

# Desenvolvimento de Ferramenta Bobbin-Tool para o Processo de Soldadura por Fricção Linear Caracterização e Análise da Liga de alumínio AA6061-T4



## Eládio Amaro Camacho Andrade

## Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Júri

Presidente:Professor Doutor Rui Manuel dos Santos Oliveira BaptistaOrientador:Professor Doutor Pedro Miguel dos Santos Vilaça da SilvaVogais:Professor Doutor Altino de Jesus Roque LoureiroProfessora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

### Outubro de 2009

ii

## Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível de realizar sem a colaboração de diversas pessoas e entidades às quais eu desejo prestar aqui, os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Doutor Pedro Vilaça, o meu orientador, agradeço pela oportunidade da realização deste trabalho, pelas condições que me criou, pela confiança que me depositou, pela sua incansável disponibilidade e apoio, que foi uma constante durante a realização deste trabalho.

Ao Mestre Filipe Nascimento pela discussão, apoio e disponibilidade nas diversas áreas deste trabalho, que foram cruciais. Foi uma constante companhia, e um importante pilar deste trabalho.

Ao Doutor Telmo Santos agradeço o apoio, as trocas de informações nas mais diversas áreas deste trabalho. A sua disponibilidade e troca de ideias foram importantes na parte de projecto.

À Mestre Catarina Vidal pela ajuda e disponibilidade no tratamento de dados, que foram igualmente importantes no cálculo das eficiências mecânicas.

À Doutora Beatriz Silva agradeço a disponibilidade na realização dos ensaios de tracção uniaxial, assim como os conhecimentos que me transmitiu sobre o assunto.

Ao Mestre Valentino Cristino agradeço o apoio prestado em diversas áreas laboratoriais.

Ao Senhor Pedro e ao Senhor Nelson do LTO da SPM do IST agradeço o apoio prestado na realização de algumas tarefas oficinais necessárias.

Ao Doutor Pedro Amaral agradeço os conhecimentos transmitidos na área de ensaios de flexão e materiais, a sua disponibilidade, assim como a possibilidade de realizar este tipo de ensaios.

Ao Senhor João Luis da tornearia da Benedita pelo seu apoio na Produção da Ferramenta e Sistema de Fixação.

Aos meus colegas e amigos, Fábio Silva, Gonçalo Vargas, Nuno Conraria, Vitor Beltrão, agradeço o apoio trocado em diversas áreas deste trabalho, mas essencialmente pelo apoio mútuo em momentos mais difíceis.

A criação de uma Tese de mestrado é um momento importante, mas também um caminho muito sinuoso de percorrer.

A todos os meus colegas e amigos, criados no interior e exterior, da nossa eterna casa chamada IST.

Por fim, agradeço à minha família à minha avó, tia, mãe, pai e irmão, por tudo o que fui, sou e serei. Obrigado.

### Resumo

O processo de Soldadura por Fricção Linear (SFL), já não podendo ser considerado como uma tecnologia inovadora, assume-se hoje como uma tecnologia de ponta na ligação de diversos materiais metálicos de onde se destacam as ligas de alumínio, e materiais de baixa soldabilidade muito utilizados nas indústrias dos transportes, nomeadamente, nos sectores: aeronáutico e naval. Assim, o potencial de utilização do processo SFL na estrutura e componentes de diversos veículos de transporte, é extremamente elevado permitindo obter significativas reduções de custo, peso e impacto ambiental e aumentos de produtividade, ao substituir outras tecnologias de ligação previamente utilizadas.

Este trabalho de investigação foca-se na concepção e desenvolvimento duma ferramenta designada como Bobbin-Tool para SFL, que permitirá dar alguma portabilidade ao processo de soldadura por fricção linear, eliminar alguns defeitos comuns do processo relativamente à sua forma de aplicação convencional, permitir aumentar a taxa de produção na elaboração de cordões de soldadura e aumentar o campo de utilização. A análise baseou-se no estudo da soldabilidade da liga AA6061-T4 com 4.8mm de espessura, tipicamente utilizada em acessórios para aviões e navios devido à sua elevada resistência à corrosão, fácil maquinabilidade e por ser uma liga disponível no mercado. Para tal, desenvolveram-se parâmetros para o processo de SFL com Bobbin-Tool e procedeu-se à avaliação dos mesmos no comportamento mecânico das juntas soldadas, sob esforços estáticos de tracção e flexão. Foi igualmente implementado um estudo sobre o campo de temperaturas durante a realização de um cordão de SFL com Bobbin-Tool. Foi calculada a eficiência mecânica global das juntas soldadas, relativamente ao material base, para verificar a influência dos parâmetros estudados.

Foi elaborada uma análise metalográfica e de durezas das diversas juntas, complementada com a técnica de controlo não destrutivo por análise visual.

Os resultados obtidos demonstram a influência dos parâmetros do processo, na qualidade das juntas obtidas e permitem estabelecer o nível de influência no comportamento mecânico dos cordões.

## Palavras-Chave

SFL Bobbin-Tool AA6061-T4 Eficiência Mecânica Medição de Temperaturas

### Abstract

Although the process of Friction Stir welding (FSW) can no longer be considered as an innovative technology, it is becoming nowadays as a cutting-edge technology in the joining of various metallic materials but mainly focusing aluminum alloys, and materials with low weldability used in transport industries, particularly in the sectors: aerospace and shipbuilding. Thus, the potential use of the FSW process in the structure and components of various transport vehicles is extremely high allowing significant cost reductions, weight and environmental impact and increases productivity by replacing other previously existing joining technologies.

This research focus the design and development of a Bobbin-Tool for FSW which will provide some portability to the FSW process enabling to eliminate some frequent defects on FSW with conventional tools, increase production rate in obtaining welded joints and increase the application field. The analysis was based on the study of the weldability of the alloy AA6061-T4 with thickness of 4.8mm. Possible applications for this material are accessories for aircraft and ships because of its high corrosion resistance, easy machinability and market available.

The analysis of FSW with Bobbin-Tool started with the development of process parameters and proceeded with the mechanical resistance under static tensile and bending loading. The overall mechanical efficiency of welded joints relatively to base material was also established. The metallographic analysis and hardness measurements of the various samples, supplemented with the technique of non-destructive testing by visual analysis were used to support the analysis of process parameters influence in mechanical performance.

A study on the temperature field during the execution of a weld joint was also implemented.

## **Key-Words**

FSW Bobbin-Tool AA6061-T4 Mechanical Efficiency Thermal Measurements

# Índice

Agradecimentos	
Resumo	v
Palavras-Chave	v
Abstract	vi
Key-Words	vi
Índice	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
1. Introdução	1
1.1 Objectivos	
1.2 Introdução	
1.3 Guia de leitura	
2. Estado da Arte	
2.1 Introdução	
2.2 Fundamentos da SFL	
2.3 Ferramentas para SFL	
2.3.1 Geometria das Ferramentas	
2.3.2 - Ferramentas SFL com Bobbin-Tool	
2.4 Aplicações da SFL com Bobbin-Tool	
2.5 Conclusões	
3. Desenvolvimento dos Meios Laboratoriais para SFL co	om Bobbin-Tool17
3.1 Introdução	
3.2 Desenvolvimento do Conceito da Ferramenta Bo	bbin-Tool17
3.3 Projecto e Fabrico da Ferramenta Bobbin-Tool	
3.4 Montagem da Ferramenta	
3.5 Desenvolvimento, fabrico e montagem do sistem soldar por SFL com Bobbin-Tool	na de fixação dos componentes a 21
3.6 Conclusões	
4. Análise Experimental de SFL com Bobbin-Tool	

4	.1	Introdução2	3
4	.2	Características do Material Base Ensaiado2	3
4	.3	Descrição do Equipamento LEGIO <sup>™</sup> FSW 3U2	5
4	.4	Preparação das Chapas2	6
4	.5	Parâmetros utilizados nos ensaios2	7
4	.6	Realização dos Ensaios SFL com Bobbin-Tool2	8
4	.7	Conclusões2	9
5.	Ensa	aios de Caracterização dos Cordões	0
5	.1	Introdução3	0
5	.2	Caracterização Visual das Superfícies	0
	5.2.1	Resultados	1
	5.2.2	2 Discussão de Resultados	2
5	.3	Análise Metalúrgica3	3
	5.3.1	Resultados3	4
	5.3.2	2 Discussão de resultados3	7
5	.4	Ensaios de Dureza3	8
	5.4.1	Resultados3	8
	5.4.2	2 Discussão de resultados4	2
5	.5	Ensaios de Tracção Uniaxial4	.3
	5.5.1	Resultados4	-5
	5.5.2	2 Discussão de resultados4	.9
5	.6	Ensaios de Flexão5	2
	5.6.1	Resultados 5	3
	5.6.2	2 Discussão de resultados5	6
5	.7	Medição de Temperaturas5	9
	5.7.1	Resultados6	1
	5.7.2	2 Discussão de Resultados6	2
5	.8	Análise Global dos Resultados6	3
6.	Cond	clusões6	4
7.	Prop	ostas para Desenvolvimento Futuro6	6
8.	Refe	rências Bibliográficas6	7

Anexos	
A – Desenhos Técnicos	
A.1 Desenho Técnico do Corpo da Ferramenta, dos Shoulders e pinosi	
A.2 Desenho Técnico do sistema de Fixação das Chapasii	i

B – Procedimentos de Ensaio	.v
B.1 Procedimento para Realização da Análise Metalográfica	v
B.2 Procedimento para Realização de Ensaios de Dureza	.vi
B.3 Procedimento para Realização de Ensaios de Tracção	.vii
B.4 Procedimento para Realização dos Ensaios de Flexão em 3 Pontos	/iii
C – Gráficos dos Ensaios de Tracção	.ix

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de SFL5
Figura 2.2 - Tipos de junta de soldadura possíveis de utilizar no processo de SFL [2]5
Figura 2.3 - Ferramenta de SFL [2]7
Figura 2.4 - caracterização metalográfica de uma secção transversal típica da SFL
convencional
Figura 2.5 – Diferentes tipos de shoulders de ferramentas de SFL. Legenda: a) Shoulder com
estrias em espiral; b) Shoulder com estrias concêntricas; c) Shoulder plano d) Shoulder
côncavo9
Figura 2.6 - Diferentes pinos para a ferramenta de SFL. Legenda: a)Cónico estriado roscado;
b)Trifacetado roscado; c) Cilíndrico roscado; d) Cónico liso; e)Cónico roscado f) Cónico estriado
invertido [14]9
Figura 2.7 – Bobbin-Tool Fixa e Flutuante [22]11
Figura 2.8 - Geometrias SFL com Bobbin-Tool a) [18], b) [19], c) [20], d) [21], e) [21]
Figura 2.9 – GKSS Bobbin-Tool flutuante [25]12
Figura 2.10 – Início de um cordão SFL com Bobbin-Tool [26]13
Figura 2.11 – Modelo de equipamento Portátil SFL com Bobbin-Tool [21]
Figura 2.12 - Bobbin-Tool: a) Fixa; b) Flutuante [22]14
Figura 2.13 – Macros SFL com Bobbin-Tool [22]15
Figura 2.14 – Quatro exemplos de possíveis localizações de descontinuidade por alinhamento
de óxidos residuais (marcadas por linha a branco) resultantes de falta de correcto/completo
processamento das interfaces originais dos componentes a soldar. Nota: As setas indicam as
direcções de transmissão de ultra-sons em END por phased array [30]15
Figura 2.15 – Aplicações SFL com Bobbin-Tool [22]16
Figura 3.1 – Esquema 3D da ferramenta Bobbin-Tool desenvolvida no IST
Figura 3.2 – Pinos da ferramenta Bobbin-Tool para SFL: a) 7mm cilíndrico, b) 7mm bi-cónico,18
Figura 3.3 – Rotura pino de 5mm19
Figura 3.4 – a) Shoulder com 0º de convexidade, b) Shoulder com 2º de convexidade 19
Figura 3.5 – Procedimento de montagem da ferramenta Bobbin-Tool20

Figura 3.6 – Sistema de fixação SFL convencional [2]	.21
Figura 3.7 – Sistema de fixação SFL com Bobbin-Tool. a) Perspectiva de projecto; b) Suporte	е
após construção	.22
Figura 4.1 – Equipamento de soldadura LEGIO <sup>™</sup> FSW 3U da ESAB, e graus de liberdade	.25
Figura 4.2 – Representação dos diversos constituintes	26
Figura 4.3 – Sequência de preparação das chapas	.27
Figura 5.1 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 1	. 31
Figura 5.2 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 2	. 31
Figura 5.3 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 3	. 31
Figura 5.4 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 4	. 32
Figura 5.5 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 5	. 32
Figura 5.6 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 6	. 32
Figura 5.7 – Configuração típica de uma macrografia de secção transversal de um cordão SF	۶L
com Bobbin-Tool sob as condições do ensaio 5: AA6061-T4, t=4.8mm, pino cónico com 7mm	ı
de diâmetro; gap entre shoulders de 4.8mm e v <sub>s</sub> =100mm/min	.34
Figura 5.8 – Macrografias e Micrografias do ensaio 1	. 34
Figura 5.9 – Macrografias e Micrografias do ensaio 2	35
Figura 5.10 – Macrografias e Micrografias do ensaio 3	35
Figura 5.11 – Macrografias e Micrografias do ensaio 4	. 36
Figura 5.12 – Macrografias e Micrografias do ensaio 5	.36
Figura 5.13 – Macrografias e Micrografias do ensaio 6	. 37
Figura 5.14 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 1	. 39
Figura 5.15 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 2	. 39
Figura 5.16 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 3	40
Figura 5.17 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 4	40
Figura 5.18 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 5	.41
Figura 5.19 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 6	. 41
Figura 5.20 – Extracção de provetes SFL com Bobbin-Tool	43
Figura 5.21 – Fresadora Triac e maquinação de Provetes	.44
Figura 5.22 – Equipamento usado para ensaios de tracção	. 44

Figura 5.23 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 1
Figura 5.24 – Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 2 46
Figura 5.25 – Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 3 46
Figura 5.26 – Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 4 46
Figura 5.27 – Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 5
Figura 5.28 – Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 6
Figura 5.29 – Comparativo das propriedades mecânicas em relação ao material base, obtidas
nos ensaios realizados
Figura 5.30 – Factor EGRET obtido para os ensaios realizados
Figura 5.31 - a) Ilustração do ensaio de flexão.; b) Amarras de flexão
Figura 5.32 – Representação e ilustração da flexão do material base
Figura 5.33 – Representação e ilustração da flexão do ensaio 1 54
Figura 5.34 – Representação e ilustração da flexão do ensaio 254
Figura 5.35 – Representação e ilustração da flexão do ensaio 3 55
Figura 5.36 – Representação e ilustração da flexão do ensaio 45
Figura 5.37 – Representação e ilustração da flexão do ensaio 55
Figura 5.38 – Representação e ilustração da flexão do ensaio 6
Figura 5.39 - Gráfico comparativo das diversas propriedades mecânicas em relação ao materia
base, obtidas nos ensaios realizados57
Figura 5.40 – Factor EGREF obtido para os ensaios realizados58
Figura 5.41 – Representação 3D das zonas de colocação dos Termopares
Figura 5.42 – a)Representação da montagem de todo o equipamento inerente aos Termopares
Figura 5.43 – Visualização Gráfica no LabView-Express [42]67
Figura 5.44 – Gráfico de Temperaturas62

# Lista de Tabelas

Tabela 4-1- Composição química da liga AA6061-T4 [32]23
Tabela 4-2 – Propriedades Mecânicas da liga AA6061-T4 [32]24
Tabela 4-3 – Propriedades Térmicas e eléctricas da liga AA6061-T4 [32]24
Tabela 4-4 – Parâmetros de Soldadura 28
Tabela 4-5 – Valores máximos obtidos durante as soldaduras
Tabela 5-1 – Compilação dos resultados obtidos nos ensaios estáticos de tracção uniaxial 48
Tabela 5-2 - Compilação das características das superfícies e classificação do tipo rotura
obtidos
Tabela 5-3 – Pesos atribuídos a cada uma das cinco grandezas físicas ponderadas no factor
EGRET
Tabela 5-4 – Compilação dos resultados obtidos nos ensaios de flexão
Tabela 5-5 - Coeficientes de ponderação das propriedades mecânicas do factor EGREF 56
Tabela B.1 – Composição e modo de aplicação do contrastantev

## Lista de Símbolos

ASTM - American Society for Testing and Materials EGRET - Eficiência Global da Resistência Mecânica das juntas soldadas sujeitas a esforços Estáticos de Tracção EGREF - Eficiência Global da Resistência Mecânica das juntas soldadas sujeitas a esforços Estáticos de Flexão ISO - International Organization for Standardization

MB - Designação do material base, que está a ser alvo da ligação por fricção linear. Corresponde a todo o material que não sofreu qualquer alteração, devido ao ciclo termomecânico característico do processo.

SFL - Soldadura por Fricção Linear

TWI - The Welding Institute

AAxxxx - Designação genérica do grupo de ligas de alumínio para trabalho mecânico, segundo classificação da Aluminium Association (AA). Este grupo de ligas de alumínio, é o mais utilizado em aplicações estruturais, pelo que foi de entre este grupo, que se seleccionaram a liga para análise, no presente trabalho

ZAC - Designação da zona afectada pelo calor do MB. A estrutura metalúrgica desta zona é afectada pelo ciclo térmico do processo, sem sofrer qualquer deformação plástica.

ZATM - Designação da zona afectada termomecanicamente do MB. Esta zona de transição entre o *nugget* e a ZAC, que não chega a recristalizar, apresenta alterações metalúrgicas e uma estrutura degrão com deformações plásticas muito acentuadas, principalmente próximo da interface com o *nugget*.

LA - Lado em avanço, identifica o material que se encontra do lado em que a velocidade linear de avanço e de rotação da ferramenta, têm o mesmo sentido. Este lado também adopta uma outra denominação, menos utilizada, de Lado em corte (tradução de *shear side*).

LR - Lado em retrocesso, identifica o material que se encontra do lado em que a velocidade linear de avanço e de rotação da ferramenta, têm sentidos opostos. Este lado também adopta uma outra denominação, menos utilizada, de Lado em fluxo (tradução de *flow side*).

xiv

- α Ângulo de ataque da ferramenta de SFL em relação às placas a soldar
- σ Tensão verdadeira
- ε Extensão verdadeira
- $\sigma0,2$  Tensão limite de proporcionalidade a 0,2 %
- σmáx Tensão máxima
- σmin Tensão mínima
- σrot Tensão de rotura
- A Área
- A0 Área inicial
- E Módulo de Young
- e Extensão nominal
- F Força

ØBody Shoulder - Diâmetro da base superior da ferramenta de SFL com Bobbin-Tool

ØFlyer Shoulder - Diâmetro da base inferior da ferramenta de SFL com Bobbin-Tool

Øpino Diâmetro do pino da ferramenta de SFL

- S Tensão nominal
- Ten Tenacidade
- V Velocidade de avanço linear da ferramenta de SFL
- $\Omega$  Velocidade de rotação da ferramenta

## 1. Introdução

#### 1.1 **Objectivos**

Os principais objectivos a atingir com este trabalho foram:

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre o conceito de SFL com Bobbin-Tool e sobre resultados de outros autores com trabalhos semelhantes, de modo a permitir comparar resultados, e enquadrar tecnologicamente o principal assunto nesta tese;
- 2. Desenvolver o conceito e construir uma ferramenta Bobbin-Tool para SFL;
- 3. Elaborar um manual de utilização da nova ferramenta Bobbin-Tool para SFL
- Estabelecer uma relação entre os parâmetros do processo e a qualidade das soldaduras obtidas, nomeadamente no que diz respeito ao aparecimento de defeitos, sua morfologia e localização;
- Avaliar a influência dos diferentes tipos de parâmetros no comportamento da resistência mecânica das soldaduras, sob esforços estáticos de tracção uniaxial e flexão em três pontos;
- 6. Caracterizar por técnica de inspecção visual os cordões realizados;
- Caracterizar os aspectos metalúrgicos com base em macrografias e micrografias de secções transversais ao cordão de soldadura;
- Medir o perfil de durezas, em secções transversais ao cordão de soldadura incluindo: material base, zona afectada pelo calor e zona termomecanicamente afectada (a qual inclui o *nugget*).

#### 1.2 Introdução

O processo de Soldadura por Fricção Linear (SFL) com ferramenta Bobbin-Tool, é uma variante do processo SFL com ferramenta convencional. Trata-se de um processamento tecnológico no estado sólido, ou seja, que decorre abaixo da temperatura de fusão dos materiais a ligar. Neste processo, uma ferramenta não consumível, animada de rotação e constituída por dois *shoulders* e um pino de geometrias que podem atingir alguma complexidade, é introduzida nas chapas até se atingirem as condições térmicas adequadas para se compor o movimento de rotação com o movimento linear de avanço, durante o qual a ferramenta irá percorrer a linha de junta definida por essas mesmas chapas. Desta forma, a ligação entre os materiais a soldar é obtida a partir de uma combinação de extrusão e forjamento em matriz fechada, promovendo a mistura entre os materiais a ligar (desejavelmente aleatória, ou caótica) [1], sob calor gerado principalmente a partir da deformação visco-plástica da zona processada dos materiais soldados, mas também do atrito interfacial nas zonas de escorregamento entre a ferramenta e a superfície dos materiais [2]. A relevância tecnológica deste processo no âmbito das tecnologias de fabrico, quer para a

comunidade científica, quer para a indústria, pode ser atestada pelas importantes aplicações da SFL com Bobbin-Tool e pela intensa actividade de investigação que resultou em diversas publicações e novas patentes.

O presente trabalho enquadra-se na tradição de acompanhar os desenvolvimentos mais relevante associados à SFL. Assim, também nesta área das ferramentas avançadas para SFL, o Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, acompanhou o desenvolvimento deste novo conceito, realizando o primeiro trabalho em Portugal de análise experimental de SFL com Bobbin-Tool.

Outras variantes do processo de SFL têm vindo a ser analisadas no IST, nomeadamente: Processamento por Fricção Linear, que permite promover um refinamento do tamanho do grão na zona processada, superficial e/ou internamente, eliminando defeitos e melhorando a ductilidade e resistência dos materiais processados, bem como a sua resistência à corrosão e a esforços de fadiga, chegando nalguns casos permitir obter comportamentos de superplasticidade [3]; Revestimento superficial por fricção linear, que se trata de uma solução de revestimento superficial aplicável entre materiais de natureza física dissimilar; Abertura de canais por Fricção Linear foi outro desenvolvimento recente no IST, no qual se pretende a abertura de canais em chapas de alumínio através duma ferramenta de SFL com características específicas.

Em muitos trabalhos realizados anteriormente, foi utilizado um equipamento exclusivamente destinado à SFL, LEGIO<sup>TM</sup> FSW 3U da ESAB. Este equipamento tem uma boa robustez e elevada precisão e permite, opcionalmente, o controlo de posição ou de carga aplicada pela ferramenta nos materiais a soldar. No caso da SFL com Bobbin-Tool só é possível o controle do processo através do controlo de posição da ferramenta relativamente aos materiais a soldar. Para utilização desta nova ferramenta houve a necessidade de criar novas condições de operação, sendo uma parte deste trabalho centrada em redor do desenvolvimento dessas mesmas condições, nomeadamente: Uma nova mesa de fixação, capaz de suportar as cargas inerentes ao processo de SFL sem sofrer deflexões que prejudiquem as soldaduras realizadas.

No presente trabalho realiza-se o desenvolvimento e aplicação do processo de SFL com Bobbin-Tool na ligação da liga de alumínio AA6061-T4, muito utilizada em acessórios e componentes na indústria aeronáutica e naval.

A imensa aplicabilidade deste novo conceito torna indispensável a realização de investigação nas áreas da resistência mecânica, a esforços estáticos e dinâmicos. Outra vertente extremamente importante e pouco referenciada por outros autores, é a influência dos defeitos deste tipo de processo, nas propriedades mecânicas de juntas soldadas. Num ambiente industrial, em que o parâmetro produtividade é fundamental, é de vital importância saber se determinado defeito, quer pelo seu tipo, quer pela sua dimensão, vai prejudicar ou não, o comportamento esperado da junta soldada. Em particular, um dos defeitos mais comuns da SFL convencional, é o defeito na raiz do cordão, resultante de falta de penetração do pino ou por incompleto processamento das camadas superficiais originais dos materiais a soldar.

2

De entre todo o trabalho realizado nesta tese, destacam-se os ensaios de medição das temperaturas desenvolvidas durante a realização dos cordões de SFL com Bobbin-Tool. Estas medições vêm permitir sustentar os resultados metalúrgicos e de comportamento mecânico obtidos.

#### 1.3 Guia de leitura

No que diz respeito aos conteúdos abordados nos capítulos seguintes deste relatório de tese, apresenta-se:

No capítulo 2 a descrição da pesquisa bibliográfica que se encontra dividida em três partes: (1) Introdução, (2) Descrição de resultados obtidos por vários autores em SFL, (3) Ferramentas para SFL, onde será referida a evolução destas até à Bobbin-Tool, (4) Aplicações da SFL com Bobbin-Tool, onde serão exemplificadas aplicações industriais e resultados científicos que outros autores tenham publicado, (5) Conclusões sobre a pesquisa.

No capítulo 3, o Desenvolvimento dos Meios Laboratoriais para SFL com Bobbin-Tool: (1) Introdução, (2) Desenvolvimento do conceito da ferramenta Bobbin-Tool, (3) Projecto e fabrico da ferramenta Bobbin-Tool, (4) Montagem da ferramenta Bobbin-Tool, (5) Desenvolvimento, fabrico e montagem do sistema de fixação para SFL com Bobbin-Tool, (6) Conclusões.

No capítulo 4, a análise experimental de SFL com Bobbin-Tool onde teremos: (1) Introdução, (2) Características do material base ensaiado, (3) Uma breve descrição do equipamento utilizado LEGIO<sup>™</sup> FSW 3U, (4) Neste ponto serão assinalados pormenores a ter em conta na preparação das Chapas para posteriormente se proceder à soldadura, (5) Os parâmetros utilizados nos seis ensaios, (6) Esta parte do trabalho consiste na descrição da realização dos ensaios SFL com Bobbin-Tool, (7) Por fim, serão apresentadas conclusões referentes a este capítulo.

No capítulo 5, expõem-se os resultados obtidos: (1) Introdução, (2) caracterização visual das superfícies, (3) A análise metalúrgica dos cordões, (4) Ensaios de dureza, (5) e (6) Nestes dois pontos serão analisadas as eficiências mecânicas globais dos cordões tanto à tracção como à flexão, (7) Medição de temperaturas durante a realização do cordão para validar e comprovar o aumento de temperatura relativamente à SFL convencional, (8) A análise global dos resultados obtidos no trabalho.

Nos últimos capítulos (6) e (7) estabelecidas as conclusões mais relevantes coligidas ao longo do trabalho, de acordo com a discussão no decorrer dos vários capítulos e um grupo de propostas para trabalho futuro com vista a continuar a desenvolver a SFL com Bobbin-Tool.

## 2. Estado da Arte

#### 2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o resultado da pesquisa bibliográfica, que servirá de apoio e enquadramento, ao trabalho descrito neste relatório. Foram escolhidas matérias básicas, e outras julgadas fundamentais, na abordagem de um processo tecnologicamente recente como é a SFL com Bobbin-Tool.

O capítulo inicia-se com uma breve descrição dos fundamentos da SFL, como elemento essencial em todo o processo de SFL.

Estabelecem-se os fundamentos do processo, incluindo as ferramentas e geometrias em SFL incluindo todos os tipos até à Bobbin-Tool e as conclusões de outros autores acerca do comportamento mecânico das juntas soldadas por fricção linear Bobbin-Tool.

Assim, e imediatamente antes dos comentários finais ao capítulo, apresentam-se as principais vantagens, desvantagens e uma descrição sumária das principais aplicações industriais do processo.

#### 2.2 Fundamentos da SFL

O processo de Soldadura por Fricção Linear, inventado e patenteado em Dezembro de 1991, pelo TWI – The Welding Institute [1], representa, provavelmente, o mais importante desenvolvimento na última década do século XX, no âmbito da tecnologia de ligação metálica por soldadura. A sua aplicação industrial tem tido um crescimento significativo nos primeiros anos do século XXI. Este sucesso deve-se ao potencial de integrar novos materiais, em produtos novos ou de conceito renovado, associando os elevados níveis de qualidade, característicos dos processos de ligação no estado sólido, à garantia de repetibilidade dos resultados, independentemente das condições ambientais que se verifiquem durante a realização do processo.

Na SFL, a ligação metálica realiza-se a temperaturas inferiores à temperatura de fusão dos materiais envolvidos, o que em comparação com os processos de soldadura por fusão, resulta em menores extensões da zona afectada pelo calor, distorções e tensões residuais, como consequência directa da menor entrega térmica envolvida.

A SFL é formada pela introdução, na junta definida pelas peças a ligar, de uma ferramenta cilíndrica, não consumível, e animada de movimento de rotação, conforme se representa na Figura 2.1. O corpo da ferramenta define uma base da qual se destaca um pino com um comprimento ligeiramente inferior à penetração desejada.



Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de SFL

Após o pino ter penetrado em toda a sua extensão na junta e o *shoulder* ter entrado em contacto com a sua superfície, e se estabelecerem as condições termo-mecânicas adequadas, inicia-se o movimento linear da ferramenta, que mantém a sua velocidade de rotação.

A junta é formada pelas peças, que se devem encontrar firmemente constrangidas, tipicamente num arranjo topo-a-topo de bordos direitos, se bem que uma diversidade de outras configurações seja perfeitamente viável [2], conforme se representa na Figura 2.2, sem necessidade de tratamentos superficiais prévios ou posteriores à realização do cordão.



Figura 2.2 - Tipos de junta de soldadura possíveis de utilizar no processo de SFL [2]

O movimento da ferramenta ao longo da junta, gera calor, resultante do fluxo plástico dos materiais imposto pelo pino em rotação no seu interior (dissipação viscosa devido ao atrito interno), e devido ao atrito superficial desenvolvido entre os materiais a soldar e o *shoulder* e o pino da ferramenta de SFL [4]. O transporte do material por fluxo plástico é imposto pelo *shoulder*, e através de um perfil especial do pino, que forja e extrude o material em seu redor, direccionando-o para a parte de trás, evitando a formação de poros e resultando no cordão de soldadura. Este processo, de carácter essencialmente estacionário, decorre sob uma força vertical de forjamento aplicada pelo *shoulder* da ferramenta. Esta força vertical de forjamento deverá manter-se constante durante todo o processo.

A eficiência do processo de SFL é elevada, tal como sucede de uma forma geral com todos os processos de soldadura no estado sólido, pois a transformação da energia aplicada mecanicamente pela ferramenta, em calor, ocorre no interior dos materiais a soldar, numa vizinhança pequena do pino, exactamente na zona onde ela é utilizada para reduzir a resistência mecânica do material e assim permitir o fluxo plástico localizado em redor do pino. A parte de material em fluxo plástico é condicionada pelo *shoulder* da ferramenta, pela base de suporte das peças a soldar, e pelo restante material das peças a ligar que se encontra em domínio elástico (material mais frio).

O eixo de rotação da ferramenta define com as peças a soldar um ângulo de ataque que serve para receber o material que vai ser processado sob o *shoulder* da ferramenta, e aumentar gradualmente o efeito de forjagem imposto pelo *shoulder* durante a passagem da ferramenta, evitando assim que o material em fluxo plástico, se escape e garantindo um fecho do cordão na parte de trás do pino. Este ângulo de ataque pode-se tornar dispensável com a adopção de determinadas geometrias especiais para o *shoulder* da ferramenta, conforme será descrito mais adiante, durante a caracterização da geometria da ferramenta.

A SFL foi inicialmente desenvolvida para a soldadura de ligas de alumínio, tendo-se conseguido resultados notáveis, em aplicações com espessuras entre 1.6 e 50mm, numa só passagem, obtendo-se elevada produtividade e evitando-se os problemas típicos na soldadura por fusão destes materiais, como são por exemplo, a formação de porosidade e fissuração. Existem hoje referências a aplicações para espessuras entre 0.8mm até 75mm, [2].

Em relação às juntas coladas, tem-se a importante vantagem de permitir a reciclagem de toda a estrutura, pois a SFL é um processo totalmente autogéneo (i.e., sem material de adição), e ainda a redução de peso e complexidade resultante da não necessidade de utilizar juntas sobrepostas e com reforços, características da ligação com adesivos.

A SFL, estende-se numa fase mais recente para a soldadura de outros materiais, igualmente complexos de soldar pelas restantes técnicas de soldadura, como por exemplo, as ligas de titânio (Ti), cobre (Cu) [5], magnésio (Mg), compósitos de matriz metálica (MMC's) [6], e plásticos [7]. A aplicação desta técnica de ligação, a materiais ferrosos [8], tem sido igualmente alvo de investigação, no entanto, ainda apresenta, entre outras, a desvantagem económica da rápida degradação da geometria inicial do pino.

De facto, são os materiais com um ponto de fusão relativamente baixo, como é o caso das ligas de Al (cerca dos 600°C) ou das ligas de Cu (cerca dos 1000°C), que são especialmente aptos para serem soldados pelo processo de SFL, principalmente devido à resistência ao desgaste que as ferramentas necessitam de ter, e que diminui com o aumento da temperatura. No caso da soldadura das ligas de alumínio, a temperatura máxima de operação situa-se em cerca dos 450°C [9] o que é suportável, quase sem desgaste, por exemplo, por um aço ferramenta de trabalho a quente.

A acção combinada de extrusão, forjagem, e mistura entre os materiais a ligar, resulta numa zona de ligação com uma microestrutura tipicamente mais fina do que a dos materiais de base, conferindo à SFL a capacidade de ligar materiais difíceis, ou mesmo impossíveis, de soldar pelas restantes técnicas de ligação, com um elevado nível de fiabilidade e uma boa resistência mecânica final [10].

No que respeita à ferramenta utilizada no processo de SFL, esta tem um papel determinante nas características do processo. A ferramenta é composta por uma zona de aperto, um corpo e finalmente pelo *shoulder* e pino responsáveis pelo processamento tecnológico da SFL. A Figura 2.3, representa uma ferramenta genérica de SFL.

É através da zona de aperto que se recebem e transmitem, os seguintes esforços:

• Binário de rotação;

• Força vertical de forjagem (direcção perpendicular ao plano de soldadura);

• Força de avanço linear (direcção de soldadura);

 Força transversal (direcção normal em relação à direcção de soldadura, no plano de soldadura).

Assim, com o objectivo de maximizar a resistência e minimizar a força de aperto necessária, a zona de aperto deverá ter o maior diâmetro possível, admitido pela bucha de fixação da máquina de SFL.



Figura 2.3 - Ferramenta de SFL [2]

O corpo da ferramenta serve para transmitir as cargas até à zona do *shoulder* e pino, onde se realiza o processamento tecnológico da soldadura, e para dissipar a partição de potência calorífica, que é gerada durante a soldadura, e transmitida para o interior da ferramenta.

Seguidamente está representada a caracterização metalográfica de uma secção transversal típica da SFL convencional em ligas de alumínio.



Figura 2.4 - caracterização metalográfica de uma secção transversal típica da SFL convencional

#### 2.3 Ferramentas para SFL

#### 2.3.1 Geometria das Ferramentas

A geometria da ferramenta é um dos parâmetros mais importantes da SFL, sendo que a sua geometria influência directamente o fluxo de material e assegura a necessária pressão no interior do cordão. Tendo em vista o melhoramento dos cordões por SFL, do estudo e investigação sobre a ferramenta tem surgido ao longo dos tempos uma grande variedade de *shoulder*s e pino, os principais constituintes da ferramenta de SFL [2]. Comecemos por falar do *shoulder* da ferramenta cuja função é conter o fluxo de material que é extrudido e forjado pelo pino, impedindo que este suba e se liberte. Este material encontra esta barreira física e sofre um refluxo. Esta zona pode adquirir diversas configurações, como se observa na Figura 2.5 [4] [11].

- Plana ou Côncava Os shoulders côncavos têm a vantagem de dirigir melhor o material que escoa no shoulder da ferramenta para o centro, na direcção do pino, diminuindo o material que escapa e assim a formação de rebarba;
- Lisa ou Estriada Os shoulders lisos precisam de um ângulo de ataque para gerarem as condições adequadas ao fluxo de material. Já os shoulders estriados não necessitam deste ângulo permitindo soldar perpendicularmente à chapa, pois o efeito das estrias é suficiente para dirigir o material para o interior do shoulder em direcção do pino, reduzindo a formação de rebarba e providenciando um correcto nível de forjamento do material;
- Estrias em Espiral ou Concêntricas As estrias em espiral, em relação às concêntricas, têm um melhor efeito de escoamento do material para o centro do shoulder;



Figura 2.5 – Diferentes tipos de *shoulder*s de ferramentas de SFL. Legenda: a) *Shoulder* com estrias em espiral; b) *Shoulder* com estrias concêntricas; c) *Shoulder* plano d) *Shoulder* côncavo

Em relação à geometria do pino esta tem uma influência grande na mistura do material, pois regula o fluxo em torno do pino. No plano longitudinal o fluxo de material é aumentado pela geometria do pino e ajuda a acentuar a diferença entre o volume dinâmico (volume varrido pelo pino numa rotação de 360º) e o estático(volume do pino quando está parado) à medida que este avança na soldadura.

Quanto maior é esta diferença, mais material pode ser transportado. É portanto importante desenhar pinos com um quociente elevado entre estes volumes [6], [12]. Podemos ter assim vários tipos de pinos, que podem ser vistos na Figura 2.6 [13].



Figura 2.6 - Diferentes pinos para a ferramenta de SFL. Legenda: a)Cónico estriado roscado; b)Trifacetado roscado; c) Cilíndrico roscado; d) Cónico liso; e)Cónico roscado f) Cónico estriado invertido [14]

- Cilíndrico ou Cónico Quando o pino é cónico aumenta o efeito de forjamento vertical uniformizando o nível de pressão de compressão ao longo da espessura dos componentes a soldar e a resistência da junta e diminuindo a susceptibilidade de existência de lacunas de material, resultantes de pontos de baixa pressão, na zona do *nugget*;
- Liso ou Roscado A rosca permite aumentar o transporte de material na vertical, aumentando a capacidade de uniformizar a pressão ao longo da espessura dos componentes as soldar e promovendo uma maior mistura dos materiais;
- Rosca de Passo Constante ou Decrescente A utilização de rosca de passo decrescente, no sentido do *shoulder* para a extremidade do pino, permite aumentar ainda mais o efeito de forjamento do material nas zonas mais distantes do *shoulder* da ferramenta;
- Axissimétrico ou Facetado O facetamento permite reduzir a força linear de avanço da ferramenta, pois diminui a relação entre o volume estático e dinâmico. Introduz também

uma característica não estacionária no fluxo de material, implicando assim um fenómeno de mistura adicional do material, que resulta numa maior dispersão de óxidos superficiais;

- Facetamento com faces Direitas ou Abertura de Canais em Espiral A abertura de canais em espiral tem a mesma função do facetamento a direito, mas permite induzir um efeito adicional de forjamento vertical, do material contra a placa de suporte;
- Extremidade Plana ou Convexa O material que passa por baixo do pino sofre um forjamento com o objectivo de garantir o fecho da junta. Este forjamento é normalmente mais eficaz no caso convexo, mas obtêm-se também bons resultados com extremidades planas, que são mais baratas (fáceis de construir) e permitem uma maior tolerância no desalinhamento entre a ferramenta e a linha de soldadura.

Existem alguns estudos realizados acerca do efeito da geometria da ferramenta nas propriedades da soldadura. A. Scialpi et al. [15], estudaram o efeito de 3 diferentes *Shoulders* todos boleados na aresta (com estrias, côncava, e lisa), numa liga AA6082-T6 soldada por SFL. Não se verificaram grandes diferenças nas propriedades mecânicas das SFL realizadas por cada uma das ferramentas. Nos ensaios mecânicos obtiveram-se tensões de cedência de 193,181,194 e 283MPa, e tensões máximas de 281,270,256 e 324MPa, para a ferramenta TE, Tc, TL e MB. Já no alongamento os resultados são mais distanciados obtendo-se 17.5, 20.1,7.9 e 12.2% de alongamento à fractura.

K. Elangovan et al. [16], tentaram perceber a influência do pino na SFL de uma liga AA2219. Usaram pinos cilíndrico, cilíndrico roscado, cónico liso, quadrado e triangular. Chegaram-se à conclusão que as juntas que usavam o pino quadrado eram as que exibiam as melhores propriedades, comparativamente com as feitas com os outros pinos. Esta ferramenta a par com a triangular tem uma relação Volume dinâmico/Volume estático, elevada e transportam assim mais material. Temos ainda o facto de este tipo de ferramentas introduzirem um efeito de mistura pulsado devido as faces planas que possuem, efeito este que não existe no caso das ferramentas cilíndricas ou cónicas. Pinos com uma elevada relação de volumes dinâmico e estático e com uma mistura caótica pulsada, exibem melhores características.

#### 2.3.2 - Ferramentas SFL com Bobbin-Tool

A SFL com Bobbin-Tool é uma variante da SFL com ferramentas convencionais. A SFL com Bobbin-Tool permite transformar a SFL num processo de aplicação com menos requisitos de fixação, logo mais flexível em termos de aplicação. Desta forma podem-se obter simplificações e reduções de custo relevantes, nomeadamente porque o equipamento e sistema de fixação necessários para obter a soldadura não necessitarão da robustez utilizada para obtenção dum cordão para SFL convencional [17].

A ferramenta Bobbin-Tool poderá ser implementada de duas formas: Bobbin-Tool de *gap* (distância entre *Shoulders*) fixo ou constante ; Bobbin-Tool de *gap* variável com pressão entre *shoulder*s constante.



Figura 2.7 - Bobbin-Tool Fixa e Flutuante [22]

A primeira patente de Bobbin-Tool foi apresentado pela TWI, mas teve problemas após ensaios na zona do *nugget*, devido à inadequada geometria das *shoulders*.

Vários tipos de geometria das ferramentas Bobbin-Tool foram projectadas de forma a inovar este novo conceito.



Figura 2.8 - Geometrias SFL com Bobbin-Tool a) [18], b) [19], c) [20], d) [21], e) [21]

O Princípio de funcionamento duma Bobbin-Tool consiste em dois *shoulders* interligados por um pino, que atravessa toda a espessura dos componentes a soldar. Os *shoulder*s estão em contacto com ambas as superfícies dos materiais, exercendo uma força de compressão vertical necessária para fechar o volume em deformação visco-plástica e aplicar as necessárias condições de forjamento dos componentes. Nas condições de actuação deste tipo de ferramenta existe menos calor dissipado, nomeadamente por condução para a base de

suporte das peças em SFL com ferramenta convencional. Assim, as forças de compressão tipicamente aplicadas entre os *shoulders*, são 4 a 8 vezes menores do que as aplicadas em SFL convencional.

### 2.4 Aplicações da SFL com Bobbin-Tool

A nova geração de ferramentas Bobbin-Tool, eliminaram a necessidade de inclinação da ferramenta, contudo foi verificado que com intervalo fixo entre *shoulders*, existem problemas de fractura do pino, devido à expansão térmica dos materiais base dos componentes a soldar e no pino, levando a uma maior sensibilidade aos diversos entalhes existentes na sua superfície [23].

A Bobbin-Tool flutuante permite reduzir o problema da expansão térmica devido ao movimento relativo entre os *shoulder*s, que permite manter uma força axial constante entre eles [24].



Figura 2.9 - GKSS Bobbin-Tool flutuante [25]

Habitualmente para se iniciar a soldadura é necessário furar as chapas na zona da junta. Neste furo, insere-se a ferramenta sem o *shoulder* inferior. O pino tem um diâmetro inferior ao furo, permitindo a sua inserção e protegendo o pino de qualquer dano. Após esta operação o *shoulder* inferior é ligado ao pino aplicando uma carga adequada contra as chapas. Na fase inicial da soldadura, e ainda antes do arranque do avanço linear, existe necessidade de forjar o material junto do pino, garantindo a total contiguidade entre os materiais base e a ferramenta em rotação. Só após atingir estas condições é possível iniciar o avanço da ferramenta.



Figura 2.10 - Início de um cordão SFL com Bobbin-Tool [26]

Existe igualmente a possibilidade de abrir um rasgo nas chapas para que a ferramenta devidamente montada e com o intervalo entre *shoulders* definido, penetre as chapas previamente montadas. Este método diminui o tempo de preparação e desperdício de Material.

A SFL com Bobbin-Tool tende a desenvolver a SFL de forma a termos melhores condições de operação, no sentido em que existe uma redução dos custos a nível de equipamentos, uma maior produtividade dado que o tempo a acertar chapas é reduzido [21] e com a garantia de menores divergências nos cordões, porque com a Bobbin-Tool há maiores probabilidades de termos repetitivamente soldaduras idênticas [22].

Em comparação com a SFL convencional existe um acréscimo de temperatura devido à incapacidade da SFL com Bobbin-Tool dissipar o calor por condução devido à ausência de uma base facto esse que justifica o amaciamento das juntas [25].

O gradiente de temperatura nas Bobbin-Tool aumenta na ordem dos 50° C [27] devido à dificuldade que os *shoulders* têm em dissipar calor, factor esse que permitirá aumentar a velocidade de avanço, e consequentemente, aumentará a produtividade.

Experiências feitas em chapas de 1.8 a 25mm [28] de espessura em ligas de alumínio demonstraram que este método tem a capacidade de eliminar os defeitos de raiz nomeadamente o defeito habitual em SFL convencional, devido à penetração incompleta do pino, elimina a necessidade da base de apoio inferior, pois a força de forjamento é exercida entre os *shoulders* e não contra a base, resultando desta forma em menores distorções relativamente á SFL convencional devido ao maior equilíbrio térmico.

Uma outra vantagem é não exigir um equipamento com controlo de carga, pois o desenvolvimento da soldadura apenas exige controlo de posição por parte do equipamento de soldadura. A ferramenta é que pode internamente ter, ou não, controlo de carga entre os *shoulder*s. Sendo assim, este novo método resulta na diminuição das forças do eixo dos z eliminando assim a necessidade de equipamentos muito complexos e altamente robustos para a obtenção dum cordão [21].



Figura 2.11 – Modelo de equipamento Portátil SFL com Bobbin-Tool [21]

As vantagens da SFL com Bobbin-Tool são a facilidade de preparação do processo, a Bobbin-Tool flutuante (ver Figura 2.12) em particular, tem a vantagem adicional de ajustar automaticamente a sua posição em relação às chapas, eliminando assim a necessidade de estabelecer procedimentos muito precisos e complexos de controlo de posição ou força.



Figura 2.12 - Bobbin-Tool: a) Fixa; b) Flutuante [22]

Várias considerações têm que ser avaliadas, pois a limpeza da ferramenta (devido à colmatação de material nas estrias e espiras da Bobbin-Tool), é essencial após a soldadura, para que haja um melhor controlo da carga no aperto do *shoulder* inferior às chapas a soldar.

Um problema a ter em consideração durante a soldadura é o escoamento do material no *shoulder* inferior, pois poderá causar irregularidades no cordão, porque é a zona onde serão atingidas maiores temperaturas, devido à falta de refrigeração, na Bobbin-Tool fixa [29] foi recomendado após ensaios, concavidade no *shoulder* inferior para facilitar o fluxo viscoplástico. Abaixo está representado alguns resultados de cordões SFL com Bobbin-Tool.





Robotic bobbin weld in 2.5mm thick 6082T6

Bobbin weld in 25mm thick 6082T6







A necessidade de construção de estruturas leves e compactas, e com maior relação resistência/peso, consoante as preocupações com a escassez de recursos energéticos e ambientais, tem levado a que a indústria metalomecânica, procure cada vez mais, substituir as aplicações em ligas ferrosas, por ligas de alumínio, titânio, cobre e magnésio.

De entre as actuais aplicações industriais, deve ser dado um especial destaque, à indústria de construção naval, que atravessa uma fase de crescimento com o desenvolvimento de navios rápidos capazes de competir com o transporte aéreo e terrestre.

A indústria aeroespacial, é outra área de aplicação, por excelência, da SFL com Bobbin-Tool, sendo mesmo um dos principais incentivadores da investigação e desenvolvimento do processo, nos EUA, através da NASA no qual tem vindo a introduzir a SFL com Bobbin-Tool nos seus processos de construção estrutural [30].

A indústria automóvel é outro campo de forte expansão na actualidade, devido a variedade e multiplicidade deste processo [22]. É previsível que nos próximos anos, apoiado no desenvolvimento técnico a que o processo vai estar sujeito, se atingirá uma maior implantação industrial, incluindo aplicações que actualmente ainda não se encontram identificadas.

Pode-se afirmar que a SFL com Bobbin-Tool oferece à relação fornecedor /cliente, uma garantia de qualidade e à indústria, uma eficiência energética fundamental para a manutenção de níveis de competitividade elevados.



Figura 2.15 - Aplicações SFL com Bobbin-Tool [22]

#### 2.5 Conclusões

O processo de SFL com Bobbin-Tool, que ainda dá os seus primeiros passos em termos de aplicações industriais, é alvo de um árduo desenvolvimento por todo o mundo industrializado, constatando-se pela quantidade de publicações e patentes, disponíveis De facto, é possível encontrar variadas referências ao processo de SFL com Bobbin-Tool, sob variados aspectos, quer em termos de desenvolvimento tecnológico quer de aplicações, passando pelos estudos de impacto económico e ambiental.

Tendo em conta o crescente potencial de aplicação industrial das ligas de alumínio, e a facilidade com que se conseguem obter cordões de SFL com Bobbin-Tool com elevados níveis de qualidade, faz da SFL com Bobbin-Tool um processo a ter como referência.

Como se verá mais adiante, uma das contribuições deste trabalho, é o desenvolvimento de uma ferramenta e de um sistema de fixação para investigação, que permite o estabelecimento de correlações entre propriedades de juntas de soldadas, e os parâmetros que estiveram na sua origem. Este tipo de correlações ajudará o estado actual de desenvolvimento do processo.

## 3. Desenvolvimento dos Meios Laboratoriais para SFL com Bobbin-Tool

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se as diversas fases de desenvolvimento do conceito e produção dos meios laboratoriais para realizar pela primeira vez, no Instituto Superior Técnico, a SFL com Bobbin-Tool. Os meios laboratoriais desenvolvidos são o sistema de fixação e a ferramenta Bobbin-Tool.

O sistema de fixação consiste numa mesa que irá aplicar constrangimentos laterais nos componentes a soldar, libertando o acesso directo da ferramenta Bobbin-Tool a ambas as superfícies destes componentes. O conceito desenvolvido permitirá variar a distância entre as zonas de fixação, permitindo um comprimento máximo dos cordões de 200mm.

A ferramenta Bobbin-Tool é uma ferramenta modular, que permite a composição/combinação de diversas soluções geométricas para ambos os *shoulder*s e para o pino. A descrição apresentada neste capítulo, incluirá as instruções de utilização incluindo a montagem da ferramenta.

### 3.2 Desenvolvimento do Conceito da Ferramenta Bobbin-Tool

O desenvolvimento consistiu em projectar e construir uma nova ferramenta Bobbin-Tool no sentido de investigar as potencialidades deste novo método de SFL, a concepção da ferramenta foi baseada nalgumas características das ferramentas convencionais [31].

A simplicidade, fácil manuseamento, e robustez foram os três conceitos que estiveram sempre presentes no projecto da ferramenta.



Figura 3.1 - Esquema 3D da ferramenta Bobbin-Tool desenvolvida no IST

Legenda:

- 1. Porca de aperto
- 2. Parafuso de Fixação Flyer Shoulder
- 3. Flyer Shoulder
- 4. Parafuso de travão Body Shoulder
- 5. Body Shoulder
- 6. Parafuso de fixação do pino
- 7. Corpo da ferramenta
- 8. Pino

Foram seleccionados três tipos de pinos para o desenvolvimento da ferramenta, para testar a influência dos mesmos na qualidade da Soldadura.



Figura 3.2 – Pinos da ferramenta Bobbin-Tool para SFL: a) 7mm cilíndrico, b) 7mm bi-cónico, c) 5mm cilíndrico.

As geometrias dos pinos foram 7mm de diâmetro cilíndrico, 7mm cónico, isto é, 7mm na parte mais espessa e 5mm da parte central e 5mm cilíndrico, todos com rosca métrica de passo 1mm, com rosca esquerda no lado do Body *shoulder* e rosca direita no lado do Flyer *shoulder*, o pino de 5mm foi excluído dos ensaios devido à sua fragilidade e menor tempo de

vida dado que só era possível soldar uma junta com cada pino até ocorrer a sua rotura o que desta forma automaticamente excluiu a sua utilização.



Figura 3.3 – Rotura pino de 5mm

Foram seleccionados dois tipos de *shoulder*s para o desenvolvimento da ferramenta, com 0º e 2º de convexidade, apenas foi implementado os *shoulder*s com 2º de convexidade.



Figura 3.4 – a) Shoulder com 0º de convexidade, b) Shoulder com 2º de convexidade

## 3.3 **Projecto e Fabrico da Ferramenta Bobbin-Tool**

A Ferramenta foi projectada e desenhada em modelação 3D como se pode verificar no Anexo A.1, onde posteriormente se elaboraram os seus desenhos técnicos e entregues numa Metalomecânica, para proceder ao seu fabrico. O material seleccionado foi um aço H13, sendo uma liga para trabalho a quente, com uma durezal de 240HV após uma têmpera e revenido a aproximadamente 400°C sob vácuo, que é nomeadamente próxima da temperatura máxima que as ligas de alumínio atingem no momento da soldadura. A sua dureza aumenta até à ordem dos 540HV. De seguida as superfícies são limpas projectando pequenas esferas que vão retirar os óxidos superficiais, para ser alvo de um tratamento de endurecimento por nitruração iónica que aumentará a sua dureza até cerca de 1200HV. Por fim um tratamento de oxidação é aplicado às superfícies que consiste em termos a ferramenta num ambiente com

vapor de água a aproximadamente 500 °C, a finalidade deste tratamento para além de melhorar a resistência à corrosão, tem ainda em vista diminuir a adesão entre a ferramenta e as chapas a soldar.

#### 3.4 Montagem da Ferramenta

A ferramenta requer cuidados procedimentos de montagem, de forma a garantir todas as condições de segurança de operação, sem que ocorra nenhum dano tanto no equipamento, como na integridade física do operador. Seguidamente está representado a sequência de montagem da ferramenta.



Figura 3.5 – Procedimento de montagem da ferramenta Bobbin-Tool

Em primeiro lugar há que verificar se estão presentes todos os componentes, devidamente limpos, para dar início ao procedimento de montagem.

O segundo passo consiste em pegar no corpo da Ferramenta e colocar um O-ring na ranhura junto à entrada do canal de refrigeração da ferramenta, com aplicação de massa de grafite na ranhura, e na face lateral que está em contacto com a bucha da máquina, para garantir uma melhor estanquicidade do líquido de refrigeração e deslizamento da ferramenta na bucha (tanto em fase de montagem como de desmontagem). Seguidamente introduzimos o corpo da ferramenta na bucha com o rasgo de fixação voltado para o parafuso de constrangimento existente na bucha. Após previamente fixo com ligeiro aperto suficiente para garantir que não existe escorregamento procede-se à fixação final do corpo da ferramenta, operação essa, elaborada no batente apropriado para o efeito, aplicando uma carga na ordem dos 1000kg. O próximo passo é a montagem do Body *shoulder* e fixação com os parafusos de constrangimento existentes na face lateral. Posteriormente é colocado o pino enroscando até que o primeiro filete de rosca fique à face da superfície do Body *shoulder*. É colocado no corpo da ferramenta o parafuso de fixação e constrangimento de rotação do pino. O último passo é inserir o Flyer *shoulder* no pino com especial atenção, para que os rasgos de fixação do pino estejam devidamente alinhados com os parafusos de fixação do Flyer *shoulder*, para se proceder ao aperto após seleccionado o *"gap"* entre *shoulder*. Depois é colocada uma porca de constrangimento sob o Flyer *shoulder*, com o devido aperto, garante que durante a soldadura, o Flyer *shoulder* não desliza e altera o *gap* de operação.

## 3.5 Desenvolvimento, fabrico e montagem do sistema de fixação dos componentes a soldar por SFL com Bobbin-Tool

Para a realização de soldadura com a Ferramenta Bobbin-Tool teve que ser projectado e concebido um novo sistema de fixação, porque em SFL com ferramenta convencional as chapas são comprimidas contra uma mesa de suporte, onde têm que respeitar um rigor geométrico no acerto das chapas e têm que estar completamente constrangidas à mesa em toda a face inferior das chapas a soldar, nomeadamente para que não ocorram desvios que impossibilitem o forjamento da ferramenta contra as chapas a soldar [2].



Figura 3.6 – Sistema de fixação SFL convencional [2]

O novo sistema de fixação para a utilização da ferramenta Bobbin-Tool não tem que respeitar um rigor geométrico muito cuidado no acerto das chapas. A grande diferença entre este e o anterior sistema é que as chapas são fixas suspensas, com um intervalo definido, e não o mais próximo do *shoulder*. As chapas têm que estar suspensas para que o Flyer *shoulder* consiga percorrer a junta a soldar, sem embater em nenhuma face do sistema de fixação.


Figura 3.7 – Sistema de fixação SFL com Bobbin-Tool. a) Perspectiva de projecto; b) Suporte após construção

O sistema de fixação foi projectado de forma a ser utilizado no equipamento disponível no IST para o processo de SFL, LEGIO<sup>™</sup> FSW 3U e igualmente ser possível acoplá-lo numa fresadora convencional como podemos verificar no Anexo A.2. O sistema é constituído por uma base de espessura de 10mm, a qual é perfurada de forma a possibilitar a variação do intervalo entre os dois blocos que sustentarão as chapas. Esses blocos foram fresados no seu interior de forma a reduzir o seu peso para um mais fácil transporte. Nos vértices dos dois blocos do lado mais próximo da Bobbin-Tool, foram colocadas 2 réguas consumíveis que após algumas horas de utilização, serão susceptíveis de desgaste devido ao gradiente de temperatura atingido naquela área, e também por ser uma zona onde sofrerá mais flexões alternadas exercidas pelas chapas.

O sistema de fixação foi modelado e desenvolvido em 3D, e posteriormente foram elaborados os desenhos técnicos tendo em vista o seu fabrico.

O material utilizado neste sistema de fixação foi um aço CK45, as superfícies foram todas rectificadas, pois é necessária uma boa precisão do posicionamento dos componentes a soldar, ao longo do cordão. A soldadura é feita com controlo de posição o que obriga a cuidados com a geometria dos bordos das juntas a soldar de forma a evitar rebarbas e indentação nas chapas.

### 3.6 **Conclusões**

Este estudo foi muito importante e principalmente o mais extenso devido a variedade de particularidades envolvidas, desde o projecto, a selecção de materiais, o acompanhamento do fabrico. Por ser um método pioneiro no Instituto Superior Técnico, daí a especial atenção a todos os pormenores, desde o acabamento superficial dos filetes de rosca dos pinos, à espessura das estrias dos *Shoulders*, a quantidade de espirais das estrias, a direcção das roscas projectada segundo a direcção de rotação da ferramenta, de forma a exigir o maior rigor e precisão na obtenção da SFL com Bobbin-Tool.

# 4. Análise Experimental de SFL com Bobbin-Tool

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são descritas diversas caracteristicas envolvidas na realização dos ensaios de SFL com Bobbin-Tool. O material base ensaiado é apresentado, e o equipamento utilizado é descrito. Serão também abordados os procedimentos de soldadura, os parâmetros utilizados, para produção dos cordões de soldadura e a realização dos ensaios SFL com Bobbin-Tool.

### 4.2 Características do Material Base Ensaiado

Para a realização deste trabalho experimental foi seleccionada a liga AA6061-T4. Esta é uma liga muito utilizada em acessórios de aeronaves, acessórios de hardware, pistons hidráulicos, acoplamentos navais, devido a ser uma liga classificada com boa soldabilidade, boa resistência à corrosão e fácil maquinagem. Na Tabela 4.1 podemos observar a composição química nominal da liga, e na Tabela 4.2 é possível observar algumas propriedades da mesma.

AI	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
95.8 -	0.040 -	0.15 -	Máx	0.80 -	Máx	0.40 -	Máx	Máx
98.6 %	0.35 %	0.40 %	0.70 %	1.20 %	0.15 %	0.80 %	0.15 %	0.25 %

Tabela 4-1- Composição química da liga AA6061-T4 [32]

Propriedades Mecânicas						
Propriedade	6061-T4	Observações				
Dureza de Brinell	65	500Kg numa esfera com 10mm diâmetro				
Dureza de Vickers	75	Convertido do valor de Brinell				
Tensão de rotura [MPa]	240					
Tensão de cedência [MPa]	145					
Alongamento após fractura [%]	22					
Módulo de Young [GPa]	69					
Coeficiente de Poisson	0.33					
Resistência ao corte [MPa]	165					
Módulo de corte [MPa]	26					

Tabela 4-2 – Propriedades Mecânicas da liga AA6061-T4 [32]

	Propriedades Térmicas e Eléctricas						
	Capacidade calorífica [J/Kg.K]	Condutividade térmica [W/m.K]	Temperatura de fusão [ºC]	Temperatura solidus [ºC]	Temperatura liquidus [ºC]		
AA6061-T4	896	154	582	582	652		

Tabela 4-3 – Propriedades Térmicas e eléctricas da liga AA6061-T4 [32]

# 4.3 Descrição do Equipamento LEGIO<sup>™</sup> FSW 3U

Todos os ensaios de SFL com Bobbin-Tool foram realizados com o auxílio de um equipamento LEGIO<sup>™</sup> FSW 3UL da ESAB (Figura 4.1) [33] que consiste num equipamento laboratorial dedicado à SFL, funcionando sob controlo computacional numérico, com opção de realizar a soldadura com controlo de carga vertical de forjamento ou controlo de posição vertical. O controlo de carga vertical de forjamento e a capacidade de monitorização dos parâmetros são as principais diferenças de uma fresadora convencional.



Figura 4.1 – Equipamento de soldadura LEGIO<sup>™</sup> FSW 3U da ESAB, e graus de liberdade

A máquina possui quatro graus de liberdade: um de rotação da cabeça de soldadura (eixo C), e três lineares: (1) O eixo X (amplitude de 1000mm), garantido através de um sistema de pinhão/cremalheira; (2) O eixo Y (amplitude de 400mm) através de um parafuso sem-fim e (3) O eixo Z (amplitude de 340mm), por acção de um cilindro hidráulico com sensor de fim de curso [34].

Seguidamente encontram-se representados os diversos componentes do equipamento.



Figura 4.2 - Representação dos diversos constituintes

#### Legenda:

- 1. Cabeça de soldadura
- 2. Suporte da cabeça de soldadura
- 3. Estrutura de suporte geral
- 4. Motor para movimento em X
- 5. Motor para rotação em Z (eixo  $\theta$ )
- 6. Cilindro hidráulico de movimento em Z
- 7. Unidade hidráulica
- 8. Cabine de controlo9. Painel de controlo numérico
- 10. Sistema de arrefecimento
- 10. Sistema de arrelecimento

A estrutura que contém a cabeça de soldadura, pode ser rodada de 5º no plano XZ, facilitando dessa forma a introdução do ângulo de ataque. Em caso de necessidade de introduzir um ângulo de convergência, uma alternativa possível é a inclinação da mesa de soldadura (rotação em torno do eixo X), ou então soldar ao longo do eixo YY, utilizando o ângulo de ataque para esse efeito. Contudo, tal procedimento é de evitar, devido ao esforço aplicado sobre o sistema de transmissão parafuso/sem-fim, sob pena de danificar este sistema e perder a necessária precisão no movimento a ele associado. Informação mais detalhada acerca deste equipamento, bem como dos parâmetros que são possíveis de controlar, pode ser encontrada no manual de operação desenvolvido [34].

### 4.4 **Preparação das Chapas**

Este procedimento merece especial atenção, pois a partir dele se iniciará todo o processo de soldadura, daí ser necessário cuidado redobrado, para que a ferramenta não sofra qualquer dano no embate inicial. Seguidamente está representada a sequência de preparação das chapas.



Figura 4.3 – Sequência de preparação das chapas

O primeiro passo, após as chapas estarem devidamente cortadas, consiste em sobrepor as duas chapas e fixá-las no torno de bancada. Depois, com uma serra de fita, procede-se ao corte na face de embate da ferramenta com um ângulo de aproximadamente 60° com a horizontal.

O terceiro passo consiste em limar separadamente cada chapa com uma convergência adequada para que o choque entre a ferramenta e as chapas não seja muito brusco. Por fim a todas as superfícies de contacto das chapas com a ferramenta, são aplicadas ligeiras passagens de lixa para retirar os óxidos superficiais na zona do cordão e possíveis irregularidades que impossibilitem a aproximação das chapas.

### 4.5 Parâmetros utilizados nos ensaios

Este grupo de ensaios, foi efectuado com o objectivo da influência dos parâmetros de soldadura nas propriedades dos cordões obtidos. Assim, analisando os ensaios realizados, através do estabelecimento dos grupos de parâmetros que se mantiveram constantes e do grupo de parâmetros que variam, para avaliar a sua influência.

Os parâmetros que se mantiveram constantes, durante os ensaios, foram os seguintes: - Velocidade de rotação,  $\Omega$  = 800 rpm, com uma direcção de rotação horária para que os pinos roscados possam "*empurrar*" o material das chapas a soldar em direcção oposta à dos *shoulder*s.

- Ângulo de ataque, maquinado em termos de conicidade (convexa) dos *shoulder*s,  $\alpha$  tool = 2°.

- Todos os cordões foram realizados com controlo de posição.
- O comprimento dos cordões realizados foi de aproximadamente 150mm.

Seguidamente encontra-se uma tabela com os parâmetros variáveis utilizados nos 6 ensaios seleccionados.

Designação	Pino [7mm]	Gap [mm]	Velocidade Avanço [mm/min]
Ensaio 1	Cilíndrico	4.8	100
Ensaio 2	Cónico	4.8	160
Ensaio 3	Cónico	4.55	100
Ensaio 4	Cónico	5.05	100
Ensaio 5	Cónico	4.8	100
Ensaio 6	Cilíndrico	4.8	160

Tabela 4-4 – Parâmetros de Soldadura

O grupo de ensaios apresentado na Tabela 4.4, permite as seguintes análises comparativas:

- Análise da influência da *geometria do pino*, com base na comparação entre: ensaio 1 vrs ensaio 5; ensaio 2 vrs ensaio 6;
- b) Análise da influência da <u>velocidade de soldadura</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 vrs ensaio 6; ensaio 2 vrs ensaio 5;
- c) Análise da influência do <u>gap entre shoulders</u>, com base na comparação entre: ensaio 5 vrs ensaio 3; ensaio 5 vrs ensaio 4.

# 4.6 Realização dos Ensaios SFL com Bobbin-Tool

Os Ensaios SFL com Bobbin-Tool, foram realizados no laboratório da Secção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico. Após a inserção dos parâmetros pretendidos no PLC da máquina cada ensaio foi previamente cuidado e monitorizado através do software "*ESCADA*" onde é calculada a potência envolvida segundo os eixos, o binário e a posição da ferramenta durante todo o ensaio.

O equipamento teve que ser programado por razões de segurança, tanto da máquina como do operador, em relação às situações habituais em relação à SFL convencional. Por exemplo, numa paragem de emergência a máquina não pode sair da última posição, pois perante essa situação irá partir o pino e poderá por em causa a segurança de toda a operação.

Todos os ensaios foram realizados única e exclusivamente com controlo de posição.

Seguidamente serão apresentados os valores máximos de potência em xx, potência em yy e binário, obtidos durante as soldaduras.

	Potência eixo xx (KW)	Potência eixo yy (KW)	Binário (N/m)
Ensaio 1	24.71	10.20	37.52
Ensaio 2	31.91	9.30	35.07
Ensaio 3	30.30	9.69	38.43
Ensaio 4	36.30	8.49	26.95
Ensaio 5	29.56	9.12	32.48
Ensaio 6	37.10	11.19	37.45

Tabela 4-5 – Valores máximos obtidos durante as soldaduras

### 4.7 Conclusões

A análise realizada neste capítulo permitiu tirar algumas conclusões alusivas à realização dos ensaios. Uma delas foi a temperatura, que sem arrefecimento do Flyer *shoulder*, a soldadura processa-se com uma temperatura excessiva para a integridade da ferramenta.

Constatou-se que durante as soldaduras com o pino cónico todo o ensaio se realiza duma forma mais estável, quer na fase de entrada nas chapas, como durante a soldadura. DE facto em comparação com as soldaduras com pino cilíndrico, era notória uma menor vibração de todo o equipamento.

Após os segundos cordões, com o mesmo pino, verificou-se uma acumulação de material que cobre os filetes de rosca e as espirais dos *shoulders*, daí que é recomendado a limpeza da Bobbin-Tool entre multi-passagens, essa limpeza poderá ser feita, por exemplo, demolhando algumas horas, toda a ferramenta numa solução com soda cáustica.

# 5. Ensaios de Caracterização dos Cordões

### 5.1 Introdução

A análise dos cordões foi feita recorrendo a ensaios destrutivos e não destrutivos. Dentro do grupo dos ensaios não destrutivos foi realizada caracterização visual de ambas as superfícies dos cordões de soldadura. Quanto aos ensaios destrutivos, foi realizada análise metalográfica, ensaios de dureza, flexão, tracção e medição de temperaturas durante a realização do cordão. A análise metalográfica teve como objectivo a caracterização das alterações macro e microestruturais do material na zona afectada pelo processo de soldadura, assim como, a identificação e caracterização de eventuais defeitos. Os ensaios mecânicos consistiram na realização de ensaios de flexão em três pontos (dolado do flyer shoulder sujeito à tracção) e ensaios de tracção uniaxial. As medições de temperatura foram realizadas através de termopares com o objectivo de avaliar os ciclos térmicos com esta nova ferramenta e caracterizar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da junta.

Após a realização dos ensaios não-destrutivos, para a caracterização dos cordões de SFL com Bobbin-Tool, procedeu-se à maquinação das placas soldadas, de acordo com um plano de extracção de provetes, que para além dos provetes para análise metalúrgica (posteriormente utilizados para a medição do perfil de durezas) também previa três provetes para ensaios de tracção e dois para ensaio de flexão.

### 5.2 Caracterização Visual das Superfícies

Após a realização das soldaduras procedeu-se à observação visual dos cordões seleccionados. A observação foi complementada através de fotografia das chapas soldadas e registo dos aspectos principais necessários para interpretar superficialmente os cordões produzidos. Esta análise constitui uma interpretação qualitativa ao nível da superfície dos cordões obtidos nas diferentes condições estudadas. Os resultados obtidos estão presentes nas Figuras 5.1 a 5.6.

# 5.2.1 Resultados



Figura 5.1 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 1



Figura 5.2 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 2



Figura 5.3 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 3



Figura 5.4 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 4



Figura 5.5 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 5



Figura 5.6 – Aspecto visual da superfície superior e inferior do ensaio 6

# 5.2.2 Discussão de Resultados

Com base nos resultados obtidos na análise visual, e apresentados anteriormente pode-se realizar as seguintes análises:

- a) Análise da influência da <u>geometria do pino</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (cilíndrico) vrs ensaio 5 (cónico); ensaio 2 (cónico) vrs ensaio 6 (cilíndrico);
  - O pino cilíndrico resultou em menos formação de rebarba do que o pino cónico;
  - O pino cónico tem uma maior extensão inicial de zona não soldada, quando comparado com o pino cilíndrico.

- b) Análise da influência da <u>velocidade de soldadura</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (100mm/min) vrs ensaio 6 (160mm/min); ensaio 2 (160mm/min) vrs ensaio 5 (100mm/min);
  - Com o aumento da velocidade de soldadura, a extensão inicial de zona não soldada aumenta, sendo este efeito mais significativo para o pino de geometria cónica.
- c) Análise da influência do <u>gap entre shoulders</u>, com base na comparação entre: ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 3 (4.55mm); ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 4 (5.05mm).
  - Diferentes gaps, afectam significativamente o aspecto superficial dos cordões;
  - No ensaio 4, com gap de 5.05mm, verifica-se que está próximo do limite superior do intervalo admissível devido à dificuldade em fechar a superfície do cordão, resultante da falta de força vertical de forjamento. Mesmo assim, verificou-se uma pequena rebarba, de fácil extracção, do lado do Body shoulder. Na lado do Flyer shoulder houve um ligeiro aumento da espessura;
  - No ensaio 3 que foi produzido com um GAP de 4.55mm denota-se uma indentação dos shoulders em ambos os lados do cordão, sendo mais significativo do lado do Flyer Shoulder. Este facto resulta numa relevante redução da secção resistente do material na zona soldada;
  - Nos restantes cordões com o GAP 4,8 mm, sendo este intervalo a espessura das chapas constatou-se que não houve alterações relevantes na espessura tanto na parte superior como na parte inferior.

### 5.3 Análise Metalúrgica

A relação existente entre o comportamento mecânico de uma junta soldada e as características metalúrgicas resultantes do ciclo térmico-mecânico do processo de SFL com Bobbin-Tool, impõem uma caracterização metalúrgica. A análise metalúrgica realizada é composta por uma análise macrográfica, que permite a caracterização geométrica da zona de ligação, complementada pela análise micrográfica de algumas zonas de interesse na caracterização da influência dos mecanismos do processo nas características metalúrgicas dos materiais dos componentes soldados.

A análise metalúrgica incidiu sobre provetes cortados transversalmente em relação à direcção de soldadura, com uma largura de aproximadamente 40mm, e o cordão de SFL com Bobbin-Tool localizado a meio. Os provetes para análise da metalúrgica, depois de maquinados foram montados a frio em resina e posteriormente polidos até um polimento espelhado. Com o reagente "*Keller*", contrastou-se a amostra até julgado adequado, para a realização das macrografias e micrografias. O procedimento experimental adoptado para a realização dos ensaios de caracterização metalúrgica dos cordões de SFL realizados no IST, encontra-se descrito no Anexo B.1.

Na Figura 5.7 está representada uma macrografia de um cordão SFL com Bobbin-Tool.



Figura 5.7 – Configuração típica de uma macrografia de secção transversal de um cordão SFL com Bobbin-Tool sob as condições do ensaio 5: AA6061-T4, t=4.8mm, pino cónico com 7mm de diâmetro; *gap* entre *shoulder*s de 4.8mm e v<sub>s</sub>=100mm/min

# 5.3.1 Resultados

Seguidamente apresentam-se as macrografias e as micrografias obtidas na caracterização das diferentes zonas dos cordões de soldadura realizados.



Figura 5.8 – Macrografias e Micrografias do ensaio 1



Figura 5.9 – Macrografias e Micrografias do ensaio 2



Figura 5.10 – Macrografias e Micrografias do ensaio 3



Figura 5.11 – Macrografias e Micrografias do ensaio 4



Figura 5.12 – Macrografias e Micrografias do ensaio 5



Figura 5.13 - Macrografias e Micrografias do ensaio 6

### 5.3.2 Discussão de resultados

Com base nos resultados obtidos na análise metalúrgica, e apresentados anteriormente, pode-se realizar a seguinte análise:

Com base nas macrografias dos cordões podemos observar que nas secções transversais dos cordões apresentados, todas as estruturas típicas da SFL estão presentes e são facilmente identificáveis. O *nugget* apresenta-se com uma estrutura em camadas (forma típica do *Swiss roll*), com uma cauda que se dirige em simultâneo para a periferia de ambos os *shoulder*s (Body e Flyer *shoulder*s) no lado em avanço.

A ZATM e a ZAC são também identificáveis com alguma facilidade, devido às diferenças de tonalidade que se obtiveram com a contrastação. A ZATM apresenta-se com uma tonalidade mais escura, e apesar da baixa ampliação é já possível ver os grãos deformados. A ZAC é a estrutura que se segue à ZATM, observa-se em todas as macrografias como uma zona já com um tipo de grão semelhante ao MB, mas com uma tonalidade mais clara.

Em todos os ensaios realizados, a estrutura no interior do *nugget*, zona de recristalização dinâmica, tem um grão mais fino com as partículas de segunda fase de menor dimensão e com uma distribuição mais homogénea. Ainda no *nugget*, e na macrografia, é evidente o arranjo circular por camadas em torno do centro (swiss roll).

 a) Análise da influência da <u>geometria do pino</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (cilíndrico) vrs ensaio 5 (cónico); ensaio 2 (cónico) vrs ensaio 6 (cilíndrico);

- Com o pino cilíndrico a espessura da zona do *nugget* é inferior à espessura obtida com o pino cónico, para ambas as velocidades de soldadura;
- A extensão da ZATM é superior com a utilização de pino cónico.
- b) Análise da influência da <u>velocidade de soldadura</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (100mm/min) vrs ensaio 6 (160mm/min); ensaio 2 (160mm/min) vrs ensaio 5 (100mm/min);
  - A extensão da ZATM com maiores velocidades é superior à obtida com menores velocidades;
  - A extensão da ZAC é maior com as menores velocidades de soldadura, o que reflecte as maiores entregas caloríficas.
- c) Análise da influência do <u>gap entre shoulders</u>, com base na comparação entre: ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 3 (4.55mm); ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 4 (5.05mm).
  - .O nugget no gap inferior preenche a totalidade da espessura da chapa;
  - No ensaio de maior gap o nugget não abrange toda a espessura e encontra-se deslocado para a zona do Flyer shoulder

### 5.4 Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza têm como objectivo medir a resistência à indentação quando se aplica uma determinada carga no material. Este tipo de ensaio é importante pois permite fazer uma inferência localizada de algumas propriedades mecânicas das juntas soldadas. O valor obtido é característico do ciclo térmico-mecânico a que o material esteve sujeito, e por sua vez é indicador de propriedades mecânicas locais, tais como, tensão máxima ou de rotura do material.

O perfil de dureza Vickers foi medido ao longo da secção transversal do material, desde o material base de uma chapa até ao material base da outra, passando pelas zonas intermédias: ZAC – ZATM (incluindo o *nugget*) – ZAC, obtendo-se assim o perfil de durezas de Bobbin-Tool na liga AA6061-T4. As medições foram realizadas no centro da secção transversal (cerca de 2.4mm do topo e da base), realizando identações distanciadas de 1mm e com uma carga de 5N. O procedimento experimental encontra-se apresentado no Anexo B.2.

### 5.4.1 Resultados

Os resultados dos ensaios de dureza Vickers realizados nas amostras anteriormente referenciadas, apresentam-se na forma de gráfico que traça a evolução da dureza ao longo do cordão, desde o *nugget* (origem) até ao material base da amostra, (MB = 87.7 HV0.5), como se observa na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 1



Figura 5.15 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 2



Figura 5.16 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 3



Figura 5.17 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 4







Figura 5.19 – Perfil de dureza Vickers no ensaio 6

#### 5.4.2 Discussão de resultados

As durezas na zona dos *nuggets* estão compreendidas entre 70 e 80HV, sendo ligeiramente mais baixas do que no MB. As únicas excepções relevantes são o ensaio 3 onde a dureza da zona do *nugget* varia entre os 80 e os 90HV e do ensaio 5 onde a dureza do *nugget* varia entre os 75 e os 85HV. Em ambos os ensaios 3 e 5 sobressai um *nugget* bem desenvolvido ocupando praticamente toda a espessura, indiciando uma carga de forjamento entre *shoulder*s suficiente para forjar devidamente a zona o *nugget*.

A dureza mais baixa em cada perfil localiza-se na interface entre a ZAC e a ZATM, tipicamente do lado em retrocesso, devido a ser uma zona mais quente, sem que haja recristalização dinâmica ou deformação do grão. Outra possível justificação para o ponto de dureza mínimo absoluto se localizar na interface entre a ZAC e a ZATM é o facto de corresponder à zona que sem sofrer deformação plástica, sofre a mais elevada taxa de arrefecimento, vinda de temperaturas (+450° C) em que se verificou uma parcial redissolução dos precipitados de segunda fase, na fase sólida de alumínio, seguida de um envelhecimento na precipitação de novos intermetálicos. Note-se que a deformação plástica da estrutura cristalina, na ZATM promove a retenção de energia, que promove o aumento da dureza da estrutura em causa.

A partir do mínimo absoluto de dureza, e com o aumento da distância ao centro do *nugget*, diminui a temperatura máxima, mas aumenta o período de tempo em que se está a temperaturas típicas de activar os mecanismos de envelhecimento. Provavelmente o mínimo local que se verifica no interior da ZAC, antes de atingir o material base, deve-se a um envelhecimento, e à consequente coalescência dos precipitados.

- a) Análise da influência da <u>geometria do pino</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (cilíndrico) vrs ensaio 5 (cónico); ensaio 2 (cónico) vrs ensaio 6 (cilíndrico);
  - No ensaio 1 vrs ensaio 5 o pino cónico apresenta maior dureza, enquanto que ensaio 2 vrs ensaio 6 verifica-se o oposto, porque neste caso o maior valor de dureza é no pino cilíndrico o que vem a justificar a influência da velocidade na geometria do pino.
- b) Análise da influência da <u>velocidade de soldadura</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (100mm/min) vrs ensaio 6 (160mm/min); ensaio 2 (160mm/min) vrs ensaio 5 (100mm/min);
  - Menores velocidades de avanço aumentam a dureza. No pino cilíndrico as durezas são muito próximas, mas ainda assim é visível uma diminuição de dureza com o aumento de velocidade. Este facto é algo anómalo/contraditório quando comparado com os comportamentos tipicamente obtidos para a SFL com ferramentas convencionais.
- c) Análise da influência do <u>gap entre shoulders</u>, com base na comparação entre: ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 3 (4.55mm); ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 4 (5.05mm).

 Quanto menor o intervalo entre shoulders maior a dureza o que está de acordo com o aumento do trabalho/energia de deformação plástica entregue pela ferramenta nos componentes soldados, que promove o aumento da dureza da estrutura em causa. Assim, ao maior efeito de forjamento aplicado entre os shoulders, corresponde um aumento da dureza.

### 5.5 Ensaios de Tracção Uniaxial

Os ensaios de tracção foram realizados de modo a poder avaliar o desempenho estático, a nível de resistência mecânica do material base, das juntas soldadas e posteriormente comparar os resultados obtidos em todos os ensaios. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas NP EN 10002 – 1 [36] e EN 895 [37].



Figura 5.20 - Extracção de provetes SFL com Bobbin-Tool

Os provetes de tracção, cuja geometria e dimensões se apresentam na figura 5.20, foram maquinados na fresadora da marca Triac com um comando numérico Denford, existente no Laboratório de Máquinas Ferramenta, são obtidos dois provetes simultaneamente.



Figura 5.21 - Fresadora Triac e maquinação de Provetes

Os ensaios de tracção foram realizados num equipamento da marca Instron, modelo 4507, apresentado na Figura 5.22 com uma célula de carga de 200kN e extensómetros biaxiais de alta resolução. O procedimento experimental encontra-se descrito no Anexo B.3. Os provetes de tracção foram retirados da forma apresentada na figura 5.20.



Figura 5.22 - Equipamento usado para ensaios de tracção

#### 5.5.1 Resultados

Os valores de deformação e força, foram obtidos no decorrer dos ensaios de tracção realizados para cada uma das seis diferentes condições de SFL com Bobbin-Tool ensaiadas, e para o material base utilizado, foram tratados de forma adequada, para se poderem estabelecer as curvas de Tensão nominal (*S*) *versus* Extensão nominal (*e*), e posteriormente transformados nas curvas de Tensão verdadeira ( $\sigma$ ) *versus* Extensão verdadeira ( $\epsilon$ ), com base nas relações estabelecidas na expressão (5.1).

$$\begin{cases} e = \frac{I - I_0}{I_0} = \frac{I}{I_0} - 1 \\ S = \frac{F}{A_0} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} d\varepsilon = \frac{dI}{I} \Leftrightarrow \varepsilon = \ln \frac{I}{I_0} = \ln(e + 1) \\ \sigma = \frac{F}{A} = \frac{F \times I}{A_0 \times I_0} = S(e + 1) \end{cases}$$
(5.1)

A partir das curvas de Tensão verdadeira ( $\sigma$ ) *versus* Extensão verdadeira ( $\epsilon$ ), foram obtidos os valores de tensão máxima, tensão limite de proporcionalidade a 0.2%, módulo de Young e tenacidade. Obteve-se também o alongamento à rotura.

Para uma boa estimativa, quer do módulo de Young, e consequentemente da tensão limite de proporcionalidade a 0.2%, quer do valor da tenacidade, as curvas Tensão verdadeira ( $\sigma$ ) *versus* Extensão verdadeira ( $\epsilon$ ), foram separadas nas suas componentes elástica e plástica, tendo então cada uma destas componentes, sido aproximada pelas leis de Hooke e de Ludwik [38], respectivamente.

Estão representados os aspectos das fracturas e dos respectivos gráficos tensão/extensão verdadeira, de modo a se poder observar a zona de fractura nas Figuras 5.23 a 5.28. Deste modo é elaborada uma análise da zona em que o provete fracturou, assim como o respectivo aspecto e tipo de fractura.



Figura 5.23 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 1



Figura 5.24 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 2



Figura 5.25 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 3



Figura 5.26 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 4



Figura 5.27 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 5



Figura 5.28 - Superfícies de Fractura e Gráfico Tensão/Extensão do ensaio 6

No Anexo C encontram-se apresentados os gráficos, dos quais se obtiveram os valores das propriedades citadas. Estes mesmos valores são apresentados na Tabela 5.1 para os diferentes ensaios, juntamente com as relações ponderadas em relação às propriedades do MB. Os valores do MB são obtidos pela média dos valores obtidos em cada ensaio válido (2 ensaios de 3 realizados).

	E[G	Pa]	σ <sub>0.2</sub> [MPa]		σ <sub>máx</sub> [MPa]		A[%]		Tenacidade [J/mm³]	
MB	70	.3	17	6.2	33	9.9	22	2.6	50	).8
	Е	E EMB	<b>σ</b> <sub>0.2</sub>	σ <sub>0.2</sub> σ <sub>0.2MB</sub>	σ <sub>máx</sub>	σ <sub>máx</sub> σ <sub>máxMB</sub>	A	A A <sub>MB</sub>	Ten	Ten Ten <sub>MB</sub>
Ensaio 1	72.5	1.03	122.3	0.69	200.1	0.59	8.7	0.38	9.9	0.19
Ensaio 2	71.9	1.02	119	0.68	200	0.59	9.1	0.40	9.7	0.19
Ensaio 3	70.7	1.01	123.4	0.70	201.2	0.59	9.3	0.41	9.6	0.19
Ensaio 4	73.3	1.04	122.2	0.69	198.1	0.58	8.7	0.38	9.4	0.18
Ensaio 5	72.9	1.04	120.9	0.69	203.6	0.60	9.3	0.41	11.3	0.22
Ensaio 6	68.6	0.98	123.7	0.70	204	0.60	9.5	0.42	11.1	0.22

Tabela 5-1 - Compilação dos resultados obtidos nos ensaios estáticos de tracção uniaxial

	Localização do Início e Desenvolvimento da Rotura	Classificação da Rotura	
Ensaio 1	Superfície do cordão do lado em retrocesso, evoluindo na zona do cordão	Dúctil	
Ensaio 2	Superfície da ZAC do lado em retrocesso, evoluindo na ZAC	Dúctil	
Ensaio 3	Superfície da ZAC do lado em retrocesso, evoluindo na ZAC	Dúctil	
Ensaio 4	Ensaio 4 Superfície do cordão do lado em retrocesso, evoluindo na zona do cordão		
Ensaio 5	Ensaio 5 Superfície junto ao centro do cordão, Evoluindo na zona muito próximo do centro do cordão		
Ensaio 6	Superfície junto ao fim do cordão do lado em retrocesso, evoluindo muito próximo do fim do cordão	Dúctil	

Tabela 5-2 - Compilação das características das superfícies e classificação do tipo rotura obtidos

### 5.5.2 Discussão de resultados

Sendo relativamente complexo obter uma conclusão face à qualidade da soldadura e a influência total de cada parâmetro na qualidade da mesma, visto que são analisados seis parâmetros diferentes em cada ensaio foi aplicado um critério de análise desenvolvido por Vilaça, P [2], denominado por factor de Eficiência Global de Resistência Estática à Tracção (EGRET), definido através da Expressão (5.2)

$$EGRET = \left(C_E \times \frac{E_i}{E_{MB}} + C_{\sigma 02} \times \frac{\sigma_{02_i}}{\sigma_{02_MB}} + C_{\sigma \max} \times \frac{\sigma_{\max_i}}{\sigma_{\max_{MB}}} + C_A \times \frac{A_i}{A_{MB}} + C_{Ten} \times \frac{Ten_i}{Ten_{MB}}\right) \times 100\%$$

Em que:

- E*i*; σ 0,2*i*; σmáx*i*; A*i*; Ten*i* Propriedades mecânicas da junta soldada no ensaio *i*;
- EMB; σ 0,2MB; σmáxMB; AMB; TenMB Propriedades mecânicas do MB;
- CE; Co0,2; Comáx; CA; CTen Constantes correspondentes aos coeficientes de ponderação atribuídos a cada uma das cinco propriedades mecânicas que intervêm no factor EGRET.

Este factor tem como objectivo avaliar o nível global de qualidade do cordão numa escala percentual, tendo como base de comparação os ensaios de tracção do MB, ponderada através de pesos (coeficientes de ponderação), ilustrados na Tabela 5.3, cujos valores definem o grau de importância das diversas propriedades.

CE	Cσ0.2	Comax	CA	CTen
0.10	0.30	0.30	0.15	0.15

Tabela 5-3 – Pesos atribuídos a cada uma das cinco grandezas físicas ponderadas no factor EGRET

Os pesos que são atribuídos a cada uma das cinco características físicas, determinadas no ensaio de tracção, resultam de um esforço no estabelecimento de um critério de análise global, fundamental na estruturação de uma decisão, e expressam uma relação de importância, que sendo da total responsabilidade do autor, resultam da sua experiência acumulada no projecto e caracterização de juntas soldadas. Convém notar que estes valores de ponderação são atribuídos tendo em conta a possível aplicação das juntas soldadas, e que mediante o tipo de utilização, se pode optar por atribuir diferentes valores aos mesmos.

Para tal definiu-se, através da Expressão 5.3, que o somatório dos coeficientes considerados é igual à unidade:



 $C_E + C_{\sigma 02} + C_{\sigma \max} + C_A + C_{Ten} = 1$ 

(5.3)

Figura 5.29 – Comparativo das propriedades mecânicas em relação ao material base, obtidas nos ensaios realizados



Figura 5.30 - Factor EGRET obtido para os ensaios realizados

Da análise das figuras e tabelas anteriores é possível observar que nos ensaios não se verificou sensibilidade à existência de rebarba, com excepção do ensaio 6, para o qual devido à maior velocidade de avanço, a fissura se propagou nessa zona, mas constatou-se que a fissuração deu-se predominantemente no lado em retrocesso. Este facto, deve-se muito possivelmente à assimetria do cordão, no plano transversal, resultante da composição das velocidades de rotação e de avanço linear. Esta assimetria, entre outros fenómenos, origina

diferentes fluxos de calor e a formação da cauda do *nugget*, que se prolonga para o lado em avanço, e que se caracteriza por ter uma estrutura com um tamanho de grão menor e uma distribuição mais homogénea e refinada dos precipitados, resultando assim, num aumento da resistência à iniciação de fissuras, pelo menos nas superfícies superiores, no lado em avanço.

- a) Análise da influência da <u>geometria do pino</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (cilíndrico) vrs ensaio 5 (cónico); ensaio 2 (cónico) vrs ensaio 6 (cilíndrico).
  - Ensaio 1 vrs ensaio 5, constata-se que o pino cónico confere melhores propriedades mecânicas, isto é, verifica-se um aumento na tensão de cedência, tensão máxima, alongamento máximo e tenacidade à fractura, a nível do factor EGRET existiu um aumento superior a 1% relativamente ao cilíndrico, inclusive durante a soldadura verificou-se uma maior estabilidade do equipamento na obtenção da soldadura com o pino cónico em relação ao pino cilíndrico;
  - No caso do ensaio 2 vrs ensaio 6; verifica-se o oposto, o que vem a evidenciar a influência da velocidade de soldadura na geometria do pino. Ou seja, para maiores velocidades de soldadura, o pino cilíndrico apresenta melhores resultados.
- b) Análise da influência da <u>velocidade de soldadura</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (100mm/min) vrs ensaio 6 (160mm/min); ensaio 2 (160mm/min) vrs ensaio 5 (100mm/min).
  - Constata-se que com o aumento da velocidade de soldadura melhoram as propriedades mecânicas (e consequentemente o factor EGRET), com a ferramenta de pino cilíndrico;
  - Constata-se que com o aumento da velocidade de soldadura diminuem as propriedades mecânicas (e consequentemente o factor EGRET), com a ferramenta de pino cónico.
- c) Análise da influência do gap entre shoulders, com base na comparação entre: ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 3 (4.55mm); ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 4 (5.05mm).
  - Relativamente a uma diminuição do *gap* para um valor inferior à espessura das chapas neste caso o ensaio 5 vrs ensaio 3, verifica-se um aumento na tensão de cedência, facto esse se que deve ao acréscimo da força de forjamento que irá compactar o grão na zona de soldadura e conferir-lhe maior resistência à cedência, mas em contrapartida devido à diminuição de espessura, irá diminuir a tensão de rotura, alongamento máximo e tenacidade à fractura. O factor EGRET, neste caso em particular, apresenta diferenças abaixo de 1%;
  - Verificando a influência do aumento de gap entre shoulders, no ensaios 5 vrs ensaio 4 conclui-se que é onde existe maior diferença de propriedades mecânicas relativamente aos restantes ensaios, o que vem a provar a importância deste parâmetro e consequência do devido ajuste deste

parâmetro, aumenta a força de forjamento e consequentemente aumenta a tensão máxima, alongamento máximo e tenacidade à fractura e desta forma contribuiu para uma diferença de factor EGRET próximo dos 2%.

De forma geral podemos verificar a proximidade de propriedades mecânicas em todos os ensaios, dado que o factor EGRET nunca ultrapassou diferenças de 2% o que vem a demonstrar a repetibilidade na qualidade da SFL com Bobbin-Tool na presença de alteração de parâmetros.

### 5.6 Ensaios de Flexão

Através deste tipo de ensaio pretende-se comparar o desempenho estático das juntas soldadas com os diferentes parâmetros operatórios, quando sujeitas a um momento flector.

Os ensaios foram realizados segundo a norma NP EN 910 [39] e consistiram em submeter à flexão os provetes soldados por fricção linear com Bobbin-Tool. O plano de extracção dos provetes de soldadura, seguiu a disposição representada na Figura 5.20.

Os ensaios de flexão em 3 pontos, foram realizados com a zona do Flyer *shoulder* à tracção. Convém salientar que em todos os provetes, as arestas na zona útil do ensaio sofreram um processo de ligeira abrasão mecânica, com uma lixa de granulometria 240, com o objectivo de eliminar arestas vivas.

O diâmetro do indentador cilíndrico foi de 10mm e a distância entre apoios foi de acordo com a norma para uma espessura de 4.8mm, de 30mm.

Os ensaios de flexão foram realizados num equipamento de marca Instron, modelo 5566, ilustrado na figura 5.31, com célula de carga de 10kN. A velocidade a que se realizaram todos os ensaios foi de 5mm/min. O procedimento experimental seguido encontra-se descrito no Anexo B.4.



Figura 5.31 - a) Ilustração do ensaio de flexão.; b) Amarras de flexão

## 5.6.1 Resultados

Seguidamente encontram-se representados, numa sequência de figuras e tabelas, os resultados mais relevantes obtidos nos ensaios de flexão. É de notar que nestes ensaios todos os provetes foram testados na direcção paralela à de laminagem incluindo os do material base.

Provete	F, Ca Máxir	arga na(N)	ε, Desloc. á carga Máxima(mm)		E, Energia, necessária à fractura (J)		Zona e tipo de fractura
MB	59	10	7.975		38418		Flexão a  ≈180º sem fissuras
	F	F FMB	3	3 8MB	E	E EMB	
Ensaio 1	4711	0.797	6.100	0.766	22219	0.578	Fractura dúctil, inicio no lado em retrocesso
Ensaio 2	4749	0.804	6.967	0.874	25770	0.671	Fractura dúctil, inicio no lado em retrocesso
Ensaio 3	4751	0.804	7.279	0.913	27443	0.714	Fractura dúctil, inicio no lado em retrocesso
Ensaio 4	4231	0.716	6.821	0.855	22956	0.597	Fractura dúctil, inicio no lado em retrocesso
Ensaio 5	4159	0.704	4.304	0.540	13771	0.358	Fractura dúctil, inicio no lado em retrocesso
Ensaio 6	4990	0.844	7.463	0.934	29456	0.767	Fractura dúctil, inicio no lado em retrocesso

Tabela 5-4 - Compilação dos resultados obtidos nos ensaios de flexão



Figura 5.32 – Representação e ilustração da flexão do material base



Figura 5.33 - Representação e ilustração da flexão do ensaio 1



Figura 5.34 - Representação e ilustração da flexão do ensaio 2



Figura 5.35 - Representação e ilustração da flexão do ensaio 3



Figura 5.36 - Representação e ilustração da flexão do ensaio 4



Figura 5.37 - Representação e ilustração da flexão do ensaio 5



Figura 5.38 - Representação e ilustração da flexão do ensaio 6

### 5.6.2 Discussão de resultados

Sendo relativamente complexo obter uma conclusão face à qualidade da soldadura e a influência total de cada parâmetro, a cada um dos seis ensaios foi aplicado um critério de análise, denominado por factor de Eficiência Global de Resistência Estática à Flexão (EGREF), definido através da expressão 5.4.

$$EGREF = \left(C_F \times \frac{F_i}{F_{MB}} + C_\varepsilon \times \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{MB}} + C_E \times \frac{E_i}{E_{MB}}\right) \times 100\%$$
(5.4)

Em que:

- Fi, εi e Ei Propriedades mecânicas da junta soldada no ensaio i;
- FMB, εMB e EMB Propriedades mecânicas do MB;
- CF, Cε e CE Constantes correspondentes aos coeficientes de ponderação atribuídos a cada uma das três propriedades mecânicas que intervêm no factor EGREF.

Este factor tem como objectivo avaliar o nível de qualidade do cordão numa escala percentual, tendo como base de comparação os ensaios de flexão do Material base, ponderada através de pesos (coeficientes de ponderação), ilustrados na tabela 5.5, cujos valores definem o grau de importância das diversas propriedades obtidas.

CF	33	CE
0.25	0.25	0.5

Tabela 5-5 - Coeficientes de ponderação das propriedades mecânicas do factor EGREF

Os pesos que são atribuídos a cada uma das três características físicas, determinadas no ensaio de flexão, resultam da experiência acumulada no projecto e caracterização de juntas soldadas. Convém notar que estes valores de ponderação são atribuídos tendo em conta o possível campo de aplicações das juntas soldadas, e que mediante o tipo de utilização, se pode optar por atribuir diferentes valores aos mesmos. Para tal definiu-se através da Equação 5.5 que o somatório dos coeficientes considerados é igual à unidade.

$$C_F + C_\varepsilon + C_E = 1 \tag{5.5}$$

Figura 5.39 - Gráfico comparativo das diversas propriedades mecânicas em relação ao material base, obtidas nos ensaios realizados


Figura 5.40 - Factor EGREF obtido para os ensaios realizados

Através da análise visual dos provetes ensaiados, assim como da análise das Figuras 5.32 a 5.38 e da Tabela 5.4, que sintetiza todos os resultados obtidos nos ensaios de flexão é possível tecer alguns comentários, que permitem caracterizar o desempenho dos diversos tipos de ensaio em questão. O Material Base, apresenta os melhores resultados nestes ensaios.

Nos provetes soldados, a fractura é dúctil, e dá-se sempre no lado em retrocesso, como se vê pela queda de força abrupta nos gráficos que acompanham as imagens dos provetes fracturados. Após ser atingida a força máxima, o material cede, e cria uma fenda no cordão. Esta fenda inicia-se no extremo do provete e depois propaga-se por toda a largura do material, havendo uma diminuição da força, à medida que a fenda vai aumentando no sentido da espessura. O melhor resultado é obtido para o ensaio 6 que atingiu um factor EGREF na ordem dos 82.8%. O pior foi obtido no ensaio 5 onde o factor não ultrapassou os 48%.

- a) Análise da influência da <u>geometria do pino</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (cilíndrico) vrs ensaio 5 (cónico); ensaio 2 (cónico) vrs ensaio 6 (cilíndrico);
  - Para ambas as velocidades de soldadura, o pino cilíndrico promoveu melhores propriedades mecânicas, isto é, verifica-se um aumento da carga máxima, deslocamento à carga máxima e energia necessária à fractura;
  - A nível do factor EGRET existiu uma melhoria do pino cilíndrico relativamente ao pino cónico.
- b) Análise da influência da <u>velocidade de soldadura</u>, com base na comparação entre: ensaio 1 (100mm/min) vrs ensaio 6 (160mm/min); ensaio 2 (160mm/min) vrs ensaio 5 (100mm/min);

- Na diferença de velocidade de avanço com o mesmo gap e pino, verifica-se um aumento nas propriedades mecânicas, carga máxima, alongamento à fractura e energia necessária à fractura, com o aumento da velocidade de soldadura;
- O factor EGREF aumentou nos dois casos com o aumento da velocidade.
- c) Análise da influência do <u>gap entre shoulders</u>, com base na comparação entre: ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 3 (4.55mm); ensaio 5 (4.8mm) vrs ensaio 4 (5.05mm).
  - A diminuição do gap para um valor inferior à espessura das chapas não produziu nenhuma diminuição significativa da resistência mecânica;
  - O aumento da distância entre shoulders apresenta resultados inferiores à tendência dos restantes ensaios.

Em suma constatou-se que a fractura deu-se exclusivamente do lado em retrocesso o que prova uma maior perda de propriedades nesta zona do cordão, Este facto, deve-se possivelmente à assimetria do cordão. Esta assimetria, entre outros fenómenos, origina a formação da cauda do *nugget*, que se prolonga para o lado em avanço, e que se caracteriza por ter uma estrutura com um tamanho de grão menor e uma distribuição mais homogénea e refinada dos precipitados, resultando assim, num aumento da resistência à iniciação de fissuras, no lado em avanço.

As juntas soldadas por SFL com Bobbin-Tool de forma geral são zonas mais susceptíveis à ocorrência de fractura do que o material base. O ensaio 5 foi onde ocorreram os piores resultados, em ambos os provetes ensaiados. Estes resultados podem ser eventualmente justificados pelo aumento de dureza relativamente aos restantes ensaios (exclusivé o ensaio 3), que neste caso em particular veio a "fragilizar" a junta à flexão e facilitar o aparecimento de ruptura prematura no lado em tracção do provete. No entanto a grande redução de resistência não é facilmente justificável.

O ensaio 6 foi o caso onde se verificou melhores propriedades mecânicas, maior carga máxima, deslocamento à carga máxima e energia necessária à fractura.

#### 5.7 Medição de Temperaturas

Neste sub-capítulo apresentam-se e analisam-se, os resultados da medição de temperaturas com termopares. Os resultados foram obtidos através dum hardware da National Instruments [40] e tratados com o software LabView-Express [41].

As condições de ensaio em que foi realizada a medição de temperatura correspondem à condição de soldadura do ensaio 1, nomeadamente: material AA6061-T4, t=4.8mm, pino cilíndrico com 7mm de diâmetro; *gap* entre *shoulder*s de 4.8mm e velocidade de soldadura de 100mm/min.

Com estes resultados, avaliar o ciclo térmico durante a realização da SFL com Bobbin-Tool. O ensaio consistiu em medir as temperaturas em 4 pontos diferentes: no inicio do cordão do lado em retrocesso, a meio do cordão do lado em retrocesso e avanço, e no fim do cordão igualmente do lado em retrocesso. A colocação dos termopares é a meia espessura das chapas, no sentido de evitar eventuais efeitos convectivos que ocorram na superfície das chapas. Os termopares foram soldados às chapas com estanho, baseado no princípio do funcionamento dos termopares onde poderá existir um terceiro elemento condutor que não influência a leitura do termopar.



Figura 5.41 - Representação 3D das zonas de colocação dos Termopares

A montagem dos termopares e de todo o hardware está abaixo representado.



Figura 5.42 – a)Representação da montagem de todo o equipamento inerente aos Termopares b)Montagem dos Termopares

Os sensores térmicos utilizados foram Termopares, tipo K, com diâmetro de 0.5mm, os furos nas chapas têm 1.0mm de diâmetro, tendo sido produzidos com um engenho de furar de precisão.

### 5.7.1 Resultados

Seguidamente estão representados os valores obtidos no software LabView-Express, onde podemos visualizar em simultâneo as 4 medições, durante o processo de soldadura. Os gráficos estão ordenados do Termopar 1 para o 4 e são representados separadamente para uma melhor compreensão dos mesmos, com os valores retirados do software serão compilados as 4 leituras num único gráfico, para permitir uma comparação directa dos mesmos.



Figura 5.43 - Visualização Gráfica no LabView-Express [42]

Legenda da colocação dos Termopares:

Termopar1 - Junto ao inicio da soldadura do lado em retrocesso

Termopar2 - A meio do cordão do lado em retrocesso

Termopar3 – A meio do cordão do lado em avanço

Termopar4 – Junto ao fim da soldadura do lado em retrocesso



Figura 5.44 - Gráfico de Temperaturas

Após o final do ensaio de soldadura realizado, o tempo de arrefecimento durante o qual se manteve a aquisição de informação térmica foi de aproximadamente 5min.

### 5.7.2 Discussão de Resultados

Todos os Termopares, do ensaio, apresentam gradientes de aquecimento, e taxas de arrefecimento com um comportamento regular e típico de um processo de soldadura, o que é indício de um processo de medição bem sucedido. Relativamente às principais características dos 3 principais momentos de elaboração durante a soldadura, pode-se referir o seguinte:

- a) A taxa de aquecimento é maior no início e menos acentuada perto do final do cordão. A meio do cordão, apresenta valores intermédios;
- b) A temperatura máxima atingida ao longo de todo o procedimento é obtida no início do cordão, ou seja na entrada da ferramenta dentro do material a soldar. Este facto também é influenciado pelo procedimento de entrada da ferramenta nas chapas a soldar, onde a velocidade de entrada é sempre mais lenta do que a velocidade de soldadura, tendo em vista evitar danos na ferramenta (principalmente no pino). A meio do cordão, constata-se que ambos os lados (retrocesso e avanço) atingem praticamente a mesma temperatura máxima (a diferença de 1°C existente está compreendida no erro/falta de precisão de medição). No final do cordão, a temperatura máxima atingida é ligeiramente superior à temperatura máxima durante a fase estacionária (meio do cordão);
- c) A taxa de arrefecimento obtida foi maior a meio do cordão, do que na zona iniciail. Esta relação com a zona inicial é justificável pois todo o material por processar ainda está

disponível para receber o calor gerado na zona de entrada. Foi na zona de saída da ferramenta que se registou a maior taxa de arrefecimento, este comportamento não é o típico da SFL com ferramenta convencional, o que pode ser justificado pela saída da ferramenta Bobbin-Tool das chapas a soldar.

Outro parâmetro importante de estudo, era a diferença de temperaturas relativamente à SFL convencional [27] que deveria ser superior a 50°C, e relativamente a ensaios realizados com a mesma liga constatou-se a veracidade desse facto [2].

#### 5.8 Análise Global dos Resultados

Do estudo feito neste capítulo podemos verificar que existiram resultados com propriedades próximas do Material Base, principalmente no caso do ensaio 6 sob flexão, e a dureza na zona do cordão no ensaio 3. O facto do ensaio 6 ser o melhor resultado à flexão deve-se ao tipo de ferramenta e aumento da velocidade de soldadura. O resultado da dureza do ensaio 3 justifica que um *gap* inferior ao da espessura das chapas confere-lhe maior valor de dureza mesmo em relação ao Material Base. À tracção foram os resultados que se mantiveram muito próximos entre os 6 ensaios, a tensão de cedência, tensão de rotura, alongamento, mas com propriedades relativamente inferiores ao material base, o que indica menores propriedades de resistência à tracção da SFL com Bobbin-Tool.

### 6. Conclusões

De entre as conclusões possíveis de estabelecer, como resultado do trabalho tecnológico efectuado no âmbito do desenvolvimento de SFL sob novas condições de trabalho, isto é, a construção duma nova ferramenta, veio alargar o vasto leque de aplicações industriais e criar novas perspectivas de operação de forma a desenvolver a SFL. Esta nova ferramenta Bobbin-Tool foi pioneira em Portugal, daí a importância de todo o conhecimento e experiência adquirida na sua utilização.

Referindo em particular todo o trabalho desenvolvido na liga AA6061-T4 com 4.8mm de espessura, as conclusões tiradas foram as seguintes:

- Foi comprovada uma maior produtividade dado que o tempo a acertar chapas é reduzido e com a garantia de menores divergências nos cordões, porque com a SFL com Bobbin-Tool há maiores probabilidades de termos repetitivamente soldaduras idênticas;
- Constatou-se e comprovou-se que só é necessário robustez no eixo dos xx e yy dado que em zz a força de forjamento, é exercida na própria ferramenta entre o Flyer shoulder e o Body shoulder;
- O gap entre os Shoulders não deve ser superior à espessura das chapas, devido à dificuldade de forjamento e desperdício de material que apresenta no inicio da soldadura pois tem grande dificuldade em "forjar" completamente e ocorrer uma soldadura "sã". Não deverá igualmente ser inferior devido à redução de secção na zona do cordão e devido à grande quantidade de apara resultante da penetração excessiva dos Shoulders, verificou-se desta forma que o intervalo recomendado é o gap igual à espessura das chapas, pois é o que apresenta melhores propriedades;
- No Flyer shoulder é recomendável refrigeração dado o sobreaquecimento no momento da soldadura e dificuldade em arrefecer depois da mesma, dado que o arrefecimento por convecção mesmo com as alhetas não é suficientemente eficaz às temperaturas de operação da ferramenta. Foi implementado um arrefecimento com líquido de refrigeração e constatou-se grandes melhorias no arrefecimento geral da ferramenta e de todo o equipamento, pois sem este efeito adicional de refrigeração, a própria bucha de fixação da SFL com Bobbin-Tool sofria um maior gradiente térmico relativamente à SFL convencional e melhorou substancialmente a estabilidade da soldadura;
- Verificou-se que o pino de 5mm não é aconselhável para este material e espessura de chapa ensaiada, pois fracturam no momento inicial da segunda soldadura, o que prova a falta de vida à fadiga com este diâmetro de pino. A partir de 7mm de espessura mesmo o cónico que na zona central tem apenas 5mm de diâmetro não verificou qualquer dano;
- Outro aspecto a focar atenção é na limpeza da ferramenta, que após as segundas soldaduras, verificou-se a obstrução das espirais dos *Shoulders* como as estrias

roscadas do pino, será desta forma aconselhável a limpeza destas zonas de modo a aumentar a vida da ferramenta e facilitar o escoamento visco-plástico;

- De forma geral, os cordões SFL com Bobbin-Tool têm um melhor desempenho à flexão do que à tracção pois o melhor resultado à tracção o factor EGRET nunca ultrapassou os 58% enquanto que o factor EGREF o melhor resultado chegou à ordem dos 83%;
- Os melhores resultados globais obtidos correspondem à condição de ensaio 6: pino cilíndrico com 7mm de diâmetro; *gap* entre *shoulder*s de 4.8mm e velocidade de soldadura de 160mm/min.

### 7. Propostas para Desenvolvimento Futuro

Dando relevo ao aspecto inovador que este novo conceito SFL com Bobbin-Tool, o número de tarefas a desenvolver num futuro próximo, são em enorme escala, desta forma distinguem-se pela sua diferente natureza algumas propostas de trabalho a ter em consideração.

- Alargar o campo de velocidades de forma a tirar maiores conclusões acerca da sua verdadeira importância.
- Construir e desenvolver novas formas e geometrias de pino e Shoulders para constatar e comparar a sua influência, dado que só foram testados e ensaiados dois tipos de pino e uma geometria de Shoulders, daí a importância de serem testadas novas soluções.
- Um factor muito importante e que dará um grande passo no desenvolvimento deste conceito, será a construção dum novo equipamento que torne o processo SFL com Bobbin-Tool portátil, pois derivado a eliminação da força de forjamento em zz, o equipamento necessário não precisa de tanta robustez tanto da máquina como da própria mesa de apoio, comparativamente com a SFL convencional, só deverá ter um controlo posicional rigoroso, porque a SFL com Bobbin-Tool opera essencialmente com controlo de posição.

### 8. Referências Bibliográficas

[1] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, M. G., Templesmith, Dawes, C. J., *Friction stir butt welding,* International patent Application PCT/GB92/02203, GB Patent Application 9125978.8, US Patent 5.460.317, 6 December 1991;

[2] Pedro Miguel dos Santos Vilaça da Silva, *"Fundamentos do processo de soldadura por fricção linear – Análise experimental e modelação analítica –"*, IST, Setembro de 2003;
[3] F. Nascimento, T. Santos, P. Vilaça, R.M. Miranda, L. Quintino, *"Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys"*. Submitted for publication at: International Journal of Materials Science and Engineering: A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing); 2008;

[4] Murr, L., Tang, W., Guo, X., McClure, J., *Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding*, Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, Vol.7 (10), 1998, pp.163-172.

[5] Okamoto K., Doi M., Hirano S., Aota K., Okamura H., Aono Y., Ping C., *Fabrication of backing plates of copper by friction stir welding*, 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Port Island, Kobe, Japan, 2001.

[6] Nelson T., Zhang, H., Haynes, T., *Friction Stir Welding of Aluminium MMC 6061-Boron Carbide*, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000.

[7] Nelson T., Sorensen C., Johns C., Strand S., Christensen J., *Joining of Thermoplastics with Friction Stir Welding*, 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000.

[8] Kallee Ding, R., Oelgoetz, P., *Friction Stir Welding in the Automotive Body in White Production*, 1<sup>st</sup> International Symposium on Friction Stir Welding Thousand Oaks, California, USA, 1999.

[9] Gould, J., Feng, Z., *Heat Flow Model for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys,* Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, Vol.7 (10), 1998, pp.185-194.

[10] Threadgill, P., *Friction Stir Welds in Aluminium Alloys - Preliminary Microstructural Assessment*, TWI Bulletin, March/April, 1997.

[11] Daves, C., Tomas, W., *Development of Improved Tool Designs for Friction Stir Welding of Aluminium*, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, 1999;

[12] Yuh J. Chao, Mem. ASME; X. Qi, and W. Tang, J. Manuf. Sci. Eng. -- February 2003 --Volume 125, Issue 1, 138 (8 pages) doi:10.1115/1.1537741

[13] Vasco Godinho, Rudolf Zettler, Silvia Lomolino, *Friction stir weld zone evaluation by image analysing techniques,* Outubro de 2003;

[14] Aires, L.; Análise Experimental do Comportamento à Fadiga em Juntas Soldadas por Fricção Linear de Ligas de Alumínio para a Indústria Aeronáutica, MSc Thesis, IST, 2007; [15] A. Scialpi a, L.A.C. De Filippis a,\*, P. Cavaliere b; *Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy;* Italy; 2006

[16] K. Elangovan, V. Balasubramanian ; *Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy*; Annamalai University;India; 2006

[17] M. Skinner and R.L.Edwards, Improvements to the FSW Process Using the Self-Reacting Technology, Mater, Sci. Forum, Vol. 426-432, 2003, p2849-2854

[18] Sammy Nabors, Tool for Two Types of Friction Stir Welding, Marshall Space Flight Center, Alabama, 2006

[19] *Richard Venable, Joseph Bucher,* Mechanism for Self-Reacted Friction Stir Welding, *Marshall Space Flight Center, Alabama,* 2004

[20] Robert Carter, Kirby Lawless, Gimballed Shoulders for Friction Stir Welding, Marshall Space Flight Center, Alabama, 2008

[21] Kevin J. Colligan, Mark T. Smitherman, Low-Cost Friction Stir Welding of Aluminum for Littoral Combat Ship Applications, Project NSRP SP7 Meeting, August 2008

[22] Jonathan Martin, Ian Norris; Assessment of Bobbin Friction Stir Welding for the

Joining of Aluminium Alloys, September 2008

[23] K. Colligan, Tapered Friction Stir Welding Tool, U.S. Patent 6.669.075, Dec. 30, 2003

[24] R.J. Ding and P.A. Oelgoetz, Autoadjustable Pin Tool for Friction Stir Welding, U.S. Patent 5893507, April 13, 1999

[25] R.Zettler, T. Neumann and J. dos Santos, Design Implementation and Evaluation of the GKSS Bobbin-Tool, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht, Germany

[26] Web Page - http://www.youtube.com/watch?v=JCbRtIIZpdk&NR=1

[27] F. Marie, D. Allehaux, and B. Esmiller, Development of the Bobbin-Tool Technique on Various Aluminum Alloys, Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding, September 14- 16, 2004 (Metz, France), TWI, Paper on CD

[28] G. Sylva, R. Edwards, and T. Sassa, A Feasibility Study for Self Reacting Pin Tool Welding of Thin Section Aluminum, Proceedings of the Fifth international Conference on Friction Stir Welding, September 14-16, 2004(Metz, France), TWI, Paper on CD

[29] K.J. Colligan and J.R.Pickens, Friction Stir Welding of Aluminum Using a Tapered *Shoulder* Tool, Friction Stir Welding and Processing III, K.V. Jata, M.W.Mahoney, R.S. Mishra, and T.J. Leinert, Ed., TMS, 2005, p161-170

[30] P. H. Johnston, Addressing the limit of detectability of residual oxide discontinuities in Friction Stir butt welds aluminum using phased array ultrasound, NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681, 2008

[31] Instituto Superior Técnico, PATENTE DE INVENÇÃO NACIONAL Nº 104072, 2008

[32] Web Page - http://www.matweb.com

[33] Web Page - http:// www.esab.com

[34] Bruno Tiago de Oliveira Vieira Duque Emílio, Desenvolvimento de Aplicações de Soldadura por Fricção Linear a Diferentes Materiais e Espessuras, MSc Thesis, IST, 2008.

[35] Hua-bing <u>Ll<sup>a</sup></u>, Zhou-hua JIANG<sup>a</sup>, Zu-rui ZHANG<sup>a</sup> and Yan YANG<sup>a</sup>, Journal of Iron and Steel Research, International Volume 16, Issue 1, January 2009, Pages 58-61;

[36] NP EN 10 002-1; Materiais Metálicos – Ensaio de Tracção. Parte 1: Método de Ensaio (à Temperatura Ambiente); (1990)

[37] NP EN 895; Ensaios Destrutivos de Soldaduras em Materiais Metálicos: Ensaio de Tracção Transversal; (2002)

[38] Moura Branco ,C.,Mecânica dos Materiais, 2<sup>a</sup> Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 1994, pp.697-787

[39] NP EN 910; Ensaios Destrutivos de Soldaduras em Materiais Metálicos: Ensaio de Dobragem;(1999)

[40] Web Page - http://www.ni.com

[41] Web Page - http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/12441

## Anexos

## A – Desenhos Técnicos

# A.1 – Desenho Técnico do Corpo da Ferramenta, dos *Shoulder*s e Pinos



Figura A.1 - Desenho Técnico do corpo da ferramenta Bobbin-Tool



Figura A.2 – Desenho Técnico do Body Shoulder





Figura A.3 – Desenho Técnico do Flyer Shoulder





Figura A.4 – Desenho Técnico do pino Cónico

# A.2 - Desenho Técnico do Sistema de Fixação das chapas



Figura A.5 – Desenho Técnico da Base do Sistema de Fixação



Figura A.6 – Desenho Técnico do Bloco Maciço



Figura A.7 – Desenho Técnico da Régua de Apoio do bloco maciço

## **B – Procedimentos de Ensaio**

## B.1 – Procedimento para Realização da Análise Metalográfica

O procedimento de ensaio utilizado para a realização dos ensaios de análise da metalográfica dos cordões obtidos e do MB foi o seguinte:

1. Cortar e maquinar as amostras com as dimensões anteriormente estabelecidas, em cada uma das placas soldadas;

2. Limpar as arestas das amostras, para remoção das rebarbas;

3. Identificar cada uma das amostras;

4. Proceder à montagem das amostras em moldes com um diâmetro adequado ao tamanho da amostra em resina a frio;

5. Realizar a lixagem das amostras utilizando lixas de granulometria 240 mesh, 320 mesh, 600 mesh, 800 mesh, 1000 mesh, 2400 mesh e 4000 mesh;

6. Levar as amostras aos ultras – sons, imergidas em álcool, durante um período de 5 minutos, de modo a remover impurezas da superfície;

7. Proceder ao polimento das amostras, utilizando uma pasta de 3 micrómetros de granulometria, num pano lubrificado com uma mistura etanol: água (1:1);

8. Levar novamente as amostras aos ultras sons;

 Proceder à contrastação das amostras com soluções previamente preparadas, cuja composição se apresenta na tabela B.2

Designação	Composição	Modo de Aplicação
Keller		Mergulhar a amostra durante
	190 mL H <sub>2</sub> O,	cerca de 20 segundos.
		Passar em água corrente e
	5 me moo <sub>3</sub> ,	secar. Observar ao
	3 mL HCL,	Microscópio. Caso não esteja
	2 mL HF	bem contrastado, fazer
		pequenos incrementos de 3
		segundos e repetir o
		processo.

Nota: Entre cada fase de lixagem e polimento deve-se sempre proceder a limpeza com água corrente na amostra, passagem por álcool e secagem.

 Tabela B.1 – Composição e modo de aplicação do contrastante

## B.2 – Procedimento para Realização de Ensaios de Dureza

O procedimento utilizado durante a realização dos ensaios de dureza vickers, nos cordões de soldadura e no MB encontra-se aqui descrito:

1. Proceder à preparação superficial da amostra com a passagem álcool;

2. Proceder à marcação do centro do cordão nas amostras;

3. Nivelar a amostra através de lixagem da base da amostra até adquirir o nivelamento adequado;

4. Preparar o equipamento e o software do mesmo nos aspectos, localização das indentações, carga, ampliação de focagem da amostra, tempo de indentação;

 Determinar a distância mínima entre centros de indentações, de acordo com a Norma ISO 6507-2 (correspondente a 6 vezes a média da diagonais). Ter como referência os valores medidos no material base;

 Proceder à indentação das amostras numa filiação de n pontos, com distância de 1 mm entre si, a partir do centro das amostras, e com carga de 500g e tempo de indentação 15 s;

7. Programar os locais a indentar;

8. Verificar os locais a indentar através da focagem, com uma objectiva de 10X;

9. Proceder a indentação desses locais, caso a programação esteja ajustada ao pretendido, caso contrário voltar ao ponto 7;

10. Proceder a medição das indentações, através da focagem com a objectiva de 10X;

11. Registar os valores obtidos;

12. Encerrar o software e desligar o equipamento

## B.3 – Procedimento para Realização de Ensaios de Tracção

O procedimento de ensaio seguido para a realização dos ensaios de tracção foi o seguinte:

1. Cortar e maquinar os provetes de acordo com as dimensões referidas na norma;

2. Limpar as arestas dos provetes com uma lixa de granulometria 240, para remoção das rebarbas;

3. Calcular a espessura e largura média da zona útil de cada provete, a partir da medição de 3 valores para cada uma dessas grandezas, em diferentes pontos da zona útil;

 Calcular a secção útil inicial de cada provete: Secção Útil Inicial = Largura Média x Espessura Média;

5. Calcular o comprimento inicial entre referências de cada provete, de acordo com a norma;

6. Marcar a distância do comprimento inicial entre referências na zona útil de cada provete;

 Introduzir os parâmetros geométricos do provete no software de controlo do equipamento a utilizar;

8. Colocar e apertar os provetes nos mordentes da máquina;

9. Colocar os extensómetros no provete;

10. Iniciar o ensaio de tracção uniaxial;

11. Manter o ensaio até à rotura final do provete;

12. Gravar os valores medidos em suporte digital para posterior tratamento dos mesmos;

13. Voltar ao ponto 8 se ainda existirem mais provetes para ensaiar.

## B.4 – Procedimento para Realização dos Ensaios de Flexão em 3 Pontos

O procedimento experimental para os ensaios de flexão em três pontos na raiz do cordão foi o seguinte:

1. Obtenção dos provetes, a partir das chapas soldadas;

2. Preparação das faces laterais dos provetes, com uma lixa de granulometria 100 e arredondamento dos bordos com uma lima;

3. Determinação da distância entre apoios pela norma e do mandril a utilizar;

4. Preparação do equipamento experimental, ajustando a distância entre apoios prédefinida;

5. Iniciação do software de aquisição de dados;

6. Preparação do software de modo a introduzir os parâmetros que se irão manter constantes no decorrer de todos os ensaios;

7. Medição da largura dos provetes, de modo a poder corrigir com o software qualquer desvio à norma, no que respeita à dimensão dos mesmos;

 8. Colocação do provete nos apoios e alinhamento do mandril com o centro do cordão de soldadura;

9. Iniciação do ensaio com velocidade constante do mandril;

10. Evolução do ensaio até à quebra do provete ou até atingir um ângulo de 180º;

11. Análise visual do resultado final após retirar provete da máquina de ensaios;

12. Para cada novo provete a ensaiar repetir o procedimento a partir do ponto 7;

13. Finalmente, retirar os dados de todos os ensaios efectuados, guardando os mesmos em suporte digital;

## C – Gráficos dos Ensaios de Tracção



Figura C.1 – Resultados dos ensaios de tracção ao material base



Figura C.2 - Resultados dos ensaios de tracção do ensaio 1



Figura C.3 – Resultados dos ensaios de tracção do ensaio 2



Figura C.4 – Resultados dos ensaios de tracção do ensaio 3



Figura C.5 – Resultados dos ensaios de tracção do ensaio 4



Figura C.6 – Resultados dos ensaios de tracção do ensaio 5



Figura C.7 – Resultados dos ensaios de tracção do ensaio 6