

C

•

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS **E TECNOLOGIA** UNIVERSIDADE DE COIMBRA

> DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FRICTION SPOT WELDING DA LIGA DE ALUMÍNIO 6082-T6

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

Autor

Miguel Manita d'Antas Venâncio

Orientador

Professor Doutor Altino de Jesus Rogue Loureiro

Júri

Prosidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Flesidente	Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
	Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro
	Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
	Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
Vogais	Louro
	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
	Professor Doutor António Mário Henriques Pereira
	Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Colaboração Institucional

Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Centre for Materials and Coastal Research

Coimbra, setembro de 2013

Aos meus pais e irmã.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível com o esforço e dedicação de algumas pessoas, às quais eu deixo o meu especial agradecimento.

Ao Professor Doutor Altino Loureiro por acreditar em mim e me abrir a porta para esta parceria na Alemanha. Pela paciência que teve em tratar- me de toda a burocracia do processo de Erasmus Patnership e, com certeza, em orientar-me nos momentos em que me sentia algo perdido e conseguir sempre aconselhar-me da melhor maneira.

Um especial agradecimento ao Doutor Jorge dos Santos que celebrou um acordo entre Helmhotz-Zentrum, Geesthacht e a Universidade de Coimbra, o qual tornou possível a minha deslocação a essa instituição. Como meu supervisor me soube aconselhar e dar-me algumas ideias de como resultaria melhor o trabalho final.

Também não poderia esquecer o Doutor Uceu Suhudin, meu cossupervisor da instituição de acolhimento, que com a sua experiência me indicou os melhores caminhos a percorrer quando tudo poderia correr mal.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo e otimização dos parâmetros de *Friction Spot Welding* (FSpW) na liga de alumínio 6082-T6, 1 *mm* de espessura. No final procurouse comparar os resultados otimizados com os valores de resistência mecânica alcançados anteriormente por Pereira (2012), em soldadura por resistência por pontos (RSW) no mesmo tipo de liga.

Efetuaram-se as soldaduras de FSpW variando o procedimento, a velocidade de rotação, a profundidade de penetração, o tempo de soldadura e a força de fecho introduzida. Após soldaduras efetuadas, os provetes foram testados à tração, onde foi medida a carga suportada e o deslocamento sofrido. Depois de analisados os resultados do ensaio à tração, fez-se a análise metalográfica das amostras, para se compreender o comportamento da soldadura nos testes anteriormente realizados. Para finalizar, analisou-se a microdureza das amostras.

Com o novo procedimento desenvolvido, conseguiu-se um aumento substancial de carga suportada pelas soldaduras. A resistência à tração das soldaduras está relacionada com a geometria e dimensão do *hook* (gancho) formado na soldadura.

É necessário haver uma força de fecho mínima exercida pelo anel de fecho, no sentido de garantir a soldadura ótima.

Este processo de soldadura conduziu ainda ao aumento de dureza na zona afetada termicamente, termo mecanicamente e de mistura.

Palavras-chave: Friction Spot Welding, Soldadura por pontos por Resistência, Liga de Alumínio, Microdureza, Resistência à tração.

ABSTRACT

The main objective of this work consists on the parameters optimization of Friction Spot Welding (FSpW) performed in aluminum alloy 6082 T6, 1mm thick. At the end, a comparison is looked between these optimized results against the ones obtained by Pereira (2012), in resistance spot welding (RSW).

The welds of FSpW were done changing the methodology, rotational velocity, plunge depth, weld time and clamping force. After performing the welds, a lap shear stress test was done, where the stress and displacement were measured. After this last test completed, a metallographic analysis was performed in the way of understanding the behave of the specimens during lap shear stress test. The last test performed was micro hardness test.

A significantly increase of the stress supported by the samples were achieved with this new methodology. The stress resistances of the welds are directly linked to the geometry and size of the hook formed during the welding.

It is need a minimum clamping force to perform a correct weld.

This welding process leads to an increase of hardness on heat affected zone, thermo-mechanically affected zone and stir zone.

Key Words: Friction Spot Welding, Resistance Spot Welding, Aluminum Alloy, Micro Hardness, Lap Shear Stress.

Índice

Agrade	cimentos	iii
Resume)	v
Abstrac	·t	vii
Índice o	le Figuras	xi
Índice o	le Tabelas	xiii
1. Int	rodução	1
2. De	escrição de Funcionamento FS _p W	7
2.1.	Parâmetros de Soldadura	
2.2.	Fluxo de Material	9
2.3.	Fluxo de Calor	
2.4.	Microestruturas da Soldadura	11
2.5.	Materiais Possíveis de Soldar com FSpW	11
3. Eq	uipamento e Material Utilizado	
3.1.	Máquina de FSpW	
3.2.	Liga AA 6082 T6 e sua preparação para os ensaios	14
3.3.	Máquina de Tração	16
3.4.	Máquina de Microdureza	17
3.5.	Análise Metalográfica	
3.6.	Procedimentos de soldadura	
4. Ot	imização de Parâmetros para FS _p W	21
4.1.	Primeiro Teste	21
4.2.	Segundo Teste	
4.3.	Terceiro Teste	27
4.4.	Parâmetros Otimizados	
4.5.	Microestrutura Parâmetros Otimizados	

5. Comparação dos Resultados				
5.1. Testes de Tração				
5.2. Microdureza				
6. Conclusão				
7. Trabalhos Futuros				
Referências Bibliográficas				
ANEXO A				
ANEXO B				
ANEXO C				
ANEXO D				

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema representativo do processo de FSW [1]	1
Figura 1.2 – Esquema tipo de uma ferramenta de FSW com dois tipos de geometrias possíveis para o Pino e base [1].	2
Figura 1.3 – Esquema do processo FSSW. a) Penetração da ferramenta; b) Mistura do material;	3
Figura 1.4 – Esquema dos componentes do processo FSpW (dimensões utilizadas neste estudo)	4
Figura 1.5 – Esquema do processo RSW [8]	4
Figura 2.1 – Esquema de FSpW [10]. A-Fecho da ferramenta com uma força pré- determinada	7
Figura 2.2 – Demonstração tipo dos três tipos de morfologias obtidos da soldadura FSpW [10]. Em que o material base é representado como BM, HAZ é ZAT, TMA é ZATM e SZ é ZM.	/ A Z 11
Figura 3.1 – Protótipo do equipamento utilizado FSpW RPS100	13
Figura 3.2 – Morfologia nominal do MB	14
Figura 3.3 – Exemplar do provete de juntas sobrepostas [mm] [8]	15
Figura 3.4 - Máquina Tração Zwick Roell tm 1478.	16
Figura 3.5 – Máquina de Microdureza Zwick Roell tm ZHV.	17
Figura 3.6 – Vista de um provete pronto a embutir	18
Figura 3.7 – Linhas de indentação na análise de Microdureza	18
Figura 3.8 – Máquina Struers tm TegraForce-5 de polimento	19
Figura 3.9 – Microscópio Leica tm DM IRM	19
Figura 4.1– Macro da soldadura de Combinação 1. Hook destacado a vermelho	23
Figura 4.2 – Ampliação da zona do <i>hook</i> destacada na Figura 4.1 a vermelho	23
Figura 4.3 – Demonstração da fratura obtida no primeiro teste	23
Figura 4.4 – Esquema do novo processo testado [10]. A- fecho da ferramenta com uma estabelecida força; B- Sleeve Plunge; C- Pin Plunge; D- Posição zero do Pino e da Manga; E- Soldadura completa	24
Figura 4.5 – <i>Keyhole</i> formado por este novo processo	25
Figura 4.6 – Macros das três soldaduras obtidas	26
Figura 4.7 – Ampliação do caminho tomado pelo <i>hook</i> . Combinação 3	27
Figura 4.8 – Relação peso dos fatores com performance em tração	30
Figura 4.9 – a) Macro da combinação 2; b) Morfologia do <i>hook</i> resultante da combinação	5 2 33

Figura 4.10 – Demonstração dos dois tipos de fraturas obtidas dos testes de tração	33
Figura 4.11 – a) Macro da combinação 5; b) Geometria do <i>hook</i> de soldadura realizada com a combinação 5	34
Figura 4.12 – Morfologia da fratura resultante da combinação 5	35
Figura 4.13 – Morfologias gerais dos parâmetros otimizados obtidas em FSpW (combinação 1)	36
Figura 5.1 – Curva carga deslocamento. a)-combinação 2; b)- Curva Carga Deformação resultante de Pereira (2012) [8]	39
Figura 5.2 – Microdureza da combinação 8.	40
Figura 5.3 – Microdureza tipo obtida por Pereira (2012) [8]	40

ÍNDICE DE TABELAS

abela 3.1 – Composição química nominal da liga AA 6082 T6	14
Cabela 3.2 – Propriedades Mecânicas nominais da liga AA 6082 T6 (valores para chapas de espessura inferior a 5 mm)	15
Cabela 4.1 – Parâmetros utilizados no primeiro teste assinalados com um X	21
Cabela 4.2 – Resultados dos testes de tração para os primeiros parâmetros utilizados2	22
Cabela 4.3 – Parâmetros teste utilizados para verificação da progressão do hook	25
Cabela 4.4 – Resultados dos ensaios de tração das soldaduras realizadas pelo novo processo 2	26
abela 4.5 – Tabela de entrada de dados para método de Taguchi	28
abela 4.6 – Parâmetros dados pelo Método de Taguchi após introdução de dados	29
abela 4.7 – Resultados obtidos no teste de tração2	29
Cabela 4.8 – ANOVA, Larger the Best. Pesos dos fatores introduzidos em relação à performance no teste de tração	30
abela 4.9 – Parâmetros Finais	31
Cabela 4.10 – Comparação dos valores de resistência obtidos dos parâmetros finais com a combinação 8	32

1. INTRODUÇÃO

O processo de *Firction Stir Welding* (FSW) foi concebido no *The Welding Institute*, Reino Unido em 1991, com o intuito de fazer uma soldadura no estado sólido. Este processo revelou-se rapidamente útil para soldar ligas de alumínio de alta resistência, tendo em conta que a soldadura tem que apresentar boa resistência mecânica, sem que ocorram os defeitos comuns às demais soldaduras por fusão, como porosidade e perda de propriedades mecânicas do material base. Esta técnica recorre a uma ferramenta com uma parte útil constituída por uma base e um pino não consumíveis, representada na Figura 1.1, que podem ter geometrias precisas e variadas, consoante o resultado pretendido[1].

Como se verifica na Figura 1.1, após a ferramenta penetrar as chapas a soldar com a rotação já definida pelo utilizador, será exercida uma força descendente (*Downward Force*) que permanece constante em toda a soldadura. Esta força com o apoio da base (*Shoulder*) garante que o material plastificado permaneça aprisionado na zona a soldar, e assim, a soldadura se conclua. Depois da penetração do Pino e a força de fecho esteja constante basta agora a ferramenta se deslocar numa velocidade definida pelo utilizador, na direção definida (*Welding Direction*) [1].



Figura 1.1 – Esquema representativo do processo de FSW [1].

A ferramenta apresenta diversas geometrias, esquematizadas na Figura 1.2, como dito anteriormente, para diversos fins pretendidos. A geometria do Pino tem o papel principal de como o calor é introduzido localmente e como decorre o fluxo de material. O fluxo de material misturado é sempre depositado na parte de trás do Pino, ou seja, com a translação e rotação da ferramenta o material que se encontra à frente do Pino roda segundo este e deposita-se na sua traseira [2]. Em relação à base, a sua principal função é aprisionar o material misturado e aumentar o calor introduzido devido à maior área de contato entre ferramenta e chapas a soldar [1].



Figura 1.2 – Esquema tipo de uma ferramenta de FSW com dois tipos de geometrias possíveis para o Pino e base [1].

É relativamente fácil e não é necessário nenhum tipo de preparação especial para efetuar FSW em soldaduras de topo ou junta sobreposta [1].

As soldaduras realizadas por FSW apresentam um aumento da resistência em tração, ductilidade, aumento da vida em fadiga e uma resistência à fratura superior comparando com os processos convencionais de fusão.

Na zona de mistura origina-se uma estrutura muito fina, com recristalização equiaxial dos grãos, o que proporciona propriedades mecânicas muito favoráveis [1].

No caso de soldaduras similares, como neste processo não há introdução de materiais ligantes, nunca há incompatibilidade químicas a ter em conta [1]. Além disso,

como a sua grande eficiência energética é elevada e não há emissão de gases, em especial CO₂, este tipo de soldadura é bastante amigo do ambiente [1][3][4].

O FSW tem como inconveniência deixar sempre um buraco resultante da extração da ferramenta (*keyhole*).

Após os resultados favoráveis obtidos em FSW, começou-se a efetuar-se o mesmo processo mas em soldadura por pontos, o *Friction Stir Spot Welding* (FSSW), contendo sempre um *keyhole* final, característico do processo FSW. O processo FSSW não é mais que o uso da mesma ferramenta de FSW, em vez de haver translação da ferramenta é simplesmente introduzida a ferramenta com uma velocidade de rotação desejada e extraída passado algum tempo, estipulado para um resultado pretendido, resultando a soldadura [4], [5], [6].



Figura 1.3 – Esquema do processo FSSW. a) Penetração da ferramenta; b) Mistura do material; c) Extração da ferramenta. [11]

Assim, devido à inconveniência deste *keyhole*, desenvolveu-se um novo processo, onde este estudo incide. Uma vertente do FSSW, desenvolvido no HZG (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, antigo GKSS centro de investigação) Alemanha e patenteado [7], que se identifica como *Friction Spot Welding* (FSpW). Tem como características ser uma soldadura pontual e haver enchimento do buraco final produzido (não haver *keyhole*) pela ferramenta. A Figura 1.4 ilustra os componentes constituintes da ferramenta do processo FSpW.



Figura 1.4 – Esquema dos componentes do processo FSpW (dimensões utilizadas neste estudo). Partes Penetrantes e Rotativas: Pino e Manga. Parte de Suporte: Anel de Fecho. Imagem cedida por cortesia de HZG.

O RSW é o processo de soldadura por pontos mais utilizado industrialmente na atualidade. Este processo baseia-se na aplicação de calor, gerado por resistência elétrica, e de pressão para realizar a soldadura. Ocasiona a fusão de material para soldar. Pelo esquema da Figura 1.5, verifica-se que quando os elétrodos contactam as chapas a soldar fazem uma descarga elétrica suficiente para ocorrer fusão do material base e assim soldar. Os principais parâmetros do processo são a intensidade de corrente, o tempo de soldadura e a força exercida pelos elétrodos [8]. Este processo é bastante usado para soldar aços. Devido à mais alta condutividade elétrica das ligas de alumínio em relação ao aço, este processo faz com que seja necessário grande quantidade de energia consumida para soldar estas ligas [9].





Este trabalho pretende estudar a influência e a otimização de parâmetros do processo FSpW na resistência mecânica de soldaduras por pontos na liga de alumínio AA 6082 T6 com 1 mm de espessura. Pretende também comparar os resultados obtidos ao nível da resistência destas soldaduras com soldaduras idênticas realizadas por resistência elétrica (RSW).

Com esta finalidade, este tema revela uma componente muito atrativa de uma caminhada no incerto e na construção de conhecimento, pois como processo ainda experimental, existe ainda uma escassez de referências bibliográficas. Sendo o processo de rebitagem o mais comum de fixação pontual de ligas de alumínio, e em casos especiais o RSW, este processo revolucionário tem como estandarte a libertação de introdução de massa não pretendida, mas por enquanto não contornável, dos rebites na indústria aeronáutica, como também eliminar os defeitos ligados aos processos de soldadura por fusão e aos seus grandes consumos energéticos.

Porém, ainda não se pode garantir que os resultados obtidos são finais. Como anteriormente, ainda existe uma escassez de referências bibliográficas e assim mais estudos terão que ser realizados.

2. DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO FS_PW

Este processo tem um funcionamento diferente do FSSW. Começa pelo anel de fecho não rodar. Este tem só a função de aprisionamento do material ao exercer uma pressão no sentido das placas. A manga e o pino têm sistemas de atuação independentes, contudo, rodam no mesmo sentido e à mesma velocidade para evitar fricção entre os componentes da ferramenta e assim ruína da própria. Quando o anel de fecho fixa com uma determinada força as chapas há duas formas distintas de FSpW [10], representadas na Figura 2.1.

1) A Manga ser o componente que interage primeiro. Ou seja, a Manga ao penetrar no metal o Pino recolhe e cria um espaço onde o material movido vai se concentrar e misturar. No momento em que a soldadura está completa, a Manga recolhe e o Pino empurra o material contido no espaço da mistura até encher o lugar de ação da Manga (*Sleeve Plunge*).

2) O Pino ser o primeiro componente a interagir e o processo ocorre de maneira inversa ao anterior. Assim, a Manga é o elemento que irá empurrar o material deformado (*Pin Plunge*).



Figura 2.1 – Esquema de FSpW [10]. A-Fecho da ferramenta com uma força pré-determinada. *Sleeve Plunge:* B-Perfuração da Manga e recuo do Pino; C-Posição zero da Manga e Pino; D-Soldadura completa. *Pin Plunge:* E-Perfuração do Pino e recuo da Manga; F- Posição zero da Manga e Pino; G-Soldadura completa.

2.1. Parâmetros de Soldadura

Os parâmetros que se podem controlar no processo FSpW são a velocidade de rotação da manga e do pino [rpm], a profundidade de perfuração da manga e do pino [mm], a força de fecho, produzida da interação do anel de fecho com as placas a soldar [kN] e a duração de soldadura [s] [3]. A variação destes parâmetros ditará todas as características finais da soldadura. Assim, as propriedades mecânicas são altamente influenciadas pela relação de todos os parâmetros, obrigando a um compromisso que garanta a melhor qualidade ou, em casos específicos, a rentabilidade para valores ótimos de funcionamento projetado para as peças.

A velocidade de rotação é o parâmetro que ditará o fluxo de material e a maior parte de calor introduzido no sistema. Logo, para rotações da ferramenta mais elevadas (consideradas acima das 2000rpm [6]) o calor introduzido será maior e a fluidez do material maior por consequência. Isto acontece porque rotações superiores introduzem fricção e deformação de material maior e assim mais calor. Se em conjunto com a rotação a duração de soldadura for excessiva, a temperatura tende a atingir cerca de 80% da temperatura de fusão do material, podendo provocar a perda de propriedades mecânicas do material base [11].

A profundidade de perfuração influencia também a temperatura que se atinge durante o processo deste tipo de soldadura. Ou seja, para uma maior profundidade há uma área de contacto maior logo, uma fricção superior e consequentemente mais calor introduzido.

O tempo de soldadura também influencia a temperatura introduzida, pois ao aumentar o tempo de interação entre os componentes Manga ou Pino na deformação do material base, conduzirá a um aumento da temperatura introduzida

A força axial sobre as placas feita pelo anel de fecho, quando excessiva cria defeitos na soldadura, não só deforma as chapas a soldar como também pode criar ruína da ferramenta. No caso inverso verifica-se a falha no aprisionamento do material misturado, e

assim a falha na condução do material misturado, originando keyhole (buraco em português).

Para certos tipos de exigências, pode-se recorrer a um pré aquecimento ou arrefecimento do material base [1]. São exemplos os aços e as ligas de titânio devido aos seus elevados pontos de fusão, onde se pode fazer um aquecimento para garantir que haja uma deformação plástica suficiente à volta da ferramenta para se proceder à soldadura. Tal como as ligas de cobre devido à elevada condutividade térmica. Por outro lado, nos casos das ligas de alumínio e magnésio com os seus baixos pontos de fusão, um arrefecimento pode ser feito para evitar um aumento excessivo do tamanho de grão, e evitar a ocorrência de precipitados para ligas com tratamentos térmicos.

2.2. Fluxo de Material

O fluxo de material durante a soldadura em FSpW é bastante complexo, pois depende de diversos fatores, mas sobretudo da geometria da Manga e do Pino. Assim, como dito anteriormente, há duas formas distintas de fluxos, uma para o caso de ser a Manga o componente que interage em primeiro lugar e outra no caso de ser o Pino a penetrar o metal em primeiro.

1) No caso da Manga, a maior parte do material deformado com a perfuração da Manga entra no vazio criado pela recolha do Pino, onde é misturado, porém uma percentagem significativa de material deformado é também encontrado na parte exterior da Manga, onde o anel de fecho o aprisiona e o mantém.

 No caso do Pino o material deformado flui para a zona de recolha da Manga onde é misturado e resposto com o seu avanço, na altura de recolha do Pino. No primeiro caso ocorre a criação de uma soldadura de maior diâmetro como seria de se prever, conforme se mostra na Figura 2.1.

Nota: Estas duas formas de descrever o fluxo de material são os primeiros passos do que se pensa ser o fluxo do material. Porém, ainda nenhum estudo foi concluído demonstrando a forma correta de como o material flui durante o processo de soldadura. Espera-se que durante os próximos tempos sejam comprovados os pontos acima descritos.

2.3. Fluxo de Calor

Todo o calor é introduzido pela fricção dos componentes penetrantes durante os processos de FSW, FSSW e FSpW [11], [12]. Para FSW, a distribuição de calor ocorre de forma simétrica segundo uma linha imaginária que atravessa o centro a soldadura [11]. Assim, quando a Manga ou Pino penetram as chapas fazem um aumento de temperatura localizado na sua zona da ação, que se pensa que flui em seguida de forma uniforme nas chapas e também para os componentes em contacto com estas, ou seja, o anel de fecho e a estrutura de fixação das chapas.

Nota: Como no caso do fluxo de material, o fluxo de calor ainda não se conhece de forma correta. Mais estudos estão a decorrer nesse sentido.

2.4. Microestruturas da Soldadura

Devido ao calor introduzido e à deformação imposta pelos componentes penetrantes, encontra-se três tipos de morfologias em FSSW e FSpW [3], [10], [13], [14], como se verifica na Figura 2.2, encontra-se a zona de mistura (ZM), a zona afetada termo mecanicamente (ZATM) e a zona afetada termicamente (ZAT).



Figura 2.2 – Demonstração tipo dos três tipos de morfologias obtidos da soldadura FSpW [10]. Em que o material base é representado como BM, HAZ é ZAT, TMAZ é ZATM e SZ é ZM.

A ZATM é caracterizada por haver uma rotação de 90° dos grãos do material base (MB) devido à rotação da Manga [10], e a ZM existe uma recristalização dos grãos originada pela elevada deformação e temperaturas atingidas durante o processo FSpW [10].

2.5. Materiais Possíveis de Soldar com FSpW

Como dito anteriormente, este processo vem com o conceito, a partir do FSW, de se soldar ligas de alumínio em estado sólido. Devido aos ótimos resultados obtidos até agora em ligas similares de alumínio, existem variados estudos com o objetivo em se conseguir soldar diversas ligas metálicas dissimilares (p.e. alumínio/magnésio), ou soldar ligas metálicas com materiais compósitos (p.e. alumínio/fibra de carbono) [10], [14], [15], [16].

3. EQUIPAMENTO E MATERIAL UTILIZADO

3.1. Máquina de FSpW

A máquina de soldar FSpW RPS100 é um protótipo desenvolvido numa parceria entre o HZG e a empresa Harms & Wendetm, ver , cujo acionamento é feito por um sistema pneumático e também elétrico. Tem como características uma massa de 65 kg, uma alimentação pneumática de 6 bar, uma força de fecho de até 20 kN, rotação máxima de 3300 rpm e um binário máximo de 14,5 Nm. A interface de programação dos parâmetros a utilizar é feita através de um software desenvolvido pela empresa Harms & Wendetm.



Figura 3.1 – Protótipo do equipamento utilizado FSpW RPS100. Imagem cedida por cortesia de HZG.

As soldaduras foram feitas com recurso a uma ferramenta, com as características assinaladas na Figura 1.4, e feita numa liga de titânio.

3.2. Liga AA 6082 T6 e sua preparação para os ensaios

Esta liga de alumínio é considerada como uma liga de resistência mecânica média e com grande resistência à corrosão. Apesar de ser de resistência mecânica média é a liga da série 6000 que apresenta maior resistência mecânica. As principais aplicações situam-se na indústria das estruturas metálicas, por exemplo nas estruturas em treliça sujeitas a elevadas tensões, na indústria dos transportes, em carros desportivos, e também na indústria das embalagens, no fabrico de barris de cerveja, p.e..

A sua composição química nominal encontra-se na Tabela 3.1, e a microestrutura do material base (MB) é representada na Figura 3.2.

Tabela 3.1 – Composição química nominal da liga AA 6082 T6	

Componentes	Al	Mn	Si	Mg	Fe	Cu	Cr	Ti	Zn
%	95 – 98	0.4 – 1	0.7 – 1.3	0.6 - 1.2	Máx. 0.5	Máx. 0,1	Máx. 0.25	Máx. 0.1	Máx. 0.2



Figura 3.2 – Morfologia nominal do MB

A liga AA 6082 T6 é uma liga cuja resistência mecânica é conseguida à custa do tratamento de envelhecimento (T6), que consta de um tratamento de solubilização e têmpera, seguido de envelhecimento artificial, o que dá origem à formação de precipitados finos e coerentes com a matriz [8]. As propriedades mecânicas nominais das ligas estão indicadas na Tabela 3.1.

Densidade	2.7 g/cm^3
Microdureza	95 Hv
Tensão de Cedência	250 MPa
Tensão de Rotura	290 MPa
Módulo Young	69.5 GPa

Tabela 3.2 – Propriedades Mecânicas nominais da liga AA 6082 T6 (valores para chapas de espessura inferior a 5 *mm*)

Estes valores apresentados foram obtidos a partir da base de dados online MatWebtm - The Online Materials Database.

As chapas foram cortadas com as dimensões 100 x 25 x 1 (L x W x t_a) [mm], tendo-se realizado a soldadura numa zona de sobreposição das chapas de 20 mm (L_s) de dimensão, como se mostra na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Exemplar do provete de juntas sobrepostas [mm] [8].

3.3. Máquina de Tração

Os testes de tração foram efetuados numa máquina de ensaios eletromecânica Zwick Roelltm 1478 (Figura 3.4) de capacidade máxima de carga de 100 kN e uma velocidade translação da cruzeta inferior de 0.0005 a 1000 mm/min.

A aquisição de dados é dada através do software TestXpert cedido também pela Zwick Roelltm numa plataforma PC, onde depois de exportados os dados foram tratados em Excel.

Os testes foram feitos com base na norma ASTM D 1002 - 05, com uma velocidade de 1 mm/min, onde a deslocação da junta soldada foi medida a partir de um extensómetro MTStm modelo 63425F-24, com distância de referência de 50 mm e deslocamento máximo de \pm 25 mm. Foi programado como ponto final do teste haver um decréscimo de 75% da força total. Os testes foram efetuados à temperatura ambiente.



Figura 3.4 - Máquina Tração Zwick Roelltm 1478. Imagem cedida por cortesia de HZG.

3.4. Máquina de Microdureza

As análises de microdureza foram efetuadas numa máquina Zwick Roelltm modelo ZHV, representado na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Máquina de Microdureza Zwick Roelltm ZHV. Imagem cedida por cortesia de HZG.

Os testes foram conduzidos através de uma escala Vickers HV 0.1, ou seja, uma carga imposta de 0.9807 N durante um período de tempo de 10 s.

Para o melhor manuseamento e visibilidade dos provetes para uma análise de microdureza e metalográfica eficientes, estes foram cortados transversalmente ao eixo longitudinal a cerca de 1.5 mm do centro da soldadura (ver Figura 3.6), através de um disco de óxido de alumina com uma velocidade de rotação de 3000 rpm e translação de 0,5 mm/s (parâmetros de corte aconselhados pelos supervisores da instituição HZG), de forma que o centro fique exposto para se efetuar uma análise metalográfica correta. De seguida fez-se o embutimento na resina Demotec 30 para um melhor manuseamento.



Figura 3.6 – Vista de um provete pronto a embutir.

As indentações efetuaram-se em três linhas ao longo da soldadura, como se mostra na Figura 3.7, com um espaçamento de 500 µm entre cada indentação, num total de 101 pontos.



Figura 3.7 – Linhas de indentação na análise de Microdureza.

3.5. Análise Metalográfica

Depois de embutidos os provetes na forma descrita no subcapítulo anterior, estes foram preparados para análise metalográfica. Para se obter uma correta imagem da zona soldada poliram-se os provetes pela sequência aconselhada pela Struerstm, numa máquina da mesma companhia, de modelo TegraForce-5 (Figura 3.8). Começou-se por polir com uma lixa de 320 de granulometria, passando-se de seguida para um processo

intitulado pela Struerstm de Largo, que consiste em polir com uma suspensão diamantada de 9 µm num prato especial da marca. Em seguida mudou-se de prato e voltou-se a polir, desta vez numa suspensão diamantada de 3 µm de granulometria, que a Struerstm intitula de Dac. Para finalizar o processo de polimento, mudou-se uma vez mais de prato e ataca-se o provete mecânico-quimicamente através de OPS (sílica coloidal) com uma concentração de 1:1 em água. Este último processo é designado por Chem.

Devido a esta liga ter uma grande resistência à corrosão, submeteram-se os provetes a um ataque químico mais severo, no sentido de se conseguir uma imagem clara da zona afetada pela soldadura. É um processo eletrolítico numa solução de Barker [17], e proporciona uma imagem perfeita da soldadura.



Figura 3.8 – Máquina Struerstm TegraForce-5 de polimento. Imagem cedida por cortesia de HZG.



Figura 3.9 – Microscópio Leicatm DM IRM Imagem cedida por cortesia de HZG.

Após polimento e ataque químico passou-se à análise metalográfica. Toda a análise macro e micro estrutural foi no microscópio Leicatm DM IRM (ver Figura 3.9). Este modelo tem um sistema de captura de imagens incorporado, logo, é possível obter no momento todas as microestruturas pertencentes a este processo. Ou seja, MB, ZAT, ZATM e ZM.

3.6. Procedimentos de soldadura

Devido ao fraco conhecimento inicial dos parâmetros adequados para este tipo de material e processo, FSpW, foram utilizadas as duas técnicas, S*leeve Plunge* e *Pin Plunge*, e foi analisado o efeito de diversos parâmetros de soldadura: velocidade de rotação, penetração da ferramenta, tempo de soldadura e força de fecho. Os parâmetros iniciais foram recolhidos na literatura. Não se tomou em consideração neste estudo o tempo de espera de ação dos componentes (*Dwell Time* igual a 0 s), e sempre se considerou 1 s por passo dos processos que serão descritos no capítulo seguinte.

Com o objetivo de facilitar a compreensão do texto, os procedimentos de soldadura bem como a seleção dos parâmetros utilizados e os resultados obtidos são descritos em detalhe no capítulo seguinte.
4. OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA FS_PW

4.1. Primeiro Teste

Os primeiros parâmetros utilizados foram baseados na literatura existente [15], [18], [19]. Isto significa que não existem parâmetros otimizados para esta liga, com as características descritas no Capítulo 3.2. Assim, para primeira tentativa utilizou-se, a conselho do meu cossupervisor da instituição que me acolheu, os parâmetros descritos na Tabela 4.1, no processo de *Sleeve Plunge*.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados no primeiro teste assinalados com um X

Rotational Speed [rpm] / Sleeve Depth [mm]	1200	1500	1800
1.1		Х	
1.3	Х	Х	Х
1.6		Х	

Soldaram-se três provetes de cada combinação de parâmetros e testaram-se à tração. Verificaram-se que os valores obtidos, ilustrados na Tabela 4.2, foram muito abaixo dos esperados. Os resultados desejados rondariam os 3000 N, resultados obtidos por Pereira [8] para a soldadura por resistência. Como se verifica na Tabela 4.2, o melhor resultado ronda os 2140 N.

		Parametros			
Combinação	Velocidade de Rotação [rpm]	Profundidade Manga [mm]	Força de Fecho [kN]	Força de Rotura média [N]	Desvio Padrão [%]
1	1200	1,3		2140,5	3%
2	1500	1,3		1660,7	9%
3	1800	1,3	12	1412,4	3%
4	1500	1,1		1390,7	8%
5	1500	1,6		1610,6	7%

Tabela 4.2 – Resultados dos testes de tração para	os primeiros parâmetros utilizados
---	------------------------------------

Para se compreender os motivos de tão baixos valores efetuou-se a análise metalográfica das amostras. Pela Figura 4.1, que ilustra a macrografia da combinação 1, verifica-se que na zona destacada a vermelho existe um efeito denominado de hook (gancho em português), que se encontra na ZATM. Este efeito não é mais que o material puxado pela Manga aquando do recuo, após a penetração na chapa inferior. Assim, a Manga, durante o processo de mistura de material da chapa inferior com a superior, cria uma ligação parcial no lado exterior à própria Manga, ou seja, na zona do anel de fecho, e ao subir após conclusão da mistura, leva consigo material agarrado que origina o dito hook. Pela inclinação deste efeito na direção da chapa superior percebe-se que é uma zona de grande fragilidade, e assim, ideal para propagação de uma fratura no caso de carga, como é o ensaio de tração. A Figura 4.2 ilustra em maior ampliação a zona do hook. Verifica-se que a ligação entre as chapas se faz apenas numa zona muito reduzida. Também se deteta uma alteração da espessura da chapa superior na zona do anel de fecho, isto devido à força de fecho exercida ser excessiva. Este fenómeno também é prejudicial pois condiciona a distância do hook à superfície superior. Como se verifica na Figura 4.2, o hook vai até próximo da superfície superior. Não é portanto surpresa que a fratura obtida em todos exemplares, fratura representada na Figura 4.3, apresente sempre a mesma morfologia. A fratura propagou-se ao redor da ação da Manga, zona do *hook*.



Figura 4.1– Macro da soldadura de Combinação 1. Hook destacado a vermelho



Figura 4.2 – Ampliação da zona do hook destacada na Figura 4.1 a vermelho



Figura 4.3 – Demonstração da fratura obtida no primeiro teste

A Figura 4.1 mostra ainda um segundo fenómeno, que ocorre em todas as soldaduras. Como este processo é só *Sleeve Plunge* na zona central da soldadura não ocorre qualquer mistura de material, pois permanece a linha de separação das chapas nessa zona, o que também deverá ser prejudicial à resistência à tração da ligação em caso do efeito *hook* não se formar, pois é extremamente mais frágil a zona do *hook*, porém mais estudos terão que ser feitos para comprovar tal fato.

Nota: As macros dos restantes parâmetros do primeiro teste em Anexo A

4.2. Segundo Teste

Para ultrapassar o obstáculo imposto pela formação do *hook* foram mudados diversos parâmetros de soldadura. Porém, a simples alteração da profundidade da Manga, ou a mudança da força de fecho ou da velocidade de rotação foi ineficaz, conforme se demonstra na Tabela 4.2. Assim, pensou-se numa forma de mudar a direção de progressão do *hook*. Visto que, como foi descrito no subcapítulo 4.1, o *hook* não é mais que material a ser empurrado, pensou-se qual seria o efeito da introdução do procedimento *Pin Plunge* no processo *Sleeve Plunge* (ver Figura 4.4). Este modo nunca foi antes testado, sendo completamente desconhecido o modo de progressão do *hook*. Assim, devido ao vazio na literatura sobre este novo método iniciou-se uma série de testes, onde foram detetados vários obstáculos ao novo processo.



Figura 4.4 – Esquema do novo processo testado [10]. A- fecho da ferramenta com uma estabelecida força; B- Sleeve Plunge; C- Pin Plunge; D- Posição zero do Pino e da Manga; E- Soldadura completa

Nos testes iniciais realizados deste processo novo, os parâmetros foram baseados nos parâmetros utilizados no primeiro teste, simplesmente diminuiu-se a força de fecho (de 12 kN para 10kN) para não ocorrer a redução de espessura. Porém, verificou-se que não havia alimentação da área de ação do Pino, originando-se sempre um *keyhole*, ver Figura 4.5. Assim, conclui-se que a velocidade de rotação teria que ser superior, de modo a aumentar a fluidez de material. Ou seja, se houver uma rotação superior da ferramenta o calor introduzido será necessariamente superior, provocando uma maior fluidez do material a soldar e por consequência uma maior facilidade de a Manga poder empurrar o material misturado, e alimentar a zona de ação do Pino.



Figura 4.5 – Keyhole formado por este novo processo

Depois de vários testes realizados, simplesmente utilizando um sistema de tentativa erro, conclui-se que para uma rotação de 2200 rpm e uma força de fecho de 10 kN e um tempo de espera de 0 s entre cada passo, o *keyhole* não ocorre, quaisquer que sejam as profundidades do Pino e da Manga. Após a definição da velocidade de rotação base, realizou-se o conjunto de testes indicados na Tabela 4.3, com o objetivo de ver o efeito da profundidade do Pino.

Combinação	Profundidade	Profundidade	Velocidade de	Força de fecho
Comonação	da Manga [mm]	do Pino [mm]	rotação [rpm]	[kN]
1		0,6		
2	1,3	0,8	2200	10
3	3			

Os ensaios de tração (dois exemplares de cada combinação) realizados a estas soldaduras apresentaram um aumento substancial da resistência, conforme mostram os valores médios de carga de rotura indicados na Tabela 4.4. Os resultados mostram também que o aumento de profundidade do Pino produz apenas um ligeiro aumento da carga de rotura das soldaduras.

Combinação	Força de rotura	Desvio Padrão	
Compinação	média [N]		
1	4154,51	4%	
2	4191,60	1%	
3	4245,03	2%	

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de tração das soldaduras realizadas pelo novo processo



Combinação 1



Combinação 2



Combinação 3





Figura 4.7 – Ampliação do caminho tomado pelo hook. Combinação 3

Estes resultados bastantes superiores, demonstrados na Tabela 4.4, compreendem-se facilmente, através da análise metalográfica das soldaduras. A partir da Figura 4.6 nota-se que o caminho do *hook* é completamente diferente ao caminho anteriormente tomado. A Figura 4.7 ilustra as secções transversais das soldaduras realizadas. Verificando o caminho tomado pelo *hook* conclui-se que este segue um caminho no início descendente em direção à zona de ação da Manga contornando-a, e desvanece-se na ZM.

4.3. Terceiro Teste

Após o sucesso do teste anterior, para se comprovar qual a gama de parâmetros a que FSpW com este método pode funcionar, recorreu-se ao método estatístico Método de Taguchi [20], de forma a haver a rentabilização da utilização do material base, que é limitado. Este método pretende dar respostas com base num grau de certeza medido, de forma a não haver desperdícios de valores nos dados inseridos inicialmente. Isto significa que, como o material base disponível não é ilimitado, e não é viável economicamente e temporalmente testar todos os parâmetros possíveis, introduz-se no método os parâmetros por fatores de controlo e testa-se por níveis. Consoante o número de fatores e de níveis, constrói-se uma matriz ortogonal. Neste estudo introduziram-se 3 fatores de controlo (Velocidade de Rotação; Profundidade do Pino; Profundidade da Manga) em 3 níveis (Tabela 4.5), o que origina 6 graus de liberdade.

Tabela 4.5 – Tabela de entrada de dados para método de Taguchi

Fatores de Controlo			Níveis		
		1	2	3	
Velocidade de Rotação	rpm	1900	2000	2200	
Profundidade do pino	mm	0,6	1	1,4	
Profundidade da manga	mm	1	1,3	1,6	

Graus de Liberdade = Fatores de Controlo \times (Níveis - 1) = $3 \times (3 - 1) = 6$

Formando-se assim uma matriz L9 (i.e. 9 linhas de combinação de parâmetros) (Tabela 4.6).

	Fa	atores de controlo)
Combinação	Velocidade de	Profundidade	Profundidade da
Compinação	rotação [rpm]	do pino [mm]	manga [mm]
1	1900	0,6	1,0
2	1900	1,0	1,3
3	1900	1,4	1,6
4	2000	0,6	1,3
5	2000	1,0	1,6
6	2000	1,4	1,0
7	2200	0,6	1,6
8	2200	1,0	1,0
9	2200	1,4	1,3

Tabela 4.6 – Parâmetros dados pelo Método de Taguchi após introdução de dados

Após obtenção dos parâmetros, soldaram-se três exemplares de cada combinação, simplesmente para testar os provetes à tração. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.7, através das médias da resistência à tração. Verifica-se que a combinação 8 é a que tem melhor comportamento.

	Força de rotura	Desvio padrão
	média [kN]	
1	4267,1	8%
2	4147,0	1%
3	3754,8	6%
4	4170,2	1%
5	3948,6	1%
6	4317,5	13%
7	3798,9	1%
8	4727,8	4%
9	4233,1	1%

Tabela 4.7 – Resultados obtidos no teste de tração

Após introdução destes valores uma vez mais no Método de Taguchi, este mede o peso de cada variável e diz qual é a combinação mais relevante. Sabe-se que quanto maior o peso do fator melhor (Tabela 4.8).

FATORES DE		NÍVEIS		Graus de		Média	Efeito do
CONTROLO	1	2	3	Liberdade (f)	Somatório (S)	Quadrada /Variância (V)	Fator (%)
Velocidade de Rotação	72,12	72,30	72,53	2	0,261	0,13	9,35
Profundidade do pino	72,18	72,59	72,19	2	0,328	0,16	11,73
Profundidade da manga	72,86	72,43	71,66	2	2,206	1,10	78,92

Tabela 4.8 – ANOVA, Larger the Best. Pesos dos fatores introduzidos em relação à performance no teste de tração

A partir da Tabela 4.8 percebe-se que 78,92% da performance da soldadura é obtida através da ação da Manga. Porém estes valores terão que ser confirmados, pois ainda é uma etapa algo precoce para confirmar tal valor do parâmetro. Assim, através destes dados pode-se construir um gráfico que relaciona os pesos com a performance em tração (Figura 4.8).





O fator A corresponde à Velocidade de Rotação, o B ao Profundidade do Pino e o C ao Profundidade da Manga. Pelos pesos obtidos dos fatores (A3 igual a 72,53; B2 igual a 72,59; C1 igual a 72,86), realiza-se que esta combinação, teoricamente, leva ao parâmetro ideal, que fará que um provete suporte uma maior tensão. Comparando estes resultados e os resultados demostrados na Tabela 4.7, comprova-se que a combinação 8 é deveras a melhor.

4.4. Parâmetros Otimizados

Com os resultados anteriores, basta agora só verificar a influência das variações dos três fatores mencionados no subcapítulo anterior. Assim, construiu-se mais uma matriz de parâmetros, mas desta vez só com as variações próximas da velocidade de rotação e a profundidade da Manga e do Pino (ver Tabela 4.9).

Tabela 4.9 – Parâme	tros Finais
---------------------	-------------

	Pa	arâmetros Finai		
C	Velocidade de	Profundidade	Profundidade	
Combinação	rotação [rpm]	do pino [mm]	da manga [mm]	
1	2000	1,0	1,0	Velocidade de
2	2400	1,0	1,0	Rotação
3	2200	0,6	1,0	Profundidade do Pino
4	2200	1,4	1,0	
5	2200	1,0	0,7	Profundidade da Manga
6	2200	1,0	1,3	

Soldaram-se três provetes de cada combinação mais dois da combinação 8, do conjunto apresentado no subcapítulo anterior, e compararam-se os resultados de tração aos resultados da combinação 8, acrescentado de mais dois provetes (ver Tabela 4.10).

Combinação	Força de rotura média [kN]	Desvio padrão
8	4656,3	4%
1	4769,8	3%
2	4901,2	2%
3	4609,6	8%
4	4851,1	2%
5	3009,3	11%
6	4150,2	1%

Tabela 4.10 – Comparação dos valores de resistência obtidos dos parâmetros finais com a combinação 8

Com a introdução de mais dois resultados na combinação 8 verifica-se uma diminuição na média da carga suportada pela soldadura mas mantendo o mesmo desvio padrão. Porém assinala-se um aumento significativo da carga suportada na combinação 2, com um desvio padrão muito pequeno, o que permite concluir que o aumento da velocidade de rotação é benéfico para a resistência da soldadura. A partir da Figura 4.9 pode-se verificar que o *hook* é quase na totalidade desviado na direção do núcleo da soldadura, fazendo que o rendimento da soldadura seja superior.



Figura 4.9 – a) Macro da combinação 2; b) Morfologia do hook resultante da combinação 2

Neste caso, como o *hook* apresenta geometria diferente, a fratura do provete ocorre de maneira distinta dos primeiros exemplares do subcapítulo 4.1. Neste caso obtiveram-se duas formas distintas de fratura, uma que resultou na quebra total no sentido da soldadura (Figura 4.10 a)), e outra em que a fratura se propagou no sentido da chapa inferior, contornando a ação do Pino (Figura 4.10 b)).



Figura 4.10 – Demonstração dos dois tipos de fraturas obtidas dos testes de tração a) Fratura no sentido da solda; b) Vista inferior da fratura em torno do Pino

Por outro lado, a combinação 5 apesar de ter a mesma profundidade da Manga de 1 mm e uma velocidade de rotação de 2200 rpm, obteve o pior resultado. Com base no estudo metalográfico (Figura 4.11), constata-se que a formação do hook nesta combinação propaga-se em direção ao centro da soldadura de forma direta, de tal modo que as chapas são soldadas de forma parcial, até mais ou menos à zona de ação do Pino.



Figura 4.11 – a) Macro da combinação 5; b) Geometria do *hook* de soldadura realizada com a combinação 5

Constatou-se que ocorre sempre o mesmo tipo de fratura nesta combinação, que segue o caminho do *hook*, ou seja, quebra totalmente no sentido da soldadura (ver Figura 4.12).

Assim, conclui-se que neste processo a profundidade do Pino é fulcral para se ter uma bom resultado. Ou seja, comprova-se que pelo Método de Taguchi o peso da ação da Manga não é tão mais influente assim, dividindo assim a sua influência para a ação do Pino e parte para a velocidade de rotação, devido ao melhor rendimento para uma velocidade superior.



Figura 4.12 – Morfologia da fratura resultante da combinação 5

Nota: Todas as outras macros dos parâmetros otimizados encontram-se em Anexo B

4.5. Microestrutura Parâmetros Otimizados



Figura 4.13 – Morfologias gerais dos parâmetros otimizados obtidas em FSpW (combinação 1).

Como se verifica na Figura 4.13, a ZM da soldadura é maioritariamente composta com grãos finos recristalizados devido às elevadas deformações e temperaturas atingidas pelo processo. Também se verifica um refinamento do grão nas ZATM e ZAT em relação ao MB. Com estes parâmetros não houve problemas com o caminho tomado do *hook*. Este não toma o caminho comum do processo *Sleeve Plunge*, ou seja, em vez de se

dirigir de forma ascendente em direção à superfície superior, neste caso contorna a zona de ação da Manga e dissolve-se na ZM. Isto acontece devido à nova forma de como o material flui, porém mais estudos terão que ser feitos para se compreender este fenómeno com características bastantes positivas.

5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. Testes de Tração

Com os parâmetros finais para FSpW já definidos, pode-se comparar por fim os dados de resistência obtidos por Pereira (2012) com os valores deste trabalho. Verificase que os resultados representados na Figura 5.1 a), soldadura por FSpW da combinação 2 dos parâmetros otimizados, são muito superiores aos resultados de soldaduras realizadas por RSW, como é ilustrado na Figura 5.1 b), em que há uma diferença em cerca de 2000N de esforço suportado. Há que ter em conta que devido à geometria da ferramenta de FSpW, o diâmetro de soldadura ronda os 9 mm ao contrário do que acontece em RSW que ronda os 6mm.



Figura 5.1 – Curva carga deslocamento. a)-combinação 2; b)- Curva Carga Deformação resultante de Pereira (2012) [8]

Ter em atenção que neste estudo só se compara a curva representada a verde, demonstrada na Figura 5.1 b), com a curva representada na Figura 5.1 a).

Nota: Mais alguns exemplares de curvas carga deformação estão em Anexo C

5.2. Microdureza

Para todas as soldaduras analisadas por FSpW registou-se um aumento significativo da dureza nas zonas afetadas termicamente e mecanicamente (ZAT e ZATM), conforme se mostra na Figura 5.2, para uma soldadura realizada com a combinação 8. Caso inverso sucede para soldaduras efetuadas por RSW, com se verifica na Figura 5.3.



Figura 5.2 – Microdureza da combinação 8.

Line 1) Linha Superior; Line 2) Linha Intermédia; Line 3) Linha Inferior. Azul MB; Verde ZAT; Amarelo ZATM; Laranja ZM.



Figura 5.3 – Microdureza tipo obtida por Pereira (2012) [8].

Este aumento de dureza provém da competição entre diversos mecanismos, uns que provocam redução de dureza e outros aumentos de dureza. O calor gerado no processo tende a dissolver os precipitados endurecedores, reduzindo a dureza. Contudo, se o calor adicionado for suficiente pode verificar-se a reprecipitação, e a perda de dureza será marginal. Na zona recristalizada dinamicamente ocorre habitualmente um refinamento significativo do grão, o que aumenta a dureza e a resistência mecânica, de acordo com a lei de Hall e Petch [21]. Nessa zona (o nugget) podem coexistir grãos finos com grãos deformados. A deformação desses grãos também aumenta a dureza e resistência mecânica. É o que se passa na ZATM não recristalizada. O esclarecimento destes aspetos necessita de um estudo aprofundado e moroso por microscopia eletrónica de transmissão, que cai fora do âmbito desta tese.

Nota: Mais alguns exemplos de microdureza efetuados encontram-se em Anexo D

6. CONCLUSÃO

Os trabalhos realizados permitiram extrair as seguintes conclusões:

• Com este método desenvolvido, conseguiu-se um aumento substancial de carga suportada pelas soldaduras. A resistência à tração das soldaduras está relacionada com a geometria e dimensão do *hook* (gancho) formado na soldadura. Apesar de o Método de Taguchi avaliar um valor relativamente baixo para a ação do Pino, cerca de 11% e cerca de 78% para a ação da manga, na resistência da soldadura comprovou-se que o pino terá uma influência mais significativa para o sucesso de FSpW. Porém, o pino só tem relevância significativa para uma penetração (*Pin Depth*) de 1 mm ou mais de profundidade.

• A velocidade de rotação tem também um papel muito relevante. Para velocidades mais elevadas obteve-se sempre resultados melhores. Porém, há que ter em atenção a introdução de calor na soldadura, pois para velocidades de rotação muito elevadas mais calor é introduzido, o que leva a deformações das chapas a soldar. Assim, este fenómeno obriga a um compromisso entre a resistência e as deformações nas chapas. Contudo, comprovou-se que para velocidades inferiores a 1900 rpm há a formação de uma cavidade (keyhole), o que leva a assumir este valor como o limite inferior de velocidades de rotação, para este caso. Mais estudos são necessários para definir o limite superior, pesando-se no compromisso entre a resistência e a deformação das soldaduras.

• Também é necessário haver uma força de fecho de pelo menos 10 kN, de modo a evitar a formação de keyhole. Não havendo força de fecho suficiente o material misturado é perdido em fugas por entre o anel de fecho e o material base. Para forças superiores a 12 kN origina-se uma redução da espessura da chapa superior.

• O processo de soldadura conduziu ainda ao aumento de dureza na zona afetada termicamente e mecanicamente, ao contrário dos processos convencionais. As causas desse aumento requerem ainda estudos complementares.

7. TRABALHOS FUTUROS

Apesar de os primeiros resultados não serem muito animadores, conseguiu-se, alterando o processo comum de FSpW, resultados muito estimulantes e prometedores de uma técnica com futuro e ainda com grande margem de progressão, como se demonstrou neste trabalho. Há ainda muitos fenómenos por descobrir e compreender como se desenrolam durante o processo. São exemplos disso o fluxo e mistura de material na soldadura, a geração e transferência de calor para as chapas, e mesmo o comportamento à fadiga das ligações.

Também é muito estimulante saber quais os mecanismos que fazem com que a dureza aumente durante a soldadura. É também importante estudar a influência dos parâmetros no campo de tensões residuais na vizinhança da soldadura.

Neste estudo não foi tido em conta o procedimento de soldadura *Pin Plunge* sozinho. Por este motivo, é aconselhável estudar soldaduras produzidas por este processo, para se compreender qual o seu efeito na morfologia do *hook*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, Aug. 2005.
- [2] K. Colligan, "Material flow behavior during friction welding of aluminum," *Welding Journal*, vol. 78, no. July, pp. 229–237, 1999.
- [3] S. Amancio, "Friction spot joining of light weight metals and fiber reinforced polymer hybrid structures."
- [4] F. Ramos, T. Strohaecker, and J. dos Santos, "A Influência do Perfil da Ferramenta e Velocidade de Rotação na Soldagem a Ponto por Fricção e Mistura Mecânica da Liga AA 6181-T4," *SciELO Brasil*, vol. 17, pp. 104–113, 2012.
- [5] P. Lin, J. Pan, and T. Pan, "Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, no. 1, pp. 74–89, Jan. 2008.
- [6] Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 15, pp. 2230–2236, 2007.
- [7] C. Schilling and J. dos Santos, "Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding," *US Patent* 6,722,556, 2004.
- [8] A. Pereira, "Comportamento Mecânico de Juntas Soldo-Coladas," Universidade de Coimbra, 2012.
- [9] Miller Electric Mfg. Co., Handbook for Resistance Spot Welding. Illinois, 2012.
- [10] S. T. Amancio-Filho, A. P. C. Camillo, L. Bergmann, J. F. Dos Santos, S. E. Kury, and N. G. a. Machado, "Preliminary Investigation of the Microstructure and Mechanical Behaviour of 2024 Aluminium Alloy Friction Spot Welds," *Materials Transactions*, vol. 52, no. 5, pp. 985–991, 2011.
- [11] M. Awang, "Simulation of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Study of Friction Phenomena," West Virginia University, 2007.
- [12] M. Awang, V. Mucino, Z. Feng, and S. David, "Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW) process: use of an explicit adaptive meshing scheme," SAE International, pp. 1–6, 2005.
- [13] S. Baek, D. Choi, C. Lee, and B. Ahn, "Structure–Properties Relations in Friction Stir Spot Welded Low Carbon Steel Sheets for Light Weight Automobile Body," *Materials* ..., vol. 51, no. 2, pp. 399–403, 2010.

- [14] S. H. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole, X. Cao, and P. Wanjara, "Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 556, pp. 500–509, Oct. 2012.
- [15] T. Rosendo, B. Parra, M. a. D. Tier, a. a. M. da Silva, J. F. dos Santos, T. R. Strohaecker, and N. G. Alcântara, "Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy," *Materials & Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1094–1100, Mar. 2011.
- [16] B. Thompson, "Friction Stir Spot Welding(FSSW)- A Literature Review," 2012.
- [17] ASM International, "ASM Handbook," in in *Volume 9 Metallographic Techniques and Microstuctures*, Ninth., 1985, p. 775.
- [18] L. C. Campanelli, U. F. H. Suhuddin, A. Í. S. Antonialli, J. F. dos Santos, N. G. de Alcântara, and C. Bolfarini, "Metallurgy and mechanical performance of AZ31 magnesium alloy friction spot welds," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 4, pp. 515–521, Apr. 2013.
- [19] Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui, and T. Li, "Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints," *Materials & Design*, vol. 44, pp. 476–486, 2012.
- [20] J. Antony and F. J. Antony, "Teaching the Taguchi method to industrial engineers," *Work Study*, vol. 50, no. 4, pp. 141–149, 2001.
- [21] L. M. Brown, "Indentation Size Effect and the Hall-Petch 'Law'," *Materials Science Forum*, vol. 662, pp. 13–26, Nov. 2011.

ANEXO A

Macros primeiros parâmetros.



Combinação 2



Combinação 3



Combinação 4



Combinação 5

ANEXO B

Macros dos parâmetros otimizados



Combinação 8



Combinação 3



Combinação 4



Combinação 6

ANEXO C



Curva carga deslocamento combinação 1 do primeiro teste.

Curva carga deslocamento combinação 3 do segundo teste.





Curva carga deslocamento combinação 5 dos parâmetros otimizados.

ANEXO D



Microdureza referente ao primeiro teste.





Microdureza referente aos parâmetros otimizados.