



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Ligação por Resistência Elétrica Contínua de Chapas Finas em Aço, Alumínio e Zinco

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Projeto Mecânico/Sistemas de Produção

Autor

Tiago Miguel Mira Aguiar

Orientadora

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Júri

Presidente Professor Doutor **Altino de Jesus Roque Loureiro**
Professor Associado c/Agreg. da Universidade de Coimbra

Vogais Professora Doutora **Dulce Maria Esteves Rodrigues**
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão
Investigador do CEMUC

Professor Doutor **António Mário Henriques Pereira**
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Engenheiro **António Manuel Correia Dias**
Engenheiro da Empresa JAMARCOL

Colaboração Institucional



JAMARCOL

Coimbra, julho, 2014

“Quanto mais aumenta o nosso conhecimento, mais evidente fica a nossa
ignorância”

John F. Kennedy

Aos meus pais

Agradecimentos

A realização desta tese é o culminar de mais uma etapa da minha vida. Sem o apoio, incentivo e confiança de certas pessoas nada disto se tornaria realidade, às quais eu estarei eternamente grato.

À Professora Doutora Dulce Rodrigues, pela orientação, pela exigência, pelo saber que transmitiu, e, principalmente, pela paciência, pelo interesse sistemático por tudo o que estava a ser feito, e pela disponibilidade imediata e a tempo inteiro.

Ao Doutor Carlos Leitão, pela prontidão e paciência em ajudar com qualquer dúvida, pelos ensinamentos científicos e laboratoriais, e pela boa disposição sempre demonstrada.

À Mestre Maria Inês Costa, pela boa disposição, pelo apoio nas tarefas laboratoriais, pela partilha de conhecimentos, e pela disponibilidade imediata em ajudar.

Aos colegas de tese e de laboratório, pela boa disposição e entreaajuda.

Aos meus pais e avós, por serem os principais responsáveis pelo que sou hoje e por aquilo que atingi, pela confiança depositada em mim, pelas excelentes condições que me deram para poder crescer e estudar, pelo incentivo e apoio incondicionais e pela educação que me deram.

Aos meus familiares, o apoio e incentivo dados ao longo da vida, em especial ao Tio Raúl, pela ajuda, paciência e pela partilha de conhecimentos ao longo do curso, e à minha irmã, por tudo o que representa para mim.

À Inês, pelo companheirismo dos últimos anos e pelas alegrias.

Aos amigos, pela amizade, companheirismo e animação.

À empresa JAMARCOL, pela colaboração e pela execução das soldaduras.

A todos,

O meu mais sincero Obrigado.

Resumo

Nesta tese, são analisadas a qualidade das soldaduras em chapas finas sobrepostas, obtidas pelo processo de soldadura por resistência elétrica contínua, vulgarmente designado por soldadura por roletes. O princípio de funcionamento deste processo consiste na passagem de corrente elétrica através das chapas a soldar, que, devido à sua resistência elétrica, vão aquecer e fundir-se. As soldaduras foram realizadas em chapas similares de uma liga de zinco *zintek*, liga de alumínio 5754-H22 e aço galvanizado DX51D. Foi ainda realizada uma soldadura dissimilar em aço-zinco.

Com o objetivo de avaliar a suscetibilidade à formação de defeitos em soldaduras por resistência de vários materiais base, com características químicas e físicas distintas, foram realizadas soldaduras numa gama alargada de condições para três metais base: Alumínio, Aço e Zinco. Os parâmetros de soldadura foram variados de modo a tentar minorar a ocorrência de defeitos macroscópicos. A qualidade das ligações produzidas foi avaliada através da observação das microestruturas, e da realização de ensaios de dureza e ensaios de tração.

A análise das soldaduras em aço revelou ausência de fusão na zona de soldadura. Contudo, em algumas soldaduras a ligação resultou de um processo de soldadura por pressão a quente, e noutras por uma ligação zinco-zinco. Todas as soldaduras em aço revelaram um aumento de dureza na zona de soldadura, devido à formação de estruturas frágeis.

As soldaduras da liga de alumínio revelaram, em alguns casos, uma entrega térmica excessiva, responsável pela existência de projeções de material e zonas fundidas em toda a espessura, e noutros casos uma entrega térmica insuficiente que levou à obtenção de soldaduras por pressão a quente. Para estas soldaduras foi notada uma redução de dureza na zona de soldadura, que revelou ser independente dos parâmetros utilizados, e foram detetados defeitos, tais como poros e fissuras.

Na liga de zinco, as soldaduras obtidas apresentaram a formação de um *nugget*, com indícios de fusão. Contudo, foram observadas porosidades e fissuras que, pelos ensaios de tração, revelaram comprometer o bom desempenho da ligação.

A soldadura dissimilar de aço-zinco revelou defeitos microscópicos importantes devido a uma escolha inadequada de parâmetros, que levaram à fusão e formação de um *nugget* no lado do zinco, sem qualquer alteração microscópica no aço. A ligação entre o aço e o zinco, na soldadura dissimilar, resultou da ligação do zinco à camada de revestimento, do aço galvanizado, também ela em zinco.

Palavras-chave: [Soldadura por roletes], [Aço galvanizado], [Liga de zinco], [Liga de alumínio]

Abstract

This thesis analyses the weld quality of thin sheets in a lap joint, produced by resistance seam welding. The basic principle of the process is the passage of electric current through the sheets to be welded, which will heat up and melt, due to their electrical resistance. The welds were made in similar sheets of a zinc alloy *zintek*, aluminium alloy 5754-H22, and a galvanized steel DX51D. It was also made a dissimilar weld of steel-zinc.

In order to evaluate the susceptibility to the formation of defects in resistance welding of different base materials, with different physical and chemical characteristics, welds were performed in a wide range of conditions, for three base metals: Aluminium, Steel and Zinc. The welding parameters were varied to try to reduce the occurrence of macroscopic defects. The quality of the welds was evaluated by microstructural observations, and hardness and traction tests were performed.

It was not observed melted material, on the steel welds. However, in some welds, the connection was established by hot pressure, and in another, by a zinc-zinc join. All the steel welds revealed an increase on hardness at the weld zone, due to formation of brittle structures.

The aluminium welds revealed, in some cases, an excessive heat generated, which was responsible for the material projections and for the melted zone in the whole thickness, and in another cases, hot pressure welds were obtained because of the low heat generated. In these welds, there was a decrease in hardness, in the welded zone, which revealed to be independent of the used parameters, and defects were found, like cracks and porosities.

In the welds produced in the zinc alloy, it was visualized a *nugget* formation. However, cracks and porosities were observed, which, by the traction tests, revealed to compromise the performance of the join.

In the dissimilar weld of steel-zinc were observed important microscopically defects, due to an inappropriate choose of parameters, which caused fusion and a *nugget* formation, on the zinc side, without any microscopically modification in steel. The connection between steel and zinc, in the dissimilar join, resulted from the connection between zinc and zinc layer of the galvanized steel.

Keywords [Resistance seam welding], [Galvanized steel], [Zinc alloy],
[Aluminium alloy]

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. Soldadura por Resistência Elétrica por Roletes	3
2.1.1. Descrição do Processo	4
2.1.2. Sequência da Soldadura.....	8
2.1.3. Equilíbrio Térmico	9
2.1.4. Parâmetros de Soldadura	10
2.1.5. Análise da Soldabilidade dos Materiais por Resistência.....	14
2.1.6. Análise de Defeitos em Soldadura por Resistência.....	16
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1. Material Base	19
3.2. Soldaduras.....	19
3.3. Análise Metalográfica.....	21
3.4. Caracterização Mecânica	22
3.4.1. Ensaios de Dureza	22
3.4.2. Ensaios de Tração.....	23
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	25
4.1. Análise Metalográfica.....	25
4.1.1. Inspeção Visual	25
4.1.2. Análise Microscópica	26
4.2. Caracterização Mecânica	40
4.2.1. Ensaios de Dureza	40
4.2.2. Ensaios de Tração.....	46
5. CONCLUSÕES	49
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO A	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes tipos de soldaduras por roletes: (a) Soldadura por pontos sobrepostos; (b) Soldadura por pontos individuais; (c) Soldadura contínua (adaptação do original (Groover M., 2010)).....	4
Figura 2 - Metodologias de soldadura por roletes: (a) Eléttodos alinhados verticalmente; (b) Um eléctrodo circular e uma guia; (c) Dois eléctrodos circulares posicionados do mesmo lado da chapa e uma guia no lado oposto; (d) Dois pares de eléctrodos alinhados verticalmente.	5
Figura 3 – Variação da resistência na junta a soldar e formação do <i>nugget</i>	6
Figura 4 – Representação de um ponto de soldadura.	7
Figura 5 – Estruturas da zona soldada e processos de solidificação: (a) dissipação de calor uniforme pelos eléctrodos e pelas chapas; (b) maior dissipação na direção dos eléctrodos; (c) maior dissipação pelas chapas (adaptação do original (Zhang H. e Senkara J., 2006)).	7
Figura 6 – Sequência da soldadura por roletes.	8
Figura 7 – Equilíbrios térmicos: (a) distribuição térmica equilibrada; (b) distribuição térmica não equilibrada.	9
Figura 8 – Parâmetros adicionais em alguns equipamentos de soldadura: rampa para a corrente e tratamento térmico.....	14
Figura 9 – Utilização de um fio de cobre na superfície do eléctrodo (Rukkii, 2014).	15
Figura 10 – Esquema do efeito de redução de espessura na soldadura por roletes.	16
Figura 11- Porosidades no <i>nugget</i> : (a) resulta da expulsão de material – aço (Zhang H. e Senkara J., 2006); (b) resulta de bolhas gasosas (poros maiores) e contração de material na solidificação (poros menores) – liga de alumínio 5182 (Rashid M. et al, 2011).....	18
Figura 12 – Representação esquemática dos parâmetros de soldadura.	20
Figura 13 – Esquemática da linha de indentações: chapa superior (Linha 1); chapa inferior (Linha 2); interface das duas chapas (Linha 3).	23
Figura 14 - Esquema da geometria e dimensão dos provetes sujeitos ao Ensaio de Tração.	24
Figura 15 - Equipamentos dos Ensaios de Tração: (a) Máquina de Tração <i>Instron Electropuls</i> ; (b) Extensómetro Ótico <i>Gom Aramis 5M</i>	24
Figura 16 - Secção transversal das amostras de aço antes de ataque químico: (a) amostra 2; (b) amostra 3; (c) amostra 20.	26
Figura 17 - Microestrutura da amostra 3: (a) secção longitudinal; (b) zinco na interface das chapas.	26
Figura 18 - Ligação zinco-zinco na interface das chapas: (a) amostra 3; (b) amostra 20. ..	27

Figura 19 - Microestrutura da soldadura 3: (a) Material base; (b) Zona de soldadura.	27
Figura 20 – Microestrutura da amostra 2: (a) secção transversal; (b) detalhe da zona 1; (c) detalhe das zonas 2 (200x) e 3 (500x).....	28
Figura 21 – Microestrutura da amostra 2: (a) secção longitudinal; (b) detalhe da zona 1..	28
Figura 22 – Representação esquemática dos parâmetros de soldadura para os três aços. ..	30
Figura 23 - Microestrutura da amostra 10: (a) secção longitudinal; (b) detalhe das zonas 1 e 2 (200x); (c) detalhe da zona 3 (200x).....	31
Figura 24 - Microestrutura da amostra 5: (a) secção longitudinal; (b; c) secções transversais das zonas 1 e 2; (s; e) detalhe das zonas 3 e 4 (200x).....	31
Figura 25 - Microestrutura da amostra 9: (a) secção longitudinal; (b) zona de ligação das chapas; (c) zona não ligada.	32
Figura 26 – Microestrutura da amostra 10: (a) secção transversal; (b) detalhe do MB; (c) detalhe da ZTA; (d) detalhe 1 (200x).....	33
Figura 27 – Microestrutura da amostra 9: (a) secção transversal; (b) detalhes do MB; (c) detalhe da ZTA; (d) detalhe 1.	34
Figura 28 – Representação esquemática dos parâmetros de soldadura para as três amostras de alumínio.....	36
Figura 29 - <i>Nugget</i> e dimensões dos metais base das duas amostras de zinco: (a) Zinco 14; (b) Zinco 15.....	37
Figura 30 - Microestrutura da secção transversal da amostra 14.	38
Figura 31 - Microestrutura da secção longitudinal da amostra 14.	38
Figura 32 - Secção transversal da amostra 16: (a) antes de ataque químico; (b) após ataque químico.....	39
Figura 33 - Secção longitudinal da amostra 16 e detalhe da porosidade.	40
Figura 34- Gráficos dos perfis de dureza das três amostras de aço.....	41
Figura 35 – Efeito da variação da quantidade de carbono e de dureza na microestrutura de aços (Costa M., 2013).	42
Figura 36 - Gráficos dos perfis de dureza das três amostras de alumínio.....	43
Figura 37 - Gráficos dos perfis de dureza das duas amostras de zinco.....	45
Figura 38 - Gráfico do perfil de dureza da amostra de aço-zinco.	45
Figura 39 – Gráficos das curvas Força/Deslocamento das amostras de aço: (a) Ensaio do Tipo C; (b) Ensaio do Tipo S.	47
Figura 40 – Mapa de deformações da amostra 3 - Ensaio do Tipo S.....	47
Figura 41 - Gráficos das curvas Força/Deslocamento da amostra 15 de zinco: Ensaio do Tipo C e do Tipo S.	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos metais base (% Wt.).	19
Tabela 2 - Parâmetros de soldadura utilizados.	20
Tabela 3 - Composições químicas dos reagentes: <i>Poulton's</i> modificado (Leal R., 2011), <i>Nital</i> (Committee A. H., 2004) e Reagente Zinco (Zipperian D., 2011).....	22
Tabela 4 - Inspeção visual das soldaduras.....	25

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

e - Espessura da chapa (Equação da proporção entre largura do eletrodo e espessura da chapa)

d - Tamanho de Grão (Equação de Hall-Petch)

d_1 - Largura do Eletrodo (Equação da proporção entre largura do eletrodo e espessura da chapa)

d_{HV}^2 - Média Aritmética do Comprimento das Diagonais (Equação de Dureza)

H_0 - Constante (Equação de Hall-Petch)

H - Dureza (Equação de Hall-Petch)

HV - Dureza Vickers (Equação de Dureza)

I - Intensidade de corrente (Equação do Efeito de Joule)

k_h - Constante (Equação de Hall-Petch)

P - Carga do Indentador (Equação de Dureza)

Q - Calor Gerado (Equação do Efeito de Joule)

R - Resistência Elétrica (Equação do Efeito de Joule)

$R_{1,2,3,4,5}$ - Resistência Elétrica (Equação da Soma de Resistências)

R_{total} - Resistência Elétrica Total (Equação da Soma de Resistências)

t - Duração da Passagem de Corrente (Equação do Efeito de Joule)

Siglas

ASM – American Society for Metals

CEMUC – Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIC – Digital Image Correlation

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FSW – Friction Stir Welding

MB – Material Base

RA – Rampa de Aquecimento

TD – Tempo de Descida

TM – Tempo de Manutenção

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

1. INTRODUÇÃO

A ligação de metais por soldadura já tem muitos anos de existência e desenvolvimento, tendo começado com a soldadura por forjamento. A descoberta da eletricidade permitiu a invenção de vários processos, como por exemplo as tecnologias de soldadura por resistência elétrica e todas as variantes de soldadura por arco elétrico (Amada Miyachi, 2014).

A soldadura por resistência elétrica é um processo termoelétrico, no qual é gerado calor na interface de duas chapas sobrepostas, devido à resistência à passagem de corrente elétrica na interface. Comparativamente a outros processos de soldadura, a soldadura por resistência elétrica é um método de ligação rápido, não necessita de materiais de adição, utiliza baixas voltagens, não comprometendo a segurança do operador, e pode ainda ser considerado um processo limpo e amigo do ambiente (Miyachi Unitek, 2013). Das variantes deste método, é destacada a soldadura por resistência por pontos que é um dos processos mais utilizados atualmente, sendo aplicado, por exemplo, na carroçaria dos automóveis, onde são feitos milhares de pontos de soldadura. Esta tese incide no estudo de soldaduras produzidas por um processo de soldadura por resistência elétrica contínua, vulgarmente designado por Soldadura por Roletes, que é em tudo semelhante ao processo de resistência por pontos, com a diferença de fazer soldaduras contínuas para aplicações que requeiram estanquicidade. Das variantes da soldadura por resistência elétrica, a grande maioria das informações e artigos escritos são direcionados para a soldadura por resistência por pontos, não existindo, atualmente, muita informação sobre a soldadura por roletes.

Para o presente estudo, foram realizadas soldaduras por resistência elétrica contínua, nas instalações da empresa JAMARCOL, em configuração de junta sobreposta, de chapas finas similares de aço, alumínio e zinco, e uma ligação dissimilar de aço-zinco. O aço, com designação DX51D, é um aço galvanizado com revestimento em zinco Z200. A liga de alumínio utilizada, uma liga não tratável termicamente da série 5754-H22, apresenta boa resistência à corrosão, sendo utilizada na indústria automóvel e em equipamentos de pesca (aalco, 2014). A liga de zinco, com a designação de *zintek*, é vulgarmente utilizada em aplicações de arquitetura (coberturas e revestimentos) (Zintek,

2014). Para todos os metais base foram variados os parâmetros de soldadura, de modo a relacioná-los com a qualidade das soldaduras produzidas. O presente trabalho incidiu na análise da qualidade das soldaduras, e teve início já com as soldaduras realizadas, sendo que, o autor desta tese não observou o processo de realização das mesmas, nem fez a seleção dos parâmetros utilizados.

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos, sendo feito um enquadramento do tema no primeiro capítulo. O estado de arte é apresentado no capítulo dois, onde os processos de soldadura por resistência elétrica são descritos, com especial ênfase para a soldadura por roletes, e são fornecidas algumas bases, relativas à caracterização mecânica e metalográfica das ligações, necessárias para a melhor compreensão de resultados apresentados neste trabalho. No capítulo três é feita uma breve descrição dos materiais, métodos e equipamentos utilizados sendo, no capítulo quatro, mostrados e analisados os resultados obtidos na análise metalográfica, nos ensaios de dureza e nos ensaios de tração. No capítulo cinco, são apresentadas as conclusões do trabalho, e no capítulo 6, são indicadas sugestões para trabalhos futuros, que possam vir a ser realizados neste tema. Por fim, no Anexo A, são incluídas ampliações de algumas imagens presentes ao longo do texto, com o intuito de elucidar o leitor na visualização das mesmas.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Soldadura por Resistência Elétrica por Roletes

O processo de soldadura por resistência elétrica é um dos procedimentos de soldadura mais antigos (Weman K., 2003), tendo sido descoberto em 1877 por Elihu Thomson. Contudo, apenas em 1925 este método começou a ser desenvolvido e utilizado, sendo atualmente um dos processos com maior utilização industrial (Santos O. e Quintino L., 1993). Este processo assenta na passagem de corrente elétrica através das chapas a soldar, posicionadas em configuração de junta sobreposta. A passagem de corrente elétrica promove a fusão dos materiais base, devido à geração de calor por efeito de Joule, gerando deste modo a soldadura no ponto de contacto das chapas.

Na atualidade o processo de soldadura por resistência elétrica apresenta várias variantes destacando-se: a soldadura por pontos; a soldadura por roletes; a soldadura por projeção; a soldadura topo-a-topo e a soldadura por *flash* (Weman K., 2003).

O processo de soldadura por resistência elétrica contínua, que será designado no decorrer deste texto apenas por soldadura por roletes, resume-se a uma passagem de corrente elétrica de grande densidade através das peças a unir, que, devido às suas resistências elétricas, aquecem e fundem-se. Na literatura há autores que enquadram este processo de soldadura nos processos por fusão, como por exemplo (Committee A. H., 1993), ou nos processos de soldadura em estado sólido, (ISF, 2003).

A soldadura por roletes permite velocidades de soldadura elevadas, é eficiente, não poluente e não necessita de material de adição (Weman K., 2003). Contudo, a espessura máxima do conjunto das duas chapas a ligar é limitada a 6mm (Rukkii, 2014). Geralmente é utilizado em aplicações em que se pretende obter estanquicidade, tal como depósitos de combustível de automóveis, painéis de escape, reservatórios de água e latas (Committee A. H., 1993)

2.1.1. Descrição do Processo

O processo de soldadura por roletes é aplicado na soldadura de chapas metálicas sobrepostas (Santos O. e Quintino L., 1993). Tal como se mostra na Figura 1 e Figura 2.a, geralmente são utilizados dois eléctrodos de forma circular que se encontram em lados opostos das chapas a ligar, estando alinhados verticalmente um com o outro. Estes eléctrodos exercem pressão sobre as chapas, mantendo-as unidas, e fazem passar corrente eléctrica de forte intensidade, de um para o outro, através das chapas que vão aquecer, por efeito de Joule, devido à resistência à passagem de corrente. Os eléctrodos rodam sobre o metal base a soldar (pelo menos um deve ser acionado por um motor eléctrico) e vão fazendo a soldadura através da passagem de corrente eléctrica (Santos O. e Quintino L., 1993). A corrente poderá estar sempre ligada, formando uma soldadura contínua (Figura 1.c), ou poderá ser intermitente levando a uma soldadura por pontos sobrepostos ou afastados entre si (Groover M., 2010; ISF, 2003), dependendo da frequência utilizada (Figura 1.a e b).

Relativamente à configuração e posição dos eléctrodos, outros métodos podem ser utilizados, embora menos frequentemente (Santos O. e Quintino L., 1993; Committee T. W., 1969). Pela visualização da Figura 2.b, em vez de dois eléctrodos circulares, pode ser utilizado um eléctrodo circular que se desloca linearmente sobre uma guia sobre a qual assenta o metal base a soldar. Outra configuração possível é a utilização de dois eléctrodos circulares, posicionados no mesmo lado do material base, com uma guia no lado oposto (Figura 2.c). Este método é em tudo semelhante ao da Figura 2.b, adicionando no entanto mais um eléctrodo, o que permite fazer duas soldaduras simultaneamente. Na Figura 2.d mostra-se uma metodologia semelhante à da Figura 2.a, mas na qual se recorre à utilização de dois pares de eléctrodos.

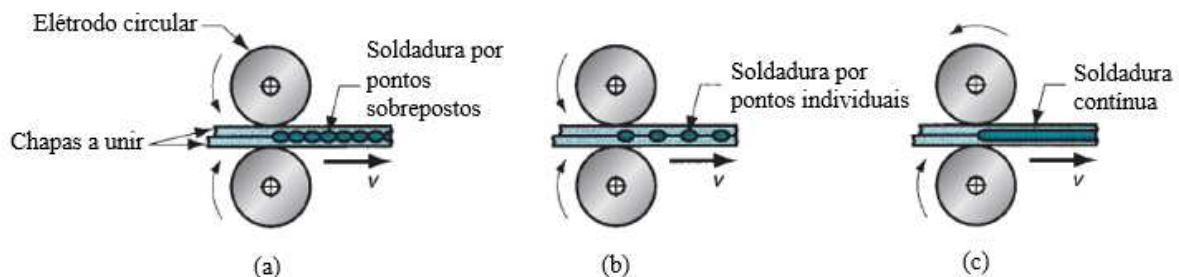


Figura 1 - Diferentes tipos de soldaduras por roletes: (a) Soldadura por pontos sobrepostos; (b) Soldadura por pontos individuais; (c) Soldadura contínua (adaptação do original (Groover M., 2010)).

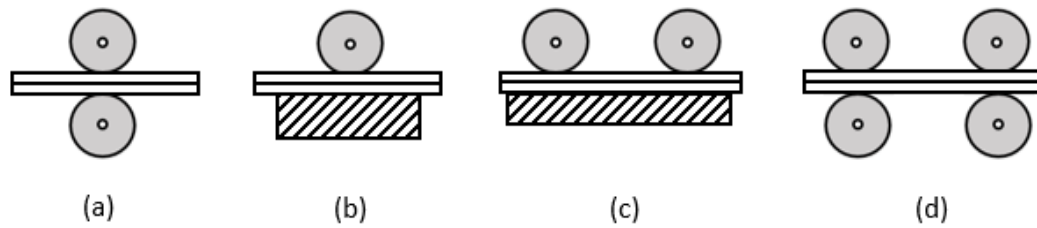


Figura 2 - Metodologias de soldadura por roletes: (a) Eléttodos alinhados verticalmente; (b) Um eléttodo circular e uma guia; (c) Dois eléttodos posicionados do mesmo lado da chapa e uma guia no lado oposto; (d) Dois pares de eléttodos alinhados verticalmente.

Tal como já foi referido neste texto, nos processos de soldadura por resisténcia, o calor necessário à ligação dos materiais base é gerado por efeito de Joule, sendo dado pela equação:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

Q – Calor gerado [J];

I – Intensidade de corrente [A];

R – Resisténcia eléttica [Ω];

t – Duraçáo da passagem de corrente [s].

Uma parte do calor gerado é consumida na fusáo dos materiais a ligar e outra parte é dissipada por conduçáo através do material base e dos eléttodos. Pela equação 1, o calor adicionado pode ser ajustado fazendo variar a intensidade da corrente e o tempo de soldadura. A passagem de corrente através das chapas a soldar atravessa um conjunto de zonas com níveis diferentes de resisténcia eléttica, como se mostra na Figura 3, sendo a sua soma representada pela equação 2.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (2)$$

R_1 - Resisténcia de contacto eléttodo-chapa;

R_2 - Resisténcia da chapa superior;

R_3 - Resisténcia da interface chapa - chapa;

R_4 - Resisténcia da chapa inferior;

R_5 - Resisténcia de contacto eléttodo- chapa.

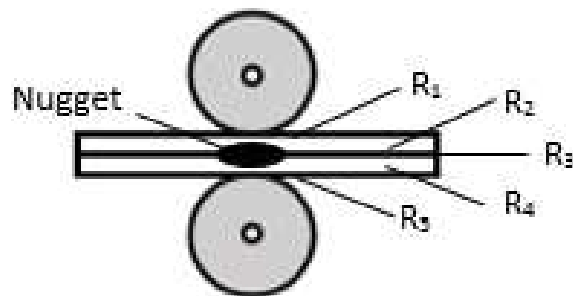


Figura 3 – Variação da resistência na junta a soldar e formação do *nugget*.

As resistências R_2 e R_4 dependem exclusivamente da resistividade dos materiais a ligar e é sempre inferior a R_3 . As resistências R_1 e R_5 devem ter o menor valor possível de modo a não obstruírem a passagem da corrente elétrica e a garantir que a geração máxima de calor ocorrerá na interface das chapas a unir. Para isso é necessário ter alguns cuidados quer na seleção da pressão exercida pelos eletrodos, quer com o estado da superfície das chapas e dos eletrodos. Com efeito a resistência diminui com o aumento da superfície de contacto dos eletrodos, e deste modo com o aumento da pressão exercida por estes, uma vez que quando esta aumenta, aumenta o contacto entre superfícies. Por outro lado, a resistência nas zonas de contacto eletrodo/chapa pode aumentar com a sujidade dos eletrodos e das chapas a soldar, ou ainda, se estas tiverem revestimentos e/ou camadas de óxidos superficiais.

A resistência R_3 é a que tem o valor mais elevado de todas as resistências sendo nesta zona que ocorre a maior geração de calor. Isto leva à fusão dos materiais, formando um *nugget* (área de secção elíptica), vulgarmente designado por Zona de Fusão (ZF). O material nas vizinhanças da ZF recebe também uma grande quantidade de calor por condução, a qual é insuficiente para promover a fusão, mas pode ser suficiente para promover a recristalização do material base. Esta área é designada por Zona Termicamente Afetada (ZTA). Os tamanhos das ZF e ZTA dependem dos parâmetros de soldadura. Consoante os materiais recebam mais ou menos calor, estas zonas podem ser maiores ou menores, respetivamente. O Metal Base (MB) é todo o material que não é afetado pelo calor da soldadura, pelo que, as suas propriedades não são alteradas.

Na Figura 4 está esquematizado um ponto de soldadura com estas três zonas em evidência. Estas zonas ganham forma durante o arrefecimento e solidificação da soldadura, sendo o centro do *nugget* a última área a solidificar, pois encontra-se na zona

onde a quantidade de calor é máxima. Nesta zona, tal como se mostra na Figura 5, costumam formar-se dendrites e grãos equiaxiais. Com efeito, dentro da ZF são vulgarmente encontrados grãos colunares orientados perpendicularmente à linha de fusão (Zhang H. e Senkara J., 2006), uma vez que o processo de arrefecimento e solidificação é condicionado pelo material adjacente à ZF, ou seja, uma parte do calor é dissipada pelos eléctrodos e outra pela chapa. Este cenário encontra-se esquematizado na Figura 5.a. A Figura 5.b mostra a ZF com grãos colunares maiores na direção vertical do que na horizontal. Esta morfologia de grão indica que o calor se dissipou maioritariamente na direção dos eléctrodos, o que pode ser explicado por uma refrigeração excessiva dos mesmos. Nestas soldaduras, como o arrefecimento é maior na direção vertical, a última zona a solidificar, que contém os grãos equiaxiais, terá a forma de uma elipse horizontal. Se por algum motivo os eléctrodos não conseguirem cumprir bem o papel de refrigeração, a formação de grãos colunares verticais será reduzida, devido à maior dissipação de calor através das chapas. Neste caso a última zona a solidificar terá a forma de uma elipse vertical (Figura 5.c).

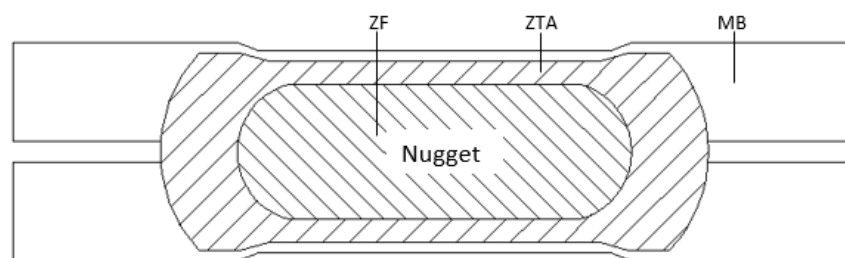


Figura 4 – Representação de um ponto de soldadura.

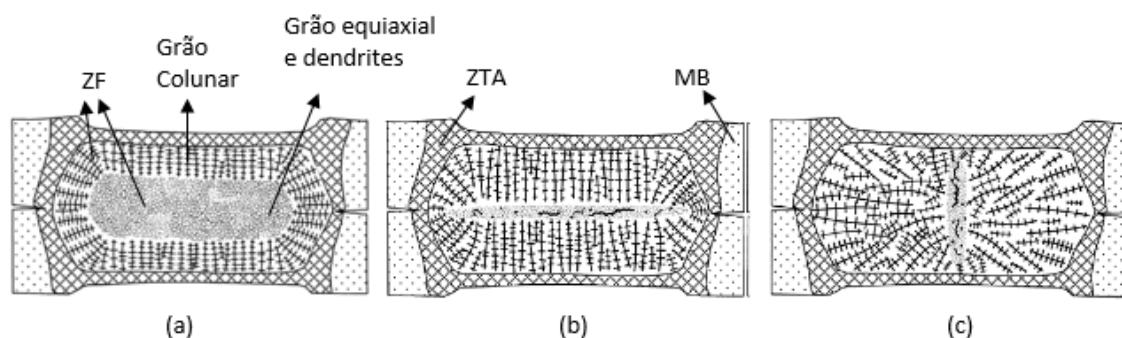


Figura 5 – Estruturas da zona soldada e processos de solidificação: (a) dissipação de calor uniforme pelos eléctrodos e pelas chapas; (b) maior dissipação na direção dos eléctrodos; (c) maior dissipação pelas chapas (adaptação do original (Zhang H. e Senkara J., 2006)).

2.1.2. Sequência da Soldadura

Foi atrás referido que neste processo podem ser obtidos três tipos de soldadura, consoante a corrente esteja, ou não, ligada em contínuo. A sequência do processo será descrita para o exemplo ilustrado na Figura 1.a, onde a soldadura é constituída por uma sucessão de pontos sobrepostos. Isto deve-se ao facto de no presente trabalho ter sido utilizada esta metodologia para a obtenção das soldaduras.

A sequência de soldadura contempla uma série de passos essenciais para a realização da soldadura, ilustrados na Figura 6, e que são detalhados de seguida.

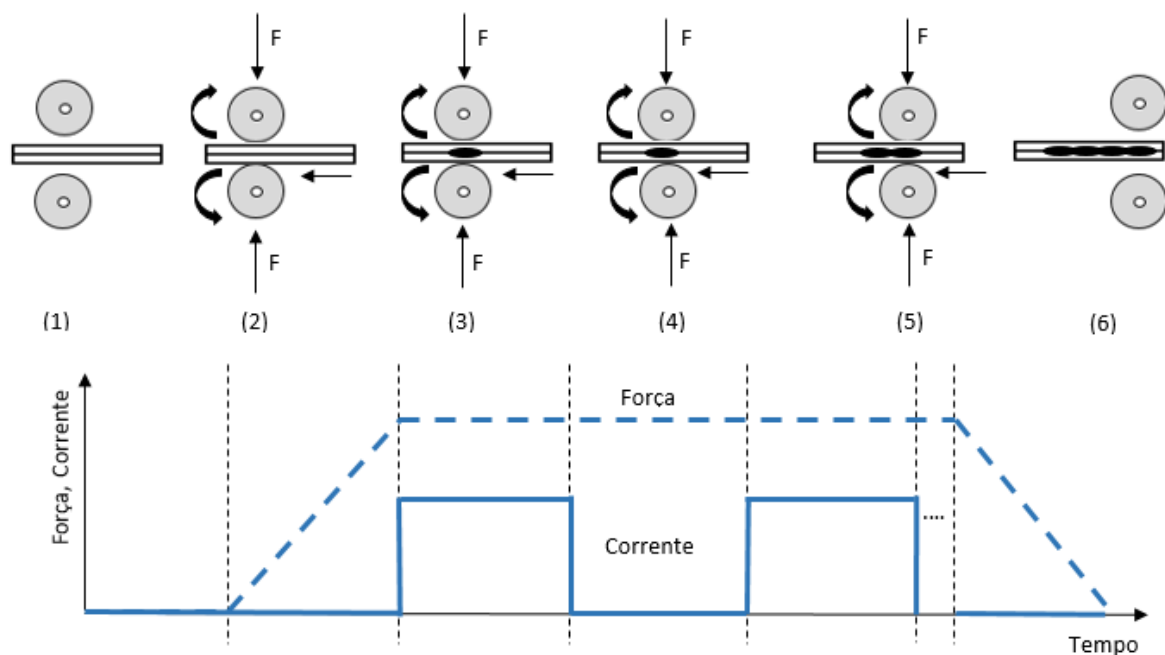


Figura 6 – Sequência da soldadura por roletes.

1 - No início do processo as chapas a ligar são colocadas entre os eletrodos.

2- Os eletrodos são colocados em contacto com as chapas exercendo uma pressão constante, previamente determinada, que será mantida até ao fim da operação de soldadura.

3 – É ligada a corrente elétrica que dá origem à geração de calor e à formação de um *nugget*. Em simultâneo é iniciado o movimento de rotação dos eletrodos, obrigando o material base a deslocar-se (note-se que os eletrodos estão numa posição estacionária, apenas tendo um movimento de rotação, obrigando as chapas a deslizar entre eles).

4 – A corrente é desligada e é iniciado o processo de arrefecimento. Os elétrodos ajudam no processo de refrigeração e mantêm a pressão sobre as chapas mantendo-as unidas enquanto se dá a solidificação do banho de fusão.

5 – A corrente é novamente ligada, gerando um *nugget* sobreposto ao anterior. A distância de sobreposição depende da velocidade dos elétrodos e da frequência com que a corrente é ligada/desligada. A partir desta fase as etapas 3 e 4 são repetidas fazendo uma linha de soldadura por pontos sobrepostos.

6 – Concluída a soldadura, é removida a pressão exercida pelos elétrodos e a chapa é retirada.

2.1.3. Equilíbrio Térmico

Para se obterem boas soldaduras é importante que ambas as chapas a unir sejam igualmente afetadas pelo calor. O *nugget* deve ser igualmente profundo nas duas chapas, sendo a interface entre estas a linha de simetria do *nugget* (Figura 7.a). A Figura 7.a ilustra uma soldadura com uma distribuição térmica equilibrada, enquanto a Figura 7.b mostra uma distribuição térmica não equilibrada: o *nugget* está deslocado relativamente à linha de interface das chapas, tendo a chapa de baixo recebido mais calor. Isto leva a que a ligação apresente valores de resistência reduzidos relativamente à ilustrada Figura 7.a. Com efeito, repare-se que, se o *nugget* (elipse) estiver centrado na interface das chapas, a área de ligação entre as mesmas é maior.

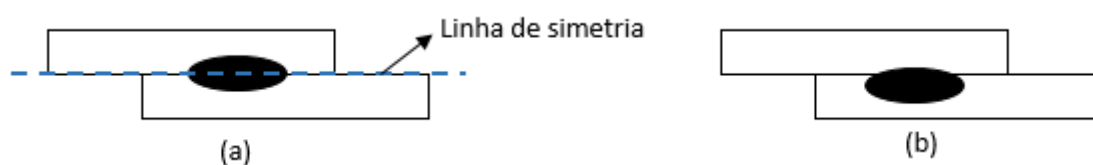


Figura 7 – Equilíbrios térmicos: (a) distribuição térmica equilibrada; (b) distribuição térmica não equilibrada.

Geralmente as soldaduras são realizadas em metais base semelhantes, com o mesmo tratamento superficial e iguais espessuras. Os dois elétrodos são também feitos do mesmo material e têm dimensões e geometrias semelhantes. Isto leva à obtenção de soldaduras termicamente equilibradas como na Figura 7.a. Quando umas destas condições não se observam, poderemos ter uma das seguintes situações:

Materiais dissimilares – os materiais base têm propriedades diferentes e como tal as condutividades térmica e elétrica e a resistência à passagem de corrente serão

diferentes. Isto leva a que a chapa que tiver menor condutividade térmica (maior resistência) gere uma maior quantidade de calor deslocando o *nugget* na sua direção. Para evitar esta situação devem ser utilizados elétrodos de diferentes materiais: o eletrodo de menor condutividade elétrica deve estar em contacto com a chapa de menor resistência, de modo a ocorrer uma menor dissipação de calor durante o arrefecimento.

Espessuras diferentes – a chapa de maior espessura gera uma maior quantidade de energia sendo o *nugget* deslocado para esta zona. Uma possível solução é utilizar elétrodos com dimensões diferentes, estando o de maiores dimensões sobre a chapa de maior espessura.

Elétrodos diferentes – no caso de serem soldadas duas chapas iguais com elétrodos de diferentes materiais, o *nugget* será deslocado para a chapa em contacto com o eletrodo de maior resistência elétrica. Elétrodos de dimensões diferentes deslocam o *nugget* para a chapa em contacto com o eletrodo menor, pois dissipa menos calor (Kelkar G. , 2007).

2.1.4. Parâmetros de Soldadura

Em soldadura por resistência, uma boa escolha dos parâmetros de soldadura é fulcral para a obtenção de soldaduras com boa qualidade. Assim sendo é importante ter conhecimento dos parâmetros do processo e de como estes se relacionam com as soldaduras obtidas. Analisando a literatura (Committee T. W., 1969; Santos O. e Quintino L., 1993; Khosravi et al, 2012) podem ser definidos como principais parâmetros de soldadura a intensidade de corrente, o tempo de soldadura, a pressão de aperto, a velocidade de soldadura e as características dos elétrodos. De seguida será apresentado o efeito da variação dos parâmetros na qualidade das soldaduras.

Intensidade de Corrente e Tempo de Soldadura

Para uma melhor compreensão, os parâmetros intensidade e tempo de soldadura serão abordados em conjunto. Com efeito, pela Equação do Efeito de Joule, o calor gerado depende destes dois parâmetros que podem ser conjugados entre si de modo a obter a quantidade de calor desejada. É preferencial utilizar intensidades de corrente elevadas e baixos tempos de soldadura, fazendo assim com que a quantidade de calor conduzida ao material base seja menor, o que leva a uma menor expansão térmica e a um

arrefecimento mais rápido da soldadura. Para além disso, o aumento da intensidade de corrente e a diminuição do tempo permitem velocidades de soldadura mais elevadas, o que conduz a maiores taxas de produtividade.

De assinalar que, durante o processo de soldadura por roletes, uma parte da corrente tende a desviar-se em direção ao ponto de soldadura anterior, pelo que, este processo necessita de intensidades mais elevadas do que outros processos de soldadura por resistência. De acordo com os metais base e/ou as espessuras a ligar, a intensidade de corrente pode normalmente variar entre 10 a 30 kA. Comparando o alumínio com o aço, por exemplo, o alumínio necessita de intensidades de corrente superiores devido à sua maior condutividade térmica. O tempo de soldadura é ajustado em ciclos. Para uma frequência de 50Hz, um ciclo corresponde a 0.02s.

Um pequeno aumento na corrente leva a um aumento do diâmetro e da resistência da soldadura. O mesmo sucede com um aumento do tempo de soldadura, mantendo a corrente constante. No entanto, pela Equação 1, pode observar-se que a variável intensidade de corrente está ao quadrado, levando a que tenha uma maior influência na energia produzida. Assim, o tamanho da soldadura aumenta de forma quadrática com a intensidade da corrente e aumenta linearmente com o tempo de soldadura. A utilização de uma baixa intensidade de corrente leva à não formação do banho de fusão, uma vez que os elétrodos e as chapas dissiparão rapidamente todo o calor para fora da região de soldadura. O aumento do tempo de soldadura diminui a vida útil dos elétrodos, aumenta a redução de espessura no material base (causada pela pressão exercida pelos elétrodos) e ainda o tempo de dissipação do calor para o material base. Isto leva a velocidades de arrefecimento mais reduzidas, o que poderá ser útil para materiais que tenham tendência para formar estruturas frágeis (Rukkii, 2014).

Eléttodos e Pressão Aplicada

Os parâmetros tipo de eléctrodo e pressão serão, também, abordados em conjunto uma vez que estão interligados.

Os eléttodos têm como função aplicar a pressão, fazer passar a corrente através das chapas e ajudar no processo de arrefecimento. Para isso são arrefecidos internamente com água. Uma vez que, em relação aos outros processos de soldadura por resistência

elétrica, a soldadura por roletes gera uma maior quantidade de calor, pode ser, por vezes, necessário recorrer a refrigeração externa, sendo neste caso um fluxo de fluido aplicado diretamente na interface elétrodo/chapa, ou então, a imersão das chapas num líquido refrigerante. Normalmente o fluido utilizado é água, mas para casos especiais, como por exemplo materiais ferrosos sujeitos a oxidar, poderão ser utilizados aditivos anticorrosivos com a água (Committee T. W., 1969).

A pressão aplicada é também essencial neste tipo de soldadura uma vez que tem como funções (Santos O. e Quintino L., 1993) unir as chapas antes da soldadura, variar a resistência de contacto (quanto maior a pressão exercida, maior será a área de contacto do par elétrodo/chapa e menor será a resistência), conter o banho de fusão no interior da junta e, após a soldadura, pode ainda promover refinamento do grão do material fundido. A pressão aplicada tem de ser previamente determinada de modo a não comprometer a qualidade da soldadura. Se a pressão for em excesso pode causar uma redução de espessura excessiva, diminuindo a resistência da soldadura. No caso de ser insuficiente, pode não promover contacto suficiente, quer entre os materiais base, quer entre os pares elétrodo/chapa, levando à produção de faíscas, projeção de material e a um desgaste rápido dos elérodos. Através da utilização de um valor de pressão adequado, o banho de fusão será criado no interior das juntas, não havendo fusão da interface elétrodo/chapa, o que evita a ocorrência de projeções de material e leva a que os elérodos promovam um arrefecimento mais eficiente.

O tempo de aperto, antes da soldadura, não afeta as propriedades da ligação, mas deve ser longo o suficiente para permitir que os elérodos estejam na posição correta antes da passagem de corrente elétrica. Um tempo de aperto muito curto pode originar expulsões do metal fundido da soldadura ou da superfície da interface elétrodo/chapa (Rukkii, 2014).

Características dos Elérodos

A geometria e o diâmetro dos elérodos têm um grande impacto no processo e nas propriedades da soldadura uma vez que afetam quer a pressão exercida, quer a distribuição da corrente na soldadura. Quanto à geometria, a superfície de contacto do elétrodo pode ser plana ou convexa. No caso de ser plana, há uma proporção entre a

largura do elétrodo e a espessura da chapa que deve ser respeitada de acordo com a equação:

$$d_1 = 5\sqrt{e} \quad (3)$$

onde “ d_1 ” é a largura do elétrodo e “ e ” a espessura da chapa.

Para a soldadura de chapas de diferentes espessuras ou condutividades elétricas, a largura do elétrodo deve ser escolhida de modo a promover um bom equilíbrio térmico. Por exemplo, para um material com grande condutividade elétrica e/ou com pouca espessura, deve ser escolhido um elétrodo de menor diâmetro.

A escolha do material do elétrodo é, também, um fator importante. Na soldadura de materiais com elevada resistência elétrica o elétrodo deve apresentar boa condutividade de modo a permitir dissipar facilmente o calor gerado em excesso. Analogamente, para uma chapa com elevada condutividade, o material do elétrodo deve ser resistivo de modo a poder funcionar como uma fonte de calor (Kelkar G., 2007). Na grande maioria das aplicações os elétrodos utilizados são feitos em cobre (grande condutividade), podendo ser também de tungsténio ou molibdénio (maior resistência).

Velocidade de Soldadura

A velocidade de soldadura é proporcional à velocidade de rotação dos elétrodos, podendo variar entre 1 a 5 m/min, de acordo com as características da junta a soldar. Com o aumento da frequência da corrente, do diâmetro dos elétrodos e da camada de óxidos à superfície das chapas, a velocidade deve aumentar. Por outro lado deve ser reduzida quando a espessura das chapas diminui.

Outros Parâmetros de Soldadura

Dependendo da máquina de soldadura utilizada, pode ser necessário definir uma série de parâmetros de soldadura suplementares, que condicionam a variação da corrente ao longo do tempo, como se mostra na Figura 8 (Rukkii, 2014). Nomeadamente, pode ser necessário definir uma rampa, com declive positivo, de modo a aumentar o tempo necessário para a intensidade de corrente atingir o valor máximo. Isto é utilizado, por exemplo, em aços galvanizados, permitindo que o zinco tenha mais tempo para ser removido da zona de soldadura. Do mesmo modo, o tempo de descida da corrente também

pode ser ajustado por uma rampa, desta vez de declive negativo. Além disto, em materiais de baixa soldabilidade pode ser feito um tratamento térmico, aplicando uma série de impulsos de corrente, de menor intensidade, antes, ou depois, da corrente de soldadura, tal como se mostra na Figura 8.

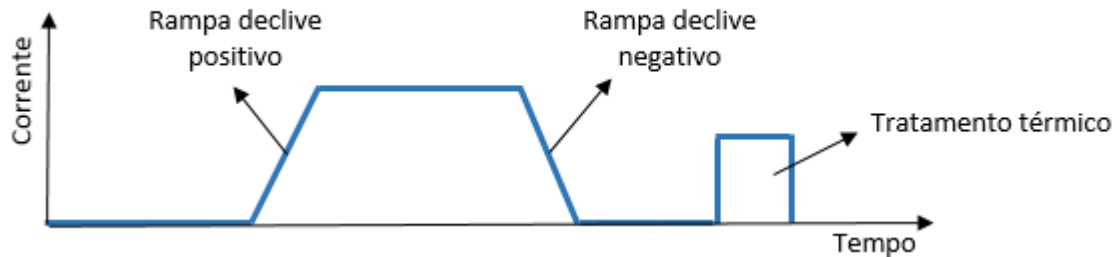


Figura 8 – Parâmetros adicionais em alguns equipamentos de soldadura: rampa para a corrente e tratamento térmico.

2.1.5. Análise da Soldabilidade dos Materiais por Resistência

Os materiais sujeitos a estudo no presente trabalho são o zinco, a liga de alumínio 5754-H22 e o aço galvanizado DX51D. Na literatura, por exemplo (Santos O. e Quintino L., 1993), é dito que estes materiais são soldáveis por roletes.

Zinco

As ligas de zinco podem ser soldadas por roletes com correntes relativamente elevadas, e pressões exercidas pelos eletrodos relativamente baixas. Se as superfícies estiverem razoavelmente limpas, apenas é necessário proceder à remoção de algumas gorduras, caso contrário, é necessário uma limpeza mecânica. Neste tipo de soldadura é comum aparecerem algumas cavidades na zona do *nugget* (Committee T. W., 1972).

Alumínio

Os processos de soldadura por resistência são muito utilizados na ligação de ligas de alumínio. Ao contrário de outros tipos de soldadura por fusão, a soldadura por resistência pode soldar o alumínio sem perdas significativas de resistência. O alumínio é um metal com uma grande condutividade térmica e elétrica, necessitando de elevadas intensidades de corrente. Quando exposto ao ar forma rapidamente uma camada de óxido à superfície (alumina) de elevada resistência elétrica, levando ao aquecimento da superfície,

desgaste dos elétrodos e adesão do metal base ao eletrodo. Antes de proceder à soldadura, deve ser feita uma decapagem, sendo benéfica a utilização de uma rampa para a corrente, de modo a prevenir o efeito da elevada resistência de contacto no início de soldadura.

Aço Galvanizado

Os aços que contenham até 0.3% de carbono são facilmente soldáveis por resistência elétrica. Contudo, o revestimento em zinco dos aços galvanizados dificulta um pouco a tarefa, tornando-a tanto mais difícil quanto maior for a espessura de revestimento. Com efeito, a soldadura deste material deve permitir manter intata a camada de zinco na interface eletrodo/chapa, fundir o zinco na zona de interface das chapas, e ainda, retirá-lo da zona de ligação das chapas para que não haja inclusões de zinco no *nugget* após o arrefecimento.

O revestimento em zinco altera as propriedades térmicas e elétricas do material base. Com efeito, o aço galvanizado não apresenta resistência elétrica na interface chapa/chapa tão elevada como os aços não revestidos, o que leva a que a quantidade de calor na zona de ligação não seja tão elevada. Para compensar este facto, devem ser utilizadas intensidades de corrente mais elevadas, e/ou tempos de soldadura mais longos, do que os utilizados em aços não revestidos. A deposição de zinco na superfície dos eletrodos pode conduzir a um aquecimento excessivo destes, podendo comprometer a fase de arrefecimento e diminuir a densidade de corrente. A adesão do zinco ao eletrodo pode ser evitada com a utilização de um fio auxiliar (Figura 9), que serve de interface entre o eletrodo e a peça, sobre o qual será depositado o zinco, e de uma boa refrigeração dos eletrodos.

Na soldadura de aços galvanizados não é aconselhável a utilização de corrente contínua e é recomendável o uso de uma fonte externa de refrigeração a água.

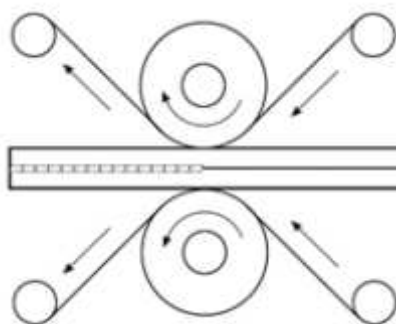


Figura 9 – Utilização de um fio de cobre na superfície do eletrodo (Rukkii, 2014).

2.1.6. Análise de Defeitos em Soldadura por Resistência

Atendendo à forte influência dos defeitos de soldadura na resistência mecânica das ligações soldadas, faz-se, de seguida, uma análise resumida dos principais defeitos passíveis de serem encontrados em soldaduras produzidas por resistência elétrica.

Redução de espessura

Após a ligação, as soldaduras realizadas por resistência apresentam sempre uma redução de espessura na interface de contacto com os eléctrodos, tal como pode ser visto na Figura 10. Esta redução é normalmente associada à pressão exercida pelos eléctrodos. Quanto maior a pressão aplicada, maior vai ser a redução de espessura. Os eléctrodos são sempre a causa direta deste fenómeno, mas outras variáveis podem afetar indiretamente, nomeadamente, a natureza do material a ser soldado e o calor gerado, uma vez que a redução de espessura pode estar também associada à contração do material durante a solidificação (Santos O. e Quintino L., 1993). É ainda de notar que, para materiais distintos, um mais macio que o outro, perante as mesmas condições de soldadura (calor, pressão dos eléctrodos, etc.), o material menos duro vai apresentar uma redução de espessura maior. Do mesmo modo, para dois materiais iguais, da mesma natureza, mas com geração de calor diferentes, por exemplo, o material que receber maior quantidade de calor vai sofrer maior redução de espessura, devido ao efeito de amaciamento. A excessiva redução de espessura pode levar a projecções de material, que diminuem a resistência da soldadura e causam má aparência (Zhang H. e Senkara J., 2006).

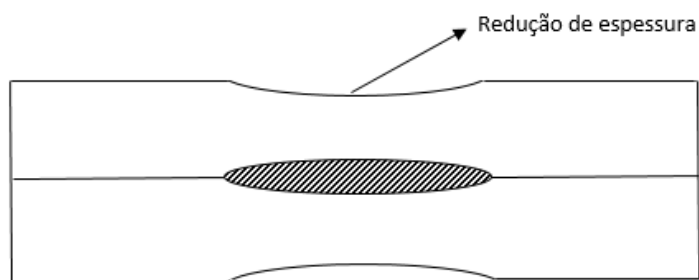


Figura 10 – Esquema do efeito de redução de espessura na soldadura por roletes.

Porosidades e Fissurações

Na análise de soldaduras por resistência, podem ser encontrados, quer orifícios no *nugget*, vulgarmente designados por porosidades, quer fendas, que podem estar localizados na ZF ou na ZTA.

O aparecimento de poros pode estar associado a três fenómenos: projeções, contração na solidificação e inclusões gasosas. As projeções de material (Figura 11.a) resultam de expulsões do metal líquido da zona da junta, que podem causar dois efeitos indesejáveis: podem comprometer a resistência da soldadura e a aparência das chapas (questão de estética). Geralmente este fenómeno está relacionado com uma escolha inadequada, quer dos elétrodos, quer dos parâmetros de soldadura, podendo ocorrer na zona de contacto do par elétrodo/chapa ou na interface das chapas. No primeiro caso, a qualidade da superfície e a vida dos elétrodos podem ser afetados, e no segundo caso, a resistência mecânica da ligação é afetada negativamente. Esta condição pode levar ao aparecimento de cavidades no interior do *nugget*. De um modo geral, há maior risco de projeções no alumínio do que no aço devido à utilização de intensidades de corrente mais elevadas.

As inclusões gasosas são bolhas de gás que ficam presas no material líquido. Após a solidificação, a ZF conterá vazios nas zonas onde se encontravam as inclusões gasosas. Estas podem aparecer de diversas maneiras:

1) Inclusão de hidrogénio – este elemento está presente na atmosfera e poderá estar também nas chapas e elétrodos, se estes se encontrarem húmidos. Se este elemento for solúvel no material a soldar, existe um perigo acrescido da inclusão de bolhas de hidrogénio, na massa de metal líquido;

2) Elementos de adição voláteis – alguns materiais contêm elementos de liga voláteis nas suas matrizes, que, devido ao elevado aquecimento na ZF, evaporam, levando ao aparecimento de inclusões gasosas;

3) Outras fontes – por vezes há presença de lubrificantes e elementos orgânicos, resultantes de tratamentos superficiais, nas superfícies das chapas, que podem contribuir para a formação de porosidades.

Os poros resultantes da contração durante a solidificação encontram-se junto ao último líquido a solidificar, e resultam da contração do material aquando da solidificação. As porosidades resultantes da contração são mais pequenas do que as geradas pelas bolhas de gás (Figura 11-b). Há a possibilidade destes dois fenómenos coexistirem, podendo combinar-se para formar poros de maiores dimensões.

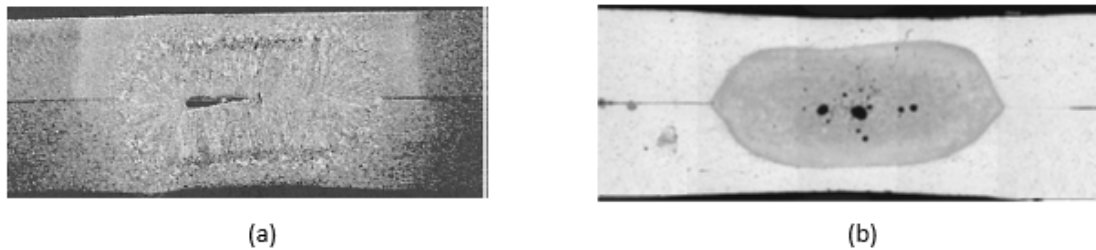


Figura 11- Porosidades no *nugget*: (a) resulta da expulsão de material – aço (Zhang H. e Senkara J., 2006); (b) resulta de bolhas gasosas (poros maiores) e contração de material na solidificação (poros menores) – liga de alumínio 5182 (Rashid M. et al, 2011).

A fissuração do material base poderá estar associada a três mecanismos bem conhecidos de fissuração em soldadura (Committee T. W., 1972): fissuração a quente, fissuração a frio e arrancamento lamelar.

A fissuração a quente pode ocorrer de dois modos diferentes: solidificação e liquação. A primeira ocorre na ZF e a segunda na ZTA.

A fissuração na solidificação pode ser devida à contração do material na passagem da fase líquida, para a fase sólida. Isto resulta na formação de fissuras em resultado da escassez de metal líquido que não abrange algumas regiões entre os grãos solidificados. Este defeito encontra-se esquematizado nas Figuras 5.b e c (Zhang H. e Senkara J., 2006; Silva C. e Paranhos R., 2003; TWI, 2014).

Outra hipótese para o aparecimento de fissuras nas soldaduras está relacionada com a formação de fases com baixo ponto de fusão, levando à formação de filmes de líquido no centro da soldadura. Com efeito, durante a solidificação ocorre crescimento de grão que vai excluindo elementos de baixa solubilidade para o centro de soldadura. Estes elementos e impurezas podem ligar-se a outros elementos existentes na estrutura formando fases de baixo ponto de fusão que geralmente têm baixa resistência. Devido às tensões residuais resultantes da contração de material, há a formação de fissuras entre os grãos na zona de segregação. Isto ocorre no *nugget* da soldadura e pode estender-se ao longo da soldadura provocando fissuras longitudinais (Kelkar G.P., 2014).

A fissuração a quente na ZTA ocorre durante o aquecimento do material base na zona adjacente ao *nugget*. Em certos momentos da soldadura há zonas da ZTA com um misto de estado sólido e líquido devido à presença de elementos de baixo ponto de fusão (Zhang H. e Senkara J., 2006). A fissuração ocorre pela formação de bolsas de líquido nas fronteiras de grão simultaneamente com tensões geradas pela contração (Silva C. e Paranhos R., 2003).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Material Base

No presente estudo foram utilizados como material base uma liga de alumínio 5754-H22, uma liga de zinco *Zintek* e um aço galvanizado DX51D com revestimento em zinco Z200. As suas composições químicas estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos metais base (%Wt.).

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Alumínio	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6 - 3,6	0,2
Zinco	-	-	0,080 - 1	-	-	Restante
Aço	0,015	Restante	-	0,5	-	-
Material	Ti	Cr	Al	C	P	
Alumínio	0,15	0,3	Restante	-	-	
Zinco	0,060 - 0,20	-	0 - 0,015	-	-	
Aço	0,001	-	-	0,11	0,017	

3.2. Soldaduras

As soldaduras em estudo foram realizadas nas instalações da empresa JAMARCOL. As chapas das ligas de zinco e de alumínio tinham 1mm de espessura, e as de aço 0.85mm. Uma das soldaduras foi realizada entre materiais dissimilares, aço-zinco, sendo as restantes obtidas para materiais iguais.

O equipamento utilizado tem a configuração apresentada nas Figuras 1.a e 2.a, tendo sido utilizados dois elétrodos de cobre (Liga de Cu, Cr e Zr) de superfícies planas, alinhados verticalmente. A máquina é da marca *Motofil, MSR 150T*, e pode trabalhar com uma intensidade máxima de corrente de 350A, e uma potência de 150kVA a 50%.

Na Tabela 2 estão representados os parâmetros de soldadura utilizados nas diferentes soldaduras, identificados de acordo com o quadro de comandos da máquina de soldadura. Foram realizadas várias soldaduras, em materiais diversos, mas apenas nove

reuniram condições para análise. Por uma questão de organização e para facilitar a distinção entre as diferentes soldaduras durante o processo experimental, as amostras foram numeradas, como é mostrado na coluna “n” da Tabela 2. Destes parâmetros, apenas a potência é referida e conhecida na literatura. Na Figura 12, está representado um esquema da interpretação dos parâmetros, numa tentativa de os perceber, simulando dois pulsos de corrente consecutivos. Tal como se mostra na Figura 12, foi assumido que a rampa de aquecimento e o tempo de descida correspondem aos declives iniciais e finais, respetivamente, da intensidade de corrente, e que o tempo de manutenção é o tempo que a corrente está ligada na sua intensidade máxima. As unidades dos parâmetros são desconhecidas, exceto na potência (kVA).

Tabela 2 - Parâmetros de soldadura utilizados.

Material	n	Rampa de Aquecimento	Tempo de Descida	Tempo de Manutenção	Potência [kVA]
Aço	2	0	3.2	0.1	6
	3	0	3.2	0.1	5
	20	0	3.5	0.1	5
Alumínio	5	0	3.2	0.1	8.5
	9	8	3.5	0,1	10
	10	1	3.5	1.5	8.5
Zinco	14	0	3.5	0.1	7
	15	0	3.5	0.1	7
Aço-Zn	16	0	3.5	0.1	6.5

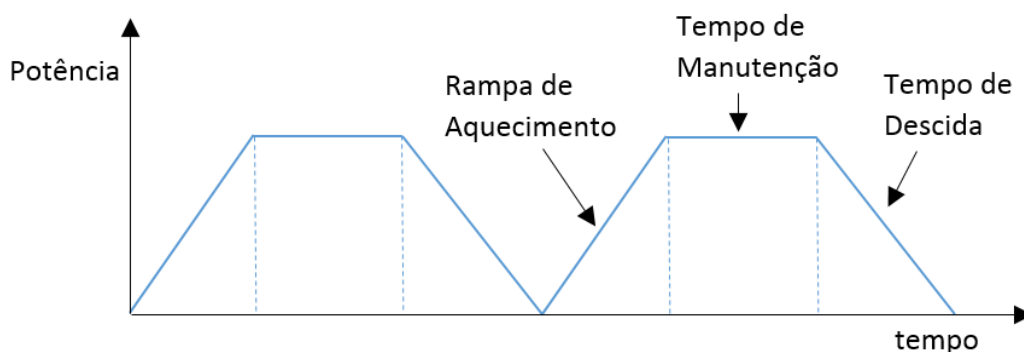


Figura 12 – Representação esquemática dos parâmetros de soldadura.

3.3. Análise Metalográfica

A análise metalográfica efetuada tem como objetivo a visualização da microestrutura das soldaduras, para posterior análise e caracterização das transformações induzidas pelo processo de soldadura. Assim, foi possível avaliar a qualidade das soldaduras produzidas e, no caso de serem detetados defeitos consideráveis, justificar as causas associadas.

Na análise metalográfica foram utilizados dois microscópios óticos, das marcas *Leica DM 4000 M LED* e *Zeiss Axiotech 100HD*, com ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x, e 1000x. O registo fotográfico das soldaduras foi efetuado com recurso às máquinas fotográficas das marca *Canon Powershot G5* e *Leica MC 120 HD*.

Para tornar possível a análise microestrutural, foi necessário seguir um conjunto de passos essenciais. Começou por ser feito o corte das chapas soldadas, com recurso a uma guilhotina, de modo a obter um conjunto de pequenas amostras para cada soldadura. Posteriormente, as superfícies destas amostras foram sujeitas a um processo de desbaste superficial, com 2mm de profundidade, através de um torno mecânico, com o intuito de eliminar o efeito de esmagamento causado pela guilhotina. De seguida, todas as amostras foram colocadas em resina e polidas com lixas de carbonato de silício com granulometria decrescente (P180, P320, P600, P1000 e P2500). O polimento final foi realizado com recurso a uma solução de suspensão de diamante, tendo sido utilizadas as soluções de 6 μ m e 3 μ m, no aço galvanizado, e soluções de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m no alumínio, zinco e zinco-aço. Por último, de modo a revelar a microestrutura, as amostras foram submetidas a ataques químicos. O reagente utilizado no aço foi o *Nital* (Committee A. H., 2004), no alumínio, o *Poulton's* modificado (Leal R., 2011), no zinco, uma mistura à base de água e hidróxido de sódio (Zipperian D., 2011), e no aço-zinco foi primeiramente utilizado *Nital*, de modo a revelar a microestrutura do aço, e de seguida, o reagente utilizado no zinco. A composição dos reagentes pode ser consultada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composições químicas dos reagentes: *Poulton's* modificado (Leal R., 2011), *Nital* (Committee A. H., 2004) e Reagente Zinco (Zipperian D., 2011).

Poulton's	
HCl	12ml
HNO ₃	6ml
HF	1ml
H ₂ O	1ml
Poulton's Modificado	
Reagente Poulton's	50ml
HNO ₃	25ml
H ₂ O	25ml
Ácido Crômico	12g
Nital	
Álcool Etílico	49ml
HNO ₃	1ml
Reagente Zinco	
NaOH	10g
H ₂ O	100ml

3.4. Caracterização Mecânica

3.4.1. Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados num equipamento da marca *Shimadzu Microhardness Tester*. Foram aplicadas cargas de 200g para o alumínio e cargas de 300g para o aço e o zinco. O tempo de indentação foi de 15s e a distância entre os pontos de indentação foi de 500µm. As indentações foram realizadas segundo duas linhas retas, como esquematizado na Figura 13, sendo ainda utilizada uma terceira linha de medições em algumas amostras, a fim de clarificar a análise de resultados. As indentações efetuadas durante o ensaio de dureza foram fotografadas, utilizando os equipamentos já descritos no capítulo da análise metalográfica, e medidas, utilizando o software *AxioVision* da marca *Carl Zeiss*. Posteriormente, efetuou-se o cálculo dos valores de dureza utilizando a seguinte equação:

$$HV = \frac{1.8544P}{d_{HV}^2} \quad (4)$$

onde “P” é a carga aplicada pelo indentador [kg], e “d_{HV}” é a média aritmética do comprimento das diagonais [mm].

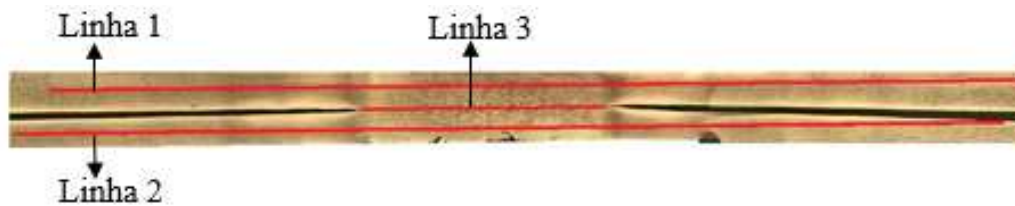


Figura 13 – Esquematização da linha de indentações: chapa superior (Linha 1); chapa inferior (Linha 2); interface das duas chapas (Linha 3).

3.4.2. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios mecânicos (Figura 15.a) da marca *Instron Electropuls*, com recurso a um extensómetro ótico (Figura 15.b) da marca *Gom Aramis 5M*, com o intuito de registar a deformação local nas diferentes zonas dos pontos de soldadura. Como mostrado na Figura 14, foram realizados ensaios de tração em provetes transversais (Tipo S) e ainda ensaios de tração em corte (Tipo C). No primeiro caso, apenas uma chapa é tracionada de modo a testar a continuidade mecânica na zona de ligação e no segundo caso, uma das chapas é fixa estando a outra sujeita a uma força axial, de modo a solicitar em corte a região soldada. Esta é a metodologia mais utilizada para avaliar a resistência mecânica das soldaduras em junta sobreposta.

Para a realização dos ensaios, teve de se proceder à preparação das amostras, as quais foram cortadas com a configuração e dimensões apresentadas na Figura 14, de modo a permitir a aquisição de deformação por DIC. Foi aplicada tinta branca, salpicada com pequenas gotas de tinta preta, sobre as superfícies das amostras, de modo a obter um padrão aleatório que permitisse, ao extensómetro ótico, fazer a leitura de deformação. Apenas quatro tipos de soldadura foram ensaiados, três de aço e um de zinco, pelo facto de apenas as amostras soldadas destes metais base terem as dimensões mínimas para a realização dos ensaios.

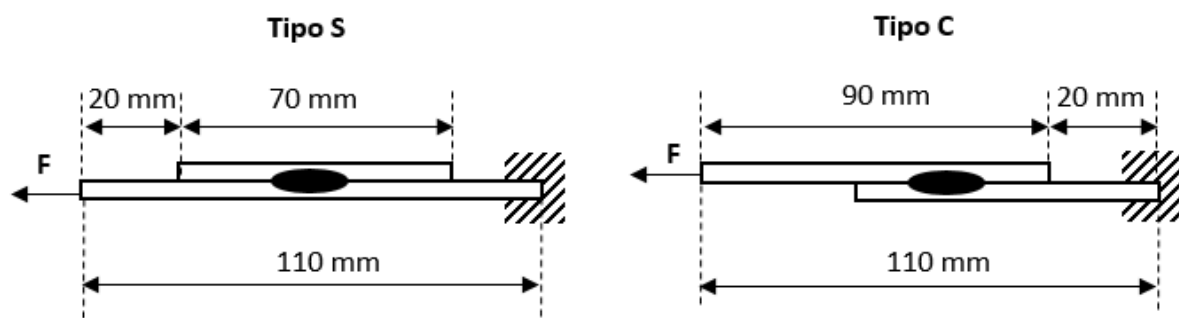


Figura 14 - Esquema da geometria e dimensão dos provetes sujeitos ao Ensaio de Tração.



(a)



(b)

Figura 15 - Equipamentos dos Ensaio de Tração: (a) Máquina de Tração *Instron Electropuls*; (b) Extensômetro Óptico *Gom Aramis 5M*.







4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Análise Metalográfica

4.1.1. Inspeção Visual

Inicialmente todas as amostras foram visualmente inspecionadas, não tendo sido detetadas descontinuidades superficiais macroscópicas indicativas de ausência de ligação, tal como se mostra na Tabela 4, onde se apresentam macrografias das diversas soldaduras. Contudo, foram observados pequenos defeitos em zonas localizadas de algumas soldaduras: as três soldaduras na liga de alumínio apresentaram sinais de projeção de material, na superfície das chapas; as duas soldaduras em zinco apresentaram algumas zonas que denotaram arrancamento de material, por adesão aos elétrodos; na soldadura em aço-zinco registaram-se vestígios de arrancamento de material, mas apenas no lado do zinco.

Tabela 4 - Inspeção visual das soldaduras.

Amostra_n	Sem Defeito	Defeito	
		Projeção	Arrancamento
Aço_2			
Aço_3			
Aço_20			
Alumínio_5			
Alumínio_9			
Alumínio_10			
Zinco_14			
Zinco_15			
Aço-Zinco_16			

4.1.2. Análise Microscópica

Após a inspeção visual, procedeu-se à análise microestrutural das soldaduras. Para cada amostra foi registada a microestrutura, quer de secções transversais das soldaduras, quer de secções longitudinais, representativas da evolução microestrutural ao longo do comprimento do cordão de soldadura. No texto que se segue faz-se uma análise microestrutural individualizada das soldaduras nos diferentes materiais base ou combinações de metais base.

4.1.2.1. Aço Galvanizado

Na Figura 16 estão representadas as secções transversais das três soldaduras em aço. Nas imagens correspondentes às secções transversais, das soldaduras 3 e 20, e à secção longitudinal, da soldadura 3 (Figura 17.a), pode ser observada uma linha contínua na interface dos materiais, revelando que não há ligação entre as chapas soldadas. No entanto, os metais base encontram-se unidos, devido à existência de uma ligação zinco-zinco na interface das chapas galvanizadas. O zinco encontra-se na superfície dos metais base e tem um ponto de fusão muito inferior ao do aço. Tanto na Figura 17.b, como na Figura 18, onde são mostradas, em detalhe, as secções transversais das duas amostras, é possível observar uma camada de zinco na interface entre os MB. A Figura 18, mostra ainda que estas ligações zinco-zinco não são contínuas ao longo de toda a soldadura, mas apenas em algumas zonas.

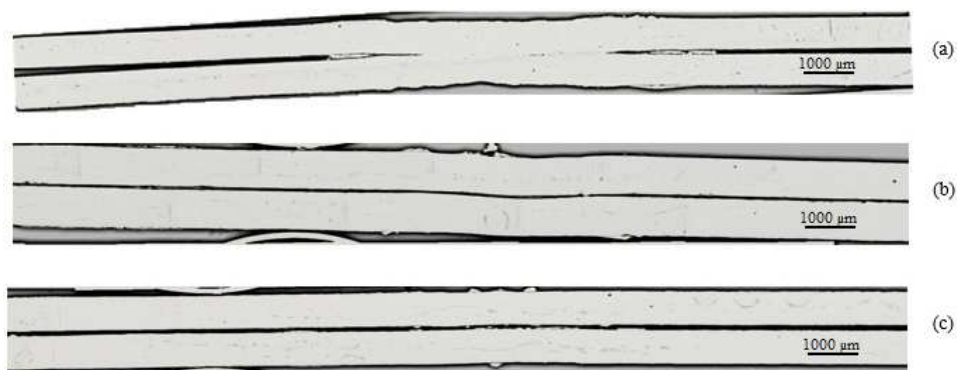


Figura 16 - Secção transversal das amostras de aço antes de ataque químico: (a) amostra 2; (b) amostra 3; (c) amostra 20.



Figura 17 - Microestrutura da amostra 3: (a) secção longitudinal; (b) zinco na interface das chapas.

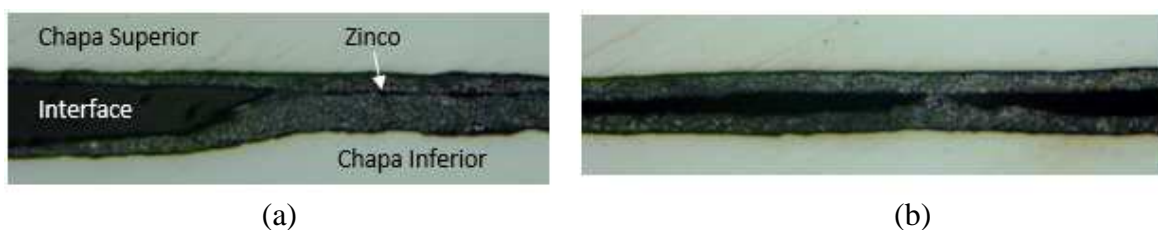


Figura 18 - Ligação zinco-zinco na interface das chapas: (a) amostra 3; (b) amostra 20.

Na Figura 19 são comparadas as microestruturas do MB (Figura 19.a), e da soldadura da amostra 3 (Figura 19.b) correspondente à zona que recebeu a máxima quantidade de calor. Como se pode depreender da análise da figura, não há vestígios de fusão nem de alterações na microestrutura da soldadura relativamente ao MB, revelando que as temperaturas atingidas e/ou o tempo de permanência a temperaturas elevadas, foram insuficientes para promover recristalização. O mesmo é observado para a amostra 20.

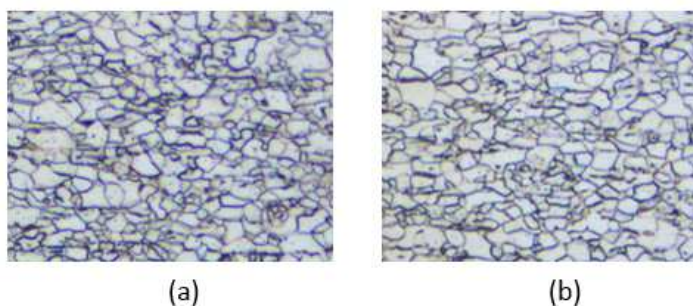


Figura 19 - Microestrutura da soldadura 3: (a) Material base; (b) Zona de soldadura.

Na soldadura 2, representada na Figura 16.a, pode ver-se que há uma zona central onde a linha de interface das duas chapas deixa de ser visível, correspondendo à área de junção efetiva dos dois metais base. No entanto, na Figura 20, onde está representada a secção transversal da amostra 2, após ataque químico, é visível que a zona de ligação das chapas não é contínua. Com efeito, nesta fotografia é observável uma linha intermitente, indicadora da existência de zonas ligadas e não ligadas. Na Figura 21, onde pode ser visualizada uma secção longitudinal da mesma soldadura, também pode ser observada a linha descontínua. Na análise detalhada da microestrutura da amostra 2, não foram detetados indícios de fusão de material, mas registou-se a ocorrência de crescimento de grão, na zona de ligação (Figura 20.b). Este crescimento de grão ocorreu devido à recristalização estática. O facto de existir ligação sem sinais de fusão, leva a concluir que a soldadura ocorreu por pressão a quente, ou seja, devido às altas temperaturas atingidas, houve um amaciamento do material base que, aliado à pressão dos eléctrodos, levou à união dos dois materiais. Os resultados obtidos neste trabalho foram também observados por

Alireza Khosravi *et al* (Khosravi et al, 2012) em soldadura por resistência elétrica contínua de aços galvanizados. Estes autores observaram também a linha de interface entre as duas chapas, em soldaduras produzidas com parâmetros que geraram menor quantidade de calor, e a formação de um *nugget* bem definido em soldaduras produzidas com quantidades de energia mais elevadas.

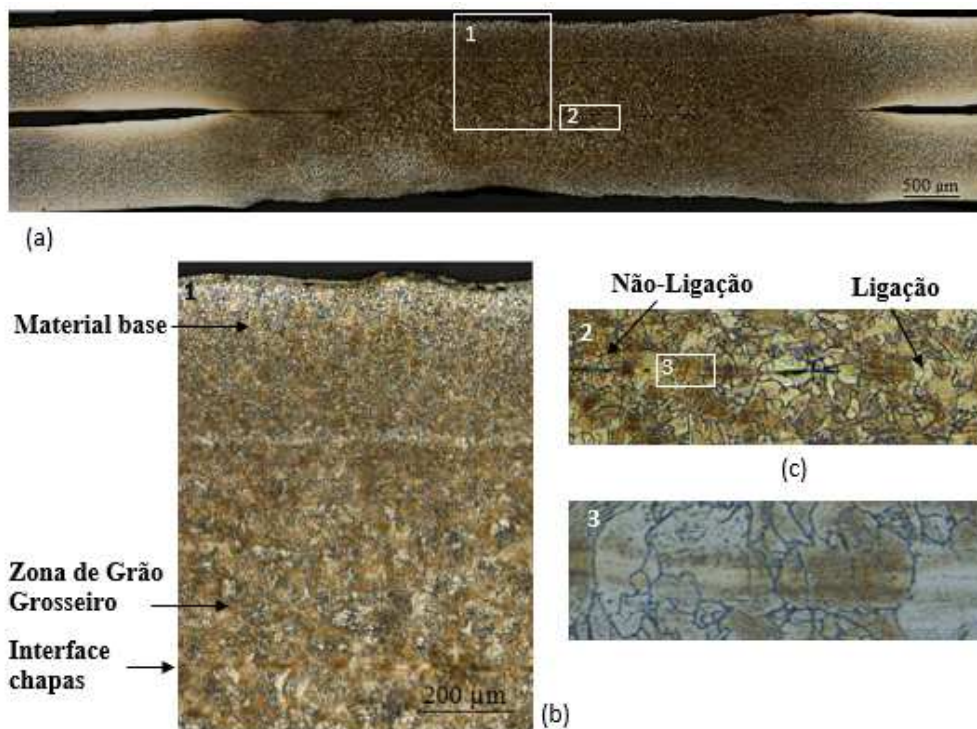


Figura 20 – Microestrutura da amostra 2: (a) secção transversal; (b) detalhe da zona 1; (c) detalhe das zonas 2 (200x) e 3 (500x).



Figura 21 – Microestrutura da amostra 2: (a) secção longitudinal; (b) detalhe da zona 1.

A análise das soldaduras demonstraram ainda que as três amostras apresentaram uma ligeira redução de espessura, sendo cerca de 3% para as soldaduras 3 e

20, e 9% para a soldadura 2, o que pode ser justificado pelo facto de a soldadura 2 ter recebido uma maior quantidade de calor. Este fenómeno da redução de espessura com o aumento da intensidade de corrente é bastante reportado na literatura, como por exemplo num artigo de Alireza Khosravi *et al* (Khosravi et al, 2012). A maior indução de calor na amostra 2 é evidenciada pela microestrutura da soldadura, a qual mostra sinais evidentes da ocorrência de recristalização. Porém, a análise da soldadura mostra também que não houve fusão do material base, nem a consequente formação do *nugget*, apresentando apenas ZTA e MB.

De modo a tentar correlacionar a estrutura das soldaduras com os parâmetros de soldadura utilizados na sua produção, na Figura 22 está esquematizada a variação de potência de soldadura em função dos diferentes parâmetros apresentados na Tabela 2. De acordo com esta tabela, a amostra 2 difere da amostra 3 na potência utilizada, e a amostra 3 difere da amostra 20, no tempo de descida. Desta figura pode concluir-se que o facto da amostra 2 ter recebido maior quantidade de calor é devido à utilização de uma maior potência. Comparando os parâmetros utilizados na produção das soldaduras 3 e 20, não há diferenças a assinalar. No entanto, a análise metalográfica indica que os parâmetros utilizados foram incorretos, pois a quantidade de calor gerada foi insuficiente para promover fusão nos três aços, o que asseguraria a continuidade de ligação. Com base na literatura, deveria ter sido utilizada uma potência superior e/ou maior tempo de soldadura (maior TM) e/ou menor velocidade de soldadura e/ou diminuir o tempo entre dois picos de corrente consecutivos. Nesta última situação e, observando o gráfico da Figura 22, isto seria alcançado reduzindo o tempo de descida.

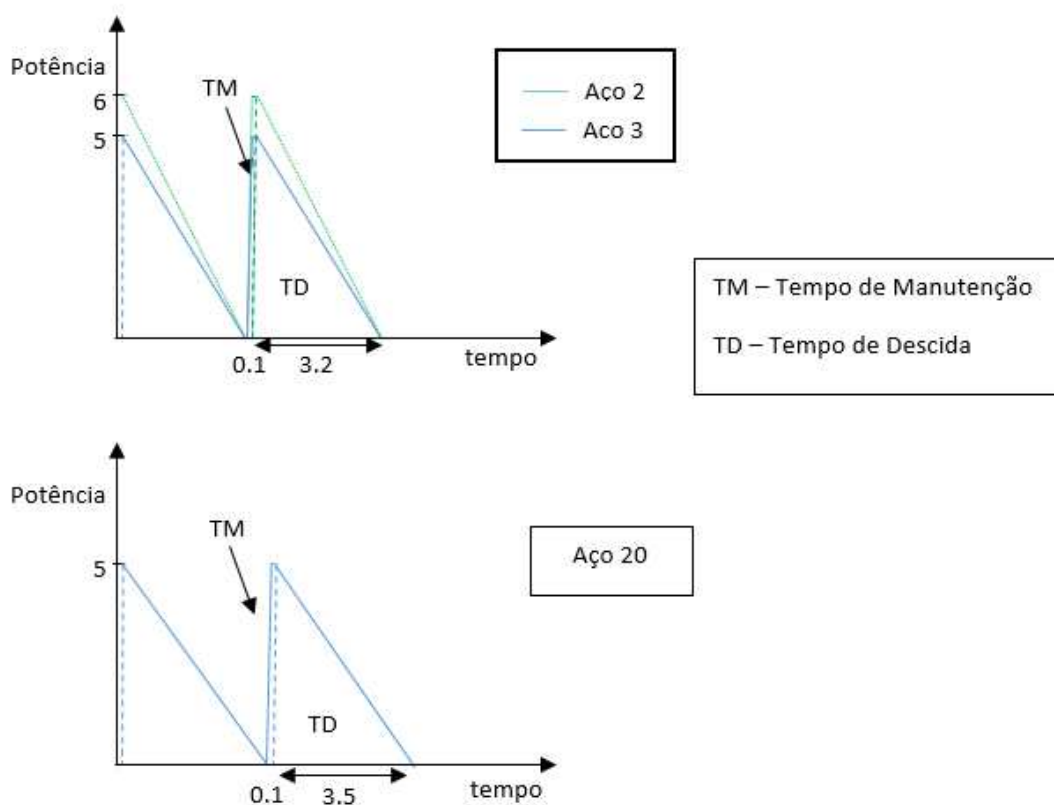


Figura 22 – Representação esquemática dos parâmetros de soldadura para os três aços.

4.1.2.2. Liga de Alumínio

As Figuras 23.a, 24.a e 25.a, mostram as secções longitudinais das três amostras da liga de alumínio. Em todas as figuras pode ser observado que a superfície das chapas superiores é relativamente uniforme, enquanto a superfície das chapas inferiores é irregular. Pode também ser notado que estas irregularidades aparentam ser periódicas e deste modo associadas à intermitência da corrente elétrica, que é ligada e desligada sucessivamente. Na amostra 9 (Figura 25), nas zonas da chapa com menor espessura, a corrente terá estado ativa, levando a uma maior geração de calor e provocando, deste modo, amaciamento do material, o que, juntamente com a pressão dos elétrodos, terá causado redução de espessura. Nas zonas de soldaduras com maior espessura, a corrente terá estado desligada, levando a que o material não atinja temperaturas tão elevadas. As amostras 5 e 10 (Figuras 23 e 24) apresentam reentrâncias e/ou cavidades periódicas, devidas à projeção de material, em pontos onde a corrente esteve ligada. O facto de este fenómeno acontecer apenas numa das chapas pode estar relacionado com o estado de superfície dos elétrodos, existindo um com maior desgaste e/ou sujidade do que o outro.

Pela Figura 24.a (alumínio 5) são visíveis zonas brancas na superfície das chapas, correspondentes à fusão de material. O mesmo sucede na amostra 10, não sendo tão evidente.

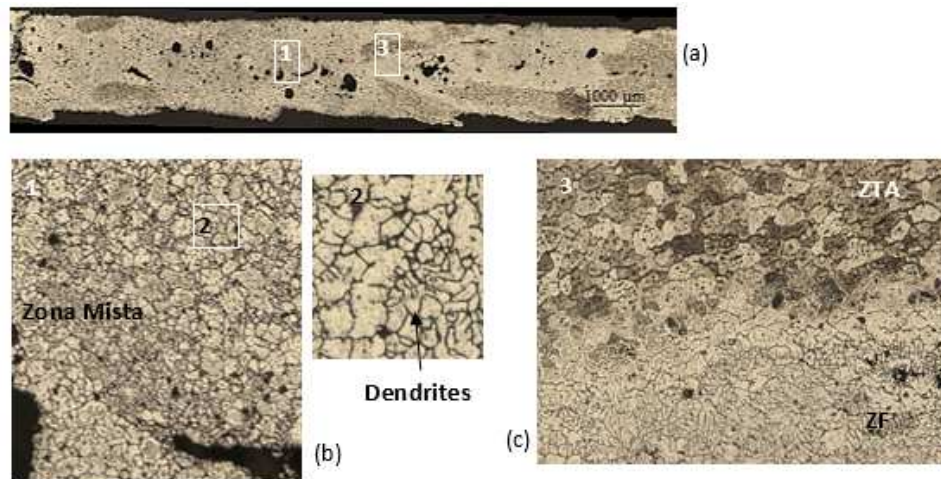


Figura 23 - Microestrutura da amostra 10: (a) secção longitudinal; (b) detalhe das zonas 1 e 2 (200x); (c) detalhe da zona 3 (200x).

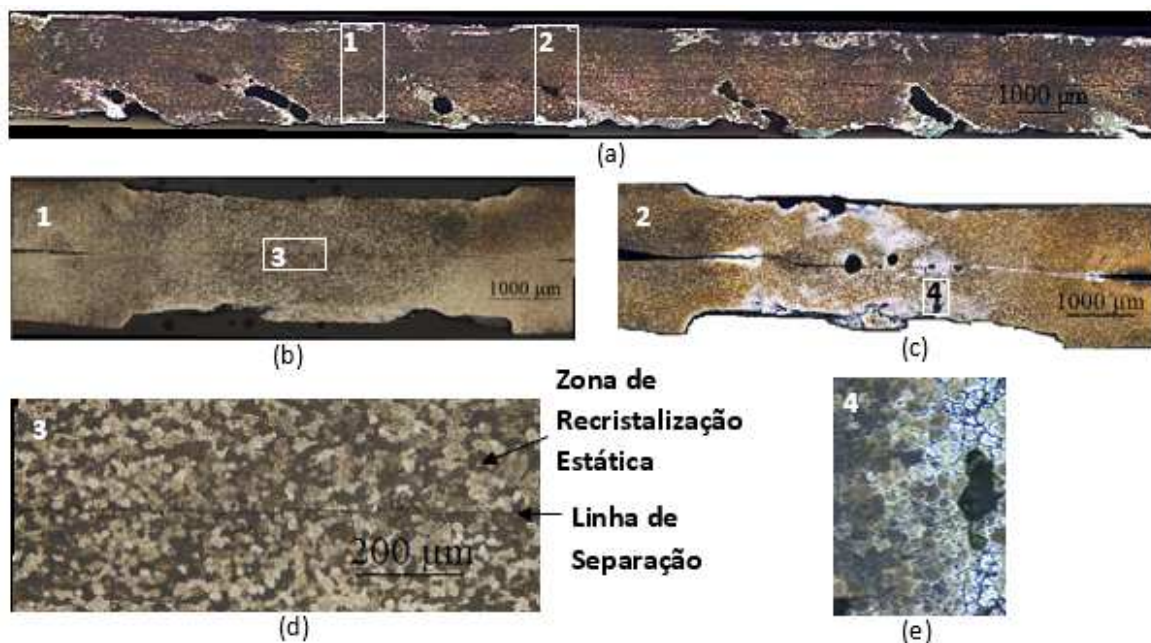


Figura 24 - Microestrutura da amostra 5: (a) secção longitudinal; (b) c) secções transversais das zonas 1 e 2; (s; e) detalhe das zonas 3 e 4 (200x).

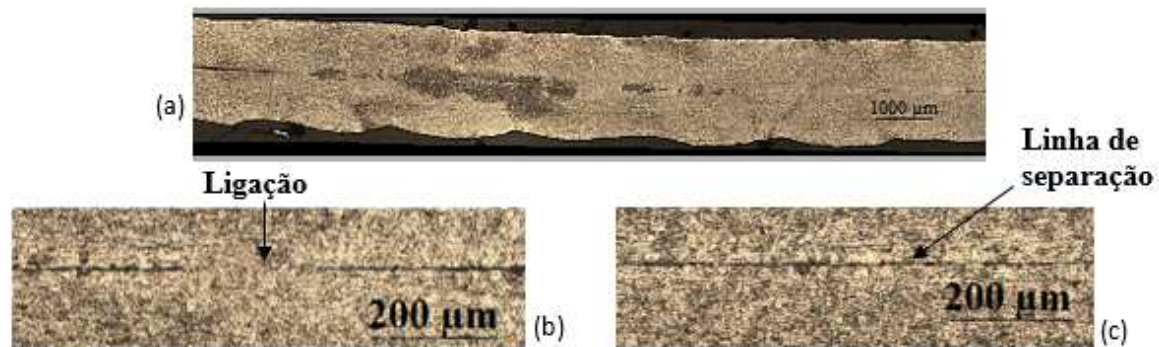


Figura 25 - Microestrutura da amostra 9: (a) secção longitudinal; (b) zona de ligação das chapas; (c) zona não ligada.

Pela observação das secções longitudinais das amostras 5 e 10, pode concluir-se que as soldaduras não são homogêneas. O caso mais evidente é a soldadura 5, representada na Figura 24, que apresenta zonas periódicas, quer com cavidades e porosidades, quer sem defeitos. De modo a melhor evidenciar esta conclusão, na Figura 24.b e c são apresentadas as microestruturas das secções transversais, numa zona isenta de defeitos (detalhe 1), e numa zona com defeitos (detalhe 2). Na primeira imagem (Figura 24.b), pode ver-se que o alumínio não apresenta sinais de fusão, apenas tendo sido notado crescimento de grão (Figura 24.b e d), devido a recristalização estática. Nesta zona nota-se uma linha descontínua na interface das chapas, indicando que a soldadura nas regiões sem defeitos será descontínua. Já na segunda imagem (Figura 24.c), é notório o aparecimento de dendrites (Figura 24.d), sugerindo que houve fusão, sendo que, em toda a sua espessura, o alumínio apresenta um misto de ZF e ZTA. Nesta última zona há ainda crescimento de grão, devido a recristalização estática. Pela secção longitudinal (Figura 24.a) é ainda visível que há fusão em torno das cavidades e porosidades, e pela secção transversal é notada fusão em toda a espessura, levando a concluir que as cavidades e porosidades formadas se devem à projeção de material. Também na secção transversal são notados poros de menores dimensões na zona central, que podem ser atribuídos à contração do material durante a solidificação, à existência de inclusões gasosas de magnésio (elemento volátil) e à presença de hidrogénio. Este fenómeno foi também observado por Rashid *et al* (Rashid M. et al, 2011) num estudo de soldadura por resistência elétrica por pontos na liga de alumínio 5182. Para além destes defeitos, esta amostra contém fissuras nas zonas de material fundido, resultantes da contração de material durante a solidificação. Toda esta análise realizada para a soldadura 5 é observada na soldadura 10, através da Figura 26,

onde é mostrada a sua secção transversal. Na Figura 26.a pode-se ver porosidades de diversos tamanhos. Na Figura 26.b e c, observa-se a microestrutura do MB e da ZTA, respetivamente, notando-se crescimento de grão, e na Figura 26.d, é visível a formação de uma fissura. Ao contrário da amostra 5, a soldadura 10 não apresenta descontinuidades, revelando uma ligação completa das chapas soldadas.

Nas secções transversais das amostras 5 e 10 é visível a redução de espessura na área de atuação dos eléctrodos. No entanto, esta não será quantificada visto que esta redução não está somente associada ao calor e pressão dos eléctrodos, mas também há projeção de material, apresentando uma superfície irregular.

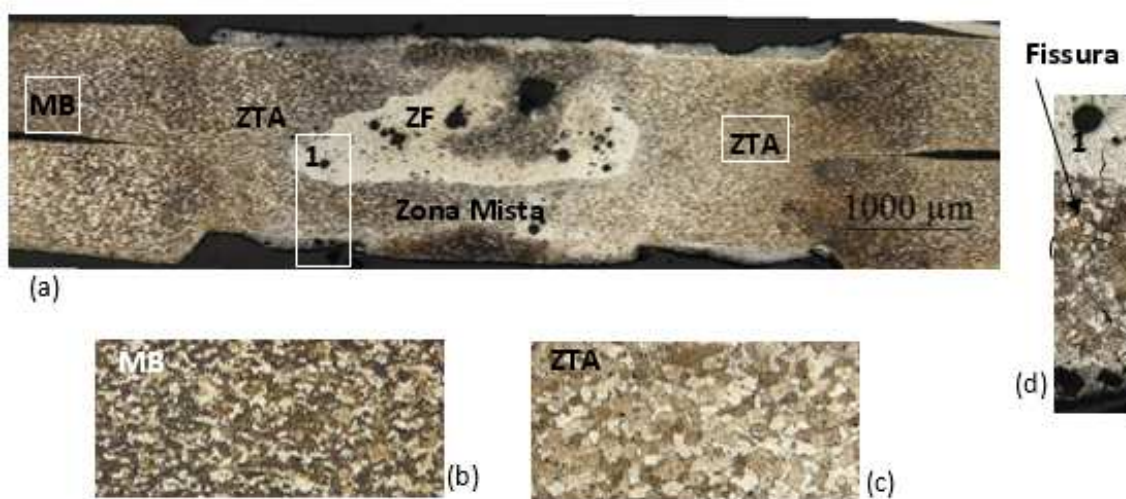


Figura 26 – Microestrutura da amostra 10: (a) secção transversal; (b) detalhe do MB; (c) detalhe da ZTA; (d) detalhe 1 (200x).

Na Figura 25.a, onde está representada a secção longitudinal da amostra de alumínio 9, pode ser observada a linha de interface das chapas, havendo ligação em poucos pontos da soldadura (Figura 25.b e c). Pela análise das secções longitudinal e transversal (Figuras 25 e 27, respetivamente), é possível concluir que ocorreu crescimento de grão, devido à recristalização estática. Não foram também encontrados quaisquer vestígios de fusão, levando a concluir que a ligação foi obtida por pressão a quente. Na secção transversal nota-se ainda a presença de fissuras (Figura 27.d) e de cavidades (Figura 27.a). A fissura aparece nas fronteiras de grão da ZTA, revelando, pela sua morfologia, tratar-se de fissuração a quente na ZTA, originada pela formação de filmes líquidos nas fronteiras de grão, devido à presença de elementos de baixo ponto de fusão. Este tipo de fissuração só pode ser evitado com um controlo adequado da composição da liga (Kou S., 2003). Quanto à cavidade, a sua forma e tamanho, aliados ao facto de estar junto a uma zona descontínua

das chapas, levam a concluir que foi originada pela projeção de material. No entanto, não há evidências de fusão de material nesta amostra. Como na secção longitudinal não há a presença de porosidades nem cavidades, pode-se assumir que se trata de um defeito pontual. Na zona de passagem dos eléctrodos há uma redução de espessura de cerca de 8%, sendo um valor semelhante ao registado na soldadura 2 (9%). O facto de o alumínio ser um material mais macio do que o aço (causando maior redução de espessura), foi compensado pela maior quantidade de calor recebida pelo aço.

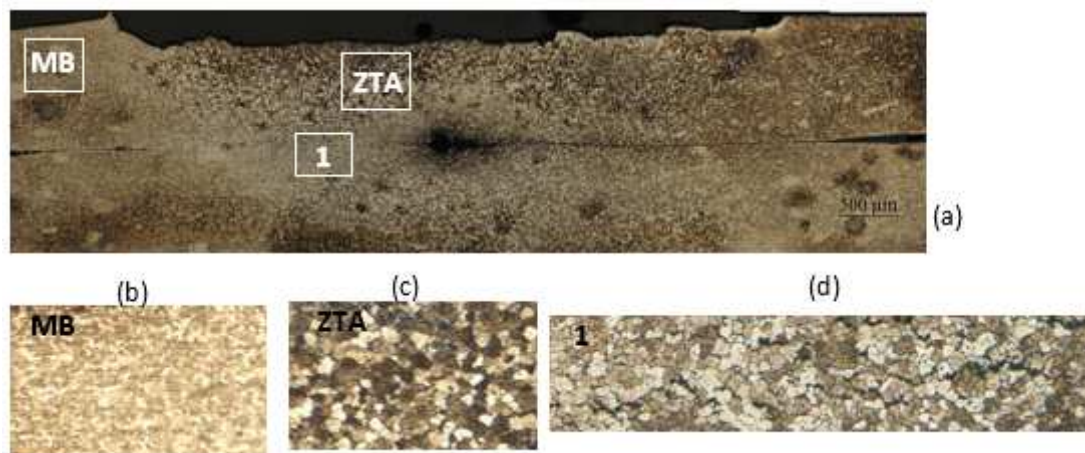


Figura 27 – Microestrutura da amostra 9: (a) secção transversal; (b) detalhes do MB; (c) detalhe da ZTA; (d) detalhe 1.

De modo a melhor entender a relação entre as características morfológicas e microestruturais das soldaduras e os parâmetros de soldadura utilizados na sua produção, na Figura 28 é esquematizada a evolução da potência ao longo do tempo em função dos parâmetros da Tabela 2, onde são simulados dois pulsos de corrente elétrica consecutivos para cada amostra. O tempo que a corrente está ligada no pico máximo de potência na soldadura 5 é dos mais baixos (TM), mas o facto de ter o menor espaçamento entre dois picos consecutivos, leva a que consiga manter o material quente, de modo a que, aquando do pico máximo este já se encontra pré-aquecido e é fundido. Nas zonas fora do período TM, as temperaturas atingidas pelo material são suficientes para promover a sua recristalização. Isto está de acordo com a análise microestrutural da amostra 5, onde foram observadas zonas periódicas com excesso de calor, intercaladas por zonas com calor insuficiente. A soldadura 10 tem um espaçamento entre picos superior ao da amostra 5, sendo compensado pelo aumento de TM, que é significativamente maior, gerando uma quantidade de calor superior à soldadura 5. Esta maior geração de calor na amostra 10

justifica o facto de ter apresentado uma ligação contínua, ao invés da ligação descontínua observada na análise metalográfica da amostra 5. Na amostra 9, apesar de ter sido utilizado o maior valor de potência, o baixo valor de TM e o grande espaçamento entre picos leva a que o material se mantenha a temperaturas baixas, resultando em temperaturas suficientes para a recristalização, mas insuficientes para fusão. Tal como observado na análise microestrutural, a soldadura 9 foi a amostra que apresentou a pior ligação entre os metais base.

Com isto, pode-se concluir que os parâmetros utilizados deviam ter gerado menor quantidade de calor na amostra 10, e maior na soldadura 9. Na soldadura 5 deviam ter sido utilizados parâmetros que reduzissem o calor gerado e o intervalo de tempo entre dois picos de corrente e/ou velocidade de soldadura menor.

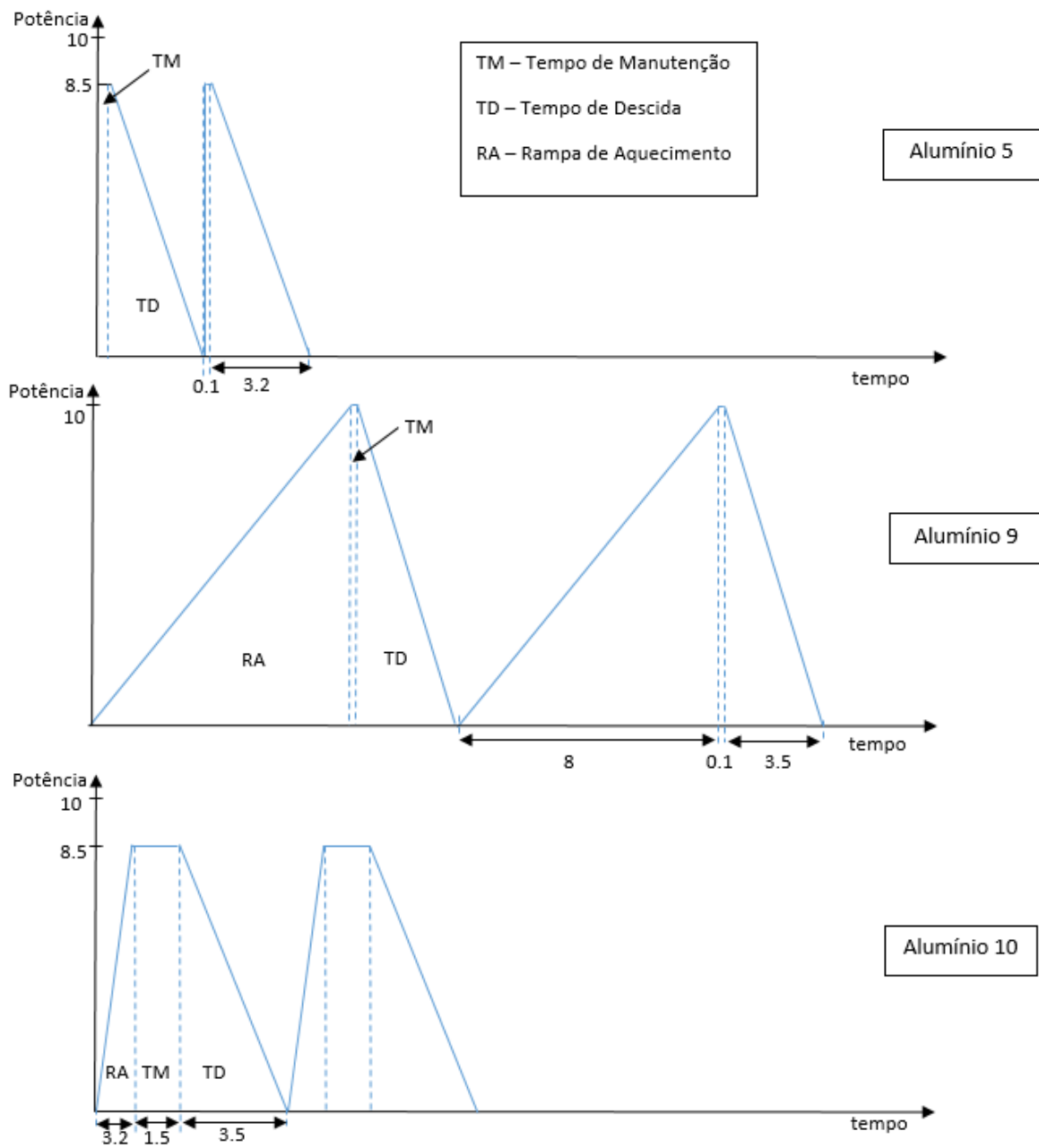


Figura 28 – Representação esquemática dos parâmetros de soldadura para as três amostras de alumínio.

4.1.2.3. Liga de Zinco

Na soldadura das duas amostras (14 e 15) da liga de zinco, os parâmetros utilizados foram os mesmos, sendo as soldaduras apenas diferenciadas pelo facto de as chapas da amostra 15 terem uma largura maior. Analisando as Figuras 29.a e b, é possível concluir que não há diferenças significativas no tamanho do *nugget* das duas amostras. Estas apresentam uma redução de espessura de 9%, similar à registada nas soldaduras de alumínio, amostra 9, e aço, amostra 2. O facto de o zinco ser um material macio, comparado com o aço, e de ter recebido maior quantidade de calor do que as amostras de aço e alumínio, como é observado na Tabela 2, devia levar a uma redução de espessura mais significativa. Tal não aconteceu, assumindo-se que a força utilizada nos eléctrodos foi menor, relativamente aos outros dois materiais.

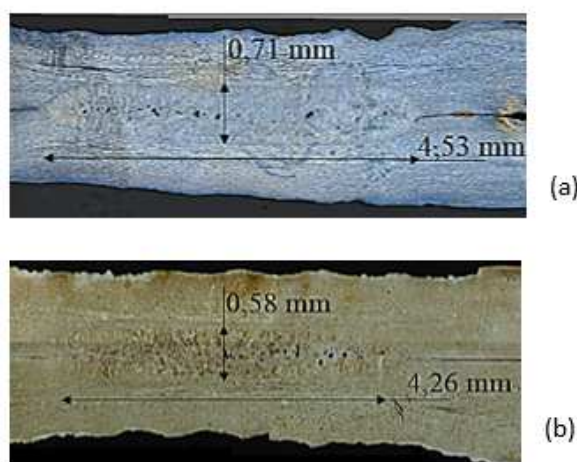


Figura 29 - *Nugget* e dimensões dos metais base das duas amostras de zinco: (a) Zinco 14; (b) Zinco 15.

Na Figura 30 está esquematizada a secção transversal da soldadura 14, onde as três zonas, MB, ZTA e ZF podem ser facilmente distinguidas. Nesta figura são mostrados detalhes ampliados das diferentes zonas. No MB podem ser observados grãos deformados, alinhados na direção de laminagem. Do MB, para a ZTA, nota-se um crescimento de grão, devido à recristalização estática. Também na ZTA, são encontradas várias fissuras, como é mostrado no detalhe 2, originadas pela formação de filmes líquidos nas fronteiras de grão devido à presença de elementos de baixo ponto de fusão na liga. Finalmente, a ZF corresponde a toda a área do *nugget*. O detalhe 3 corresponde à parte exterior do *nugget*, onde se observa a formação de grãos colunares alinhados com a direção de arrefecimento. A dimensão e distribuição dos grãos colunares é semelhante à volta do *nugget*, indicando

que houve um arrefecimento equilibrado com uma igual dissipação de calor em todas as direções. Ainda na ZF, podem-se observar dendrites e grãos equiaxiais, sendo estes últimos encontrados na periferia do *nugget*, na zona de interface das chapas (detalhe 1). No centro do *nugget* são encontrados poros que, devido ao tamanho reduzido e à sua localização, conclui-se que a sua formação está associada à contração de material durante a solidificação.

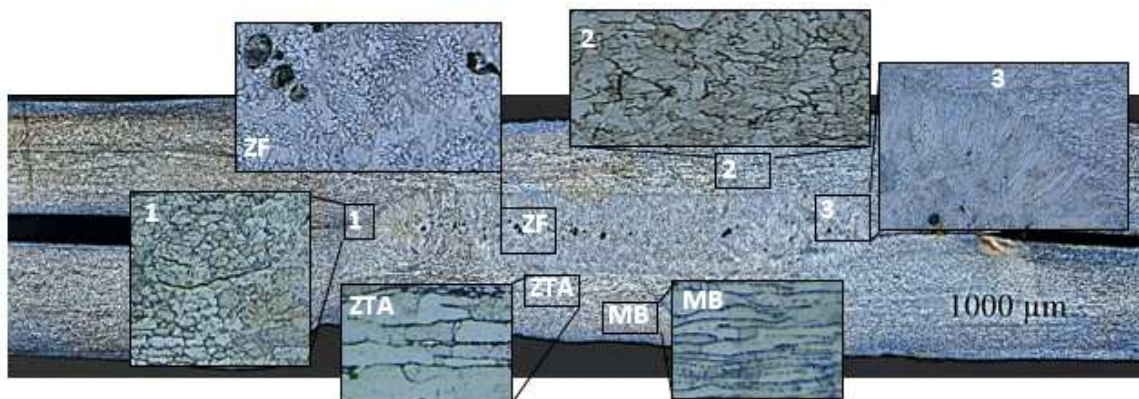


Figura 30 - Microestrutura da secção transversal da amostra 14.

Na Figura 31 está representada a secção longitudinal da soldadura 14, a qual revela uma soldadura homogênea ao longo do comprimento da amostra. É possível observar os vários *nugget* formados, existindo uma pequena sobreposição entre os mesmos, como esquematizado na imagem. São, também, observadas fissuras na ZTA e porosidades na ZF. Tal como na secção transversal, não se observa a presença da linha de interface das chapas na zona do *nugget*.

Com base na análise metalográfica conclui-se que as duas amostras de zinco não apresentam diferenças significativas. Dependendo da aplicação a que será sujeito este material, uma maior sobreposição entre os pontos de soldadura poderia ser requerida, de modo a conferir uma melhor resistência mecânica à ligação. A formação de poros poderá ser reduzida com um aumento controlado da força dos eléctrodos, de modo a não causar grandes reduções de espessura, e a formação de fissuras pode ser evitada através de um controlo adequado da composição da liga.



Figura 31 - Microestrutura da secção longitudinal da amostra 14.

4.1.2.4. Aço-Zinco

Na Figura 32 são apresentadas fotografias da secção transversal da soldadura dissimilar entre a liga de zinco e o aço galvanizado, antes e depois de ataque químico. Em ambas as imagens é notada uma brusca redução de espessura do lado do zinco, devido a este ter sido arrancado da junta por colagem ao eléctrodo. Pela secção transversal (Figura 32) e longitudinal (Figura 33), pode-se observar que há uma linha de interface entre as chapas a soldar, ao longo de todo o comprimento de soldadura. Contudo, existe uma ligação entre a chapa de zinco e o zinco de revestimento do aço galvanizado. Liu *et al* (Liu et al., 2010) observaram, num estudo de soldadura por resistência elétrica por pontos, de uma ligação dissimilar de aço galvanizado-magnésio, uma ligação entre o aço galvanizado e o magnésio, devido à solidificação de zinco fundido na interface das chapas. Na Figura 32.b, pode ser visualizado um *nugget* formado apenas no lado do zinco, e na Figura 33, porosidades no centro do *nugget*, devidas à contração de material durante o arrefecimento. No lado do aço, não foram registadas alterações na microestrutura. Relativamente às soldaduras similares em zinco, 14 e 15, os parâmetros utilizados na soldadura dissimilar apenas diferem na potência utilizada, que foi inferior. No entanto, o zinco na soldadura 16 recebeu uma maior quantidade de calor, levando à formação de um *nugget* de dimensões superiores ao das soldaduras similares em zinco. Segundo Liu *et al* (Liu et al., 2010), isto é devido às diferenças de condutividades elétricas do aço e do zinco. Como o zinco apresenta uma maior condutividade, o calor gerado no lado do aço será maior, servindo como uma fonte de calor adicional para o zinco. Inversamente, a este aço é imposta uma quantidade de calor inferior à gerada nas soldaduras similares em aço, apesar de os parâmetros indicarem o contrário.

O aço não recebeu calor suficiente para ser fundido. A chapa de zinco ficou agarrada aos eléctrodos revelando excesso de calor e/ou refrigeração insuficiente. Poderia ter sido utilizado um fio auxiliar na interface eléctrodo/peça, de modo a não permitir a ocorrência deste fenómeno.



Figura 32 - Secção transversal da amostra 16: (a) antes de ataque químico; (b) após ataque químico.



Figura 33 - Secção longitudinal da amostra 16 e detalhe da porosidade.

4.2. Caracterização Mecânica

4.2.1. Ensaio de Dureza

4.2.1.1. Aço Galvanizado

Na Figura 34 estão representados os perfis de dureza registados para as soldaduras realizadas nos aços. As medições foram realizadas na chapa de cima, na chapa de baixo e, para a amostra 2, na zona de soldadura. A linha a laranja corresponde à dureza média do material base. Pela análise dos gráficos das diferentes amostras, pode constatar-se que os perfis de dureza são semelhantes em todas as linhas, com um aumento de dureza crescente a partir do MB em direção ao centro de soldadura, onde a dureza é máxima (o aumento de dureza é de cerca de 80% para a amostra 2, e de cerca de 45% para as amostras 3 e 20). Comparando as três soldaduras, pode concluir-se que a soldadura 2 foi a que recebeu maior quantidade de calor, traduzindo-se num aumento de dureza mais acentuado e numa maior área afetada, adjacente ao centro de soldadura. No estudo efetuado por Alireza Khosravi *et al* (Khosravi et al, 2012), foi observado um ligeiro aumento de dureza num aço galvanizado, onde houve formação de *nugget* (indicando ter recebido mais calor do que os aços do presente estudo).

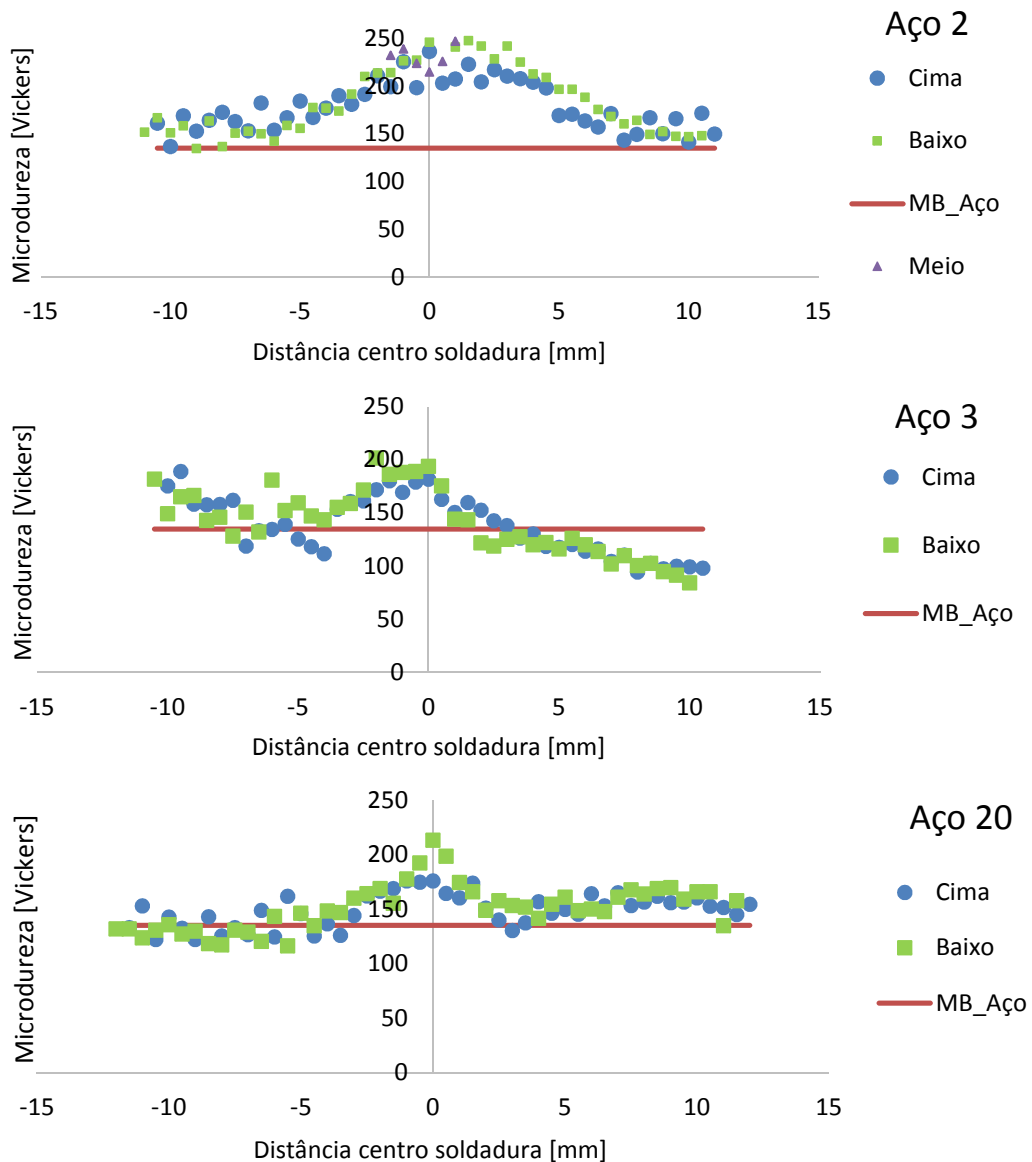


Figura 34- Gráficos dos perfis de dureza das três amostras de aço.

A relação de Hall-Petch indica que a dureza diminui com o aumento do tamanho de grão, e é dada pela seguinte equação:

$$H = H_0 \times k_h d^{-1/2} \quad (5)$$

onde, H_0 e k_h são constantes e d é o tamanho de grão. Pela análise metalográfica da amostra 2, foi visto que o tamanho de grão aumentou na zona soldada, ou seja, pela equação 5, a dureza deveria diminuir. No entanto é constatado o inverso, com um grande aumento de dureza. Assim sendo a dureza desta amostra não está somente relacionada com o tamanho de grão, mas também com a formação de estruturas frágeis durante o

arrefecimento. As temperaturas atingidas permitiram a austenitização total na região da soldadura, formando-se posteriormente bainite e/ou martensite, resultantes do arrefecimento rápido que é característico deste processo de soldadura (Zhang H. e Senkara J., 2006). Na Figura 35 está representado um gráfico que relaciona o tipo de microestrutura dos aços com a dureza e com a percentagem de carbono que, para o aço em estudo, é de 0.11%. De acordo com o gráfico, a microestrutura na região das soldaduras será um misto de bainite/martensite. Nas amostras 3 e 20 as temperaturas não são tão elevadas como na amostra 2, levando a que ocorra apenas austenitização parcial, seguida de arrefecimento rápido, resultando na formação de estruturas bainíticas/martensíticas em menor quantidade. O gráfico da Figura 35 indica a formação de bainite numa matriz ferrítica-perlítica, para estas soldaduras.

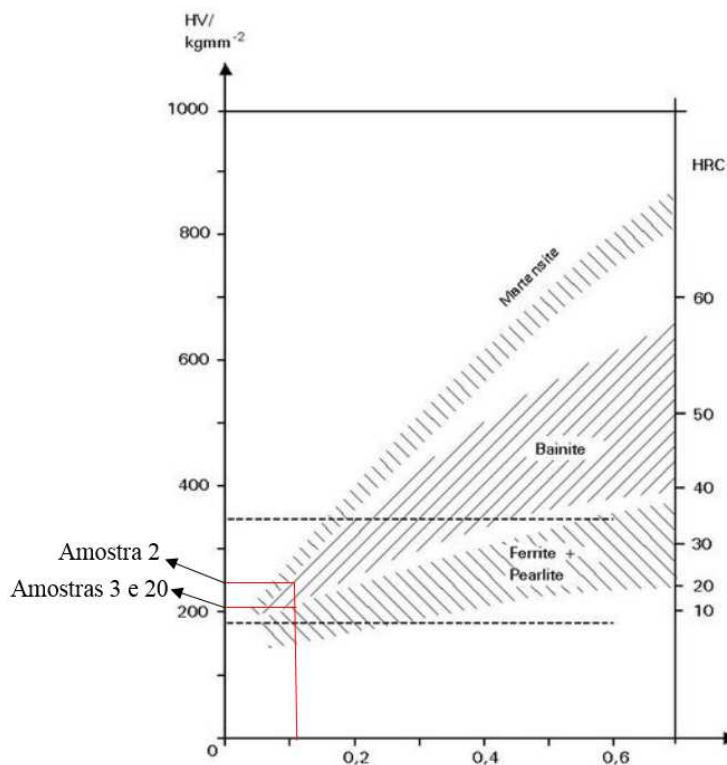


Figura 35 – Efeito da variação da quantidade de carbono e de dureza na microestrutura de aços (Costa M., 2013).

4.2.1.2. Liga de Alumínio

Na Figura 36 estão representados os perfis de dureza para as três soldaduras em alumínio. Pela análise dos gráficos, os resultados das medições realizadas nas chapas superior e inferior são idênticos, com uma redução de espessura progressiva desde o MB até à zona de soldadura, onde é atingido o valor mínimo de dureza, na ordem dos 25%. Na

amostra 5 foi realizada uma terceira linha de ensaios na zona central, que não está aqui representada, resultando em durezas com valores muito baixos devido às porosidades presentes. É registado na literatura uma redução de dureza em soldaduras nas ligas de alumínio 5xxx, sendo justificado pelo amaciamento de material devido ao efeito de recozimento, resultante da recristalização (Leitão C. et al, 2012).

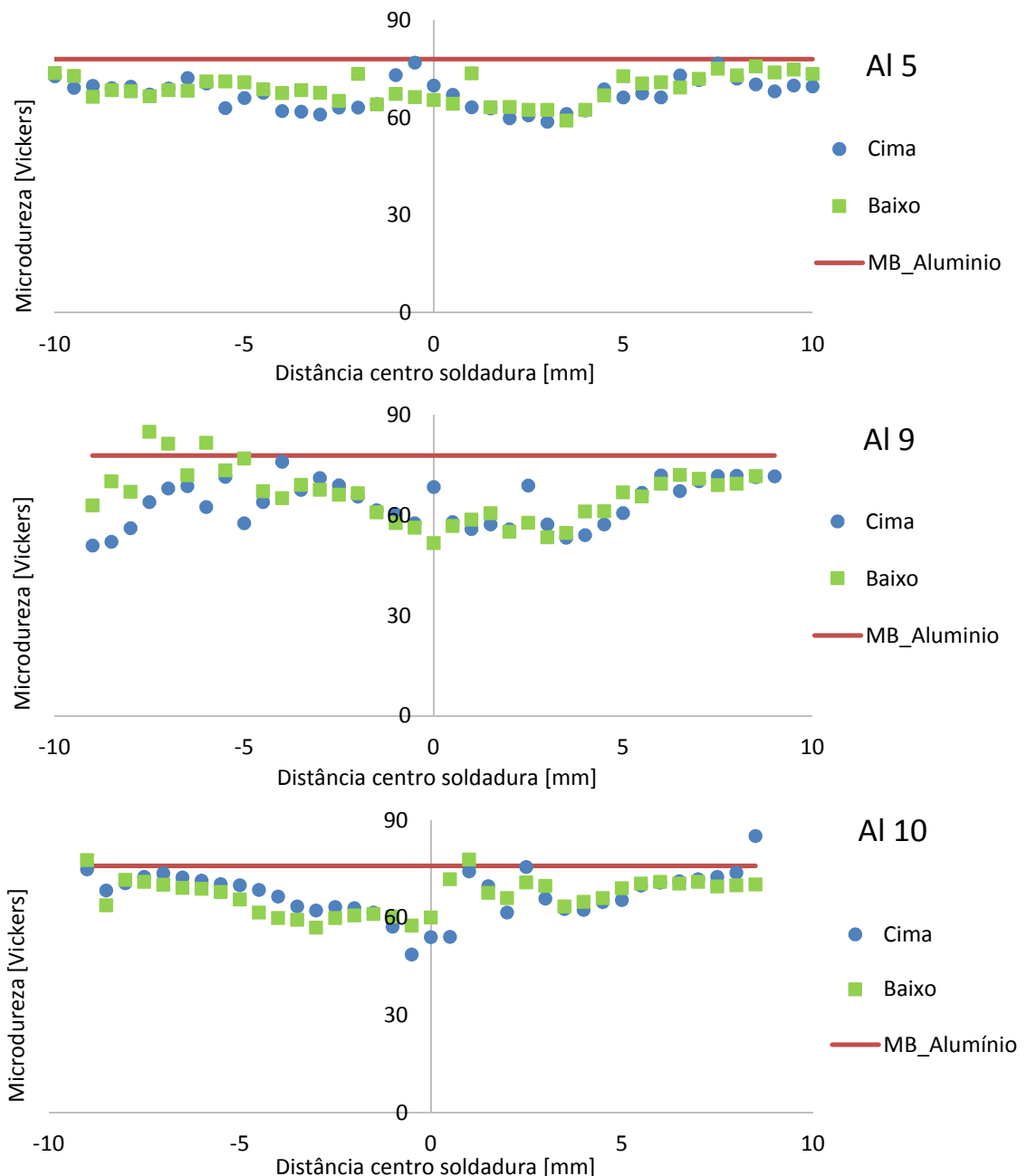


Figura 36 - Gráficos dos perfis de dureza das três amostras de alumínio.

4.2.1.3. Liga de Zinco

Na Figura 37 estão representados os perfis de dureza para as duas amostras da liga de zinco. É de observar que os dois gráficos são semelhantes, não existindo uma variação de dureza significativa, desde o MB até ao centro de soldadura. Apenas na soldadura 14 é visível um ligeiro decréscimo de dureza, registado na chapa inferior, no centro de soldadura, o qual se deve a terem sido feitas medições na zona de porosidades. A não variação de dureza nesta liga de zinco foi, também, observada num estudo efetuado por Carlos Leitão *et al* (Leitão C. et al, 2012), em soldaduras por fricção por FSW. Segundo Muster *et al* (Muster T. et al, 2006) a baixa solubilidade de titânio resulta na precipitação de uma fase intermetálica, $TiZn_{15}$, a qual, segundo Pantazopoulos (Pantazopoulos G. e Sampani A., 2006), é uma fase dura. Para além disto, Muster *et al* (Muster T. et al, 2006) referem que outras fases secundárias, mais duras, podem ser formadas nas ligas Zn-Cu-Ti, para arrefecimentos lentos. Neste tipo de soldadura a solidificação é rápida, mas pode haver certos pontos da microestrutura que levem mais tempo a solidificar, havendo a formação destas fases duras. O endurecimento desta liga, com a formação das fases secundárias e, principalmente com a formação da fase de $TiZn_{15}$, foi compensado pelo recozimento de material durante a geração de calor.

4.2.1.4. Aço-Zinco

Na Figura 38 está representado o gráfico com os perfis de dureza da amostra de aço-zinco. Como se pode ver na figura, o aço não apresenta uma distribuição uniforme da dureza, apesar de, no geral, apresentar uma dureza similar ao MB. Como foi referido na análise metalográfica, apesar de ter sido utilizada uma maior potência, esta amostra recebeu menos calor comparativamente com as três amostras de aço. Sendo assim, as temperaturas atingidas não foram suficientes para promover a austenitização total da microestrutura, não permitindo a formação de estruturas frágeis, nem para promover o recozimento do material, não tendo lugar qualquer amaciamento. O zinco apresenta um ligeiro aumento de dureza na zona de soldadura, o que não se verificou nas amostras de zinco 14 e 15. Deste modo pode assumir-se que, o facto de ter recebido uma maior quantidade de calor, permitiu que ocorresse a formação de estruturas frágeis, tal como $TiZn_{15}$.

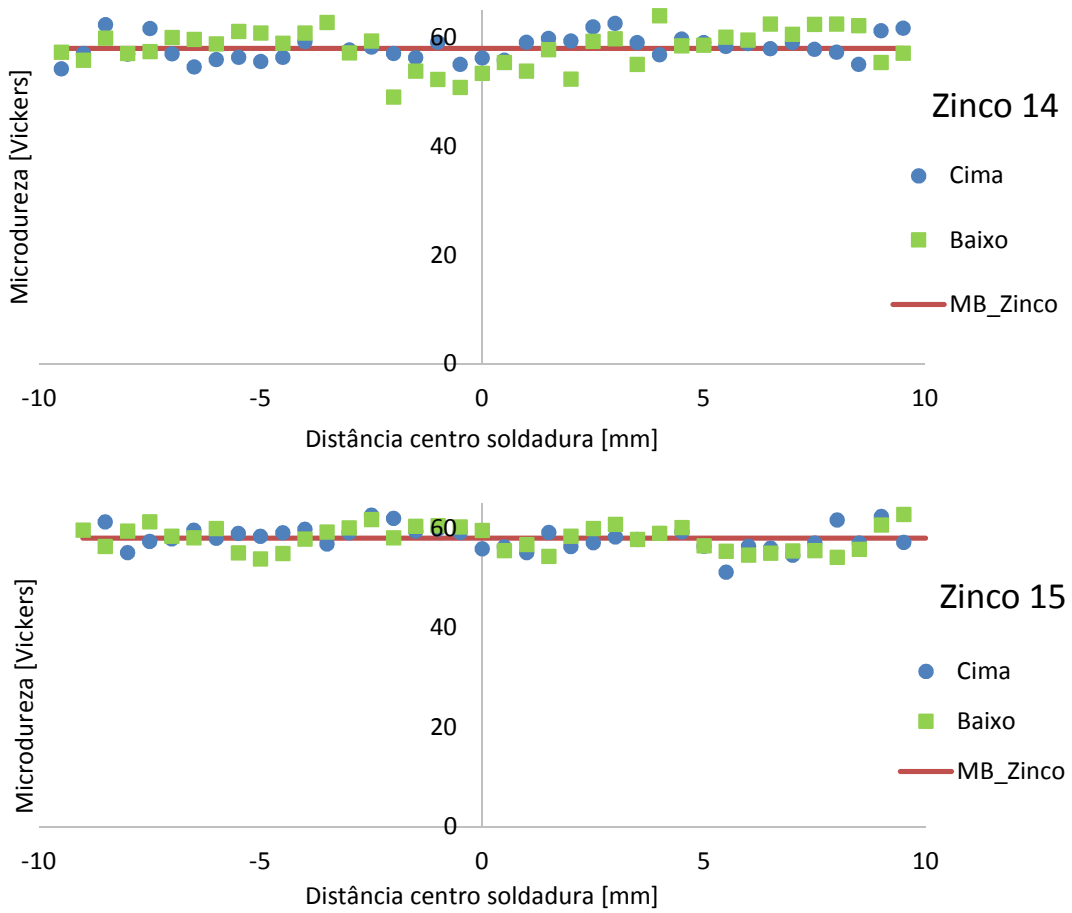


Figura 37 - Gráficos dos perfis de dureza das duas amostras de zinco.

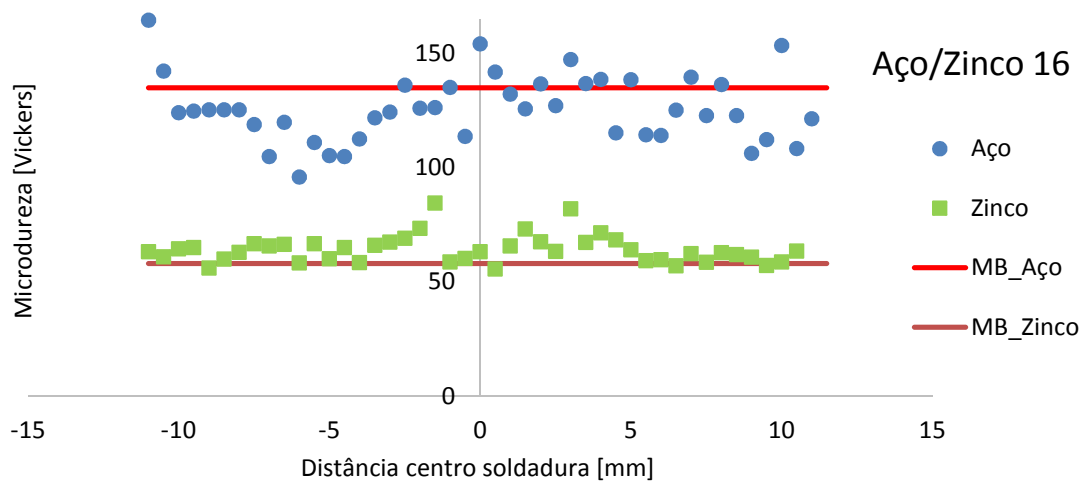


Figura 38 - Gráfico do perfil de dureza da amostra de aço-zinco.

4.2.2. Ensaios de Tração

Apenas a amostra 15 da liga de zinco e as três amostras de aço galvanizado foram sujeitas a testes de tração, devido às restantes não apresentarem as dimensões mínimas para proceder aos ensaios.

4.2.2.1. Aço Galvanizado

Na Figura 39.a, estão representadas as curvas Força/Deslocamento das três amostras de aço, obtidas nos ensaios do tipo C. Foi também registado que a rutura ocorreu na zona de soldadura, para as amostras 3 e 20, e no MB, para a amostra 2. Tal como se pode ver na figura, a amostra 2 é a que apresenta maior resistência mecânica, tal como seria de prever após as análises de metalografia e de dureza. A resistência desta soldadura é semelhante à do MB, tendo sofrido rutura para uma carga de 4.5 kN, o que é desejável do ponto de vista estrutural. A grande redução na ductilidade da soldadura (75%), relativamente ao MB, deve-se à não uniformidade da deformação durante o ensaio. A zona de soldadura não apresentou deformação, tendo sido o MB deformado até à rutura.

Tal como foi analisado nas secções anteriores, as amostras 2 e 3 não apresentavam soldaduras de qualidade, o que pode ser comprovado através da análise dos gráficos, que mostram que estas soldaduras sofreram rutura para valores muito reduzidos de carga aplicada (2.2 kN), ou seja, muito inferiores à tensão limite de elasticidade do MB, que foi atingida para uma carga de 4 kN.

Nos ensaios do tipo S (Figura 39.b), as três soldaduras apresentaram resistência mecânica similar à do MB, e a rutura ocorreu no MB. Foi registada uma redução de ductilidade de 65%, estando associada ao facto de os aços apresentarem um aumento de dureza e espessura na zona de soldadura, levando a que esta região não se deforme, movendo-se em bloco durante o ensaio. Isto pode ser visualizado na Figura 40, onde se mostra, a título de exemplo, o mapa de deformações para a amostra 3. Por esta figura, pode-se visualizar que não há deformação na zona de soldadura, e que a deformação no MB é uniforme e de cerca de 4.5%.

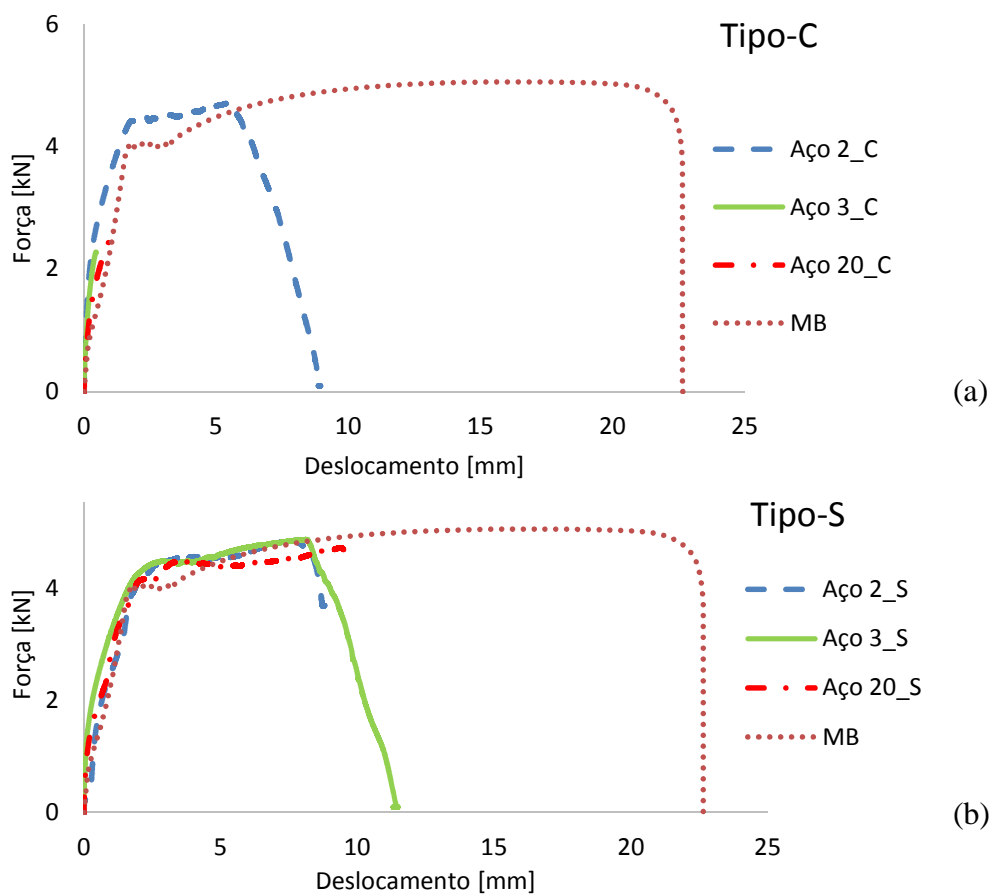


Figura 39 – Gráficos das curvas Força/Deslocamento das amostras de aço: (a) Ensaios do Tipo C; (b) Ensaio do Tipo S.

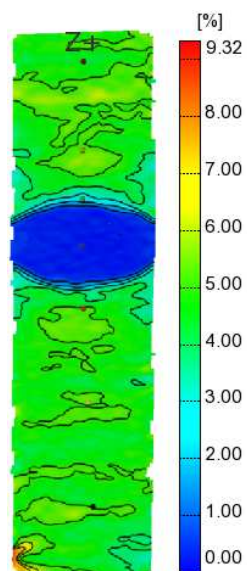


Figura 40 – Mapa de deformações da amostra 3 - Ensaio do Tipo S.

4.2.2.2. Liga de Zinco

Na Figura 41 estão representadas as curvas Força/Deslocamento da amostra 15 da liga de zinco, para os ensaios do tipo C e S. Nos dois tipos de ensaios a ruptura ocorreu na ZTA, o que é explicada pela presença de fissuras nesta zona, tal como registado aquando da análise metalográfica. Como se pode ver na figura, nos ensaios do tipo C, a amostra apresentou resistência mecânica similar à do MB, sofrendo ruptura para uma carga de 2.6 kN, revelando que a pouca sobreposição dos *nugget* foi suficiente para apresentar boa resistência. Foi ainda notada uma grande redução de ductilidade, cerca de 67%, devida à presença de fissuras na ZTA. Nos ensaios do tipo S, a resistência mecânica foi ligeiramente inferior à do MB, tendo sofrido ruptura para uma carga de 2.5 kN e foi registada uma diminuição de ductilidade de 11%. No decorrer do ensaio o MB foi-se deformando até a ZTA ser solicitada e não aguentar a carga, sofrendo ruptura. Estes ensaios de tração revelaram que as fissuras presentes na ZTA podem comprometer o bom desempenho da ligação.

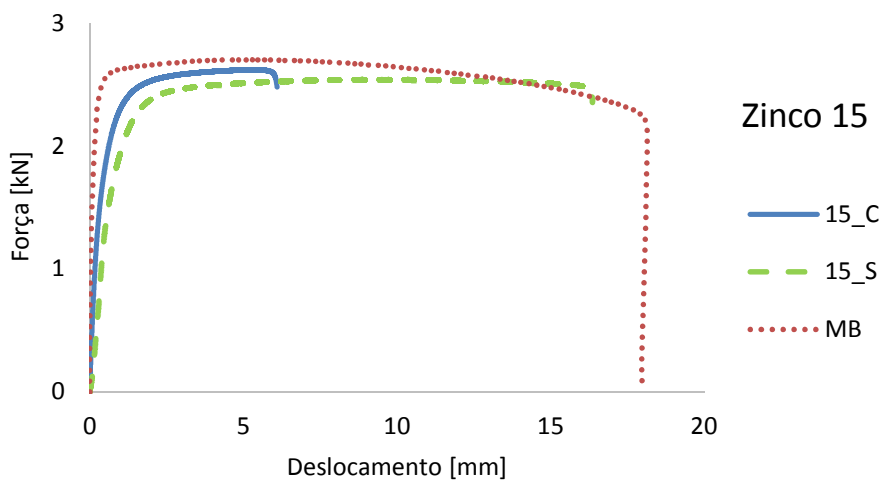


Figura 41 - Gráficos das curvas Força/Deslocamento da amostra 15 de zinco: Ensaios do Tipo C e do Tipo S.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram analisadas soldaduras similares, de chapas sobrepostas da liga de zinco *zintek*, da liga de alumínio 5754-H22 e do aço galvanizado DX51D, e ainda, uma ligação dissimilar de aço-zinco. Todas as soldaduras foram produzidas utilizando o processo de soldadura por roletes.

As três soldaduras em aço galvanizado não revelaram fusão, devido à baixa quantidade de calor gerado. A amostra que foi sujeita a uma maior quantidade de calor, foi a única a sofrer recristalização, e obteve os maiores valores de resistência mecânica e dureza. Ainda para esta amostra, foi registada uma resistência semelhante à do MB, revelando estar bem soldada, e observou-se que a ligação foi obtida por pressão a quente promovida pela força dos elétrodos e pelo calor gerado. As outras duas amostras obtiveram resultados semelhantes, uma em relação à outra, apresentando baixa resistência mecânica em tração e aumento de dureza relativamente ao MB. A união estabelecida entre as chapas foi devida à ligação zinco-zinco do revestimento de aço.

A soldadura em alumínio que recebeu maior quantidade de calor revelou estar perfeitamente soldada em todo o comprimento de soldadura. Contudo, o calor foi excessivo, resultando em zonas com um misto de fusão e grãos recristalizados em toda a espessura, em projeções de material, e na formação de porosidades e fissuras quer na ZF, quer na ZTA. Na amostra com a menor quantidade de calor gerado não houve fusão de material, tendo apenas havido recristalização. Foi observada a ligação das chapas em poucos pontos da soldadura, nos quais a ligação entre as chapas foi obtida por pressão a quente. Foram também notados poros e fissuras. A terceira amostra recebeu uma quantidade de calor excessiva e apresentou estar soldada nas zonas de geração de calor. Foi observado o aparecimento de poros, fissuras e projeções de material. Apesar de todas as soldaduras terem sido sujeitas a ciclos térmicos diferentes, os perfis de dureza traçados foram semelhantes, notando-se um ligeiro decréscimo de dureza na zona de soldadura, devido ao efeito de recozimento.

A soldadura da liga de zinco foi a única a apresentar a formação de um *nugget*, na zona soldada. Foi constatada a presença de pequenos poros no centro do *nugget* e de

fissuras na ZTA. A resistência mecânica foi similar à do MB e não foi registada variação de dureza, devido à anulação do efeito de recozimento com a formação de fases duras.

A soldadura dissimilar de aço-zinco revelou uma ligação zinco-zinco, entre a liga de zinco e o zinco de revestimento do aço. Devido às diferenças de condutividades elétricas dos dois materiais, o aço aqueceu o zinco, levando à formação de um *nugget* de dimensões superiores às registadas nas soldaduras similares de zinco e a um aumento de dureza. No aço não foram observadas alterações quer de microestrutura, quer de dureza.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo de soldadura por roletes é um processo sobre o qual os estudos realizados e as informações disponíveis são escassas. O presente trabalho permitiu um estudo aprofundado sobre esta tecnologia, tendo sido recolhidas as informações existentes na literatura, e agregadas sob a forma do estado de arte escrito nesta tese. Este conjunto de informações constitui uma boa base de partida para a compreensão do processo e da influência da variação de parâmetros na qualidade das soldaduras. Para além disto, a parte experimental e a análise feitas neste trabalho, vêm complementar a base teórica, e permitem ter a noção do que correu bem e do que pode ser melhorado. Assim sendo, uma sugestão para trabalhos futuros, é a melhoria do presente estudo, com a realização de novas soldaduras, nos mesmos materiais base, cabendo ao autor a realização de um estudo prévio sobre o processo, de modo a fazer a seleção dos parâmetros a utilizar. Outra sugestão, é alargar o estudo a novos materiais, ainda não analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- aalco. http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5754-H22-Sheet-and-Plate_153.ashx (Acedido em julho de 2014).
- Amada Miyachi. “Amada Miyachi.”
<http://www.amada.co.jp/miyachi/e/useful/popup/pop01.html> (Acedido em julho de 2014).
- Committee, A. H. (2004). *Metallography and Microstructures* (Vol. 9). ASM International.
- Committee, A. I. (1990). *Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (10^o ed., Vol. 2). ASM International.
- Committee, T. W. (1969). *Welding Handbook* (6^o ed., Vol. 2). American Welding Society
- Committee, T. W. (1972). *Welding Handbook - Metals and Their Weldability* (6^o ed., Vol. 4). American Welding Society.
- Costa, M. I. (2013). *Surface Modification of Structural Steels by Friction Stir Processing*. FCT-Universidade de Coimbra.
- Galvão, I., Leitão, C., Loureiro, A., & Rodrigues, D. (2012). Friction Stir Welding of Very Thin Plates.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems* (4^a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- ISF - Welding Institute; RWTH - Aachen University. (2003). Welding Technology 1 Welding and Cutting Technologies. 100-114.
- J.F. Oliveira Santos, L. Q. (1993). *Processos de Soldadura* (Vol. 2). Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade.
- Kelkar, Girish P. *WJM Technologies*. <http://www.welding-consultant.com/WeldCracks.pdf> (Acedido em junho de 2014).
- Kelkar, G. (2007). Improving Heat Balance in Resistance Welding.
- Khosravi, A., Halvae, A., & Hasannia, M. H. (2012). Weldability of electrogalvanized versus galvanized interstitial free steel sheets by resistance seam welding

- Kou, S. (2003). *Solidification and Liquation Cracking Issues in Welding*.
- Leal, R. (2011). *Soldadura por Fricção Linear de Elementos de Baixa Espessura*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Liu, L., Xiao, L., Feng, J. C., Tian, Y., Zhou, S., & Zhou, Y. (2010). The Mechanisms of Resistance Spot Welding of Magnesium to Steel.
- Miyachi Unitek Corporation. *Fundamentals of Small Parts Resistance Welding*. 2013.
- Muster, T. H., Ganther, W. D., & Cole, I. S. (2006). The influence of microstructure on surface phenomena: Rolled zinc.
- Pantazopoulos, G., & Sampani, A. (2006). Analysis of a weld failure of a rolled Zn-alloy strip – A case study.
- Rashid, M., Medley, J. B., & Zhou, Y. (2011). Nugget formation and growth during resistance spot welding of aluminium alloy 5182. (C. M. Quarterly, Ed.)
- Rukkii. Resistance Welding Manual. (Acedido em junho de 2014)
- Silva, C. L., & Paranhos, R. (2003). *Infosolda*. Obtido de <http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/fissurao-a-quente.pdf>
- TWI. *TWI - FAQ: What is hot cracking?:* <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking> (Acedido em junho de 2014)
- Weman, K. (2003). *Welding processes handbook*. Woodhead Publishing Ltd.
- Zhang, H., & Senkara, J. (2006). *Resistance Welding - Fundamentals and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Zintek. *Zintek*, de http://www.zintek.it/en/content/Product~30/Zintek_in_architecture~50 (Acedido em junho de 2014)
- Zipperian, D. C. (2011). *Metallographic Handbook*. PACE Technologies, USA

ANEXO A



Figura 42 – Ampliação da Figura 17.

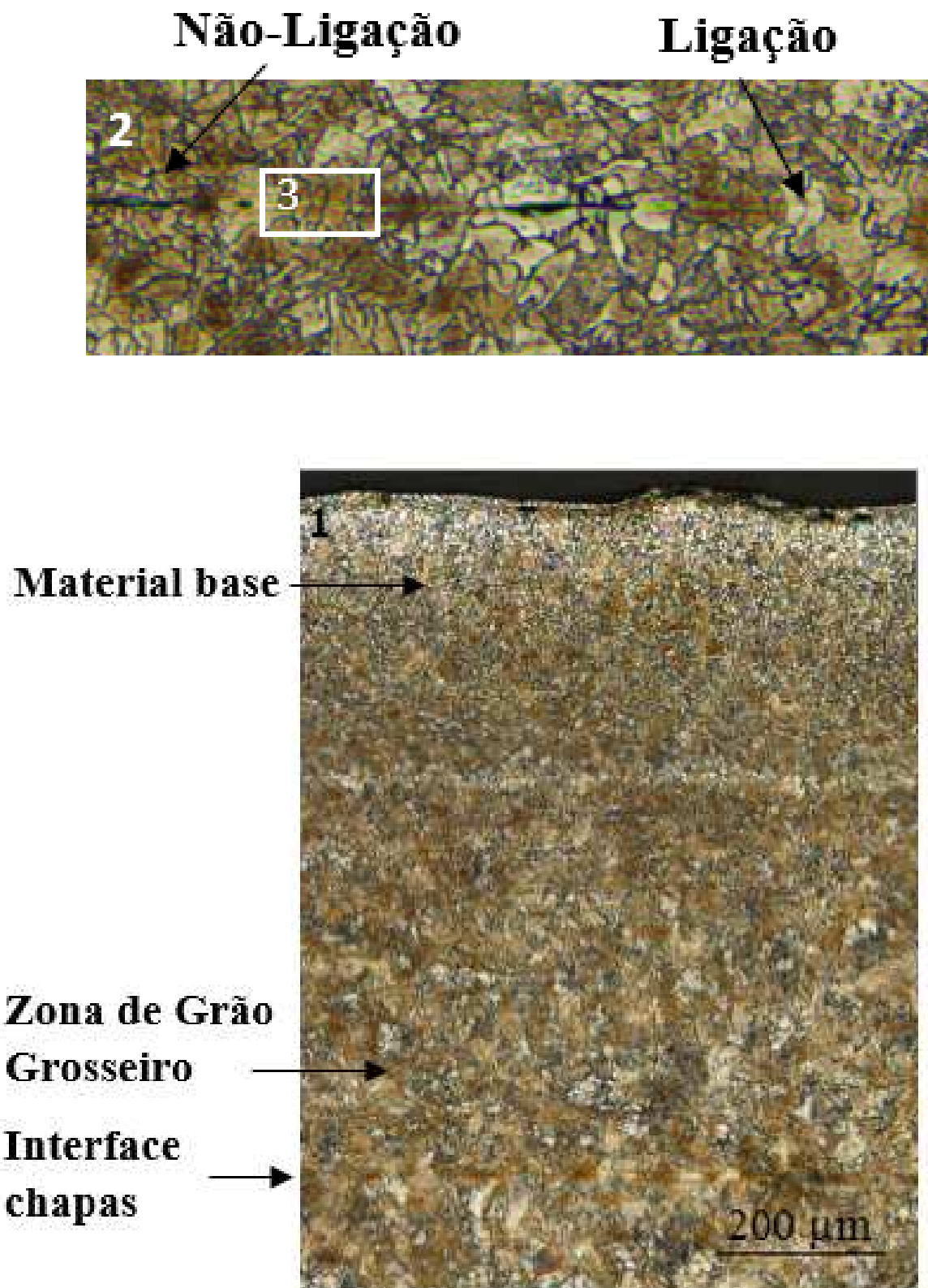


Figura 43 – Ampliação da Figura 20.b e c.

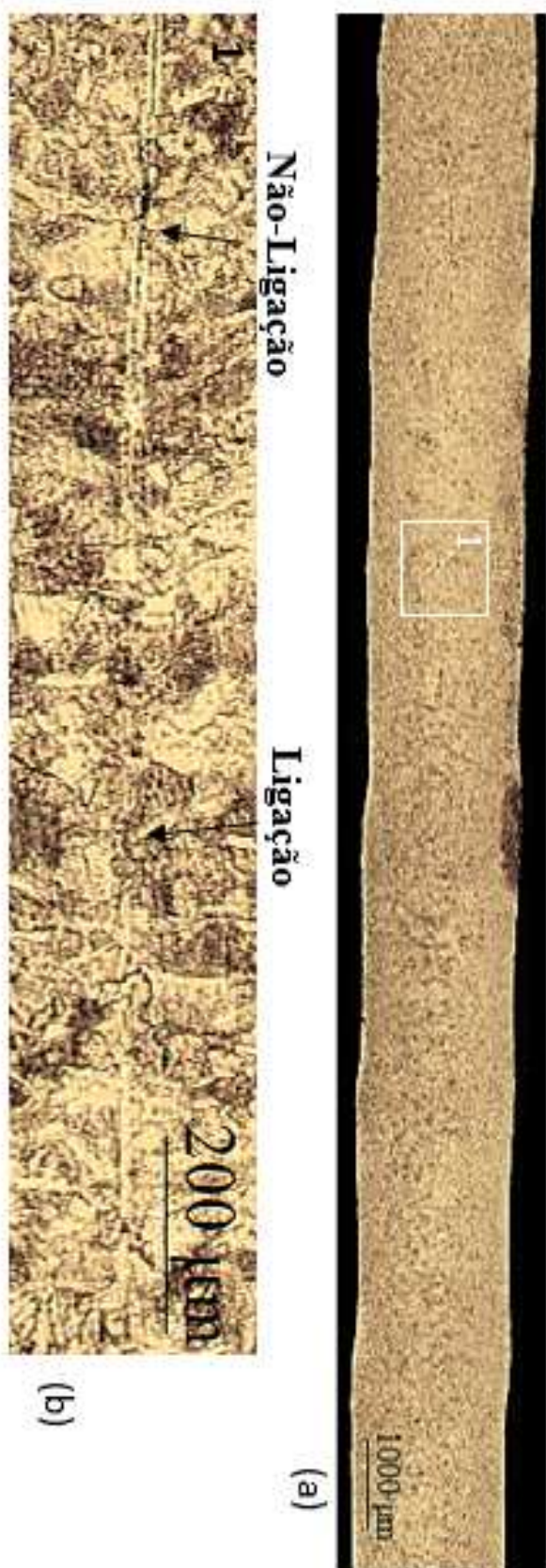


Figura 44 – Ampliação da Figura 21.

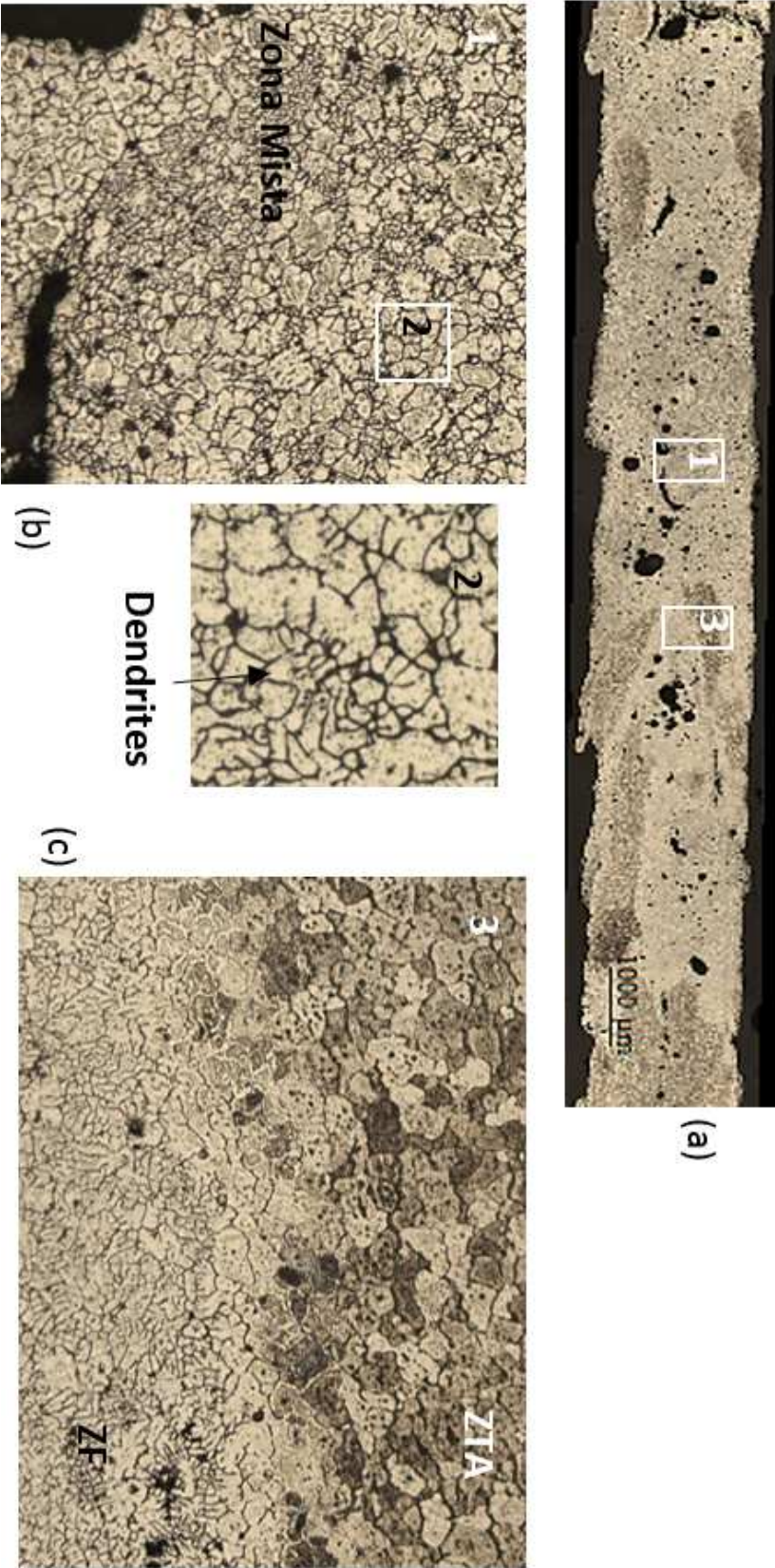


Figura 45 – Ampliação da Figura 23.

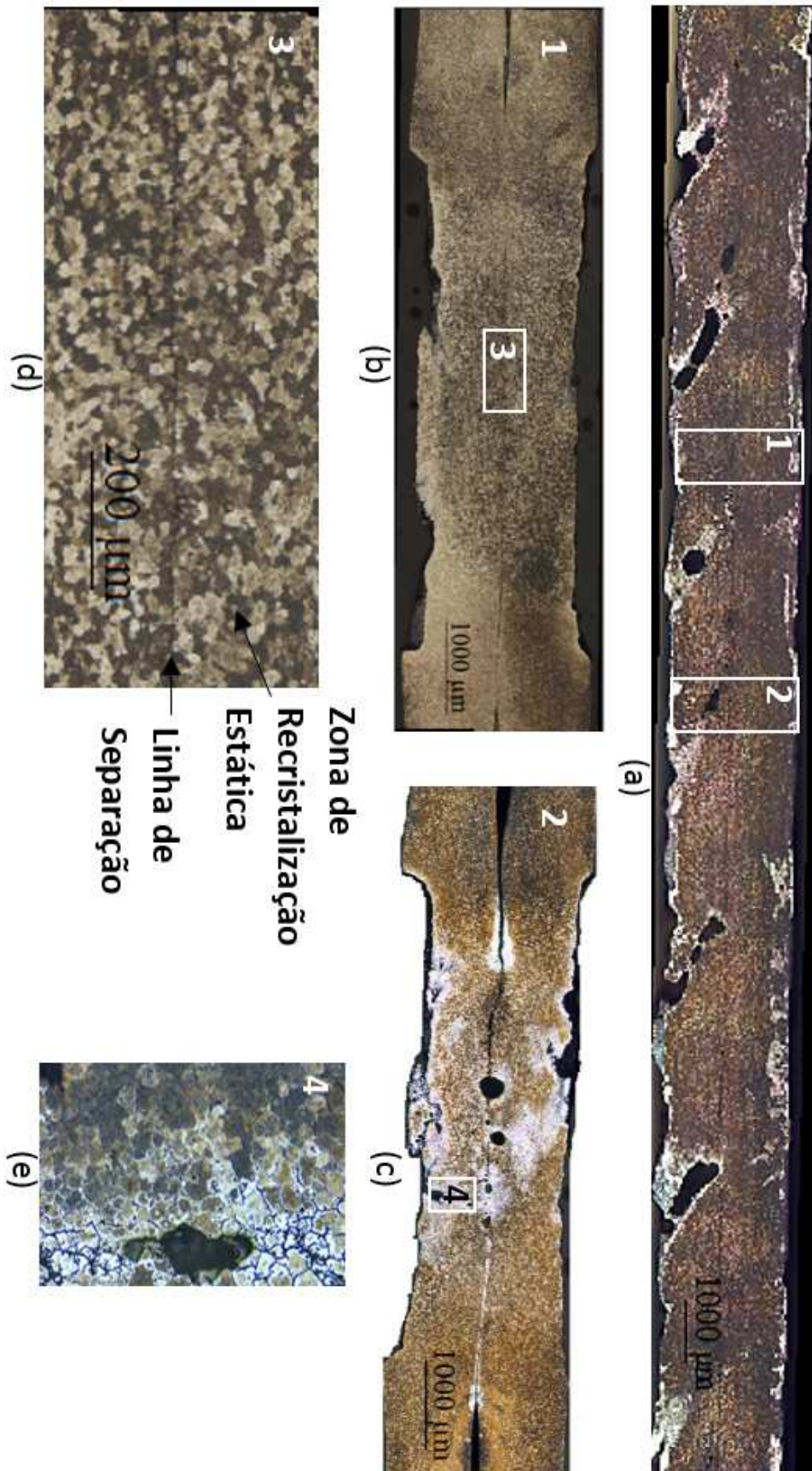


Figura 46 – Ampliação da Figura 24.

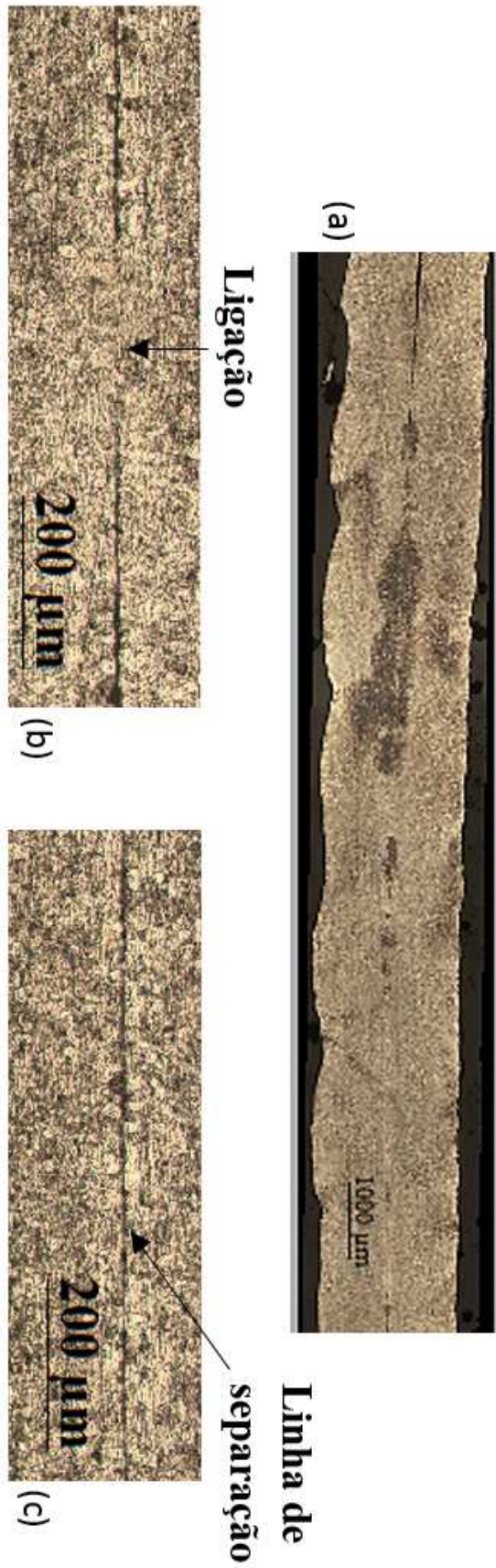


Figura 47 – Ampliação da Figura 25.

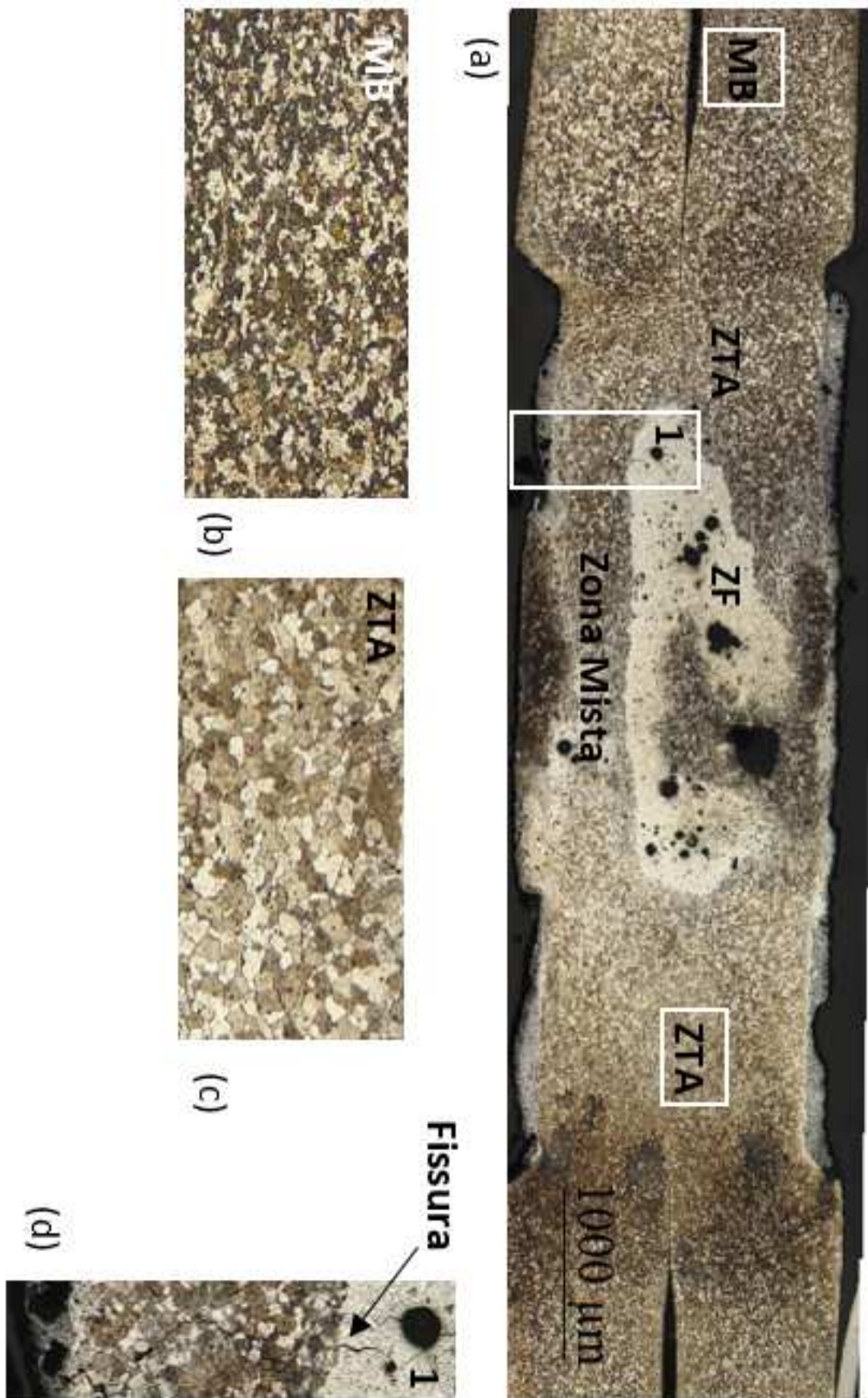


Figura 48 – Ampliação da Figura 26.

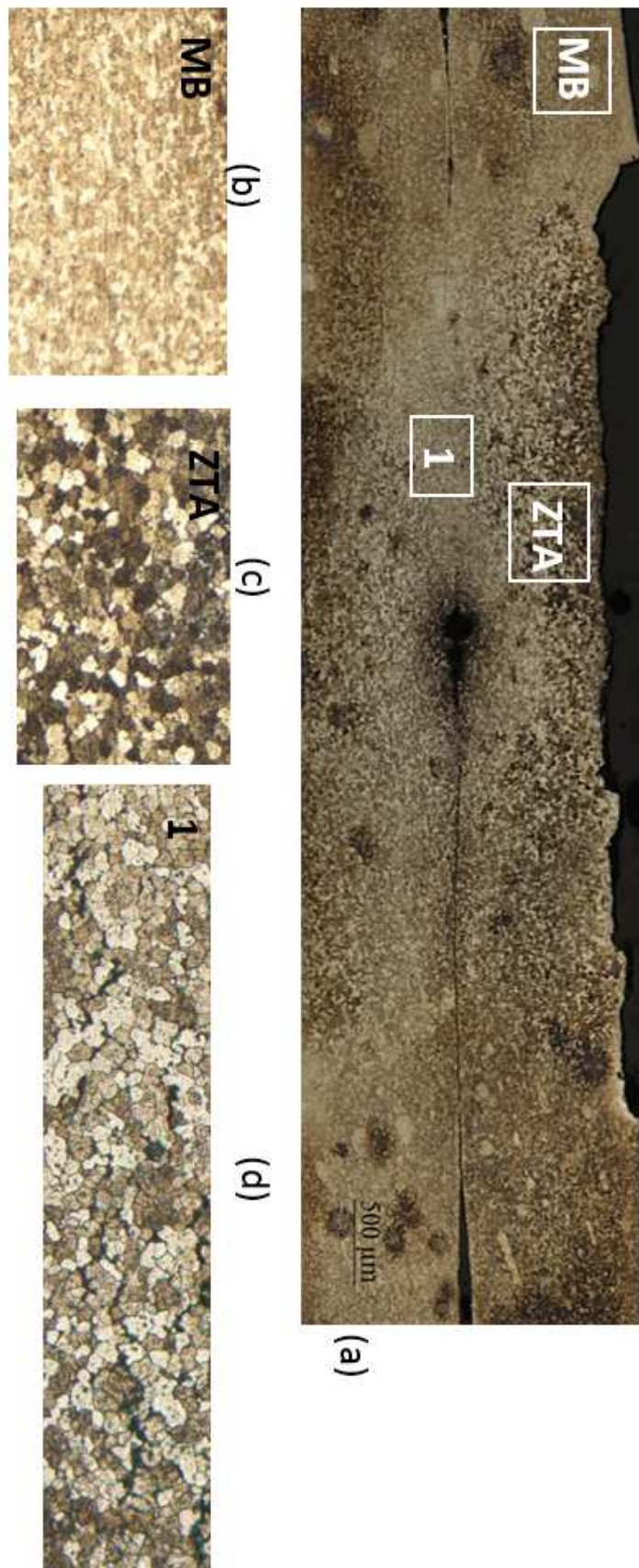


Figura 49 – Ampliação da Figura 27.

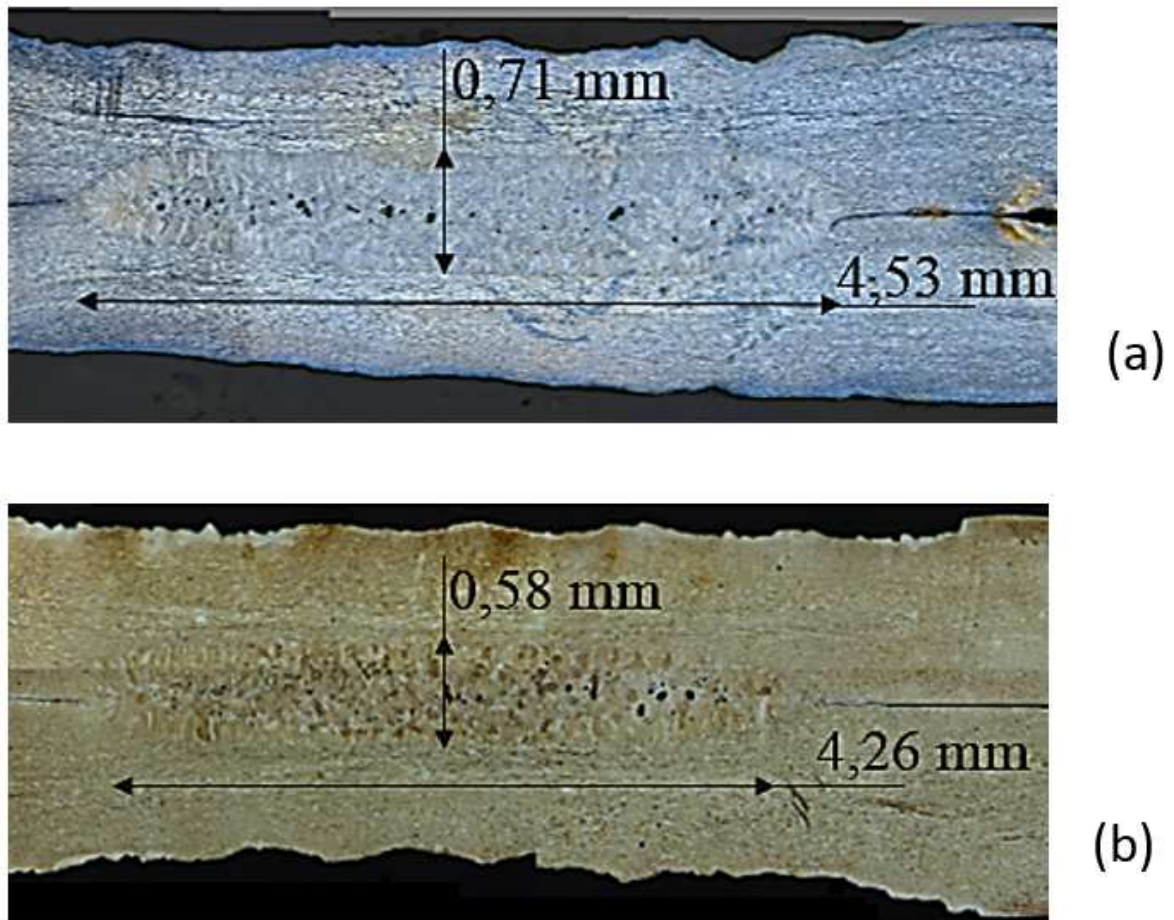


Figura 50 – Ampliação da Figura 29.

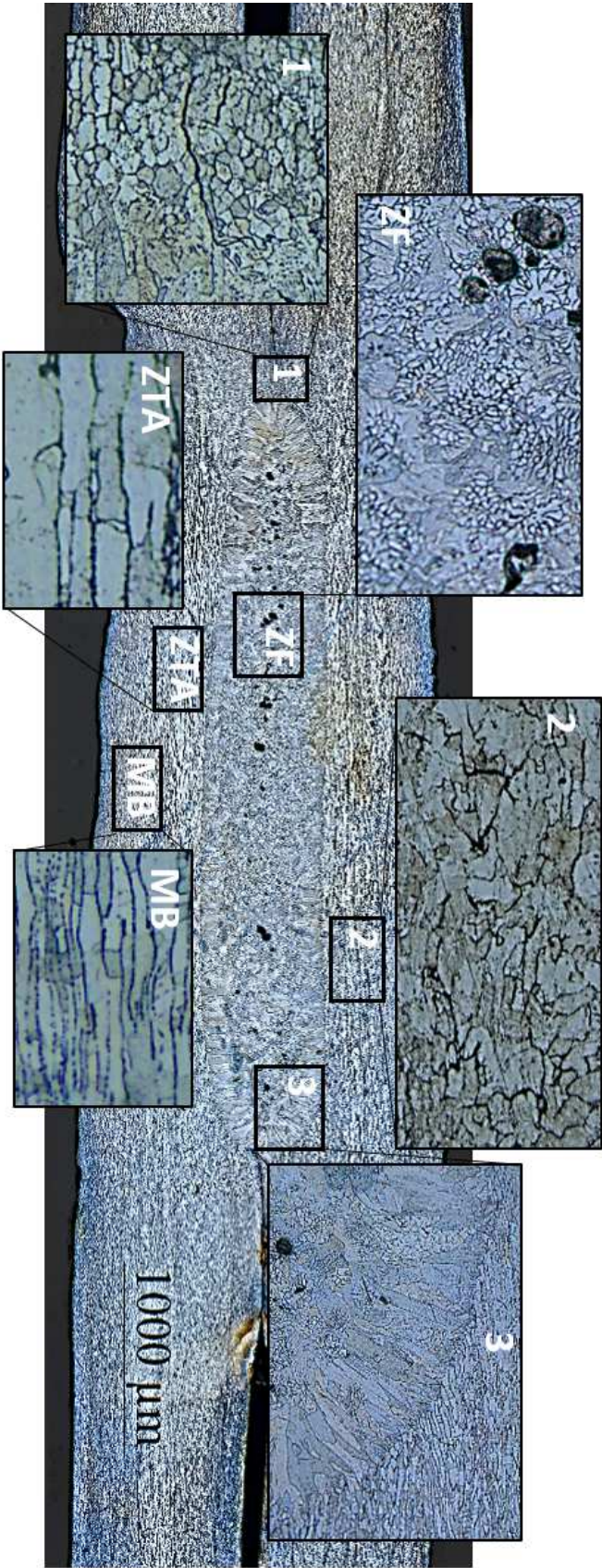


Figura 51 – Ampliação da Figura 30.

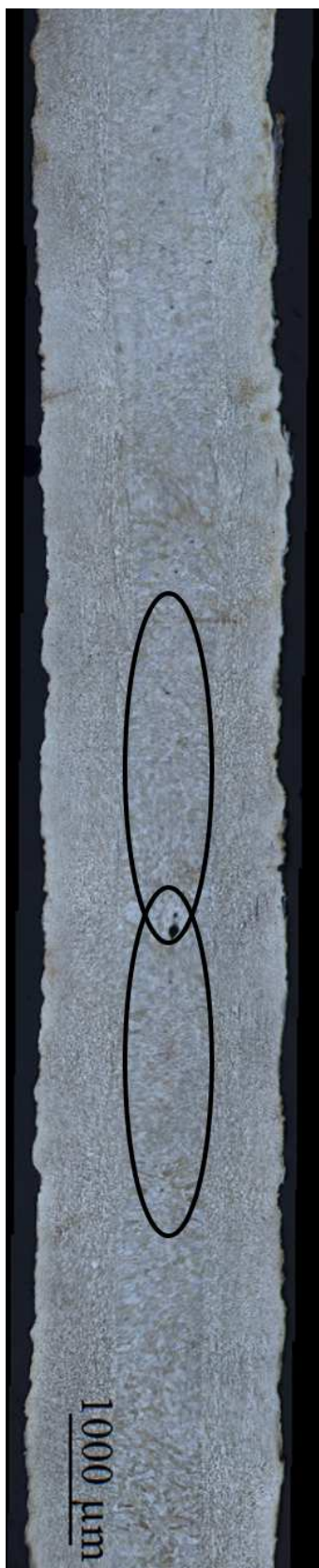


Figura 52 – Ampliação da Figura 31.

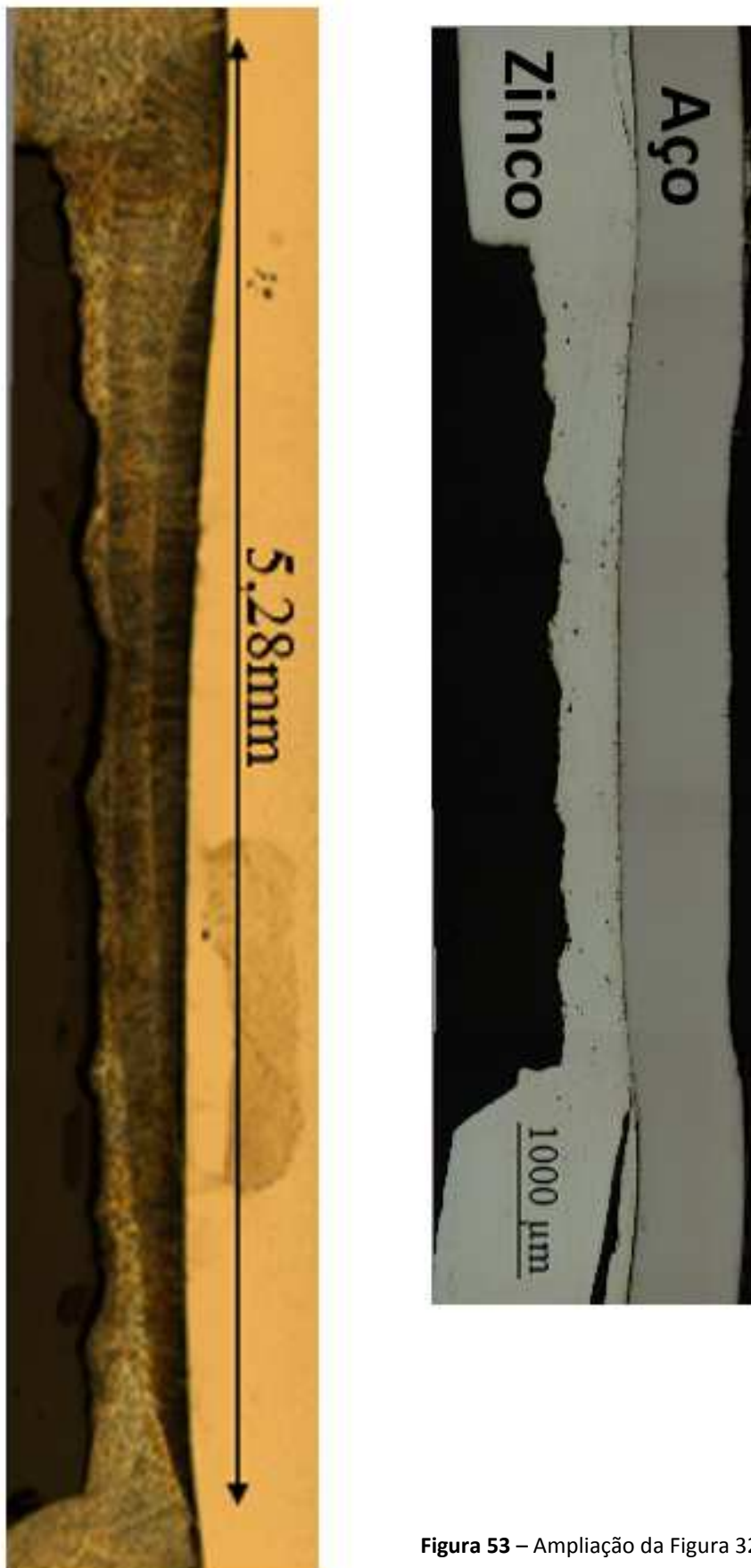


Figura 53 – Ampliação da Figura 32.

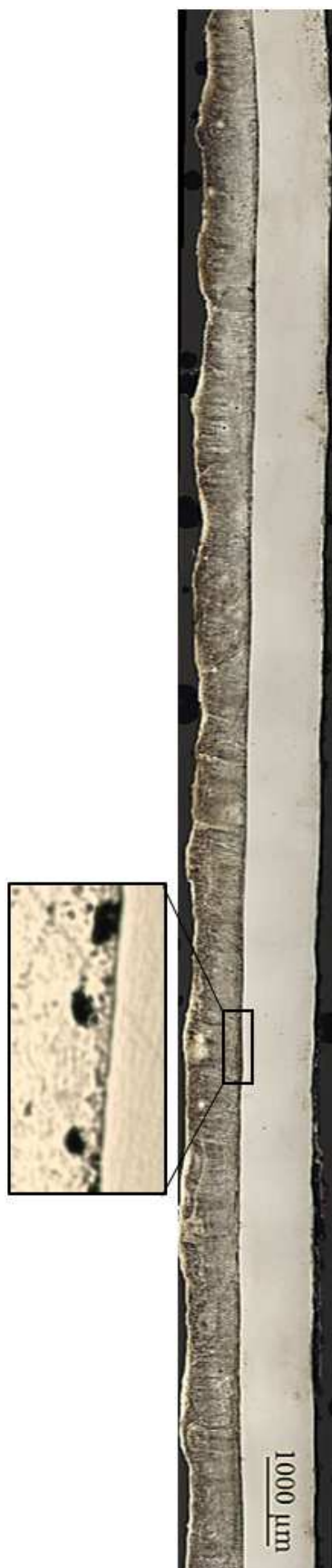


Figura 54 – Ampliação da Figura 33.