



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Leonardo David Costa Silva Ferreira

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E
MICROESTRUTURAL DE SOLDADURAS EM AÇO
PRODUZIDAS POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA**

VOLUME 1

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na
Especialidade de Produção e Projeto orientada pelo Doutor Carlos Miguel
Almeida Leitão e pela Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues e
apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências
e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Fevereiro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Caracterização mecânica e microestrutural de soldaduras em aço produzidas por resistência elétrica

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

Mechanical and microstructural characterization of steel welds produced by electrical resistance

Autor

Leonardo David Costa Silva Ferreira

Orientadores

Carlos Miguel Almeida Leitão

Dulce Maria Esteves Rodrigues

Júri

Presidente	Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Fernando António Gaspar Simões Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
Vogais	Doutor Sree Sabari Investigador Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2020

Agradecimentos

A redação deste documento marca o fim do meu trabalho de investigação nesta dissertação, e do meu percurso académico. Deste modo, quero deixar nesta página agradecimentos às pessoas que tornaram tudo isto possível:

Aos meus coordenadores pelo acompanhamento, em especial ao Doutor Carlos Leitão por toda a atenção, disponibilidade, críticas, ajuda, colaboração, incentivo ao trabalho e fantástica personalidade.

A todos os meus colegas e amigos do laboratório de tecnologia do DEM, pelo fantástico ambiente de companheirismo e entre-ajuda que proporcionaram.

Aos amigos que conheci ao longo do curso, e cuja amizade levo comigo para a vida, em especial aos que partilharam comigo a inesquecível aventura de Erasmus, assim como os que partilharam muito do seu tempo comigo no último ano de Mestrado.

A todos estes, o meu desejo de sucesso e felicidades futuras, tanto pessoais como profissionais.

À minha família por me ter apoiado e acompanhado desde sempre. Em especial ao meu pai Nelson por me ter introduzido desde muito cedo a vida profissional, a indústria e paixão pela mecânica. À minha mãe Alzira por me introduzir desde cedo à Universidade de Coimbra, e consequente motivação e incentivo por prosseguir estudos no ensino superior. À minha irmã Tatiana, que embora fisicamente muito distante, continua muito presente na minha vida. Um enorme agradecimento por todas experiências e ensinamentos que me proporcionou desde sempre, sendo por isso a pessoa que mais influencia tanto as decisões que tomo, como a minha forma de pensar, ser e estar.

Por último, uma pessoa muito especial partiu desta vida durante o decorrer desta dissertação. Um enorme beijinho de agradecimento à minha Avó Maria Saudade, sendo que saudade é o que sinto dos seus gestos, palavras, sorriso, e a sua eterna boa disposição.

Resumo

A presente dissertação teve como objetivo a análise da influência dos parâmetros de força e energia elétrica aplicados no processo de Soldadura de Resistência por Protuberâncias (*Resistance Projection Welding – RPW*), na microestrutura e na resistência mecânica de soldaduras em aço. Por forma a realizar essa análise, foram conduzidos ensaios de caracterização microestrutural e mecânica, tendo sido desenvolvido um método inovador para caracterização da resistência mecânica das soldaduras, designado de Teste de Arrancamento Monitorizado (TAM).

O estudo realizado permitiu concluir que a escolha inadequada dos parâmetros de processo levou a que a união dos materiais ocorra sem a fusão dos mesmos, o que promoveu a formação de uma descontinuidade na interface de ligação das chapas a unir.

A resistência mecânica das soldaduras foi condicionada principalmente pelos níveis de força enquanto que a energia teve maior influência na qualidade da ligação.

Por fim, a análise de sensibilidade dos parâmetros do processo, quanto à repetitividade do processo de soldadura, permitiu aferir a falta de homogeneidade nas propriedades mecânicas e microestruturais das soldaduras obtidas.

Palavras-chave: Soldadura por protuberâncias, Soldadura por resistência, Propriedades mecânicas, Aço macio, Parâmetros do processo.

Abstract

The current dissertation took as objective the analysis of force and electrical energy parameter influence of Resistance Projection Welding process – RPW, in microstructure and mechanical resistance of steel welds. In order to perform this analysis, microstructural and mechanical characterization tests have been conducted, in which a new groundbracking test has been developed for characterization of mechanical resistance of welds, named Pullout Monitorized Test (Teste de Arrancamento Monitorizado – TAM).

The conducted study allowed to conclude that inappropriate process parameters choice, led bonding of materials to occur without fusion, which promoted a discontinuity formation in the faying surfaces of sheets to bond.

Mechanical resistance of welds was mainly restrained by levels of force, while electrical energy had more influence in bonding quality.

Finally, sensitivity analysis of process parameters, regarding repetivity of welding process, allowed to check lack of homogeneity in mechanical and microstructural properties obtained welds.

Keywords Projection welding, Resistance welding, Mechanical properties, Mild steel, Process parameters.

Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xiv
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. Introdução.....	1
2. Estado de arte.....	3
2.1. Soldadura por Resistência	3
2.1.1. Etapas do processo de Soldadura por Resistência	4
2.1.2. Análise Morfológica	4
2.2. Soldadura por Protuberâncias.....	8
2.2.1. Descrição do processo.....	8
2.2.2. Caracterização geométrica	9
2.3. Influência da variação dos processos de soldadura	12
2.3.1. Influência da geometria das protuberâncias redondas	12
2.3.2. Influência da caracterização mecânica dos MB	13
2.3.3. Influência da variação da Corrente Elétrica	13
2.3.4. Influência da variação do tempo de soldadura	14
2.3.5. Influência da variação da Força axial	14
2.4. Síntese da influência dos principais parâmetros de soldadura na Energia formada	15
2.5. Caracterização dos Materiais de Base.....	16
2.5.1. Aço DC 04.....	16
2.5.2. Aço DC 01.....	16
3. Procedimento experimental	17
3.1. Materiais de base	17
3.2. Fabrico dos componentes.....	18
3.2.1. Parâmetros de soldadura	19
3.3. Amostragem	20
3.3.1. Análise metalográfica	21
3.3.2. Determinação de propriedades mecânicas	21
4. Análise de resultados.....	25
4.1. Inspeção Visual.....	25
4.2. Evolução das Propriedades Mecânicas	28
4.3. Repetitividade	33
4.3.1. Avaliação de Micrografias e Durezas	34
4.3.2. Ensaio de Força	36
5. Conclusões e sugestões de trabalho futuro	39
5.1. Influência da variação dos parâmetros de Força e Energia.....	39

5.2. Repetividade	39
5.3. Sugestões de trabalho futuro.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sequência do processo (imagem retirada de Rukki Metals, 2009).....	4
Figura 2.2 - Zonas afetadas pela soldadura (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965).....	5
Figura 2.3 - Tipos de resistência em RSW (adaptado de Zhang e Senkara, 2011)	6
Figura 2.4 - Gráfico Dilatação–tempo de arrefecimento. (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965).....	7
Figura 2.5 - Forma de uma protuberância redonda. (adaptado de Koscielski L., 2015).....	10
Figura 2.6 - Forma de uma protuberância anular numa peça de chapa estampada. (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965).....	11
Figura 2.7 - a) Protuberância linear – Secção em V; b) Protuberância linear dentada; (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965).....	11
Figura 2.8 – Protuberâncias naturais (adaptado de Koscielski L., 2015).....	12
Figura 3.1 - Descrição geométrica do componente a) Perspetiva isométrica b) perspetiva de cima do componente c) perspetiva transversal do detalhe do componente.....	17
Figura 3.2 – Gráfico Tensão-Deformação dos MB	18
Figura 3.3 – a) Equipamento de soldar b) Geometria dos eléctrodos e sua posição no equipamento.....	19
Figura 3.4 – Geometria da Protuberância.....	19
Figura 3.5 – Designação das zonas do componente, e sua respetiva posição na máquina de soldar.	20
Figura 3.6 – Perfis de indentação de medição de dureza na soldadura.....	21
Figura 3.7 – a) Parte de componente arrancado transversalmente por teste de arrancamento b) Conformidade da superfície de fratura da soldadura	22
Figura 3.8 - a) Posição do provete TAM nas amarras da máquina Shimadzu AGS-X 100 kN, antes do início do ensaio b) Descrição das 4 soldaduras no provete, e zona de aperto nas amarras.	23
Figura 3.9 – Curva típica de Força-Deslocamento obtida após ensaio TAM	24
Figura 3.10 – Soldadura 4 do provete TAM	24
Figura 4.1 - Mapa de soldaduras da peça F40/E23	26
Figura 4.2 - Mapa de soldaduras da peça F40/E25	26
Figura 4.3 - Mapa de soldaduras da peça F37/E20.....	27
Figura 4.5 - Mapa de soldaduras da peça F37/E26.....	27
Figura 4.6 - Variação da dureza de soldadura com energia aplicada	29

Figura 4.7 - Influência da variação da energia da força axial na resistência de soldadura..	30
Figura 4.8 – Superfície de fratura após-teste TAM.....	31
Figura 4.9 - Perfil de dureza médio das soldaduras das peças F37/E26 e F40/E25.....	31
Figura 4.10 - Percentagem de deformação dos MB das soldaduras das peças F40/E25 e F37/E26.....	32
Figura 4.11 – Localização dos módulos em estudo na peça.....	33
Figura 4.13 - Micrografias 50x e durezas HV0.2 de soldaduras do módulo inferior das peças FE, R1, R2 e R3 a) S1 b) S2	35
Figura 4.12 - Micrografias 50x e durezas HV0.2 de soldaduras do módulo superior das peças FE, R1, R2 e R3 a) S1 b) S2	35
Figura 4.14 - Micrografias 50x e durezas HV0.2 de soldaduras do módulo lateral das peças FE, R1, R2 e R3 a) S1 b) S2.....	36
Figura 4.15 - Valores de resistência das soldaduras do módulo superior.....	38
Figura 4.16 - Valores de resistência das soldaduras do módulo lateral.....	38
Figura 4.17 - Valores de resistência das soldaduras no módulo inferior.....	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dimensões de protuberâncias redondas com altura até 3 mm, de acordo com a norma DIN EN 28167.....	10
Tabela 2.2 - Resumo da Influência da variação dos parâmetros na energia calorífica formada	15
Tabela 3.1 - Composição química dos materiais de base (valores em percentagem)	18
Tabela 3.2 – Designação dos componentes e seus respectivos parâmetros FE	20
Tabela 3.3 - Designação das datas de fabrico das peças avaliadas quanto à repetitividade e seus parâmetros de fabrico FE.....	20
Tabela 4.1 – Inspeção visual dos módulos laterais dos componentes soldados	28

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

σ – Tensão
 σ_c – Tensão de cedência
 σ_{max} - Tensão máxima
HV – dureza Vickers

Siglas

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra
FE – parâmetro força e energia; peça estudada quanto à variação de força e energia
F/E – Relação força a dividir por energia
MB – Material de base
ZF – Zona fundida
ZTA – Zona termicamente afetada
RPW – Soldadura por resistência por protuberâncias
RSW – Soldadura por resistência por pontos
E - Energia fornecida [Joule - J]
I - Intensidade de corrente elétrica [Ampere - A]
R – Resistência à passagem de corrente elétrica [Ohm - Ω]
t – tempo de passagem de corrente [segundo – s]
k – Factor que representa as perdas de calor por convecção, radiação e condução que são dissipadas pelos eléctrodos, ou o meio envolvente.

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução do conhecimento e dos recentes desafios e metas energéticas, torna-se cada vez mais importante desenhar e implementar soluções que permitam a obtenção de processos de fabrico mais eficientes e robustos, garantindo a segurança e estabilidade dos produtos. Assim, um dos métodos mais comuns de fabrico e ligação de metais é através de processos de soldadura, que apresenta como principal vantagem ligação de componentes com geometria complexa. A soldadura é em si um processo de ligação dividido em várias variantes tendo em consideração a sua fonte de energia. Assim, no âmbito desta dissertação é estudada ligação de 2 chapas metálicas através do processo de soldadura por resistência por protuberâncias. Este processo é uma variante do processo de soldadura por resistência elétrica, com a característica de que um dos materiais de base contém uma protuberância, e tem como principal característica a aplicação de baixos parâmetros de força e energia pelos elétrodos.

As soldaduras em estudo ligam as partes de face e reforço de um componente de aço macio, que faz parte constituinte de um eletrodoméstico. O estudo consiste na avaliação metalográfica e realização de ensaios de dureza e resistência para avaliar a qualidade de soldadura. Assim foram estudadas soldaduras provenientes das mesmas localizações de 6 peças com igual geometria e número de soldaduras, fabricadas com diferentes parâmetros de força e energia elétrica aplicados pelos elétrodos. Foram também avaliadas soldaduras provenientes de 3 peças com os mesmos parâmetros de força e energia aplicados, mas fabricados em datas diferentes, com objetivo de avaliar a repetitividade do processo.

O texto desta dissertação está dividido em 5 capítulos. No capítulo 1 é feita uma introdução do tema, e uma breve descrição da análise experimental. No capítulo 2 é feita uma síntese do processo de soldadura, e dos materiais de base presentes nas peças. No capítulo 3 é descrito o processo experimental realizado, onde inclui a localização das soldaduras na peça, descrição das protuberâncias, materiais de base, e parâmetros de força e energia avaliados. No capítulo 4 são apresentados os resultados da influência da variação

dos parâmetros de força e energia aplicados, assim como a repetitividade do processo, sendo feita também uma discussão e reflexão dos mesmos.

No capítulo 5 é então apresentada uma síntese dos resultados e conclusões do estudo, e propostas de execução de trabalho futuro a realizar.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Soldadura por Resistência

Soldadura por resistência é um processo de soldadura que consiste na geração de energia calorífica através da aplicação de corrente elétrica num material com uma determinada resistência elétrica, ao longo de um período de tempo. A energia obtida através da combinação destes parâmetros é descrita pela lei de Joule, segundo a equação 2.1. Assim, a geração de calor suficiente causa liquificação do material na zona a soldar, promovendo fusão e coalescência entre os materiais de base, MB. (Rossi, 1954) (AWS)

$$E = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.1)$$

Este processo tem como principais vantagens uma taxa de produção de rápida e automatizada, tornando o custo por soldadura muito baixo. A aplicação de corrente elevada em pouco tempo garante que as perdas de calor para o material de base, MB e arredores sejam mínimas, garantindo uma maior eficiência energética. Além disso não é necessário o uso de materiais de adição. Porém, apresenta como desvantagem de ser um processo restrito a juntas metálicas de baixa espessura e sobrepostas, para permitir que a soldadura seja parte integrante de um circuito com uso de baixa corrente elétrica. (Rossi, 1954)

2.1.1. Etapas do processo de Soldadura por Resistência

O processo de Soldadura por Resistência ocorre dividido em 3 etapas, como representado na Figura 2.1, sendo elas:

1º - Fase de aperto (*Squeeze time*) – Os eletrodos são pressionados contra as faces dos materiais de base;

2º - Fase de aplicação de corrente (*Welding*) – Corrente elétrica passa pelos terminais dos eletrodos através da zona de soldadura;

3º - Fase de espera, ou arrefecimento (*hold time*) – Corrente elétrica deixa de passar pelos eletrodos, com força constante aplicada, sendo esta uma fase de espera, onde se dá arrefecimento dos materiais. (Rukki Metals, 2009)

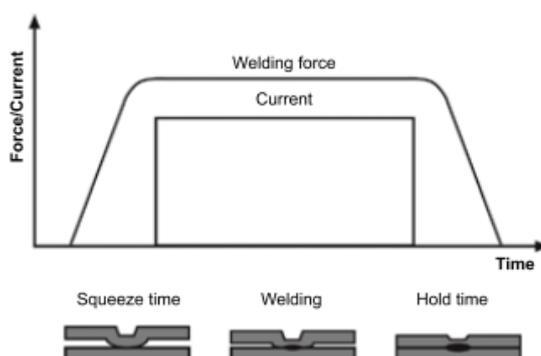


Figura 2.1 - Sequência do processo (imagem retirada de Rukki Metals, 2009)

2.1.2. Análise Morfológica

2.1.2.1. Caracterização metalográfica

O processo de soldadura por resistência impõe aos materiais na zona de soldadura alterações a nível microestrutural. Numa soldadura, a ocorrência de fusão é indicada pelo crescimento do *nugget* sob a forma de dendrites. No caso de o calor gerado ser inferior à temperatura de fusão dos MB, trata-se de um processo de soldadura no estado sólido, em que a temperatura gerada e posterior arrefecimento, causam ligação dos materiais e alteração da sua estrutura cristalina, embora com menor resistência mecânica. (Haga, H. *et al*, 1981)

O processo de recristalização e restauração da estrutura cristalina numa soldadura é o mesmo do que para uma chapa do mesmo material, dependendo da composição química

do material e da velocidade de arrefecimento. Para uma velocidade de arrefecimento for reduzida, forma-se ferrite e perlite. Para uma velocidade intermédia forma-se ferrite, bainite e martensite. Para uma velocidade rápida ocorre formação de martensite. Esta última é uma fase dura e frágil, sendo geralmente indesejável em soldadura. (Zhang e Senkara, 2017)

Assim, de acordo com a Figura 2.10, a recristalização do núcleo fundido começa na periferia da zona D para a zona A, sendo que existe um gradiente de temperaturas negativo. As zonas A e B são denominadas de zona de fusão (ZF). As zonas C e D, zona termicamente afetada (ZTA) e modificam apenas a sua estrutura cristalina, não entrando em fusão, uma vez que durante a operação de soldadura, a sua temperatura foi mantida num valor inferior à temperatura de fusão, ocorrendo apenas recristalização. A zona E corresponde ao restante material em que a microestrutura não foi afetada, designando-se de material de base (MB). (Lhereux e Belotte, 1965).

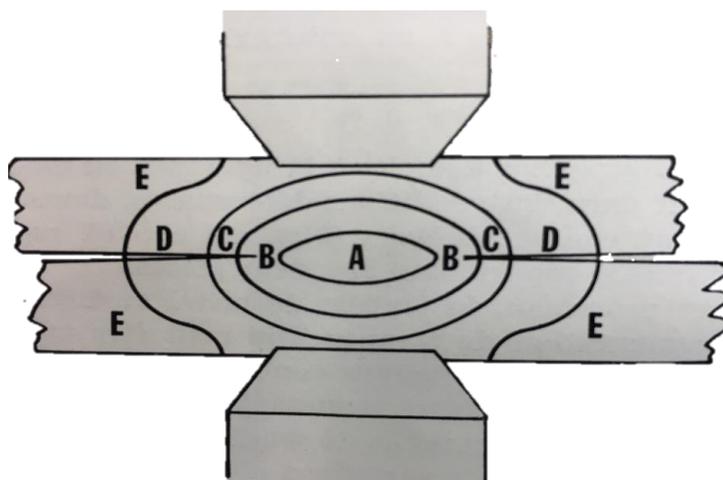


Figura 2.2 - Zonas afetadas pela soldadura (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965)

2.1.2.2. Resistência de contacto

É definida como a resistência que um material tem à passagem de corrente elétrica. Esta é de caracterização complexa, pois depende da resistividade elétrica dos vários materiais que compõem a região de soldadura e o circuito elétrico. Na Figura 2.6 são demonstrados os vários tipos de resistência à passagem de corrente elétrica entre os eletrodos, que dependem da condutividade elétrica das zonas em que a corrente passa.

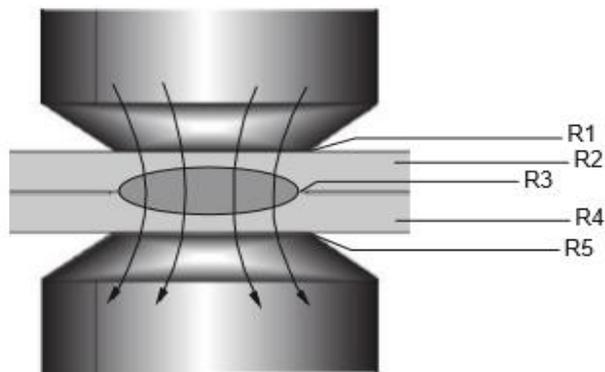


Figura 2.3 - Tipos de resistência em RSW (adaptado de Zhang e Senkara, 2011)

Na Figura 2.6, R1 e R5 correspondem às resistências de contacto na interface eléctrodo-material de base. R3 corresponde à resistência da zona de soldadura, sendo que antes da aplicação de corrente, esta é a resistência de contacto entre os MB. R2 e R4 correspondem às resistências elétricas dos MB. A resistência de contacto R3 é a maior resistência do circuito, onde ocorre a maior formação de calor em todo o circuito, correspondente à ZF. (Zhang e Senkara, 2017);(Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, 2002)

2.1.2.3. Densidade de corrente

As superfícies metálicas dos MB não são perfeitamente lisas, sendo constituídas a nível microscópico por micro-relevos na ordem dos μm , designando-se por rugosidade. Deste modo, o contacto entre as superfícies metálicas não é total, sendo efetuado nos pontos mais salientes de contacto entre os dois metais. Então, a área real de contacto é sempre inferior à área aparente de contacto entre os MB.

Assim, densidade de corrente é um parâmetro que relaciona a corrente transmitida com a área real de soldadura. A equação 2.5 descreve a variação de densidade de corrente J , que é tanto maior quanto maior for a intensidade de corrente I , e menor quanto for maior for a área real de contacto A . Por sua vez, o aumento de densidade de corrente J é proporcional à resistência de contacto $R3$, da Figura 2.3. (Zhang e Senkara, 2017)

$$J = I/A \quad (2.5)$$

2.1.2.4. Defeitos na microestrutura e importância do esforço de compressão dos eletrodos na fase de arrefecimento

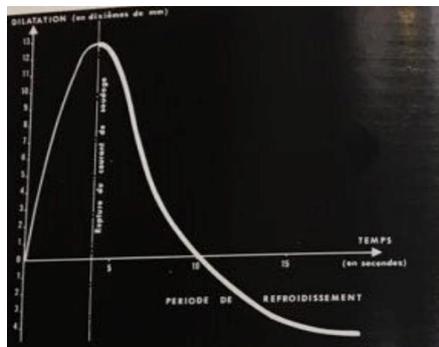


Figura 2.4 - Gráfico Dilatação–tempo de arrefecimento. (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965)

O gráfico da Figura 2.4 representa a dilatação volumétrica do material de soldadura após o início da fase de aplicação de corrente. Verifica-se que durante a fase de aplicação de corrente, o material de soldadura expande volumetricamente devido ao aumento de temperatura, e que após o corte de corrente o material tende a contrair devido ao arrefecimento. Porém, após algum tempo de arrefecimento ocorre uma contração negativa, isto é, o material fica ainda mais pequeno do que o seu estado inicial antes de voltar à temperatura ambiente.

Ocorre também a formação bolhas de vapores de gás metálico dissolvidas no metal fundido devido às elevadas temperatura atingidas. A quantidade destas bolhas de gás depende da composição química do MB, devido à presença de magnésio e zinco, e da temperatura atingida. À medida que o material arrefece, após interrupção da corrente, o metal do *nugget* solidifica com tendência a ficar cada vez mais viscoso. Nestas condições, as bolhas de gás tendem a ficar presas no *nugget* sob a forma de porosidades. Também, tendo em consideração a contração excessiva do material, e que a solidificação do *nugget* começa na periferia, podem ocorrer zonas de vazio designados de rechupes, sendo este defeito comum em soldadura de metais com maior espessura. Pode ocorrer também a formação de tensões internas, e se estas forem superiores à resistência mecânica do material de soldadura, ocorrem fissuras no *nugget*. (Ma, C. *et al*, 2008)

Estes defeitos podem ser anulados devido à força aplicada arrefecimento pelos eletrodos durante a fase de arrefecimento. Esta fase pode dar-se com ou sem contacto dos eletrodos. Por um lado, o arrefecimento com eletrodos e com aplicação de um esforço de compressão provoca uma interface de soldadura homogénea. O esforço de compressão

transmitido pelos eletrodos durante a solidificação força o material frio a deformar-se e a seguir a contração do metal quente. Deste modo, um esforço de compressão suficiente durante a fase de arrefecimento previne a formação de porosidades e rechupes no *nugget*. Por outro lado, a interface de uma soldadura arrefecida livremente apresenta sempre um grande número de vazios internos, porosidades, e fissuras. As propriedades mecânicas de uma soldadura arrefecida livremente serão sempre inferiores às de uma soldadura com força aplicada na fase de arrefecimento. (Lhereux e Belotte, 1965)

2.2. Soldadura por Protuberâncias

Soldadura por Resistência tem várias variantes, como soldadura por Pontos RSW (*Spot Welding*), sendo esta a mais usada. Soldadura por Protuberâncias RPW (*Projection Welding*), que é semelhante à soldadura por pontos, porém um dos materiais de base contém uma protuberância, sendo este o tipo de soldadura estudada nesta dissertação. Soldadura por Costura (*Seam Welding*), onde a soldadura é feita por dois eletrodos sob a forma de roletes que deslizam através dos materiais a unir, aplicando corrente elétrica e força. Existe também as variantes soldadura de topo por resistência (*butt welding*), e soldadura por flash (*flash welding*). (AWS)

2.2.1. Descrição do processo

Variante do processo de Soldadura por Resistência e bastante semelhante ao processo RSW, varia deste pelo facto de ser existir num dos metais base uma projeção ou extrusão de material, designado de Protuberância. No caso de os metais soldados serem diferentes, é conveniente aplicar a protuberância no metal de maior condutividade elétrica, logo com resistividade menor. A protuberância permite equilibrar o calor gerado entre ambos os metais, pois permite uma concentração de calor numa área mais pequena. Assim, garante-se um balanço na geração de calor entre as duas peças, obtendo-se temperaturas igualmente elevadas em ambas as faces. ((Sun. X, 2001);(Cunat, Pierre-jean 2007)).

O uso de protuberâncias no processo tem várias vantagens: 1) Uso de menores parâmetros de força e energia, devido à maior concentração de calor relativamente ao processo RSW. 2) O uso reduzido desses parâmetros permite uma maior vida dos eletrodos.

3) Existe um balanço de energia satisfatório quando se soldam metais com diferentes condutividades elétricas, devido ao equilíbrio de calor gerado pela menor área de contacto entre os MB com uso de protuberância. 4) As soldaduras podem ter uma menor distância de espaçamento entre si relativamente ao processo RSW, devido à ausência do fenómeno de *shunting*. Este fenómeno ocorre quando outros pontos de ambos materiais fora da soldadura entram em contacto. A corrente encontra então outro circuito de passagem, diminuindo a sua intensidade no ponto de soldadura. Este fenómeno provoca ainda aumento de temperatura nos locais onde passa, podendo causar soldadura indesejada em outro local. Este fenómeno é pouco comum em RPW, pois as chapas estão tipicamente afastadas entre si devido ao uso de protuberâncias .

No entanto existem desvantagens, tais como: 1) A adição do processo de manufactura das protuberâncias; 2) As protuberâncias são feitas de uma vez só, pois geralmente os componentes soldados pelo processo RPW contém várias dezenas de soldaduras, sendo que a manufactura sequencial de protuberâncias diminui a rapidez global do processo de ligação dos materiais. ((Zhang e Senkara, 2017);(Lhereux e Belotte, 1965); (Rossi, 1954))

2.2.2. Caracterização geométrica

Existem dois tipos de protuberâncias:

2.2.2.1. Protuberâncias Artificiais

Este tipo de protuberância exige uma operação mecânica de preparação num dos MB, antes da soldadura. Devem ser projetadas de tal maneira que a sua realização seja simples, barata e que a sua forma seja regular. A sua geometria é essencialmente de 3 formas:

- 1) Protuberâncias redondas. Têm como principal característica a sua forma de domo, e são geralmente desejáveis porque permitem um crescimento uniforme de soldadura. Este tipo de Protuberância é realizado com o auxílio de uma prensa com a forma da protuberância. Segundo a norma DIN EN 28167, na Protuberância representada na Figura 2.5 existe uma relação entre o diâmetro

exterior d_1 , e altura de protuberância a e o diâmetro d_2 , de acordo com a Tabela 2.1

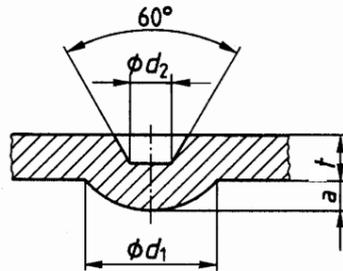


Figura 2.5 - Forma de uma protuberância redonda. (adaptado de Koscielski L., 2015)

Tabela 2.1 – Dimensões de protuberâncias redondas com altura até 3 mm, de acordo com a norma DIN EN 28167

d_1	a	d_2
1.6	0.4	0.5
2.0	0.5	0.63
2.5	0.63	0.8
3.2	0.8	1.0
4.0	1.0	1.25
5.0	1.25	1.6
6.3	1.6	2.0
8.0	2.0	2.5
10.0	2.5	3.2

- 2) Protuberâncias anelares. Este tipo de soldadura é fabricado com uma prensa anelar, e é indicado para soldaduras estanques, sendo muito usada em soldadura de placas com dimensões reduzidas. A sua geometria é exemplificada na Figura 2.2.

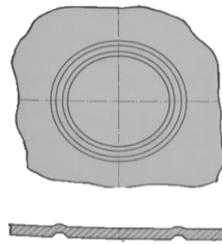


Figura 2.6 - Forma de uma protuberância anular numa peça de chapa estampada. (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965).

3) Protuberâncias lineares ou dentadas. São fabricadas em peças maciças por torneamento, maquinagem, fresagem, estampagem, entre outros. A sua geometria é representada na Figura 2.3

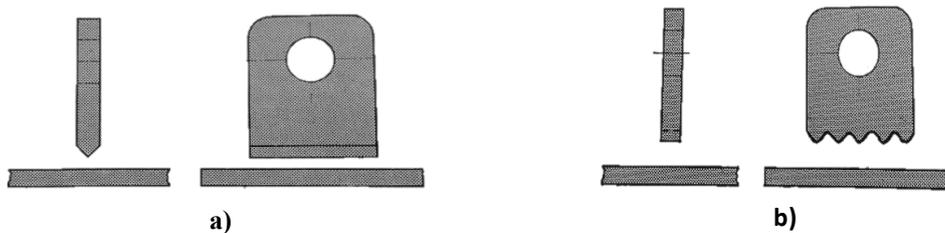


Figura 2.7 - a) Protuberância linear – Secção em V; b) Protuberância linear dentada; (adaptado de Lhereux e Belotte, 1965)

2.2.2.2. Protuberâncias Naturais

Devido à sua forma geométrica particular, certas peças contém protuberâncias naturais, não sendo necessário qualquer processo de manufactura. Quando colocadas numa determinada posição sobreposta, estas peças apresentam as zonas de contacto em projeção que podem por si só permitir a passagem de corrente, permitindo o crescimento progressivo do *nugget* a partir da linha ou ponto de contacto. Um exemplo disso é a soldadura em cruz de 2 tubos. 2 tubos colocados perpendicularmente em contacto permitem a passagem de corrente a partir de um único ponto na interface entre os 2 metais bem localizado. Este tipo de soldadura pode ser utilizado em malhas de tubos de aço soldado como por exemplo

condensadores de frígorigos, carrinhos de compras, redes de metal como vedações, materiais de construção civil, entre outros. (Koscielski L., 2015)

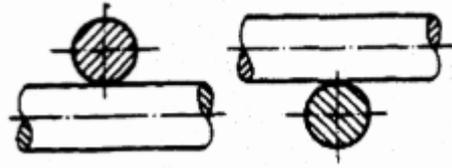


Figura 2.8 – Protuberâncias naturais (adaptado de Koscielski L., 2015)

2.3. Influência da variação dos processos de soldadura

Neste subcapítulo é feita uma revisão de estudos científicos sobre a influência da variação de vários parâmetros que influenciam a qualidade de soldadura do processo RPW.

2.3.1. Influência da geometria das protuberâncias redondas

Nesta dissertação são avaliadas protuberância com forma redonda. Assim, tendo em consideração a Figura 2.1, é avaliada a influência da altura “a” da protuberância, de acordo com Sun, X. (2001)

2.3.1.1. Influência da altura de protuberância “a”

Se a altura a for insuficiente, pode ocorrer colapso prematuro da protuberância na fase de aperto, causando assim uma maior área real de contacto no início da fase de aplicação de corrente. Para uma mesma intensidade de corrente transmitida, o aumento da área real de contacto diminui a densidade de corrente, (Eq. 2.5) e por sua vez a concentração de calor.

Deste modo, para aumentar a resistência de contacto e consequentemente ocorrer maior geração de calor, é necessário implementar mais corrente elétrica. Além disso, o colapso prematuro da protuberância torna a soldadura num processo RSW, inviabilizando as vantagens do processo RPW que é aplicação de parâmetros FE reduzidos.

Se a altura da protuberância a for elevada, durante a fase de aplicação de corrente, a taxa de formação de calor é mais rápida do que o tempo de colapso da protuberância na extremidade da interface de contacto, e como resultado pode ocorrer expulsão de material.

2.3.2. Influência da caracterização mecânica dos MB

Sun. X, (2000) avaliou o efeito da variação dos MB com diferentes propriedades mecânicas à temperatura ambiente, na qualidade de soldadura do processo RPW. O primeiro, denominado aço livre intersticial (IF) com tensão de cedência σ_c à temperatura ambiente de 150 Mpa, e o segundo, aço liga leve de alta resistência (HSLA) com tensão de cedência à temperatura ambiente de 440 Mpa. Assim, para os mesmos parâmetros FE aplicados e com variação de MB, verificou que o material com menor σ_c , aço IF teve maior deformação na fase de aperto, causando maior área de contacto entre os MB, e por sua vez menor densidade de corrente. Assim, o uso de materiais com baixas propriedades mecânicas causa uma soldadura pouco resistente.

2.3.3. Influência da variação da Corrente Elétrica

(Halilović, Jasmin *et al.*, 2014) avaliou em chapas de aço com baixo teor em carbono, o efeito da influência da variação da intensidade de corrente e tempo de aplicação de força e corrente elétrica na variação da dureza. Concluiu que destes 3 parâmetros, a variação de intensidade de corrente tem mais influência na geração de Energia, pois para o mesmo tempo de soldadura e força axial aplicada, o aumento de corrente causa um aumento expressivo no *nugget* da ZF, e na zona térmicamente afetada, ZTA.

2.3.3.1. Corrente elétrica excessiva e insuficiente

A utilização de uma corrente elétrica elevada promove o crescimento da ZF, aumentando o diâmetro do *nugget*, e aumento da resistência mecânica da soldadura. Contudo, a aplicação de corrente excessiva reduz a vida útil dos eléctrodos potencia a expulsão de material, causando vazios internos e consequente degradação das propriedades mecânicas da soldadura. Por outro lado, se a corrente elétrica fornecida for insuficiente, origina-se um *nugget* subdimensionado e com fraca resistência mecânica. (M. KIMCHI, 1983) (Z. Han *et al.*, 1989)

2.3.4. Influência da variação do tempo de soldadura

(Razai *et al*, 2018) avaliaram o efeito da variação do tempo de aplicação de corrente, considerando constante a corrente e força axial aplicada na soldadura por resistência, em chapas de aço com baixo teor em carbono. Concluíram que o aumento do tempo de aplicação de corrente promove o aumento energia calorífera total de soldadura, tal como indica a lei de Joule, Eq 2.1. O aumento de energia por sua vez aumenta o tamanho de *nugget* e resistência de soldadura.

2.3.5. Influência da variação da Força axial

Um fator importante que influencia a resistência de contacto R3 da Figura 2.6, entre os MB à passagem de corrente de elétrica, é a força axial de aperto aplicada pelos eléctrodos. De facto, é comum substituir a importância da resistência de contacto pela força de aperto, sendo esta geralmente controlada por um cilindro pneumático. Durante a fase de aperto, deve ainda haver um tempo de espera de cerca 150 ms antes de aplicar corrente elétrica, de forma a estabilizar a força imposta pelos eléctrodos, de modo a permitir o assentamento dos eléctrodos na soldadura. (Miyachi, A., 2015)

2.3.5.1. Excessiva Força axial

A aplicação de força axial de aperto muito elevada pelos eléctrodos induz elevadas tensões de contacto nos MB em contacto, deformando-se nos pontos salientes, aumentando assim a área real de contacto entre eles. Assim, o aumento da área de contacto entre os MB promove a diminuição da densidade de corrente, e por sua vez diminuição da resistência de contacto R3 da Figura 2.6. De acordo com a lei de Joule (Eq 2.1), uma menor resistência elétrica leva à geração de energia calorífera inferior.

Ainda, a aplicação de uma força de aperto muito elevada pode levar ao aumento do tempo de formação de elevada temperatura, por sua vez suficiente para causar liquidificação e fusão do *nugget*. Assim, o aumento da força de aperto leva a uma diminuição da resistência de contacto entre os MB, e posterior formação de *nugget* menos resistente. Como o parâmetro de força axial é facilmente controlado através da ação de um cilindro pneumático, é comum atribuir mais importância a este. (Song, Q, *et al.*, 2005) (Zhou *et al*, 2014)

2.3.5.2. Insuficiente Força axial

Se a força axial aplicada pelos elétrodos for muito baixa, pode ocorrer fusão dos MB previamente ao colapso da projeção, durante a fase de aplicação de corrente. Isto aumenta o risco de ocorrência de expulsão de material, assim como aumenta o desgaste dos elétrodos. (Senkara, J. *et al*, 2004);(Zhou *et al*, 2014)

2.3.5.3. Influência da força de aperto nas propriedades mecânicas da soldadura

(Colombo *et al*, 2018) avaliaram a influência das propriedades mecânicas de dureza e resistência de soldadura, com aumento de força aplicada pelos elétrodos. Conclui-se que o aumento de força promove a deformação dos materiais de base em contacto, e por sua vez o endurecimento do material. (O aumento de dureza é mais intenso, quanto menor for a temperatura gerada devido à fraca participação de mecanismos de amaciamento como restauração e recristalização que reduzem a densidade de defeitos cristalinos).

2.4. Síntese da influência dos principais parâmetros de soldadura na Energia formada

Pelo exposto, na Tabela 2.1 é resumida a influência da variação dos parâmetros de força axial F_z , corrente elétrica I , e tempo de soldadura t , na energia calorífica E formada na soldadura.

Tabela 2.2 - Resumo da Influência da variação dos parâmetros na energia calorífica formada

E	Aumenta com:	↑ I	↓ F_z	↑ t
----------	---------------------	------------	---------------------------	------------

2.5. Caracterização dos Materiais de Base

Designa-se por aço-carbono as ligas ferro-carbono que contém quantidades de carbono muito baixas, cerca de 0,03% até 1,2%, teores manganês entre 0,25 e 1,00%, e quantidades muito reduzidas de outros elementos.

Aço macio é um aço com teor muito baixo em carbono, com resistência mecânica relativamente baixa, e apresenta ductilidade elevada. É geralmente fabricado sob a forma de chapas finas para aplicações de enformação, tais como guarda-lamas, painéis de automóveis, componentes de eletrodomésticos, entre outros. (Smith, 1996)

De acordo com a norma europeia EN 10130, aço DC é um aço de baixo teor em carbono, laminado a frio.

2.5.1. Aço DC 04

Aço DC 04, com designação numérica 1.0338, tem como composição química máxima $C_{max} = 0,08\%$ $Mn_{max} = 0,4\%$, $P_{max} = 0,03\%$ $S_{max} = 0,03\%$. (European Steel and Alloy Grades/Numbers - DC04), (SemiMetais)

2.5.2. Aço DC 01

No caso do Aço DC 01, com designação DC 1.0330. Tem como composição química máxima $C_{max} = 0,12\%$ $Mn_{max} = 0,6\%$, $P_{max} = 0,045\%$ $S_{max} = 0,045\%$. (European Steel and Alloy Grades/Numbers - DC01),(SemiMetais).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente documento foram analisadas as soldaduras por protuberância retiradas de um componente de um eletrodoméstico fabricado na empresa TEKA – Aveiro, Portugal, como aquele que se mostra na figura 1. Este componente é constituído por duas peças estampadas, a face e o reforço, como se pode observar na figura 1b) e no detalhe de um dos cantos dos componentes, na figura 1c).

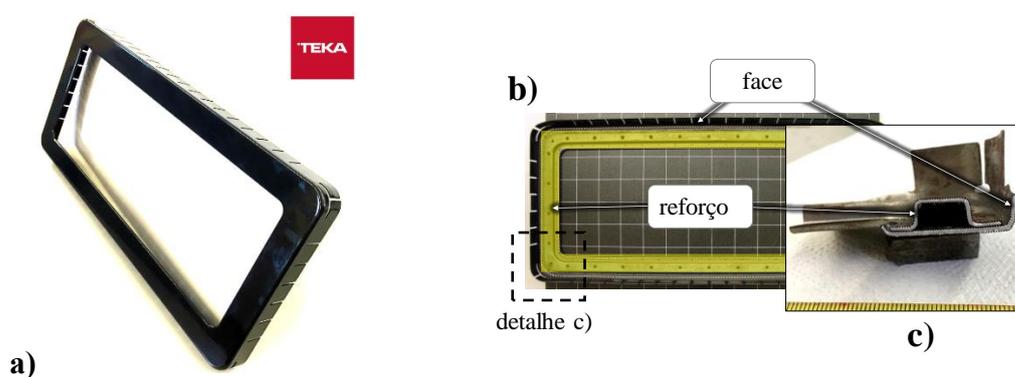


Figura 3.1 - Descrição geométrica do componente a) Perspetiva isométrica b) perspetiva de cima do componente c) perspetiva transversal do detalhe do componente

3.1. Materiais de base

A face e o reforço do componente resultam da estampagem de chapas de 1mm em aço DC04 e DC01, respetivamente. Na tabela 3.1 apresentam-se as composições químicas destes aços. É de notar que o aço utilizado no reforço é o aço DC01, por ser aquele que apresenta maior teor de carbono e conseqüentemente, maior resistência mecânica. De facto, como se pode ver pelas curvas tensão deformação destes dois materiais, que se mostram na figura 3.2, a diferença em termos de resistência mecânica entre os dois aços é substancial.

Tabela 3.1 - Composição química dos materiais de base (valores em porcentagem)

Material	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	V	Cr	N
DC 01	0,0235	0,1830	0,0066	0,0096	0,0122	0,0449	0,0042	0,001	0,0005	0,0262	0,0082
DC 04	0,0035	0,1900	0,0045	0,0094	0,0072	0,0358	0,0038	0,001	0,0007	0,0185	0,0057

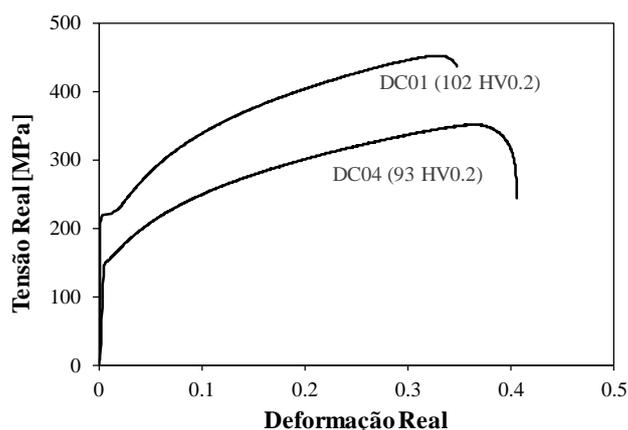


Figura 3.2 – Gráfico Tensão-Deformação dos MB

3.2. Fabrico dos componentes

A união dos componentes foi obtida através de 110 soldaduras por protuberâncias/componente, utilizando o equipamento desenvolvido para o efeito, que se mostra na figura 3a). Neste equipamento, os elétrodos em cobre encontram-se divididos por 12 módulos, como se pode observar no esquema da figura 3b) por questões distribuição de energia e de eficiência na substituição, caso estes se danifiquem. A salientar também a sua geometria que permite transmitir a corrente individualmente para cada protuberância, cujas características e dimensões se apresentam na figura 4. As protuberâncias são previamente produzidas na parte do reforço.

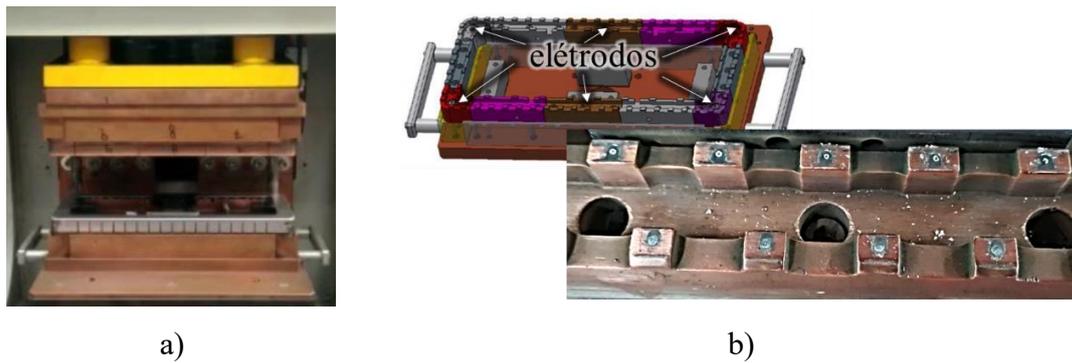


Figura 3.3 – a) Equipamento de soldar b) Geometria dos elétrodos e sua posição no equipamento

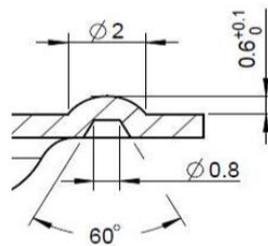


Figura 3.4 – Geometria da Protuberância

3.2.1. Parâmetros de soldadura

Para efeitos de estudo, fizeram-se variar os parâmetros de entrada do equipamento dentro dos valores que se descrevem na Tabela 3.2. A notar o facto de que, por limitações de conceção, este equipamento só permite fazer variar os parâmetros de Energia (E) e Força Axial (Fz), adiante designados de FE. Os parâmetros estudados permitem aferir a influência de pequenas variações de parâmetros de processo nos resultados de soldadura. Ainda de modo a atestar o grau de variabilidade do processo, foi feita uma análise de repetibilidade com base no estudo das soldaduras cujos parâmetros se encontram descritos na tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Designação dos componentes e seus respectivos parâmetros FE

Designação	Força [kN]	Energia [kJ]
F40/E23	40	23
F40/E25	40	25
F40/E27	40	27
F39/E25	39	25
F37/E20	37	20
F37/E26	37	26

Tabela 3.3 - Designação das datas de fabrico das peças avaliadas quanto à repetitividade e seus parâmetros de fabrico FE.

Designação	Data de fabrico	Parâmetros
F40/E25	original	Força = 40 kN Energia = 25 kJ
F40/E25+6h	+6 horas	
F40/E25+24h	+24 horas	

3.3. Amostragem

Após o processo de fabrico, as protuberâncias foram numeradas e documentadas tendo em consideração o seu posicionamento e módulo de elétrodo, como se mostra na Figura 3.6. Ou seja, a zona mais perto do operador será designada por zona da frente, a mais afastada, zona de trás. Por consequente, as restantes zonas serão designadas por laterais.

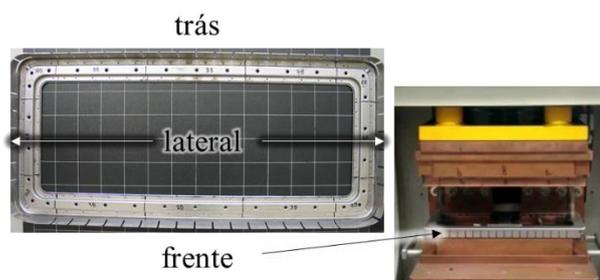


Figura 3.5 – Designação das zonas do componente, e sua respetiva posição na máquina de soldar.

Amostras da secção transversal das peças foram retiradas do componente com recurso a serra de fita e tendo em consideração a geometria do ensaio a que se destinava.

3.3.1. Análise metalográfica

Amostras retiradas dos componentes foram colocadas em resina e polidas com recurso às práticas comuns de preparação de amostras para microscopia ótica segundo a norma ISO 643:2019. Para revelação da microestrutura, as secções transversais das soldaduras foram contrastadas quimicamente com reagente Nital 2% (2ml HNO₃ + 98ml C₂H₆O), através de passagem com algodão na superfície.

As amostras foram observadas e as microestruturas foram documentadas com recurso a microscópio ótico Leica DM 4000M e respetivo software. Complementarmente, para efeitos de medição foi utilizado ainda o software Zeiss AxioVision Rel 4.8.

3.3.2. Determinação de propriedades mecânicas

3.3.2.1. Ensaio de Micro-Dureza

Foram realizados ensaios de microdureza, usando um indentador Vickers, com uma carga de 200gf durante 15 segundos. Para o efeito foi usado um equipamento Shimadzu HMV-G e as amostras foram previamente preparadas do mesmo modo do que aquele utilizado para a preparação de amostras para microscopia ótica. Como se mostra na Figura 3.6, foram realizados três perfis de dureza por amostra. Estes três perfis caracterizam simultaneamente a evolução da dureza ao longo da espessura e secção transversal da junta e aferem o valor e a variabilidade da dureza no interior da zona do *nugget*.

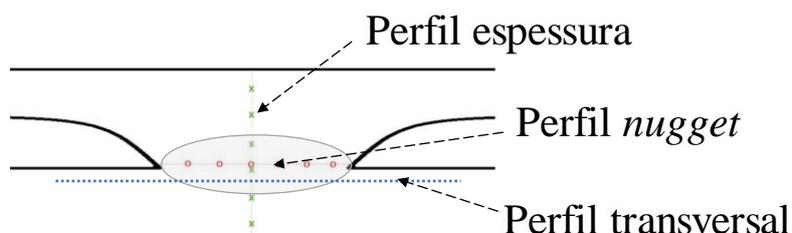


Figura 3.6 – Perfis de indentação de medição de dureza na soldadura

3.3.2.2. Ensaios de arrancamento monitorizados

Na prática corrente, a inspeção das soldaduras do componente em estudo passa por um teste de arrancamento. O processo consiste em arrancar transversalmente as partes da soldadura da peça, como se pode observar na Figura , solicitando a soldadura na direção transversal à superfície da chapa. Segundo a norma interna da empresa, esta metodologia permite aferir qualitativamente a conformidade ou não conformidade da soldadura caso haja arrancamento de material ou rutura pela zona da soldadura, respetivamente, como se mostra na Figura 3.7 b). Apesar de ser a prática normalizada, esta é realizada manualmente por um operador qualificado e não padece de registos de força. Neste sentido, para este estudo, com o intuito de aferir diferenças de resistência mecânica entre soldaduras, foi concebida uma metodologia que permite determinar a força de arrancamento das soldaduras que compõem os componentes.

O ensaio designado Teste de Arrancamento Monitorizado (TAM) consistiu na realização do teste de arrancamento convencional com recurso a uma máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X 100kN. Deste modo, foi possível controlar a velocidade de ensaio (5mm/min) e registar os valores de deslocamento e força durante todo o mesmo.

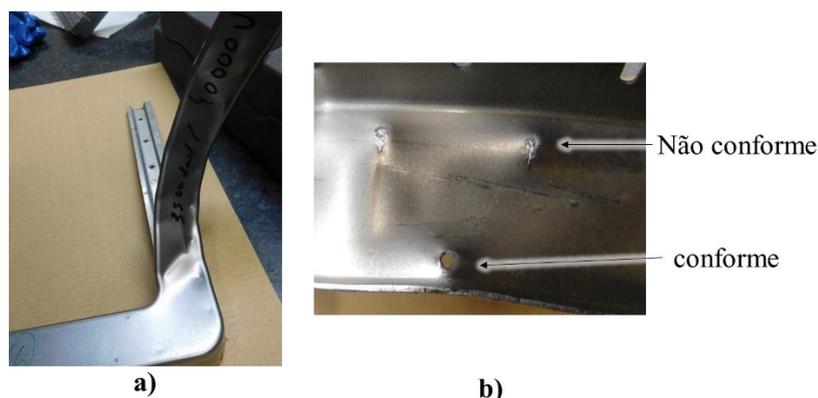


Figura 3.7 – a) Parte de componente arrancado transversalmente por teste de arrancamento
b) Conformidade da superfície de fratura da soldadura

3.3.2.3. Provete TAM

Para a realização do TAM foi preciso também conceber um provete cuja geometria permitisse que este fosse ensaiado no equipamento universal de ensaios mecânicos, como se mostra na Figura 3.8 a). Para este trabalho, foram ensaiados provetes com uma primeira proposta de geometria, a qual se mostra no esquema da Figura 3.8 b). A salientar que, como se mostra nesta figura, cada provete contém 4 soldaduras, as quais serão solicitadas individualmente com o decorrer do ensaio.

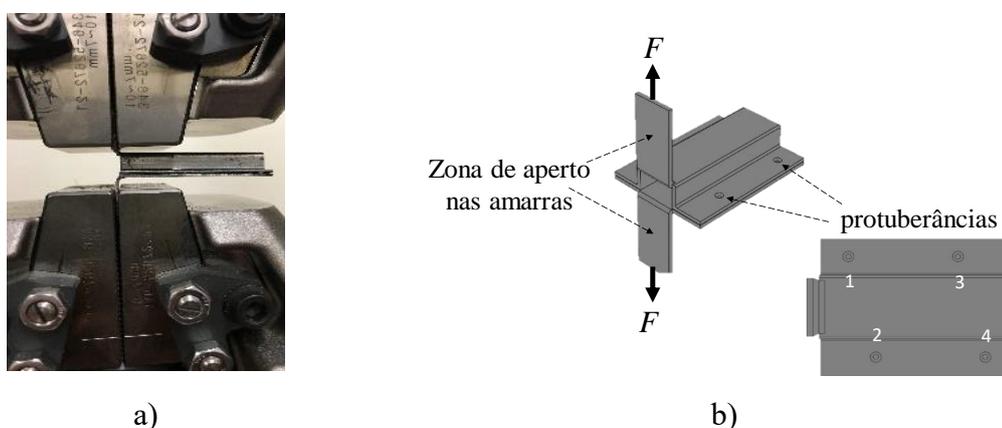


Figura 3.8 - a) Posição do provete TAM nas amarras da máquina Shimadzu AGS-X 100 kN, antes do início do ensaio **b)** Descrição das 4 soldaduras no provete, e zona de aperto nas amarras.

3.3.2.4. Tratamento de dados do teste TAM

Na Figura 3.9 mostra-se a curva Força-Deslocamento obtida após o ensaio de arrancamento. Pela curva consegue-se aferir a presença de quatro picos que correspondem à solicitação de cada uma das soldaduras que compõem o provete, sendo assim possível realizar uma análise qualitativa e quantitativa das soldaduras para uma solicitação controlada. No entanto, a realização de testes preliminares permitiu concluir que, para efeitos quantitativos, as partes da curva correspondentes às soldaduras 1 e 4 não deverão entrar em consideração para os resultados analisados nesta tese. De facto, não foi garantida coerência dimensional na distância entre a extremidade do provete e centro da soldadura 1 para todos os provetes ensaiados, a adicionar ao facto desta região se encontrar muitas vezes deformada antes do ensaio, devido ao método de fabrico. No que diz respeito à soldadura 4, sendo esta

a última a ser solicitada, para além de apresentar excessiva deformação plástica como se pode verificar na Figura 3.10, deixa de estar submetida a solicitações que permitam considerar o modo de teste como arrancamento, i.e., a solicitação nem sempre é feita na direção perpendicular à superfície das chapas soldadas. Neste sentido, no presente estudo, para efeitos quantitativos, só foram consideradas as partes da curva correspondentes as soldaduras 2 e 3.

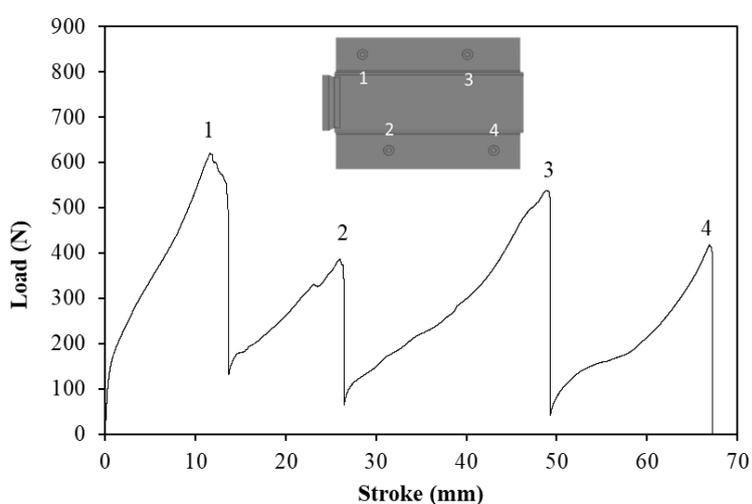


Figura 3.9 – Curva típica de Força-Deslocamento obtida após ensaio TAM



Figura 3.10 – Soldadura 4 do provete TAM

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo mostram-se os principais resultados alcançados ao longo do presente trabalho. Numa primeira parte faz-se uma consideração global acerca da qualidade das solduras dos componentes. De seguida, aborda-se o comportamento e as propriedades mecânicas das mesmas e termina-se com uma reflexão e retiram-se conclusões respeitantes à influência dos parâmetros do processo com comportamento mecânico e resistência das soldaduras.

4.1. Inspeção Visual

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, e 4.4 mostram-se imagens dos componentes F40/E23, F40/E27, F37/E20 e E37/E26 respectivamente, de modo a analisar as condições mais extremas do intervalo de parâmetros utilizado. Pela observação das imagens, a olho nú, pode-se aferir a falta de falhas severas derivadas do processo de soldadura. No entanto, numa observação mais promenorizada, com recurso às macrografias das secções transversais da soldaduras, também mostradas nas imagens, permite confirmar a existência de ligação na maioria das soldaduras. De facto, nas soldaduras analisadas, não foi possível indentificar qualquer falta de ligação, quer na parte da frente (linhas superiores) quer na parte de tras (linhas inferiores) do componente. No entanto, esta tendência não foi observada nas zonas laterais dos componentes, pois verificou-se uma elevada taxa de defeitos por falta de ligação no interface entre as duas chapas. Este facto poderá prender-se com deficiências de fixação devido a má conceção de equipamento ou desgaste desigual dos módulos dos eléctrodos nesta parte da peça, que leva a uma deficiente condução de energia e má formação da soldadura, por deficientes condições de calor gerado.

Por sua vez, comparando as macrografias das soldaduras da parte lateral do componente, das Figuras 4.1 e 4.3, 4.2 e 4.4, pode concluir-se que a susceptibilidade à ocorrência destes defeitos prende-se com a utilização de menores valores de energia (Figuras 4.1 e 4.3), já que, para componentes obtidos com valores mais altos de energia (Figuras 4.2 e 4.4) estes defeitos não são tão evidentes. Este facto demonstra que esta não conformidade resultará de condições adversas de geração de calor.

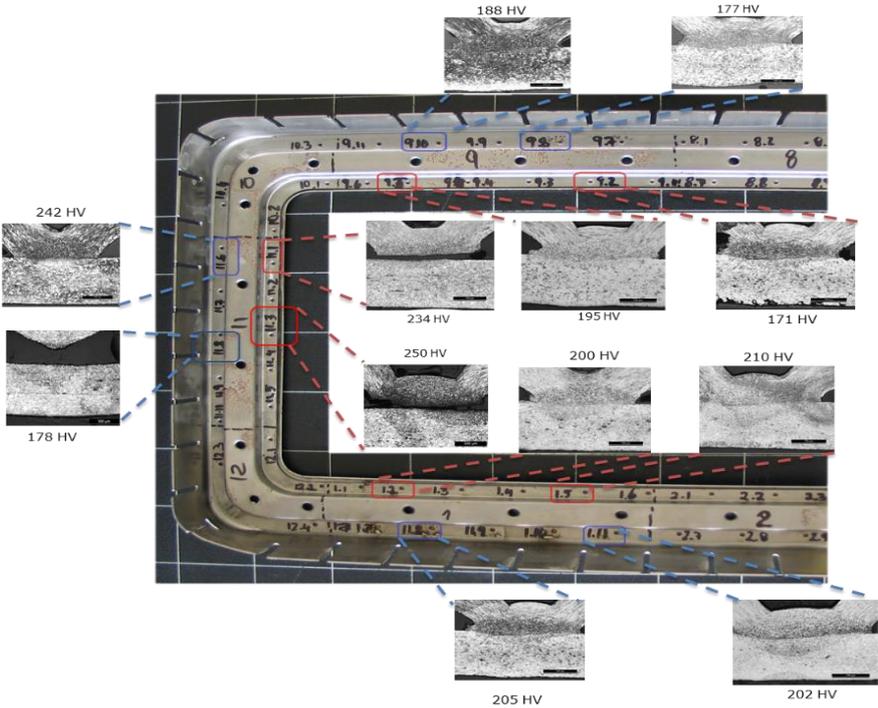


Figura 4.1 - Mapa de soldaduras da peça F40/E23

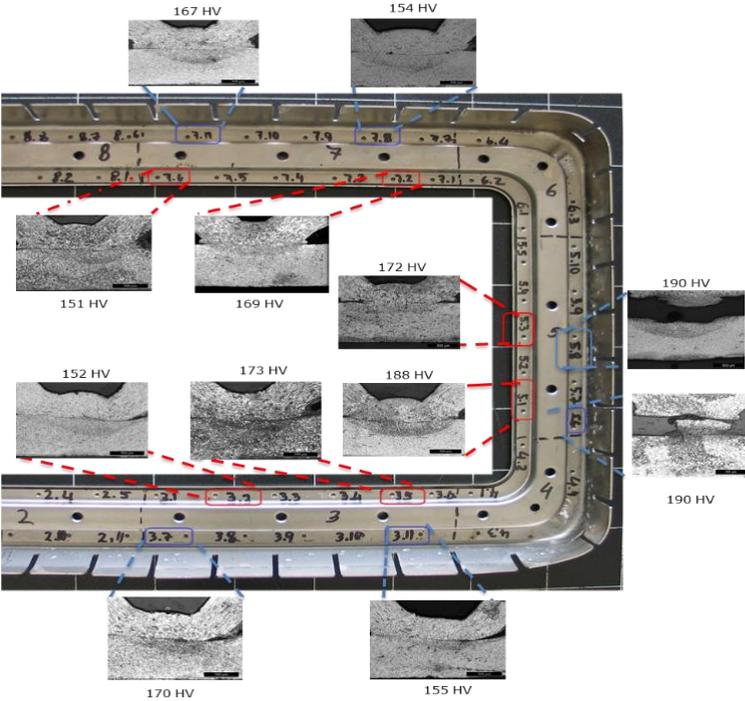


Figura 4.2 - Mapa de soldaduras da peça F40/E25

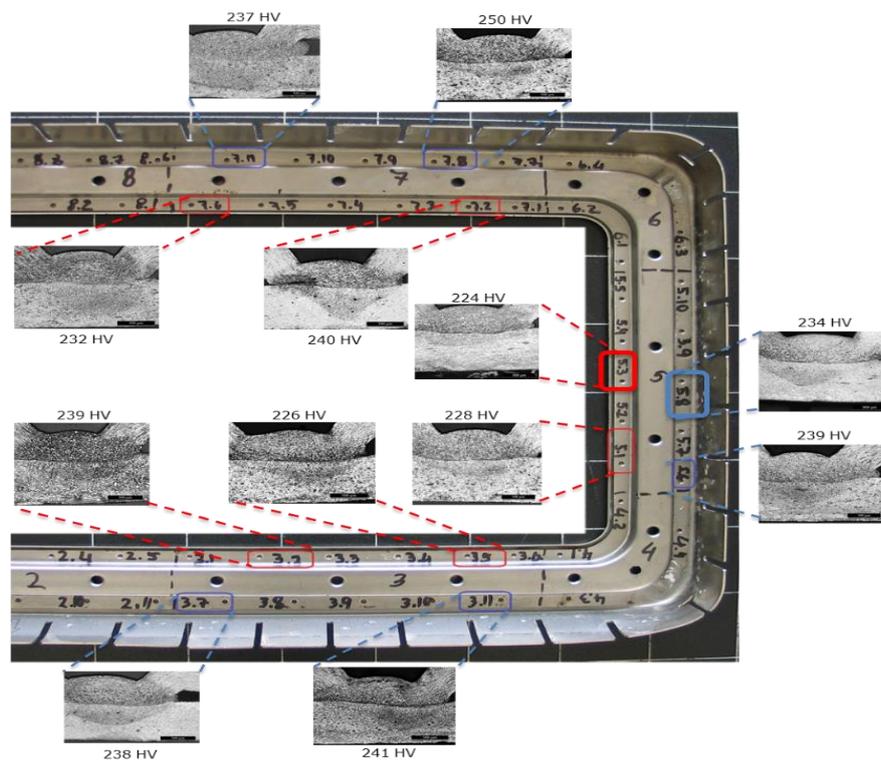


Figura 4.3 - Mapa de soldaduras da peça F37/E20

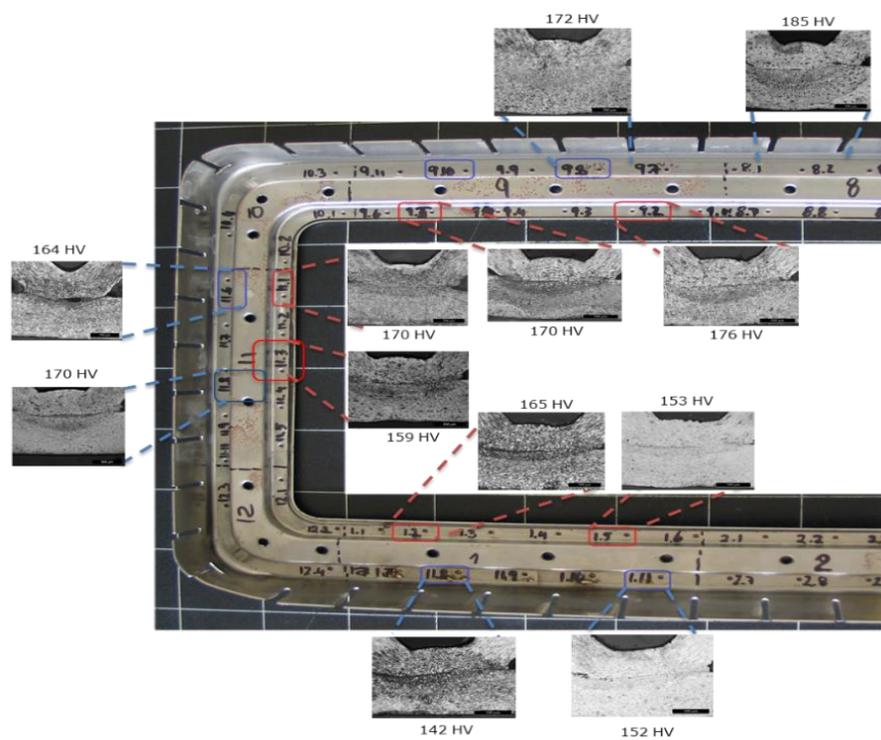


Figura 4.4 - Mapa de soldaduras da peça F37/E26

De modo a evidenciar o que foi referenciado anteriormente, na Tabela 4.1, resume-se o resultado da inspeção visual realizada nos 5 componentes estudados, e relaciona-se com a energia e a força axial utilizada para produzir as soldaduras. Assim, pela análise dos resultados, pode concluir-se que, para além da energia, outro fator importante na obtenção de ligação na parte lateral do componente será a força axial, pois, quanto maior o quociente Fz/Ec , maior foi a propensão à ocorrência de soldaduras defeituosas.

Tabela 4.1 – Inspeção visual dos módulos laterais dos componentes soldados

	F37/E26	F40/E27	F40/E25	F40/E23	F37/20
Resultados Inspeção Visual	✓	✓	✓	✗ (5)	✗ (4)
Relação Força/Energia (Fz/Ec)	1,42	1,48	1,60	1,74	1,85

✓ sem defeito | ✗ sem ligação

Devido à existência de defeitos e consequente dificuldade em determinar a resistência mecânica das soldaduras, os resultados correspondentes às secções laterais do componente não serão tidos em conta na análise da influência dos parâmetros do processo nas propriedades mecânicas das ligações.

4.2. Evolução das Propriedades Mecânicas

Na Figura 4.5 apresentam-se os valores de dureza média, medida na zona soldada de todas as soldaduras analisadas no presente estudo, ou seja, obtidas para diferentes níveis de energia e força axial. Assim, pelo gráfico, poderá considerar-se que a dureza não evolui significativamente com a energia para uma força axial de 40kN e é constante para o menor valor de força. Este facto indicia que quanto maior a força aplicada, melhor será o contacto entre as superfícies a unir e, mais eficiente será entrega térmica. Complementarmente, também é aferível pela figura que, quanto maior a força axial, maior vai ser o valor de dureza na zona soldada, indiciando maior entrega térmica durante o processo. De facto, para a mesmo nível de energia, tendo em conta uma maior área de contacto, menor será a

resistência, e mais curto será o ciclo térmico. Nesta medida, menor será o grau de amaciamento, devido a uma menor entrega térmica. Por outro lado, acrescenta o aumento de deformação causado pelo eletrodo (Winnicki, M. *et al*, 2018), que promove aumentos de dureza na ordem de grandeza daqueles que foram observados.

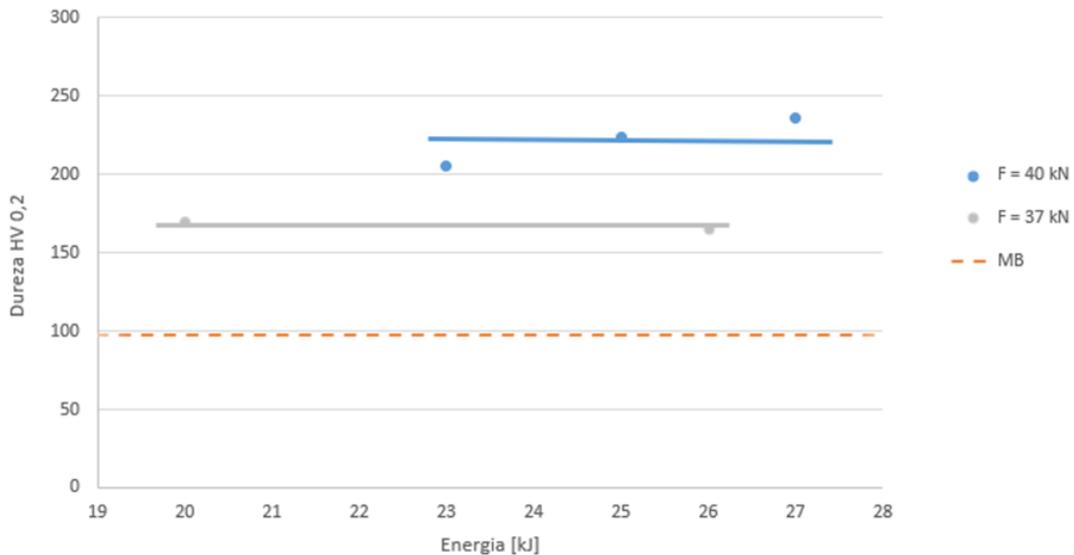


Figura 4.5 - Variação da dureza de soldadura com energia aplicada

Na figura 4.6, mostram-se os valores médios das forças máximas registadas nos ensaios TAM para as diferentes soldaduras. É mais uma vez notória a influência da força axial nas propriedades mecânicas, neste caso, a resistência de arrancamento (σ_A). Esta grandeza foi calculada através da equação 4.1

$$\sigma_A = \frac{4F_{23}}{\pi \cdot l_{ZS}^2} \quad (4.1)$$

onde, F_{23} é a média dos 2ºs e 3ºs picos das curvas obtidas nos ensaios TAM e l_{ZS} a largura da zona soldada, medida na secção transversal. Assim, quanto menor o valor da força axial, maior será a resistência ao arrancamento, para qualquer valor de energia. No entanto, para um determinado valor de força axial, a resistência máxima ao arrancamento tenderá a aumentar com a energia.

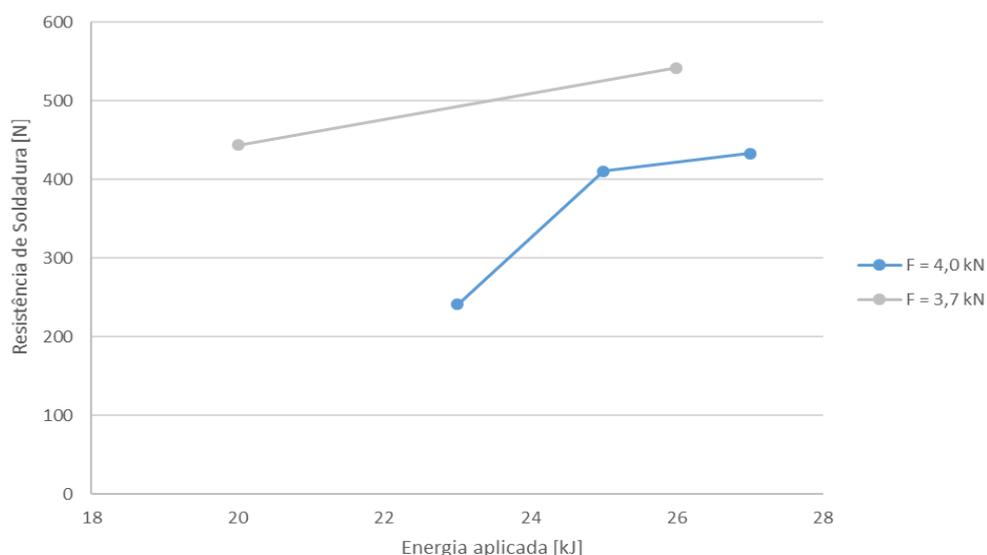


Figura 4.6 - Influência da variação da energia da força axial na resistência de soldadura

Estes resultados parecerão contraditórios quando comparados com os anteriores (Figura 4.5), pois a formação de um *nugget* mais resistente leva também à obtenção de soldaduras de menor resistência mecânica. De facto, outros autores observaram que o aumento da largura do *nugget*, promovida por motivos diversos como maiores valores de pressão ou de intensidade promovem um aumento de propriedades mecânicas (Pouranvari, M., (2012)). Observando a fotografia da Figura 4.7 onde se mostra a superfície de rotura de uma das soldaduras, é possível verificar que o material que está a ser deformado durante o ensaio não é o material da soldadura. Complementarmente, observando os perfis de dureza presentes na Figura 4.8, correspondentes às soldaduras F40/E25 e F37/E26, poderá concluir-se também que não existem variações significativas de propriedades mecânicas na vizinhança do *nugget*, e desse modo que possam justificar as diferenças observadas.

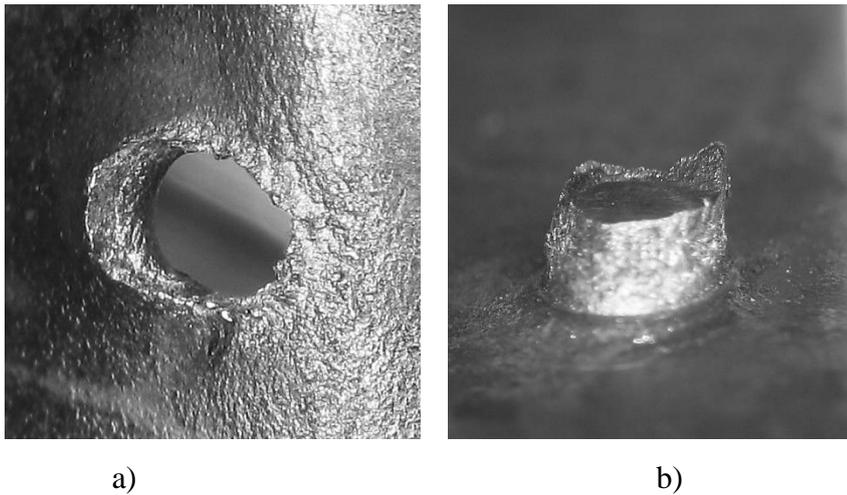


Figura 4.7 – Superfície de fratura após-teste TAM

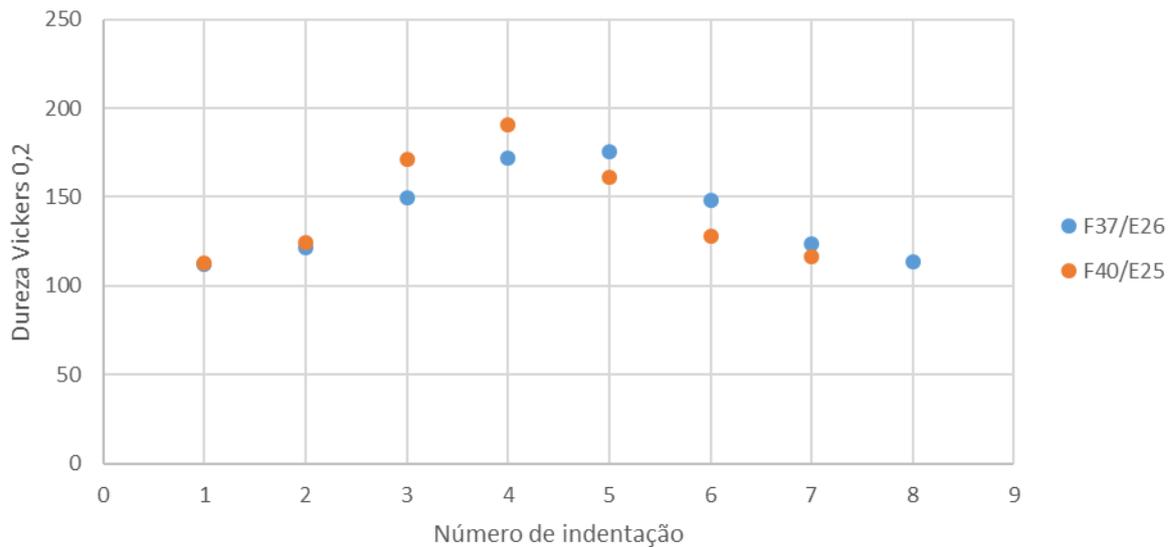


Figura 4.8 - Perfil de dureza médio das soldaduras das peças F37/E26 e F40/E25

Tendo em conta as áreas de deformação das soldaduras durante o ensaio TAM, na Figura 4.9, mostra-se a evolução da área útil de tração para duas soldaduras produzidas com aproximadamente a mesma energia, e diferentes forças axiais. Pelo gráfico é possível concluir que, quanto maior for esta força axial, devido ao maior esmagamento promovido, menor será a secção da chapa superior (reforço), sendo assim preciso menos esforço para deformar a região adjacente à soldadura durante o ensaio, o que leva a que se tenham registados menores valores de força durante o ensaio.

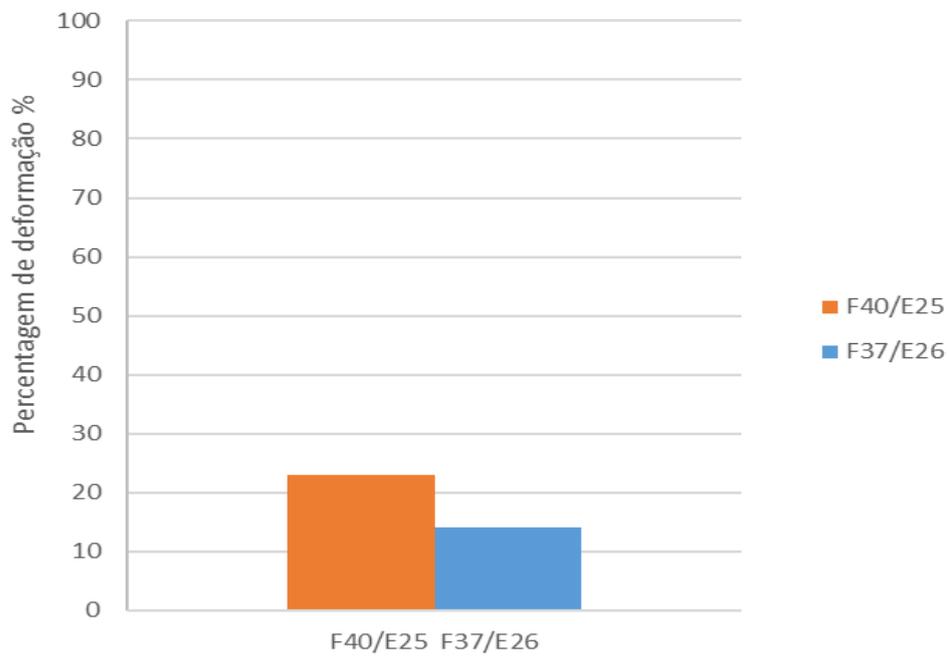


Figura 4.9 - Percentagem de deformação dos MB das soldaduras das peças F40/E25 e F37/E26

4.3. Repetitividade

Os resultados das propriedades medidas nas soldaduras obtidos anteriormente foram obtidos através do cálculo de valores médios de várias soldaduras na mesma peça. Isto porque em cada peça, os valores de dureza e resistência de cada soldadura apresentam uma diferença considerável entre, pondo em causa a certeza sobre a estabilidade do processo.

Assim, neste subcapítulo é avaliada a capacidade de processo tendo em consideração a repetitividade, isto é, comparar as propriedades micrográficas e mecânicas de soldaduras contidas em peças fabricadas com parâmetros FE iguais, porém em datas diferentes. Assim, foram estudadas soldaduras em 4 peças para este efeito, sendo cada uma estudada na sua metade direita nos módulos provenientes do lado superior, lateral e inferior da peça, conforme esquematizado na Figura 4.17. Em cada módulo foram avaliadas 2 soldaduras provenientes de amostras de resina, S1 e S2, destinadas a serem avaliadas quanto ao perfil de micrografias e durezas. Foram também avaliadas soldaduras provenientes de amostras de resistência, com objetivo de serem avaliadas quanto à resistência de soldadura.

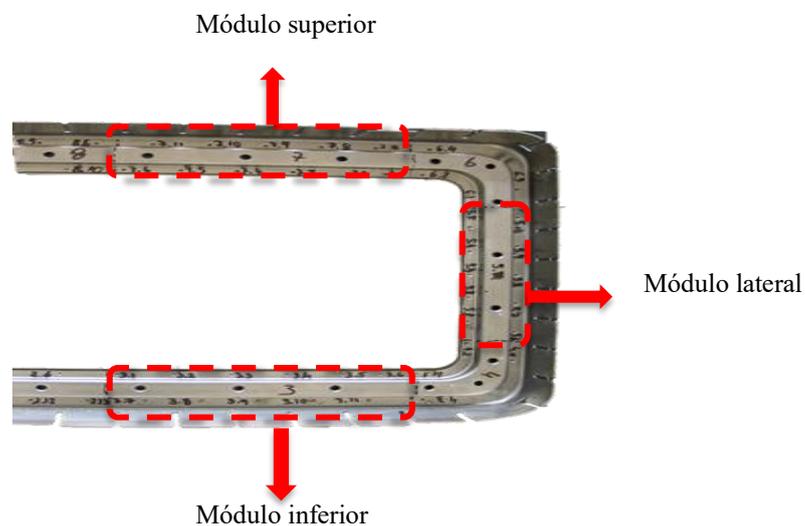


Figura 4.10 – Localização dos módulos em estudo na peça

4.3.1. Avaliação de Micrografias e Durezas

Nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 são representadas em coluna, as micrografias com ampliação 50x quimicamente atacadas, das soldaduras das posições S1 e S2 dos módulos superior, lateral e inferior, das peças FE, R1, R2 e R3, assim como o valor médio de dureza da secção longitudinal de cada soldadura, representado ao lado de cada micrografia. Com base na informação obtida nestas imagens foi construída a Tabela 4.2, que indica para todas as posições de soldadura, a diferença de amplitude de durezas em percentagem, assim como o número de soldaduras que possuem linha de descontinuidades na mesma posição de soldadura. Considera-se que não existe repetitividade quando a diferença de amplitude de dureza é superior a 10%.

Assim, por análise da Tabela 4.2, verifica-se que apenas 2 posições de soldaduras apresentam dureza com amplitude inferior a 10%, e que maior parte das soldaduras avaliadas apresentam linha de descontinuidades. Estas diferenças podem ser explicadas por alguns dos parâmetros aplicados nas soldaduras como taxa de arrefecimento, força ou energia, e caracterização mecânica dos MB não serem necessariamente iguais em todas as soldaduras. Assim sendo, conclui-se que as soldaduras não são homogêneas quanto à repetitividade, devido a alguma anomalia nos aspetos referidos.

Tabela 4.2 - Diferenças percentuais e número de soldaduras com linha de descontinuidades

	Módulo superior		Módulo inferior		Módulo lateral	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Diferença %	13	17	5	14	17	6
Diferença inferior a 10%	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Nº de soldaduras com linha de descontinuidades	3	4	3	2	4	4

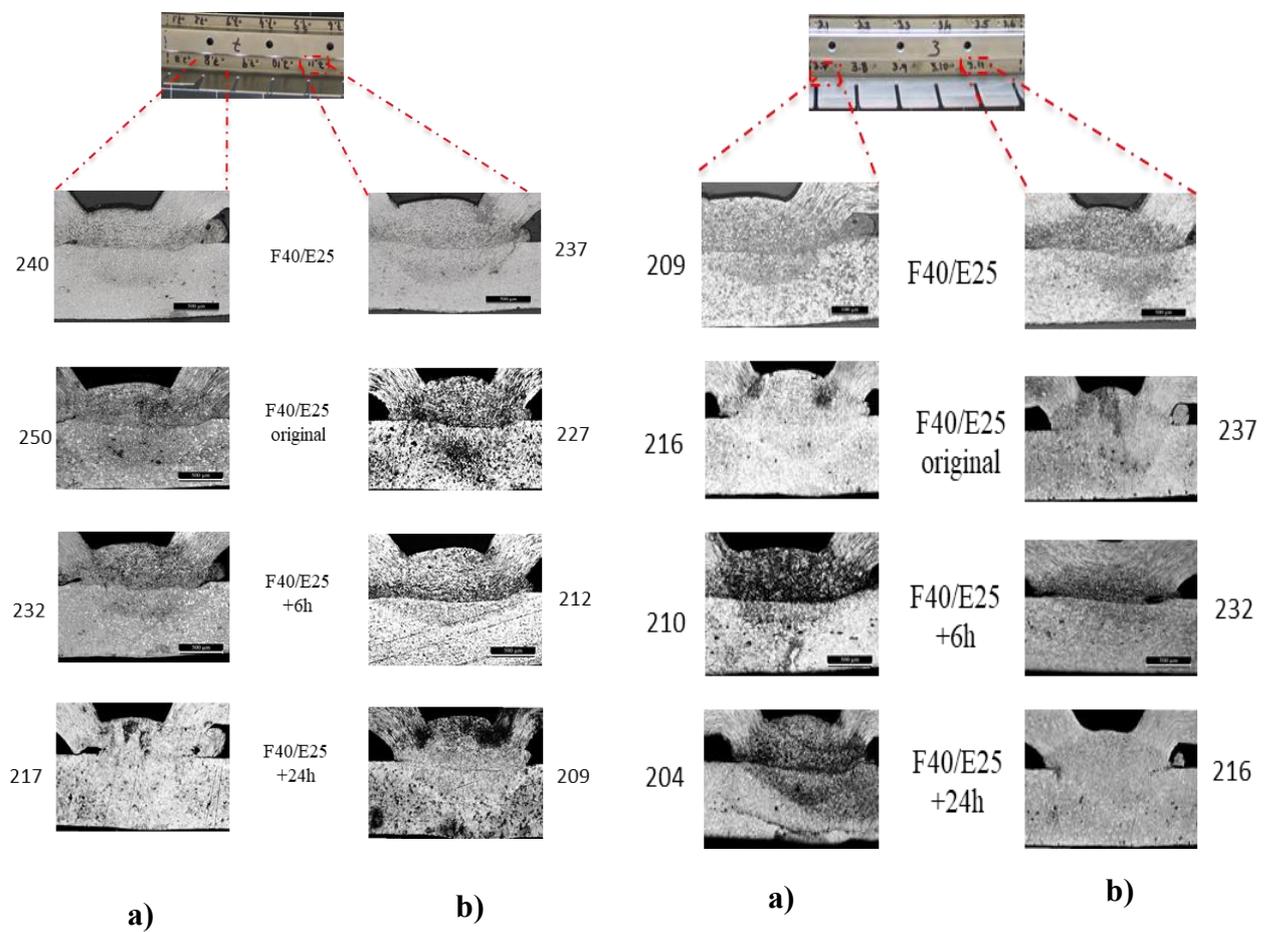


Figura 4.11 - Micrografias 50x e durezas HV0.2 de soldaduras do módulo superior das peças FE, R1, R2 e R3 **a) S1 b) S2**

Figura 4.12 - Micrografias 50x e durezas HV0.2 de soldaduras do módulo inferior das peças FE, R1, R2 e R3 **a) S1 b) S2**

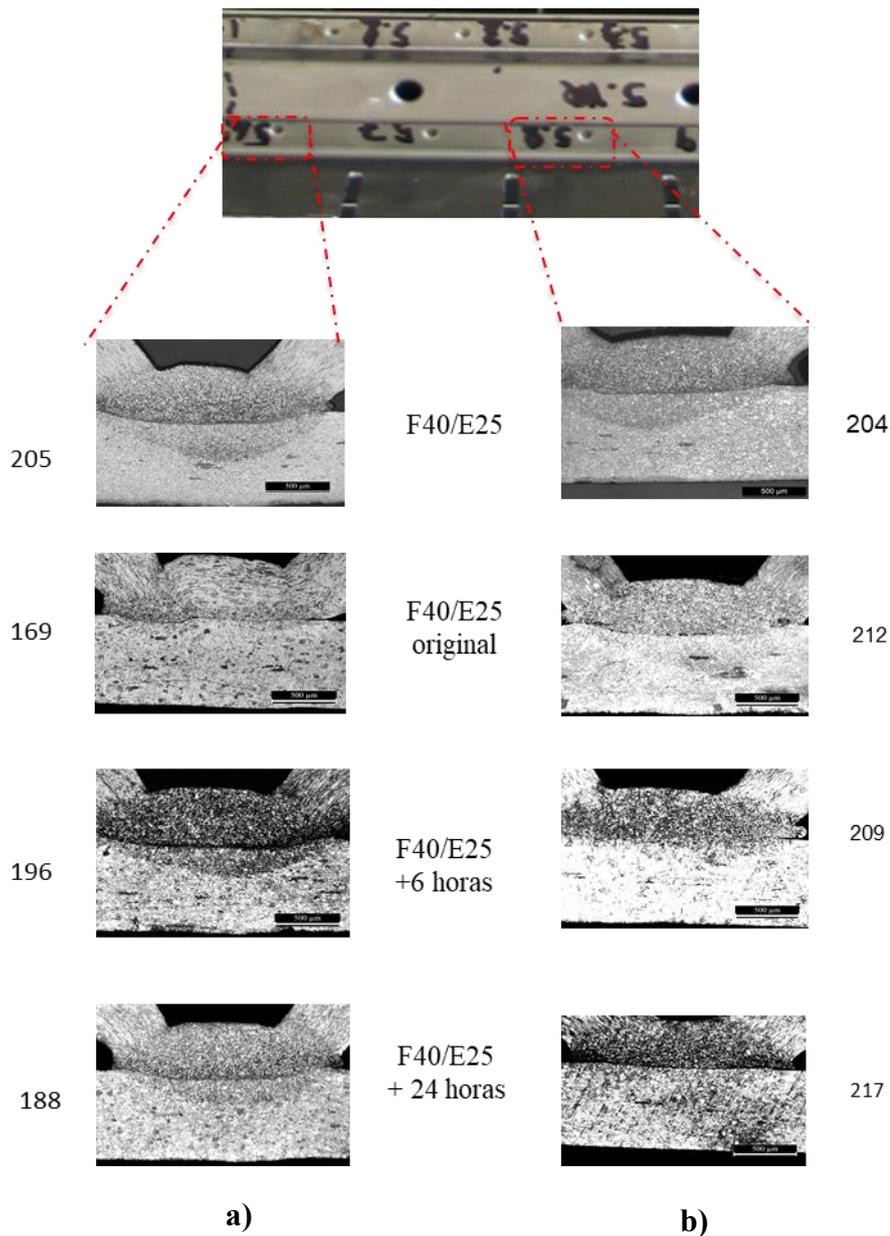


Figura 4.13 - Micrografias 50x e durezas HV0.2 de soldaduras do módulo lateral das peças FE, R1, R2 e R3 a) S1 b) S2

4.3.2. Ensaio de Força

Nos gráficos das Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 são representados os valores de resistência máxima obtidas no ensaio de força. A razão pelo qual apenas são analisadas 2 soldaduras ao invés de 4 em cada amostra, é explicada no capítulo 3.3.2.

Cada soldadura é avaliada conforme a sua posição corresponda ao lado interior ou exterior da amostra. Neste ensaio foram analisadas amostras das peças FE, R2 e R3, provenientes módulos do lado lateral, inferior e superior da peça. No módulo superior, é ainda possível comparar resultados obtidos da peça de teste com os mesmos parâmetros, fabricada com objetivo de avaliar quais as condições de ensaio a ser aplicadas.

Por análise destas figuras construiu-se a Tabela 4.3, em que para cada posição de soldadura avaliada neste ensaio, indica a diferença em percentagem de amplitude de resistência de soldadura. Considera-se novamente que, posições de soldadura com diferença percentual de amplitude superior a 10% apresentam problemas de repetibilidade. Assim, por análise da Tabela 4.3, verifica-se que apenas as soldaduras exteriores dos módulos superior e inferior apresentam uma diferença inferior a 10%. Ainda, os gráficos das Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 indicam uma maior dispersão do valor de resistência de soldaduras da peça R2 face às restantes peças nos módulos lateral e inferior.

Estes resultados permitem afirmar que não existe homogeneidade quanto à repetibilidade de qualidade de soldaduras neste ensaio e que, ou o material de base da peça R2 apresenta propriedades mecânicas diferentes das restantes peças, ou então os parâmetros FE fornecidos pelos elétrodos à peça R2 são diferentes dos fornecidos às outras peças, levando a diferente resistência mecânica das soldaduras nesta peça.

Tabela 4.3 - Diferenças percentuais da amplitude de resistência de soldadura

	Superior	Lateral	Inferior
Interior (%)	24	11	14
Exterior (%)	9	32	8

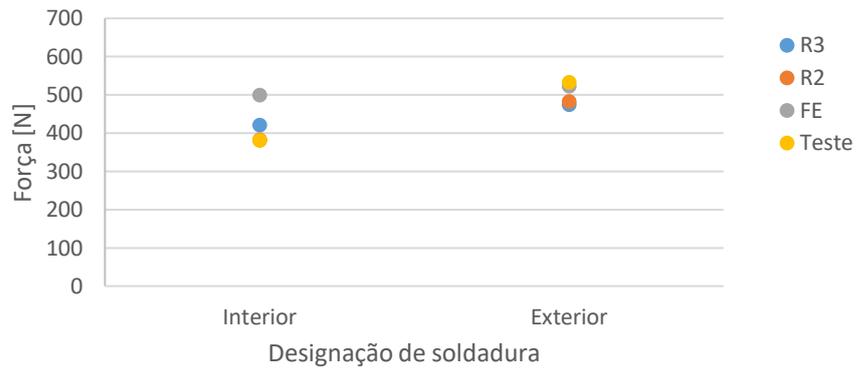


Figura 4.14 - Valores de resistência das soldaduras do módulo superior

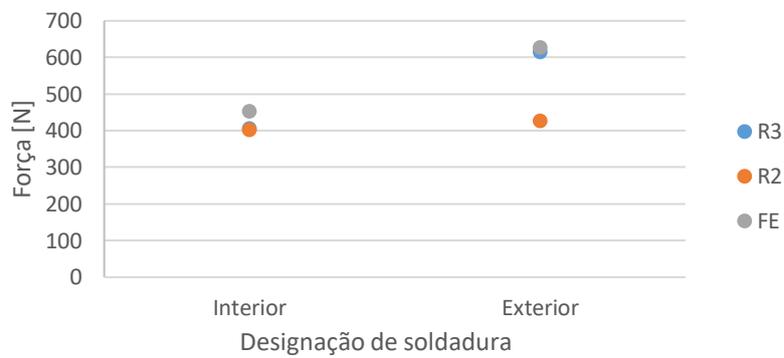


Figura 4.15 - Valores de resistência das soldaduras do módulo lateral



Figura 4.16 - Valores de resistência das soldaduras no módulo inferior

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões que se retiraram neste trabalho de investigação, bem como sugestões de trabalho a desenvolver com base nos resultados obtidos nesta dissertação. A investigação consistiu na avaliação da influência da variação dos parâmetros de Força e Energia aplicados pelos elétrodos no processo de soldadura RPW na qualidade de soldadura, assim como a repetibilidade do processo.

5.1. Influência da variação dos parâmetros de Força e Energia

- A dureza das soldaduras do perfil vertical é maior na ZF, e diminui consoante afastamento desta zona, e é constante ao longo do perfil horizontal;
- Existe em quase todas as soldaduras uma linha de descontinuidades;
- A existência de linha descontinuidades indica que nenhum parâmetro FE é suficiente para gerar temperatura de fusão do material, ocorrendo assim soldadura no estado sólido devido à recristalização e adesão dos materiais a soldar;
- A linha de descontinuidades pode ser também devida à má qualidade de limpeza prévia do material;
- A ligação de soldaduras é promovida por uma baixa relação Força/Energia, conseguida através do aumento da energia aplicada, sendo a variação de força desprezável;
- O aumento de energia aplicada promove o aumento de dureza e resistência dos materiais de soldadura;
- O aumento de força aplicada promove o aumento de dureza, e diminuição do tamanho de grão e resistência de soldadura.

5.2. Repetibilidade

A avaliação da repetibilidade do processo é feita com análise de peças fabricadas com os mesmos parâmetros aplicados de força e energia, mas fabricadas em dias e horas

diferentes. Os resultados avaliados foram a dureza, micrografias e resistência das soldaduras. Assim, as conclusões obtidas indicam que:

- Existe linha de descontinuidades em quase todas as soldaduras, o que indica que a soldadura se dá no estado sólido, ou que a qualidade de limpeza é imprópria;
- Tanto as durezas, como resistência das soldaduras apresentam diferenças nas posições de soldadura avaliadas. As soldaduras não são homogêneas, sendo que não existe repetitividade de processo. Isto pode ser devido à má qualidade de limpeza dos MB, ou aplicação dos parâmetros FE não é igual em todas as ocasiões, ou então os lotes de materiais apresentam propriedades mecânicas diferentes entre si.

5.3. Sugestões de trabalho futuro

Como recomendação de trabalho futuro, sugere-se:

- Comparar a influência da variação da limpeza prévia dos MB em peças com parâmetros FE iguais aos estudados nesta dissertação;
- Estudar a influência da variação dos parâmetros FE com classes de força aplicada mais diferentes;
- Estudar a influência de outros parâmetros aplicados como o tempo de soldadura e taxa de arrefecimento imposta pelos eletrodos;
- Estudar a influência da variação dos parâmetros FE em soldaduras com materiais similares, e comparar os resultados obtidos com os desta dissertação;
- Estudar a influência da variação dos parâmetros FE em soldaduras provenientes de diferentes módulos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Welding Society, What is Resistance Welding, Acedido em 15/12/2019, em <https://www.aws.org/rwma/page/resistance-welding>

Colombo, T., Dos Santos, G., Teruel, P., Otubo, J., Faria, A., (2018). Microstructure evolution and failure modes of a resistance spot welded TWIP steel, *Jornal de soldagem e inspeção*, volume 23, 460-473

Cunat, P., (2007), “The Welding of Stainless Steels”, *Materials and Applications Series*, volume 3

DIN EN 28167 (1992), Projections for Resistance welding

DIN EN 10130 (1999), Aço com baixo teor em carbono laminado a frio

European Steel and Alloy Grades/Numbers, “DC 01 Steel”, Acedido em 27/09/2019, em http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199

European Steel and Alloy Grades/Numbers, “DC 04 Steel”, Acedido em 27/09/2019, em http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=201

Haga, H. Aoki, K., Sato, T., Mechanisms of Formation of Weld Defects in High-Frequency Electric Resistance Welding, (1981), *Welding Journal* (Miami, Fla), volume 60

Halilović, J., Butković, S., Mehmedović, M., Šarić, E. (2014). Investigation of Hardness Profiles and Microstructure Change in the Weld Nugget and Haz of Resistance Spot Welded Low Carbon Steel, 18th International Research/Expert Conference

- Han, Z., Orozco, J., Indacochea, J. E., Chen, C. H., (1989), Resistance spot welding: a heat transfer study, *Welding Journal*, volume 73
- ISO 643:2019 (2019). Steels – Micrographic determination of the apparent grain size, *International Organization for Standardization*
- Kimchi, M., (1983), Spot Weld Properties When Welding With Expulsion, A Comparative Study, *Welding Research Supplement*
- Koscielski, L., (2015) “Resistance Projection Welding”, *Welding Tech Tips Journal*, volume 35, 10-13
- Lhereux, G. E., Belotte, E. J., (1965), *Le Soudage par Résistance*, DUNOD, Paris.
- Ma, C., Chen, D. L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A., Biro, E., Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel, (2008), *Materials Science and Engineering A*, 334–346
- Micalli J., Batalha, J., Razera, R., Mariucci, S., (2002), *Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem Tecnologia dos Processos de Soldagem e Corte*, Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, módulo 1 -11
- Mikno, Z., Pilarczik, A., Korzeniouski, M., Kustron, P., (2018) “Analysis of resistance welding processe sand expulsion of liquid metal from the weld nugget”, 522-531
- Miyachi, A. (2015), *The Importance of Squeeze Time in Resistance Welding*
- Phillips, D. H., (2016), “Welding Engineering – An introduction” 1^a Ed., John Wiley & Sons, pgs 95-113
- Pouranvari, M., (2012), Failure mode transition in similar and dissimilar resistance spot welds of HSLA and low carbon steels, *Canadian Metallurgical Quarterly*, volume 51, pgs 67-74

- Rezaei, D. M., Heidarshenas, B., Baniasadi, F., (2018) Determination of nugget size in resistance projection welding by means of numerical method and comparison with experimental measurement
- Rossi, B. E., (1954), Welding Engineering, McGraw Hill, New York.
- Rukki Metals, (2009), Resistance Welding Manual, Rautaruukki Corporation
- SemiMetais, “Aço laminado a frio”, acessido em 27/09/2019, em <http://www.semimetais.com/porta/pt-pt/acolaminadofrio>
- Senkara, J., Zhang, H., Hu, S.J., (2004), Expulsion prediction in resistance spot welding, Welding Journal, 83, 123-s, 2004.
- Song, Q., Zhang, W., Bay, N., (2005), An experimental study determines the electrical contact resistance in resistance welding, Welding Journal (Miami, Fla), volume 84,
- Sun, X., (2000), Modeling of Projection Welding Processes Using Coupled Finite Element Analyses, pgs 244-251
- Sun, X., (2001), Effect of Projection Height on Projection Collapse and Nugget Formation- A Finite Element Study, pgs 211-216
- William F. Smith (1996), Principles of Materials Science and Engineering, 3ª Ed., McGraw Hill
- Winnicki, M., Małachowska, A., Korzeniowski, M., Jasiorski, M., Jasiorski, M., Baszczuk, A., (2018), Aluminium to steel resistance spot welding with cold sprayed interlayer, Surface Engineering, volume 34, pgs 235-242
- Zhang, H., Senkara, J., Resistance Welding – Fundamentals and applications, CRC Press 2nd Edition, 2017

Zhou, K., Lilong, (2014) Study on effect of electrode force on resistance spot welding process, Journal of Applied Physics, 2014

Erro! A origem da referência não foi encontrada.
