



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise da influência da geometria da ferramenta na ligação por *Friction Stir Welding* de chapas finas em junta sobreposta

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

Autor

Sara Isabel Gonçalves Gouveia

Orientador

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado c/ Agreg. da Universidade de Coimbra
	Doutor José Alexandre Gouveia Henriques Engenheiro de estruturas na empresa Coolhaven, SA
Vogais	Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão Investigador do CEMUC

Orientador	Professor Doutor Dulce Maria Esteves Rodrigues Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
-------------------	--

Colaboração Institucional



AIMEN



Cool Haven

Coimbra, Julho, 2014

Aos meus pais, irmã e avós.

Agradecimentos

A realização desta dissertação marca o fim de uma importante etapa da minha vida. Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma decisiva para a sua concretização.

À Professora Doutora Dulce Rodrigues, responsável pela orientação desta dissertação, agradeço a disponibilidade, dedicação, paciência e a sua forma exigente, crítica, criativa e alegre de expor as ideias que tanto me fizeram evoluir.

Ao AIMEN pela colaboração na realização das soldaduras.

Ao CEMUC por me ter acolhido e me ter disponibilizado todas as condições necessárias para a concretização deste trabalho.

Ao Doutor Carlos Leitão e à Mestre M^a Inês Costa, um obrigado muito especial, pelos ensinamentos, por mostrarem disponibilidade, muita paciência e boa disposição, que muito me ajudaram durante a realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório quero agradecer pelo companheirismo, boa disposição e partilha de conhecimentos.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por nunca deixarem de acreditar e investir em mim e nas minhas capacidades, e à minha irmã por me ter “aturado” nos momentos mais difíceis e pelo apoio incondicional.

Ao resto da minha família, em especial avós, tios e primo, por todo o apoio, amor e carinho.

Ao João Vaz quero agradecer a paciência, apoio, incentivo e amizade, e por ter estado sempre presente ao longo destes anos.

Aos meus amigos de longa data, em especial às Chicas, que sempre me apoiaram, quero agradecer a força e amizade ao longo deste tempo.

Aos meus colegas e amigos, da Universidade de Coimbra, um obrigado muito especial, por estes 5 anos de aprendizagem e companheirismo.

A todos,
O meu muito obrigado.

Resumo

A investigação desenvolvida no âmbito desta dissertação de Mestrado teve por objetivo analisar a influência da geometria da ferramenta na ligação em junta sobreposta, de chapas finas utilizando a tecnologia *Friction Stir Welding* (FSW). O material base utilizado foi a liga de alumínio 5754-H22, correntemente utilizada na fabricação de painéis para a indústria automóvel.

As soldaduras estudadas foram realizadas utilizando os mesmos parâmetros de soldadura, à exceção da velocidade de translação, penetração e geometria da ferramenta. Foram comparadas três ferramentas, uma com pino cilíndrico e duas com pino cónico, e três velocidades de translação (350, 700 e 1000 mm/min). A penetração variou entre 1,1 e 1,2 mm. De modo a aferir a qualidade das ligações, procedeu-se à caracterização morfológica, mecânica e microestrutural de todas as soldaduras produzidas.

Dos resultados obtidos foi possível concluir que algumas das soldaduras apresentam limitações a nível de resistência, resultantes da existência do defeito do tipo *hooking* em algumas soldaduras. Nas soldaduras realizadas com a velocidade de translação mais reduzida, de 350 mm/min, os resultados obtidos não diferem com a geometria da ferramenta utilizada. No entanto, para velocidades de translação superiores, a utilização da ferramenta CN6 mostrou não ser uma boa opção. As soldaduras realizadas com esta ferramenta apresentam defeitos geométricos severos para velocidades de translação elevadas, e, conseqüentemente, resistência mecânica reduzida. As soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8, a velocidades de translação elevadas, não apresentam defeitos geométricos severos. Para estas soldaduras foi possível obter boa resistência mecânica, sendo estas ferramentas as mais apropriadas para serem utilizadas em produção industrial.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*, Junta Sobreposta, Liga de Alumínio 5754-H22.

Abstract

In this dissertation it is analyzed the influence of the tool geometry on the mechanical properties and defect formation in Friction Stir Lap Welding (FSLW) of very thin plates. The base material used was the 5754-H22 aluminum alloy. This aluminum alloy have been widely used in automobile structures.

The welds were performed using the same welding parameters, except for the travel speed, penetration depth and tool geometry. There were used three tools, one with cylindrical pin and two with conical pin, and three travel speeds (350, 700 and 1000 mm/min). The penetration depth was set between 1,1 and 1,2 mm. Morphological, mechanical and microstructural analyses of all the welds was performed..

This analysis enabled to conclude that some welds had limitations in terms of strength, resulting from the existence of the hooking defect in some of the welds. For the welds performed with the lower travel speed, the results were the same even if there were used different tool geometries. However, increasing the travel speed, it was found that the use of CN6 tool is not good option to the industry. The welds performed with this tool had sever geometrical defects, for high travel speeds, and, consequently, low mechanical strength. The welds performed with the CN8 and CL6 tools, at high travel speeds, do not exhibit severe geometrical defects. For these welds good mechanical strength was obtained, showing that these tools are more appropriate to industrial use.

Keywords Friction Stir Welding, Lap Joint, Aluminum Alloy 5754-H22.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. <i>Friction Stir Welding</i>	3
2.1.1. Parâmetros de soldadura.....	4
2.1.2. Caracterização microestrutural das soldaduras.....	6
2.1.3. Defeitos em soldaduras em junta sobreposta.....	7
2.2. Material base.....	8
2.2.1. Ligas de Alumínio	8
2.2.2. A liga de alumínio 5754-H22	9
2.2.3. A liga de alumínio 6082	9
2.3. Enquadramento	10
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	11
3.1. Realização das soldaduras	11
3.1.1. Ferramentas utilizadas	11
3.1.2. Parâmetros de soldadura.....	12
3.1.3. Soldaduras dissimilares	13
3.2. Análise metalográfica	14
3.3. Caracterização mecânica.....	16
3.3.1. Ensaio de dureza.....	16
3.3.2. Ensaio de tração.....	17
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	21
4.1. Análise metalográfica	21
4.1.1. Análise das soldaduras dissimilares	21
4.1.2. Análise microscópica das soldaduras	22
4.1.3. Identificação e quantificação dos defeitos.....	24
4.1.4. Estudo do afundamento das ferramentas	27
4.2. Caracterização mecânica das soldaduras	30
4.2.1. Medições de dureza	30
4.2.2. Ensaio de corte em tração	33
4.2.3. Ensaio de tração transversal.....	38
5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO	43
5.1. Conclusões.....	43
5.2. Perspetivas de trabalho	45

6. BIBLIOGRAFIA..... 47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do processo FSLW (Adaptada de (Buffa, et al. 2009)).	4
Figura 2.2 – Esquema das zonas microestruturais do processo de soldadura FSW. (Adaptado de (Leitão 2013)).	7
Figura 2.3 – Exemplo do defeito do tipo hooking no lado de avanço da amostra CN6_700.	7
Figura 3.1 – Geometria das ferramentas CL6, CN6 e CN8 e as suas dimensões.	12
Figura 3.2 – Esquema da profundidade de penetração da ferramenta (dz).	13
Figura 3.3 – Microscópicos óticos: a) ZEISS Axiovert 100HD e b) Leica DM 4000 M LED.	15
Figura 3.4 – Equipamento de microdureza da marca Shimadzu.	16
Figura 3.5 – Esquema da linha de medição de dureza.	17
Figura 3.6 – Máquina de tração da Shimadzu e extensómetro ótico, modelo Aramis 5M, da Gom.	17
Figura 3.7 - Configuração dos provetes para o ensaio de corte em tração: a) tipo A, provete solicitado no lado do avanço; b) tipo R, provete solicitado do lado do recuo.	18
Figura 3.8 – Configuração dos provetes para o ensaio de tração: a) tipo S, provete para analisar a resistência mecânica na superfície da soldadura; b) provete para ser solicitado em condições de serviço.	19
Figura 3.9 – Dimensão dos provetes para o ensaio de tração.	19
Figura 4.1 - Soldaduras de materiais dissimilares realizadas com as três ferramentas.	21
Figura 4.2 – Secções transversais das soldaduras com velocidades de rotação de 600 rpm e velocidade de translação de 350 mm/min, para as 3 ferramentas.	23
Figura 4.3 – Detalhe do lado do avanço para as soldaduras realizadas a 350 mm/min pelas ferramentas CL6 e CN6: a) antes do ataque químico; b) depois do ataque químico.	23
Figura 4.4 – Detalhe do lado do avanço e do recuo para as soldaduras realizadas a 1000 mm/min pelas ferramentas CL6 e CN6: a) depois do ataque químico; b) antes do ataque químico.	24
Figura 4.5 – Esquema da medição da redução de espessura (Δe).	25
Figura 4.6 – Evolução da redução de espessura (Δe) para todas as soldaduras.	25
Figura 4.7 – Esquema de medição do defeito do tipo <i>hooking</i> .	26
Figura 4.8 – Evolução da dimensão do defeito do tipo <i>hooking</i> para todas as soldaduras.	26
Figura 4.9 – Esquema de medição da espessura efetiva (EPT).	27
Figura 4.10 – Evolução da espessura efetiva (EPT) para todas as soldaduras.	27

Figura 4.11 – Esquema das penetrações das ferramentas: a) esquema da ferramenta CL6 com 0 mm de penetração; b)esquema da ferramenta CL6 com 1,2 mm de penetração; c) detalhe do afundamento do pino e da base.	29
Figura 4.12 – Dimensão efetiva da penetração da base na chapa superior.	29
Figura 4.13 - Perfiz de dureza obtidos para as soldaduras realizadas a 350 mm/min.....	31
Figura 4.14 - Perfiz de dureza obtidos para as soldaduras realizadas a 1000 mm/min.....	32
Figura 4.15 - Evolução do valor médio de dureza com a geometria da ferramenta e a velocidade de translação.	33
Figura 4.16 – Distribuição da deformação nos provetes solicitados do tipo R.....	35
Figura 4.17 – Carga máxima normalizada dos provetes solicitados do tipo R.	35
Figura 4.18 – Distribuição da deformação nos provetes solicitados do tipo A.....	37
Figura 4.19 - Carga máxima normalizada dos provetes solicitados do tipo A.....	37
Figura 4.20 – Distribuição da deformação dos provetes solicitados do tipo S.	39
Figura 4.21 - Carga máxima normalizada dos provetes solicitados do tipo S.	39
Figura 4.22 – Distribuição da deformação dos provetes em condições de serviço.....	41
Figura 4.23 - Carga máxima normalizada dos resultados obtidos no ensaio de tração em condições de serviço.	41
Figura 4.24 – Curvas tensão-deformação locais dos provetes solicitados em condições de serviço	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da liga de alumínio 5754-H22 (MatWeb 2014).....	9
Tabela 2.2 – Propriedades Mecânicas obtidas da liga de alumínio 5754-H22.....	9
Tabela 2.3 – Composição química da liga de alumínio 6082 (MatWeb 2014).....	10
Tabela 3.1 – Parâmetros de soldadura utilizados para o MB Al 5754-H22.	13
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados nas soldaduras dissimilares 5754/6082.	14
Tabela 3.3 – Composição química do reagente “ <i>Poulton Modificado</i> ”.....	15
Tabela 3.4 – Composição química do reagente <i>Poulton</i>	15

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

α – Ângulo de ataque [°]

v – Velocidade de translação [mm/min]

ω – Velocidade de rotação [rpm]

dz – Penetração da ferramenta [mm]

F – Força axial [N]

Siglas

A – Lado do avanço

AIMEN – Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EPT – Espessura efetiva

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FSLW – *Friction Stir Lap Welding*

FSW – *Friction Stir Welding*

MB – Material base

R – Lado do recuo

TST – *Top Sheet Thinning*

TWI – *The Welding Institute*

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZTMA – Zona termo mecanicamente afetada

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 90 que a investigação de melhorias e/ou de novas soluções de processos de soldadura tem vindo a aumentar, como é o caso da tecnologia *Friction Stir Welding* (FSW). Esta é uma tecnologia de soldadura em estado sólido que utiliza uma ferramenta, rotativa e não consumível, constituída por um pino e uma base concêntricos. Quer a geometria da base, quer a geometria do pino, apresentam uma influência determinante na qualidade final da soldadura. Durante o processo de FSW a ferramenta penetra na interface dos materiais a unir, produzindo calor pela fricção entre a ferramenta e a chapa a ser soldada. Devido ao aumento de temperatura no material e à deslocação linear da ferramenta rotativa, vai ocorrer mistura mecânica dos materiais, sob deformação plástica, produzindo a ligação. A aplicação desta tecnologia na indústria tem vindo a aumentar por ser uma técnica de soldadura em estado sólido, ou seja, a temperatura necessária para que ocorra a ligação nunca atinge a temperatura de fusão dos materiais, provocando uma menor alteração microestrutural dos materiais a unir.

Neste estudo, o principal objetivo foi analisar a influência da geometria da ferramenta na soldabilidade de chapas finas em junta sobreposta, utilizando a tecnologia FSW. As soldaduras foram realizadas em parceria com o centro tecnológico AIMEN. O material base utilizado foi a liga de alumínio 5754-H22, em chapas com 1 mm de espessura. De notar que até à data, não se encontram estudos publicados utilizando esta técnica em chapas de alumínio da liga 5xxx, com uma espessura tão fina. Para o processo de soldadura foram utilizadas três ferramentas com diferentes geometrias: uma com pino cilíndrico e duas com pino cónico, todos eles sem rosca. Todas as soldaduras foram realizadas com a mesma velocidade de rotação de 600 rpm e testaram-se três velocidades de translação diferentes (350, 700 e 1000 mm/min).

Esta dissertação está dividida em três secções. Na primeira secção, intitulada “Estado da Arte”, é realizada uma contextualização geral do processo *Friction Stir Lap Welding* (FSLW), isto é, apresenta-se uma descrição do processo e dos respetivos parâmetros de soldadura. Realiza-se ainda uma caracterização microestrutural generalista das soldaduras obtidas por este processo e ainda, uma caracterização dos defeitos geométricos existentes

em soldaduras realizadas com esta configuração. A segunda secção, denominada “Procedimento Experimental”, descreve as ferramentas e parâmetros utilizados na realização das soldaduras e explica o procedimento experimental utilizado na análise metalográfica e na caracterização mecânica das soldaduras. Na terceira secção, designada por “Apresentação e Análise de Resultados”, apresentam-se os resultados da análise metalográfica efetuada, são analisados os defeitos geométricos encontrados e é quantificada a variação da espessura efetiva. Faz-se ainda uma análise do fluxo de material durante a soldadura, com base em soldaduras dissimilares. É também estudada a penetração da ferramenta, em função da geometria, e analisada a sua influência na morfologia das soldaduras. Esta secção aborda também a caracterização mecânica das soldaduras, sendo apresentados os resultados das medições de dureza efetuadas em todas as soldaduras, e ainda, os resultados de ensaios de corte em tração e ensaios de tração transversal.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. *Friction Stir Welding*

O processo de soldadura por *Friction Stir Welding* (FSW) é uma tecnologia de soldadura em estado sólido patenteada em 1991 pelo *The Welding Institute* (TWI), no Reino Unido. A tecnologia FSW é baseada na utilização de uma ferramenta, não consumível, constituída por uma base e um pino concêntricos que é inserida no material a unir, com uma velocidade de rotação e de translação pré-determinadas. Durante a fricção entre a ferramenta e a superfície da chapa é produzido um fluxo de calor, que amacia os materiais a soldar, os quais são também deformados plasticamente pela ferramenta, produzindo a ligação (Barlas e Ozsarac 2012) (Salari, et al. 2014).

A adoção do processo FSW na indústria tem vindo a aumentar por ser um método de soldadura de alta qualidade. Na indústria automóvel e aeronáutica, por exemplo, este processo tem vindo a substituir ligações rebitadas, sendo utilizado para produzir painéis reforçados (Lang, Wagner e Eifler 2011) (Yang, et al. 2011). A técnica de soldadura por FSW é um processo de soldadura alternativo, que, quando comparado com a soldadura por fusão, apresenta vários benefícios, principalmente no que diz respeito à ligação de ligas de alumínio. Como no processo de soldadura por FSW o material é soldado em estado sólido, não ocorrem os fenómenos de fissuração a quente ou de formação de porosidades, frequentes na soldadura de alumínio por fusão. O processo de soldadura por FSW pode ser usado para unir vários tipos de combinações de metais, desde que a geometria e material da ferramenta sejam corretamente selecionados. Este processo tem sido usado para a fabricação de juntas topo-a-topo, sobrepostas, em T e de canto. Contudo, para cada configuração de junta deve ser utilizada uma geometria específica da ferramenta (Barlas e Ozsarac 2012) (Salari, et al. 2014).

Na soldadura por FSW em junta sobreposta, vulgarmente designada por *Friction Stir Lap Welding* (FSLW), que se pode observar na Figura 2.1, juntam-se duas chapas de metal, uma sobre a outra. Durante este processo, a ferramenta em rotação penetra na chapa superior, com uma profundidade pré-determinada, até que a base da ferramenta entre em

contacto com a superfície desta. Por fim, com a deslocação linear e rotação da ferramenta, realiza-se o cordão de soldadura (Yang, et al. 2011). Neste estudo vão ser analisadas soldaduras de chapas finas da liga de alumínio 5754-H22, em configuração de junta sobreposta.

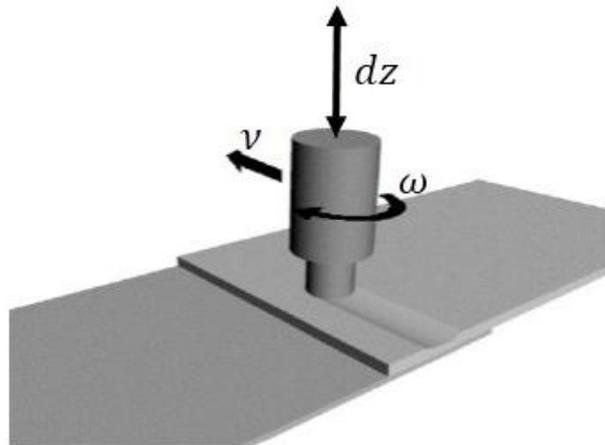


Figura 2.1 – Esquema do processo FSW (Adaptada de (Buffa, et al. 2009)).

2.1.1. Parâmetros de soldadura

As características mecânicas, morfológicas e microestruturais das soldaduras realizadas pela tecnologia FSW estão fortemente relacionadas com os parâmetros de soldadura utilizados. Esses parâmetros são a geometria da ferramenta, a velocidade de rotação (ω), a velocidade de translação (v), o ângulo de ataque (α) e a profundidade da penetração da ferramenta (dz), se a soldadura for realizada em controlo de posição, ou o valor da força axial (F), se a soldadura for realizada em controlo de força. Quer a geometria da ferramenta, quer a velocidade de rotação e de translação, são parâmetros críticos na otimização do processo FSW, devendo ser escolhidos cuidadosamente. Deste modo, é necessário entender e controlar a influência dos parâmetros de soldadura nas condições termomecânicas desenvolvidas durante o processo, de modo a poder prever a microestrutura e as propriedades mecânicas finais da ligação (Lang, Wagner e Eifler 2011) (Barlas e Ozsarac 2012) (Salari, et al. 2014).

2.1.1.1. Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta é um parâmetro importante pois afeta a quantidade de calor gerado, o fluxo de material, a potência necessária e a uniformidade da junta soldada (Barlas

e Ozsarac 2012). O projeto da ferramenta envolve a otimização de muitas características tais como o diâmetro da base, a sua geometria, o comprimento do pino, o seu diâmetro e geometria. Outro aspeto importante na ferramenta é a escolha do material para a sua fabricação. Com efeito, as soldaduras são realizadas entre 70 a 90% da temperatura de fusão do material a ser soldado, e por isto é importante que o material da ferramenta possua resistência suficiente para trabalhar a estas temperaturas sem que ocorra desgaste ou fratura durante a operação da ligação (Salari, et al. 2014).

Devido à importância da geometria da ferramenta na otimização do processo FSW, existe um grande número de estudos referentes à influência da geometria da ferramenta na evolução microestrutural e nas propriedades mecânicas das soldaduras. É de especial interesse o estudo feito por Kulekci *et al.* (2008), que utiliza uma configuração de junta sobreposta e refere o efeito de três ferramentas cilíndricas diferentes em FSLW, utilizando como material base a liga de alumínio AA5754 em chapas de 3 mm de espessura. Kulekci *et al.* (2008) concluíram que o aumento do diâmetro do pino diminui a resistência à fadiga da soldadura.

Apesar de a maioria dos estudos sobre caracterização mecânica e microestrutural de soldaduras analisarem configurações de junta topo-a-topo, é ainda possível encontrar alguns estudos sobre FSLW, como é exemplo dos estudos de Cao e Jahazi (2011) e de Salari *et al.* (2014). Cao e Jahazi (2011) estudaram soldaduras de ligas de magnésio AZ31B-H24, em chapas com 2 mm de espessura em configuração de junta sobreposta. Neste estudo, os autores chegaram à conclusão que o aumento da resistência à tração das soldaduras é conseguido através do aumento da velocidade de rotação e que o aumento do afundamento do pino na chapa inferior diminui a resistência à tração das soldaduras. No estudo feito por Salari *et al.* (2014) foi analisada a influência da geometria da ferramenta em soldaduras realizadas na liga de alumínio AA5456, em chapas de 5 e 2,5 mm de espessura, em configuração de junta sobreposta. Estes autores concluíram que a geometria do pino da ferramenta influencia significativamente a soldadura, e que a soldadura com melhor qualidade foi realizada com um pino com geometria cônica escalonada e roscada. Porém, não se encontraram estudos da influência dos vários parâmetros do processo de FSLW em soldaduras de chapas finas de 1 mm, como foi estudado no presente trabalho.

2.1.1.2. Velocidade de rotação e de translação

A velocidade de rotação da ferramenta (ω), medida em rotações por minuto (rpm), é essencial para que exista fricção entre a ferramenta e o material base. Sendo a fricção a principal fonte de calor durante a soldadura, é imprescindível saber controlar este parâmetro, uma vez que o calor gerado pode afetar negativamente as propriedades mecânicas das soldaduras (Kulekci, Sik e Kaluç 2008).

A velocidade de translação (v), definida pela distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo (mm/min), consiste no movimento linear da ferramenta responsável pela formação de uma linha de soldadura contínua. Quanto maior for esta velocidade, maior será o índice de produtividade. No entanto, o aumento da velocidade de translação conduz a uma menor taxa de calor adicionado por unidade de distância percorrida.

Pelo exposto é fácil concluir que as velocidades de rotação e de translação estão muito dependentes uma da outra. Se existir uma velocidade de rotação elevada, ou uma baixa velocidade de translação, a tendência é aumentar o calor adicionado. Assim, estes dois parâmetros devem ser otimizados em simultâneo pois o calor gerado, insuficientemente ou em excesso, e com o fluxo do material a depender destes parâmetros, pode originar defeitos como cavidades e fissuras (Barlas e Ozsarac 2012).

2.1.2. Caracterização microestrutural das soldaduras

Nas soldaduras produzidas por FSW é possível encontrar três zonas microestruturais diferentes, como se pode observar na Figura 2.2, onde se mostra a zona de material base (MB), a zona afetada pelo calor (ZAC), a zona termo mecanicamente afetada (ZTMA) e ainda, uma subzona da ZTMA, o *nugget*. De notar que, apesar de esta imagem corresponder a uma soldadura topo-a-topo, as diferentes zonas microestruturais são comuns a todas as soldaduras realizadas por FSW, independentemente da configuração de junta adotada.

Como se pode ver na Figura 2.2 a ZTMA apresenta grãos alongados e deformados, devido à deformação plástica originada pela ferramenta. O *nugget*, que faz parte da ZTMA, é caracterizado por grãos equiaxiais, resultantes da recristalização dinâmica causada pela deformação plástica intensa e pela exposição a temperaturas elevadas durante o processo FSW. A ZAC, é a região situada entre a ZTMA e o MB, onde existem alterações microestruturais, associadas aos ciclos térmicos induzidos pelo processo de soldadura, mas

não ocorre deformação plástica por ação da ferramenta (Barlas e Ozsarac 2012) (Leitão 2013).

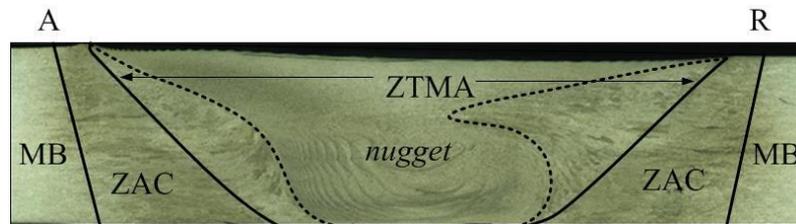


Figura 2.2 – Esquema das zonas microestruturais do processo de soldadura FSW. (Adaptado de (Leitão 2013)).

2.1.3. Defeitos em soldaduras em junta sobreposta

2.1.3.1. Defeito do tipo *hooking*

Nas soldaduras realizadas por FSW em configuração de junta sobreposta, pode existir a formação do defeito geométrico do tipo *hooking*, como se pode observar na Figura 2.3. Este defeito, que tem origem entre as duas chapas soldadas, pode surgir em ambos os lados das soldaduras, apenas no lado do avanço ou apenas no lado de recuo, podendo prolongar-se em direção ao *nugget*. Este defeito consiste no prolongamento da linha que separa as duas chapas, que resulta da penetração da ferramenta na chapa inferior, que cria um fluxo ascendente deste material (Cao e Jahazi 2011) (Salari, et al. 2014).

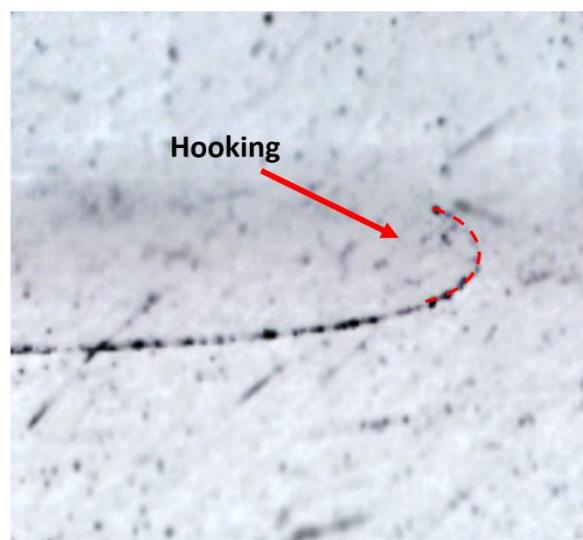


Figura 2.3 – Exemplo do defeito do tipo *hooking* no lado de avanço da amostra CN6_700.

O defeito do tipo *hooking* aparece apenas na ZTMA, pois é nesta zona que existe movimento do fluxo de material provocado pela ferramenta. Na ZAC nunca aparece este defeito porque é uma zona que só é afetada pelo calor da soldadura (Cao e Jahazi 2011).

A presença deste defeito vai reduzir a espessura efetiva da chapa superior, e por conseguinte, reduz a resistência mecânica da ligação. Segundo Yang *et al.* (2011), ao diminuir o calor gerado no material e com a utilização de ferramentas especialmente projetadas para esta configuração de junta, é possível promover a diminuição, ou mesmo eliminação, do defeito do tipo *hooking* em chapas de alumínio.

2.1.3.2. Defeito do tipo *Top Sheet Thinning*

O defeito do tipo *Top Sheet Thinning* (TST) é um defeito geométrico que pode ocorrer em qualquer tipo de soldaduras produzidas por FSW, mas que se torna especialmente grave no caso das soldaduras em junta sobreposta, uma vez que estas, na generalidade dos casos, já apresentam uma importante diminuição da secção resistente devido à presença do defeito do tipo *hooking*. Este defeito consiste na redução da espessura efetiva das chapas, durante a soldadura, de forma que o cordão final apresenta uma forma côncava. O excesso de penetração da base da ferramenta na superfície das chapas é o principal fator para a ocorrência deste defeito (Cao e Jahazi 2011) (Caldeira 2013).

2.2. Material base

2.2.1. Ligas de Alumínio

Como é do conhecimento geral, as ligas de alumínio apresentam uma combinação de propriedades que são muito vantajosas em engenharia. Estas ligas têm grande aplicação na indústria de transportes, por apresentarem baixa densidade, na indústria alimentar, por não serem tóxicas, e na indústria de energia, devido às suas propriedades de condutividade elétrica (Smith 1998).

O alumínio puro tem uma baixa resistência mecânica e não pode ser utilizado em aplicações onde a resistência à deformação e à fratura são fundamentais. Assim, adicionam-se outros elementos ao alumínio de modo a melhorarem a sua resistência mecânica. Estes elementos podem ser o cobre, o magnésio, o zinco, entre outros. Quando o alumínio é combinado com outros elementos pode atingir valores de resistência mecânica da ordem de 690 MPa (Smith 1998) (Extrusal 2011).

2.2.2. A liga de alumínio 5754-H22

As ligas de alumínio da série 5xxx fazem parte do conjunto das ligas de alumínio que podem ser endurecidas por trabalho mecânico a frio, ou seja, abaixo da temperatura de recristalização do material. Nas ligas 5xxx o principal elemento de liga é o magnésio, o qual, em solução sólida, ajuda a promover o endurecimento. Ou seja, o encruamento e o endurecimento por solução sólida, são os dois métodos utilizados para aumentar a resistência mecânica desta liga. Nesta ligas de alumínio, em que o principal elemento de liga é o magnésio, é comum observar-se o efeito de Portevin-Le Chatelier nas curvas tensão-deformação. As ligas desta série possuem boas características de soldabilidade, maquinação e resistência à corrosão e são muito utilizadas na fabricação de painéis para a indústria automóvel (Smith 1998) (Barlas e Ozsarac 2012).

A composição química da liga de alumínio 5754-H22 é apresentada na Tabela 2.1, onde se observa que a percentagem de magnésio varia entre 2,60% e 3,60% (Aalco Metals Ltd 2014). A referência H22 indica que esta liga foi endurecida por encruamento e sujeita a recozimento parcial, sendo designada como endurecida a 1/4 (MatWeb 2014). Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas das propriedades mecânicas desta liga de alumínio, determinadas em ensaios mecânicos realizados neste trabalho.

Tabela 2.1 – Composição química da liga de alumínio 5754-H22 (MatWeb 2014).

Composição Química [% Wt.]								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
≤0,40	≤0,40	≤0,10	≤0,50	2,60 a 3,60	≤0,20	≤0,15	≤0,30	93,6 a 97,3

Tabela 2.2 – Propriedades Mecânicas obtidas da liga de alumínio 5754-H22.

$\sigma_{0.2}$ Tensão limite de elasticidade [MPa]	σ_u Resistência à tração [Mpa]	ϵ Deformação Real	Dureza Vickers
171	281	0,142	76

2.2.3. A liga de alumínio 6082

As ligas de alumínio da série 6xxx são ligas de alumínio que podem ser submetidas a tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Nas ligas 6xxx os principais

elementos de liga são o magnésio e o silício, cuja precipitação provoca o endurecimento das ligas deste grupo (Smith 1998).

A composição química da liga de alumínio está apresentada na Tabela 2.3, onde se observa que a percentagem de magnésio varia entre 0,6% e 1,2% e a percentagem de silício varia entre 0,7% e 1,3%.

Tabela 2.3 – Composição química da liga de alumínio 6082 (MatWeb 2014).

Composição Química [% Wt.]								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
0,7 a 1,3	≤0,50	≤0,10	0,4 a 1	0,60 a 1,20	≤0,20	≤0,10	≤0,25	95,2 a 98,3

2.3. Enquadramento

O levantamento bibliográfico realizado demonstrou que a investigação sobre a ligação por FSW de chapas finas, em junta sobreposta, era ainda limitada até à data do presente trabalho. Assim sendo, a aplicação industrial desta tecnologia, neste tipo específico de aplicação, requeria não só o desenvolvimento de todos os procedimentos de soldadura, como também, a realização de uma caracterização mecânica e microestrutural detalhada das soldaduras. Neste contexto, este estudo presente teve como objetivo avaliar a influência da geometria da ferramenta e da velocidade de translação na microestrutura, macroestrutura e propriedades mecânicas de soldaduras, em junta sobreposta, na liga de alumínio 5754-H22.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste estudo foram realizadas soldaduras por FSW, em junta sobreposta, de chapas com 1 mm de espessura, na liga de alumínio 5754-H22. De modo a averiguar a influência da velocidade de translação na qualidade das soldaduras e tentar otimizar a produtividade do processo, foram realizadas diversas soldaduras combinando velocidades de translação distintas, com diferentes ferramentas. Para cada ferramenta foi previamente otimizada a profundidade de afundamento para que as soldaduras analisadas nesta dissertação de Mestrado fossem todas isentas de defeitos macroscópicos. As soldaduras foram produzidas em parceria com o centro tecnológico AIMEN.

3.1. Realização das soldaduras

3.1.1. Ferramentas utilizadas

Para a análise da influência da geometria da ferramenta na ligação por FSW de chapas finas em junta sobreposta foram projetadas três ferramentas, com geometrias distintas, otimizadas de modo a tentar eliminar os defeitos de soldadura, quer do tipo *hooking*, quer do tipo *Top Sheet Thinning* (TST). Estas ferramentas foram fabricadas em aço-ferramenta H13, por ser um aço de elevada resistência destinado a operações de trabalho mecânico a quente.

As geometrias e dimensões dos pinos das três ferramentas projetadas mostram-se na Figura 3.1. Estas ferramentas serão identificadas ao longo do texto utilizando as siglas CL6, CN6 e CN8, que identificam a geometria e as dimensões dos pinos. Sendo assim, a sigla CL6 identifica a ferramenta com pino cilíndrico com 6 mm de diâmetro, as siglas CN6 e CN8 identificam as ferramentas com pinos cônicos, com diâmetro superior (junto à base) de 6 e 8 mm, respetivamente. Todas as ferramentas desenvolvidas apresentavam base cônica, com 12 mm de diâmetro, e independentemente da geometria, todos os pinos apresentavam 1,3 mm de comprimento e geometria não roscada. De notar que não é frequente, neste processo de soldadura, a utilização de pinos com uma geometria não roscada (Yang, et al. 2011).

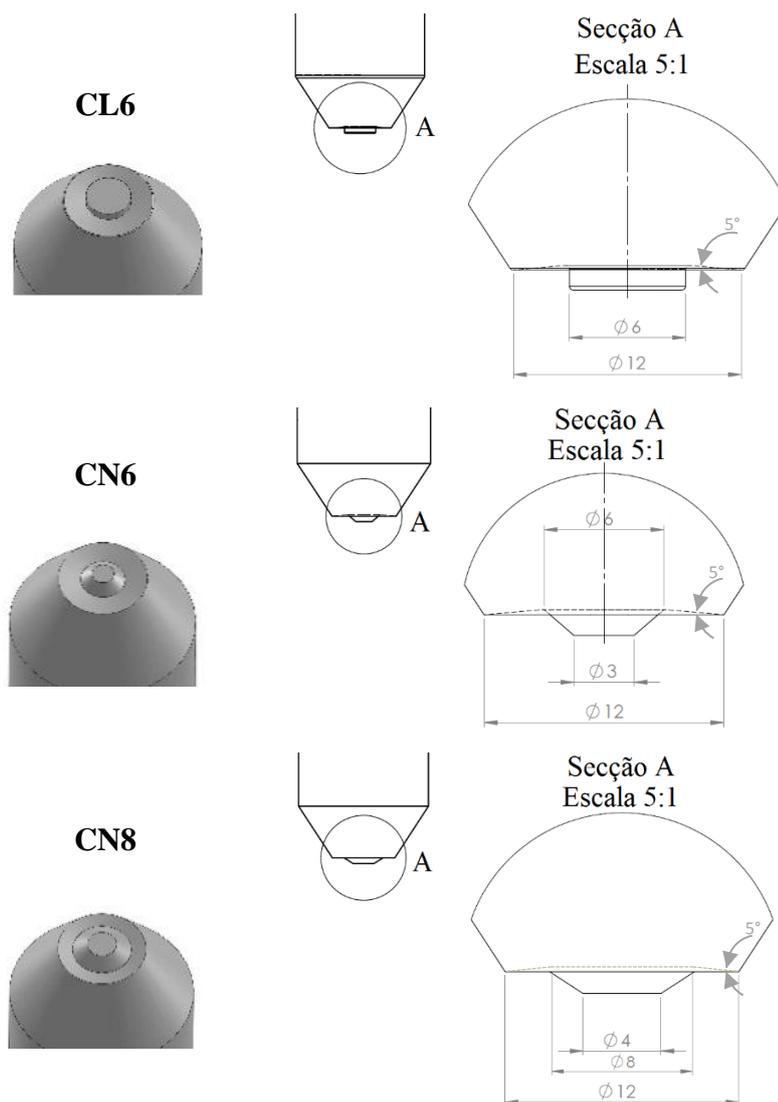


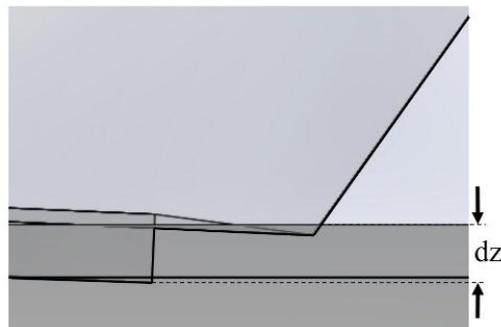
Figura 3.1 – Geometria das ferramentas CL6, CN6 e CN8 e as suas dimensões.

3.1.2. Parâmetros de soldadura

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros do processo utilizados na produção das nove soldaduras estudadas neste trabalho. De notar que, todas as soldaduras foram realizadas com a mesma velocidade de rotação e o mesmo ângulo de inclinação da ferramenta. Testaram-se várias velocidades de translação (350, 700 e 1000 mm/min) para as diferentes ferramentas (CL6, CN6 e CN8). A profundidade da penetração da ferramenta (dz), representada na Figura 3.2, variou entre 1,1 e 1,2 mm, de acordo com a geometria da ferramenta, para que todas as soldaduras fossem isentas de defeitos macroscópicos superficiais.

Tabela 3.1 – Parâmetros de soldadura utilizados para o MB Al 5754-H22.

Ferramenta	Velocidade de Rotação [rpm]	Velocidade de Translação [mm/min]	Ângulo α [°]	dz [mm]
CL6		350		1,1
CL6		700		1,1
CL6		1000		1,1
CN6		350		1,1
CN6	600	700	2	1,2
CN6		1000		1,2
CN8		350		1,2
CN8		700		1,2
CN8		1000		1,2

**Figura 3.2** – Esquema da profundidade de penetração da ferramenta (dz).

Ao longo do texto para identificar as diferentes soldaduras, será utilizada uma sigla do tipo “a_b”, em que “a” representa a ferramenta utilizada e “b” identifica a velocidade de translação com que foi produzida a soldadura.

3.1.3. Soldaduras dissimilares

Neste trabalho foram ainda produzidas algumas soldaduras dissimilares, isto é, soldaduras realizadas entre dois materiais base distintos. Estas soldaduras foram produzidas de modo a tornar possível uma análise do fluxo do material, durante o processo de soldadura, ou seja, tentar visualizar a interação entre os materiais das chapas superior e inferior. As soldaduras dissimilares foram realizadas com as ligas de alumínio 5754 e 6082, e os parâmetros utilizados na realização destas soldaduras encontram-se na Tabela 3.2. Uma vez que estes materiais apresentam diferenças importantes de resistência mecânica e de comportamento plástico a altas temperaturas (Leitão 2013), de modo a analisar a influência destas

propriedades na qualidade da ligação, foram efetuadas soldaduras em que se alterou sucessivamente o posicionamento das chapas. Ao longo deste texto, as soldaduras produzidas utilizando a liga 5754 como chapa superior, serão designadas por 5_6 e as soldaduras com a liga 6082, como chapa superior, serão designadas 6_5.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados nas soldaduras dissimilares 5754/6082.

Soldadura	Velocidade de Rotação [rpm]	Velocidade de Translação [mm/min]	Ângulo α [°]	dz [mm]	Material da chapa superior
CL6_5_6					5754
CN6_5_6					5754
CN8_5_6	600	350	2	1,2	5754
CL6_6_5					6082
CN6_6_5					6082
CN8_6_5					6082

3.2. Análise metalográfica

Para a análise metalográfica extraíram-se amostras, na direção transversal à direção da soldadura, de todas as soldaduras e, posteriormente, fez-se a montagem dessas amostras em resina, para que fosse possível a sua análise. Todas as amostras foram polidas, utilizando lixas de granulometria decrescente (P180, P600, P1000 e P2500). De seguida, foram polidas com recurso a suspensão de diamante de 6, 3 e 1 μm , para a obtenção de um acabamento espelhado. Para revelar a microestrutura das soldaduras utilizou-se o reagente “*Poulton Modificado*”, cuja composição química se encontra na Tabela 3.3. A composição química do reagente *Poulton* mostra-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Composição química do reagente “*Poulton Modificado*”.

<i>Poulton Modificado</i>	
<i>Poulton</i>	50 ml
HNO ₃	25 ml
H ₂ O	25 ml
Àcido Crómico	12 g

Tabela 3.4 – Composição química do reagente *Poulton*.

<i>Poulton</i>	
HCl	12 ml
HNO ₃	6 ml
HF	1 ml
H ₂ O	1 ml

A microestrutura das soldaduras foi examinada com recurso a dois microscópios óticos, o microscópio ZEISS Axiovert 100HD e o microscópio Leica DM 4000 M LED, com ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x, e registada com recurso a uma máquina fotográfica da marca Canon, modelo PowerShot G5.



a)



b)

Figura 3.3 – Microscópios óticos: a) ZEISS Axiovert 100HD e b) Leica DM 4000 M LED.

3.3. Caracterização mecânica

3.3.1. Ensaio de dureza

Para a execução dos ensaios de dureza utilizou-se a máquina de microdureza da marca *Shimadzu*, apresentada na Figura 3.4. Neste ensaio utilizou-se um indentador piramidal de diamante para efetuar as indentações. As medições de dureza foram feitas com uma carga de 200 g, com uma duração de 15 s e utilizou-se um espaçamento entre medições de 500 μm . As indentações foram efetuadas ao longo da secção transversal, como é indicado na Figura 3.5, apenas na chapa superior. Optou-se por fazer apenas uma linha de dureza porque, como referido por Caldeira (2013), os perfis de dureza das chapas inferior e superior são semelhantes, mesmo que a chapa inferior seja sujeita a uma menor influência da base da ferramenta. As medições de dureza foram realizadas em todas as soldaduras.



Figura 3.4 – Equipamento de microdureza da marca Shimadzu.

Após completadas as indentações necessárias, fotografou-se cada indentação com o auxílio do microscópio *Zeiss Axiotec 100 HD*, utilizando uma ampliação de 500x, e a câmara *Canon PowerShot G5*. De seguida, procedeu-se à sua medição no programa *AxionVision*, um *software* disponibilizado pela *Carls Zeiss*. Posteriormente registaram-se as medições numa folha *template* do *Excel* onde se efetuou o cálculo da dureza em *Vickers*.

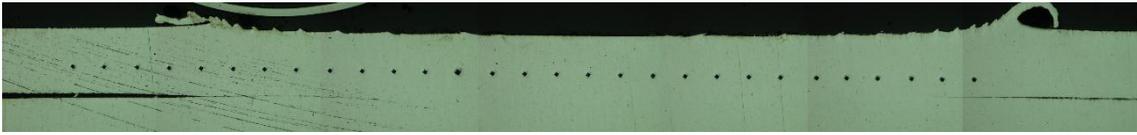


Figura 3.5 – Esquema da linha de medição de dureza.

3.3.2. Ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração utilizou-se a máquina de tração da marca *Shimadzu*, modelo Autograph AG-X, que se pode observar na Figura 3.6, com uma célula de carga com 5 kN de capacidade máxima. Para a aquisição da deformação local, ao longo das amostras, utilizou-se um extensómetro ótico, modelo *Aramis 5M*, da marca *Gom*, que também pode ser observado na Figura 3.6. Para a utilização deste equipamento é indispensável uma preparação antecipada dos provetes, através da aplicação de uma camada uniforme de tinta branca, salpicada com pequenas gotas de tinta preta, em todos os provetes, formando um padrão aleatório. Para a análise da resistência mecânica das soldaduras, realizaram-se para, todas as soldaduras, ensaios de corte em tração, como exemplificado na Figura 3.7, e ensaios de tração transversal, como exemplificado na Figura 3.8.



Figura 3.6 – Máquina de tração da Shimadzu e extensómetro ótico, modelo Aramis 5M, da Gom.

Para os ensaios de corte em tração, foram preparados provetes com dimensões 120×16 mm como mostra a Figura 3.9 a). Para cada soldadura realizaram-se dois tipos de ensaios de corte em tração de modo a avaliar isoladamente a resistência mecânica do lado do avanço (Figura 3.7 a) e do lado do recuo (Figura 3.7 b) das soldaduras. Para a análise da resistência mecânica das soldaduras solicitadas do lado do avanço, foram realizados ensaios de corte em tração designados no corrente texto por tipo A. Como é possível observar na Figura 3.7 a), após ser maquinado um provete com as dimensões da Figura 3.9 a), foi necessário retirar uma extremidade na chapa superior, no lado do recuo, e uma extremidade da chapa inferior, no lado do avanço, para se proceder ao ensaio. Para avaliar a resistência mecânica das soldaduras solicitadas do lado do recuo, foram realizados ensaios de corte em tração designados por tipo R. A Figura 3.7 b) mostra a configuração dos provetes do tipo R, onde é possível observar que foi necessário retirar a extremidade da chapa superior, do lado do avanço, e a extremidade da chapa inferior, do lado do recuo, aos provetes com a dimensão inicial da Figura 3.9 a), para se poder realizar os ensaios.

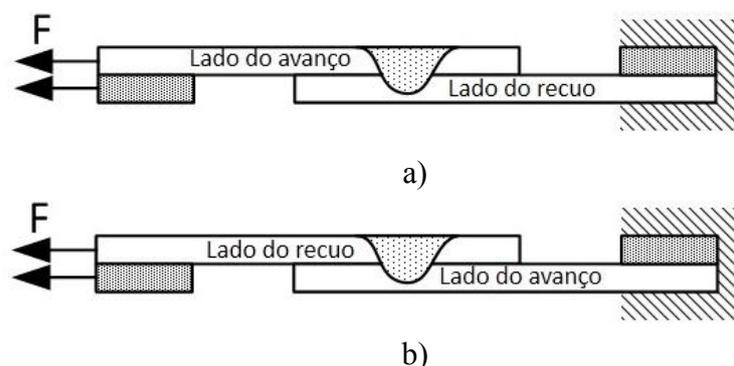


Figura 3.7 - Configuração dos provetes para o ensaio de corte em tração: a) tipo A, provete solicitado no lado do avanço; b) tipo R, provete solicitado do lado do recuo.

Para os ensaios de tração transversal prepararam-se duas configurações de provetes distintas, como é exemplificado na Figura 3.8. Foram testados provetes onde apenas foi solicitada a chapa inferior, tendo sido retiradas as duas extremidades da chapa superior, denominados neste trabalho por provetes do tipo S e representados na Figura 3.8 a). Estes provetes foram concebidos de modo a testar a continuidade da ligação entre as duas chapas ao longo da secção transversal da soldadura. A dimensão destes provetes é idêntica à dimensão inicial dos provetes utilizados para o ensaio de corte em tração.

Foram também testados provetes em condições de solicitação próximas daquelas a que as soldaduras estarão sujeitas em condições de serviço, como exemplificado na Figura 3.8 b). A dimensão destes provetes, que se mostra na Figura 3.9 b), foi inferior à dimensão dos provetes testados em corte, de modo a não ultrapassar a capacidade máxima da máquina de tração na realização deste ensaio.

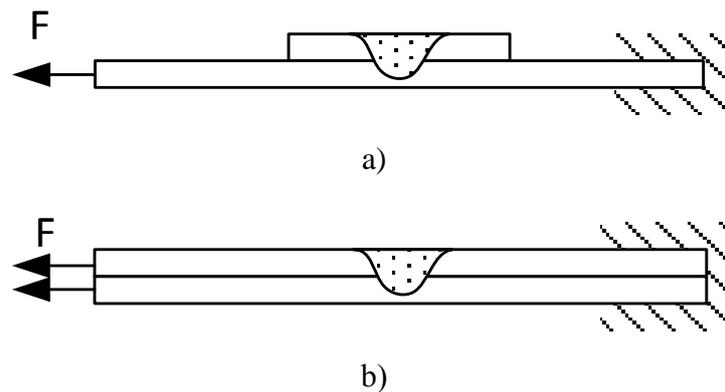


Figura 3.8 – Configuração dos provetes para o ensaio de tração: a) tipo S, provete para analisar a resistência mecânica na superfície da soldadura; b) provete para ser solicitado em condições de serviço.

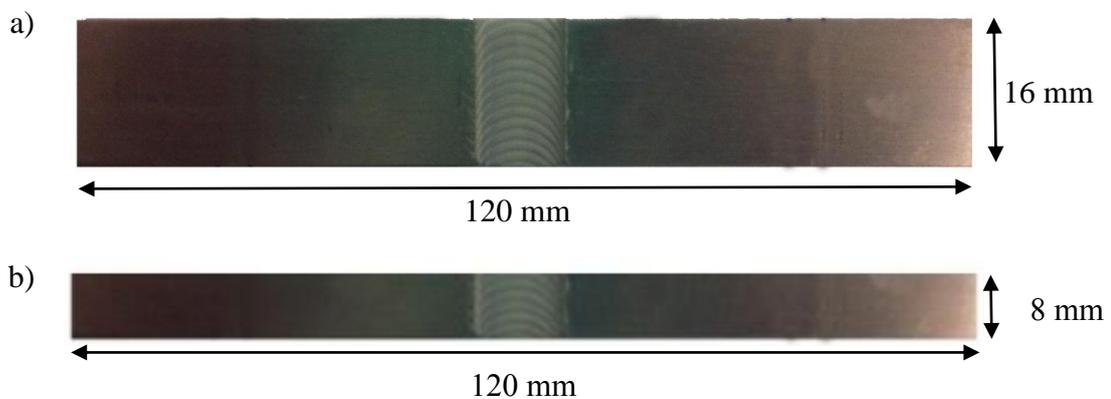


Figura 3.9 – Dimensão dos provetes para o ensaio de tração.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Análise metalográfica

4.1.1. Análise das soldaduras dissimilares

Como explicado no procedimento experimental, de modo a analisar a interação dos materiais base durante a soldadura, foram realizadas soldaduras dissimilares entre as ligas de alumínio 5754 e 6082, os quais permitem obter contrastação diferenciada após ataque químico. A Figura 4.1 apresenta as secções transversais das seis soldaduras dissimilares efetuadas. Nas imagens apresentadas, o material mais claro corresponde à liga de alumínio 5754 e o material mais escuro à liga de alumínio 6082. Na figura, as soldaduras realizadas com a ferramenta CN8, mostram-se nas imagens a) e d), com a ferramenta CL6, nas imagens b) e e), e com a ferramenta CN6, nas imagens c) e f).

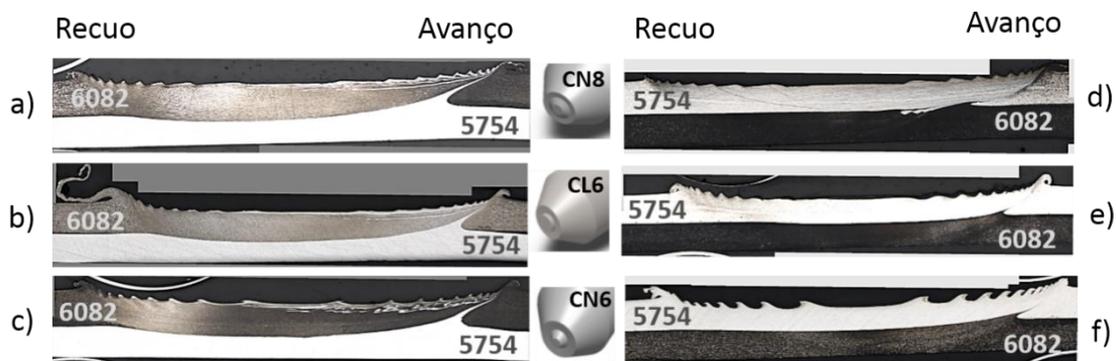


Figura 4.1 - Soldaduras de materiais dissimilares realizadas com as três ferramentas.

Como se pode observar na Figura 4.1, o tipo de ferramenta não influencia de forma determinante as características morfológicas macroscópicas das soldaduras, que são semelhantes independentemente da geometria do pino. Em todas as soldaduras é possível visualizar que terá ocorrido um fluxo de material da chapa inferior, na direção ascendente, no lado do avanço. Este movimento do material foi devido à penetração do pino na chapa inferior, e ao movimento de rotação da ferramenta, que força o material da chapa inferior a

ascender. Uma estrutura morfológica do tipo *hooking*, que resulta precisamente deste fluxo ascendente, é perfeitamente visível do lado do avanço de todas as soldaduras dissimilares.

Apesar das semelhanças na morfologia das soldaduras dissimilares, podem no entanto ser notadas ligeiras diferenças, no lado do avanço das soldaduras, dependendo do posicionamento das chapas 5754 e 6082. Nas soldaduras 6_5 (a), b) e c)), em que a liga de alumínio 5754 corresponde à chapa inferior, existe muito mais material da chapa inferior a ascender, do que nas soldaduras 5_6, quando a liga de alumínio 6082 corresponde à chapa inferior. Com efeito, é de notar que nas soldaduras 6_5 (a), b) e c)), algum do material da chapa inferior chega à superfície das soldaduras, o que mostra que efetivamente existe mistura, ainda que incipiente, dos materiais de base na região do *nugget*. Finalmente, as imagens da Figura 4.1 permitem ainda concluir que, nas soldaduras de materiais dissimilares, o material com resistência mecânica inferior a elevada temperatura (a liga 6082) deverá corresponder à chapa inferior, de modo a minimizar o defeito do tipo *hooking*, e deste modo, maximizar a qualidade da ligação.

4.1.2. Análise microscópica das soldaduras

Na Figura 4.2 mostram-se as secções transversais das soldaduras realizadas com velocidade de translação de 350 mm/min, para as três ferramentas, após se ter realizado o ataque químico. Na mesma figura, é ainda possível ver em detalhe o lado de avanço e o lado de recuo de cada soldadura a ser analisada. A Figura 4.3 apresenta o lado de avanço das soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN6, antes e após o ataque químico. Com efeito, analisando a Figura 4.2 é de notar a presença de uma linha escura ascendente, bem demarcada, no lado do avanço das amostras CL6_350 e CN6_350. No entanto, após uma observação atenta à Figura 4.3, comparando as imagens a) e b), é possível concluir que, tanto para a amostra CL6_350, e como para a amostra CN6_350, a linha preta mencionada anteriormente não é discernível, pelo que corresponderá a uma linha de óxidos, que acompanha o movimento ascendente do material, e não uma descontinuidade do tipo *hooking* (as linhas de óxidos são apenas visíveis após a realização do ataque químico). Analisando estas figuras é possível concluir que as soldaduras realizadas com as três ferramentas, à velocidade de translação de 350 mm/min, não apresentam defeito do tipo *hooking*.

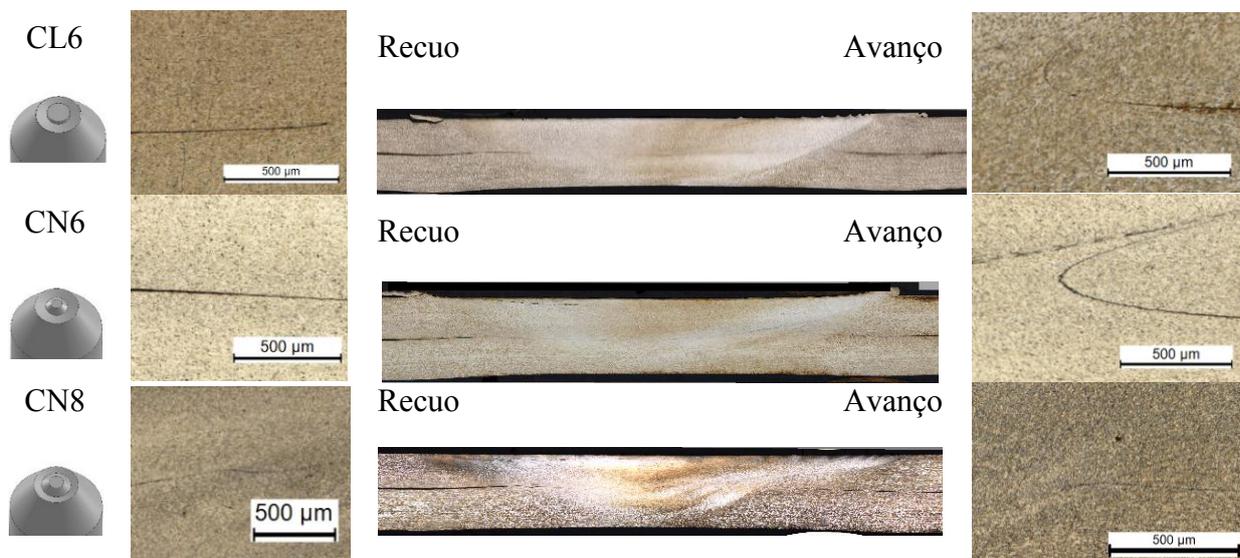


Figura 4.2 – Secções transversais das soldaduras com velocidades de rotação de 600 rpm e velocidade de translação de 350 mm/min, para as 3 ferramentas.

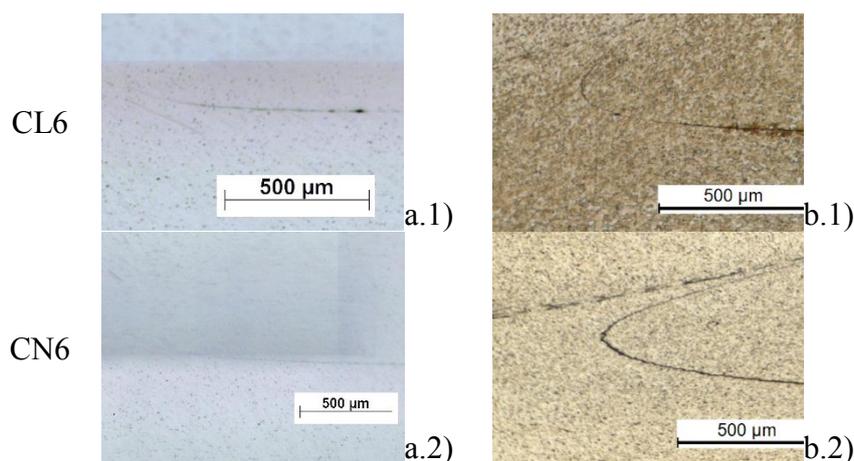


Figura 4.3 – Detalhe do lado do avanço para as soldaduras realizadas a 350 mm/min pelas ferramentas CL6 e CN6: a) antes do ataque químico; b) depois do ataque químico.

Na Figura 4.4 são comparados os detalhes do lado do avanço, e do lado do recuo, das soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN6, com velocidade de translação de 1000 mm/min, antes e depois do ataque químico. Analisando a amostra CL6_1000, é possível concluir que tanto no lado do recuo (a.1)) como no lado do avanço (a.2)) existe uma linha preta bem definida. Contudo, no lado do recuo, antes do ataque químico (b.1)) não existe nenhuma linha preta, idêntica à observada depois do ataque químico. Conclui-se assim que a linha preta corresponde a uma linha de óxidos que acompanha o movimento ascendente do material, como já se observou anteriormente para outras soldaduras. Para as soldaduras

realizadas com as ferramentas CL6 e CN6, no lado do avanço (b.2) e b.4), respetivamente), é possível identificar na figura o defeito do tipo *hooking*. No entanto, na soldadura efetuada pela ferramenta CL6 (b.2)), apenas é visível um pequeno declive, enquanto a soldadura realizada com a ferramenta CN6 (b.4)), apresenta um defeito do tipo *hooking* mais severo.

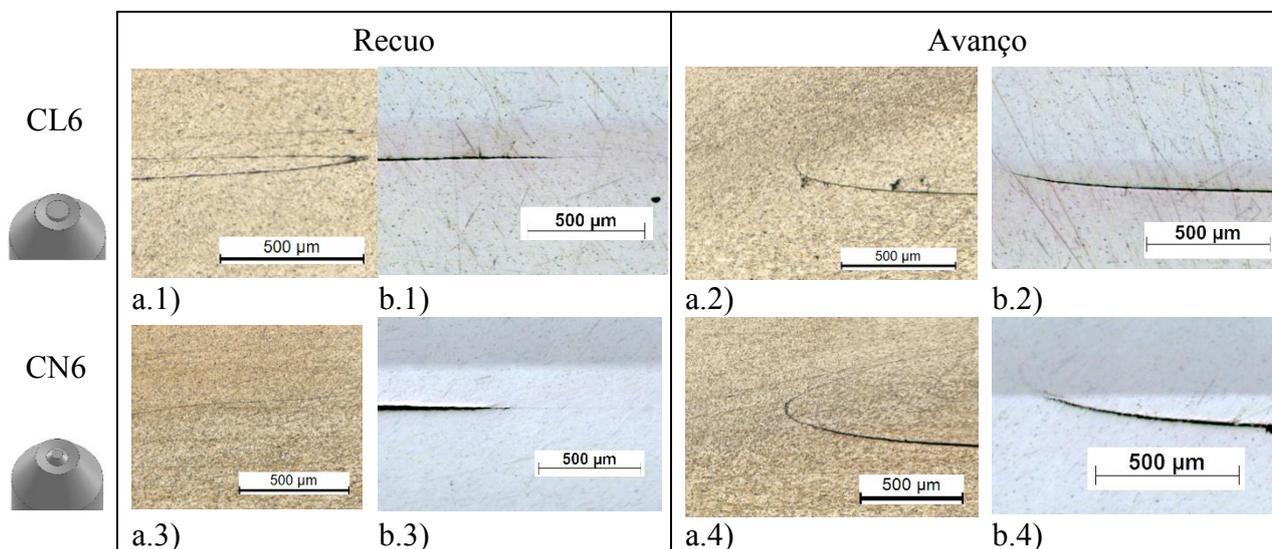


Figura 4.4 – Detalhe do lado do avanço e do recuo para as soldaduras realizadas a 1000 mm/min pelas ferramentas CL6 e CN6: a) depois do ataque químico; b) antes do ataque químico.

4.1.3. Identificação e quantificação dos defeitos

Nesta secção, analisa-se em função dos parâmetros de soldadura, a dimensão dos defeitos do tipo *Top Sheet Thinning* (TST) e do tipo *hooking*, detetados nas soldaduras, e ainda, a evolução da espessura efetiva.

Como foi referido na revisão bibliográfica, o defeito do tipo TST ocorre no cordão da soldadura, quando existe redução de espessura da chapa superior. A percentagem de redução de espessura (Δe) foi calculada usando a relação,

$$\Delta e [\%] = \left(1 - \frac{e_0}{e_{MB}}\right) \times 100, \quad (4.1)$$

onde, e_0 é a espessura do componente no centro da soldadura e e_{MB} é a espessura do componente na zona do material base, como se mostra na Figura 4.5.

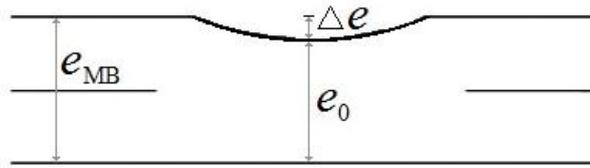


Figura 4.5 – Esquema da medição da redução de espessura (Δe).

A Figura 4.6 apresenta a evolução da redução de espessura, em %, de todas as soldaduras. Por observação da figura é possível concluir que existe redução de espessura (Δe) para todas as soldaduras, ou seja, todas as soldaduras possuem o defeito do tipo TST, sendo em algumas soldaduras mais severo do que noutras. A Figura 4.6 mostra que para a velocidade de translação de 350 mm/min, o valor da redução de espessura não difere com a geometria da ferramenta, apresentando um valor de redução de espessura próximo de 10%. Com o aumento da velocidade de translação para 700 mm/min, existem variações do valor da redução de espessura, mais ou menos significativas, de acordo com a geometria da ferramenta. Essas variações mostram-se contantes com o aumento da velocidade de translação para 1000 mm/min. Observa-se na figura, que as soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8 não apresentam variações importantes de variação de espessura com o aumento da velocidade de translação. Já as soldaduras realizadas com a ferramenta CN6, são as soldaduras que apresentam um defeito do tipo TST mais severo, visto que, na figura, as soldaduras apresentam um valor de redução de espessura próximo de 20%, com o aumento da velocidade de translação. Este aumento deve-se sem dúvida à necessidade de aumentar a penetração da ferramenta de 1,1 para 1,2 mm, ao aumentar a velocidade de translação (Tabela 3.1).

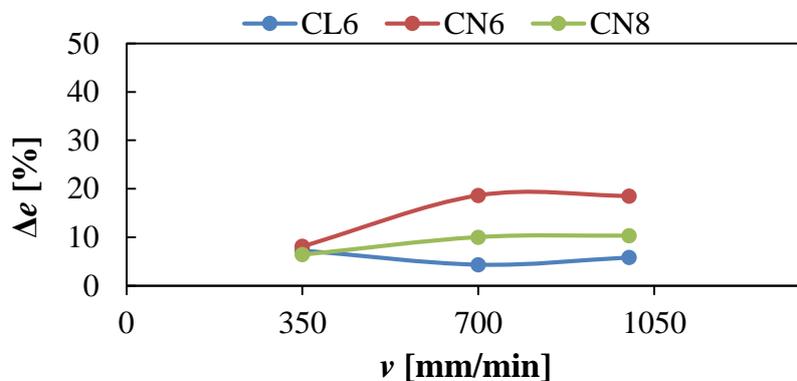


Figura 4.6 – Evolução da redução de espessura (Δe) para todas as soldaduras.

Neste estudo foi ainda possível identificar a presença do defeito do tipo *hooking* no lado do avanço de algumas soldaduras. Contudo, não foi possível identificar este defeito, no lado do recuo, em nenhuma soldadura. A severidade deste defeito foi avaliada realizando medições de acordo com o esquema da Figura 4.7.

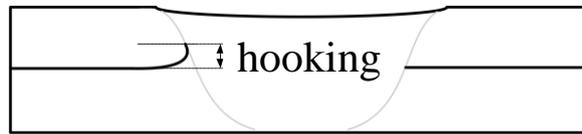


Figura 4.7 – Esquema de medição do defeito do tipo *hooking*.

A Figura 4.8 apresenta a evolução da dimensão do defeito do tipo *hooking* de todas as soldaduras. Por observação da figura é possível ver que para a velocidade de translação de 350 mm/min, o defeito do tipo *hooking* é inexistente para qualquer ferramenta utilizada. O aumento da velocidade de translação originou um aumento na dimensão do defeito tipo *hooking*. Nas soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8, existe um aumento na dimensão do defeito do tipo *hooking*, mas de pequena amplitude. Para as soldaduras realizadas com a ferramenta CN6, com o aumento da velocidade de translação, registou-se um aumento severo da dimensão do defeito do tipo *hooking*, quando comparado com as soldaduras realizadas pelas outras ferramentas. Estes resultados enfatizam a análise da secção anterior.

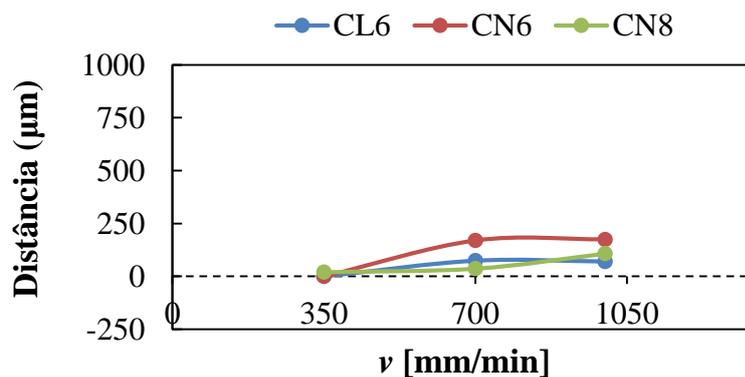


Figura 4.8 – Evolução da dimensão do defeito do tipo *hooking* para todas as soldaduras.

A Figura 4.9 mostra o esquema de medição da espessura efetiva (EPT). Como se observa na figura, a medição da espessura efetiva conjuga os dois defeitos existentes, sendo representativo de secção resistente efetiva de todas as soldaduras.

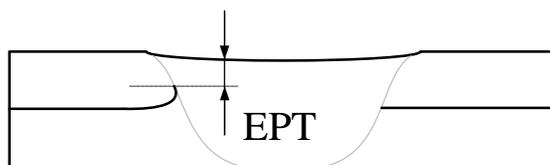


Figura 4.9 – Esquema de medição da espessura efetiva (EPT)

Na Figura 4.10 está representada a evolução da espessura efetiva para todas as soldaduras e a tracejado está representado o valor da dimensão inicial da chapa superior. A figura mostra que para a velocidade de translação de 350 mm/min, o valor de espessura efetiva é independente da geometria das ferramentas. As soldaduras realizadas a 350 mm/min têm o valor da espessura efetiva igual à dimensão inicial da chapa, pelo que se pode confirmar que estas soldaduras são isentas de defeitos, quer do tipo *hooking*, quer do tipo TST. Para as soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8 não existe alteração, significativa, do valor de espessura efetiva com o aumento da velocidade de translação, mantendo um valor de espessura efetiva muito próxima da dimensão inicial da chapa. Já as soldaduras realizadas com a ferramenta CN6 apresentam uma descida do valor de espessura efetiva, com o aumento da velocidade de translação, chegando a um valor próximo de metade da dimensão inicial da chapa. Uma diminuição tão severa da espessura efetiva afetará sem dúvida a resistência mecânica das soldaduras.

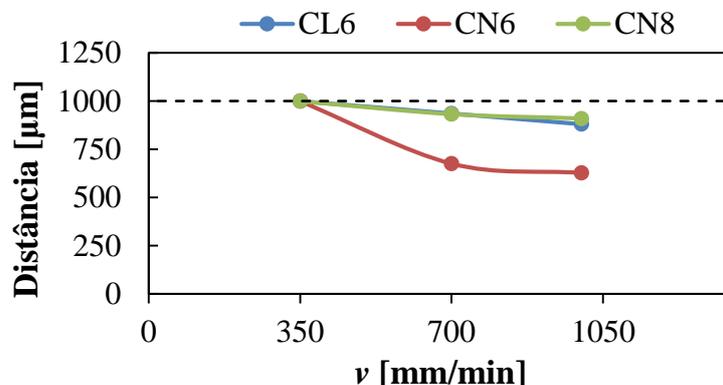


Figura 4.10 – Evolução da espessura efetiva (EPT) para todas as soldaduras.

4.1.4. Estudo do afundamento das ferramentas

Nesta secção analisa-se o afundamento efetivo das ferramentas em função das diferentes geometrias. Este estudo é importante porque as soldaduras foram realizadas com uma penetração pré-definida, que variou em função da geometria das ferramentas. É ainda de notar que devido à geometria dos pinos, o afundamento efetivo da base (Figura 4.11 c)) vai

variar com a geometria e penetração da ferramenta, influenciando as características morfológicas das soldaduras.

Na Figura 4.12 são representados os valores do afundamento da base da ferramenta na chapa superior, medidos recorrendo ao programa *SolidWorks*, utilizando os desenhos do projeto das ferramentas, como se exemplifica na Figura 4.11. A castanho e a azul estão representados os afundamentos da base das ferramentas considerando valores de penetração de 1,1 mm e 1,2 mm, respetivamente. As soldaduras realizadas estão representadas com barras preenchidas a tracejado, ou seja, para as soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8 utilizou-se sempre uma penetração de 1,1 mm e 1,2 mm, respetivamente. Para a ferramenta CN6, começou-se por usar uma penetração de 1,1 mm para 350 mm/min, mas notou-se que com o aumento da velocidade de translação, as soldaduras realizadas com esta ferramenta e penetração tinham defeitos macroscópicos superficiais. Para otimizar estas soldaduras, alterou-se a dimensão da penetração de 1,1 mm para 1,2 mm. Assim, as amostras CN6_700 e CN6_1000 foram realizadas com uma penetração de 1,2 mm.

Da análise da Figura 4.12, pode concluir-se que quanto maior é a penetração da ferramenta, maior vai ser o afundamento da base na chapa superior. Como se observa na figura, para as soldaduras realizadas com a ferramenta CN6, para dimensões iguais de penetração da ferramenta, os valores de afundamento da base são sempre superiores aos registados para as soldaduras realizadas com as outras ferramentas. Posto isto, pode-se afirmar que o afundamento tem influência na qualidade da soldadura, visto que a ferramenta CN6, com um maior afundamento da base, tem maiores defeitos quer do tipo *hooking*, quer do tipo TST, nas soldaduras realizadas a 700 e a 1000 mm/min, realizadas utilizando uma penetração da ferramenta de 1,2 mm. Por observação da Figura 4.12 pode concluir-se também que a ferramenta CN8, com uma penetração de 1,1 mm, corresponderia à combinação conducente aos menores valores do afundamento da base, o que seria vantajoso em termos da eliminação do defeito do tipo *hooking*. No entanto, esta combinação foi testada, tendo-se observado nas soldaduras realizadas com penetração de 1,1 mm, com a ferramenta CN8, a presença de defeitos macroscópicos superficiais importantes. O afundamento da base, para as ferramentas CN8, com penetração 1,2 mm, e CL6, com penetração 1,1 mm, são semelhantes. E, com efeito, foi possível observar que as soldaduras realizadas, às diferentes velocidades de translação, com penetração de 1,1 e 1,2 mm,

utilizando as ferramentas CL6 e CN8, respetivamente, apresentaram propriedades semelhantes, quer em termos de defeitos do tipo *hooking* quer de defeitos do tipo TST.

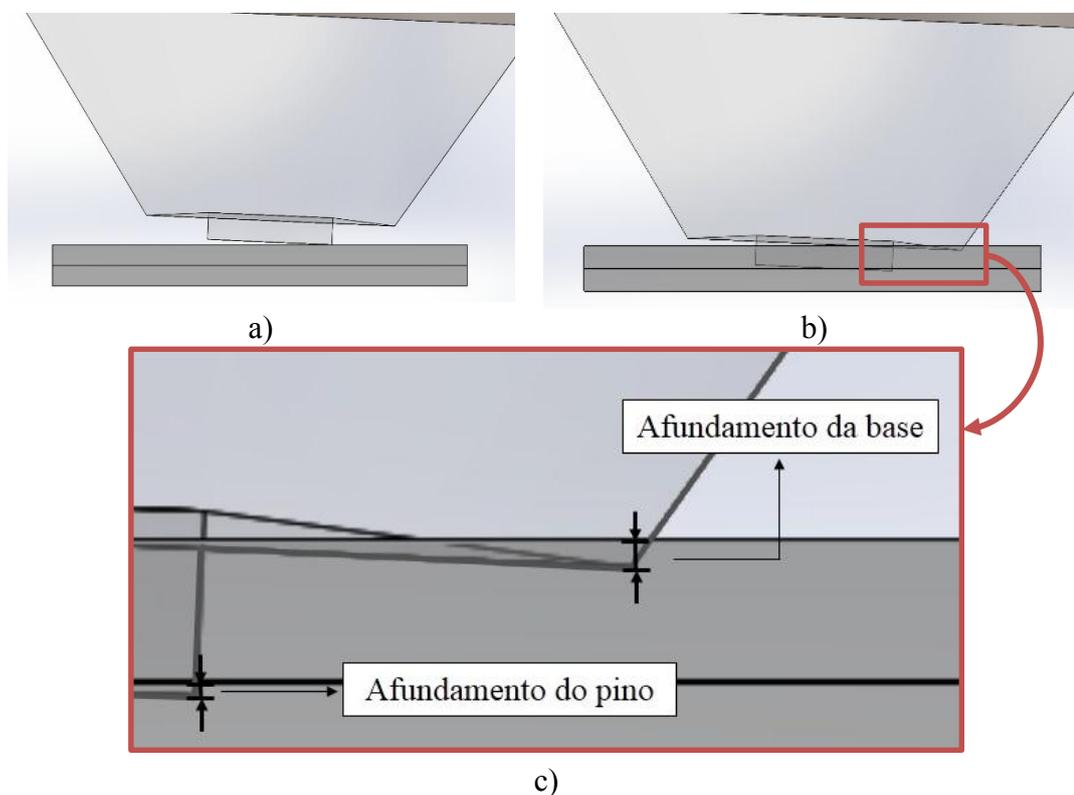


Figura 4.11 – Esquema das penetrações das ferramentas: a) esquema da ferramenta CL6 com 0 mm de penetração; b) esquema da ferramenta CL6 com 1,2 mm de penetração; c) detalhe do afundamento do pino e da base.

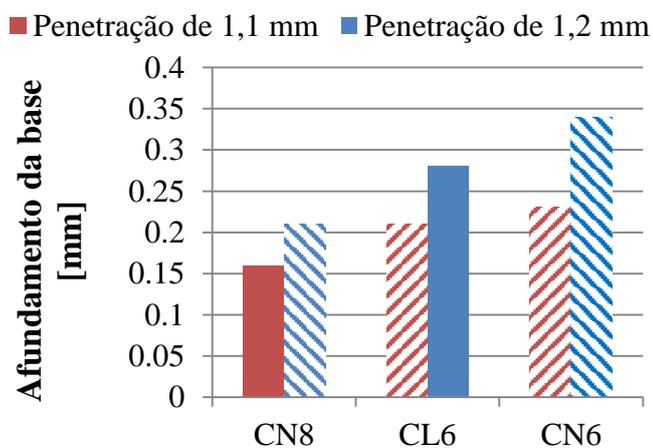


Figura 4.12 – Dimensão efetiva da penetração da base na chapa superior.

4.2. Caracterização mecânica das soldaduras

4.2.1. Medições de dureza

Na Figura 4.13 e na Figura 4.14 são comparados os perfis de dureza para as soldaduras efetuadas com velocidade de translação de 350 e 1000 mm/min, respetivamente. Em cada gráfico, a linha contínua laranja representa o valor de dureza médio do material base (76 HV). Analisando os perfis de dureza obtidos para as soldaduras CL6_350, CN6_350 e CN8_350, apresentados na Figura 4.13, pode concluir-se que existe uma pequena redução de dureza, após a soldadura, relativamente ao valor de dureza médio do material base.

Da Figura 4.14, onde se apresentam os perfis de dureza obtidos para as soldaduras CL6_1000, CN6_1000 e CN8_1000, é possível concluir que para esta velocidade de translação não existe uma redução de dureza tão significativa, relativamente ao material base, como a registada para as soldaduras realizadas com velocidade de translação de 350 mm/min.

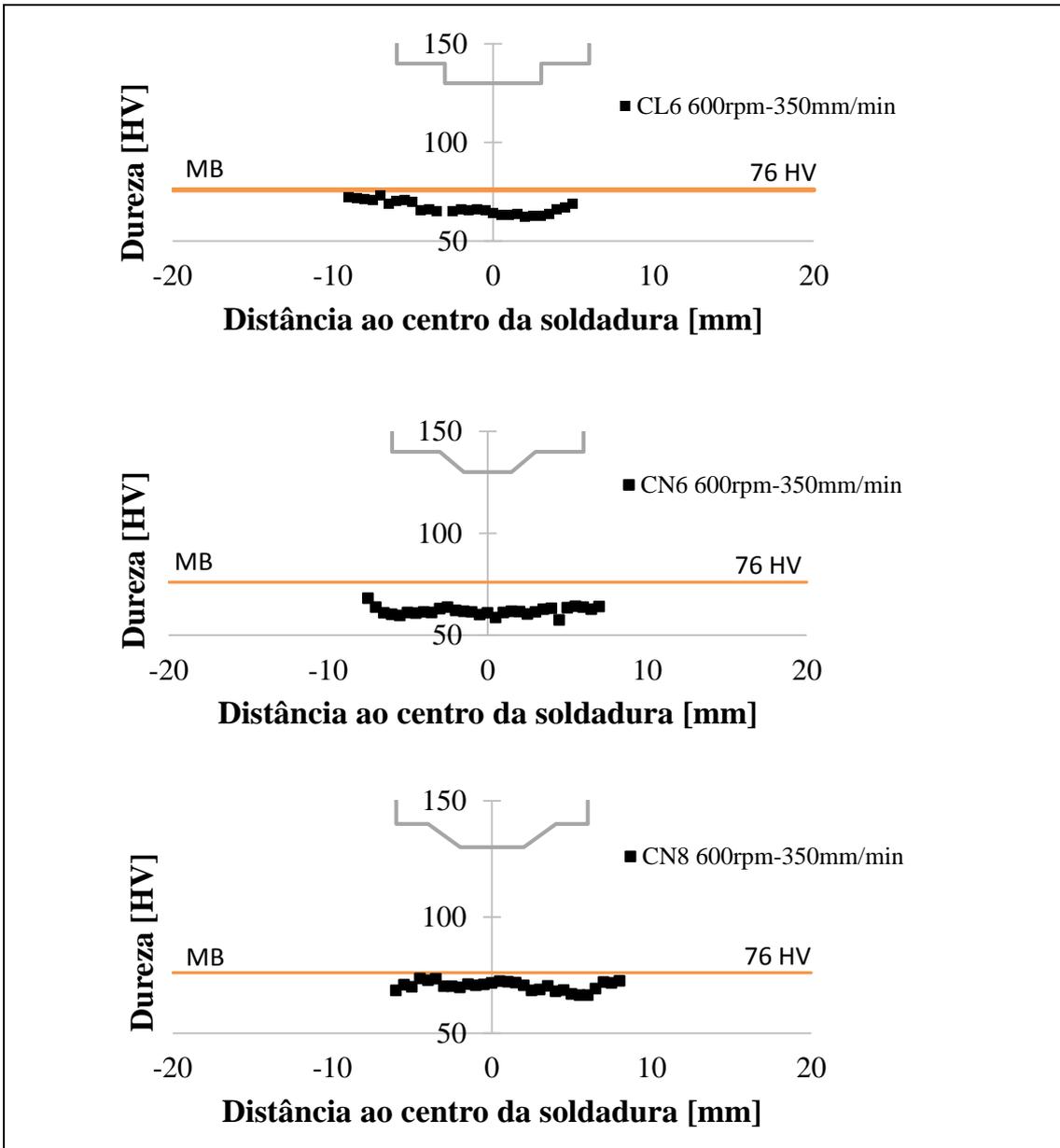


Figura 4.13 - Perfil de dureza obtidos para as soldaduras realizadas a 350 mm/min.

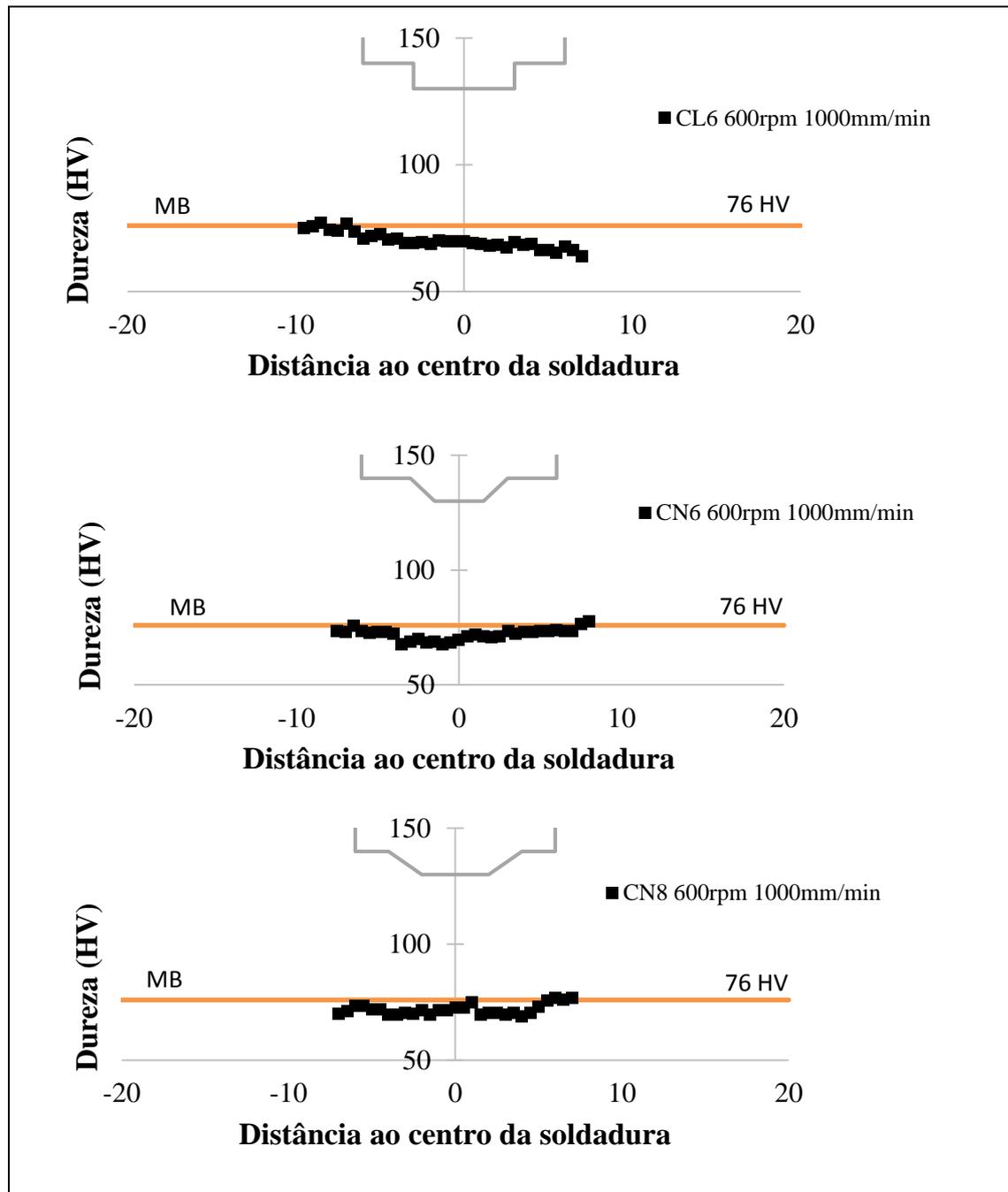


Figura 4.14 - Perfil de dureza obtidos para as soldaduras realizadas a 1000 mm/min.

Finalmente, na Figura 4.15, apresenta-se a evolução do valor médio de dureza, de todas as soldaduras realizadas. Mais uma vez, neste gráfico, a linha a tracejado representa o valor de dureza médio do material base. Por observação da figura, é possível concluir que todas as soldaduras possuem um valor médio de dureza ligeiramente inferior ao registado para o material base. Esta diminuição do valor médio de dureza deve-se ao recozimento, na região da soldadura, do metal base que se encontrava no estado H22, ou seja, parcialmente endurecido por trabalho mecânico a frio. Com efeito, a figura mostra que as soldaduras

realizadas com velocidade de translação de 350 mm/min, correspondente a menores velocidades de aquecimento e arrefecimento, registaram o menor valor médio de dureza. Com o aumento da velocidade de translação, e correspondente aumento das velocidades de aquecimento e arrefecimento, existe um aumento do valor médio de dureza de todas as soldaduras. O arrefecimento mais rápido, reduz o tempo disponível para que ocorra recozimento na região da soldadura, diminuindo assim a perda de dureza destas soldaduras relativamente às efetuadas a 350 mm/min.

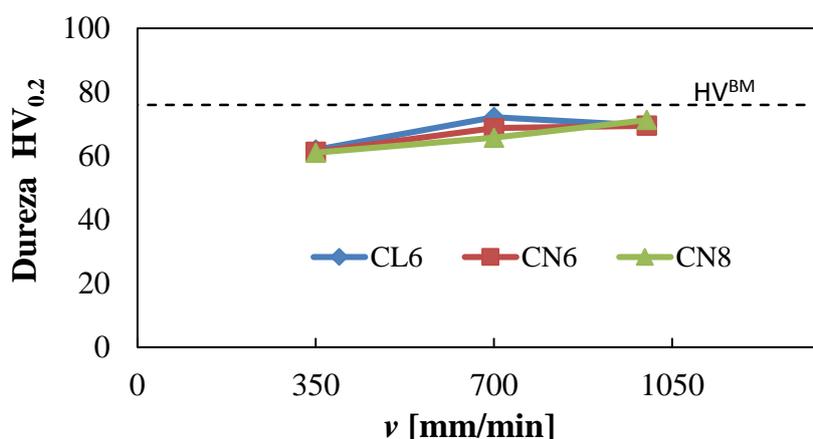


Figura 4.15 - Evolução do valor médio de dureza com a geometria da ferramenta e a velocidade de translação.

4.2.2. Ensaios de corte em tração

Da Figura 4.16 à Figura 4.19 mostram-se os resultados obtidos nos ensaios de corte em tração para os provetes solicitados do lado do recuo (Figura 4.16 e Figura 4.17) e do lado do avanço (Figura 4.18 e Figura 4.19). Nestas figuras, para todas as soldaduras testadas, mostram-se a distribuição da deformação nas amostras, correspondente ao momento em que os provetes atingiram a carga máxima, e a força máxima normalizada (NML). A força máxima normalizada (NML), calculada pela equação

$$NML = \frac{F_{\text{MáxSoldadura}} [\text{N}]}{F_{\text{MáxMB}} [\text{N}]} \quad (4.2)$$

corresponde ao quociente entre a carga máxima registada em cada ensaio de provetes de soldadura e a carga máxima registada, no ensaio de tração uniaxial, de provetes de material base com a mesma largura dos provetes de soldadura (Figura 3.9 a)).

4.2.2.1. Provetes do tipo R

A Figura 4.16 apresenta a distribuição da deformação nos provetes ensaiados em corte em tração, do lado do recuo (tipo R). Analisando a figura é possível ver que para todas as amostras a carga máxima foi atingida depois de se ter registado deformação plástica no material base. A amostra CN6_700 não se encontra representada nesta figura, porque ocorreu um erro durante a aquisição de dados, e devido à similaridade dos mapas da distribuição de deformação, não se sentiu a necessidade de repetir os ensaios desta soldadura.

Na Figura 4.17 está representada a carga máxima normalizada correspondente ao ensaio dos provetes do tipo R. Por observação da figura, é possível ver que a resistência máxima em corte das soldaduras dos provetes solicitados do lado do recuo é muito próxima da resistência máxima do material base. No geral, a força máxima normalizada não varia significativamente com a geometria da ferramenta nem com a velocidade de translação.

Os resultados das Figura 4.16 e Figura 4.17, em conjunto, demonstram que as soldaduras realizadas, quando solicitadas no lado do recuo (tipo R), têm excelente qualidade.

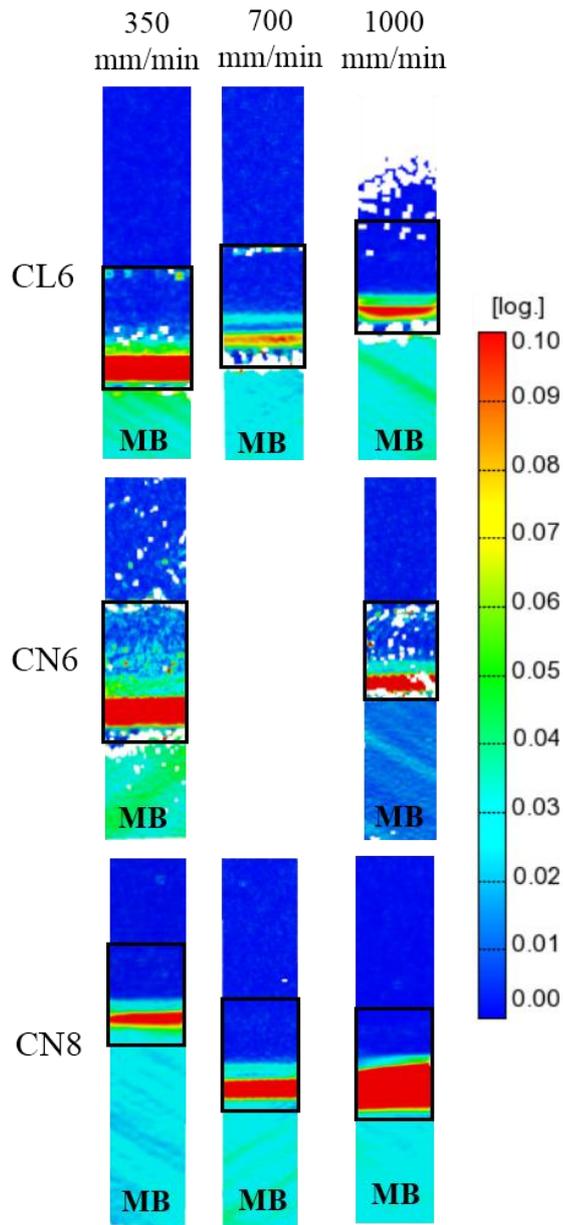


Figura 4.16 – Distribuição da deformação nos provetes solicitados do tipo R.

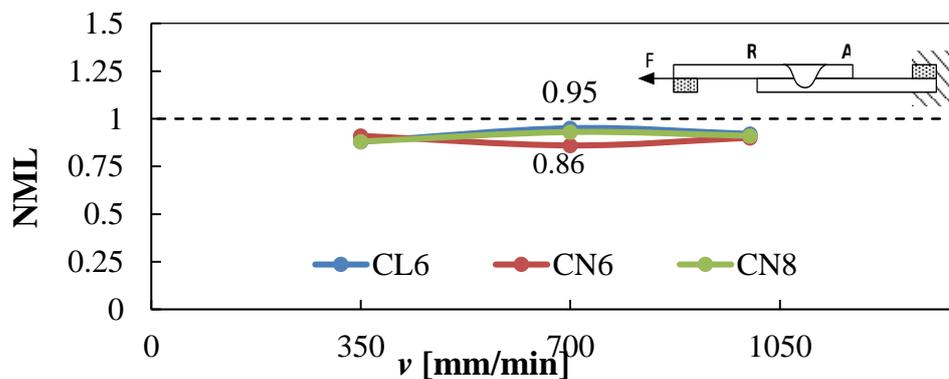


Figura 4.17 – Carga máxima normalizada dos provetes solicitados do tipo R.

4.2.2.2. Provetes do tipo A

A Figura 4.18 mostra os mapas de distribuição da deformação dos provetes solicitados em corte em tração, do lado do avanço (tipo A). Como se pode observar na figura, para todas as soldaduras realizadas com velocidade de translação de 350 mm/min, quando solicitadas do lado do avanço, a carga máxima ocorreu após deformação plástica do material base. Para as soldaduras realizadas com velocidades de translação superiores (700 e 1000 mm/min), o valor de deformação plástica no material base foi quase nulo. Pode-se então concluir, por observação desta figura, que logo no início do ensaio, a deformação deverá ter sido localizada na extremidade do defeito do tipo *hooking*, não sendo transmitida ao resto da amostra. Estes resultados mostram que este é um defeito que pode atingir proporções que podem comprometer a resistência mecânica da ligação no lado do avanço.

Na Figura 4.19 está apresentada a carga máxima normalizada dos provetes solicitados do lado do avanço. A figura mostra que a resistência mecânica dos provetes do tipo A varia significativamente em função da geometria das ferramentas e da velocidade de translação. É possível também concluir que com o aumento da velocidade de translação existe uma diminuição da resistência mecânica de todas as soldaduras. As soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8, apresentam valores próximos da carga máxima normalizada, com a variação da velocidade de translação. As soldaduras realizadas com a ferramenta CN6 são as soldaduras que apresentam maior diminuição da resistência mecânica com o aumento da velocidade de translação, pois para as velocidades superiores a 350 mm/min, esta ferramenta apresenta valores severos dos defeitos, quer do tipo *hooking* quer do tipo TST.

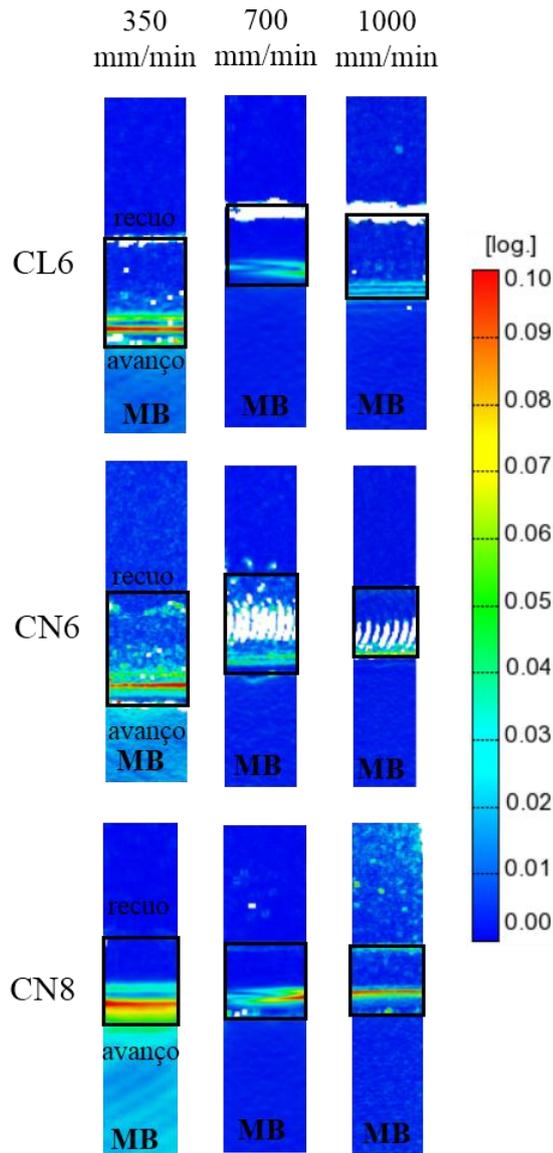


Figura 4.18 – Distribuição da deformação nos provetes solicitados do tipo A.

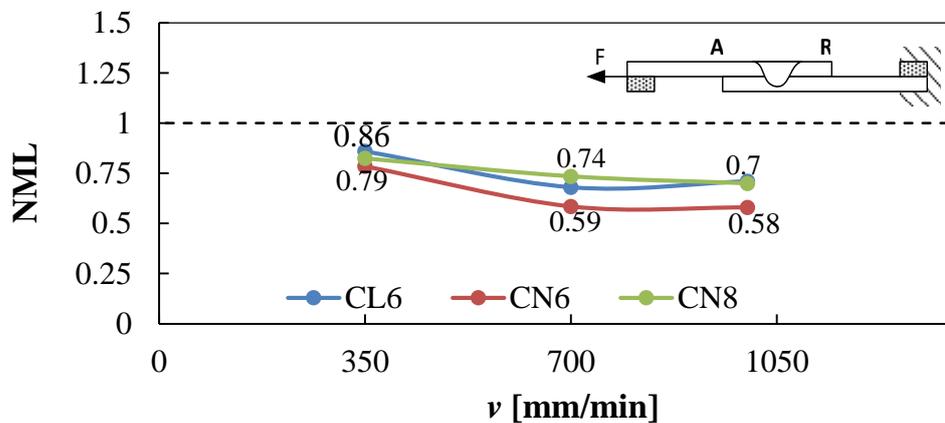


Figura 4.19 - Carga máxima normalizada dos provetes solicitados do tipo A.

4.2.3. Ensaios de tração transversal

Da Figura 4.20 à Figura 4.24 mostram-se os resultados obtidos nos ensaios de tração transversal, para os provetes do tipo S (Figura 4.20 e Figura 4.21) e para os solicitados em condições de serviço (Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24). Nessas figuras, mais uma vez, mostra-se a distribuição da deformação nas amostras, correspondente ao momento em que os provetes atingiram a carga máxima, e a força máxima normalizada (NML), calculada utilizando a equação (4.2), para todas as soldaduras e para todos os tipos de ensaios. Analisam-se ainda, na Figura 4.24, as curvas tensão-deformação locais obtidas através dos ensaios dos provetes em tração transversal em condições de serviço.

4.2.3.1. Provetes do tipo S

Na Figura 4.20 está representada a distribuição da deformação nos provetes do tipo S. Como se pode observar na figura, independentemente do tipo de soldadura, para todas as amostras, a rotura ocorreu sempre do lado do recuo, devido, sem dúvida, a uma ligeira diminuição da espessura na chapa inferior. Esta diminuição de espessura, no lado do recuo, está associada à componente descendente do fluxo de material durante a soldadura. Em nenhum dos ensaios realizados foi observado descoesão no meio da soldadura, na zona de ligação entre as duas chapas.

Na Figura 4.21 mostra-se a carga máxima normalizada dos provetes do tipo S. Analisando estes resultados é possível concluir que a resistência máxima dos provetes de soldadura é muito próxima da do material base, como seria de esperar.

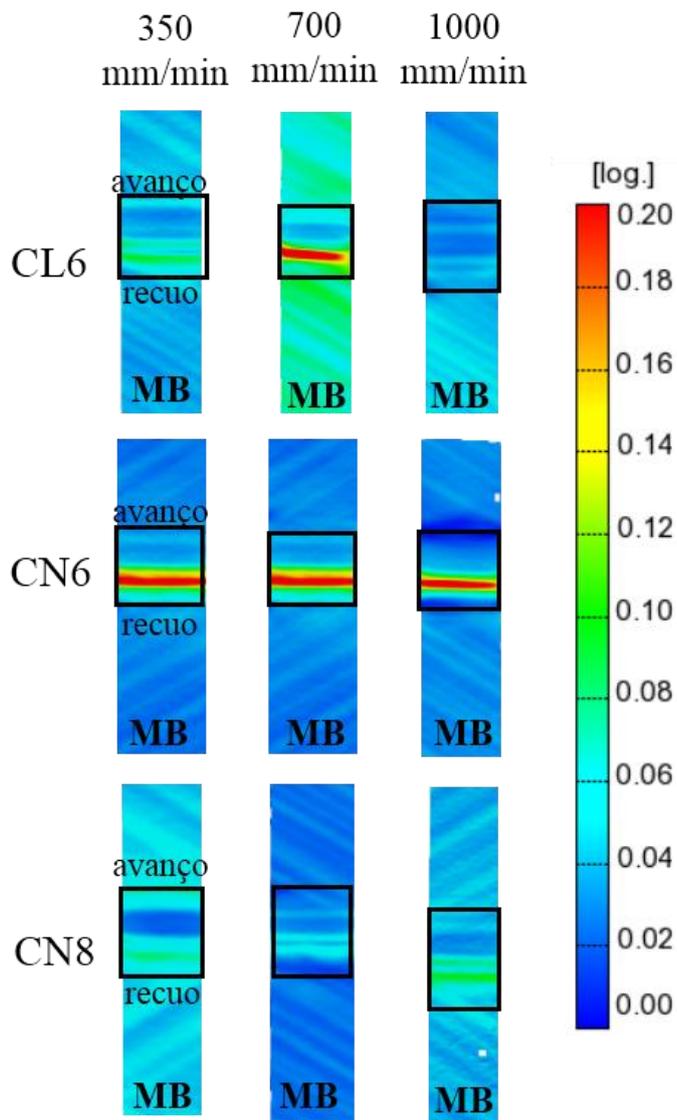


Figura 4.20 – Distribuição da deformação dos provetes solicitados do tipo S.

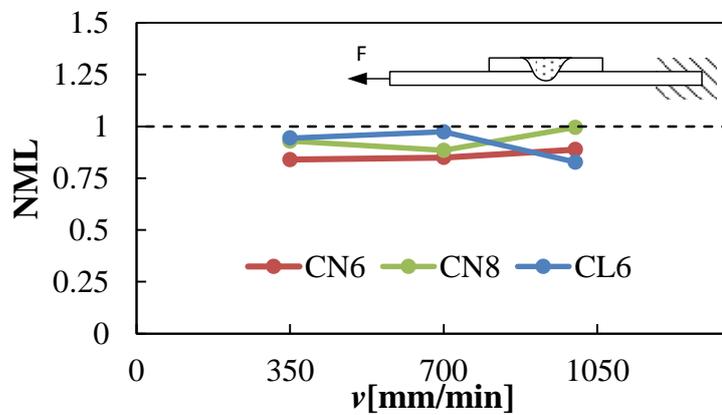


Figura 4.21 - Carga máxima normalizada dos provetes solicitados do tipo S.

4.2.3.2. Provetes solicitados em condições de serviço

Na Figura 4.22 mostra-se a distribuição da deformação nos provetes solicitados à tração em condições de serviço. Analisando a figura é possível verificar que a carga máxima ocorreu após deformação significativa na zona da soldadura, em todos os provetes. Os provetes das amostras CN6_350 e CN8_350 foram os únicos a romper no centro da soldadura. Estes provetes romperam após deformação plástica significativa no material base, o que exclui qualquer influência do defeito do tipo *hooking* na resistência mecânica desta ligação. Em todos os provetes das soldaduras realizadas com ferramenta CL6, e nos provetes das amostras CN8_700 e CN8_1000, a rotura ocorreu no lado do avanço, após deformação plástica significativa na zona da soldadura. No caso dos provetes das amostras CL6_350, CL6_1000 e CN8_1000 ocorreu apenas deformação plástica ligeira no material base. Nos provetes das amostras CN6_700 e CN6_1000 pode concluir-se que existe uma forte influência do defeito do tipo *hooking* na resistência mecânica da ligação, uma vez que ambos os provetes sofreram rotura no lado de avanço, com valores desprezáveis de deformação plástica no material base.

A Figura 4.23 mostra a carga máxima normalizada dos provetes solicitados em condições de serviço. Por análise da figura, é possível ver que para a velocidade de translação de 350 mm/min, as soldaduras realizadas com a ferramenta CL6 apresentam resistência mecânica de cerca de 80% da resistência mecânica do material base. Nas soldaduras realizadas com as ferramentas CN6 e CN8, observa-se um aumento da resistência mecânica em comparação com as soldaduras realizadas com a ferramenta CL6, atingindo-se cerca de 90% da resistência mecânica do material base. No entanto, nas soldaduras realizadas com as ferramentas CN6 e CN8, a resistência mecânica vai diminuir com o aumento da velocidade de translação, enquanto nas soldaduras realizadas com a ferramenta CL6, o valor de resistência mecânica mantém-se constante com o aumento da velocidade de translação. A diminuição da resistência mecânica é mais acentuada para a ferramenta CN6, pois foi para valores da velocidade de translação mais elevados que se registaram valores extremos de defeitos do tipo *hooking* e do tipo TST.

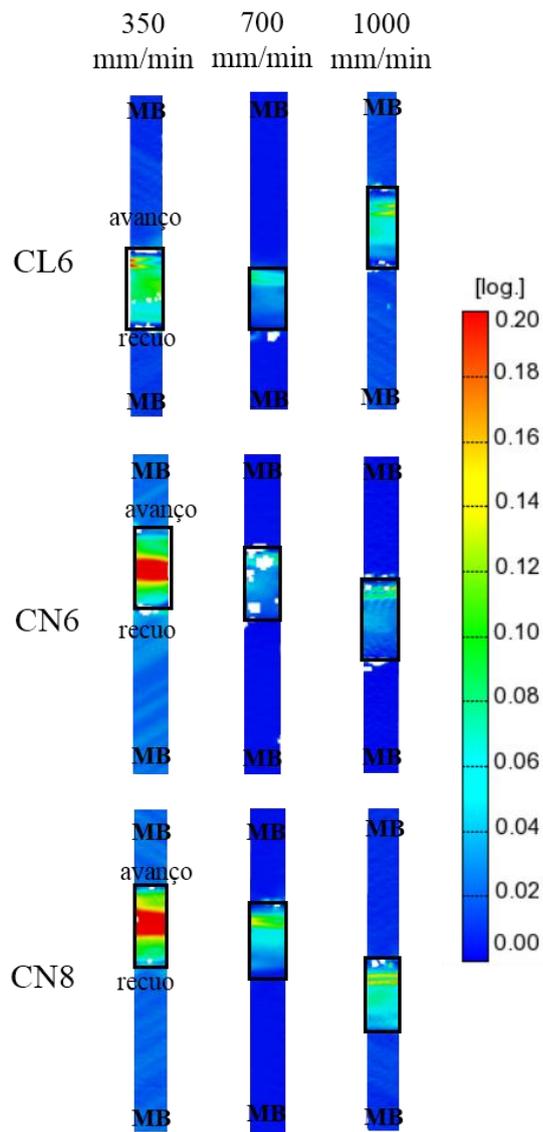


Figura 4.22 – Distribuição da deformação dos provetes em condições de serviço.

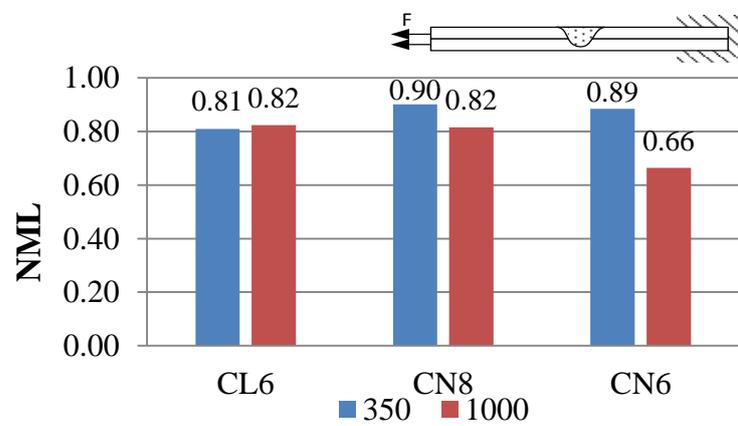


Figura 4.23 - Carga máxima normalizada dos resultados obtidos no ensaio de tração em condições de serviço.

Na Figura 4.24 são apresentadas as curvas tensão-deformação locais, representativas da resistência mecânica do material das soldaduras, obtidas com base nos resultados dos ensaios de tração dos provetes solicitados em condições de serviço. Na figura comparam-se as curvas locais das soldaduras realizadas com as três ferramentas e as velocidades de translação de 350 e 1000 mm/min com a curva do material base. O efeito de Portevin-Le Chatelier, característico da deformação plástica desta liga, é visível quer nas curvas de material base, quer nas curvas de soldaduras.

Da análise da figura pode concluir-se que existe perda de resistência do material base na zona da soldadura quer para as soldaduras realizadas a 350 mm/min, como para as soldaduras realizadas a 1000 mm/min. Porém a resistência local da soldadura aumenta com o aumento da velocidade de translação. Estes resultados são consentâneos com os obtidos aquando das medições de dureza.

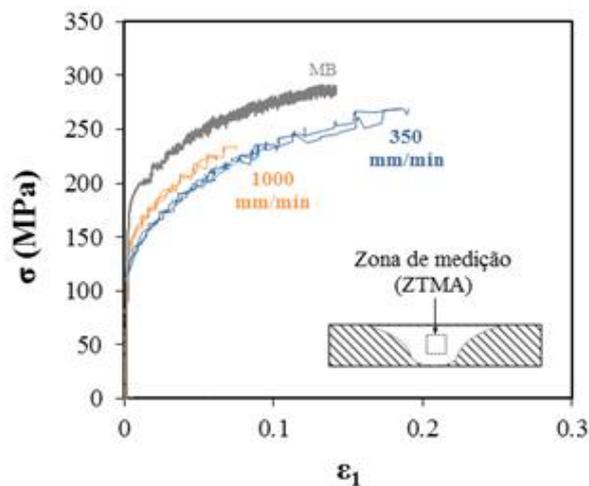


Figura 4.24 – Curvas tensão-deformação locais dos provetes solicitados em condições de serviço

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO

5.1. Conclusões

A investigação desenvolvida no âmbito desta dissertação de Mestrado teve por objetivo analisar a influência da geometria da ferramenta na ligação de chapas da liga de alumínio 5754-H22, com 1 mm de espessura, pelo processo FSW em junta sobreposta.

A análise do fluxo de material, efetuada recorrendo à análise metalográfica de soldaduras dissimilares, utilizando as três ferramentas com geometrias distintas, permitiu concluir que não existem diferenças macroscópicas significativas a nível de morfologia da soldadura, quando se altera a geometria das ferramentas. Com efeito, as únicas dissemelhanças importantes foram reportadas ao alterar o posicionamento, relativamente à base da ferramenta, das ligas 5754 e 6082.

A identificação e quantificação de defeitos geométricos das soldaduras permitiu concluir que nas soldaduras realizadas com velocidade de translação de 350 mm/min, independentemente da geometria da ferramenta utilizada, não apresentam qualquer defeito geométrico. As soldaduras realizadas com a ferramenta CN6 e velocidades de translação de 700 e 1000 mm/min apresentam valores severos, quer do defeito do tipo *hooking*, quer do defeito do tipo TST, e conseqüentemente uma maior redução da secção resistente na zona da ligação.

O estudo do afundamento das ferramentas que se mostra neste trabalho revela que é necessário otimizar o valor de penetração da ferramenta tendo em conta a sua geometria, pois apesar de se utilizar a mesma penetração nas diferentes ferramentas, o afundamento da base e do pino vai variar dependendo da geometria da ferramenta. Este afundamento influencia quer a possibilidade de formação de defeitos macroscópicos superficiais, quer de defeitos geométricos internos.

Os resultados dos ensaios de dureza apresentados nesta dissertação mostram que, independentemente da geometria da ferramenta, a dureza média das soldaduras é sempre ligeiramente inferior à dureza média do material base. No entanto, a dureza média aumenta com o aumento da velocidade de translação.

O estudo da resistência mecânica das soldaduras foi efetuado recorrendo a ensaios de corte em tração, com provetes solicitados do lado do recuo e do avanço, e recorrendo a ensaios de tração transversal, com provetes solicitados na chapa inferior (tipo S) e em condições de serviço. Os resultados obtidos mostram que todos os provetes do tipo R sofreram deformação plástica no material base, antes de ocorrer rotura, e que a resistência mecânica de todas as soldaduras solicitadas do lado do recuo está próxima da resistência mecânica do material base. Neste contexto, é possível concluir que todas as soldaduras apresentam boa qualidade quando solicitadas no lado do recuo. No caso dos provetes solicitados do lado do avanço, apenas ocorreu deformação plástica no material base para os provetes das soldaduras produzidos com velocidade de translação de 350 mm/min. Para os restantes provetes, logo no início do ensaio, a deformação plástica foi localizada na extremidade do defeito do tipo *hooking*, o que compromete a resistência mecânica da soldadura. Com efeito, para os provetes do tipo A, a resistência mecânica da soldadura diminui com o aumento da velocidade de translação, sendo sempre inferior para as soldaduras realizadas com a ferramenta CN6.

Quanto aos ensaios de tração transversal, apesar de todos os provetes do tipo S terem sofrido rotura do lado do recuo, devido a uma ligeira redução de espessura, todos apresentaram resistência mecânica próxima da do material base. Os resultados apresentados para os provetes solicitados em condições de serviço, mostram que os provetes das soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e CN8 sofreram rotura após deformação plástica significativa na zona da soldadura. Sendo que nos provetes das soldaduras CN6_350 e CN8_350 ocorreu rotura no centro da soldadura, enquanto que no resto das soldaduras ocorreu rotura no lado do avanço. No entanto, apenas para os provetes das soldaduras CN6_700 e CN6_1000 ocorreu rotura sem existir deformação plástica significativa na zona da soldadura, o que mostra a forte influência do defeito do tipo *hooking* na resistência da ligação. Os provetes solicitados em condições de serviço das soldaduras realizadas com velocidade de translação de 350 mm/min mostram boa resistência mecânica, principalmente nas soldaduras realizadas com as ferramentas CN8 e CN6 que apresentam resistência mecânica cerca de 90% da resistência mecânica do material base. No entanto, para a velocidade de translação de 1000 mm/min, os provetes das soldaduras realizadas com a ferramenta CN6 diminuem a resistência mecânica para 66% da resistência mecânica do material base. Sendo que os provetes das soldaduras realizadas com as ferramentas CL6 e

CN8, com velocidade de translação de 1000 mm/min, apresentam uma resistência mecânica de 82% da resistência mecânica do material base.

Finalmente, comparando toda a análise realizada nesta dissertação, pode-se concluir que as ferramentas CL6 e CN8 são bastante apelativas para uso a nível industrial, uma vez que para a velocidade de translação de 1000 mm/min não apresentam defeitos geométricos significativos que comprometam a resistência mecânica das soldaduras.

5.2. Perspetivas de trabalho

A tecnologia *Friction Stir Lap Welding* (FSLW) é relativamente recente e, como tal, está restrita a uma gama limitada de aplicações. Posto isto, seria vantajoso desenvolver uma análise da influência dos vários parâmetros de processo na qualidade de soldaduras similares, realizadas em materiais base diferentes do aplicado neste trabalho, e ainda, na realização de soldaduras dissimilares, como por exemplo, Al-Cu e Al-Fe.

6. BIBLIOGRAFIA

- Aalco Metals Ltd. 2014. *Technical Information Aluminium Alloy 5754*. Acedido em 29 de 03 de 2014. http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_5754-H22~H24~H26_153.ashx.
- Barlas, Z., e U. Ozsarac. 2012. "Effects of FSW parameters on joint properties of AlMg3 Alloy." *Welding Journal* 91: 16s-22s.
- Buffa, G., G. Campanile, L. Fratini, e A. Prisco. 2009. "Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties." *Materials Science and Engineering A* 519: 19-26.
- Caldeira, F. 2013. *Ligação por Friction Stir Welding de Chapas Finas em Junta Sobreposta*. Coimbra: Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Cao, X., e M. Jahazi. 2011. "Effect of tool rotation speed and probe length on lap joint quality of FSW magnesium alloy." *Materials and Design* 32: 1-11.
- Extrusal. 2011. *Companhia Portuguesa de Extrusão, S.A.* Acedido em 13 de 06 de 2014. <http://www.extrusal.pt/index.php?id=57>.
- Kulekci, M. K., A. Sik, e E. Kaluç. 2008. "Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints." *Int J Adv Manuf Technol* 36:877-882.
- Lang, Xavier, Guntram Wagner, e Dietmar Eifler. 2011. "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA5454-joints." Em *Friction Stir Welding and Processing VI*, de Rajiv Mishra, Murray W. Mahoney, Yutak Sato, Yuri Hovanski e Ravi Verma, 123-130. Hoboken: John Wiley & sons, Ico.
- Leitão, Carlos Miguel Almeida. 2013. *Influence of base material plastic properties and process parameters on friction stir weldability*. Coimbra: Dissertação para Doutoramento em Engenharia Mecânica na especialidade de Tecnologia da Produção, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- MatWeb. 2014. *Material Property Data*. Acedido em 29 de 03 de 2014. http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=bb191b05a9424da5bdef4be5cad33182.
- Salari, Emad, Mohammad Jahazi, Alireza Khodabandeh, e Hadi Ghasemi-Nanesa. 2014. "Influence of tool geometry and rotational speed on mechanical properties and defect formation in friction stir lap welded 5456 aluminum alloy sheets." *Materials and Design* 58: 381-389.
- Smith, W. F. 1998. *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, 3ª edição*. Amadora: McGRAW-HILL.
- Yang, Q., X. Li, K. Chen, e Y. J. Shi. 2011. "Effect of tool geometry and process condition on the strength of a magnesium friction stir lap linear weld." Em *Friction Stir Welding and Processing VI*, de Rajiv Mishra, Murray W. Mahoney, Yutake Sato, Yuri Hovanski e Ravi Verma, 195-203. Hoboken: John Wiley & sons, Inc.