldadas de elevada fiabilidade em serviço. Para obter juntas de soldadura de qualidade devem cumprir-se quatro requisitos básicos:

- Fornecer energia para facilitar a união;
- Remover as substâncias contaminadoras superficiais;
- Promover a ausência de contaminação pela atmosfera, proteção gasosa;
- Controlar a estrutura do metal depositado [2,3].

Uma boa soldadura deve oferecer, entre outras coisas, segurança e qualidade, sendo para isso necessário que os cordões sejam efetuados com o máximo de habilidade e com os parâmetros adequados. Os parâmetros utilizados num processo de soldadura são bastante importantes nas características geométricas do cordão obtido. A intensidade, velocidade de alimentação do fio, tensão do arco eléctrico, velocidade de soldadura, tipo de eléctrodo, entre outros, são parâmetros que influenciam directamente o resultado final da soldadura. Para seleccionar os parâmetros mais eficientes é necessário efectuar alguns testes e ajustes do processo. Uma escolha inadequada pode dar origem a defeitos de soldadura como por exemplo: falta de penetração, inclusão de escória, porosidades [2,3].

Este tipo de ligação pode dividir-se em três tipos consoante o princípio do seu processo: fusão, resistência e brasagem. Na soldadura por fusão a energia é fornecida para a fusão do material base e de adição como é ilustrado na Figura 2.1. A energia fornecida é obtida através do calor desenvolvido por um arco eléctrico, sendo que o material de adição consiste num consumível do tipo fio eléctrodo. Por sua vez, a protecção do banho de fusão durante o processo é obtida através de uma protecção

gasosa. O material de adição deve ser adequado para a situação em causa, isto é, ser compatível metalurgicamente com o material base [2,3].

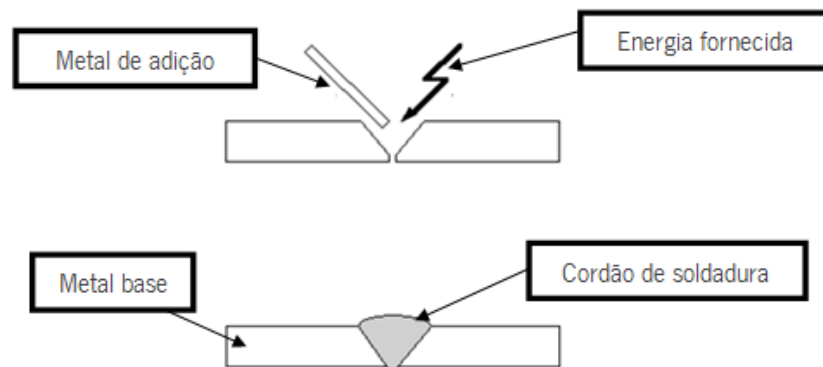


Figura 2. 1 - Soldadura por fusão [2].

Existem quatro processos principais de soldadura por fusão: MIG/MAG, TIG, SER (Soldadura por eléctrodo revestido) e SAS (soldadura por arco submerso). Na execução prática deste trabalho, o tipo de soldadura utilizado foi o processo MIG/MAG, ilustrado na Figura 2.2, sendo por essa razão abordado com maior pormenor. Este tipo de soldadura é também conhecido como soldadura por arco eléctrico com protecção gasosa, sendo bastante utilizado para a soldadura de chapas de aço de baixa e média espessura. A grande diferença entre a soldadura MIG e MAG diz respeito ao gás de protecção, sendo que no caso da soldadura MIG é usado um gás inerte (Árgon, Hélio) e na soldadura MAG um gás activo (CO_2) [2,3].



Figura 2. 2 - Soldadura MIG/MAG [9].

O princípio de funcionamento é igual para ambos processos consistindo basicamente num arco eléctrico que é estabelecido entre o fio eléctrodo e o componente a soldar como representado na Figura

2.3. O fio eléctrodo é fundido no arco e alimentado automaticamente de forma contínua durante o processo, assim como o gás de protecção [2,3 e 8].

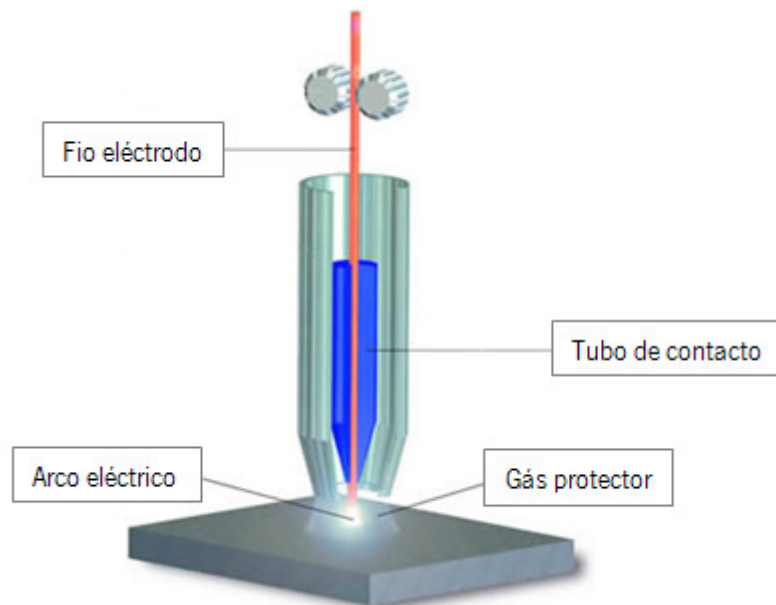


Figura 2. 3 - Esquema representativo da soldadura MIG/MAG [10].

O processo de soldadura MAG é usado para aços leves, enquanto o processo MIG é usado para a soldadura de aços inoxidáveis e metais não ferrosos tais como alumínio, níquel, cobre. A soldadura MIG / MAG não é um processo adequado para aplicações de soldadura exteriores pois está sujeito a uma perturbação da protecção do gás devido a correntes de ar ou de vento [8,10].

As características deste processo permitem efectuar deposições de quatro formas distintas tendo em conta os parâmetros de soldadura: globular, por spray, por curto-circuito e corrente pulsada. A transferência por spray trabalha com tensões e intensidades elevadas, neste tipo de deposição ocorrem com frequência salpicos. A transferência globular utiliza tensões e correntes médias, este tipo de deposição caracteriza-se pelas gotas de metal fundido de elevadas dimensões durante a deposição. Por fim, a transferência por curto-circuito é caracterizada por baixas tensões e correntes, bem como por eléctrodos de diâmetros reduzidos [8,10].

A soldadura por corrente pulsada vem, cada vez mais, ganhando espaço no mercado devido às vantagens em comparação com a soldadura MIG/MAG convencional (globular, spray e curto-circuito). Este tipo de deposição permite obter um maior controlo da transferência do metal, soldar peças de baixa espessura usando a transferência por spray, bem como o uso de fios com um diâmetro maior sem fusão excessiva de material [8,10].

2.1.1 Equipamento de soldadura

Os equipamentos utilizados na soldadura MIG/MAG são concebidos para uma soldadura semi-automática, embora também possam ser adaptados à soldadura automática. A Figura 2.4 representa o equipamento usado, que consiste numa tocha de soldadura, fio eléctrodo, gás de protecção e uma fonte de energia [8,10].

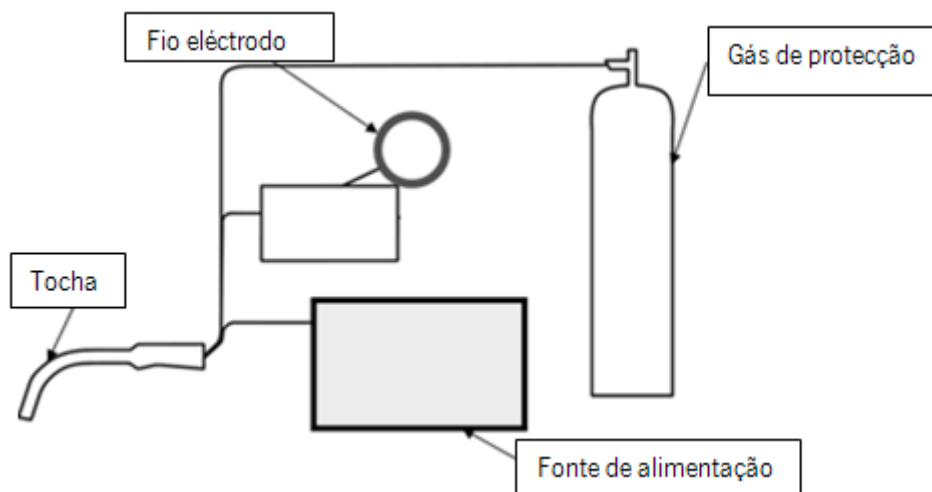


Figura 2. 4 - Equipamento usado no processo MIG/MAG [10].

A soldadura MIG/MAG automatizada apresenta o mesmo princípio de funcionamento do processo MIG/MAG semi-automático. No entanto, a automatização deste processo resulta numa maior rentabilidade no fabrico de peças em série. Um robô programado efectua a mesma sequência de soldadura de forma precisa e tendencialmente existem menos discontinuidades (defeitos). Este processo automático apresenta diversas vantagens como as grandes velocidades e taxas de deposição, definição específica da zona de trabalho, grande precisão na execução das soldaduras e capacidade de repetição sem a ocorrência do erro humano [11].

2.1.2 Vantagens/desvantagens

São várias as vantagens que o processo de soldadura MIG/MAG apresenta, entre as quais se destacam as seguintes:

- Elevadas taxas de deposição;
- Funciona de forma automática ou semi-automática;
- Possui vários tipos de deposição;
- Sem remoção de escória;

- Baixo custo de produção;
- Facilidade de operação;
- Adequado para a maioria dos materiais;
- Excelente protecção da zona de soldadura [10].

Quanto às desvantagens que este processo de soldadura apresenta as mais relevantes são:

- O custo do equipamento;
- Não deve ser utilizado em presença de corrente de ar;
- Dificil transporte do equipamento devido à utilização do gás;
- Necessidade de haver uma protecção do arco do ambiente exterior (ausência de ar) de forma a evitar a extinção do arco eléctrico e falta de protecção do banho metálico [10].

2.2 METALURGIA DA SOLDADURA

Para efectuar a união no processo de soldadura por fusão, como foi referido anteriormente, é necessário que ocorra a fusão do material base e de adição. O ciclo térmico resultante deste processo implica a existência de temperaturas elevadas que dão origem a gradientes de temperatura desde a zona do cordão até às zonas mais afastadas. A distribuição das temperaturas na vizinhança do cordão de soldadura tem uma influência determinante nas transformações metalúrgicas. Na Figura 2.5 estão representadas as zonas resultantes do processo de soldadura: cordão, zona termicamente afectada e material base [5,10].

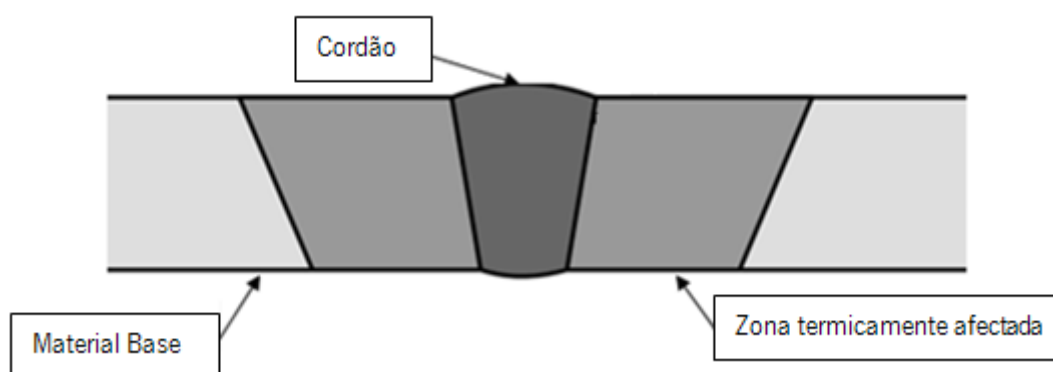


Figura 2. 5 - Zonas resultantes da soldadura [5].

2.2.1 Cordão

Esta zona é onde o material se encontra no estado líquido durante a execução da soldadura. Resulta da fusão do material base e do material de adição, caracterizando-se no seu estado bruto de fusão pelos grãos resultantes da solidificação, normalmente visíveis sem ampliação. O resultado final desta zona é o cordão de soldadura, sendo as suas características bastante importantes para garantir a qualidade da ligação soldada [5,10].

2.2.2 Zona termicamente afectada

A zona termicamente afectada é a zona que sofre alterações microestruturais devido ao ciclo térmico da soldadura a que esteve sujeita. Isto é, toda a zona da região perto do cordão onde as temperaturas máximas foram superiores a um certo valor, dando assim origem a transformações de carácter metalúrgico. Na Figura 2.6 está ilustrado o ciclo térmico do ponto A presente nesta zona, ou seja, sujeito a um aquecimento e respectivo arrefecimento originado pelo processo de soldadura [5,10].

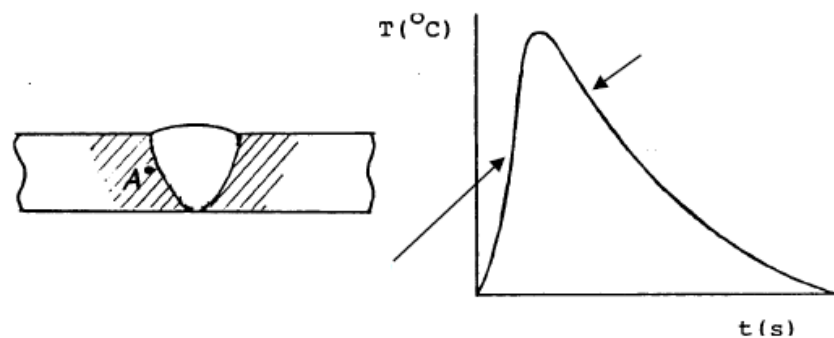


Figura 2. 6 - Ciclo térmico presente na ZTA [10].

Em cada transformação, caracterizada por uma temperatura mínima, o limite exterior da correspondente zona afectada coincide com a isotérmica característica desta temperatura. As características metalúrgicas e propriedades mecânicas dependem das condições a que esteve sujeita durante o processo. Nesta zona podem surgir alguns defeitos, como por exemplo: fissuração por hidrogénio, fissuração por corrosão sob tensão [5,10].

2.2.3 Material base

O material base é o material que constitui as partes que vão ser ligadas pelo processo de soldadura. No entanto, na Figura 2.5, refere-se o material base como a zona deste que se mantém 'fria' e que não interfere no processo de fusão (Zona mais afastada do material base alterado, ou seja, da ZTA). Normalmente diz-se que é a zona do material base que não sofreu alterações durante o processo de soldadura [5,10].

2.2.4 Microestrutura do cordão

Sabe-se que o processo de soldadura dá origem a modificações metalúrgicas locais no material base. Além disso, caracteriza-se pela criação de uma zona fundida (cordão), cuja microestrutura e propriedades são um pouco diferentes das apresentadas pelo material base. Na soldadura de aços, a microestrutura do cordão é influenciada pelo estado inicial da austenite, pelas condições de aquecimento e arrefecimento, bem como pela presença dos elementos de liga. O diagrama de equilíbrio ferro - carbono, Figura 2.7, representa a origem das diferentes microestruturas resultantes nas zonas de soldadura [12,13].

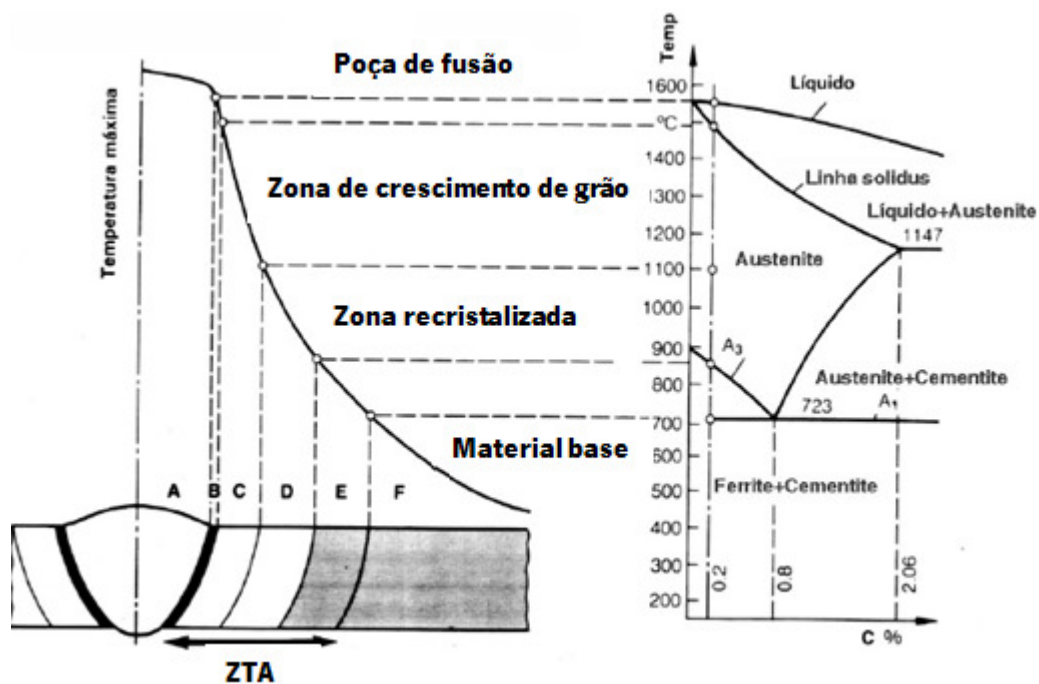


Figura 2.7 - Diagrama de equilíbrio ferro - carbono [14].

Os aços podem ter uma grande variedade de microestruturas dependendo da sua composição química e condição (fundido, forjado ou tratado termicamente). Em aços cujo teor em carbono é baixo a sua estrutura é predominantemente ferrítica. A perlite aparece com o aumento do teor em carbono, sendo que a cementite começa a surgir nas fronteiras de grão a partir de teores superiores a 0,8% [12,13].

Os aços podem apresentar uma microestrutura composta por ferrite, ferrite + perlite, perlite ou perlite + cementite, consoante o seu teor em carbono. Sendo assim, a microestrutura dos aços tendo em conta o teor em carbono, pode ser constituída por:

- Hipoeutectóide <0,8 % Ferrite + Perlite;
- Eutectóide = 0,8 % Perlite (100%);

- Hipereutectóide > 0,8 % Perlite + Cementite [12,13].

Os aços de baixo teor em carbono, nos quais estão incluídos os hipoeutectóides, apresentam baixa resistência e elevada ductilidade. São usados para a construção de pontes, navios, peças grandes, entre outras aplicações. Este tipo de aço apresenta uma microestrutura constituída por ferrite e perlite, como se pode observar na Figura 2.8 [12,13].

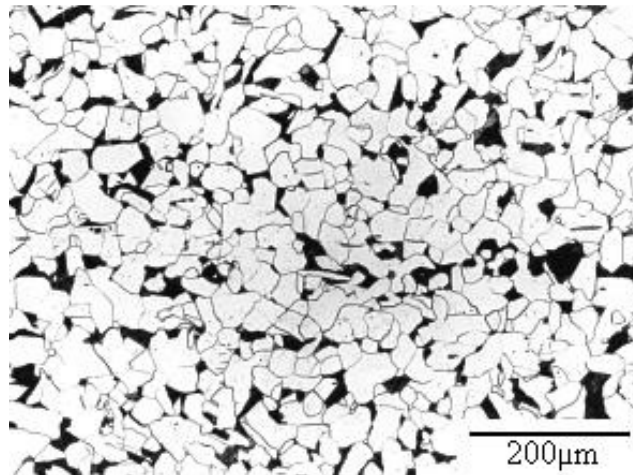


Figura 2. 8 - Microestrutura típica de um aço hipoeutectóide (ferrite + perlite) [15].

No caso de uma soldadura de um passe a microestrutura do cordão é formada pelos produtos resultantes da decomposição da austenite em ferrite. Um exemplo da microestrutura resultante é a designada microestrutura de Widmanstätten. Neste caso, o constituinte pró-eutectóide pode começar a nuclear nas fronteiras de grão austeníticas mas crescer em condições de não equilíbrio. Isso deve-se a uma restrição na difusão do carbono resultante da diminuição de temperatura. Estas condições dão origem ao crescimento de cristais do constituinte pró-eutectóide de forma acicular, no interior dos grãos austeníticos, como se pode observar na Figura 2.9 [12,13].

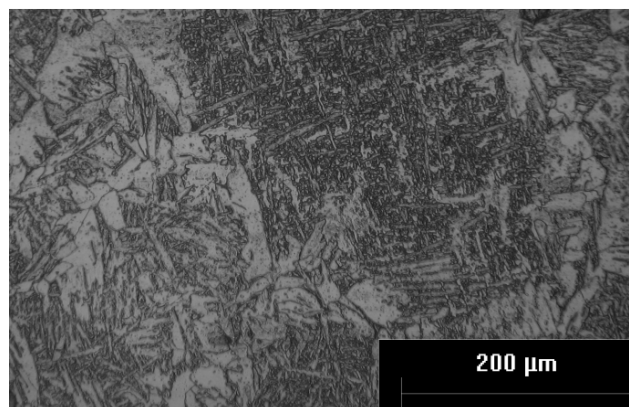


Figura 2. 9 - Microestrutura de Widmanstätten [15].

2.2.4.1 Microconstituintes

Os microconstituintes presentes nas microestruturas dos aços além dos já referidos (ferrite, cementite, perlite, austenite) podem ser a bainite e a martensite. A estrutura final e o constituinte presente dependem da natureza e percentagens dos elementos de liga. Convém então diferenciar os diferentes constituintes:

- ✓ Ferrite - Solução sólida intersticial de carbono na rede cristalina do ferro CCC;
- ✓ Austenite - Solução sólida intersticial de carbono no ferro – γ ;
- ✓ Cementite – Fe₃C. A cementite é um composto frágil e com dureza elevada;
- ✓ Perlite - Constituinte eutectóide formado por lamelas de ferrite e cementite;
- ✓ Bainite – Produto intermédio entre a martensite e a perlite;
- ✓ Martensite – Resulta de condições severas de arrefecimento [12,13].

Cada microconstituente apresenta diferentes características que resultam do seu processo de transformação (condições de aquecimento e arrefecimento). Por essa razão o controlo da microestrutura final da soldadura é bastante importante de forma a garantir as características desejadas para a aplicação em causa [12,13].

A ferrite acicular devido às suas características é na maior parte das vezes o microconstituente desejado uma vez que, os seus grãos pequenos tornam-na um eficiente bloqueador da propagação de fissuras e melhoram a tenacidade. Por outro lado a martensite, Figura 2.10, é um microconstituente que apresenta uma dureza elevada e baixa tenacidade, o que a torna indesejada em várias situações [12,13].

A bainite, Figura 2.10, apresenta duas morfologias com diferenças microestruturais: superior e inferior. A bainite superior é formada por lamelas finas de ferrite e possui uma estrutura interna de deslocações, separadas por partículas de carboneto de ferro. A bainite inferior apresenta uma morfologia acicular, com uma estrutura de deslocações mais densa que a superior. Este constituinte tem a vantagem de apresentar uma ductilidade mais elevada que a martensite, sendo utilizável industrialmente como microestrutura final de alguns componentes. Isso não se verifica com as microestruturas martensíticas, que necessitam de um tratamento térmico suplementar antes de entrarem em serviço (revenido) [12,13].

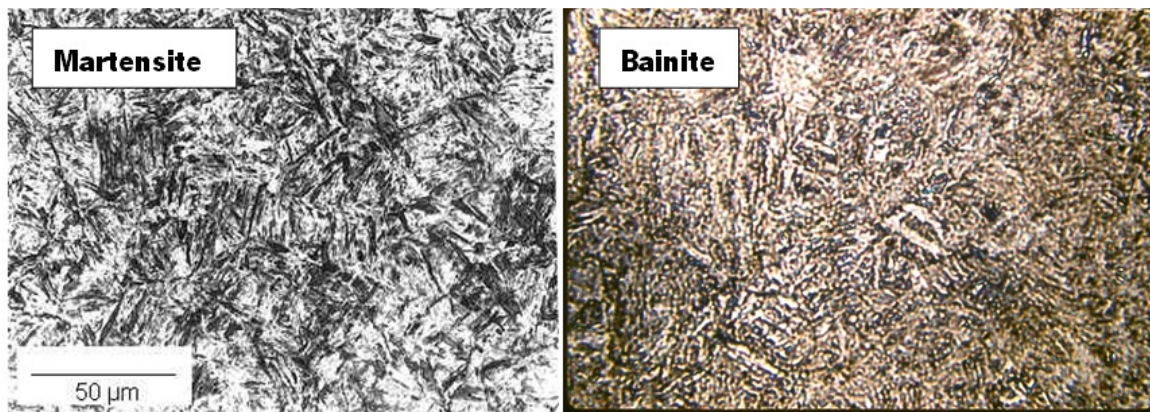


Figura 2. 10 - Microestrutura martensítica e bainítica [16].

2.2.5 Grãos

Os cristais no metal resultantes da sua solidificação designam-se por grãos e as superfícies que os separam por fronteiras de grão, Figura 2.11. Os grãos formam-se a partir dos núcleos, que ao se desenvolverem encontram outros núcleos em crescimento sendo criado um limite entre eles (fronteira de grão). Este limite entre os diferentes grãos é considerado um defeito cristalino, porque representa uma interrupção no arranjo uniforme dos átomos [13,17].

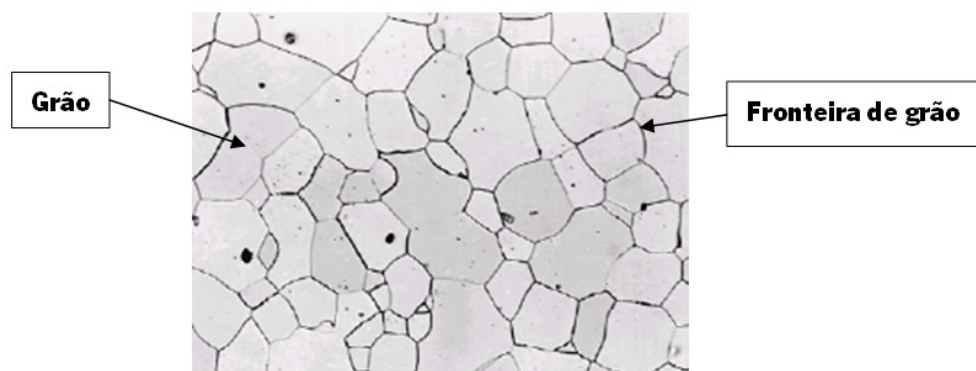


Figura 2. 11 - Grão e fronteira de grão [12].

Podem aparecer dois tipos principais de estruturas de grão: grãos equiaxiais e grãos colunares. Os primeiros surgem quando o crescimento dos grãos é aproximadamente igual em todas as direções e os segundos são grosseiros, alongados e estreitos, resultantes de uma solidificação lenta com um gradiente de temperatura acentuado [13,17].

Durante a solidificação existe libertação do calor latente de fusão compensando dessa forma as perdas de calor por transferência para a vizinhança. Na solidificação a temperatura do líquido desce abaixo da temperatura de fusão dando origem a um sobrefrefecimento, Figura 2.12. Este fenómeno permite a formação dos gérmens de nucleação a partir dos quais se forma e cresce a fase sólida [13,17].

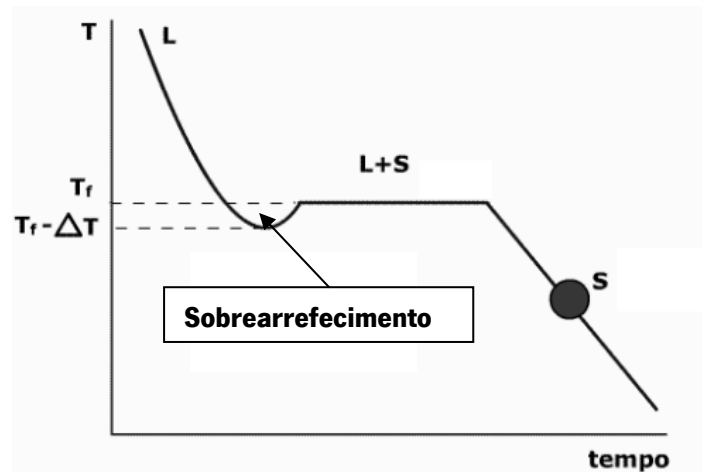


Figura 2. 12 - Curva de arrefecimento [17].

2.2.5.1 Solidificação

A solidificação é o resultado do vazamento de material fundido e divide-se em 2 etapas: nucleação e crescimento, Figura 2.13. A nucleação diz respeito à formação de núcleo sólidos e o crescimento ao desenvolvimento dos núcleos dando origem a uma estrutura de grãos [13,17].

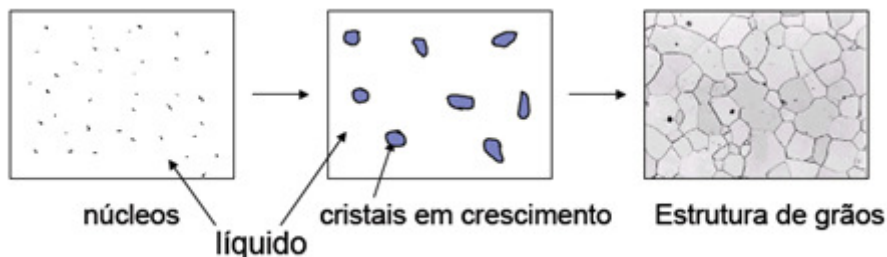


Figura 2. 13 – Etapas de Solidificação de um metal fundido [17].

Os dois principais tipos de nucleação de partículas sólidas num metal líquido são: nucleação homogénea e heterogénea. A nucleação homogénea é o processo mais simples pois, os núcleos formam-se no interior do metal líquido ou seja, é o próprio metal que fornece os átomos para formar os núcleos. Este tipo de nucleação implica necessariamente a existência de um sobrarrefecimento elevado. Para ocorrer uma nucleação heterogénea, é necessário um material estranho (paredes do molde, impurezas, inoculantes) que serve de local preferencial para a nucleação. Este tipo de nucleação permite uma solidificação com sobrarrefecimento mais baixo que a nucleação homogénea [13,17].

O crescimento inicia-se no momento que os átomos atingem o raio crítico tornando-se dessa forma núcleos estáveis. O raio crítico pode então, ser definido como o tamanho mínimo para que os núcleos possam crescer e tornarem-se estáveis. Obviamente, nem todos os grãos podem - se desenvolver e

crescer, porém os grãos maiores crescem à custa dos grãos menores, que acabam por diminuir de tamanho. Dessa forma, o tamanho médio do grão vai aumentando ao longo do tempo, sendo que em cada instante de tempo existe uma faixa de tamanhos de grão. Esta etapa de solidificação ocorre por difusão atômica, ou seja, acoplamento de átomos aos núcleos formando cristais. A velocidade de crescimento depende da temperatura, aumentando de forma proporcional com o aumento da mesma [13,17].

O número de locais disponíveis (núcleos) para ocorrer nucleação influencia a estrutura de grão obtida. Se o número de locais disponíveis for pequeno vai originar uma estrutura com poucos grãos e grosseiros. Por outro lado, se houver mais disponibilidade a nucleação resultará numa estrutura com um maior número de grãos e de menores dimensões. Na Figura 2.14, estão representadas as duas situações resultantes de solidificação, grão grosseiro e grão fino [13,17].

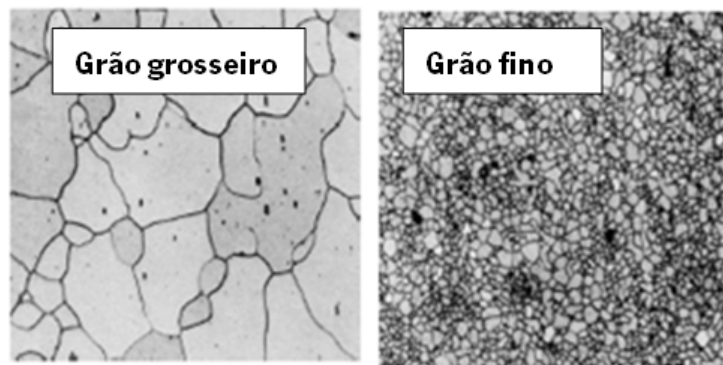


Figura 2. 14 - Estrutura de grãos grosseiros e finos [17].

Existem algumas técnicas utilizadas para favorecer a diminuição do tamanho de grão (afinação de grão) entre elas: uso de inoculantes, oscilação do arco, nucleação superficial estimulada, entre outros. O objectivo destes métodos é obter uma afinação do grão de forma a obter as propriedades mecânicas desejadas, evitando dessa forma a formação de grãos grosseiros e diminuição de defeitos de soldadura [13,17].

2.2.5.2 Solidificação na soldadura

Com o desenrolar da solidificação os grãos no centro do cordão apresentam maiores dimensões que os grãos mais afastados desta zona central. Isso deve-se à dissipação de calor em direção ao material base através dos grãos que solidificaram primeiro. Esses grãos já no estado sólido permanecem mais tempo a altas temperaturas, o que favorece o seu crescimento [13,17].

Por outro lado, um ponto dentro da ZTA mais perto da zona do cordão está sujeito a um gradiente de temperatura severo, o que leva ao desenvolvimento de grãos grosseiros, Figura 2.15. Porém, à medida que se vai afastando do cordão, mas ainda dentro da ZTA, o tamanho de grão é menor pois está sujeito a um gradiente de temperatura mais baixo (zona de recristalização) [13,17].

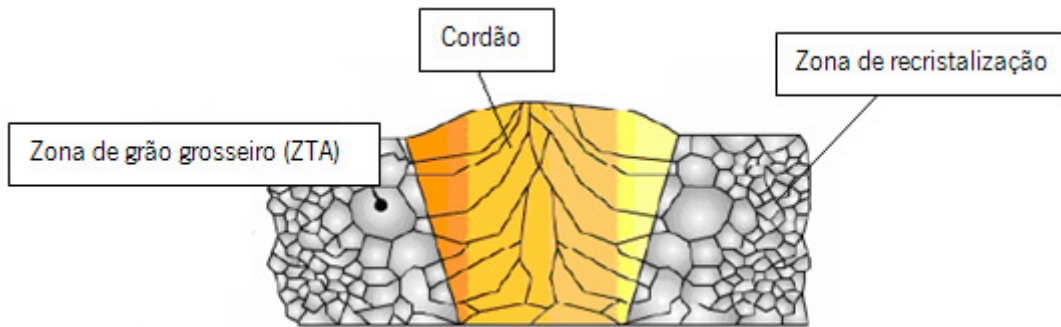


Figura 2. 15 - Representação dos grãos resultantes da soldadura [5]

2.2.5.3 Tamanho de grão e as propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de um material dependem do seu respectivo tamanho de grão. No entanto, a variação das características mecânicas não dependem só desta propriedade, mas também da natureza do metal e dos tratamentos sofridos. Na Figura 2.16, é apresentado um gráfico com uma variação esquemática das propriedades em função da temperatura num material deformado e recozido [12,13].

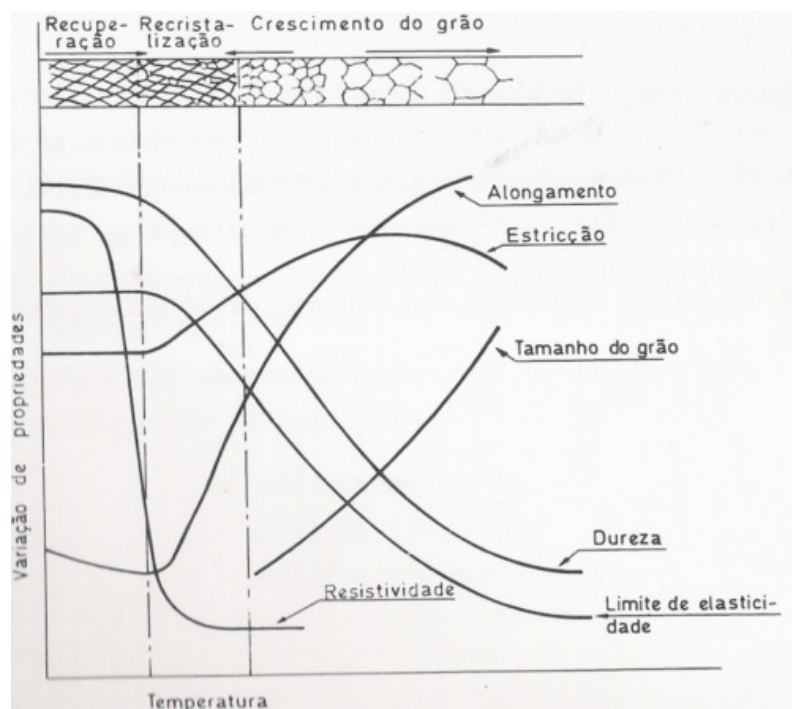


Figura 2. 16 - Variação das propriedades mecânicas com o tamanho de grão [12].

Um exemplo desta variação é o caso de um metal com tamanho de grão afinado, que terá melhor resistência à tração, à temperatura ambiente. Isso deve-se aos seus contornos de grão tenderem a inibir a deformação de grãos individuais quando o material é submetido a esforços de tensão. Por sua vez, a temperaturas elevadas a movimentação atômica é favorecida e a resistência do material será menor. Já a ductilidade aumenta com a recristalização e diminui com o tamanho de grão. A resistividade diminui na recuperação, mas quase não sofre alterações durante a recristalização [12,13].

Tendo em conta as propriedades mecânicas e a sua variação, percebe-se a preferência por grãos de tamanho menor para aplicações a baixas temperaturas, bem como à temperatura ambiente. Para aplicações a temperaturas elevadas são desejáveis grãos grosseiros. Metais e ligas metálicas com tamanho de grão pequeno geralmente possuem melhor resistência à tração, melhor tenacidade e melhor resistência à fadiga [12,13].

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico é a técnica mais utilizada pela indústria metalúrgica para melhorar o produto final da soldadura. Este processo consiste num aquecimento da peça (inferior à temperatura crítica de transformação) permanecendo a essa temperatura por um período de tempo estipulado. O aquecimento é realizado normalmente com recurso a um forno como representado na Figura 2.17 [5,6].

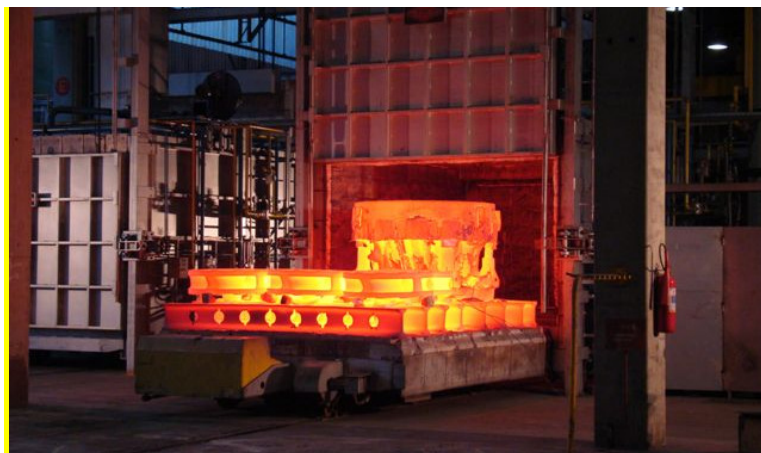


Figura 2. 17 – Tratamento térmico [18]

A peça/estrutura é mantida no interior do forno durante o tempo e temperatura previamente estabelecida. A etapa final corresponde ao arrefecimento que deve ser lento, permitindo dessa forma reduzir as tensões residuais e melhorar as propriedades dentro de um limite aceitável [5,6].

Os objetivos principais de um tratamento térmico são:

- Aumentar a ductilidade;
- Diminuir a dureza;
- Eliminar as tensões residuais;
- Melhorar as condições metalúrgicas da ZTA [5,19].

Apesar do uso generalizado pela indústria, o tratamento térmico possui algumas limitações, entre as quais se destacam:

- Tamanho do forno, que não permite a aplicação do processo a peças demasiado grandes;
- Não é eficaz em todas as ligas, como por exemplo os aços inoxidáveis ;
- Não deve ser usado em estruturas soldadas de aço com baixo teor em carbono e aços de alta resistência (possibilidade de redução da resistência);
- Não pode ser usado em peças que passaram por têmpera e revenido sem o risco de alterar propriedades;
- Peças difíceis de arrefecer podem desenvolver novos padrões de tensões residuais no final do tratamento. As taxas de arrefecimento podem ser retardadas, mas com aumento dos custos inerentes ao processo [19,20].

As várias limitações apresentadas levaram à investigação de um novo método que permitisse competir e resolver estas limitações. Apesar do uso da vibração na soldadura não ser algo completamente novo, antigamente era feito de uma forma bastante rústica. Contudo, esta nova forma de aplicação de vibrações na soldadura, que vai ser abordado no próximo sub-capítulo, foi idealizada como uma possível alternativa ao método tradicional, o tratamento térmico, cuja aplicação em muitas situações é impraticável [7,19].

2.4 VIBRAÇÃO

Uma perturbação que se propaga num determinado meio é definida como uma onda. Por exemplo, se duas pessoas segurarem as extremidades de uma corda e uma delas a movimentar, é gerada uma perturbação. O movimento provocado pela perturbação origina uma onda transmitida ao longo da

corda. Isto deve-se ao facto de uma perturbação num meio elástico se propagar progressivamente nesse meio. Neste caso em particular, a mão da pessoa que criou a perturbação é a fonte e a corda é o meio onde a onda se propaga [21,22].

As ondas podem ser classificadas em ondas mecânicas e eletromagnéticas. As ondas mecânicas são originadas pela deformação de uma região num meio elástico. Este tipo de ondas necessita de um meio material, uma vez que, são ondas que não se propagam no vácuo. Sabendo que o som é um fenómeno acústico que resulta da propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo, que vibra num meio elástico, e que as ondas sonoras podem-se propagar nos sólidos, líquidos e gases, estas são fundamentais para o estudo dos ultrassons. As ondas eletromagnéticas são originadas por cargas eléctricas oscilantes, e ao contrário das ondas mecânicas propagam-se no vácuo. As ondas periódicas ocorrem numa sucessão regular e repetida no mesmo intervalo de tempo [21,22].

2.4.1 Ondas mecânicas

As vibrações (ou oscilações) mecânicas dão origem a ondas periódicas representadas por uma curva harmónica. Nestes tipos de oscilações, as partículas do meio executam um movimento harmónico em torno da posição de repouso. A amplitude do movimento vai diminuindo com o tempo, devido à perda de energia adquirida pela onda. Na Figura 2.18 está representada a forma de uma onda periódica de alta frequência [21,22].

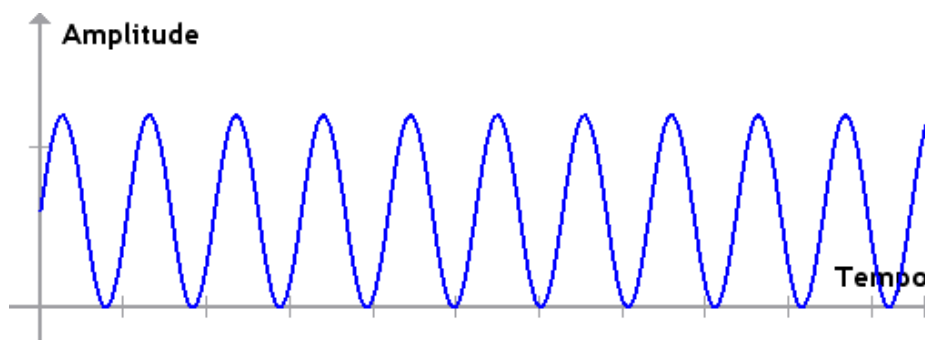


Figura 2. 18 - Vibração periódica [21].

As equações 1,2 e 3 definem as características de uma onda periódica:

$$Y = A \sin(\omega t) \tag{Eq.2.1}$$

$$f = \frac{1}{T} \tag{Eq.2.2}$$

$$V = \lambda f \tag{Eq.2.3}$$

Onde:

A - Amplitude da onda;

λ - Comprimento de onda (distância entre dois picos consecutivos);

T - Período (tempo necessário para executar um ciclo);

f - Frequência (número de ciclos por segundo);

V - Velocidade de propagação da onda no meio [21,22].

2.4.2 Classificação das ondas

As ondas sonoras são periódicas e classificadas em audíveis e inaudíveis, dependendo do número de ciclos por segundo (frequência), Figura 2.19. Quando as ondas sonoras têm uma frequência entre 20 Hz e 20 kHz, são perceptíveis pelo ouvido humano, sendo este fenômeno acústico designado por som. Por sua vez, quando as ondas possuem frequências inferiores a 20 Hz, não são perceptíveis pelo ouvido humano, e denominam-se por infrassons. Por outro lado, quando as ondas possuem frequências superiores a 20 kHz designam-se por ultrassons [21,22].

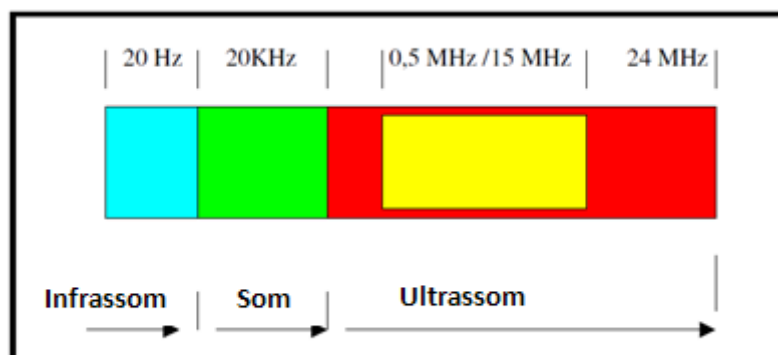


Figura 2. 19 - Espectro de frequências [21].

Os ultrassons são ondas mecânicas que se propagam através de qualquer meio com uma frequência superior a 20 kHz. No entanto, existem aplicações onde são usados ultrassons de baixa frequência podendo esta ser menor que 20 kHz [21,22].

A propagação de uma onda ultrassônica num meio obriga as partículas que o compõem a executar um movimento de oscilação em torno da sua posição de equilíbrio, cuja amplitude diminui gradualmente com a perda de energia da onda. Considerando um meio de propagação elástico, ou seja, em que as partículas que o constituem não estão rigidamente ligadas e podem oscilar em qualquer direção, podem-se classificar as ondas ultrassônicas em 2 tipos: longitudinais, transversais [21,22].

2.4.2.1 Ondas longitudinais

Numa onda longitudinal, as partículas do meio em que ela se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio. Se for aplicada uma onda longitudinal num meio elástico, o primeiro plano de partículas desse meio é comprimido por ação do impacto da onda, que transmite a energia cinética recebida sucessivamente para os próximos planos de partículas, entrando em vibração. As ondas longitudinais propagam-se nos sólidos, líquidos e gases, conseguindo alcançar altas velocidades de propagação, variando conforme o meio:

- Aço - $V = 5900$ m/s
- Água - $V = 1480$ m/s
- Ar - $V = 330$ m/s [21,22].

2.4.2.2 Ondas transversais

Numa onda transversal a vibração das partículas do meio faz-se perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Assim, os planos de partículas no meio de propagação mantêm a mesma distância uns dos outros. Ao contrário das ondas longitudinais as ondas transversais não se propagam nos líquidos e gases, pois nestes meios não há ligações mecânicas [21,22].

2.4.3 Geração de ondas ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são originadas por um elemento emissor que vibra com uma determinada frequência. Este emissor de ondas, designado por transdutor, pode apresentar uma forma circular ou rectangular. O princípio de funcionamento baseia-se no efeito piezoelétrico apresentado por alguns materiais. Um cristal piezoelétrico pode transformar energia elétrica alternada numa oscilação mecânica e energia mecânica em elétrica. Um transdutor é constituído por cristais piezoelétricos montados numa base, por eléctrodos e por um 'bloco' metálico externo que envolve o transdutor [21,22].

2.4.3.1 Tipos de transdutores

Existem três tipos de transdutores mais usados para este efeito: monocristal (recto ou normal), angular e duplo cristal. Os transdutores monocristal, Figura 2.20, são geradores de ondas longitudinais normais à superfície. São construídos a partir de um cristal piezoelétrico fixado num bloco rígido (amortecedor), sendo a sua parte livre protegida por uma membrana de borracha ou por uma resina especial. O

amortecedor serve de apoio para o cristal e absorve as ondas emitidas pela face colada a ele. A parte do transdutor que está em contacto com a peça deve ser protegida de forma a evitar desgastes mecânicos. [21,22].

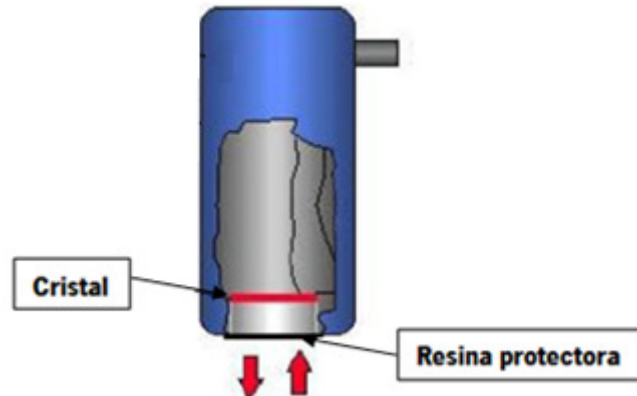


Figura 2. 20 - Transdutor monocristal [22].

Um transdutor do tipo duplo cristal, como o próprio nome indica, apresenta como diferença em relação ao monocristal o facto de ter incorporado no seu interior dois cristais. Estes são separados por um material acústico isolante e dispostos de forma a estarem ligeiramente inclinados em relação à superfície de contacto. Cada cristal tem uma função podendo ser emissor ou receptor, sendo completamente indiferente qual deles exerce que função [21,22].

Ao contrário dos transdutores referidos os angulares são caracterizados pelo facto do cristal formar um ângulo com a superfície do material. O ângulo é obtido, inserindo uma cunha de plástico entre o cristal piezelétrico e a superfície [21,22].

2.4.3.2 Waveguide

Se o transdutor for colocado directamente sobre a peça onde vai ser aplicado é criada uma camada de ar entre a ponta do transdutor e a superfície da peça. Esta camada vai impedir que as vibrações mecânicas geradas pelo transdutor sejam transmitidas com eficiência para a peça. Isso deve-se às diferentes características acústicas (impedância acústica) entre o transdutor e a peça. A impedância acústica, definida pela equação 2.4, representa a quantidade de energia acústica que se reflecte e propaga num determinado meio:

$$Z = \rho \times V \quad \text{Eq.2.4}$$

Onde,

Z – Impedância acústica;

ρ – Densidade do meio;

V – Velocidade de propagação.

Para reduzir a diferença entre as características acústicas, usa-se muitas vezes um waveguide, que permite a transmissão eficiente da vibração. Ou seja, um waveguide estabelece o 'caminho' a percorrer pelas ondas ultrassónicas geradas até se propagarem na peça de trabalho [21,22].

2.5 ULTRASSONS NA SOLDADURA

Este sub-capítulo resulta da recolha de informação de vários trabalhos e pesquisas já realizadas sobre o uso de vibração ultrassónica na soldadura. Tem como objectivo principal verificar e perceber o que já foi feito, como se fez e os resultados obtidos.

2.5.1 Origem

Formas rudimentares de vibração foram usadas há quase dois séculos na tentativa de estabilizar peças metálicas. "Hammer Peening" era um dos métodos de vibração usados e consistia numa aplicação sucessiva de golpes com um martelo, sendo que esses esforços geravam uma amplitude de vibração elevada. No entanto, era algo incontroável, imprevisível e demasiado lento para ser utilizado a nível industrial. As várias limitações deste e outros processos impediram o seu desenvolvimento e uso generalizado de forma a rivalizarem com o tratamento térmico. Por essa razão, acabaram por ser postos de lado e mais tarde completamente abandonados [23,24 e 25].

O uso da vibração por ultrassons é um conceito mais recente que outros métodos existentes para o mesmo efeito. Surgiu devido à escassez de energia e ao crescente aumento da poluição, sendo um conceito amigo do ambiente. Nos últimos 20, 30 anos tem ocorrido um desenvolvimento significativo de forma a satisfazer as exigências necessárias. Assim como o tratamento térmico tem o objetivo de melhorar a estabilidade geométrica e a integridade mecânica de peças fundidas, forjadas e componentes soldados. Num tratamento térmico é fornecida energia sob a forma calor, e neste processo em específico, a energia é fornecida ao sistema sob a forma de vibrações mecânicas [23,26].

Apesar de ser uma ideia ainda relativamente recente, existem algumas aplicações para as quais esta técnica poderá ser direccionada:

- ✓ Máquinas-Ferramenta (Bases e Colunas);

- ✓ Ferramentas para o sector automóvel e aeroespacial;
- ✓ Turbinas;
- ✓ Componentes de submarinos;
- ✓ Componentes de grandes dimensões, componentes críticos [23,25 e 27].

2.5.2 Algumas investigações efectuadas

No início dos anos 60, Buhler e Pfalzgraf realizaram e descreveram testes numa variedade de peças soldadas [29,30,31 e 32]. As suas conclusões não foram animadoras, embora tenham conseguido alcançar uma redução de 20 % da tensão residual, estavam claramente limitados pela sua preocupação com potenciais falhas por fadiga. Por essa razão, não usaram amplitudes que seriam necessárias para obter um alívio significativo.

Brogden realizou um levantamento bibliográfico de todas as pesquisas efectuadas até 1968. As conclusões sobre a eficiência do processo eram acima de tudo pessimistas, não estava convencido de que a estabilidade geométrica podia ser alcançada sem o risco de ter falha por fadiga durante a vibração [33]. Em 1972, Cheever descreveu uma extensa investigação sobre o assunto realizado no Memorial Battelle Institute [34]. Inicialmente, os resultados obtidos foram desanimadores e não conclusivos, estes testes iniciais foram seguidos por uma série de testes numa variedade de peças, mas a dispersão de resultados impediu a conclusão de uma teoria coerente.

Dvornak estudou a solidificação em condições vibratórias e concluiu que, a afinação de grão é obtido, facto que se deve à menor energia necessária para a nucleação da fase sólida [35]. Em 2007, Lu Qinhua afirmou que a vibração facilita a libertação de gases e resulta em cordões de soldadura de boa qualidade (redução de porosidades) [36].

Watanabe e Nakamura avaliaram o efeito de agitação electromagnética na microestrutura de um cordão de soldadura [37]. Eles estudaram os parâmetros para conseguir obter uma afinação de grão. As suas conclusões apontam para uma significativa diminuição do tamanho do grão devido a um aumento do sobrearrefecimento durante a solidificação.

Pucko e Gliha afirmam que há um efeito positivo da vibração durante a soldadura, na resistência ao impacto [38]. Eles concluíram que a vibração estabiliza a microestrutura afectando a resistência ao impacto e o tipo de fractura do material.

2.5.3 Princípio de funcionamento

Basicamente este conceito consiste num processo em que durante a soldadura é fornecida energia através de um gerador de ondas ultrassónicas ao componente soldado, como representado na Figura 2.21. Isto é, uma vibração de uma determinada frequência é utilizada para provocar a vibração da peça de trabalho enquanto decorre o processo de soldadura [23,25].

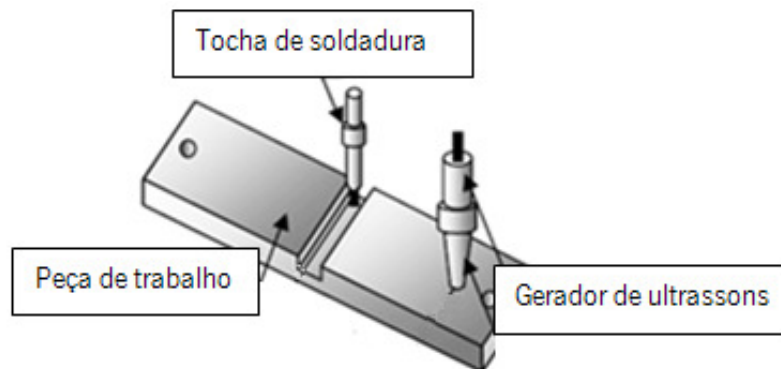


Figura 2. 21 - Esquema representativo do processo [39].

O gerador de ondas ultrassónicas é fixado à peça e transmite energia sob a forma de vibrações enquanto a soldadura é efectuada. O equipamento normalmente utilizado consiste num gerador de frequência variável e um painel de controlo electrónico, como se pode ver na Figura 2.22. Pode ainda ser usado, um acelerómetro que detecta as vibrações e transmite um sinal para o painel de controlo [23].

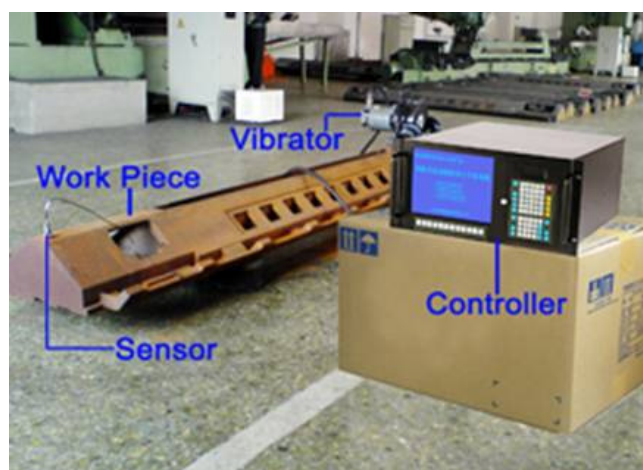


Figura 2. 22 - Equipamento utilizado [40].

A maioria dos fabricantes de equipamentos de ultrassons recomenda o uso da própria frequência de ressonância da peça de trabalho. Dessa forma, conseguem aumentar a carga induzida e maximizar o efeito das ondas vibratórias [7,41].

Normalmente, a frequência vai sendo aumentada gradualmente até que a primeira ressonância (frequência natural) seja alcançada. Essa ressonância é mantida por um período de tempo específico e, em seguida, a frequência é aumentada novamente até à segunda ressonância repetindo-se o método. O ponto de ressonância é obtido através da variação da frequência do gerador de ultrassons até ser alcançada a frequência adequada. Dois minutos é o tempo médio necessário para atingir a frequência de ressonância. Neste ponto, a vibração é mantida por um determinado tempo, dependendo do peso da peça e da sua aplicação prevista, que pode variar de 10 minutos a uma hora ou mais, mas se for ultrapassado, a peça não vai sofrer qualquer dano por fadiga [7,26 e 41].

Se as peças forem muito grandes, ou possuírem espaços abertos, pode ser necessário aplicar o procedimento em vários pontos. Alguns equipamentos realizam o processo de vibração automaticamente. A vibração é mantida por 15 minutos, numa sequência de três frequências diferentes previamente selecionadas, cada uma com duração de cinco minutos. Este método é eficiente para tratar peças com peso de até 10 toneladas. Para peças com peso superior a 10 toneladas repete-se o método em 2 períodos de 15 minutos (sem a peça sofrer qualquer dano). Para todas as aplicações deve-se:

- Apoiar a peça da melhor maneira possível, deixando-a livre para vibrar;
- O gerador de ultrassons deve ser conectado diretamente à peça, de forma a transferir toda a energia vibratória gerada [7,26,27 e 44].

2.5.4 Metodologias usadas

A aplicação da vibração de forma eficaz resulta da combinação de diversos factores:

1. Material: O material usado deve ser dúctil, possuindo assim uma rigidez não muito elevada [42,43].

2. Geometria: Várias formas e tamanhos podem ser usados não havendo grande restrição neste aspecto. [42,43].

3. Aplicação (envolve várias etapas):

3.1 Colocação da peça sobre almofadas de carga: Este tipo de almofadas deve ser feito de material macio (por exemplo de poliuretano). Devem ser colocadas afastadas umas das outras e longe dos cantos da peça de trabalho. Além disso, devem ficar por baixo, de forma a isolar a peça a partir do

piso, como na Figura 2.23. Assim, o amortecimento da peça de trabalho é minimizado permitindo o aumento da resposta de ressonância em vibração [42,43].

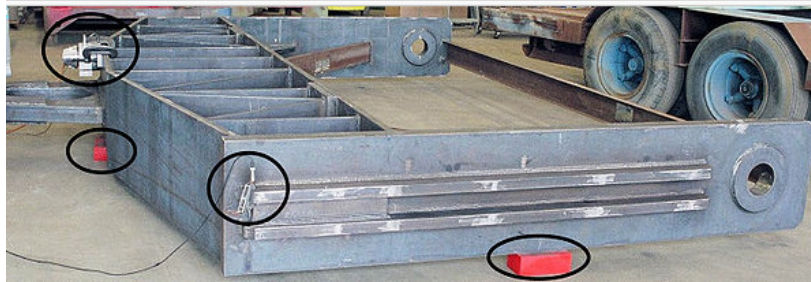


Figura 2. 23 - Posicionamento das almofadas de carga [44].

3.2 Posicionamento e fixação do gerador de ultrassons: Deve ser colocado afastado a partir dos cantos da peça de trabalho e orientado de forma a ser mais eficiente para atingir as frequências de ressonância da peça. O gerador deve ser fixado, tipicamente com grampos ou parafusos de alta resistência. Outra maneira de transmitir vibrações utiliza uma mesa especial de vibração. Aqui, o gerador de ultrassons é ligado ao tampo da mesa que é livremente suspenso em almofadas de borracha [24,42 e 43].

3.3 Posicionamento e orientação do sensor de vibração: A melhor localização para este sensor é um dos cantos da peça de trabalho e em linha com o plano de força do gerador de ultrassons de modo a ser mais sensível às deflexões verticais (perpendicular ao comprimento da peça de trabalho). A localização e orientação do acelerômetro são selecionadas para maximizar a detecção da frequência de ressonância [42,43].

4. Ressonância: Um sistema físico representado na Figura 2.24, composto por uma massa (m), uma rigidez (k) e um coeficiente de amortecimento (C) é caracterizado por uma série de frequências naturais próprias [23].

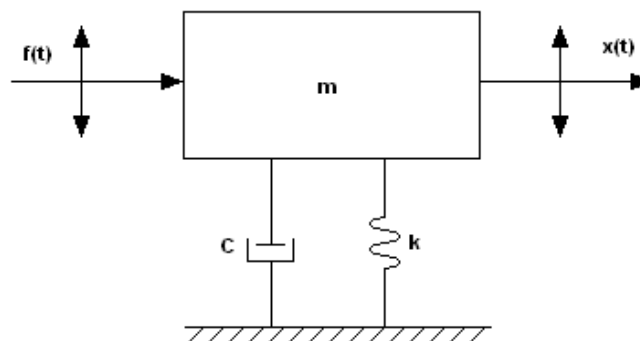


Figura 2. 24 - Sistema físico de vibração [23].

A equação 2.5 representa a cinética do sistema:

$$m \frac{d^2}{dt^2} + \frac{cdx}{dt} + kx = F(w) \cdot \text{sen}(wt) \quad \text{Eq. 2.5}$$

Supondo que esse sistema é excitado por uma vibração de frequência semelhante a alguma das suas frequências naturais. O primeiro vai vibrar com uma amplitude máxima superior à amplitude da vibração de excitação, sendo este fenómeno representado na Figura 2.25, designado por ressonância [20,45].

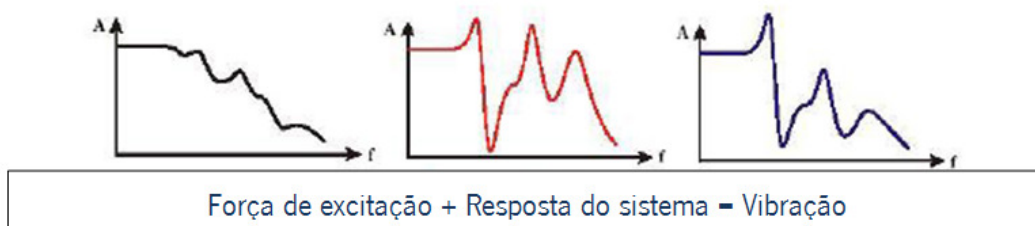


Figura 2. 25 - Fenómeno de ressonância [45].

A ressonância é o fenómeno pelo qual um corpo vibra ao ser atingido por vibrações produzidas por outro corpo. O fenómeno acontece quando o período das vibrações excitadas pelo primeiro corpo coincide com o período natural de vibrações do segundo, ou seja, quando a frequência de vibração induzida (externa) no corpo coincide com sua frequência natural. Se aplicarmos uma vibração ultrassónica num corpo, dependendo das suas características acústicas, ele entrará em ressonância. Tal como em muitos processos, o sucesso é dependente tanto do equipamento utilizado como da habilidade do operador [45].

O método mais utilizado para encontrar as ressonâncias de uma peça de trabalho é fazer uma leitura através da faixa de frequências do gerador de ultrassons. Ao mesmo tempo, é feita a gravação da amplitude de vibração versus frequência do gerador de ultrassons. A faixa de velocidade máxima recomendada é de pelo menos 6000 - 8000 rpm. Assim, para encontrar uma ressonância é necessário ajustar a velocidade de vibração para o pico de ressonância, contudo, isto é cada vez mais difícil devido ao aumento da rigidez das peças de trabalho [42,43].

O efeito do atraso no tempo entre o início da vibração ressonante e amplitude de ressonância completa a ser alcançada implica o uso de uma velocidade de leitura lenta. Dessa forma, é possível um registo exacto do padrão de ressonância. Uma velocidade de leitura de 10 rpm é bastante usada na gravação de picos ressonantes de peças de trabalho. Velocidades mais elevadas não permitem examinar

correctamente nem atingir a amplitude de ressonância, como se pode verificar na Figura 2.26. À medida que aumenta o tamanho da peça de trabalho, a taxa de leitura pode ser diminuída, a fim de capturar totalmente dados de ressonância precisos [42,43].

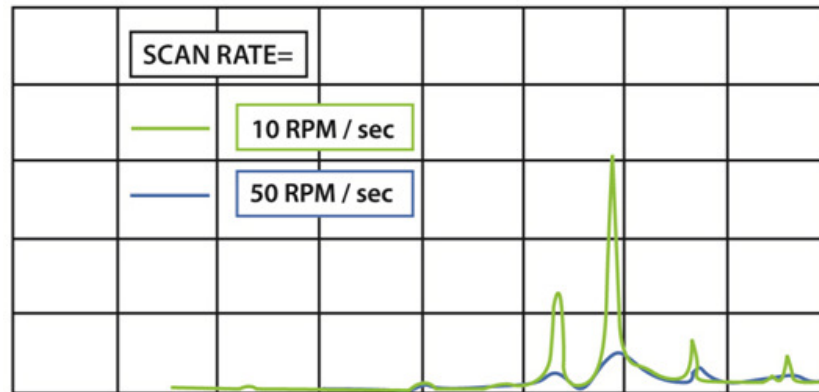


Figura 2. 26 - Velocidades de leitura diferentes [44].

2.5.5 Vantagens

Esta técnica de vibração consegue à partida resolver algumas limitações apresentadas pelo tratamento térmico convencional. Entre as principais vantagens que poderá apresentar destacam-se:

- Redução no prazo de execução do serviço;
- Composição química da peça de trabalho não impõe restrições à sua utilização;
- Possibilidade de aplicação em aços de baixo carbono, de resistência elevada;
- Potencial de poupança nos custos do equipamento, tempo e energia;
- Ausência de muitos dos defeitos característicos do tratamento térmico (distorções, incrustações e degradação das propriedades mecânicas) serve para tornar o processo ainda mais atraente;
- Praticamente sem qualquer restrição de peso ou tamanho;
- O tempo de aplicação é apenas uma fração do que é preciso para executar o tratamento térmico;
- Não apresenta impacto ambiental;
- Possibilidade de ser aplicado em qualquer ponto do processo de fabrico;
- Reduzido investimento, não precisa de fornos, economiza espaço e investimento em equipamentos caros;
- Equipamento relativamente pequeno, leve e portátil [23,24,41 e 47].

Muitos investigadores afirmam conseguir uma maior estabilidade geométrica durante a maquinagem e operações posteriores de peças fundidas e soldadas, até muitas toneladas de peso, depois da aplicação de vibração. Embora ainda não seja aceite oficialmente, pelas entidades de projeto e construção que continuam a utilizar o tratamento térmico, o uso da vibração por ultrassons ganhou popularidade considerável ao longo dos últimos anos [23,24]. Na Tabela 2.1 é apresentada uma análise comparativa de alguns pontos principais onde potencialmente o uso de vibração na soldadura poderá ser mais atractivo que o tratamento térmico.

Tabela 2. 1 - Tratamento térmico vs Aplicação de vibração [23]

Parâmetros	Tratamento térmico	Vibração
Equipamento	Forno	Equipamento portátil
Tempo de aplicação	Elevado	Baixo
Consumo de energia	Elevado	Baixo
Espaço ocupado	Fixo e ocupa grande espaço	Sem espaço fixo
Poluição	Elevada	Sem poluição

2.5.6 Limitações

Além da ausência de uma teoria coerente e conclusões firmes sobre o seu efeito, esta técnica de vibração apresenta algumas limitações. A sua aplicação ainda não pode ser comparada com o tratamento térmico apesar do crescimento nos últimos anos. É um processo ainda limitado pela falta de uma teoria coerente de operação. A falta de um consenso em relação ao seu funcionamento reflecte-se na diversidade de abordagem e procedimentos recomendados, bem como pela quantidade escassa de pesquisa conclusiva disponível. Os resultados das investigações até ao momento têm sido inconclusivos como por exemplo: a sua gama de aplicabilidade para certas classes de materiais é por enquanto incerta. Contudo, o uso de vibração por ultrassons na soldadura já mostrou ser eficaz em algumas circunstâncias [7,23 e 48].

Por vezes, é muito complicado ajustar a peça de trabalho quando está a ser fabricada e aplicar este conceito. Definir as condições óptimas para uma aplicação eficiente apresenta dificuldades acrescidas. Como consequência, esta técnica só pode ser efectuada por especialistas treinados, pois é difícil para os trabalhadores comuns lidar com esta tecnologia sem formação. Uma peça de trabalho precisa de um tipo de processo em específico, o operador deve saber definir os parâmetros corretos de processamento. Existem algumas limitações, como em qualquer processo metalúrgico e/ou mecânico,

como a não recomendação para diversas situações como por exemplo: uso de peças largas. Além disso peças que apresentem uma rigidez elevada apresentam menor aptidão para este processo devido a uma maior dificuldade de entrarem em ressonância [23,46 e 48].

É um método especialmente compatível com os processos de soldadura TIG, MIG/MAG sendo que se usado com outro tipo de soldadura podem surgir alguns problemas de logística. Ou seja, a sua aplicação é possível nos processos de soldadura onde não interfira com o processo propriamente dito. Podem surgir por exemplo: problemas no posicionamento do equipamento de vibração, na execução da soldadura (trajectória da soldadura, fixação da peça de trabalho, tipo de junta, existência de massa), entre outros [23,46 e 48].

CAPÍTULO III: MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

3.1 PROVETES

Para efectuar o estudo da vibração por ultrassons na soldadura usaram-se provetes onde se efectuou uma soldadura MIG simultaneamente com a aplicação de vibração. Enquanto se soldou na zona central do provete, um waveguide conectado ao provete transmitiu energia na forma de vibrações mecânicas.

3.1.1 Material

Como material para os provetes escolheu-se no catálogo da F.Ramada o aço de construção (aço ao carbono) C1, também vulgarmente conhecido como St 37-2 K. Este tipo de aço tem como principal aplicação o fabrico de órgãos de máquinas por soldadura. A sua cor de identificação é o verde-claro e não é sujeito a nenhum tratamento térmico antes de ser fornecido [49]. O aço C1, ilustrado na Figura 3.27, foi usado em perfil rectangular com 8 mm de espessura e 100 mm de largura. A ficha técnica deste aço pode ser consultada no Anexo A.



Figura3. 27 - Aço C1 100x8.

Na Tabela 3.2 é apresentada a composição química do aço C1, que é um aço com baixo teor em carbono, mais concretamente um aço hipoeutectóide.

Tabela 3. 2 - Composição química do aço C1 [49]

Elemento	C	Mn	P	S
%	0,090	0,560	0,017	0,015

3.1.2 Geometria

A geometria escolhida para os provetes consistiu numa barra simples com um rasgo na parte central, Figura 3.28. É nesse rasgo situado na parte central que se deposita o cordão de soldadura para posterior análise. Além do rasgo realizou-se em todos os provetes um furo que serve para fixar o conjunto *transdutor - waveguide* dos ultrassons ao componente. No Anexo B pode ser consultado o desenho técnico dos provetes.

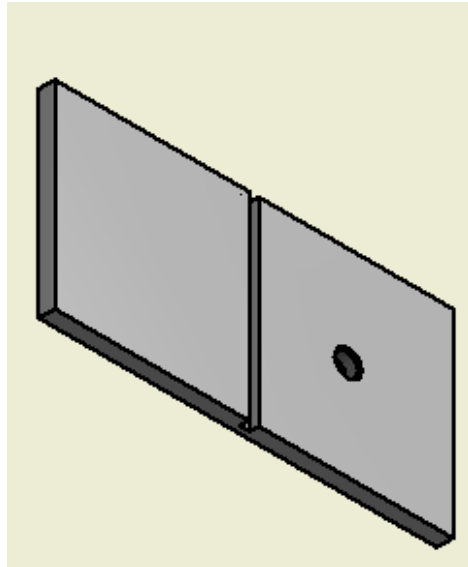


Figura 3. 28 - Geometria dos provetes.

3.1.3 Fabrico

O fabrico dos provetes fez-se na oficina do DEM da Universidade do Minho e começou pelo corte da chapa de aço C1 com as dimensões estabelecidas. Cortaram-se 6 provetes com 200 mm de comprimento no serrote mecânico, Figura 3.29.

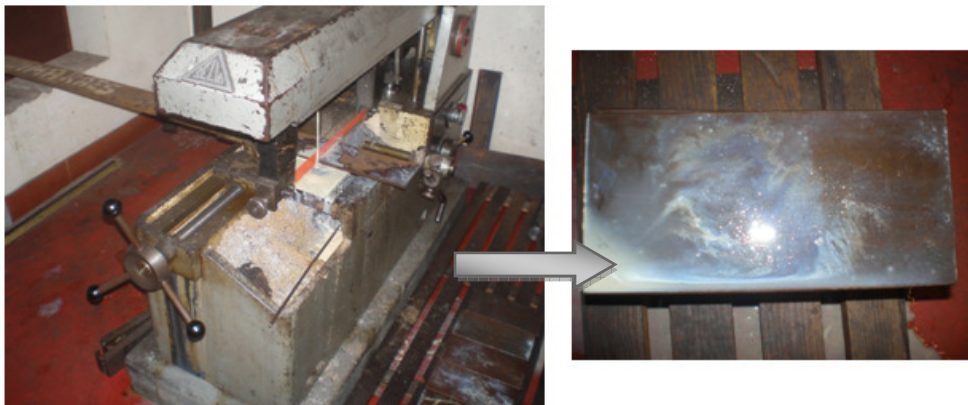


Figura 3. 29 - Corte dos provetes no serrote mecânico.

Depois do corte, passou-se à execução do rasgo na zona central de cada provete utilizando para tal, a fresadora, Figura 3.30. Assim, para executar o rasgo de 4,5 mm de profundidade usou-se uma fresa de topo de 8,2 mm de diâmetro. Esta etapa foi realizada em 5 passagens, sendo que nas 4 primeiras se retirou 1 mm de material e na final 0,5 mm.



Figura 3. 30 - Execução do rasgo no provete.

Como verificado na pesquisa bibliográfica, o equipamento de ultrassons deve ser correctamente fixado à peça que vai ser soldada, garantindo assim que toda a energia gerada seja transmitida. Neste trabalho experimental essa ligação efectuou-se através de um furo roscado no provete. Nesse furo é roscado um perno de aperto ligado ao waveguide dos ultrassons ficando dessa forma conectado ao provete. Tendo em conta a pesquisa bibliográfica, definiu-se a distância de 45 mm do rasgo central do provete ao furo como representado na Figura 3.31.

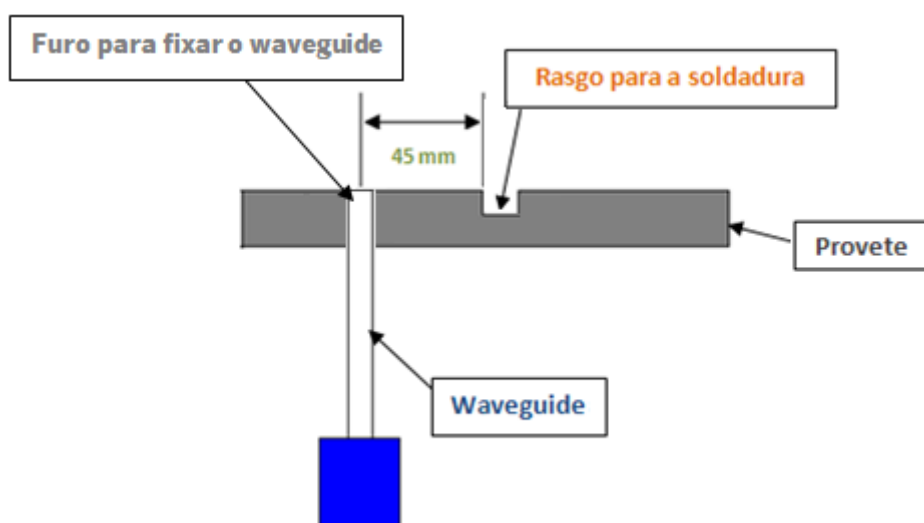


Figura 3. 31 - Esquema representativo da ligação do waveguide ao provete.

Os furos nos provetes foram realizados na máquina de furar com uma broca de 11,5 mm sendo que após a sua conclusão, procedeu-se à sua escareação para facilitar a entrada do perno. Por fim, fez-se o roscado com o macho 1/2" 20 UNF obtendo a forma final dos provetes, como se pode ver na Figura 3.32.

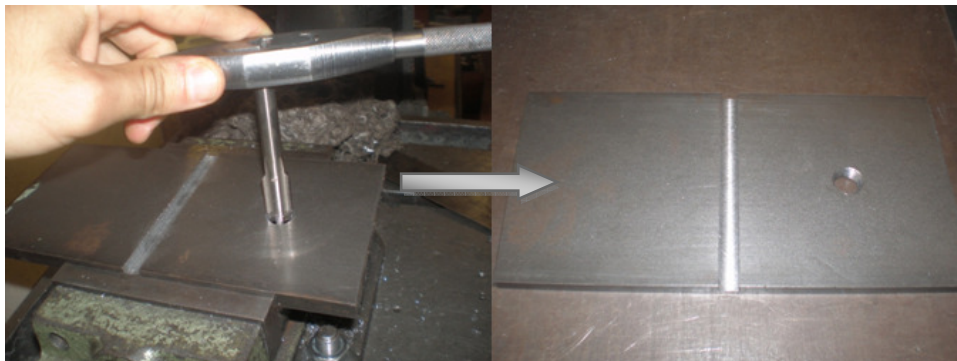


Figura 3. 32 - Execução do furo roscado e geometria final dos provetes.

3.2 SUPORTE PARA OS ULTRASSONS

Um ponto importante na aplicação de vibrações de forma correcta é a transmissão de energia do gerador de ultrassons para o componente. De forma a evitar a sua dissipação optou-se por suportar o conjunto *transdutor - waveguide* a uma determinada altura. Assim, garante-se que a vibração atinge com eficiência a zona desejada, ou seja, o rasgo do provete onde é efectuada a soldadura. Para resolver esse problema pensou-se em construir um suporte simples e eficiente. Uma vez que o robô de soldadura possui uma mesa, idealizou-se um suporte que pudesse ficar fixado à mesa, como se pode ver na Figura 3.33.

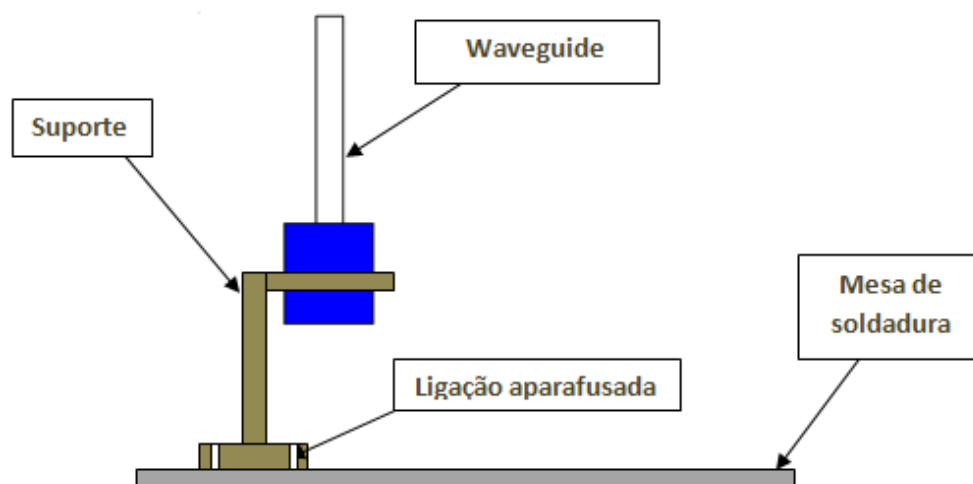


Figura 3. 33 - Esquema representativo do suporte.

O suporte consiste numa base fixada à mesa e numa abraçadeira que segura o conjunto *transdutor-waveguide* a uma determinada altura durante a soldadura evitando assim, as perdas de energia. Sabia-se à partida que, o diâmetro do transdutor é de 85 mm e a distância entre os furos da mesa de soldadura é de 110 mm. Além disso, era necessário ter em conta uma altura mínima que permitisse passar os fios de ligação do transdutor (> 80 mm). A fixação do suporte à mesa de soldadura faz-se por dois parafusos M24, por sua vez, o aperto da abraçadeira do suporte efectua-se através de dois parafusos M6. Na Figura 3.34, está representado o suporte idealizado com todos os componentes que o constituem. Os desenhos técnicos dos componentes que constituem o suporte podem ser consultados no Anexo B.

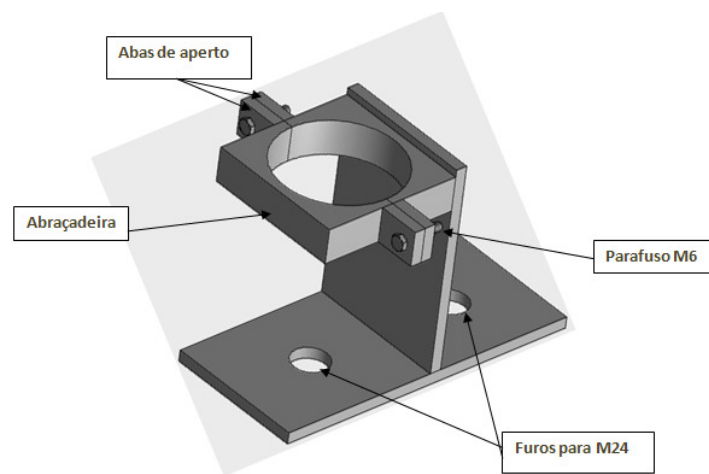


Figura 3. 34 - Suporte para o conjunto *transdutor-waveguide*.

3.2.1 Fabrico

Numa primeira fase, cortaram-se no serrote mecânico os diferentes componentes com as dimensões definidas, Figura 3.35. Usou-se uma chapa de aço F10 de 25 mm de espessura para a abraçadeira e de 8 mm para os restantes componentes. Nesta primeira fase, seccionaram-se as bases, as 4 abas de aperto e uma secção retangular que deu origem à abraçadeira.



Figura 3. 35 - Componentes seccionados no serrote mecânicos.

Posteriormente, na base do suporte que é fixada à mesa do robô realizaram-se 2 furos com um diâmetro de 26 mm. Por sua vez, no componente de secção 100X100 mm obtida na etapa anterior efectuou-se um furo de 87 mm no torno mecânico, Figura 3.36. Concluído o furo, seccionou-se o componente a meio com uma serra de disco obtendo assim as duas metades que constituem a abraçadeira.

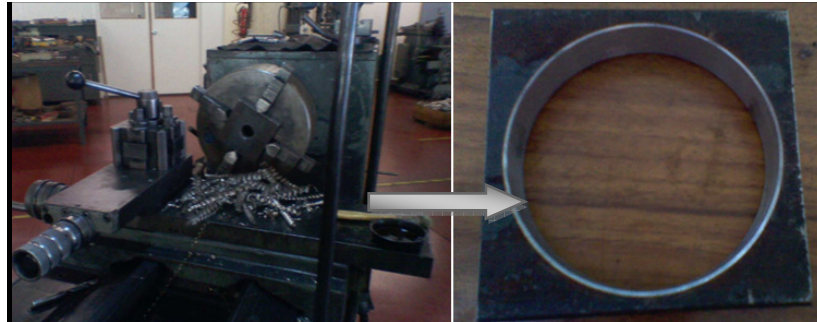


Figura 3. 36 - Execução do furo de 85mm no torno mecânico.

Seguidamente passou-se à ligação dos diferentes componentes através do processo de soldadura. Por fim, efectuou-se um furo de 7 mm em cada aba onde são colocados os parafusos M6 para efectuar o aperto. Na Figura 3.37 é apresentado o suporte após a conclusão de todas as etapas da sua construção.

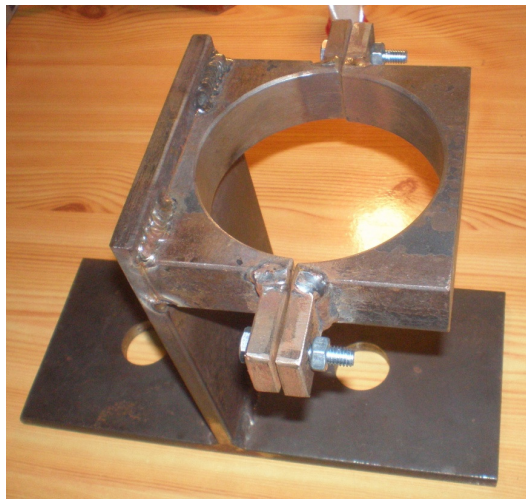


Figura 3. 37 - Suporte para conjunto *transdutor-waveguide*.

3.3 APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO NA SOLDADURA

O objectivo definido para este trabalho como referido é a avaliação do efeito de ondas ultrassónicas na soldadura. Sendo assim, após efectuar a soldadura simultaneamente com aplicação de vibração mecânica verificou-se a existência ou não de melhorias em relação a uma soldadura normal (sem vibração).

O procedimento usado é um pouco diferente do encontrado e referido na pesquisa bibliográfica, desde logo no equipamento usado. No entanto, os fundamentos descritos são também aplicados na execução deste trabalho. Por exemplo, os apoios de borracha referidos, neste procedimento são substituídos por um suporte com a mesma função. O suporte foi idealizado para as condições usadas neste trabalho, mas em posteriores testes poderá ser necessário efectuar algumas alterações.

O método aplicado consiste no uso de um robô para efectuar a soldadura no provete com os parâmetros previamente definidos. Ao mesmo tempo, o conjunto *transdutor - waveguide*, fixado a uma certa altura por um suporte, transmite vibração mecânica ao provete, como representado na Figura 3.38. Por sua vez, o transdutor é ligado ao equipamento Mastersonic MSG 2000 que é controlado por um software próprio.

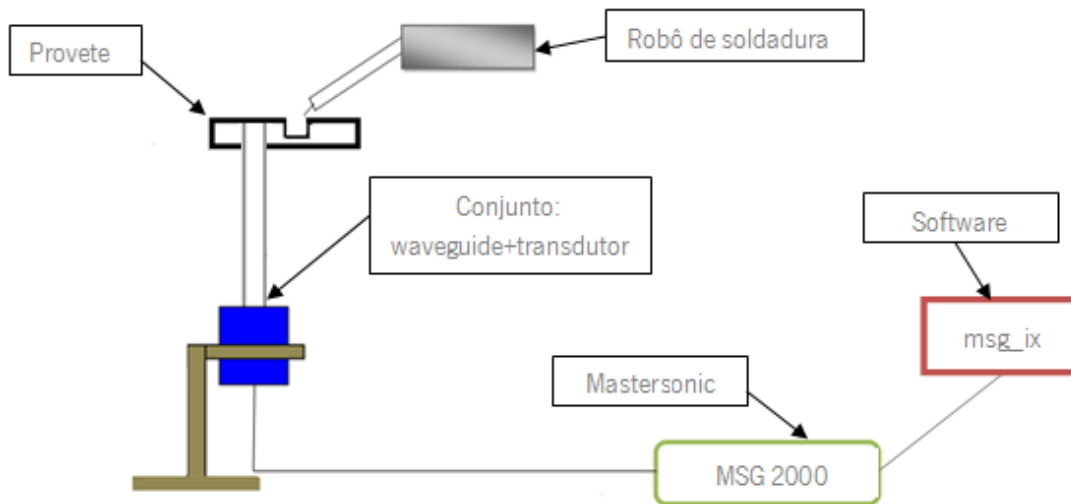


Figura 3. 38 - Esquema representativo do procedimento usado.

As ondas ultrassónicas geradas são transmitidas pelo waveguide e propagadas no provete, como representado na Figura 3.39, sendo que, simultaneamente, a soldadura é efectuada normalmente.

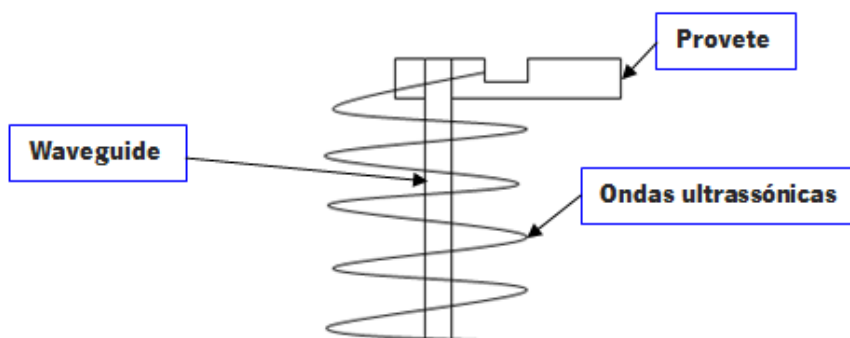


Figura 3. 39 - Esquema representativo da propagação das ondas ultrassónicas.

Esta parte experimental realizou-se na empresa Ribalde, em Santo Tirso. A Ribalde, Figura 3.40, é uma empresa que fabrica equipamentos de movimentação de terras e cargas, sendo a soldadura um processo importante da sua produção.



Figura 3. 40 - Empresa Ribalde.

Utilizaram-se 6 provetes para efectuar o trabalho experimental, sendo os parâmetros definidos e explicitados mais à frente. Ao nível de instrumentação utilizou-se equipamento de soldadura MIG e de ultrassons (waveguide, transdutor e Mastersonic MSG 2000), Figura 3.41.

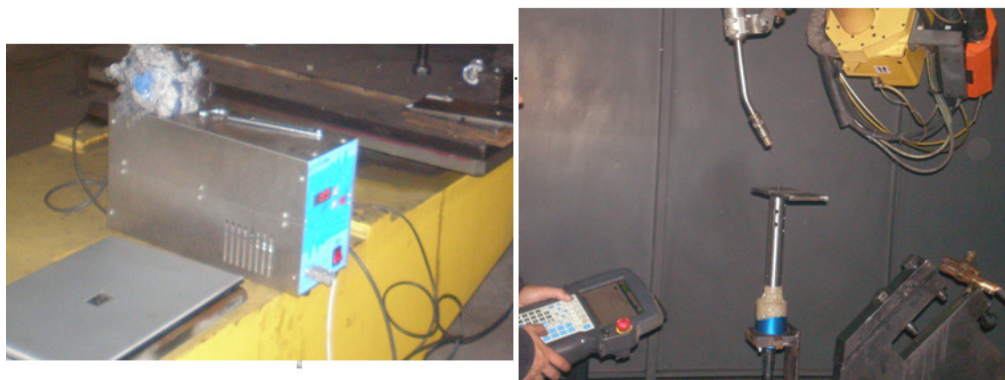


Figura 3. 41 - Instrumentação usada.

3.3.1 Equipamento de soldadura

A soldadura dos provetes efectuou-se através de um robô de soldadura MIG, Figura 3.42. Este robô permite efectuar movimentos rápidos e suaves ponto-a-ponto. Além disso, é fácil de controlar tendo um desempenho fiável para a alta produtividade. O robô é controlado através de uma programação prévia

efectuada na consola. Através dessa programação é definida a trajetória ao longo da zona que vai ser soldada, sendo gravadas as coordenadas.



Figura 3. 42 - Robô de soldadura MIG.

3.3.2 Equipamento de ultrassons

O Mastersonic MSG 2000, Figura 3.43, é um equipamento de multifrequência que oferece um excelente controlo devido à sua interface programável. No que diz respeito à potência de trabalho, pode variar desde 0 a 1500 W e ser animado em quaisquer condições de serviço. Além disso, consegue criar uma distribuição uniforme e homogénea de actividade acústica numa superfície e no interior do sistema de vibração, evitando a criação de ondas estacionárias. Assim, garante que todo o sistema de vibração seja totalmente agitado com a mesma frequência [50].



Figura 3. 43 - Mastersonic MSG 2000.

Este equipamento é ligado a um transdutor, que transmite a energia gerada na forma de vibrações ao waveguide, Figura 3.44. O transdutor permite converter a energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Por sua vez, o waveguide é ligado à peça de trabalho por um perno roscado, permitindo a propagação eficiente das ondas ultrassônicas geradas.

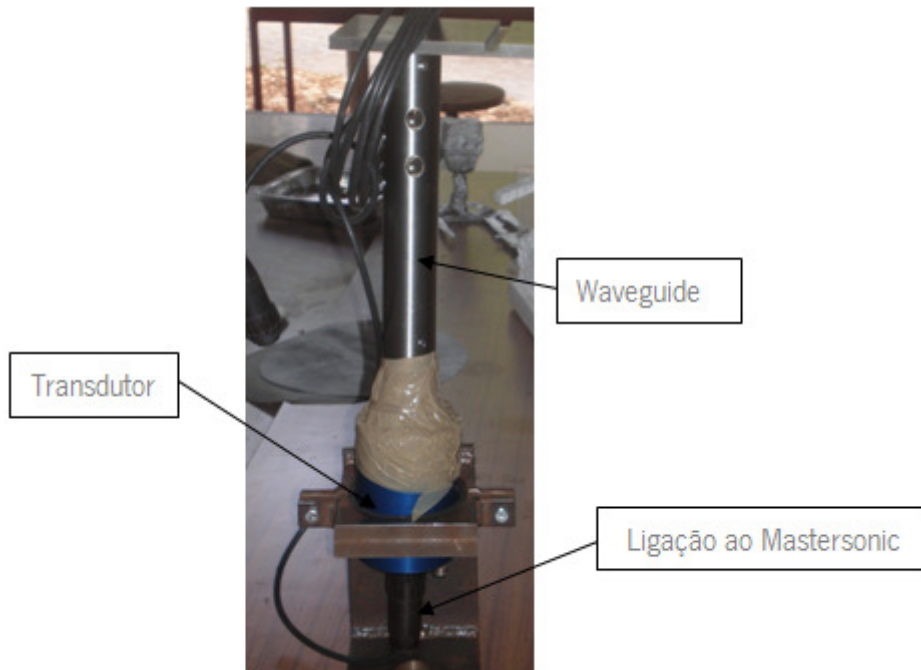


Figura 3. 44 - Transdutor e waveguide utilizados.

O controlo do Mastersonic utilizado realiza-se através de um software próprio, Figura 3.45, sendo conectado ao computador através de uma ligação USB. Neste programa podem ser ajustados e configurados os parâmetros pretendidos entre os quais a potência e frequência dos ultrassons.

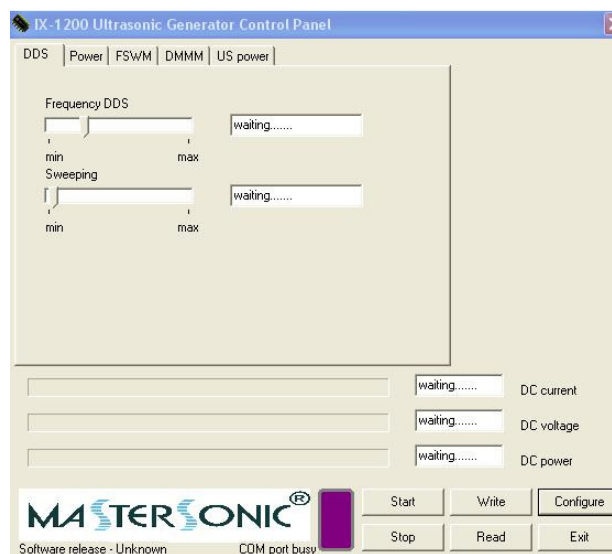


Figura 3. 45 - Software de controlo Mastersonic.

Na Figura 3.46, está representado um esquema de todos os componentes usados para gerar as ondas ultrassónicas pretendidas. É através da ligação entre estes diferentes componentes que são geradas as ondas ultrassónicas com a frequência desejada.

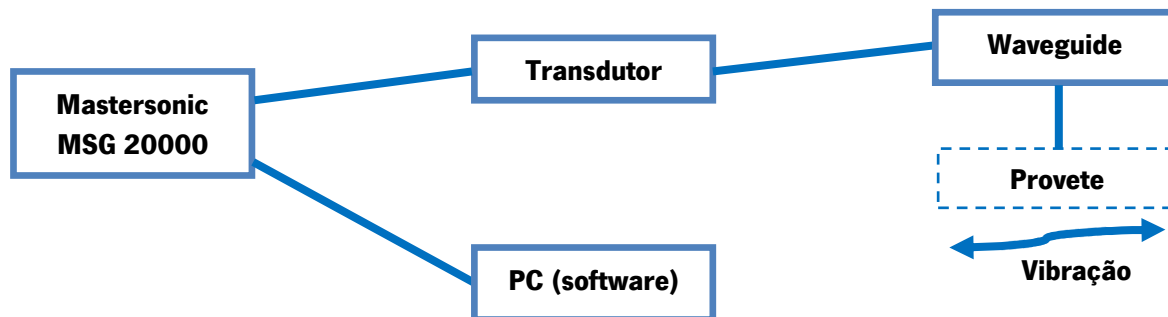


Figura 3. 46 - Esquema representativo dos componentes que geram os ultrassons.

3.3.3 Parâmetros utilizados

Como referido anteriormente, usaram-se 6 provetes para efectuar o trabalho experimental. Os testes efectuados dividiram-se em 3 grupos, sendo que cada grupo era composto por dois provetes. Um dos provetes foi usado numa soldadura normal (sem vibração) e o outro numa soldadura com aplicação de vibrações mecânicas.

Os 3 testes, no que toca aos parâmetros de soldadura, podem classificar-se em: forte, médio e baixo em relação ao valor da intensidade utilizado. Ou seja, o objectivo era testar o efeito da vibração perante diferentes condições de soldadura (velocidades de arrefecimento, quantidade de metal depositado).

Todos os parâmetros de soldadura foram definidos tendo em conta a espessura da chapa (8mm), ou seja, de forma a evitar por exemplo, uma penetração completa durante a fusão. O cordão foi realizado numa única passagem, obtendo assim um cordão contínuo. Relativamente à velocidade de soldadura, decidiu-se utilizar um valor baixo, típico deste tipo de teste. Por sua vez, a intensidade e a velocidade de alimentação do fio foram alteradas nos 3 testes de forma a testar a vibração em 3 condições diferentes.

A intensidade é uma variável que tem bastante influência no processo de soldadura uma vez que é responsável pela taxa de fusão do eléctrodo, penetração e quantidade de material base que vai fundir. Isto é, para uma corrente elevada há um aumento da taxa de fusão do eléctrodo originando um cordão de maior dimensão, assim como, um aumento da penetração. Para correntes mais baixas acontece exactamente o fenómeno oposto [2]. Sendo assim, usaram-se 3 valores diferentes, sendo um mais

forte, outro médio e por fim um mais baixo, obtendo assim diferentes velocidades de arrefecimento e quantidade de metal depositado em cada teste.

A ideia inicial era manter fixos os valores da potência e frequência dos ultrassons, no entanto, isso não foi possível. Sendo assim, os parâmetros mantiveram-se constantes nos 2 primeiros testes. No terceiro teste o valor da frequência usado foi ligeiramente diferente, por sua vez o valor da potência foi o mesmo dos testes anteriores.

Nas Tabela 3.3, são apresentados os vários parâmetros quer de soldadura, quer dos ultrassons utilizados nos 3 testes efectuados:

Tabela 3. 3 - Parâmetros utilizados nos 3 testes

Parâmetros	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
$V_{\text{soldadura}}$ (mm/min)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
d_{no} (mm)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tensão (V)	29,0	29,0	28,6	28,6	24,0	24,0
Corrente (A)	353,0	353,0	320,0	320,0	233,5	233,5
V_{no} (mm/min)	1050,0	1050,0	845,0	845,0	500,0	500,0
f (kHz)	-	19,8	-	19,8	-	18,5
P (W)	-	350,0	-	350,0	-	350,0

3.3.4 Execução prática

Depois de definir todos os parâmetros e equipamentos passou-se à realização do procedimento experimental. Nas soldaduras sem aplicação de ultrassons apenas foi necessário usar a consola que

controla o robô para efectuar a soldadura. Quanto às soldaduras com vibração, o procedimento foi o mesmo, mas com o sistema de ultrassons activo, Figura 3.47.



Figura 3. 47 - Soldadura com os ultrassons activos.

3.4 ANÁLISE METALGRÁFICA

Para efectuar o estudo dos provetes retirou-se uma amostra de cada um para a realização da análise metalográfica. A preparação das amostras efectuou-se no laboratório de metalurgia da Universidade do Minho. Esta etapa foi executada cautelosamente, devido ao grau de perfeição exigido ao acabamento final de uma amostra. A preparação das amostras divide-se em 4 etapas: corte, lixamento, polimento e ataque químico.

3.4.1 Corte

O corte da amostra fez-se numa secção transversal dos provetes soldados, Figura 3.48. Esta secção contém a zona do cordão, a zona termicamente afectada e o metal base. Além dos provetes, cortou-se uma amostra do material base sem soldadura para ser usado como referência.

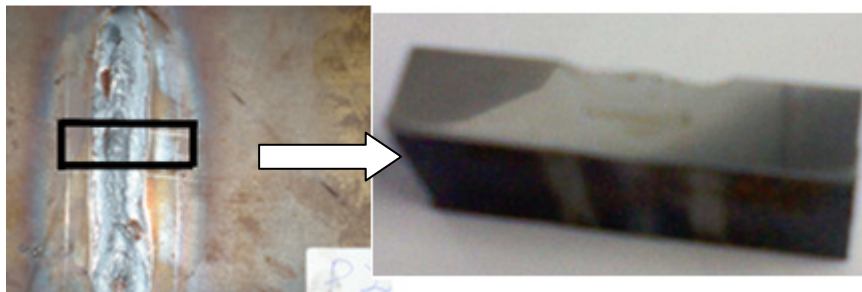


Figura 3. 48 - Seccionamento das amostras.

Esta etapa realizou-se através de um disco abrasivo, Figura 3.49, que permite um corte regular sem alteração das propriedades. Este tipo de corte apresenta a melhor solução para o seccionamento

pretendido, uma vez que, elimina por completo o trabalho mecânico a frio. Dessa forma, dá origem a superfícies planas com baixa rugosidade, de forma bastante rápida e segura.



Figura 3. 49 - Equipamento de corte (Discotom).

3.4.2 Lixamento

No final do corte de todos os provetes passou-se ao lixamento das amostras na polideira da Mecapol, Figura 3.50. O lixamento tem como objectivo a eliminação dos riscos e marcas da superfície da amostra antes da etapa de polimento. Este processo ocorre em 3 etapas, com 3 lixas de granulometria diferente. Como recomendado, começou-se pela mais alta, neste caso a de 180p, de seguida 600p e por fim a menor, 1200p. Alterou-se a posição da amostra cerca de 90° de lixa para lixa, até que os traços da lixa anterior mudassem todos de direcção. Na mudança entre as diferentes lixas limpou-se as amostras com álcool para evitar possíveis contaminações resultantes de partículas das lixas.



Figura 3. 50 - Polideira Mecapol.

3.4.3 Polimento

O objectivo do polimento é obter um acabamento superficial espelhado sem qualquer risco. Para aços como o das amostras, usa-se como agente de polimento o diamante devido às suas características de granulometria (dureza, poder de desbaste, forma dos grãos). Antes de executar o polimento deve

limpar-se a superfície da amostra, de forma a retirar todos os traços abrasivos, poeiras e outros. O polimento de todas as amostras, efetuou-se também na polideira referida na etapa de lixamento. Numa primeira fase usou-se o pano de 6 μm e, posteriormente, o pano de 1 μm . Também nesta etapa, limpou-se as amostras na mudança de pano cuidadosamente para evitar contaminação.

3.4.4 Ataque químico

O objetivo do ataque químico é permitir a visualização dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. Coloca-se um reagente em contacto com a superfície da amostra por um determinado tempo. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes que se desejam identificar. No ataque químico das amostras usou-se como reagente o nital 5% (5 % de ácido nítrico e 95% de álcool etílico), Figura 3.51, bastante usado nos materiais ferrosos, mergulhando-se as amostras durante 30 s. No final, limpam-se todas as amostras com água e álcool e fez-se a secagem.



Figura 3. 51 - Reagente Nital 5%.

3.5 EXAME MACROGRÁFICO

A macrografia tem como objectivo recolher o maior número de dados sobre as características superficiais das soldaduras. Através do estudo macrográfico das soldaduras pretende-se avaliar por um lado, as anomalias geométricas ou físicas e, por outro lado, validar as condições de soldadura com que foram efectuados. A análise das anomalias das soldaduras tem um carácter pontual, uma vez que, a zona examinada pode não ser representativa da totalidade da soldadura, o que é uma das limitações desta técnica [5].

Neste exame macrográfico, analisaram-se os parâmetros geométricos do cordão, ou seja, a largura, comprimento e a extensão da zona termicamente afectada. Após a realização do ataque químico ficaram evidenciadas as diferentes zonas da soldadura de cada amostra. Nesta etapa recorreu-se a

uma ampliação inferior a 5x, aliada a uma observação à vista desarmada. A captação das imagens fez-se através de uma máquina fotográfica. Por sua vez, a análise e medição das diferentes zonas do cordão efectuou-se com auxílio do software *Image Pro Plus*, Figura 3.52.

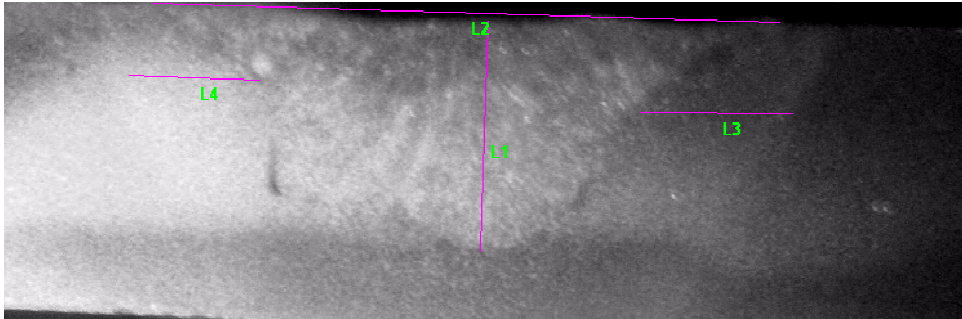


Figura 3. 52 - Medição através do *Image Pro Plus*.

Na Figura 3.53 é possível ver um esquema representativo do local onde foram efectuadas as diferentes medições das características geométricas dos cordões.

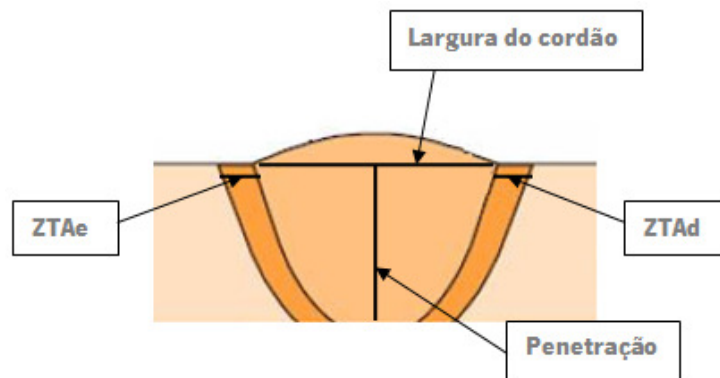


Figura 3. 53 - Esquema representativo das zonas de medição do cordão.

3.6 EXAME MICROGRÁFICO

Nas análises micrográficas as ampliações utilizadas são bastante superiores às da macrografia. Dessa forma, permitem obter um maior número de informações, como por exemplo: identificação e caracterização das fases presentes, quantificação de tamanho médio de grão, fracção volumétrica, entre outros aspectos [5].

A visualização micrográfica das amostras realizou-se com recurso a um microscópio óptico, Figura 3.54. Para recolher as micrografias adaptou-se uma máquina fotográfica ao microscópio facilitando assim, a recolha e arquivamento da informação. Esta etapa exige bastante cuidado no manuseamento do equipamento, na focagem e estudo das diferentes zonas da soldadura.



Figura 3. 54 - Microscópio óptico e máquina fotográfica.

Retiram-se micrografias de todas as zonas de soldadura seguindo o esquema da Figura 3.55. Além do metal base, da zona termicamente afectada e do cordão, as zonas de transição também foram analisadas. A análise das diferentes zonas fez-se com recurso às ampliações 50x, 100x e 200x.



Figura 3. 55 - Esquema representativo das amostras analisadas.

3.5.1 Tamanho de grão

Para determinar o tamanho de grão e dessa forma avaliar o efeito dos ultrassons nas várias amostras aplicou-se o método planimétrico. Segundo este método, escolhendo uma micrografia deve traçar-se um círculo de área conhecida e esta deve conter pelo menos 50 grãos. Posteriormente deve efectuar-se a contagem dos grãos presentes no interior da área seleccionada. Deve ter-se em conta que os grãos interceptados pelo contorno do círculo devem contar como meio grão. O método recomenda que este procedimento seja repetido para 3 micrografias diferentes da zona da amostra com a mesma ampliação. Sendo assim, efectuou-se o procedimento em 3 micrografias diferentes da zona termicamente afectada e do cordão de cada amostra com ampliação de 200x. A execução do método fez-se com o auxílio do software de análise e tratamento de imagens, o *ImageJ*. Na Figura 3.56, está

representado um exemplo deste software que permite efectuar a contagem dos grãos presentes no interior de uma secção circular definida e medir a área de cada um.

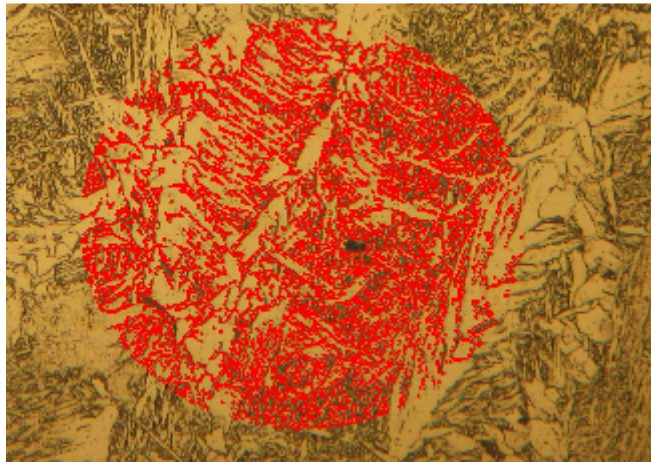


Figura 3. 56 - Cálculo da área e do número de grãos pelo *ImageJ*.

Depois de obter os dados necessários através do *ImageJ* passou-se à etapa de cálculo da área média da secção do grão e do respectivo diâmetro, supondo uma secção circular. Para isso, usaram-se as equações 3.6 e 3.7:

$$\bar{A} = \frac{At}{N} \quad \text{Eq.3.6}$$

$$\bar{d} = \sqrt{\frac{4 \times \bar{A}}{\pi}} \quad \text{Eq.3.7}$$

Onde,

\bar{d} - Diâmetro médio;

\bar{A} - Área média da secção;

At - Área total de teste;

N - Número total de grãos.

3.5.2 Microdureza

A dureza é a resistência que um material oferece à penetração ou à deformação permanente da sua superfície. O uso de ensaios de microdureza permitem verificar a influência da soldadura no endurecimento ou amaciamento das diferentes zonas soldadas [13].

O ensaio de microdureza Vickers consiste basicamente na indentação de um indentador de diamante no material durante uns segundos. Posteriormente calcula-se o valor da dureza através das equações 3.8 e 3.9:

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad \text{Eq.3.8}$$

$$d = \frac{d1+d2}{2} \quad \text{Eq.3.9}$$

Onde,

$d1, d2$ – diagonais resultantes da indentação;

F- carga aplicada.

Os testes de microdureza Vickers realizaram-se no microdurímetro da marca *Shimadzu* presente no laboratório de metalurgia, Figura 3.57. Em todas as indentações efectuadas na linha de medição, utilizou-se uma carga de 500 g durante 20 s.



Figura 3. 57 - Microdurímetro.

Realizaram-se 11 indentações em cada amostra, seguindo uma linha de teste como representado na Figura 3.58. Ao longo da linha de teste, mediu-se a microdureza das diferentes zonas: material base, zona termicamente afectada e cordão.

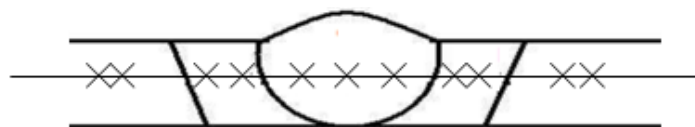


Figura 3. 58 - Esquema representativo da linha de microdureza analisada.

A medição das diagonais resultantes de todas as indentações efectuadas em cada provete fez-se através do *Image Pro Plus*, Figura 3.59, sendo posteriormente calculada a dureza através das equações referidas anteriormente.

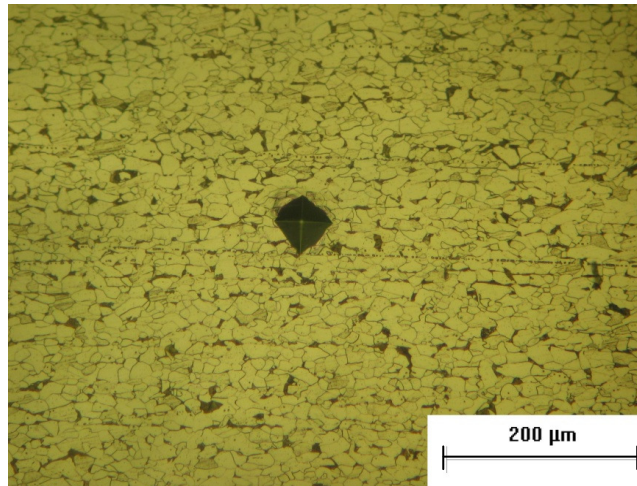


Figura 3. 59 - Medição das diagonais resultantes da indentação.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 CORDÕES DE SOLDADURA

Na Figura 4.60, são apresentados os provetes e os respectivos cordões resultantes da soldadura no final de todos os testes. Os provetes 1 e 2 são referentes ao teste 1 (corrente mais elevada), por sua vez os provetes 3 e 4 ao teste 2 (corrente intermédia) e, por fim, os provetes 5 e 6 ao teste 3 (corrente mais baixa). Os provetes 2,4 e 6 foram soldados com vibração sendo que os provetes 1,3, e 5 foram soldados normalmente. É possível verificar as diferentes dimensões dos cordões resultantes das condições em que foram soldados (diferentes taxas de deposição e velocidade de arrefecimento).

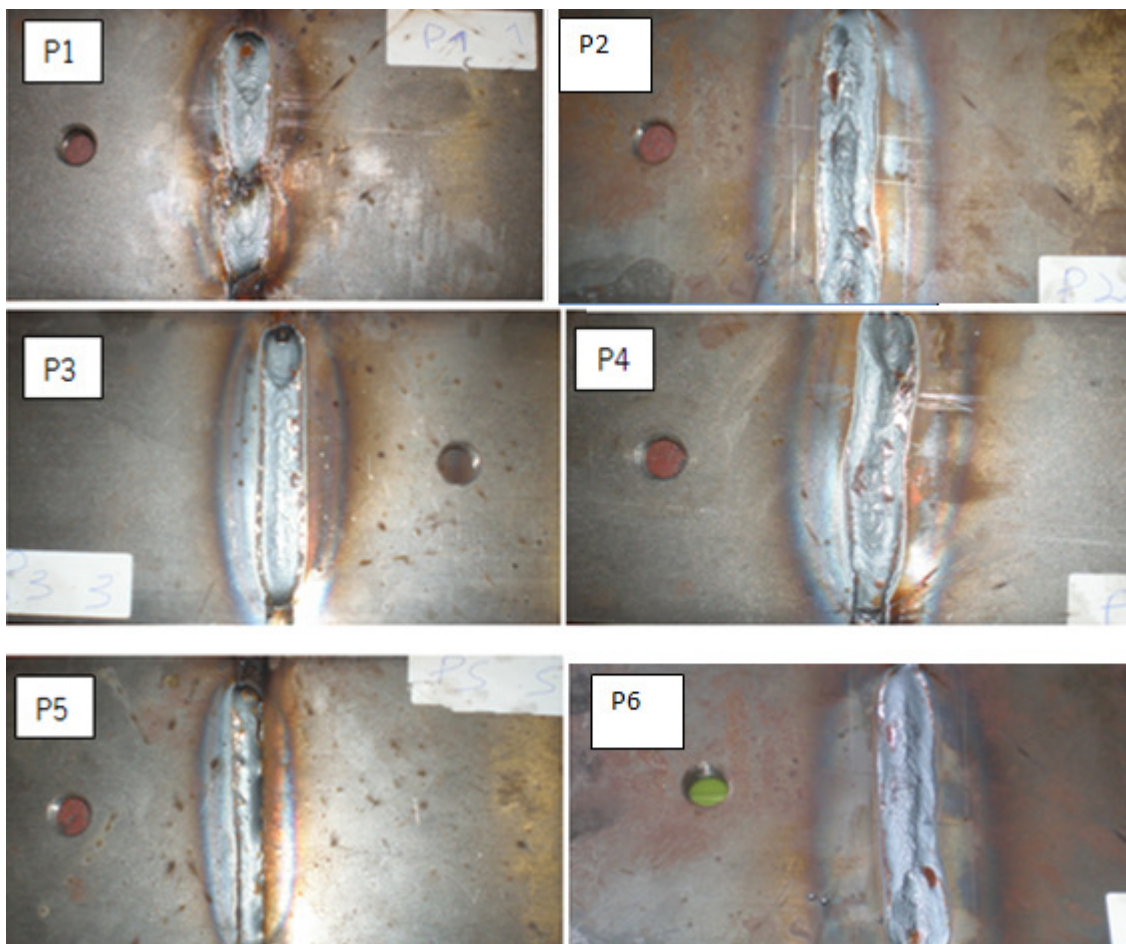


Figura 4. 60 - Cordões de soldadura dos provetes.

4.2 MACROGRAFIA

As macrografias apresentadas são apenas representativas das zonas de soldadura das amostras. As informações analisadas e apresentadas resultaram de uma análise mais exaustiva. Embora não sejam apresentadas, todas foram utilizadas para a discussão das características de soldadura observadas e além disso, a delimitação das várias zonas efectuou-se, também, através das micrografias de forma a conseguir uma visualização global e mais precisa de todas as zonas. Neste sub-capítulo apresentam-se os parâmetros geométricos: largura do cordão, penetração e extensão da zona termicamente afectada.

4.2.1 Provete 1 vs Provete 2

Nas Figuras 4.61 e 4.62 são apresentadas as macrografias retiradas das amostras dos provetes 1 e 2.



Figura 4. 61 - Amostra do provete 1 (soldadura sem vibração).

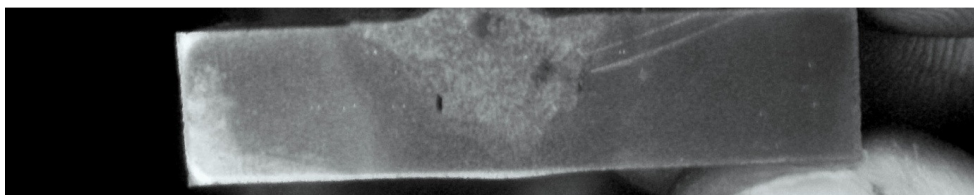


Figura 4. 62 - Amostra do provete 2 (soldadura com vibração).

Na tabela 4.46 são apresentados os resultados da análise macrográfica dos parâmetros geométricos dos provetes 1 e 2. Observa-se que, o provete 2 (com vibração) apresenta uma extensão da zona termicamente afectada e largura do cordão de menores dimensões. Além disso, este provete apresenta uma maior penetração do cordão que o provete 1. Assim, para a mesma intensidade e velocidade de alimentação do fio, o provete soldado com vibração resultou num aumento da penetração do cordão e diminuição da zona termicamente afectada em relação ao provete 1 soldado normalmente.

Tabela 4. 4 - Resultados macrografia provete 1 vs provete 2

Zona	Provete 1	Provete 2
ZTAe (mm)	4,2	3,5
Largura do cordão (mm)	15,1	14,3
Penetração (mm)	6,1	6,7
ZTAd (mm)	3,9	3,3

4.2.2 Provete 3 vs Provete 4

Na Figura 4.63 e 4.64 são apresentadas as macrografias retiradas das amostras dos provetes 3 e 4.

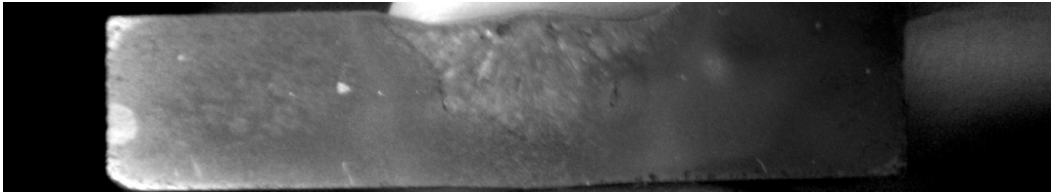


Figura 4. 63 - Amostra do provete 3 (soldadura sem vibração).

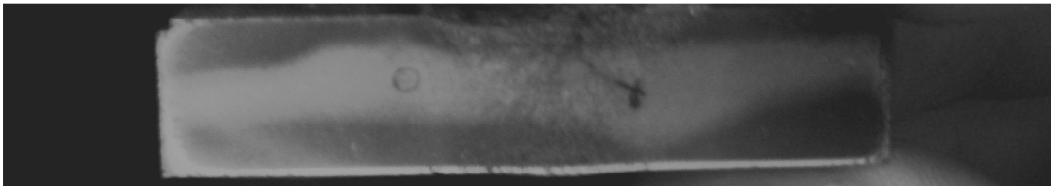


Figura 4. 64 - Amostra do provete 4 (soldadura com vibração).

Na tabela 4.5 são apresentados os resultados da análise macrográfica dos parâmetros geométricos dos provetes 3 e 4. Neste caso, o provete soldado com o sistema de ultrassons ligado (P4) também apresenta uma extensão da zona termicamente afectada e largura do cordão de menores dimensões. Além disso, a soldadura deste provete resultou numa maior penetração do cordão em relação ao provete 3. Assim, para a mesma intensidade e velocidade de alimentação do fio, o provete soldado com vibração resultou num aumento da penetração e diminuição da zona termicamente afectada em relação ao provete 3 soldado normalmente.

Tabela 4. 5 - Resultados macrografia provete 3 vs provete 4

Zona	Provete 3	Provete 4
ZTAe (mm)	3,1	2,9
Largura do cordão (mm)	14,1	13,9
Penetração (mm)	5,8	6,3
ZTAd (mm)	3,2	3,5

4.2.3 Provete 5 vs Provete 6

Na Figura 4.65 e 4.66 são apresentadas as macrografias retiradas das amostras dos provetes 5 e 6.

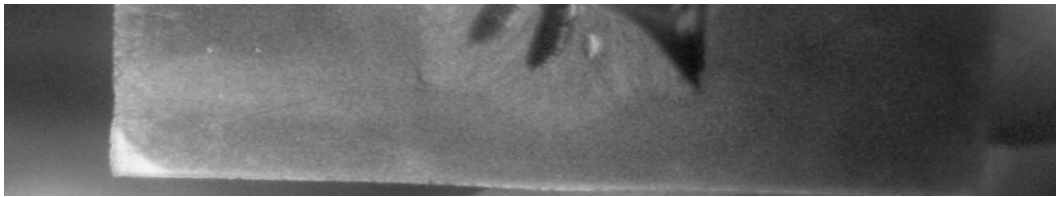


Figura 4. 65 - Amostra do provete 5 (soldadura sem vibração).

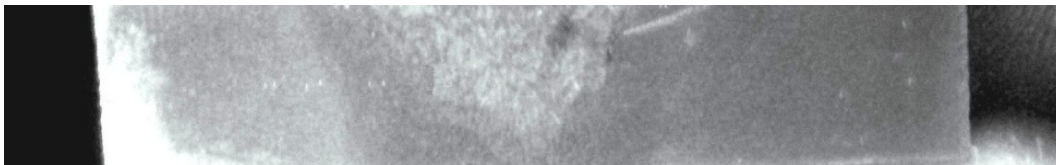


Figura 4. 66 - Amostra do provete 6 (soldadura com vibração).

Na tabela 4.6 são apresentados os resultados da análise macrográfica dos parâmetros geométricos dos provetes 5 e 6. Observa-se que, o provete 6 (com vibração) apresenta uma extensão da zona termicamente afectada do lado esquerdo e largura do cordão de menores dimensões. Além disso, este provete apresenta uma maior penetração do cordão que o provete 5. Assim, para a mesma intensidade e velocidade de alimentação do fio, o provete soldado com vibração resultou num aumento da penetração do cordão e diminuição da zona termicamente afectada do lado esquerdo em relação ao provete 5 soldado normalmente.

Tabela 4. 6 - Resultados macrografia provete 5 vs provete 6

Zona	Provete 5	Provete 6
ZTAe (mm)	2,1	1,8
Largura do cordão (mm)	12,3	11,5
Penetração (mm)	5,1	5,4
ZTAd (mm)	2,2	1,9

4.2.4 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6

Comparando os 3 provetes soldados com vibração, ou seja, as diferentes condições de soldadura utilizadas verifica-se que em todos o uso de vibração resultou em melhorias nas características geométricas do cordão. A penetração foi visivelmente maior nestes provetes em relação à soldadura sem vibração. Por outro lado, a extensão da zona termicamente afectada foi menor. O efeito da vibração foi semelhante nos 3 testes, sendo um pouco maior no teste 1. No último teste a diferença foi menor, devido também em parte às próprias condições do teste (menor taxa de deposição de metal).

4.3 MICROESTRUTURA

De forma a poder analisar e retirar informações relativamente ao efeito da vibração ultrassónica ao nível microestrutural retiraram-se micrografias das diferentes microestruturas das zonas de soldadura resultantes. Ao longo deste sub-capítulo são apresentadas as micrografias consideradas mais relevantes entre as várias amostras. No Anexo C podem ser consultadas mais algumas micrografias de todas as amostras analisadas.

4.3.1 Material base

Todas as amostras são constituídas pelo mesmo material base, o aço de construção C1. Este aço, como referido anteriormente, é um aço de baixo teor em carbono (0,09 %), ou seja, é um aço hipoeutectóide, que no diagrama ferro-carbono está à esquerda do ponto eutectóide (0,77% C). Este aço, cujo teor em carbono não ultrapassa os 0,1%, apresenta uma estrutura típica dos hipoeutectóides, praticamente constituída por ferrite pró-eutectóide e algumas colónias de perlite, como se pode ver na Figura 4.67.

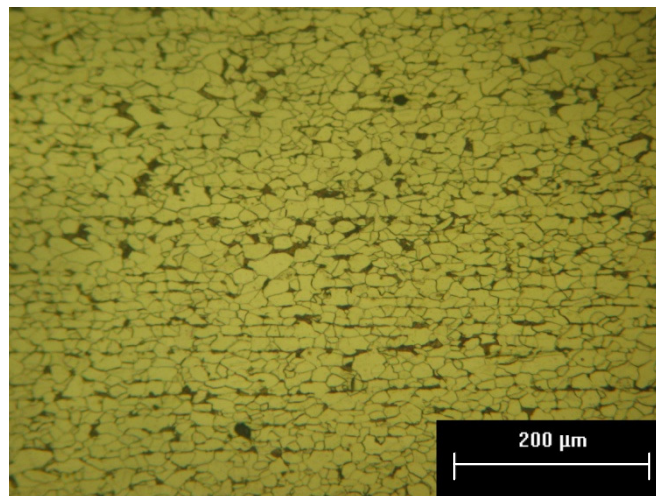


Figura 4. 67 - Microestrutura do aço C1.

4.3.2 Provete 1 vs provete 2

Ao longo deste sub-capítulo são apresentadas as micrografias retiradas nas diferentes zonas de soldadura dos provetes 1 e 2. Através delas é efectuada uma análise das microestruturas presentes e uma comparação entre as duas amostras.

4.3.2.1 Zona termicamente afectada

Durante a observação da zona termicamente afectada encontraram-se duas zonas distintas. Assim sendo, a zona termicamente afectada pode ser dividida em duas zonas diferentes: uma de grãos mais grosseiros e outra de grãos recristalizados a uma temperatura mais baixa, como se pode ver na Figura 4.68 referente ao provete 1.

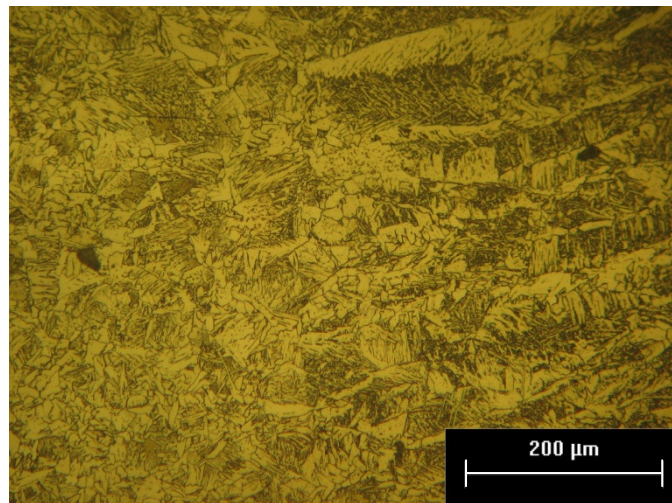


Figura 4. 68 - Zonas da soldadura amostra do provete 1.

Na Figura 4.69 é apresentada a estrutura da zona termicamente afectada dos provetes 1 e 2. Esta zona mais perto do cordão de soldadura apresenta um tamanho de grão grosseiro presente na fronteira com a zona fundida. Tal, deve-se ao sobreaquecimento excessivo provocado pelo metal depositado (temperaturas superiores à temperatura de recristalização) que dá origem à formação de grãos austeníticos de elevadas dimensões no seu arrefecimento. Nas duas amostras, a estrutura apresentada é a mesma, ou seja, uma estrutura ferrite-perlite de grãos grosseiros.

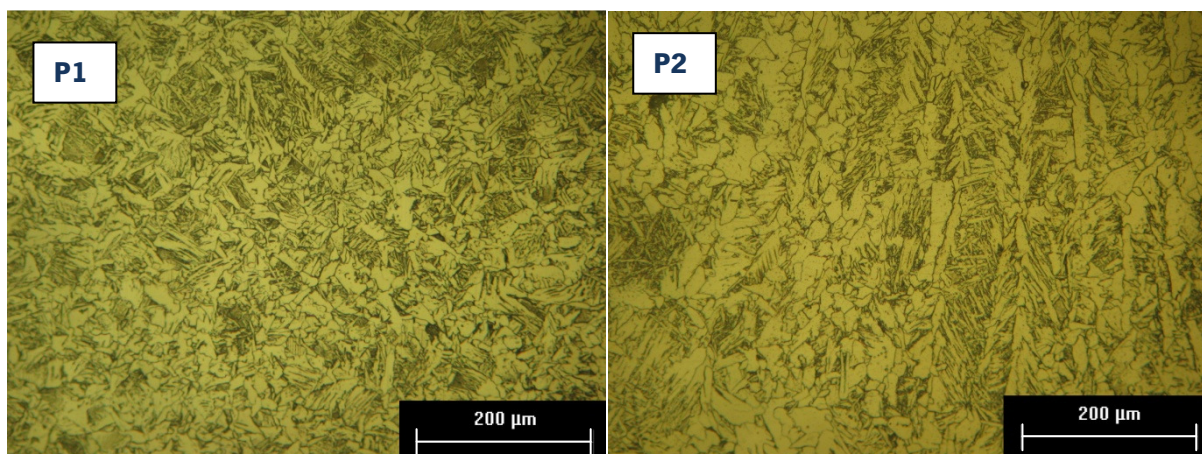


Figura 4. 69 - Microestrutura da zona termicamente afectada provete 1 e 2.

A Figura 4.70 diz respeito à microestrutura da zona recristalizada do provete 1. Esta segunda zona termicamente afectada, como referido, surge devido ao facto de estar sujeita a um gradiente térmico menos intenso que a zona anterior. Assim, promove-se a formação de novos grãos ferríticos, através de uma austenitização parcial ocorrida entre as linhas Ac1 e Ac3 do diagrama Fe-C. Consiste numa estrutura de grãos ferríticos semelhantes aos do metal base. No entanto, devido ao gradiente de temperatura a que esteve sujeita ocorreu nessa zona recristalização a baixa temperatura da fase α .

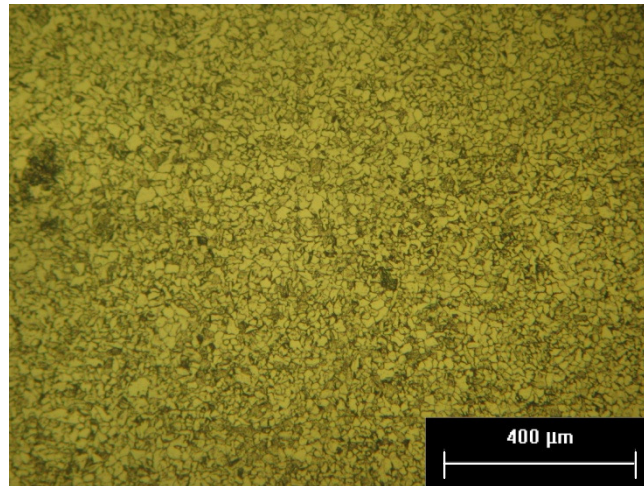


Figura 4. 70 - Microestrutura da zona recristalizada provete 1.

4.3.2.2 Cordão

Na Figura 4.71 está presente a microestrutura final apresentada na zona do cordão dos provetes 1 e 2. Trata-se da estrutura de Widmanstätten, composta por grãos colunares, característica das soldaduras de passe único. Nesta estrutura, as colónias de perlite formadas são envolvidas por uma ferrite pró-eutectóide, sendo que em algumas zonas se identifica, ainda, uma pequena quantidade de pequenos grãos de ferrite.

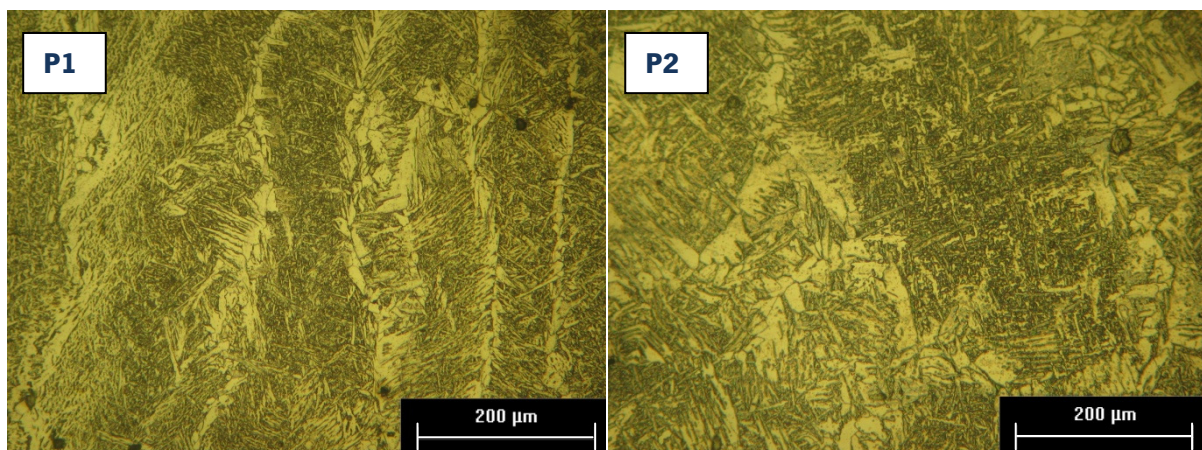


Figura 4. 71 - Microestrutura do cordão provete 1 e 2.

4.3.3 Provetes 3 vs provete 4

Ao longo deste sub-capítulo são apresentadas as micrografias mais relevantes retiradas nas diferentes zonas de soldadura dos provetes 3 e 4.

4.3.3.1 Zona termicamente afectada

Como esperado, também nestas amostras se verificou a existência de duas zonas termicamente afectadas referidas anteriormente. A primeira constituída por grãos mais grosseiros e outra por grãos mais finos, Figura 4.72.

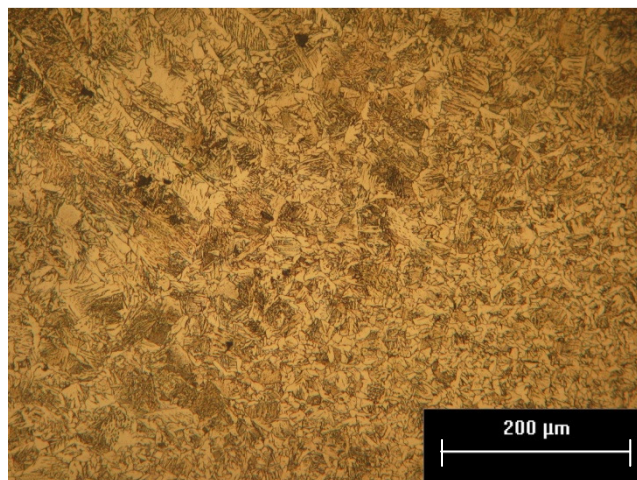


Figura 4. 72 - Zona termicamente afecta de recrystalizada do provete 3.

A razão para existência das duas zonas diferentes, uma mais perto do cordão e uma outra mais perto do metal base, a mesma apresentada anteriormente. Na zona recrystalizada obteve-se uma estrutura de grãos ferríticos recrystalizados. Na Figura 4.73, é apresentada a estrutura da zona termicamente afectada mais perto do cordão do provete 3 e 4. Assim, como apresentado nos provetes do teste 1 a microestrutura resultante desta zona é uma estrutura ferrite-perlite de grãos grosseiros.

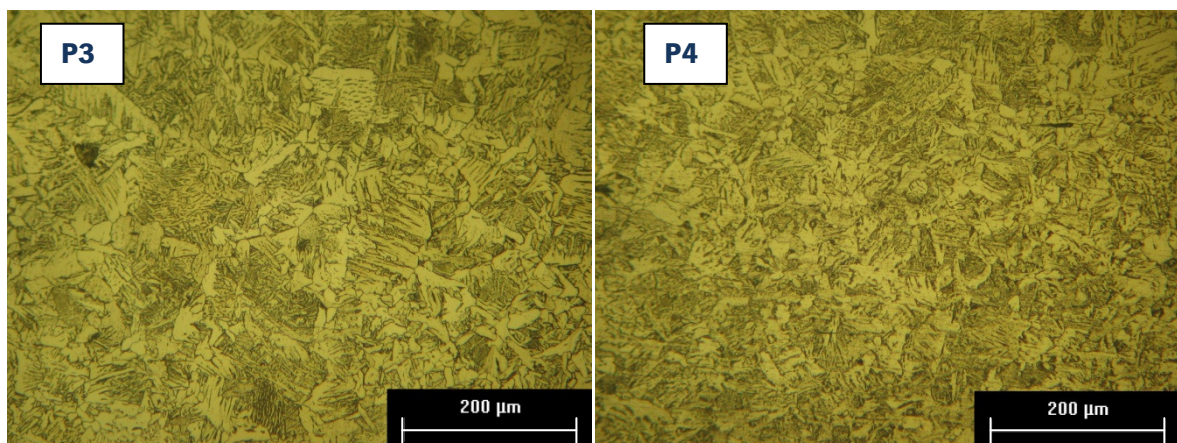


Figura 4. 73 - Microestrutura da zona termicamente afectada provete 3 e 4.

4.3.3.2 Cordão

Na Figura 4.74 está presente a microestrutura final apresentada na zona do cordão dos provetes 3 e 4. Trata-se, também, em ambos os casos da estrutura de Widmanstätten, composta por grãos colunares, onde as colónias de perlite formadas são envolvidas por uma ferrite pró-eutectóide.

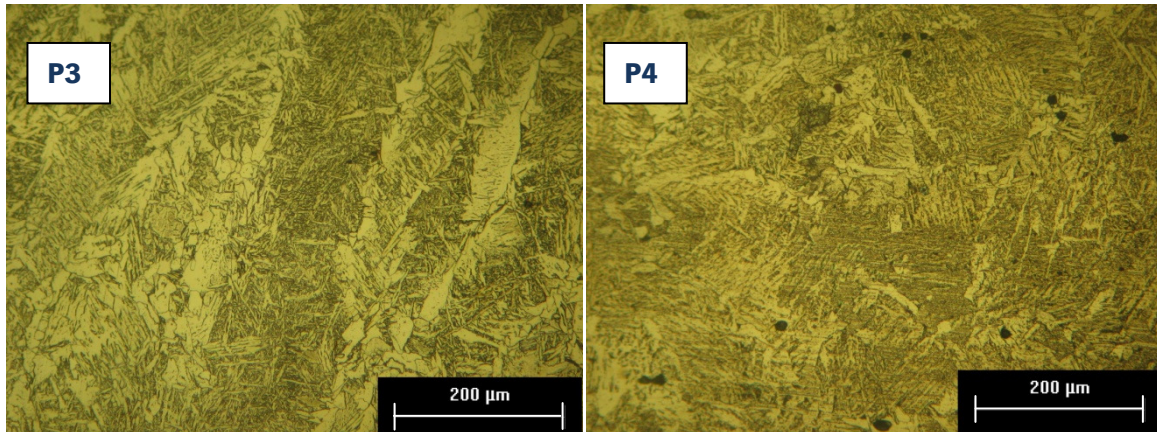


Figura 4. 74 - Microestrutura do cordão provete 3 e 4.

4.3.4 Provete 5 vs provete 6

Ao longo deste sub-capítulo são apresentados as micrografias mais relevantes retiradas nas diferentes zonas de soldadura dos provetes 5 e 6. Na Figura 4.75 é possível ver as diferentes zonas resultantes da soldadura do provete 5. Facilmente é possível identificar a existência das duas zonas termicamente afectadas e a zona mais grosseira característica do cordão de soldadura.

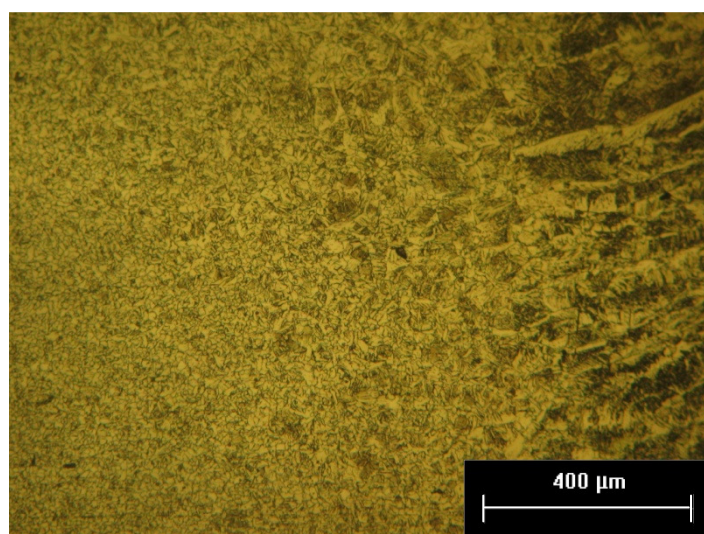


Figura 4. 75 - Zonas resultantes da soldadura (metal base, ZTA e cordão).

4.3.4.1 Zona termicamente afectada

Na Figura 4.76 é apresentada a estrutura da zona termicamente afectada mais perto do cordão do provete 5 e 6. Assim, como apresentado nos restantes provetes, a microestrutura resultante desta zona é uma estrutura ferrite-perlite de grãos grosseiros.

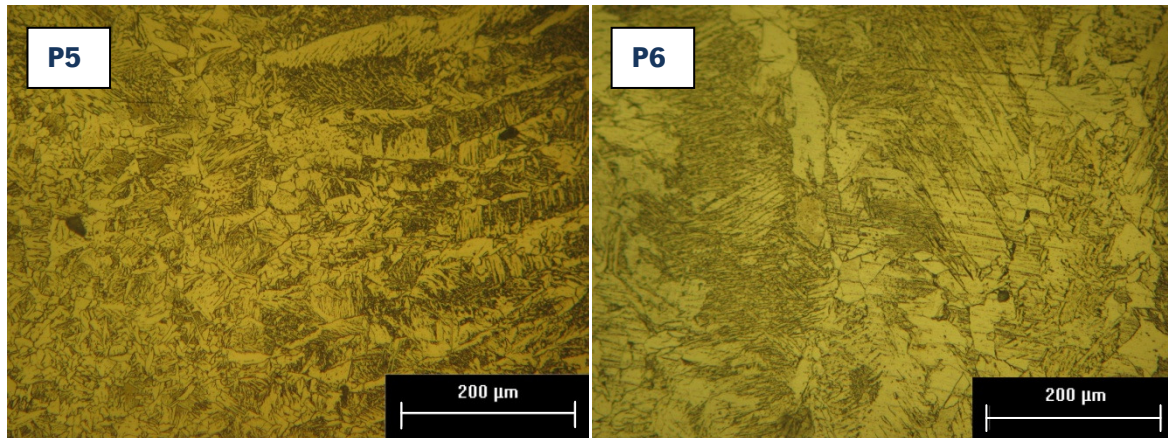


Figura 4. 76 - Microestrutura da zona termicamente afectada provete 5 e 6.

4.3.4.2 Cordão

Na Figura 4.77 está presente a microestrutura final da zona do cordão dos provetes 5 e 6. Igualmente aos restantes cordões, aqui a microestrutura resultante é a de Widmanstätten, composta por grãos colunares, onde as colónias de perlite formadas são envolvidas por uma ferrite pró-eutectóide.

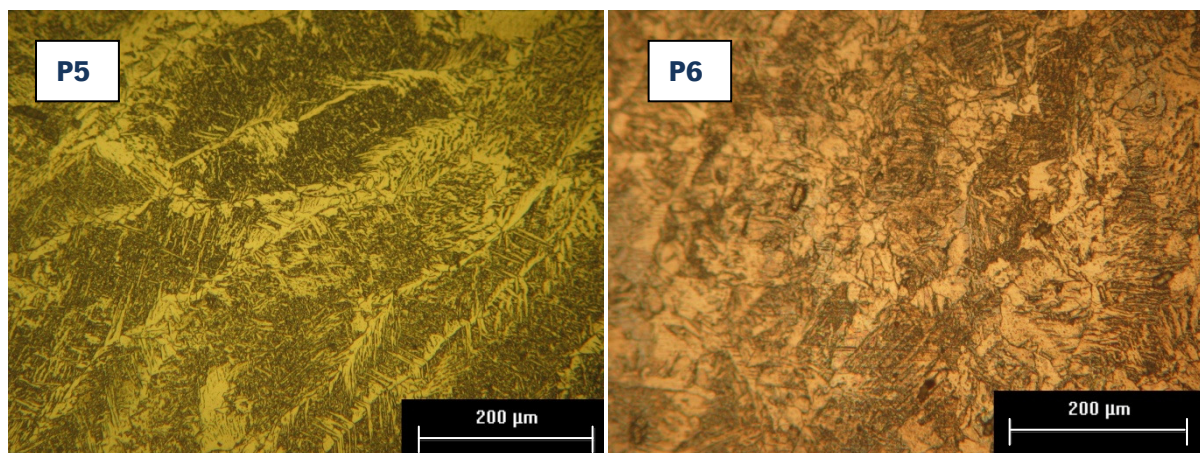


Figura 4. 77 - Microestrutura do cordão provete 3 e 4.

4.3.5 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6

Comparando os 3 provetes soldados com vibração, ou seja, as diferentes condições de soldadura utilizadas verifica-se que em todos o uso de vibração não alterou os constituintes presentes na microestrutura. Desta forma, não se encontraram diferenças entre os provetes de cada grupo nem nos

restantes dos outros testes. No entanto, isso não quer dizer que não tenham ocorrido alterações ao nível microestrutural nos provetes soldados com vibração, sendo essas potenciais alterações o assunto abordado nos próximos sub-capítulos.

4.4 TAMANHO DE GRÃO

O tamanho de grão como foi referido anteriormente é um parâmetro bastante importante, no que diz respeito às propriedades mecânicas do material. Por essa razão, avaliou-se também o efeito dos ultrassons no tamanho de grão dos diferentes provetes. A determinação deste parâmetro não é simples devido a variações entre as zonas imediatamente consecutivas, sendo os valores obtidos a média de várias medições e devem ser vistos apenas de uma forma qualitativa. O objectivo não é tanto o valor do tamanho de grão, mas sim a análise comparativa entre os diferentes provetes. Os valores obtidos resultaram de várias medições de forma a minimizar o possível erro de medição. O estudo deste parâmetro foi efectuado na zona termicamente afectada e no cordão, uma vez que são as mais relevantes. A zona termicamente afectada analisada diz respeito à zona mais perto do cordão e não à zona recristalizada.

4.4.1 Provete 1 vs provete 2

A Figura 4.78 ilustra os valores obtidos para o diâmetro médio da secção do grão e o respectivo desvio padrão, na zona termicamente afectada e no cordão das amostras do provete 1 e 2.

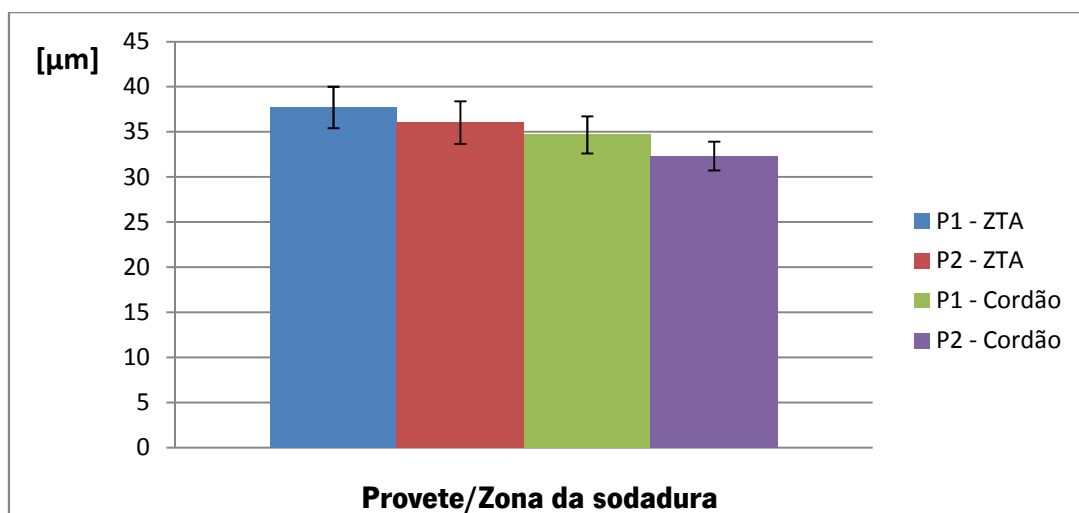


Figura 4. 78 - Diâmetro médio da secção do grão do provete 1 e 2.

O comportamento apresentado pelas amostras do provete 1 e 2 nas duas zonas é semelhante. Como esperado, a zona termicamente afectada caracteriza-se por ser uma zona com um grão mais grosseiro

(maior tamanho de grão). A microestrutura resultante desta zona referida no sub-capítulo anterior, confirma a existência de uma granulação mais grosseira em relação à zona do cordão. As altas temperaturas, a que esta zona esteve sujeita, propiciaram a existência de um crescimento dos grãos. Dessa forma, resultou na existência de um menor número de grãos, mas com maiores dimensões. Pode observar-se também que, o tamanho de grão na zona termicamente afectada e no cordão do provete soldado sem vibração é superior. Ou seja, o provete soldado com vibração (P2) em comparação com o provete soldado normalmente promoveu uma afinação de grão. Conseguiu-se assim, uma microestrutura constituída por um maior número de grãos e de menores dimensões em relação ao provete soldado sem vibração.

4.4.2 Provete 3 vs provete 4

Na Figura 4.79 ilustra os valores obtidos para o diâmetro médio da secção do grão e o respectivo desvio padrão, na zona termicamente afectada e do cordão das amostras do provete 3 e 4.

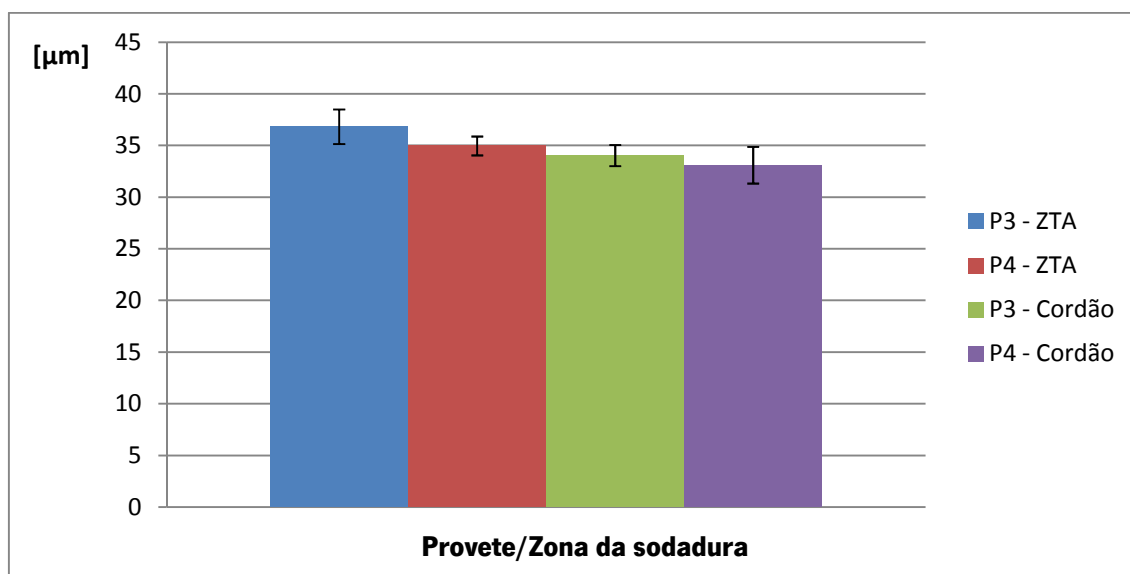


Figura 4. 79 - Diâmetro médio da secção do grão provete 3 e 4.

Assim, como sucedeu no teste analisado no sub-capítulo anterior, existe uma semelhança no comportamento das amostras do provete 3 e 4. A zona termicamente afectada caracteriza-se por ser uma zona com um grão mais grosseiro, sendo que esse fenómeno deve-se ao facto explicado anteriormente. Além disso, verifica-se que tanto na zona termicamente afectada como na zona do cordão, o provete soldado normalmente (P3) apresenta valores mais elevados (maior tamanho de grão). Ou seja, o provete soldado ao mesmo tempo que recebia vibrações mecânicas (P4) em comparação com o provete de soldadura normal promoveu uma afinação de grão. Obteve-se assim,

uma microestrutura constituída por um maior número grãos e de menores dimensões em relação à soldadura normal (sem vibração).

4.4.3 Provete 5 vs provete 6

Na Figura 4.80 são apresentados os valores obtidos para o diâmetro médio da secção do grão e o respectivo desvio padrão, na termicamente afectada e do cordão das amostras do provete 5 e 6.

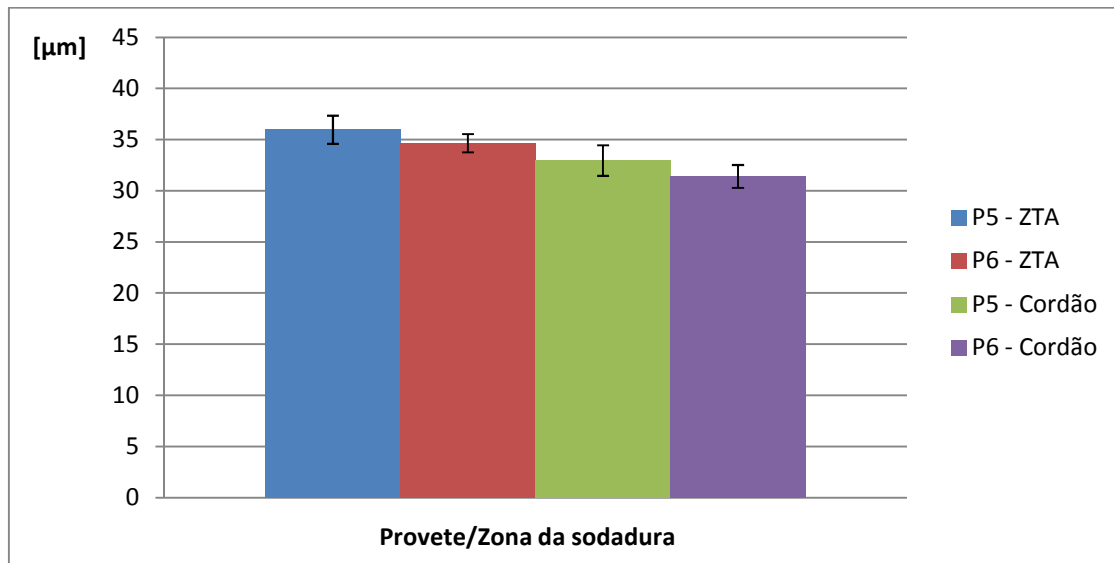


Figura 4. 80 - Diâmetro médio da secção do grão provete 5 e 6.

Tal como na situação dos restantes provetes, o comportamento na zona termicamente afectada e no cordão apresentado pelas amostras do provete 5 e 6 é semelhante. Assim, como verificado nas outras amostras, a zona termicamente afectada caracteriza-se por ser uma zona com um grão mais grosseiro, resultante do gradiente térmico acentuado a que esta zona esteve sujeita. Dessa forma, resultou na existência de um menor número de grãos mas com maiores dimensões. Comparando os 2 provetes, verifica-se que tanto na zona termicamente afectada como na zona do cordão, o provete soldado normalmente apresenta um maior tamanho de grão. Isto é, o provete soldado ao mesmo tempo que recebia vibrações ultrassónicas (P6) em comparação com o provete de soldadura normal (P5) promoveu uma afinação de grão. Obteve-se assim, uma microestrutura constituída por um maior número grãos e de menores dimensões em relação à soldadura normal (sem vibração).

4.4.4 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6

Comparando os 3 provetes soldados com vibração, mas com diferentes condições de soldadura utilizadas, verifica-se que em todos o uso de vibração resultou numa afinação de grão em relação à

soldadura sem vibração. Nas duas zonas (cordão e ZTA) o tamanho de grão obtido foi menor em todos os testes. A afinação de grão foi semelhante nos três provetes, sendo ligeiramente superior no provete 2, ou seja, do teste 1 (maior deposição de material e menor velocidade de arrefecimento).

4.5 MICRODUREZA

A medição das microdurezas de cada uma das amostras foi efectuada ao longo de uma linha, como referido anteriormente. Além das amostras de todos os provetes mediu-se a dureza do material base numa amostra sem soldadura para comparação de resultados obtidos. Com este tipo de teste pretende-se verificar a influência do processo de soldadura com ou sem vibração no endurecimento ou amaciamento das diferentes zonas dos provetes soldados. A zona definida como ZTA diz respeito à zona descrita no sub-capítulo anterior como a zona que sofreu recristalização a uma temperatura mais baixa.

4.5.1 Material base

A dureza medida no provete do material base (sem soldadura) serviu para ter um valor referência da dureza do material. O valor obtido na medição da indentação no material base e que serviu como referência da dureza dessa zona foi 204 HV.

4.5.2 Provete 1 vs provete 2

Na Figura 4.81, é possível observar os valores da dureza ao longo da linha de medição da amostra do provete 1 e 2.

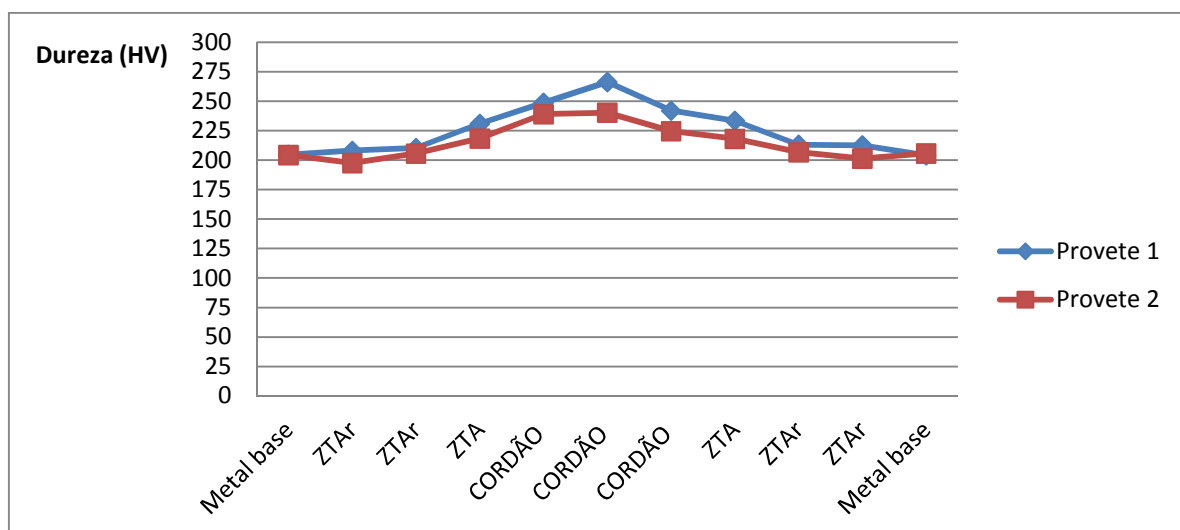


Figura 4. 811 - Dureza Provete 1 vs Provete 2.

Como esperado, em ambos os provetes ocorre um aumento da dureza do material base até à zona fundida (cordão), ocorrendo nesta zona o valor máximo de dureza. Essa variação entre a dureza do cordão e do metal base pode ser originada pela composição química do eléctrodo, promovendo um efeito endurecedor e de têmpera no arrefecimento. No entanto, esse aumento de dureza não acontece de uma forma linear na zona recristalizada (sem crescimento de grão), onde a dureza praticamente se mantém igual à do material de base. No entanto, após entrar na zona termicamente afectada, mais perto do cordão e que esteve sujeita a um gradiente térmico mais intenso, a dureza sofre um acréscimo até atingir o valor máximo já no cordão. Esta variação pode dever-se à incorporação de carbono nos grãos de austenite formados na zona mais próxima do cordão. O aumento da presença do carbono provoca assim no arrefecimento uma maior dureza do material.

Apesar de apresentarem um comportamento semelhante no aumento da dureza desde o metal base até ao cordão as amostras apresentam diferentes valores. Verifica-se que o provete 1 (sem vibração) apresenta ao longo da linha de medição valores de dureza superiores ao provete 2. A diferença entre as durezas obtidas é maior na zona do cordão. Na zona termicamente afectada o aumento da dureza também ocorre, mas em menor proporção. Ou seja, verifica-se que o provete soldado com os ultrassons activos deu origem a um efeito de amaciamento em comparação com a soldadura normal. Esta diminuição da dureza pode dever-se ao facto de a vibração levar a uma redução das tensões residuais originadas na soldadura, embora isso não possa ser comprovado neste trabalho.

4.5.3 Provete 3 vs provete 4

A Figura 4.82 ilustra os valores da dureza ao longo da linha de medição da amostra do provete 3 e 4.

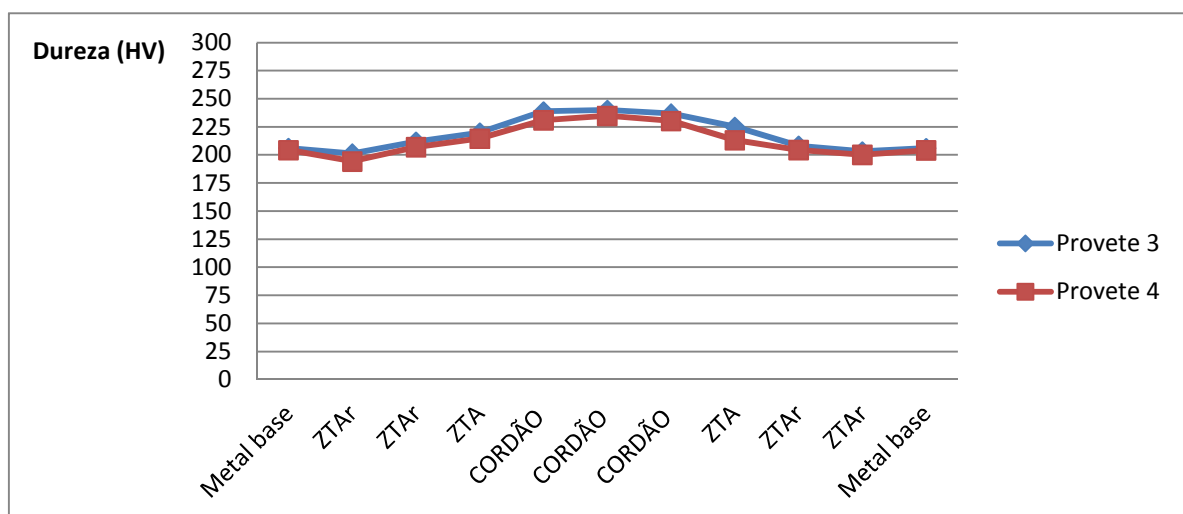


Figura 4. 82 - Dureza Provete 3 vs Provete 4.

Como seria de esperar, em ambos os provetes ocorre um aumento da dureza do material base até à zona do cordão, ocorrendo nesta zona o valor máximo de dureza. Esse aumento linear não se verifica apenas na zona termicamente recristalizada, onde a dureza se mantém praticamente igual à apresentada pelo material de base. A explicação para este fenómeno foi explicitada no sub-capítulo anterior e aplica-se também na presente situação.

Apesar de as amostras do provetes 3 e 4 apresentarem um comportamento semelhante no aumento da dureza desde o metal base até ao cordão, também se verificam diferenças nos valores. Assim, observa-se que o provete 3 (sem vibração) apresenta ao longo da linha de medição valores de dureza ligeiramente superiores ao provete 4. Apesar de haver uma diferença entre os valores da dureza a diferença obtida neste teste pode ser considerada insignificante. A diferença entre as durezas obtidas é maior na zona do cordão, sendo que na zona termicamente afectada o aumento se verifica, mas em menor proporção. Por outro lado, a diferença na zona que sofreu recristalização a diferença praticamente não existe.

A justificação atribuída para esta redução pode ser a mesma apresentada no sub-capítulo anterior (redução das tensões residuais), no entanto, neste teste a diferença obtida é bastante menor.

4.5.4 Provete 5 vs provete 6

Na Figura 4.83, são apresentados os valores da dureza ao longo da linha de medição da amostra do provete 5 e 6.

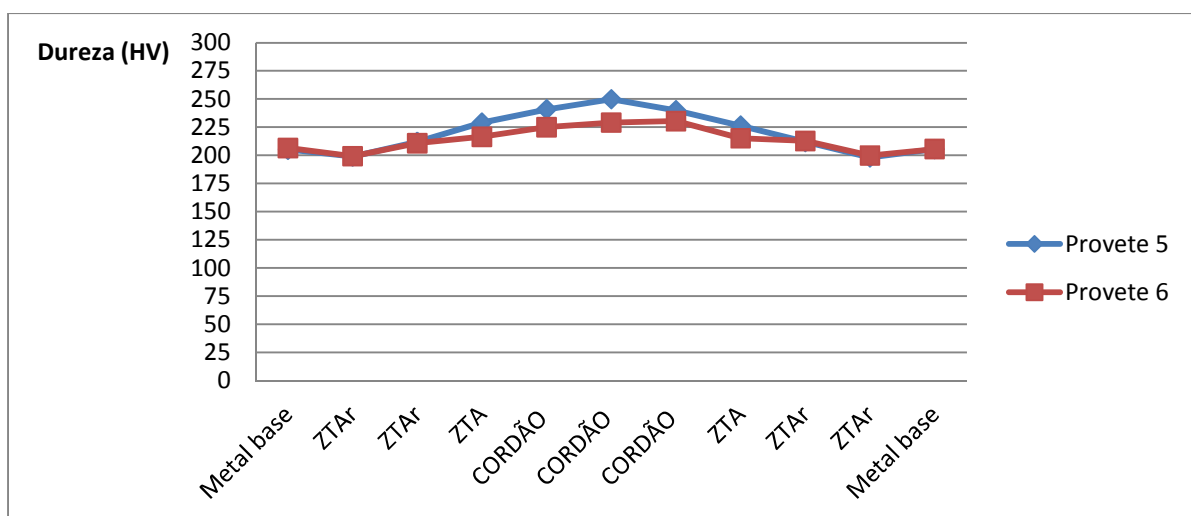


Figura 4. 83 - Dureza Provete 5 vs Provete 6.

Assim como nas amostras descritas anteriormente, o comportamento verificado em ambos os provetes é semelhante. Isto é, ocorreu um aumento da dureza do material base até à zona do cordão, ocorrendo nesta zona o valor máximo de dureza. A linha de medição obtida seguiu um aumento linear do metal base até ao cordão, excepto na zona recristalizada onde a dureza é praticamente igual à apresentada pelo material de base. No entanto, após entrar na zona termicamente afectada mais perto do cordão o valor da dureza foi aumentando até atingir o valor máximo já na zona do cordão.

Apesar de as amostras dos provetes 5 e 6 apresentarem um comportamento semelhante no aumento da dureza desde o metal base até ao cordão, também se verificam diferenças nos valores. É possível observar que o provete 5 (sem vibração) apresenta ao longo da linha de medição valores de dureza ligeiramente superiores ao provete 6. Ou seja, verifica-se novamente que o uso da vibração na soldadura (P6) resultou numa diminuição da dureza. A diferença entre as durezas obtidas é maior na zona do cordão, sendo que na zona termicamente afectada o aumento da dureza também se verifica, mas em menor proporção. A justificação atribuída para esta diminuição da dureza pode ser a mesma apresentada nos sub-capítulos anteriores.

4.5.5 Provete 2 vs Provete 4 vs Provete 6

Comparando os 3 provetes soldados com vibração, ou seja, as diferentes condições de soldadura utilizadas verifica-se que em todos o uso de vibração deu origem a um efeito de amaciamento. No entanto, o efeito de amaciamento no caso do provete 4 (teste 2) apesar de existir pode ser considerado insignificativo. Por outro lado, o provete 2 (teste 1) proporcionou o maior efeito na diminuição da dureza, o que pode ter resultado numa maior redução das tensões residuais originadas na soldadura.

CAPÍTULO V: CONCLUSÕES GERAIS

5.1 CONCLUSÃO

A realização deste estudo sobre o efeito da aplicação de vibração na soldadura, permite retirar as seguintes conclusões:

- Ao nível da pesquisa bibliográfica, conclui-se a existência de alguma resistência em relação à aplicação deste novo conceito. Apesar de ser, potencialmente, um método bastante atractivo para resolver alterações metalúrgicas provocadas pela soldadura, a sua implementação está longe de ser consensual. Uma fixação eficiente à peça de trabalho e evitar a dissipação de energia no momento de transmissão das vibrações é um factor fundamental para uma correcta aplicação do procedimento.
- A análise macrográfica demonstrou que as características geométricas do cordão de soldadura são modificadas com a aplicação de vibração. Os provetes soldados com vibração apresentaram uma extensão da zona termicamente afectada e largura do cordão de menores dimensões. Por outro lado, a penetração que é um parâmetro bastante importante na resistência mecânica do cordão, é visivelmente maior nestes provetes. Ou seja, obteve-se uma maior facilidade de penetração e diminuição da ZTA em relação aos provetes soldados sem vibração. É possível que a vibração consiga melhorar os fenómenos de transferência de metal para peça, facilitando a fusão.
- A análise microestrutural permite inferir que o uso de vibrações não altera os constituintes presentes na microestrutura obtida nas diferentes zonas resultantes da soldadura. Em todas as amostras a microestrutura da zona termicamente afectada e do cordão foi a mesma. Ou seja, uma microestrutura de *Widmanstätten* no cordão, e na ZTA uma zona com uma microestrutura de grãos recristalizados e outra constituída por grãos grosseiros.
- No que diz respeito ao tamanho de grão, verificou-se uma ligeira afinação de grão das amostras soldadas com vibração em relação à soldadura normal. Pode atribuir-se tal facto à energia

fornecida sob a forma de vibração poder dar origem a uma maior facilidade de formação de núcleos. A vibração poderá dessa forma ser considerada um 'agente' auxiliar da nucleação promovendo a formação de um maior número de grãos de menores dimensões.

- Ao nível das microdurezas pode concluir-se que a vibração tem influência sobre este parâmetro. O efeito provocado pelas ondas ultrassónicas deu origem a um amaciamento em relação à soldadura sem vibração. Esta redução da dureza pode ser indicativa de uma redução das tensões residuais provocada pela vibração, no entanto, isso não pode ser concluído neste trabalho pois não foi objecto de estudo.
- Analisando os 3 testes realizados em diferentes condições de soldadura (taxa de deposição de material, velocidade de arrefecimento) conclui-se que o uso da vibração foi benéfico em todos, sendo o seu efeito ligeiramente superior no teste 1 (intensidade mais elevada). Dessa forma pode dizer-se que a vibração deu origem a cordões de soldadura de melhor qualidade.

Este novo conceito trata-se de um método complicado uma vez que, como foi referido a propagação das ondas ultrassónicas não se processa da mesma forma em todos os meios. Isto é, no momento da soldadura existem zonas no estado líquido, outros no estado quase sólido e outras no estado sólido. A propagação das ondas ultrassónicas nestas zonas não é a mesma durante a soldadura. Este fenómeno exige um estudo ainda mais aprofundado de forma a obter uma melhor compreensão e melhores resultados.

Apesar de este trabalho levar a alguma conclusões favoráveis em relação ao uso de vibrações ultrassónicas na soldadura existem vários factores a ter em conta. O efeito obtido neste trabalho pode de certa forma ser considerado mínimo e deve ponderar-se até que ponto será interessante. Além disso, é necessário saber se esse efeito benéfico da vibração pode ser potenciado alterando algumas condições, como por exemplo, resolver um problema que surgiu na soldadura (ausência de massa para efectuar a soldadura). Este problema foi resolvido fixando no próprio provete um grampo de massa, o que poderá ter dissipado alguma energia e diminuído o efeito da vibração. Porém, as conclusões obtidas em relação ao efeito da vibração são interessantes e devem servir como um ponto de partida para uma investigação mais aprofundada.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho surgiu numa tentativa de obter mais informações sobre o efeito de vibrações ultrassónicas na soldadura, sendo que no futuro seria interessante dar-lhe uma continuidade. Desde logo, no que diz respeito à construção de um novo suporte que permitisse resolver o problema da falta de massa no momento da soldadura. Além disso, tendo este trabalho como base de partida será importante:

- Verificar o efeito da vibração no comportamento à fadiga de componentes soldados;
- Efectuar ensaios de tração e tenacidade nos componentes soldados;
- Uso de provetes com geometrias e materiais diferentes;
- Verificar a redução ou não de tensões residuais.

Numa fase mais avançada, após obtenção de mais conclusões seria interessante:

- Avaliar o efeito de diferentes valores de frequência na microestrutura e tamanho de grão, ou seja, verificar os valores de frequência mais significativos para diferentes materiais de forma a obter melhorias;
- Tentar obter uma possível relação matemática entre o tamanho de grão obtido e frequência de vibração utilizada;
- Desenvolver um procedimento que permita uma aplicação deste conceito mais fácil a nível industrial de forma a poder ser realmente implementado.

REFERÊNCIAS

- [1] *Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço - Parte 1.1, Parte 1.5 e Parte 1.8*, Comissão Europeia de Normalização;
- [2] Weman, K., *Welding Processes Handbook*, 2003 Woodhead Publishing Ltd, Abington Hall, Abington Cambridge;
- [3] American Welding Society; *Welding Handbook Volume 2: Welding Processes*, 8ª Edição; 1991; United States of America;
- [4] Robbins, M. E., *Topics in vibratory stress relief of weldments*. VSR Technology, December, 2004;
- [5] Granjon, H., *Bases Metalúrgicas da soldadura*, Publicações da Soldadura Autogénea, 1998;
- [6] McEnerney, J. W., *Recommended practices for PWHT*, USA;
- [7] Crisi G., Mendonça D., *Stress relief of welds by heat treatment and vibration: a comparison between the two methods*. VSR Technology, 2006;
- [8] ASM Handbook, *Welding Brazing and Soldering*; Volume 6, 1998;
- [9] <http://pedesenvolvimento.com/> (Acedido a 9 de Agosto de 2012);
- [10] Kon, S., *Welding Metallurgy Second Edition*; John Wiley and Sons Inc, Hoboken New Jersey, 2003;
- [11] Pires, J. N., Loureiro, A., Bölmsjö, G.; *Welding Robots – Technology, System Issues and Applications*, Springer-Verlag, London, 2006;
- [12] – Seabra, A.V., *Metalurgia Geral*, Volume I II e III, 2ª edição, Lisboa, LNEC, 1995;
- [13] – Linnert, G.E., *Welding Metallurgy*, Volume II, 3rd ed, New York, American Welding Society, 1967;

- [14] Barbosa J., *Introdução à tecnologia da soldadura*, Apontamentos Tecnologia de Fabrico II, Universidade do Minho, 2011;
- [15] <http://www.matter.org.uk/steelmatter/> (Acedido a 9 de Outubro de 2012);
- [16] <http://www.georgesbasement.com/Microstructures> (Acedido a 9 de Outubro de 2012);
- [17] Smith, W.F., *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3rd ed, New York, McGraw-Hill, 1998;
- [18] <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/> (Acedido a 9 de Agosto 2012);
- [19] Burdekin, F.M., *Heat Treatment of Welded Steel Structures*, 2nd Edition, 1969;
- [20] ASM Handbook, *Heat Treating*, Volume 4, 1991;
- [21] Rodrigues, A. M., Silva M.S., *Qualificação no Ensaio por Ultra – Som Nível I.*, Subdivisão de Treinamento, 2000, 23p;
- [22] Andreuccl, R.; “*Ensaio Por Ultra-Som*”; Abende, Julho de 2003;
- [23] <http://www.semboo.com/en/> (Acedido a 9 de Agosto de 2012);
- [24] Walker, C.A., Waddell, A.J., Johnston, D.J., *Vibratory stress relief - an investigation of the underlying processes*, VSR Technology, 1994;
- [25] <http://www.vsrtechnology.net> (Acedido a 9 de Agosto de 2012);
- [26] Nishimura, T., Aoki S., Hiroi, T., Hirai, S., *Reduction of residual stress by ultrasonic vibration during welding*, Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Seoul, Korea, 1999, pp. 255-261;
- [27] Shankar, S. - *Vibratory stress relief of mild steel weldments*. VSR Technology, January, 1982;
- [28] Adams, C. M., Klauba B. B., Berry, J. T. , *Productive applications of mechanical vibrations*, Published by American Society of Materials, VSR Technology, May, 2005;
- [29] Buhler II., and Pfalzgraf, H. C., *Investigations Into the Removal of Internal Stresses in Cast Iron and Steel by Mechanical Vibration and Continued Holding in the Atmosphere*, Verlag, 1962, 56 pp;

- [30] Buhler H., and Pfalzgraf, H. C., *Investigations Into the Reduction of Residual Welding Stresses by Alternating Stress Tests or Mechanical Vibration*, Institute of Machine Tools and Shaping Technology of the University, Hanover, Vol. 16, 1964. No. 5;
- [31] Buhler, H., Pfalzgraf. H. C., *Discussion on the Reduction of Residual Stresses in Workpieces Made of Cast Iron*, Werkstatt und Betrieb, No.2,1964,171, pp. 36-43;
- [32] Buhler, H., Pfalzgraf, H. C., *Relief of Casting Stresses by Jotting: Part 1*, Foundry Trade Journal, 1965, Vol.118, pp. 567-569;
- [33] Brogden, T., *The Relieving of Stress by Vibration - a Critical Review of the Literature*, Machine Tool Research, April. 1969. pp.27-35;
- [34] Cheever, D. L., *Vibrational Conditioning of Metallic Structures*, Battelle Memorial Institute, 1972;
- [35] Dvornak, M.J., Frost, R.H., Olron, D.L., *Influence of solidification kinetics on aluminium weld grain refinement*, Welding Journal, Vol. 70, No. 10:271, 1991;
- [36] Qinghua, L., Ligong, C., Chunzhen, N., *Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning*, Materials Science and Engineering A 457: 246–253,2007;
- [37] Watanabe, T., Nakamura, H., *Solidification control of austenitic stainless steel weld metal by electromagnetic stirring*, National Research Institute for Metals, Japan Welding Soc., Vol. 21, No.2:37-43, 1990;
- [38] Pucko B., Gliha V., *Charpy Toughness Of Vibrated Microstructures*, Original Scientific Paper - Izvorni znanstvenirad, METALURGIJA 44 :103-106,2005;
- [39] Aoki, S., Hirai, S., *Reduction of residual stress by ultrasonic surface vibration*. Published in the Japanese Society of Mechanical Engineers, VSR Technology, 1995;
- [40] <http://www.cpsctec.com.br/> (Acedido a 9 de Agosto 2012);
- [41] Prakash, J., Tewari, S.P., Verma, A., *Vibratory stress, solidification and microstructure of weldments under vibratory welding condition-a review*. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 3 No. 6, June 2011, pp. 5215-5220;

- [42] Klauba, B. – *French oil mill machinery co.* VSR Technology;
- [43] Klauba, B. – *Cnd incorporated.* VSR Technology;
- [44] Klauba, B. – *The rose corporation.* VSR Technology;
- [45] Meireles, J. - *Dinâmica de Estruturas.* Apontamentos de Concepção de Estruturas II, Universidade do Minho, 2011;
- [46] Claxton, R. - *Vibratory Stress Relief – An Authoritative Overview*, Material Australia, February, 1998;
- [47] Horsey, J.S., *Vibratory stress relieving – its advantages as an alternative to thermal treatment*, December, 2004;
- [48] Adams, C. M., Klauba, B. B, - *Productive applications of mechanical vibrations*, Presented at the American Society Of Mechanical Engineers, VSR Technology, November, 1982;
- [49] <http://www.ramada.pt> (Acedido a 16 de Agosto 2012);
- [50] <http://www.mastersonics.com/> (Acedido a 10 de Outubro 2012);

ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO AÇO

RAMADA

F. RAMADA, AÇOS E INDÚSTRIAS, S.A.

RELATÓRIO DE ENSAIO - 2.2

ORIGINAL

DE ACORDO COM EN 10204 : 2004 CERTIFICADO N° 730141
 ACCORDING TO CERTIFICATE N°

N/PEDIDO N° 367969 / 5
 OUR ORDER N°

V/PEDIDO N° PESSOAL
 YOUR ORDER N°

0/32000422 QUANTIDADE (kg) 21,400 ORDEM DE FABRICO N° ----- DATA 14/06/2012
 QUANTITY (kg) WORK N° DATE

DESIGNAÇÃO PRODUTO REC 100XB
 QUALITY

MATERIAL N° 1.0122 EN 10277-2
 WERKSTOFF N°

COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION (%)

N° VAZAMENTO HEAT N°	LOTE BATCH	C	Mn	P	S
516834	A12	0.090	0.560	0.017	0.015

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES

N° VAZAMENTO HEAT N°	LOTE BATCH	%A (Lo=5do)	Rm (MPa)	Rp0,2 % (MPa)
516834	A12	9	519	451

OUTROS ENSAIOS / OTHER TEST RESULTS

N° VAZAMENTO HEAT N°	LOTE BATCH

OBSERVAÇÕES / OBSERVATIONS

Estado de Fornecimento:

Confirmamos que os produtos enviados estão conforme a vossa encomenda e que os dados do documento original foram transcritos para este documento de inspecção.

VALIDADDO POR:

We hereby certify that the materials included are consistent with your order and the original document data were transcript to this inspection document.

(Direcção da Qualidade)

D2209-1

Processado e impresso por computador, e é válido sem assinatura.

Sede: OVAR - PORTUGAL
 Cova do Frade - Apartado 10
 3884-004 OVAR
 Tel.: 256 580 400
 Fax: 256 580 500 - 256 580 410 - 256 580 510

LISBOA
 Vila Amélia, Lote 288
 Cabanas
 2950-805 Quinta do Anjo
 Tel.: 21 288 89 00 (RDIS)
 Fax: 21 288 89 16 / 17

PORTO
 Zona Industrial da Maia I SECTOR VII
 Trav. Eng. Nobre da Costa, N.º 75
 4475-125 MOREIRA MAIA
 Tel.: 22 943 03 03
 Fax: 22 943 03 04

ÁGUEDA
 Lugar do Brejo
 3750-711 RECARDARES
 ÁGUEDA
 Tel.: 234 600 030
 Fax: 234 600 034

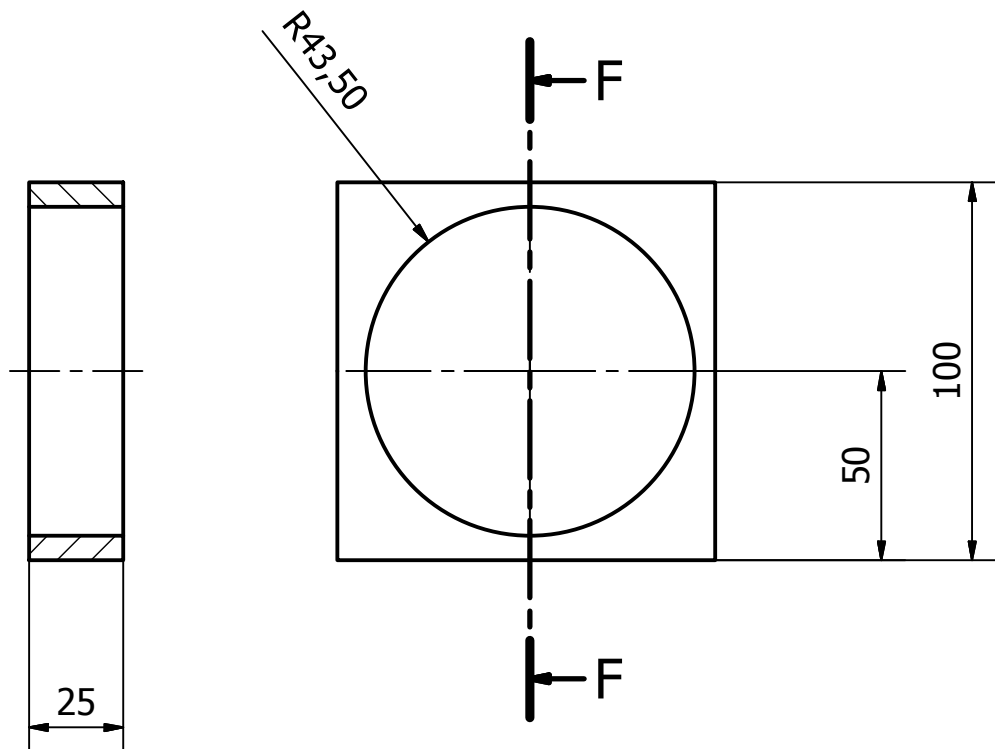
MARINHA GRANDE
 Estrada Pero Neto
 2430-902 MARINHA GRANDE
 Tel.: 244 575 680
 Fax: 244 575 688

BRAGA
 Av.º Eng.º José Rolo, Lote F1
 Parque Industrial de Celsrds
 4705-414 CELEIROS BRG
 Tel.: 253 605 350
 Fax: 253 605 353

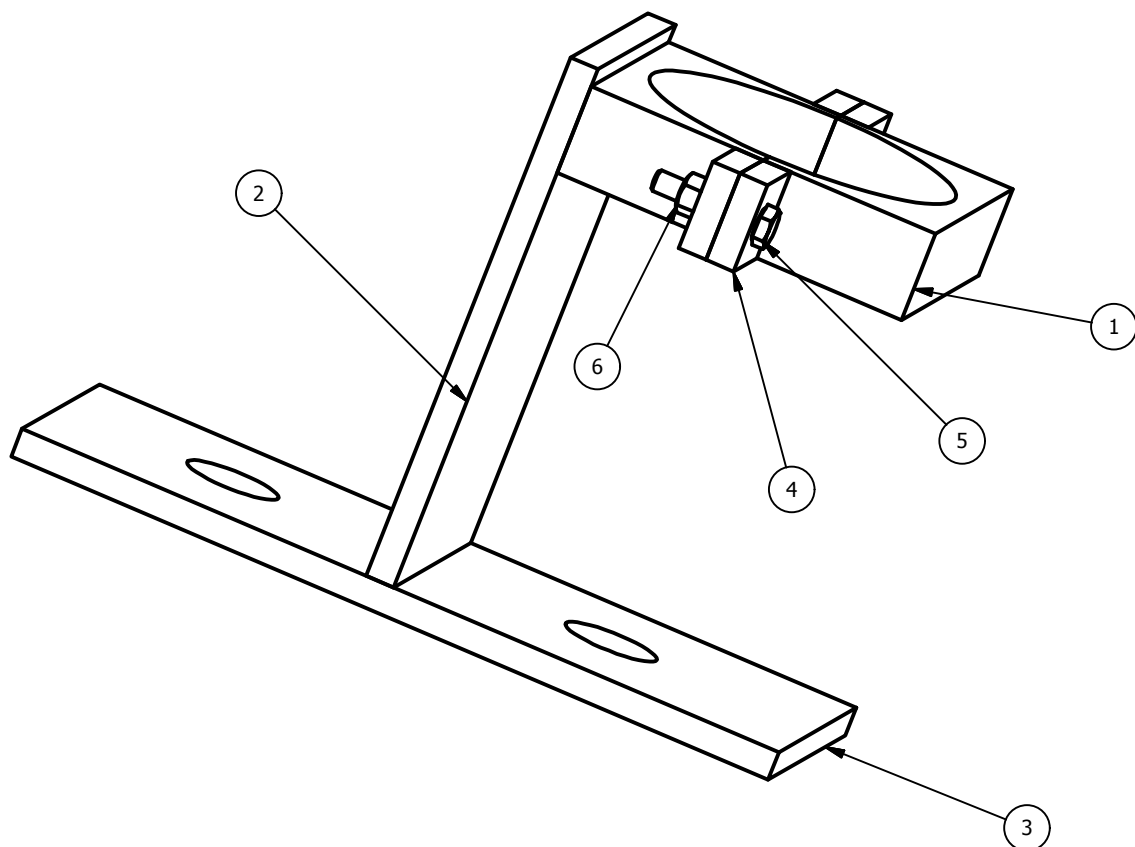
E-mail: aces.ovar@ramada.pt www.ramada.pt Registo na Conservatória de Ovar N.º 151 - Contribuinte N.º PT 500 183 844 - Capital: 15.000.000 Euros



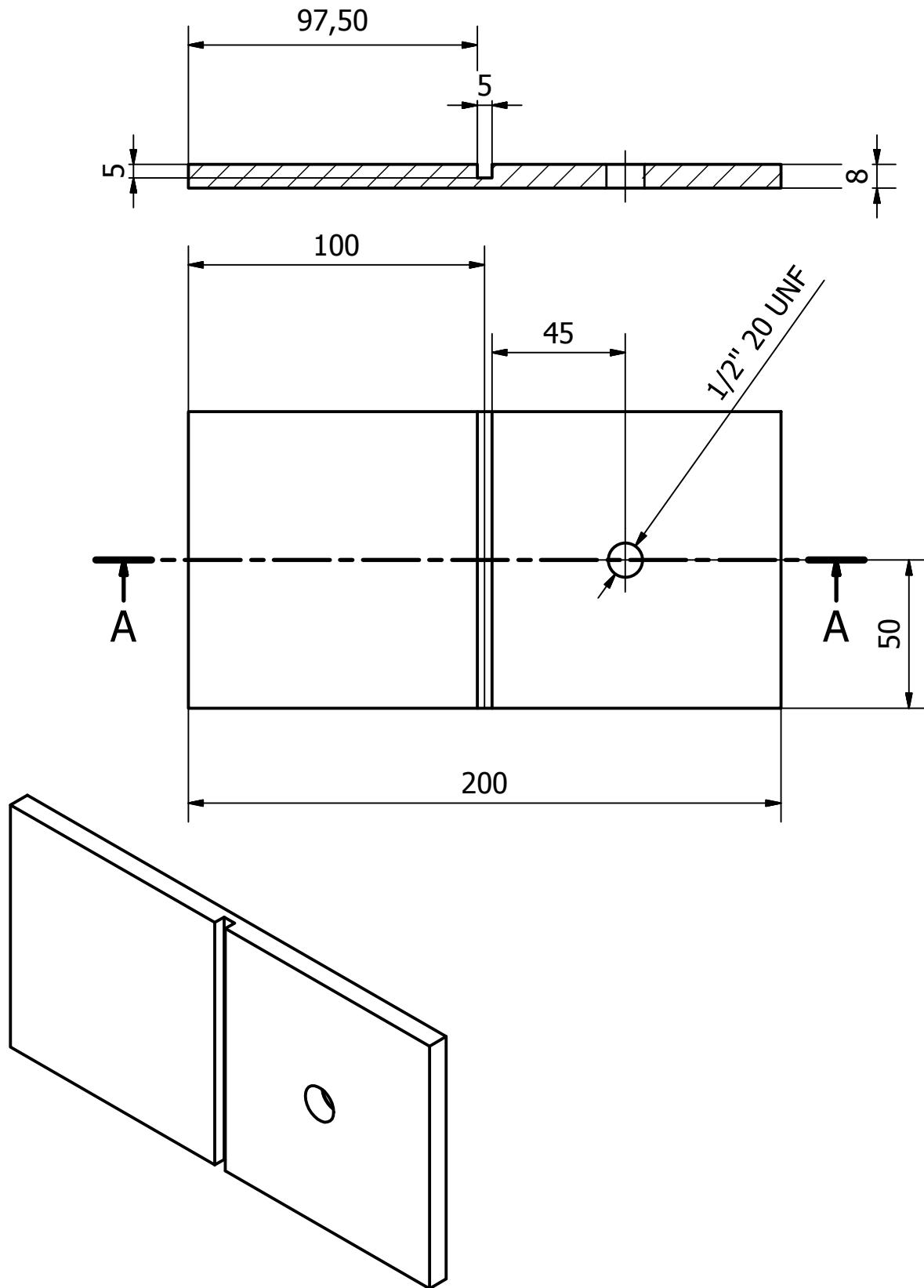
ANEXO B – DESENHOS TÉCNICOS



Projectou			Universidade do Minho Dep. Engenharia Mecânica	Dissertação	
Desenhou				Miguel Meira 50160	
Copiou					
Verificou					
Escala	Abraçadeira				
1:2					
Toler.					
				Substitui	
				Substitui por	



Lista de peças			
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	2	Meia abraçadeira	
2	1	Base 1	
3	1	Base 2	
4	4	Aba de aperto	
5	2	ISO 4014 - M6 x 30	Parafuso de cabeça sextavada
6	2	ISO 4034 - M6	Porcas sextavadas
Projectou		Universidade do Minho Dep. Engenharia Mecânica	Dissertação
Desenhou			
Copiou			Miguel Meira 50160
Verificou			
Escala	Suporte		
1:2			
Toler.			
			Substitui
			Substitui por



Projectou			Universidade do Minho Dep. Engenharia Mecânica	Dissertação	
Desenhou				Miguel Meira 50160	
Copiou					
Verificou					
Escala	Provete				
1:2					
Toler.					
				Substitui	
				Substitui por	

ANEXO C - MICROGRAFIAS

Ao longo deste anexo são apresentadas mais algumas micrografias retiradas e utilizadas para a análise das diferentes zonas de soldadura dos provetes, servindo como um complemento da informação apresentada e discutida anteriormente.

C.1 PROVETE 1

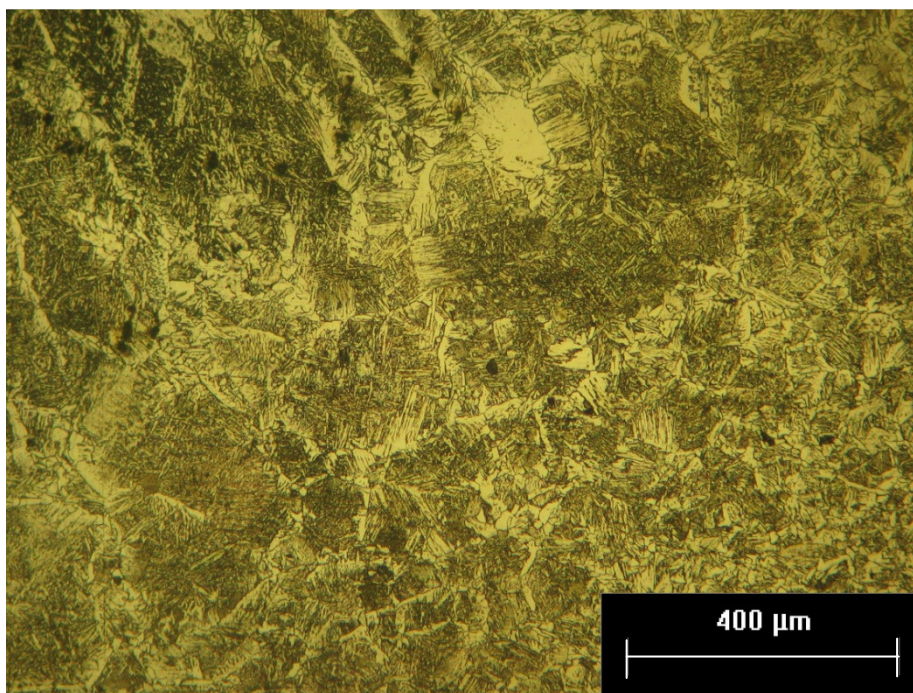


Figura C. 1 - Zonas de soldadura provete 1.

C.2 PROVETE 2

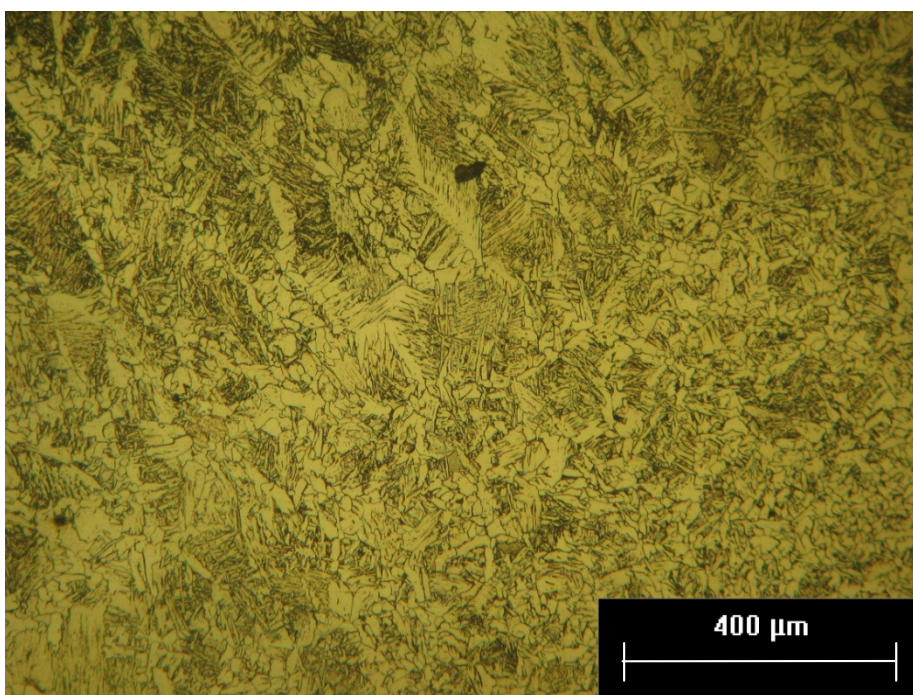


Figura C. 2 - Zonas de soldadura provete 2.

C.3 PROVETE 3

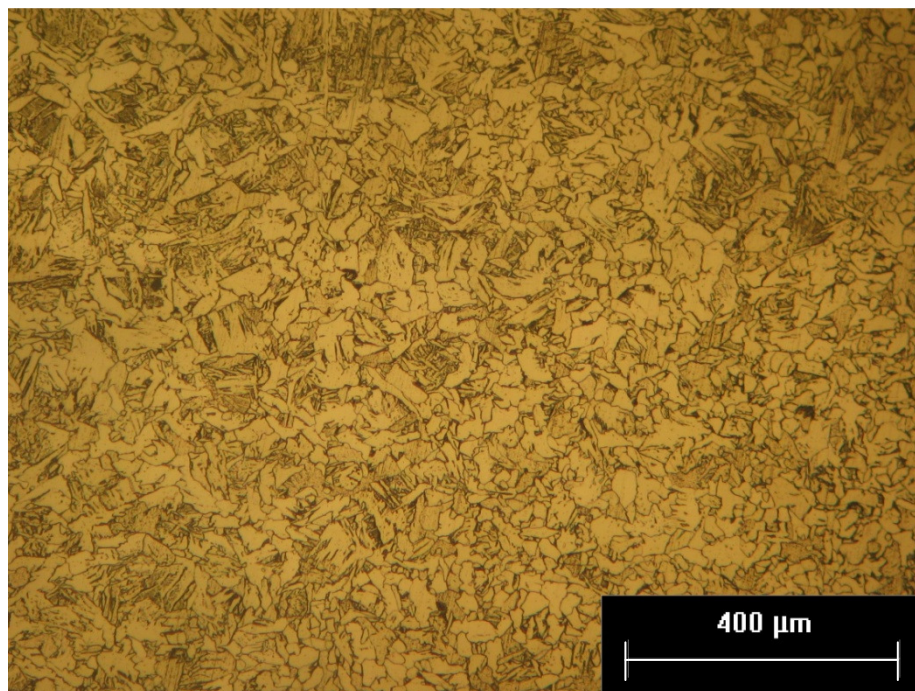


Figura C. 3 - ZTA provete 3.

C.4 PROVETE 4

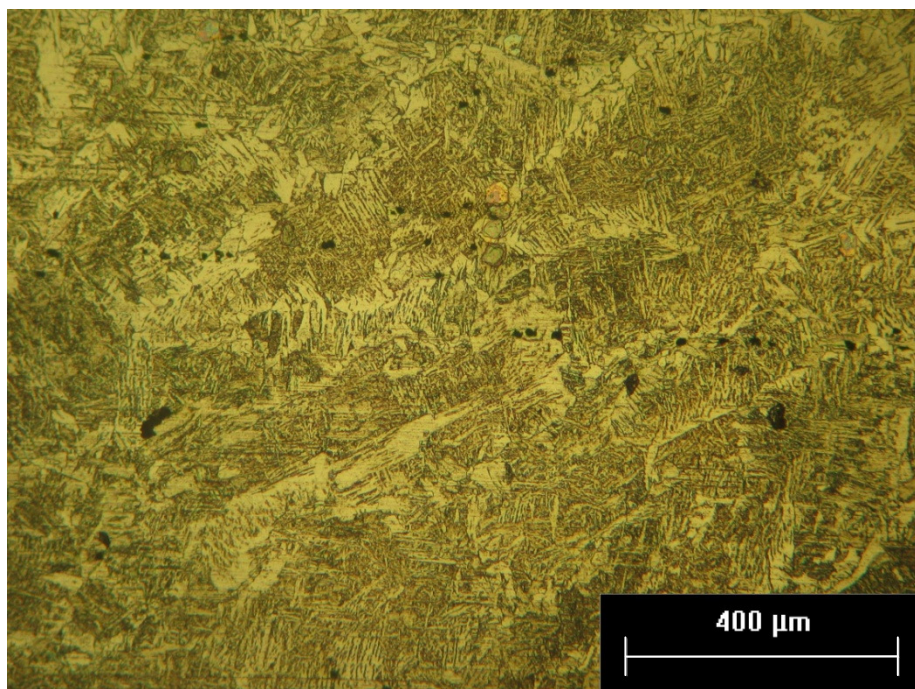


Figura C. 4 - Microestrutura do cordão provete 4.

C.5 PROVETE 5

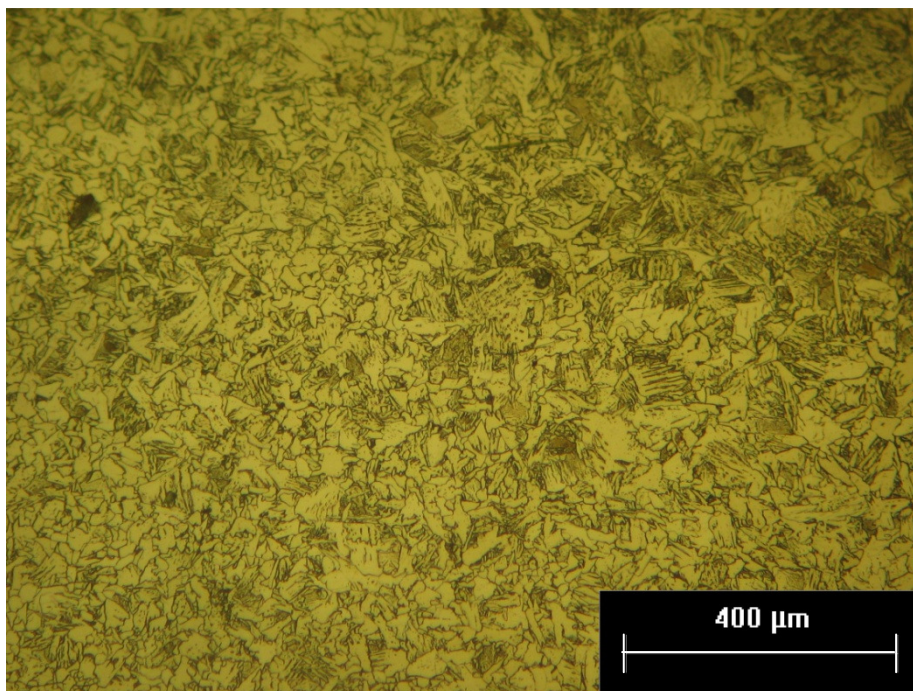


Figura C. 5 - Transição da ZTA provete 5.

C.6 PROVETE 6

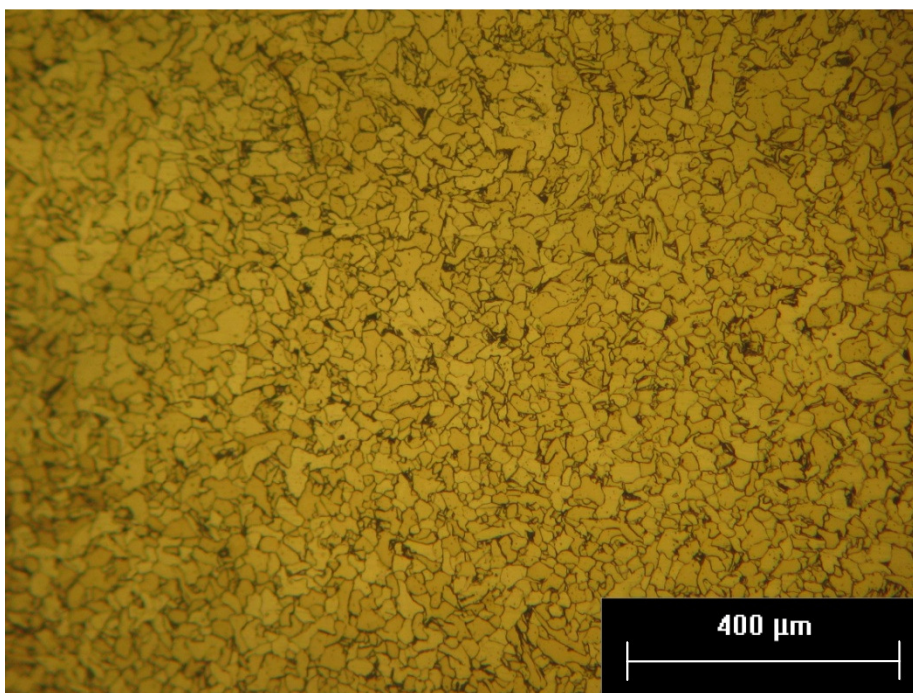


Figura C. 6 - ZTA provete 6.