



**Comportamento à fadiga de amplitude variável da liga AA6082-T651
contendo juntas soldadas por fricção linear**

Fábio Francisco Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Professor Doutor Nuno Ferreira Rilo

Orientador: Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa

Vogal: Professor Doutor José António Martins Ferreira

Julho 2009

Agradecimentos

Ao concluir esta tese, cumpre-me endereçar os mais sinceros agradecimentos às pessoas que das mais diversas formas deram um contributo para que esta se realizasse.

Ao Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa, orientador e amigo pelo que exigiu de mim e pelo que trabalhou comigo. Agradeço a oportunidade e a confiança depositada na minha investigação, a possibilidade de aprender ao seu lado e a solicitude com que me atendeu em todas as etapas do concurso

Aos amigos José Carlos Tavares e Carlos Leitão pela amizade, conselhos e apoio prestado durante a realização do trabalho.

A toda a minha família e amigos que acompanharam de perto o meu percurso académico incentivando sempre a fazer mais e melhor.

A todos um muito obrigado.

RESUMO

A soldadura por fricção linear é um processo recente e simples de soldadura no estado sólido, sem adição de material. Este apresenta vantagens sobre os processos convencionais de soldadura por fusão e tem sido utilizado com sucesso em ligas de alumínio. Um dos materiais onde o processo tem apresentado melhores resultados é a liga de alumínio AA6082-T651.

Na solicitação dinâmica de estruturas com juntas soldadas por processos convencionais, a resistência à fadiga constitui o modo de dano determinante para o seu dimensionamento. Para o caso de solicitações de amplitude variável é habitual utilizar-se a lei de Miner, a qual antevê uma acumulação de dano igual à unidade no momento da falha por fadiga, ou seja, os danos acumulam-se e a rotura por fadiga ocorre se a soma dos danos ultrapassar a unidade. Contudo, para o caso de juntas soldadas tem vindo a verificar-se que a falha por fadiga ocorre para valores de dano acumulado muito inferiores à unidade. Para o caso da soldadura por fricção linear não existem dados experimentais obtidos com solicitações de amplitude variável para demonstrar se esta tendência se mantém.

A redução de resistência à fadiga está associada a factores geométricos, metalúrgicos, falta de homogeneidade do material e defeitos de soldadura. Para o caso de soldadura por fricção linear prevê-se que existam benefícios na resistência à fadiga, devido à menor concentração de tensões associada à geometria das juntas topo-a-topo. Porém, eventuais alterações de propriedades mecânicas, como a redução da tensão de cedência e da dureza, podem levar a uma diminuição da resistência à fadiga. Outro factor importante será a presença de defeitos de soldadura.

Torna-se assim essencial efectuar um estudo experimental que permita obter as curvas de fadiga (S-N) para posterior utilização em projecto de estruturas soldadas por este processo, e conhecer qual o valor de dano acumulado a usar nas previsões de vida à fadiga (lei de Miner), de estruturas solicitadas submetidas a carregamentos de amplitude variável.

O programa experimental deste trabalho abrange a realização de algumas séries de ensaios de fadiga de amplitude constante e variável, em provetes com juntas soldadas topo-a-topo para obtenção de curvas S-N. Complementarmente, serão efectuados medições de durezas e análises microestruturais.

Palavras-chave: Soldadura por fricção linear, fadiga com solicitações de amplitude constante e variável, Lei de Miner, Liga de alumínio AA6082-T651.

ABSTRACT

The friction stir welding is a recent and simple process of welding in the solid state, without material addition. This presents advantages over the conventional processes of fusion welding and has been used successfully in aluminum alloys. One of the materials where the process has presented better result is the aluminum alloy AA6082-T651.

In the dynamic loading of structures with joint welded by conventional processes, the fatigue strength constitutes the way of determinative damage for its design. For the case of variable amplitude loading it's usual to use Miner's law, which predicts an accumulation of damage equal to the unit at the moment of the fatigue crack, it means that the damages are accumulated and the fatigue failure occurs if the amount of damages exceeds the unit. However, in case of welded joints the fatigue crack occurs for values of accumulated damage very inferior to the unit. In case of the friction stir welding doesn't exist experimental results with variable amplitude loading to demonstrate if this trend also applies.

The reduction of fatigue strength is associated to geometric and metallurgic factors, lack of homogeneity of the material and weld defects. In case of friction stir welding is predictable the existence of fatigue strength benefits, due to lower stress concentration associated to the geometry of the butt joints. However, eventual modifications of mechanical properties, as the reduction of yield strength and hardness, can lead to a reduction of the fatigue strength. Another important factor will be the presence of weld defects.

It will be crucial to carried out an experimental study that allows to get the fatigue curves (S-N) for posterior use in project of structures welded by this process, and to know which value of accumulated damage to use in the prediction of fatigue lives (Miner's law), of loading structures submitted to variable amplitude loading.

In the experimental program of this work will be carried out some series of fatigue tests at constant and variable amplitude, in samples with welded butt joints to obtain S-N curves. Complementarily, the following studies will be made: microstructural analyzes and hardness measurements.

Key-words: Friction stir weld, fatigue test at constant and variable amplitude loading, Miner's law, aluminum alloy AA6082-T651.

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE TABELAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
1 Introdução.....	1
1.1 Motivações e objectivos.....	1
1.2 Estrutura.....	2
1.3 Generalidades.....	2
2 Estado da Arte	3
2.1 Soldadura de alumínio	4
2.2 Soldadura por fricção linear.....	4
2.3 Resistência à fadiga de materiais	9
2.4 Resistência à fadiga em ligações soldadas por fricção linear	10
2.5 Lei de Miner.....	11
3 Material	12
3.1 Preparação do material para o ensaio de fadiga e estudos efectuados.....	14
3.1.1 Ferramenta utilizada na soldadura.....	14
3.1.2 Elaboração da soldadura.....	15
3.1.3 Preparação do corpo de prova para o ensaio de fadiga.....	17
4 Estudos efectuados	18
4.1 Caracterização visual das superfícies.....	18
4.2 Análise metalográfica (micrografia e macrografia).....	19
4.3 Medição de dureza	28
5 Ensaio mecânicos do material	32
5.1 Ensaio de fadiga.....	33
5.1.1 Visualização da superfície de fractura.....	34
5.1.2 Ensaio de fadiga com $R = 0$ e $R = -1$	35
5.1.3 Ensaio de fadiga a tensão constante	37
5.1.4 Ensaio de fadiga a tensão variável.....	40
6 Conclusão	49
7 Bibliografia.....	50

8	Anexos.....	i
8.1	Esquemas dos provetes das soldaduras.....	i
8.2	Desenho da ferramenta utilizada.....	iv
8.3	Procedimento da análise metalográfica	v
8.4	Procedimento da medição de durezas	vi
8.5	Procedimento dos ensaios de fadiga	vii
8.5.1	Tensão constante:	vii
8.5.2	Tensão alternada.....	vii
8.6	Cálculo dos espectros utilizados no ensaio à fadiga de amplitude variável	viii
8.7	Cálculos do dano acumulado	xi
8.8	Cálculo da tensão equivalente.....	xii
8.9	Simplificação da expressão da distribuição de Weibull:	xiii
8.10	Obtenção da distribuição característica de Weibull para os valores de dano calculados:	xiv
8.11	Cálculo da percentagem de replicação.....	xv

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de AA6082-T651	13
Tabela 2 – Propriedades Físicas de AA6082-T651	13
Tabela 3 – Propriedades mecânicas de AA6082-T651	13
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na SFL	16
Tabela 5 – Legenda das micrografias	20
Tabela 7 – Diferenças entre ensaios com $R = 0$ e $R = -1$	36
Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a tensão constante $R = 0$	38
Tabela 10 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a amplitude variável ($R=0$).....	45
Tabela 11 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a amplitude variável $R = -1$	47
Tabela 6 – Percentagem de replicação e tipo de ensaio associado.....	48
Tabela 12 – Dados necessários para o cálculo do espectro	viii
Tabela 13 – Cálculo de H_i e n_i	viii
Tabela 14 – Cálculo de SSF	ix
Tabela 15 – Valores de SSF obtidos.....	ix
Tabela 16 – Espectro realizado no ensaio de fadiga.....	x
Tabela 17 – Distribuição de ciclos em cada espectro.....	x
Tabela 18 – Dados necessários para cálculo do dano.....	xi
Tabela 19 – Exemplo de cálculo de dano acumulado	xi
Tabela 20 – Dados necessários para o cálculo da tensão equivalente	xii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ferramenta utilizada no processo de SFL	5
Figura 2 – Processo SFL.....	5
Figura 3 – Princípio geral de funcionamento da SFL.....	5
Figura 4 – Regiões da SFL	7
Figura 5 – Defeitos típicos da SFL.....	7
Figura 6 - Configurações de junta passíveis de serem soldadas pelo processo de SFL	8
Figura 7 – Chapa inicial do alumínio utilizado	13
Figura 8 – Ferramenta utilizada no processo de SFL	14
Figura 9 – Máquina utilizada no processo de SFL	15
Figura 10 – Início do processo de SFL.....	16
Figura 11 – Processo de SFL realizado	16
Figura 12 – Exemplo de soldaduras efectuadas	17
Figura 13 – Chapa com a soldadura 6 já cortada pela guilhotina.....	17
Figura 14 – Provette utilizado no ensaio de fadiga.....	18
Figura 15 – Aspecto visual da soldadura efectuada com a ferramenta de ângulo da base de 2ºe 5º respectivamente.	19
Figura 16 – Análise metalográfica da soldadura 2	20
Figura 17 – Análise metalográfica da soldadura 4	20
Figura 18 – Análise metalográfica da soldadura 5	21
Figura 19 – Análise metalográfica da soldadura 1	22
Figura 20 – Análise metalográfica da soldadura 3	23
Figura 21 – Análise metalográfica da soldadura 6	24
Figura 22 – Análise metalográfica da soldadura 7	25
Figura 23 – Análise metalográfica da soldadura 8	26
Figura 24 – Esquema das medições de durezas efectuadas.....	28
Figura 25 – Dureza da soldadura 1 e 2	28
Figura 26 – Dureza da soldadura 3, 6, 7, e 8	29
Figura 27 – Comparação das durezas obtidas	30
Figura 28 – Medições de dureza efectuadas por outros autores a) [30] b) [31] e c) [7].....	32
Figura 29 – Máquina de ensaios e sistema de controlo utilizados nos ensaios de fadiga.	33
Figura 30 – Superfícies de fractura.....	35
Figura 31 – Ciclos de tensão a amplitude variável com $R = 0$ e $R = -1$	35
Figura 32 – Peça utilizada ensaios de fadiga com $R = -1$	36
Figura 33 – Carga pulsante e carga alternada.....	37
Figura 34 – Resultados obtidos para diferentes parâmetros	38
Figura 35 – Curva S-N para diferentes tipos de iniciação de fractura.....	39
Figura 36 – Curva S-N obtida	39
Figura 37 – Comparação de ensaios à fadiga	39
Figura 38 – Curva S-N de Wohler e Gassner e factor SSF	40
Figura 39 – Espectros de tensão associados a diferentes valores de γ [15].	42

Figura 40 – Número de ciclos que determinada tensão é aplicada para diferentes valores de v	42
Figura 41 – Espectros realizados pela máquina de ensaios de fadiga	43
Figura 42 – Resultados obtidos nos ensaios de amplitude variável ($R=0$).....	46
Figura 43 – Ensaios válidos de amplitude constante e variável ($R=0$).....	46
Figura 44 – Curvas de Wohler e Gassner dos ensaios realizados	46
Figura 45 – Distribuição característica de Weibull	47
Figura 46 – Probabilidade de ocorrência para um determinado valor de dano	48
Figura 47 – Desenho da ferramenta cotada	iv
Figura 48 – Amostra analisada metalograficamente	v
Figura 49 – Máquina utilizada nas medições de dureza e indentação realizada	vi

1 Introdução

1.1 Motivações e objectivos

Desde início que senti uma grande motivação para realizar este trabalho, tendo em conta que engloba uma clara vertente prática muito importante. Para além deste aspecto, outra razão, foi a possibilidade de perceber como são obtidas algumas propriedades dos materiais utilizadas no dimensionamento de peças e componentes, bastante usadas anteriormente em diversas disciplinas. É gratificante fazer um estudo relativo a técnicas recentes permitindo assim contribuir para a obtenção de novos dados que, futuramente, possam ser utilizados no dimensionamento de componentes soldados por este processo.

O trabalho tem como principal objectivo realizar um conjunto de ensaios de fadiga que permitam verificar a validade da lei de Miner na soldadura por fricção linear. Sabendo que, esta lei prevê a falha por fadiga quando a acumulação de dano é igual à unidade, nesta dissertação irá verificar-se se essa relação é verdadeira ou se, por outro lado a falha ocorre para valores inferiores à unidade, que é o que se tem vindo a verificar no caso de juntas soldadas.

Um dos objectivos deste trabalho passa por obter as curvas de fadiga (S-N) a usar em projecto de estruturas soldadas por este processo, e conhecer qual o valor de dano acumulado a usar nas previsões de vida à fadiga de estruturas solicitadas a carregamentos de amplitude variável.

Na análise de resistência à fadiga irá comparar-se a influência dos parâmetros de soldadura e da geometria da ferramenta no comportamento à fadiga dos cordões de soldadura. O ensaio de resistência à fadiga a carregamento cíclico é o que melhor simula as condições de trabalho a que determinada peça irá estar submetida em serviço.

Após a obtenção das soldaduras, irão ser efectuadas análises metalográficas com vista a verificar a existência de defeitos e observar as microestruturas finais, obtidas depois da realização da soldadura.

Efectuar-se-ão medições de dureza com o objectivo de se poder determinar a influência da ferramenta e dos parâmetros de soldadura na dureza final da zona soldada, assim como na resistência à fadiga do material.

Este trabalho passa, também, por determinar a localização do início da fractura e a sua morfologia em cada uma das situações consideradas.

Para cumprir os objectivos irá passar-se pelas seguintes fases:

- i. Preparação da ferramenta
- ii. Soldadura do material
- iii. Estudos da soldadura (análise metalográfica e medição de durezas)
- iv. Preparação dos provetes
- v. Ensaio dos provetes

1.2 Estrutura

O *capítulo 2* inicia-se com a apresentação de conceitos fundamentais relativos a: soldadura do alumínio; soldadura por fricção linear; fadiga; fadiga de juntas soldadas por fricção linear; e Lei de Miner, que são conceitos necessários para a melhor compreensão desta dissertação.

No *capítulo 3* é caracterizado o material utilizado e irá resumir-se a importância da ferramenta, a forma como foi obtida, as suas principais características, assim como a preparação da soldadura e do provete que será utilizado no ensaio à fadiga.

No *capítulo 4* serão descritos os estudos efectuados na soldadura para análise de vários factores e serão apresentados os seus resultados.

No *capítulo 5* é dada especial atenção ao equipamento de ensaio utilizado, descrevendo a forma como o ensaio foi efectuado e divulgando os resultados obtidos.

No *capítulo 6* faz-se uma discussão de resultados tendo em conta os resultados previstos.

No *capítulo 7* apresentam-se as principais conclusões retiradas deste trabalho.

1.3 Generalidades

A utilização de estruturas metálicas em ligas de alumínio é uma solução cada vez mais promissora. Nos últimos anos houve um forte aumento da utilização de alumínio em aplicações estruturais de aviões, barcos e automóveis, devido às inúmeras vantagens que apresenta, nomeadamente a sua superioridade quando comparado com outros metais em diversas situações. As principais características que fazem com que seja um dos metais mais utilizados são o facto de ser um metal leve, macio, muito resistente, dúctil, além de ter uma excelente resistência à corrosão.

As ligas de alumínio com pequenas quantidades de cobre, manganês, silício, magnésio e outros elementos, apresentam características adequadas às mais diversas aplicações.

As tecnologias de soldadura utilizadas actualmente, sendo as mais eficientes para a ligação de componentes metálicos, não apresentam resultados satisfatórios quando o material a soldar é uma liga de alumínio.

Presentemente, no desenvolvimento de tecnologias de ligação, o processo de Soldadura por Fricção Linear aparece como a melhor solução para ultrapassar alguns dos problemas associados à soldadura por fusão das ligas de alumínio.

A Soldadura por Fricção Linear (SFL), é um processo de ligação no estado sólido, desenvolvido pelo Welding Institute (TWI) em 1991 [1]. É relativamente novo e considerado o mais significativo processo de ligação de material, desenvolvido nas últimas décadas.

A SFL foi inicialmente utilizada para ligas de alumínio, sabendo-se da sua dificuldade de junção através de outros processos e devido ao crescimento da utilização do alumínio como elemento estrutural.

Esta nova tecnologia, exige um entendimento aprofundado dos factores que afectam o processo e das propriedades mecânicas das soldaduras, para que possa ser utilizada em aplicações específicas.

Durante o processo de SFL a ferramenta rotativa que se move ao longo da junta soldada produz calor devido ao atrito gerado entre a ferramenta e o material o que leva ao movimento de material plasticizado. O material é deformado por extrusão e sofre um movimento rotacional que leva à formação da zona soldada. A qualidade da soldadura depende do comportamento do fluxo de material que, por sua vez, é influenciado pelas propriedades mecânicas do material. Por isso, a ferramenta e os parâmetros do processo, são os factores mais importantes a ter em conta quando se quer obter uma soldadura de elevada qualidade.

Sabendo da complexidade dos fenómenos envolvidos neste processo, têm sido efectuados muitos esforços no sentido de compreender o efeito da geometria da ferramenta e dos parâmetros do processo, no comportamento do fluxo de material e nas propriedades mecânicas das juntas soldadas.

Nos últimos anos a investigação realizada no campo da SFL, tem passado pelo aumento no mercado de aplicações deste processo, estudando algumas das suas principais variáveis, sendo a que mais se destaca a concepção de novas ferramentas de soldadura. Os principais objectivos destes progressos são, permitir a soldabilidade de uma maior variedade de materiais e, o aumento da resistência e da qualidade das juntas efectuadas. Sendo assim, o potencial deste processo em estruturas metálicas é muito elevado, pelo que esta potencialidade torna imprescindível a investigação nas áreas de resistência mecânica a esforços estáticos e dinâmicos.

Desta forma, o presente estudo foi realizado com o objectivo de obter dados experimentais em solicitações de amplitude constante e variável, que serão utilizados no dimensionamento de peças e, ou, estruturas.

2 Estado da Arte

Está presente neste capítulo uma parte da pesquisa bibliográfica realizada, que teve como principal objectivo enquadrar o leitor nos temas principais tratados no trabalho.

Nesta dissertação existem alguns conceitos que são fundamentais para melhor compreensão da mesma. Aqui irão ser apresentados e far-se-á uma breve explicação desses conceitos:

1. Soldadura de alumínio
2. Soldadura por fricção linear
3. Resistência à fadiga de materiais
4. Resistência à fadiga em ligações soldadas por fricção linear
5. Lei de Miner

É de salientar que foi feito um esforço para citar trabalhos de outros autores tentando, sempre que possível, ilustrar com um ou mais estudos, o assunto tratado.

2.1 Soldadura de alumínio

Apesar do alumínio poder ser soldado por vários processos, existem dificuldades em obter soldaduras de elevada qualidade através dos processos tradicionais de fusão. Devido a:

- Formação de oxigénio na superfície
- Alta condutividade térmica
- Alta expansão térmica
- Alta solubilidade do hidrogénio quando em estado fundido

Quando se utiliza um processo de ligação cujo princípio leva à fundição do material, a soldadura de alumínio apresenta baixa qualidade, muitos defeitos, fracas propriedades mecânicas e elevada distorção, apresentando assim elevadas tensões residuais, o que leva à sua falha para baixas solicitações da peça. Isto, permite considerar, a união de ligas de alumínio por soldadura convencional pouco recomendável. Existe uma pobre solidificação microestrutural e ocorrência de porosidade na zona de fusão do material, resultando numa perda significativa de propriedades mecânicas quando comparado com o material base. [2]

A dificuldade de fazer soldaduras de alta resistência à fadiga e à fractura em ligas de alumínio, impediu a utilização da soldadura para interligar estruturas em algumas indústrias mais exigentes. [2]

2.2 Soldadura por fricção linear

Tendo em conta as dificuldades de soldar alumínio pelos processos de soldadura tradicionais por fusão, desenvolveu-se uma nova forma de unir materiais, denominada por Soldadura por Fricção Linear (SFL). É um processo simples de ligação no estado sólido, onde o calor necessário para que ocorra o processo é obtido através da fricção entre as peças a unir e a ferramenta utilizada (de elevada resistência ao desgaste), que avança ao longo da linha de soldadura. Essa fricção tem o efeito de produzir energia calorífica que leva ao amaciamento (sem, contudo, atingir a temperatura de fusão), das peças a unir, que sofrem uma forte deformação plástica sob acção da ferramenta. À medida que a ferramenta avança através da linha de soldadura, o material é “misturado” pela ferramenta, fazendo uma junta consolidada à sua passagem. O movimento dos materiais em torno da linha de soldadura, leva à união no estado sólido das peças a ligar, originando a soldadura após arrefecimento. [3]~

Na (Figura 1) [3] está representada uma ferramenta típica de Soldadura por Fricção Linear. As ferramentas apresentam uma grande variedade de geometrias, sendo por isso a figura apenas um exemplo de geometria utilizado.



Figura 1 – Ferramenta utilizada no processo de SFL

Na (Figura 2) [3] está uma fotografia de um equipamento de SFL em operação. Nesta figura estão presentes alguns elementos chave da montagem utilizada para a realização do processo. A preparação deste processo de soldadura obriga a uma fixação rígida das partes a ligar.

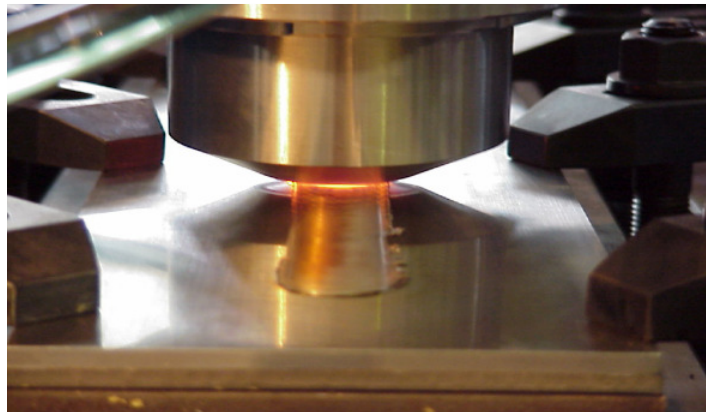


Figura 2 – Processo SFL

Na (Figura 3) [4] está esquematizado o princípio geral de funcionamento do processo.

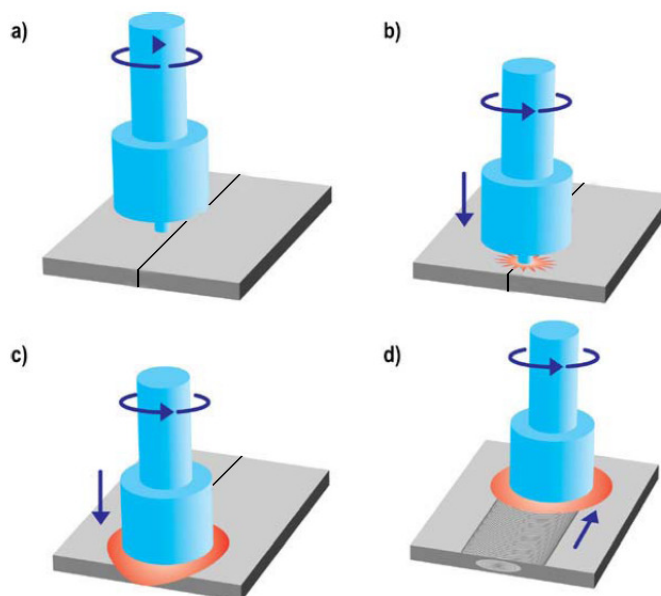


Figura 3 – Princípio geral de funcionamento da SFL

Tal como está ilustrado na figura, o processo começa com o posicionamento da ferramenta na zona da junta (a). As duas partes a soldar têm de estar fixadas rigidamente para não permitir o movimento da junta de soldadura nem o afastamento das peças. Depois de devidamente posicionada na zona de junta, a ferramenta em rotação constante é mergulhada sob pressão, com acção de uma força na direcção da peça (b). A força mantém-se até que o pino mergulhe na zona de ligação entre as peças e a base da ferramenta fique em contacto com as peças (c). Esta força vertical de forjamento aplicada pela base da ferramenta deverá manter-se constante durante todo o processo. Agora o atrito gerado entre a ferramenta com velocidade rotacional constante e as peças, produz calor que apesar de não ser suficiente para fundir o material é suficiente para causar o seu amaciamento. Com o movimento de avanço da ferramenta, o transporte do material por fluxo viscoplástico é imposto pela base e pelo perfil do pino que forja e extrude o material em seu redor, direccionando-o para a parte de trás, enchendo o volume deixado aberto pela sua passagem e resultando no cordão de soldadura. Com o objectivo de obter uma ligação contínua, a ferramenta desloca-se com velocidade linear constante ao longo da linha de soldadura (d).

Na SFL existem quatro parâmetros principais variáveis para controlar [5]. São eles:

- Velocidade de rotação.
- Velocidade de avanço.
- Pressão
- Ângulo de ataque

A redução de processos a controlar prevê um aumento da margem de segurança e leva a um elevado grau de fiabilidade. [5]

A temperatura da soldadura é uma variável que depende da velocidade de rotação da ferramenta e da velocidade de avanço, sendo que, quanto maior for o quociente entre a velocidade de rotação e a velocidade de avanço, maior será a temperatura de soldadura. De um modo geral, o aumento da velocidade de rotação ou diminuição da velocidade de avanço, levam ao aumento da temperatura de soldadura. [6]

M. Ericsson et al. [7], efectuaram um estudo sobre o comportamento mecânico e a resistência à fadiga da liga de alumínio AA6082 com diferentes velocidades de avanço. Verificaram que são independentes desse parâmetro, o que traz grandes vantagens para a indústria pois leva a um aumento de produtividade sem perda de qualidade.

As soldaduras obtidas por SFL apresentam composição química idêntica ao material a soldar, uma vez que são efectuadas a temperaturas inferiores à temperatura de fusão do material, o que confere à ligação boas características mecânicas, e que permite ligar materiais com pontos de fusão diferentes.

A força vertical de forjamento é um factor muito importante no processo de SFL uma vez que, se esta não for suficiente para se obter uma consolidação total da soldadura, a soldadura irá apresentar defeitos. Se não existir o controlo activo de carga, esta pode variar ao longo da junta soldada o que pode levar a diferentes qualidades de junta e acabamento superficial na soldadura.

K. Kumar et al. [16], efectuaram um estudo sobre o efeito da carga axial nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por SFL. Concluíram que à medida que a carga

axial é aumentada os defeitos presentes na soldadura vão desaparecendo, pois as soldaduras que efectuaram para o valor mais baixo da carga axial apresentavam grandes defeitos, e para o valor mais elevado a soldadura não tinha defeitos.

O ângulo de ataque, permite aumentar a pressão aplicada pela base e tem grande influência no aspecto visual da soldadura

A microestrutura das juntas soldadas por SFL pode ser separada em 4 regiões distintas (Figura 4):

1. Nugget
2. Zona afectada termo-mecanicamente (ZATM)
3. Zona afectada pelo calor (ZAC)
4. Material base (MB)

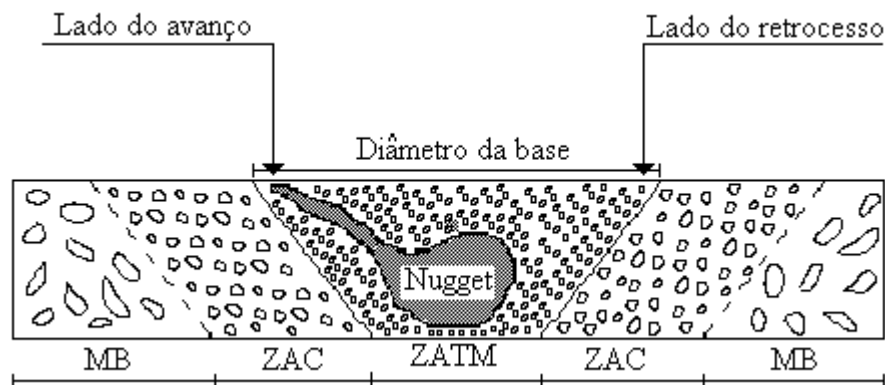


Figura 4 – Regiões da SFL

Na zona do nugget os efeitos térmicos e mecânicos foram suficientes para provocar a recristalização dinâmica do material, resultando numa microestrutura muito fina e equiaxial.

Existem defeitos que são típicos da SFL (Figura 5) e que muitas vezes são difíceis de evitar:

1. Falta de penetração;
2. Falha na raiz “Kissing bond” (devido à falta de penetração);
3. Vazios no lado em avanço (falta de pressão exercida pela base da ferramenta);
4. Óxidos e partículas de 2ª fase na superfície (concentração de precipitados).

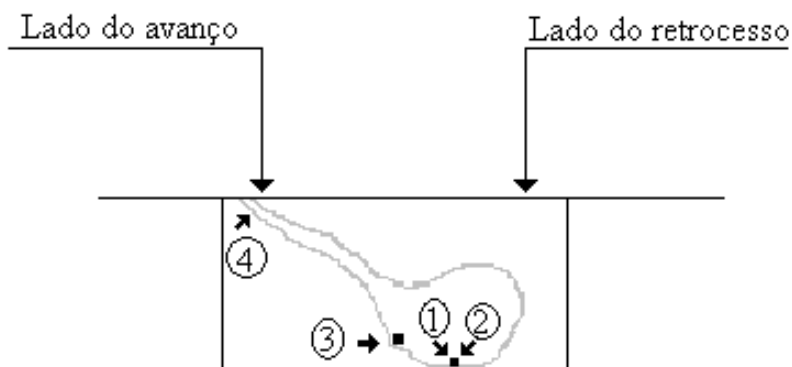


Figura 5 – Defeitos típicos da SFL

Este processo permite ainda soldar muitas configurações de junta, como indicado na figura seguinte: [2]

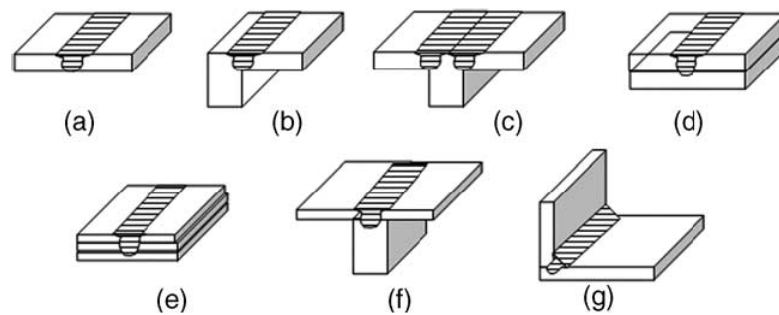


Figura 6 - Configurações de junta passíveis de serem soldadas pelo processo de SFL

(a) Junta topo-a-topo, (b) Topo-a-topo em T, (c) Junta em T com 3 peças, (d) Soldadura sobreposta, (e) Soldadura sobreposta de múltiplas peças, (f) Junta em T com duas peças e (g) Canto.

Este processo pode ser também utilizado na ligação de componentes curvos e tubulares. A gama de espessuras a soldar pode ir de 1 a 80 mm. Em peças de elevada espessura a ligação pode ser obtida com poucas passagens.

Uma boa escolha de parâmetros, no caso da SFL, permitirá obter um cordão isento de defeitos, o que resultará numa soldadura de melhor qualidade e com melhores propriedades mecânicas, que em geral é o que se pretende.

Seguidamente apresentam-se as principais **vantagens** deste processo:

- Obtenção de soldaduras com boas propriedades mecânicas.
- Composição química da soldadura semelhante à do material de base.
- Distorção reduzida nos componentes a ligar.
- Tensões residuais pouco significativas.
- Não existe necessidade da utilização de material de adição.
- Equipamentos simples, facilmente automatizados.
- Baixos consumos de energia.
- Soldaduras com poucos defeitos.
- Soldaduras com isenção de porosidades.
- Facilidade em soldar materiais com ponto de fusão diferente;
- Não necessita de mão-de-obra especializada;
- Possível de utilizar em todas as posições de soldadura e diversas configurações de junta.
- Não necessita de preparação da junta.
- Repetibilidade de qualidade em longos períodos de produção.
- Número inferior de elementos de processamento a controlar.
- Diminuição de custos de fabrico.
- Processo ambientalmente limpo.
- Aumento do tempo de vida à fadiga.
- Ferramenta não consumível.

Principais **desvantagens** deste processo:

- Elevada exigência na montagem das peças a soldar.
- Não admite velocidades de soldadura muito elevadas.
- Existência de um furo quando a ferramenta é retirada.
- Dificuldade com a variação de espessura pois para cada espessura é necessária uma ferramenta diferente.
- Dificuldades em encontrar os parâmetros ótimos de soldadura, sabendo que com a alteração do material, ferramenta ou espessura, os parâmetros alteram obrigatoriamente.
- Equipamento relativamente caro.

O processo ganhou algum destaque e no presente muitas empresas de diferentes áreas utilizam esta tecnologia em produção industrial, particularmente para unir ligas de alumínio.

Aplicações de SFL na indústria:

- Naval
- Aeroespacial
- Automóvel
- Ferroviária

2.3 Resistência à fadiga de materiais

Quando um material tem sobre ele aplicadas solicitações dinâmicas (variam com o tempo e são as mais frequentes em órgãos de máquinas), mesmo que essas solicitações tenham amplitude inferior ao limite de resistência do material, é previsível uma falha por fadiga. Quanto menor for a amplitude de tensão, maior o número de ciclos necessários para produzir a falha.

Em condições normais de uso, os componentes mecânicos devem sofrer esforços inferiores ao limite elástico do material, que corresponde à tensão máxima que o material pode suportar. Por norma, os fabricantes dimensionam os componentes de forma a estes suportarem esforços superiores a esse limite.

No entanto e apesar dos componentes se apresentarem sempre sobredimensionados, é possível que, após algum tempo de uso normal do componente, de repente, sem aviso prévio e sem motivo aparente, o componente simplesmente venha a falhar.

Essa falha é típica de um fenómeno chamado fadiga, que é um fenómeno de enfraquecimento progressivo de uma peça quando esta está sujeita a cargas dinâmicas.

“Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo (verifica-se durante um certo período de tempo) e localizado (pequenas áreas), que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, que pode culminar em fendas ou na fractura completa após um número suficiente de variações de carga (ciclos).” [8].

De forma mais abreviada, fadiga pode ser descrita como a rotura de componentes, sob uma carga inferior à carga máxima suportada pelo material, devido a solicitações cíclicas repetidas.

Como se sabe, qualquer máquina é constituída por um conjunto de componentes. Na utilização normal da máquina nunca ocorre fractura por fadiga de todos os componentes ao mesmo tempo, isto porque cada componente tem características próprias, uma das quais é o tempo de vida útil esperado.

Passamos agora à caracterização geral do processo de ruína por fadiga, que pode considerar-se dividido em quatro fases:

1. Nucleação da fissura;
2. Crescimento microscópico da fissura;
3. Propagação da Fissura;
4. Rotura final.

Numa zona crítica do material, uma pequena fenda cresce até ao ponto em que o material que resta na secção transversal não é capaz de suportar as tensões aplicadas, dando-se a fractura súbita. [8]

Para que exista iniciação e propagação de fendas por fadiga são necessárias determinadas condições no componente. A fenda pode propagar-se a partir de um defeito pré-existente no material ou numa zona de concentração de tensões na peça. Contudo, se a peça não possuir defeitos internos, a fenda inicia-se sempre na superfície da peça e na zona onde a tensão é máxima. [9]

O estudo da fadiga é importante porque a grande maioria das falhas de componentes de máquinas em serviço, se deve à fadiga. A duração de uma peça à fadiga define-se geralmente pelo número de ciclos de aplicação da carga até a rotura.

Existem vários factores que têm influência na resistência à fadiga. Uma superfície mal acabada contém irregularidades que, como se fossem um entalhe, aumentam a concentração de tensões, resultando em tensões residuais que tendem a diminuir a resistência à fadiga. O meio ambiente também influencia consideravelmente o limite de fadiga, pois a sua agressividade acelera a velocidade de propagação da fenda.

A resistência à fadiga pode ser melhorada, tendo em conta que a fadiga envolve fundamentalmente o crescimento de fendas. Assim, um processo para evitar a rotura por fadiga é evitar a iniciação de fendas. É importante minimizar a dimensão inicial de defeitos quando se pretende obter uma boa resistência à fadiga. Por um lado, sempre que possível, deve evitar-se a concentração de tensões, por outro lado, tratamentos superficiais endurecedores podem aumentar a resistência à fadiga. Um tratamento térmico adequado aumenta também o limite de fadiga. [9]

A resistência à fadiga é avaliada através dos ensaios de fadiga.

2.4 Resistência à fadiga em ligações soldadas por fricção linear

Sendo o principal objectivo deste trabalho a análise do comportamento à fadiga de juntas soldadas por fricção linear da liga de alumínio AA6082-T651, realizou-se uma pesquisa nesse sentido.

Sabendo que existem muitas aplicações onde a resistência do material à fadiga é crucial, é importante compreender o comportamento das juntas efectuadas por SFL, devido à sua potencialidade numa vasta gama de aplicações em engenharia. Isto levou a um crescimento do interesse na investigação acerca da avaliação do comportamento à fadiga de juntas efectuadas por SFL. Muitos estudos levados a cabo nos últimos anos mostram que a resistência à fadiga de juntas de SFL é menor do que a do material base, logo essas juntas são susceptíveis a rotura por fadiga. Apesar disso, a resistência à fadiga dessas juntas é maior do que a de processos convencionais de fusão tais como a soldadura MIG e Laser. [2]

Hori et al [10] verificaram que a vida à fadiga de juntas efectuadas por SFL, era dependente da relação velocidade de avanço / velocidade de rotação da ferramenta e que a resistência à fadiga diminui com o aumento desta relação.

Caizhi Zhou et al [17] determinaram a influência de defeitos na fadiga de SFL e concluíram que a resistência à fadiga das soldaduras com defeito é menor do que a resistência das mesmas sem defeito.

Os resultados globais de resistência à fadiga de juntas de SFL de ligas de alumínio são muito encorajadores. As principais razões que levam a uma boa resistência à fadiga destas juntas são: [11]

- Baixa porosidade;
- Grão fino na zona da junta;
- Bom acabamento superficial;
- Baixa concentração de tensões residuais.

Para solicitações de amplitude de tensão variável ainda não existem dados para tirar qualquer conclusão. Este trabalho tem como um dos objectivos verificar a resistência à fadiga do alumínio AA6082-T651 quando solicitado por uma tensão de amplitude variável.

2.5 Lei de Miner

Para a realização e compreensão deste trabalho é de extrema importância conhecer a lei de Miner.

Esta lei deve ser encarada como uma aproximação útil, muito fácil de aplicar, que poderá ser suficientemente precisa para utilizar em projecto.

A lei de Miner pode ser utilizada para verificar o tempo de vida à fadiga de um certo componente, quando este está sujeito a solicitações de amplitude variável. Esta lei prevê uma acumulação de dano na ordem da unidade no momento da falha por fadiga. É de esperar que tratando-se de uma soldadura o valor do dano no momento da falha seja inferior à unidade. Como o objectivo deste trabalho é saber para que valor se prevê a falha por fadiga de um componente soldado pelo processo SFL realizado em AA6082-T651, esse valor será obtido depois de feitos os ensaios de fadiga com amplitudes variáveis em provetes soldados por fricção linear.

A abordagem baseada nas curvas S-N é aplicada em conjunto com uma lei de acumulação de dano, sendo a lei linear de Miner a escolha mais comum, em detrimento de outras leis mais complexas, embora eventualmente mais realistas.

Segundo a lei de Miner, cada bloco a amplitude de tensão constante, provoca um determinado dano no material. Os danos acumulam-se e a rotura por fadiga ocorre se a soma dos danos ultrapassar a unidade. Assim, no caso geral, para n blocos, a rotura por fadiga não ocorre se for satisfeita a seguinte equação: [13]

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} < 1 \quad (1)$$

onde:

- n_1, n_2, \dots, n_n são o número de ciclos a amplitude de tensão $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, aplicados ao componente;
- $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ são o número de ciclos até a rotura correspondente à amplitude de tensão aplicada $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ (curva S-N admissível);
- A razão $\frac{n_i}{N_i}$ é a fracção de vida à fadiga correspondente a cada bloco (dano).

3 Material

Para a realização do presente trabalho foi utilizada uma chapa de alumínio com 4mm de espessura, da liga AA6082-T651, contendo uma junta soldada por fricção linear.

O alumínio é um metal macio, de baixo peso, normalmente com uma aparência cinza prateado e fosco causada por uma camada fina de oxidação que se forma rapidamente após o metal ser exposto ao ar.

O alumínio não é tóxico nem magnético. Tem uma tensão de cedência que varia entre os 19 MPa no estado puro os 400 MPa em determinadas ligas. Tem cerca de 1/3 da densidade do aço e do cobre, é muito maleável, dúctil, facilmente maquinável e apto para fundição. Possui uma excelente resistência à corrosão, devido à camada de óxidos protectora que forma, é fácil de maquinar e pode ser reciclado várias vezes sem deterioração das propriedades, o que garante uma reutilização e recuperação de grande parte do investimento inicial, beneficiando o ambiente por uma menor produção de resíduos e menor utilização das matérias-primas.

Na indústria automóvel são cada vez mais procurados materiais que permitam produzir estruturas com baixa densidade, devido ao facto de o baixo peso do material ser uma grande vantagem. Sabendo que o consumo de combustível por parte do veículo aumenta proporcionalmente com o peso, um veículo com menor peso tem um consumo de combustível inferior, logo polui menos o que é bom em termos ambientais e leva a um menor custo por km percorrido.

Na indústria automóvel os fabricantes procuram materiais com baixos custos e que sejam duráveis e tolerantes a danos. As ligas leves têm assim o caminho aberto para serem um dos principais elementos estruturais nesta indústria. Dentro deste grupo o alumínio é vastamente usado devido à conjugação das suas boas propriedades mecânicas, aliado ao baixo peso e à sua boa resistência à corrosão

A liga de alumínio 6082 [14], é uma liga com excelente resistência à corrosão, é conhecida como uma liga estrutural e é muito utilizada em maquinaria e em aplicações soldadas.

A adição de magnésio e silício promove a capacidade desta liga para o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, com o objectivo de aumentar a sua resistência mecânica.

Na liga 6082 estudada foi efectuado um tratamento térmico, alívio de tensões por alongamento e em seguida um envelhecimento artificial (T651).

Nas tabelas que se seguem apresentam-se a composição química, propriedades físicas e mecânicas desta liga.

Tabela 1 – Composição química de AA6082-T651

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
% presente	0,7 a 1,3%	0,5%	0,1%	0,4 a 1%	0,6 a 1,2%	0,2%	0,1%	0,25%	Restante

Tabela 2 – Propriedades Físicas de AA6082-T651

Propriedade	Densidade	Ponto de Fusão	Módulo de elasticidade
Valor	2,70 g/cm ³	555°C	70 Gpa
Propriedade	Resistividade eléctrica	Condutividade térmica	Expansão térmica
Valor	0.038x10 ⁻⁶ Ω.m	180 W/m.K	24x10 ⁻⁶ /K

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de AA6082-T651

Propriedade	Tensão de cedência 0,2%	Resistência à tracção	Resistência ao corte	Alongamento A5	Dureza Vickers
Valor	310 (Mpa)	340 (Mpa)	210 (Mpa)	0,11	100 Hv



Figura 7 – Chapa inicial do alumínio utilizado

3.1 Preparação do material para o ensaio de fadiga e estudos efectuados

Para se poder realizar o ensaio de fadiga e se efectuarem alguns estudos do material soldado é necessário, em primeiro lugar, realizar as seguintes operações:

- Corte da chapa em peças com forma rectangular 330 x 80 (mm);
- Elaboração da ferramenta necessária para soldar a chapa;
- Montagem das peças a soldar e da ferramenta na máquina;
- Soldadura das peças;
- Corte em guilhotina de provetes da chapa soldada;
- Maquinagem das faces laterais dos provetes;
- Afagamento das faces laterais.

3.1.1 Ferramenta utilizada na soldadura

Neste subcapítulo irá resumir-se a importância da ferramenta neste processo assim como as suas características mais influentes. Já foi anteriormente mostrado o objectivo das principais componentes da ferramenta, por isso este subcapítulo trata de completar alguns aspectos que não foram aprofundados.

Sabendo que os dois principais objectivos da ferramenta são: aquecer os elementos a soldar através do calor gerado por fricção entre a ferramenta e a peça e movimentar o material para que este se possa unir, isto implica que a geometria da ferramenta seja um aspecto muito influente neste processo de soldadura.

A geometria do pino tem uma influência grande na mistura do material, pois regula o fluxo em torno do pino.

As propriedades e a uniformidade da microestrutura da soldadura são regidas pela geometria da ferramenta. Uma ferramenta de boa qualidade pode melhorar e muito a qualidade da soldadura e a velocidade máxima possível do processo.

O material utilizado na ferramenta é outro aspecto muito importante pois tem de ter adequada dureza, boa resistência a altas temperaturas, resistência ao desgaste e à oxidação, bem como, baixa condutividade térmica para minimizar a perda de calor.

Neste processo a ferramenta não é consumida o que é uma grande vantagem em relação a outros processos de soldadura, mas em contrapartida é necessária uma ferramenta para cada espessura e material a soldar.

Com o aumento da experiência e um melhor conhecimento do escoamento do material, a geometria da ferramenta tem evoluído significativamente.

A ferramenta utilizada foi construída no DEM e está representada na figura seguinte:



Figura 8 – Ferramenta utilizada no processo de SFL

Foram utilizadas duas geometrias de ferramenta na qual apenas varia o ângulo da base da ferramenta.

As principais características da ferramenta são:

- Pino com 3,9 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro.
- Base da ferramenta com um ângulo de 2° e 5° e 16mm de diametro.

Encontra-se em anexo [8.2] o desenho à escala e cotado da ferramenta.

3.1.2 Elaboração da soldadura

Para ser realizada a soldadura a chapa de alumínio teve de ser primeiramente cortada, sendo a orientação do corte relativamente à direcção de laminagem.

O corte da chapa foi realizado de forma a obterem-se peças rectangulares com 330 mm de comprimento e 80 mm de largura para que seja mais fácil efectuar a soldadura e para que posteriormente seja mais fácil a obtenção dos provetes para os ensaios de fadiga.

A máquina utilizada para o processo foi uma fresadora convencional que se encontra na oficina do DEM e está ilustrada na figura seguinte.



Figura 9 – Máquina utilizada no processo de SFL

Antes de se realizar a soldadura final que será utilizada para a elaboração de provetes, onde se vão efectuar os estudos do material já indicados neste trabalho e os ensaios de fadiga, efectuaram-se experimentalmente alguns cordões de soldadura. Tal foi feito com o objectivo de, após a observação desses cordões, principalmente o seu acabamento superficial e a existência de fissuras visíveis, otimizar os parâmetros de soldadura: velocidade de avanço, velocidade de rotação e ângulo da ferramenta.

Para se elaborar um cordão de soldadura é necessário certificar que o material a soldar se encontra bem montado e que não irá movimentar-se durante a soldadura. A ferramenta tem de se encontrar exactamente centrada com a linha de soldadura e na superfície da peça. A profundidade que o pino penetra é um dos aspectos cruciais deste processo. Se o pino não penetrar o suficiente a soldadura sairá com defeitos. Uma vez que a máquina não tem controlo de carga, é necessário observar se a base da ferramenta está a fazer pressão suficiente sobre as peças antes de se dar início ao processo.

A figura seguinte mostra as chapas e a ferramenta já preparadas para se dar início ao processo de soldadura.

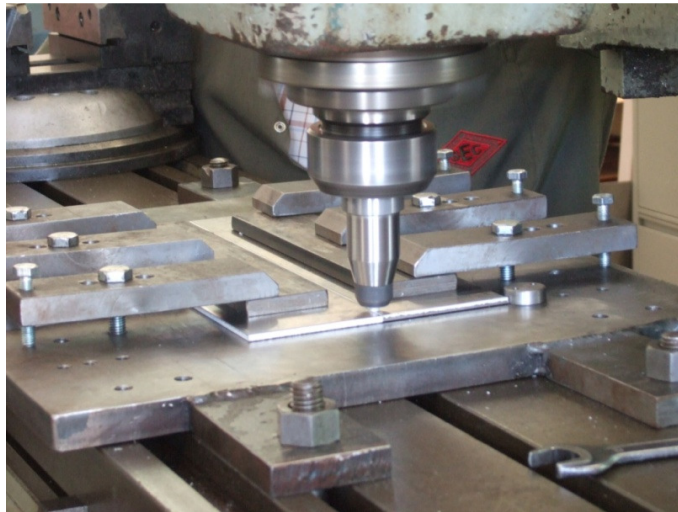


Figura 10 – Início do processo de SFL

Na tabela seguinte estão representados os parâmetros utilizados nas soldaduras efectuadas:

Tabela 4 – Parâmetros utilizados na SFL

Soldadura	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Ângulo máquina (°)	Profundidade (mm)	Ângulo da base da ferramenta (°)	Observações
1	1140	300	2	3,9	2	
2	1500	600	2	3,9	2	
3	1500	600	2	3,9	2	
4	1140	300	3	3,9	5	
5	1500	600	3	3,9	5	
6	1500	300	2	4,1	5	
7 e 8	1500	300	2	4,15	5	2 Passagens

A figura seguinte mostra o processo de SFL na sua fase final de realização.



Figura 11 – Processo de SFL realizado

A peça final soldada está aqui representada:

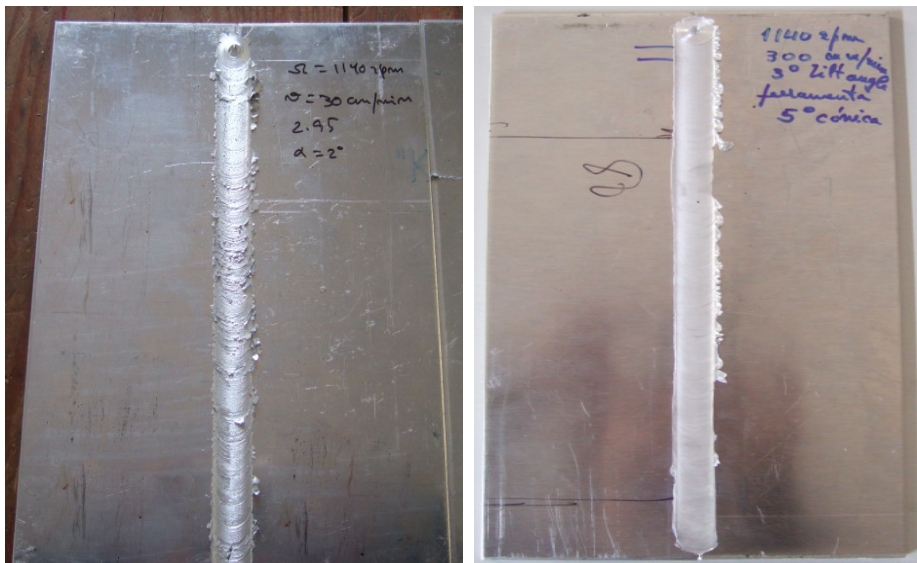


Figura 12 – Exemplo de soldaduras efectuadas

3.1.3 Preparação do corpo de prova para o ensaio de fadiga

O ensaio é efectuado em corpos de prova retirados das soldaduras efectuadas nas chapas de alumínio.

Após a realização da soldadura, foi necessário extrair os provetes da chapa soldada. Para tal recorreu-se à guilhotina. Efectuou-se o corte da chapa em pequenos provetes com largura adequada à execução dos ensaios de fadiga (cerca de 15mm).

A figura seguinte mostra uma chapa de alumínio soldada, já cortada em pequenos provetes pela guilhotina:

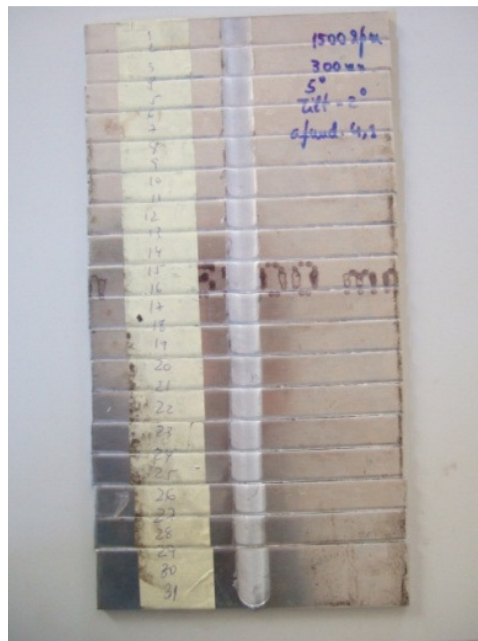


Figura 13 – Chapa com a soldadura 6 já cortada pela guilhotina

Após o corte pela guilhotina foram numerados todos os provetes para que seja possível saber a que soldadura pertencem e situá-los na soldadura, uma vez que podem existir diferenças ao nível de defeitos entre um provete do início da soldadura e um da zona final. O esquema onde se pode ver a numeração dos provetes encontra-se na secção 8.1.

Sabendo que a guilhotina efectua um corte com algumas imperfeições, conclui-se que seria melhor rectificar os provetes. Para que os provetes pudessem ser bem rectificados, sofreram um afagamento das arestas e da apara que se encontrava no cordão da soldadura, assim como foram endireitados, uma vez que após o corte da guilhotina os provetes se encontravam um pouco torcidos. Após a rectificação voltou-se a afagar ligeiramente as arestas dos provetes.

A figura seguinte mostra um provete preparado para que seja efectuado o ensaio de fadiga:

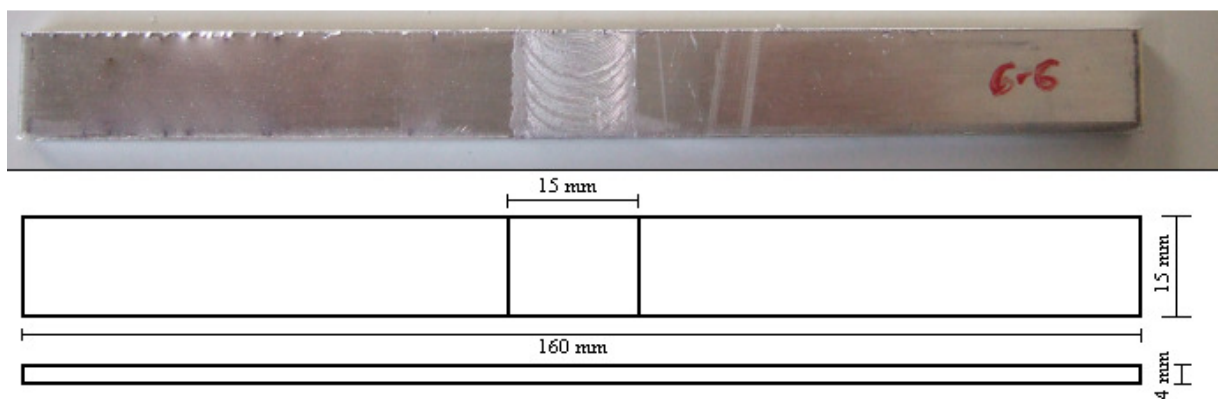


Figura 14 – Provete utilizado no ensaio de fadiga

4 Estudos efectuados

Após a realização das soldaduras foram retiradas amostras para que sejam efectuados estudos do material, amostras essas que estão identificadas na secção 8.1.

Os estudos do material efectuados foram os seguintes:

- Caracterização visual das superfícies;
- Análise microestrutural;
- Medição de durezas;

De seguida faz-se uma breve descrição dos estudos efectuados, apresentam-se os resultados obtidos e as conclusões retiradas.

4.1 Caracterização visual das superfícies

Uma vez que foram efectuadas soldaduras com ferramentas de geometrias diferentes, as soldaduras apresentam aspectos visuais diferentes. Após a realização das soldaduras observaram-se os cordões de soldadura que estão representados nas figuras seguintes:



Figura 15 – Aspecto visual da soldadura efectuada com a ferramenta de ângulo da base de 2° e 5° respectivamente.

Esta análise constitui apenas uma interpretação qualitativa ao nível da superfície dos cordões obtidos através das diferentes ferramentas. É fácil verificar que para o caso do alumínio em estudo a ferramenta com um ângulo da base de 5° apresenta um melhor acabamento superficial assim como menos rebarba devido ao facto de o material sofrer uma pressão menor com esta ferramenta, o que leva a ser menos material expelido para a periferia da ferramenta. O acabamento melhora pois o material apresenta maior facilidade de escoamento devido à existência de maior área livre entre a base da ferramenta e a chapa a soldar.

4.2 Análise metalográfica (micrografia e macrografia)

Uma definição possível para análise metalográfica é o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para relacioná-los com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Para se conseguir relacionar a estrutura observada ao microscópio com as propriedades mecânicas, deve-se seguir uma linha mais ou menos definida de procedimentos, que é o que se designa por análise metalográfica. Encontra-se em anexo (8.2) o procedimento experimental efectuado.

Metalografia é um dos métodos mais usados em metalurgia para a caracterização das microestruturas dos materiais e a microscopia óptica é uma das técnicas mais utilizadas para a obtenção de imagens da microestrutura dos materiais.

A análise macrográfica tem como objectivo caracterizar a zona de ligação, enquanto a análise micrográfica dispõe-se a caracterizar mais detalhadamente determinadas zonas da soldadura, de forma a dar a conhecer a morfologia do grão e suas alterações com a soldadura.

A análise metalográfica realizada nas amostras das diferentes soldaduras em estudo, tem como principal objectivo observar alterações no material em consequência das diferentes condições de soldadura. Quer-se ainda observar a possível existência de defeitos na soldadura e quantificar o tamanho desses defeitos para verificar se terão influência no comportamento à fadiga do material. Todas as amostras são relativas à secção transversal da soldadura.

A tabela que se encontra de seguida serve de legenda a todas as figuras.

Tabela 5 – Legenda das micrografias

Legenda	Designação
1	Lado do avanço parte superior
2	Lado do avanço parte inferior
3	Lado do avanço parte inferior
4	Lado em retrocesso parte inferior
5	Lado em retrocesso parte superior
6	Nugget
9	Material base

Seguidamente irão apresentar-se os resultados obtidos nas diferentes análises metalográficas. Optou-se por começar pela apresentação das soldaduras com defeito as quais não foram utilizadas nos ensaios à fadiga do material:

Soldadura 2

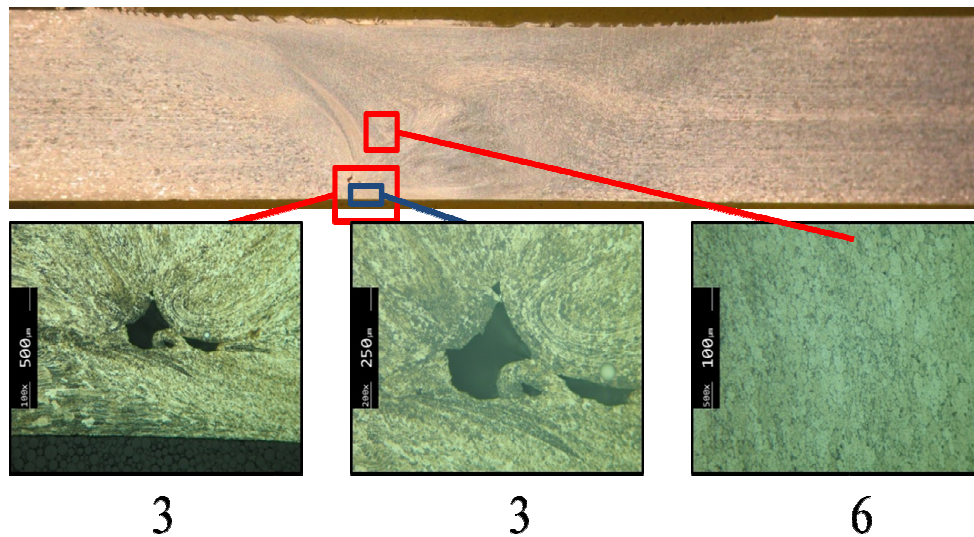


Figura 16 – Análise metalográfica da soldadura 2

Soldadura 4

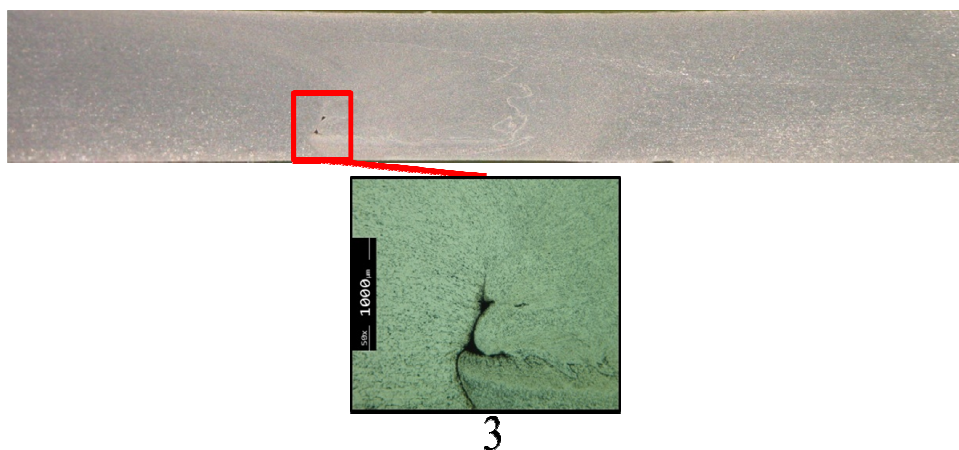


Figura 17 – Análise metalográfica da soldadura 4

Soldadura 5

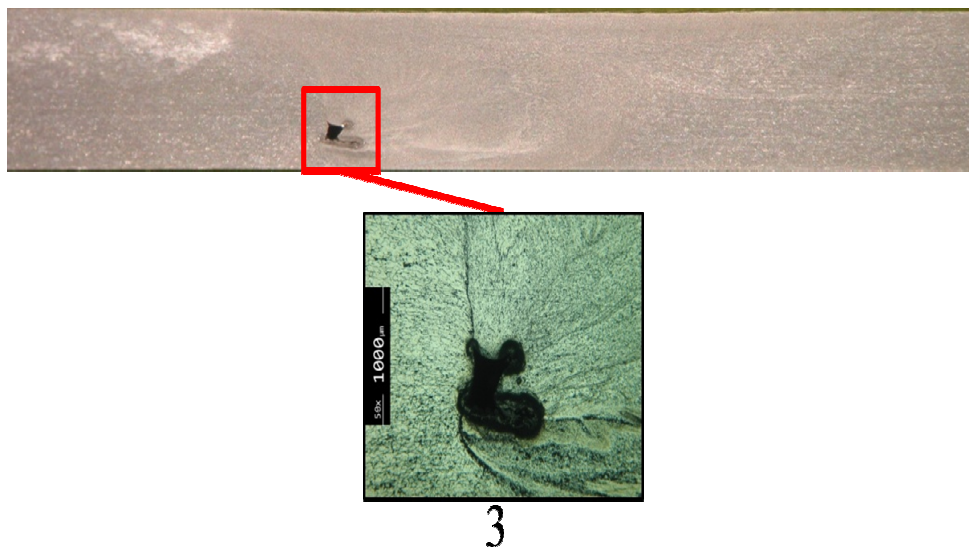


Figura 18 – Análise metalográfica da soldadura 5

Passando agora à análise dos resultados obtidos, como se pode observar nas figuras (Figura 16, Figura 17 e Figura 18) as soldaduras (2, 4 e 5) apresentam um defeito situado na mesma zona da soldadura, este defeito é designado por “vazios internos do lado do avanço” e aparece em forma de canal longitudinal contínuo na direcção da soldadura. Como pode ser verificado, este tipo de defeito ocorre do lado do avanço na zona inferior do nugget junto à ZATM. A causa principal para a ocorrência deste defeito é a falta de pressão exercida pela base da ferramenta na soldadura que pode dever-se ao facto do ângulo da base da ferramenta não ser adequado para este tipo de material ou o pino não ter o comprimento apropriado para a espessura em questão.

Verificou-se que este defeito diminui ao longo da soldadura sendo maior no início da mesma e apresenta menores dimensões no final. Isto pode dever-se ao facto de no início a soldadura estar a ser efectuada a menor temperatura (regime transitório), a temperatura da soldadura vai aumentando ao longo da soldadura até ficar constante.

Apresentam-se agora as soldaduras das quais foram executados provetes para os ensaios de fadiga:

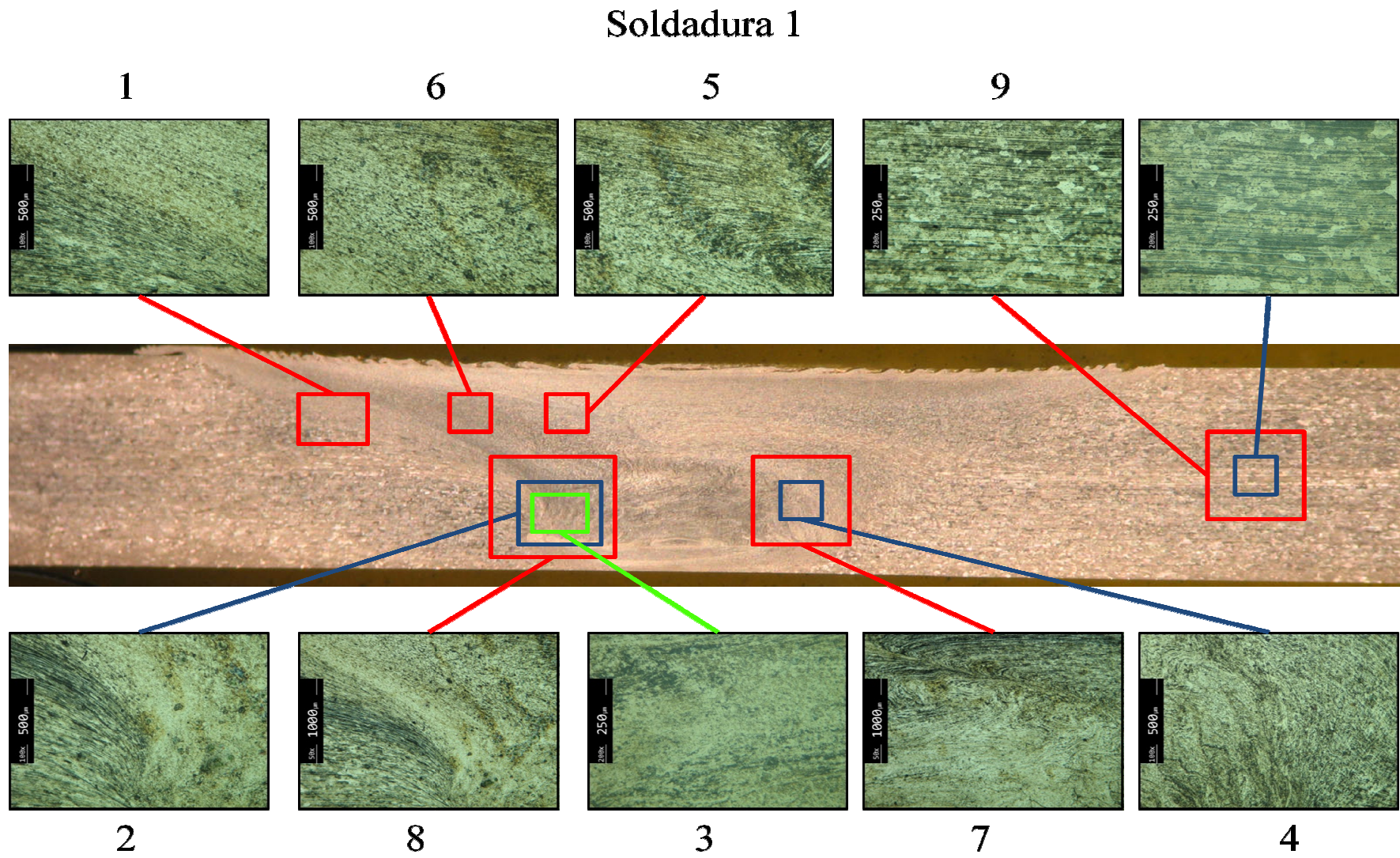


Figura 19 – Análise metalográfica da soldadura 1

Soldadura 3

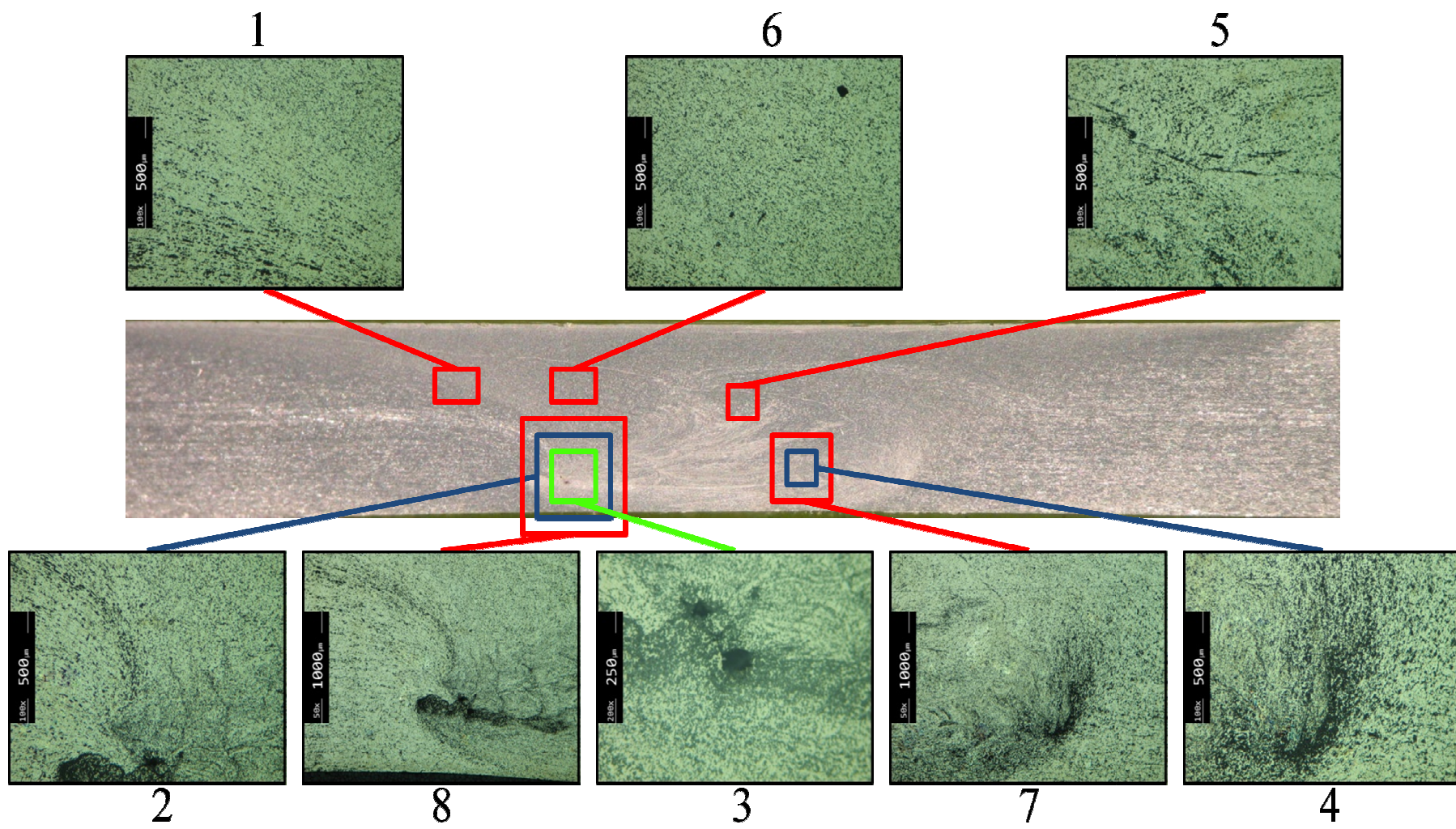


Figura 20 – Análise metalográfica da soldadura 3

Soldadura 6

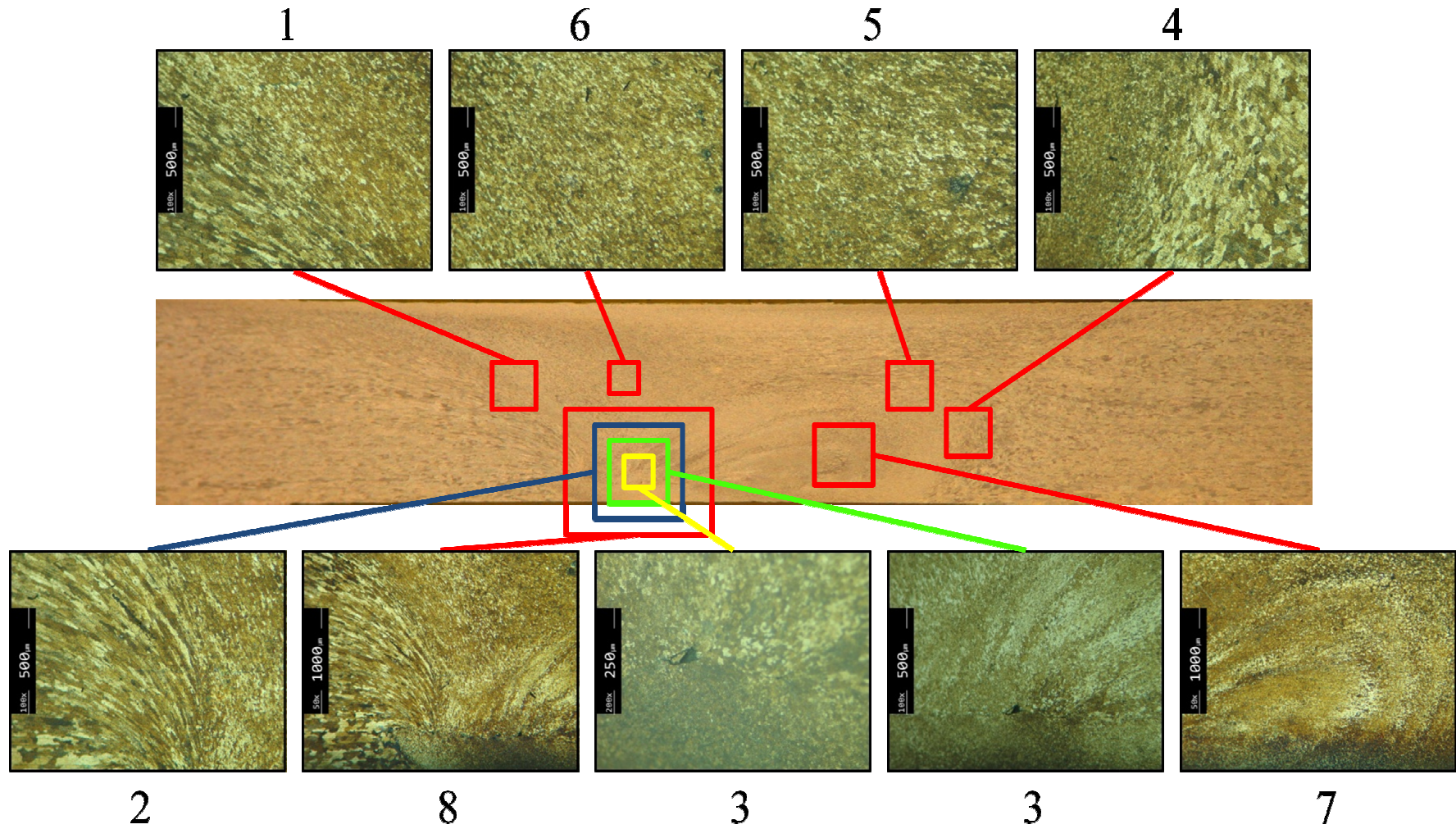


Figura 21 – Análise metalográfica da soldadura 6

Soldadura 7

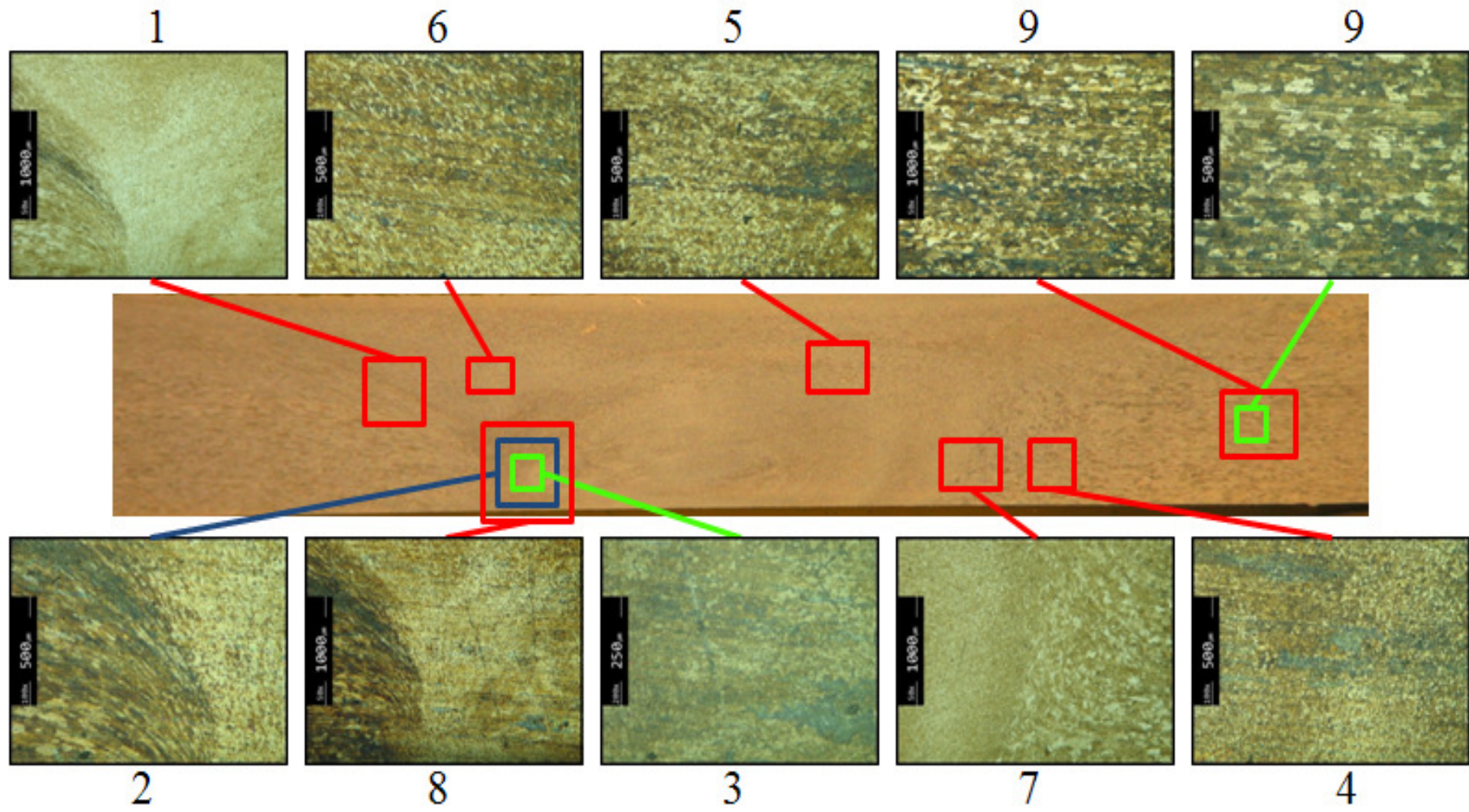


Figura 22 – Análise metalográfica da soldadura 7

Soldadura 8

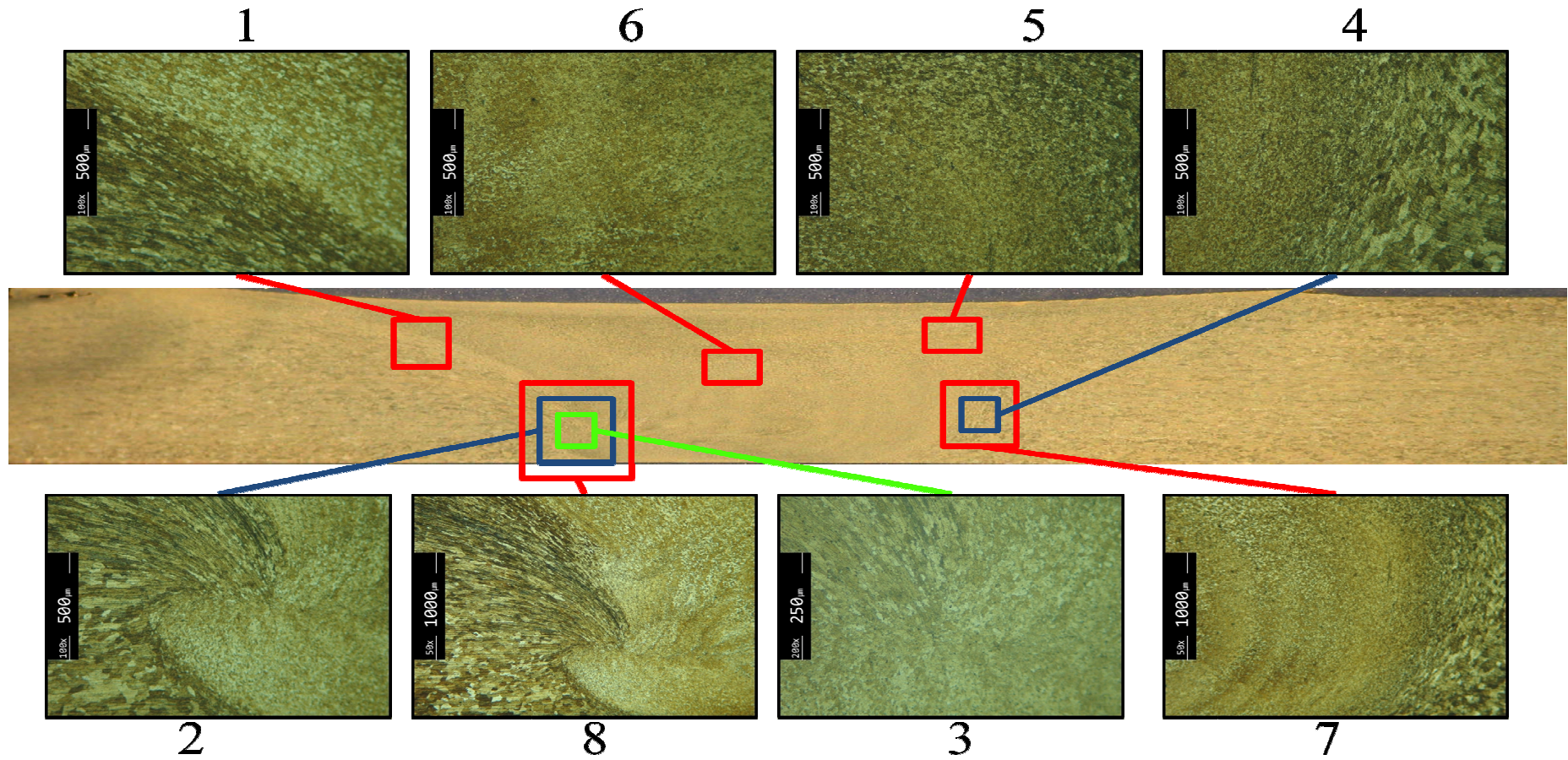


Figura 23 – Análise metalográfica da soldadura 8

Através da análise dos resultados obtidos consegue-se observar nas macrografias todas as estruturas típicas da SFL, o Nugget, ZATM, ZAC e o MB são facilmente identificáveis, tal como tinha sido visto na Figura 4.

A zona do **Nugget** apresenta um grão mais refinado, com uma distribuição mais homogênea resultado da recristalização dinâmica (combinação entre elevadas temperaturas e taxas de deformação) resultado da passagem da ferramenta durante o processo. Esta estrutura recristalizada tem como características um nível baixo de tensões residuais, excelente ductilidade, e propriedades mecânicas superiores às da zona afectada pelo calor ZAC [18].

O nugget pode ser identificado pela sua estrutura mais regular devido ao grão mais fino e à distribuição granulométrica mais homogênea, com uma cauda que se dirige para a periferia da base do avanço.

Na zona do nugget é visível a presença de anéis concêntricos, chamados de “Onion rings”, que são uma característica típica do processo de SFL e mostram o mecanismo complexo do processo: combinação da rotação, movimento vertical e horizontal do material plasticizado [19].

A altura, largura e forma do nugget variam com os diferentes parâmetros e ferramentas utilizadas.

A **ZATM** (zona afectada termo-mecanicamente), é a região que rodeia o nugget, esta zona apresenta um tamanho de grão diferente à zona do nugget pois apesar de ter sofrido um tratamento térmico devido às altas temperaturas da soldadura não sofreu deformação plástica. Essa diferença é bem evidenciada na zona de fronteira com o nugget.

É uma zona formada por grãos não homogêneos, e coincide com a zona de menor dureza do material como poderá ser verificado nas medições de dureza.

A **ZAC** (zona afectada pelo calor) é a zona que se segue à ZATM e apresenta uma estrutura semelhante ao MB (material base) mas com uma tonalidade mais clara.

Esta zona é menos afectada pelo calor que a ZATM.

A ZATM e a ZAC são identificáveis devido à diferença de tonalidade que se obteve com o ataque químico. A ZATM é um pouco mais escura e apresenta menor tamanho de grão.

O **MB** (material base) apresenta uma estrutura anisotrópica.

Caso a dureza não sofra redução, como o tamanho de grão é mais pequeno na zona da soldadura do que no material base, vai beneficiar o comportamento à fadiga do material, aumentando o tempo de iniciação de fissuras e aumentando a resistência ao crescimento das fissuras.

4.3 Medição de dureza

Os ensaios de dureza têm como objectivo medir a resistência à indentação quando se aplica uma determinada carga no material.

A dureza Vickers baseia-se na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada pela área de impressão deixada no corpo ensaiado.

Pretendeu-se, durante esta parte do trabalho, obter um perfil de dureza Vickers ao longo da secção transversal do material, desde o material de base de uma chapa até ao material de base da outra, passando pelas zonas afectadas pelo calor da soldadura (ZAC e ZATM) e nugget, obtendo assim o perfil de durezas de SFL. As amostras utilizadas foram as mesmas utilizadas durante a análise metalográfica. Nestas amostras realizaram-se medições, no centro da secção transversal, e a 0,5mm do topo e da base, realizando identações distanciadas de 1mm e com uma carga de 1,961 N, ou seja Hv de 0,2. O procedimento experimental encontra-se apresentado em anexo (8.4).

O esquema seguinte representa todas as medições de soldaduras efectuadas:

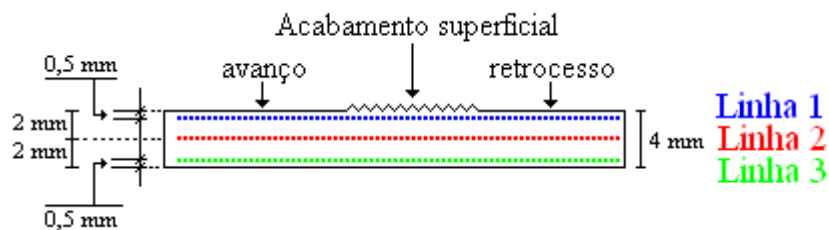


Figura 24 – Esquema das medições de durezas efectuadas

Nos gráficos de dureza, S identifica a soldadura e L a linha.

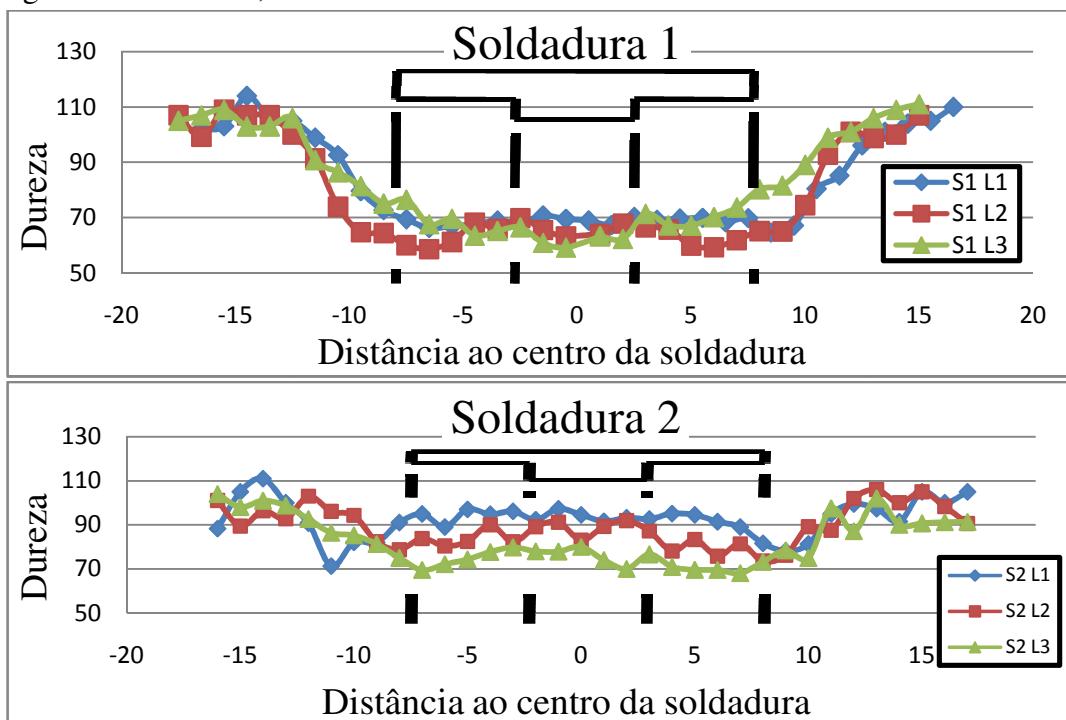


Figura 25 – Dureza da soldadura 1 e 2

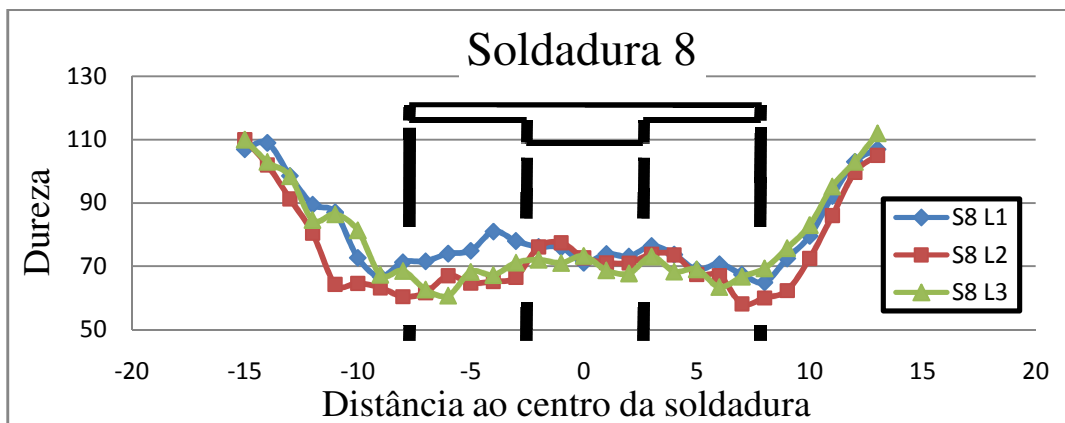
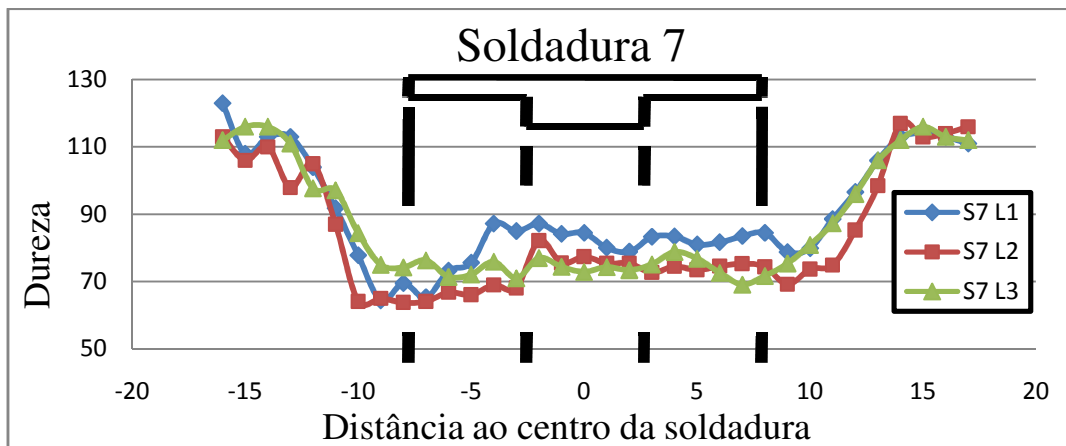
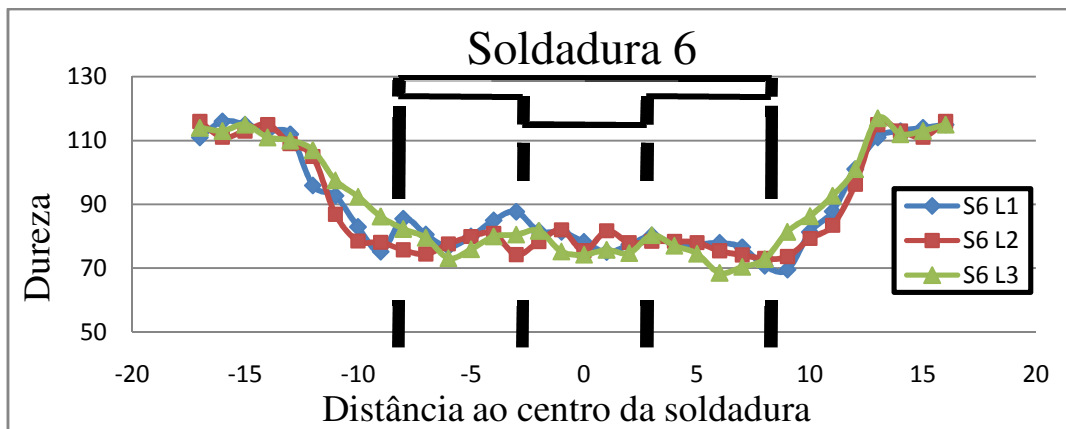
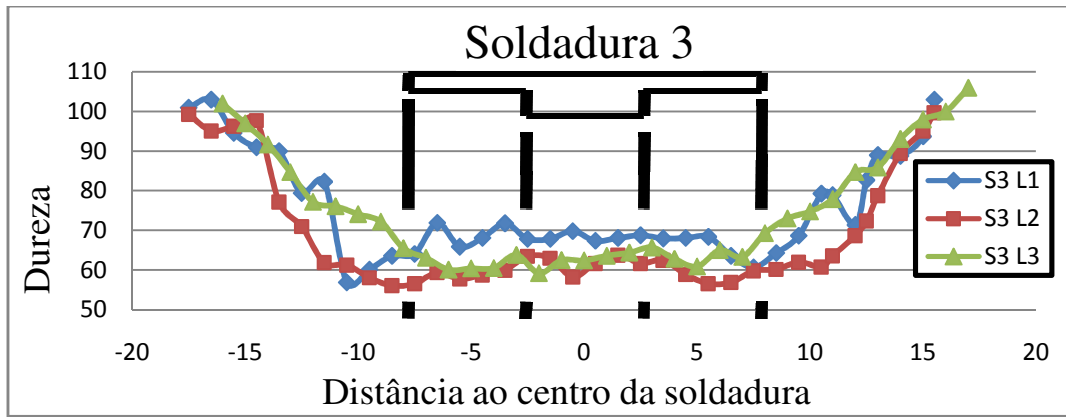


Figura 26 – Dureza da soldadura 3, 6, 7, e 8

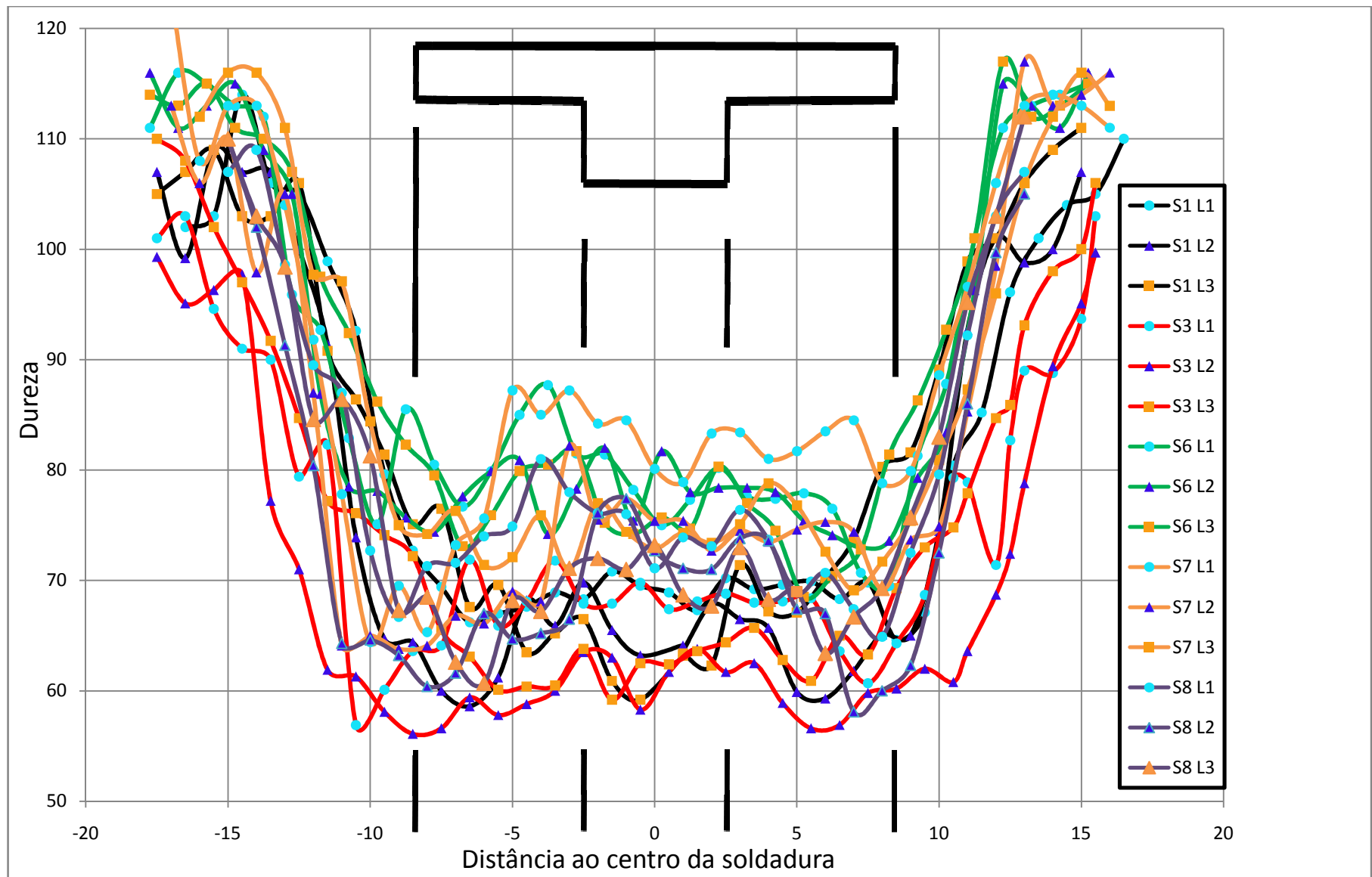


Figura 27 – Comparação das durezas obtidas

Principais conclusões que podem ser retiradas das medições de dureza efectuadas:

O principal objectivo de medir as durezas é saber qual a dureza mínima e a que zona do material pertence, pois sabe-se que a dureza é um factor importante na vida à fadiga dos materiais.

Como se pode observar nos gráficos acima apresentados o gráfico referente à soldadura 2 apresenta uma geometria e valores completamente diferentes das outras medições efectuadas, isto deve-se ao facto da amostra analisada ter sido retirada do início da soldadura e todas as outras terem sido retiradas do final da soldadura. A dureza é superior quando comparada as outras soldaduras. Isto deve-se ao facto de no início o processo ainda se encontrar em regime transitório, logo a temperatura é mais baixa e para valores mais baixos de temperatura o material é menos afectado termicamente por isso apresenta valores mais elevados e menos constantes de dureza.

As soldaduras 1 e 3 apresentam um perfil de durezas idêntico às soldaduras 6 e 7 mas com valores de dureza inferior. Isto deve-se ao facto das soldaduras terem sido efectuadas pela ferramenta com ângulo de base menor sendo que nas soldaduras 1 e 3 o ângulo da base era de 2° e nas soldaduras 6 e 7 de 5°. Como é fácil de perceber a ferramenta com ângulo de base de 2° para uma igual pressão actua sobre uma maior área de contacto (maior trabalho realizado pelas forças de atrito) o que leva a um maior aquecimento do material que irá apresentar menor dureza, como se verifica nos gráficos.

Quando se comparam as soldaduras 1 e 3 verifica-se que apresentam valores de dureza mínima idênticos. Tendo em conta que estas soldaduras têm diferentes relações de velocidade de rotação/avanço, verifica-se que a dureza não varia muito quando se varia a relação velocidade de rotação/velocidade de avanço.

Entre a soldadura 6 e 7/8 verifica-se que a soldadura 7/8 apresenta valores inferiores de dureza devendo-se ao facto da soldadura 7/8 ter sido efectuada com 2 passagens. Logo, o material sofreu 2 variações de temperatura o que levou a baixar mais a sua dureza.

Todas as soldaduras apresentam um valor mínimo de dureza na zona de interface entre a ZAC e a ZATM; isto deve-se ao facto dessa ser a zona mais quente. A zona do nugget apresenta valores inferiores de dureza quando comparada ao material base. Comparando os perfis L₁, L₂ e L₃ verifica-se que os maiores valores de dureza encontram-se no topo e na base (linhas 1 e 3 respectivamente). A linha 2 analisada (referente ao centro da soldadura) apresenta valores mais baixos de dureza, devido ao facto de na linha 1 e 3 o calor gerado ser mais facilmente libertado para o exterior enquanto que na linha 2 o material se encontra mais tempo a uma temperatura elevada.

Os gráficos que se seguem dizem respeito a resultados obtidos na mesma liga por outros autores, e servem para comparação com os resultados obtidos neste trabalho:

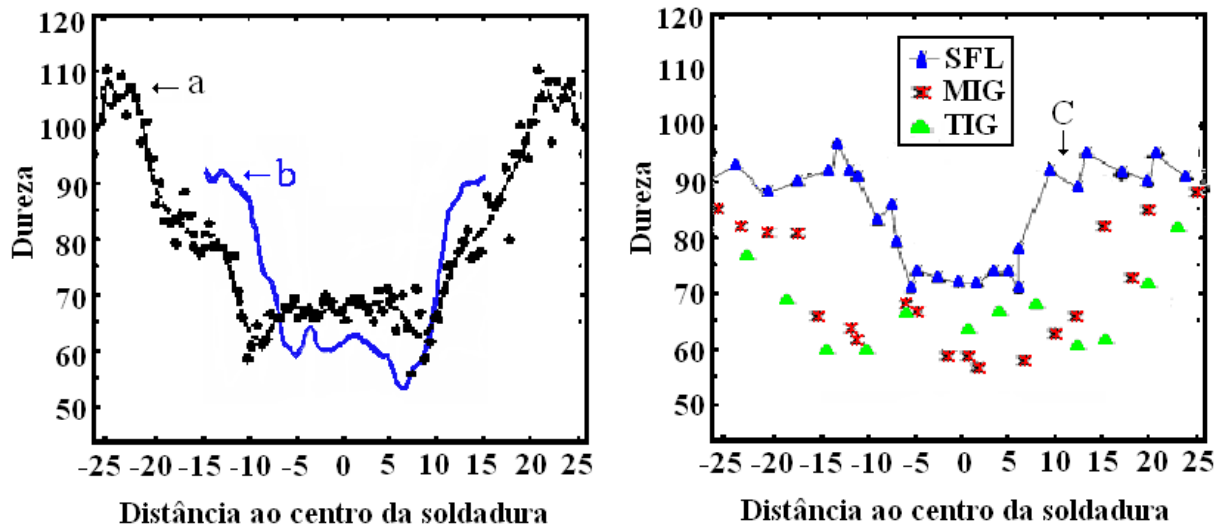


Figura 28 – Medições de dureza efectuadas por outros autores a) [30] b) [31] e c) [7].

Analisando os resultados obtidos neste trabalho e os resultados obtidos por outros autores para a mesma liga de alumínio, pode afirmar-se que são semelhantes variando entre um mínimo de 50 Hv para a ZATM e 110 para o material base. Ao comparar os resultados da SFL com os da soldadura TIG e MIG verifica-se que a perda de dureza é menor na SFL. Logo é provável que a SFL tenha um melhor comportamento à fadiga.

5 Ensaios mecânicos do material

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais é feita através de ensaios mecânicos. As propriedades dos materiais que são obtidas através dos ensaios são fundamentais para o dimensionamento de elementos estruturais.

Os ensaios são ferramentas que são utilizadas para verificar uma determinada característica ou propriedade de um material. Sabe-se que os ensaios não indicam propriedades de uma maneira absoluta, porque não reproduzem totalmente os esforços a que uma peça é submetida em serviço, mas, tem-se uma boa noção do comportamento de determinados materiais sob carregamentos específicos e para que isto ocorra realmente é necessário seguir-se regras e procedimentos.

Um dos objectivos dos ensaios mecânicos é gerar informação técnica para consulta e comparação, servindo de base de dados para uma correcta determinação de qual material utilizar num determinado projecto de engenharia.

Para qualquer projecto de engenharia deve-se conhecer e dominar as características, propriedades e, principalmente, o comportamento dos materiais.

Utilizam-se normalmente corpos de prova (amostra representativa do material) para o ensaio mecânico, já que por razões técnicas e económicas não é praticável realizar o ensaio na própria peça, que seria o ideal.

Como o objectivo deste trabalho passa por obter as curvas de fadiga (S-N) a usar em projecto de estruturas soldadas por SFL, e conhecer qual o valor de dano acumulado a usar nas previsões de vida à fadiga de estruturas solicitadas a carregamentos de amplitude variável, neste capítulo faz-se uma breve introdução ao ensaio de fadiga que será efectuado. No final deste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios.

5.1 Ensaio de fadiga

Neste subcapítulo irá explicar-se o princípio dos ensaios de fadiga e como são efectuados.

O comportamento dos materiais em termos de resistência à fadiga é avaliado mediante os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, realizados em provetes do material ou nas próprias peças. Os ensaios em provetes só têm praticamente interesse comparativo pois a peça terá uma geometria muito diferente, o que irá alterar o comportamento do material à fadiga.

São ensaios muito utilizados na indústria automóvel e aeronáutica na fase de projecto.

O ensaio de resistência à fadiga é uma forma de especificar limites de tensão e tempo de uso de uma peça ou elemento de máquina. É utilizado também para definir aplicações de materiais.

Os aparelhos de ensaio de fadiga são constituídos por um sistema de aplicação de cargas, que permite alterar a intensidade e o sentido do esforço, e por um contador de número de ciclos. O teste é interrompido assim que o corpo de prova se rompe.

Os ensaios são realizados de acordo com o tipo de solicitação que se deseja aplicar:

- Torção alternada;
- Tração-compressão;
- Flexão plana;
- Flexão rotativa.

Os ensaios de fadiga foram efectuados na máquina servo hidráulica INSTRON, modelo 1341. Os ensaios foram realizados em controlo de carga.

Foi utilizado o sistema electrónico de controlo INSTRON 8800.

A máquina e o sistema de controlo encontram-se ilustrados na figura seguinte:



Figura 29 – Máquina de ensaios e sistema de controlo utilizados nos ensaios de fadiga.

Os resultados do ensaio de fadiga geralmente são apresentados por uma curva de tensão aplicada em função do número de ciclos de rotura, ou simplesmente curva S-N que indica o número de vezes que a tensão é aplicada antes de o material fracturar. Observando a curva obtida, nota-se que, à medida que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Nota-se, também, que diminuindo a tensão a partir de um certo nível, o número de ciclos para a rotura do corpo de prova torna-se praticamente infinito. A esta tensão máxima, que praticamente não provoca a fractura por fadiga, denomina-se limite de fadiga ou resistência à fadiga do metal considerado.

Para o caso do alumínio (material em estudo), a curva obtida no diagrama S-N tem uma inclinação contínua decrescente, o que leva a dizer que este material não tem um limite de fadiga verdadeiro tendo em conta que a curva S-N nunca se torna horizontal, portanto, é necessário definir um número de ciclos (normalmente 10^8) para obter a correspondente tensão, que será chamada de resistência à fadiga.

Nos resultados dos ensaios de fadiga é normal que para o mesmo nível de tensão se obtenha variações no número de ciclos de rotura. Esta dispersão de resultados deve-se a vários factores, entre os quais se destacam a variação de dimensão e acabamento superficial dos provetes e falta de homogeneidade do material.

Tendo em conta que o limite de fadiga e a resistência à fadiga são quantidades estatísticas é de prever a existência de variações consideráveis nos resultados se a curva S-N for obtida com poucos provetes. Para que tal não aconteça terá de ser ensaiado um número adequado de provetes.

Os ensaios foram efectuados no laboratório de construções mecânicas do departamento. Para tal foi utilizada a máquina que está representada na Figura 29 e foram utilizados os provetes representados na Figura 14. Em anexo (8.5) encontra-se o procedimento experimental relativo aos ensaios de fadiga efectuados.

5.1.1 Visualização da superfície de fractura

A superfície de fractura foi visualizada ao microscópio para que fosse possível observar onde se deu a iniciação da fenda. Verificou-se que é fácil de diferenciar se a fractura se deu a partir de defeito ou da superfície.

Sabe-se que se um provete tiver iniciação de fenda a partir de defeito, a sua vida à fadiga será inferior quando comparada com a vida de um provete cuja fenda se deu a partir da superfície.

Assim, conseguir-se-á construir duas curvas S-N diferentes, uma referente a provetes com iniciação de fractura a partir de defeito e outra para provetes com iniciação de fractura a partir de superfície.

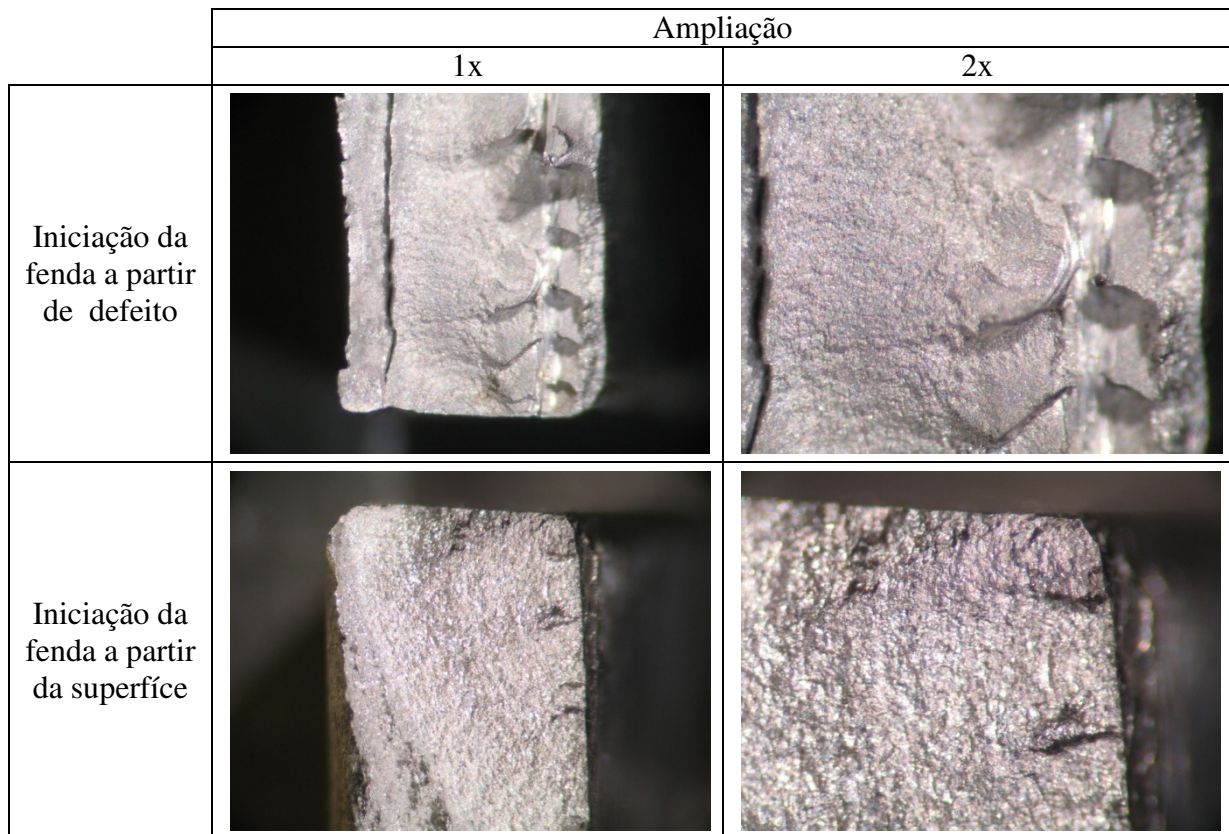


Figura 30 – Superfícies de fractura

Os resultados obtidos nas análises da superfície de fractura encontram-se nas tabelas Tabela 7 e Tabela 8.

5.1.2 Ensaio de fadiga com $R = 0$ e $R = -1$

Na Figura 31 estão representados os dois exemplos de ciclos de tensão variáveis utilizados. As diferenças entre os dois ciclos encontram-se na Tabela 6.

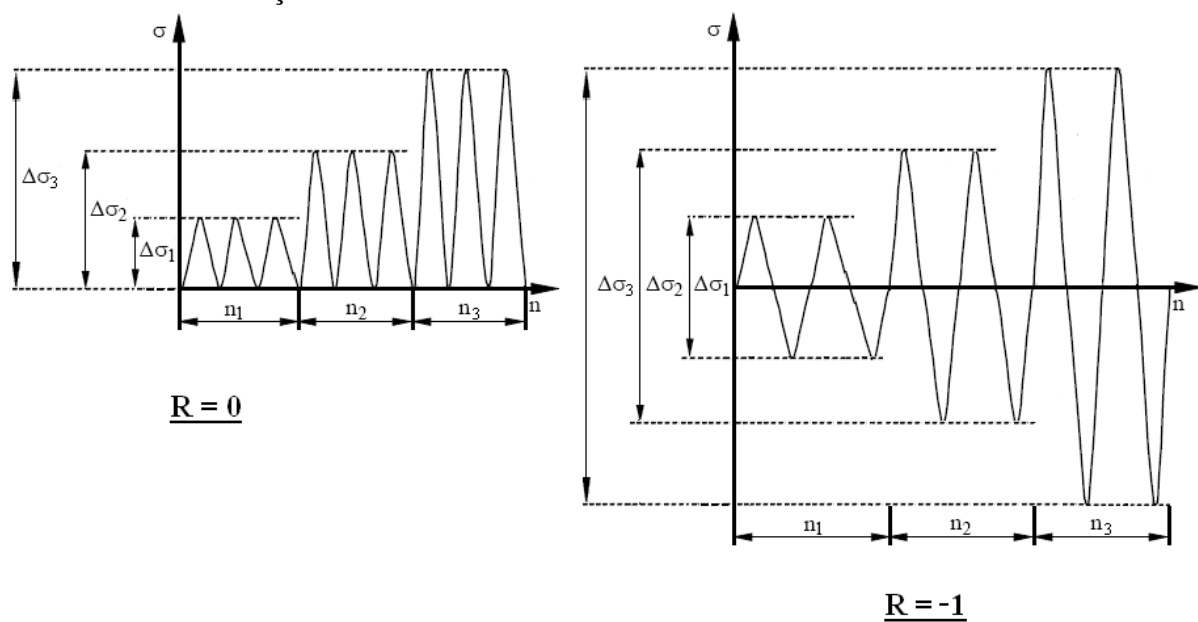


Figura 31 – Ciclos de tensão a amplitude variável com $R = 0$ e $R = -1$.

Tabela 6 – Diferenças entre ensaios com $R = 0$ e $R = -1$

	$R = 0$	$R = -1$
	$\sigma_{min} = 0$	$\sigma_{min} = -\sigma_{max}$
σ_m	$\frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_{max}}{2}$	$\frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{max}}{2} = 0$
σ_a	$\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_{max}}{2}$	$\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_{max} - -\sigma_{max}}{2} = \sigma_{max}$
$\Delta\sigma$	$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{max}$	$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{max} - -\sigma_{max} = 2\sigma_{max}$
R	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{-\sigma_{max}}{\sigma_{max}} = -1$

No caso dos ensaios a amplitude constante a diferença está no valor de P_a e P_m utilizados, e para o caso de amplitude variável está no espectro de tensões. Nos ensaios de tensão variável, nos espectros de tensões utilizados ambos os ensaios têm o mesmo valor de σ_{max} . O valor de σ_{min} para o caso de $R = 0$ tem o valor de 0 e para o caso de $R = -1$ tem o valor de $-\sigma_{max}$.

A Figura 31 ilustra bem a diferença entre ambos.

Como é fácil de observar a gama de tensão equivalente para o caso de $R = -1$ é o dobro da de $R = 0$.

Para que seja possível realizar os ensaios de tensão variável com $R = -1$ construiu-se um dispositivo com objectivo de o provete não flambar.

A peça construída encontra-se na Figura 32, é constituída por duas chapas fixas por 4 parafusos de maneira a que a distância entre elas seja sempre a mesma. No interior das chapas foram coladas duas tiras de PVC, distanciadas de cerca de 4,1 mm (para que seja possível colocar o provete entre elas). O objectivo das tiras de PVC é que o atrito entre os provetes e a peça seja mínimo.

Quando o provete está sujeito à compressão tem tendência a flambar mas como entra em contacto com as tiras de PVC esse fenómeno não ocorre.

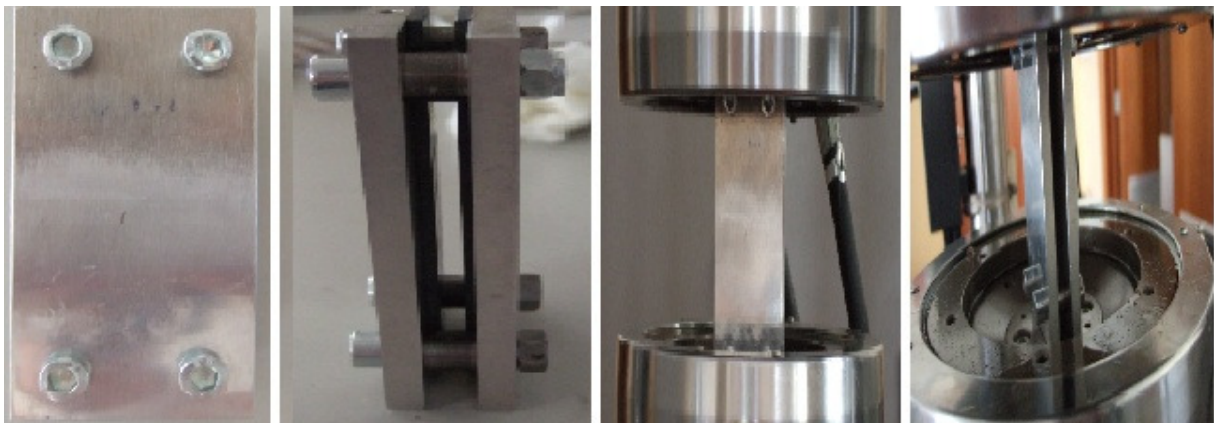


Figura 32 – Peça utilizada ensaios de fadiga com $R = -1$.

5.1.3 Ensaio de fadiga a tensão constante

5.1.3.1 Cálculo da tensão média e alternada a utilizar no ensaio de fadiga a tensão constante

Para a realização do ensaio de fadiga é necessário introduzir no software as tensões média e alternada a que o provete irá estar sujeito. Neste subcapítulo irá explicar-se como esses valores foram calculados.

Nos ensaios de fadiga foram utilizados ciclos de amplitude de tensão constante de $R=0$, que são efectuados por cargas pulsantes. O gráfico seguinte mostra um exemplo de uma carga pulsante:

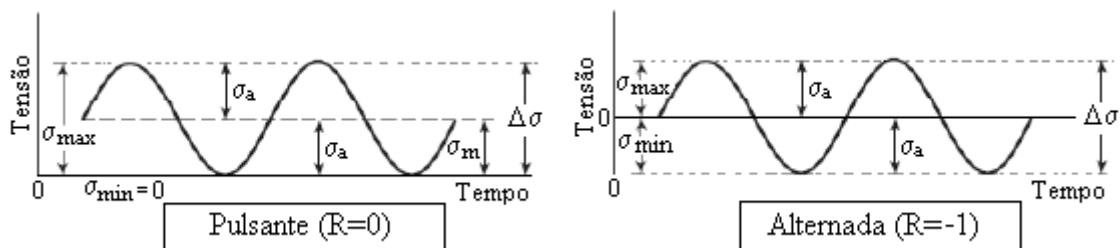


Figura 33 – Carga pulsante e carga alternada

Temos:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \text{ e } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$
$$\Delta\sigma = \sigma_{max}(1 - R) \quad (2)$$

o que leva a

$$P_{max}[KN] = \frac{\Delta\sigma[Mpa] \cdot B[mm] \cdot W[mm]}{(1-R)1000} \quad (3)$$

- B é a espessura do provete na zona soldada em mm.
- W é a largura do provete na zona soldada em mm.
- $\Delta\sigma$ é a gama de tensão a que se pretende determinar o número de ciclos até à rotura. Irão ser ensaiados provetes para valores diferentes de tensão para melhor rigor na obtenção da curva S-N.

Com base nas equações 2 e 3 é fácil calcular P_a e P_m que são os valores que serão introduzidos no software para a execução dos ensaios.

Os resultados obtidos nos cálculos de tensão alternada e tensão média encontra-se na tabela 7 onde são apresentados os resultados dos ensaios de fadiga a tensão constante.

5.1.3.2 Resultados obtidos nos ensaios de tensão constante

5.1.3.2.1

Tabela 7 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a tensão constante

REF ^a PROVETE	R	B (mm)	W (mm)	Pm = Pa [kN]	$\Delta\sigma$ [Mpa]	Nº ciclos	Início da falha
AC_6.2	0	3,94	15,29	4,52	150	38861	Iniciação em defeito
AC_6.3	0	3,91	15,08	4,42	150	36223	Iniciação em defeito
AC_6.4	0	3,95	15,25	4,52	150	28808	Iniciação em defeito
AC_6.5	0	3,94	15,22	3,00	100	365727	Iniciação na superfície
AC_6.6	0	3,95	15,22	3,01	100	666092	Iniciação na superfície
AC_6.7	0	3,95	15,19	3,00	100	720038	Iniciação na superfície
AC_6.8	0	3,95	15,19	2,55	85	2500000	Não fracturou
AC_6.9	0	3,9	15,12	2,51	85	2500000	Não fracturou
AC_6.10	0	3,95	15,17	2,55	85	2500000	Não fracturou
AC_6.8a	0	3,95	15,17	3,60	120	463760	Iniciação na superfície
AC_6.9a	0	3,9	15,12	3,54	120	401629	Iniciação na superfície
AC_6.10a	0	3,95	15,17	3,60	120	225102	Iniciação na superfície
AC_3.1	0	3,93	15,22	2,99	100	451749	Iniciação em defeito
AC_3.2	0	3,99	15,2	4,55	150	54403	Iniciação em defeito
AC_3.3	0	3,92	15,25	4,48	150	58975	Iniciação na superfície
AC_3.4	0	3,94	15,26	4,51	150	101332	Iniciação na superfície
AC_3.5	0	3,94	15,16	2,99	100	660535	Iniciação na superfície
AC_3.6	0	3,95	15,18	3,00	100	478023	Iniciação na superfície
AC_3.7	0	3,93	15,15	3,57	120	227732	Iniciação na superfície
AC_3.8	0	3,94	15,17	3,59	120	267658	Iniciação na superfície
AC_3.29	0	3,92	15,27	3,59	120	90178	Iniciação em defeito
AC_3.30	0	3,93	15,26	4,50	150	54933	Iniciação em defeito
AC_3.31	0	3,98	15,28	3,04	100	266281	Iniciação em defeito
AC_3.45	0	3,96	15,22	3,62	120	385151	Iniciação na superfície

a) Provete anteriormente utilizado num ensaio sem que tivesse ocorrido fractura

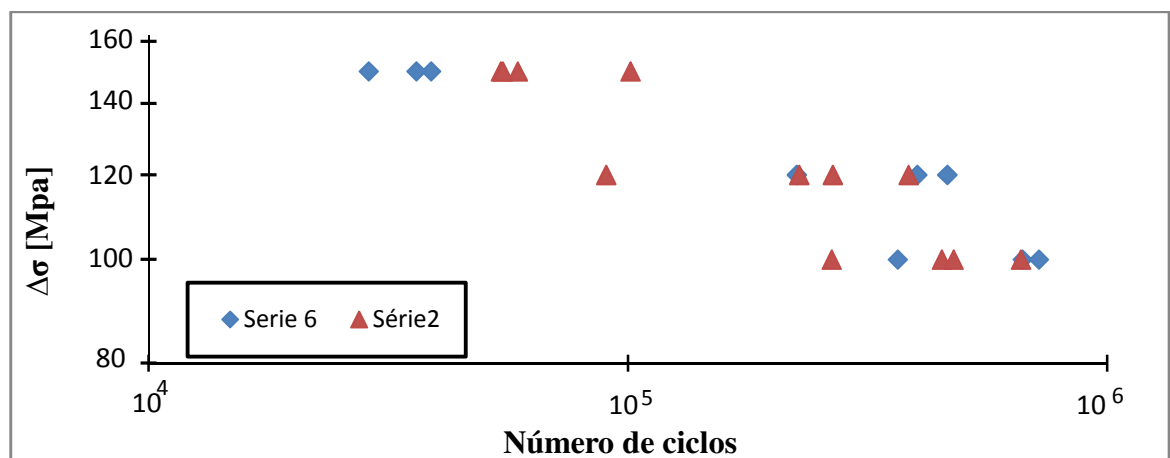


Figura 34 – Resultados obtidos para diferentes parâmetros

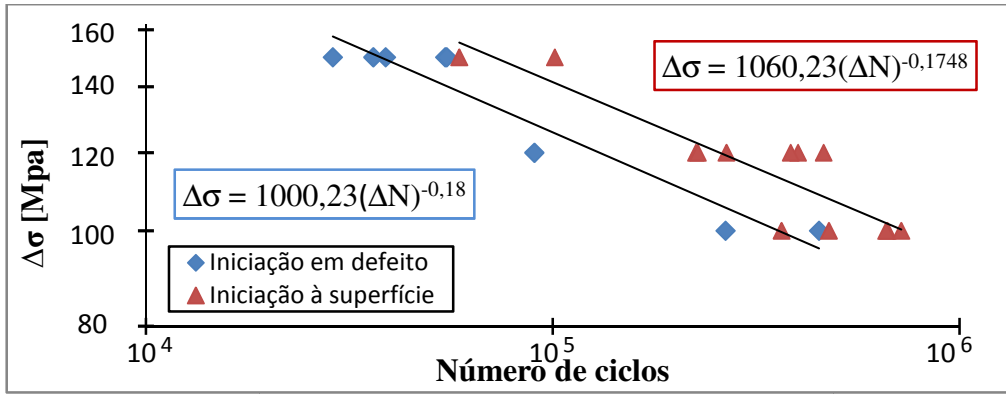


Figura 35 – Curva S-N para diferentes tipos de iniciação de fractura

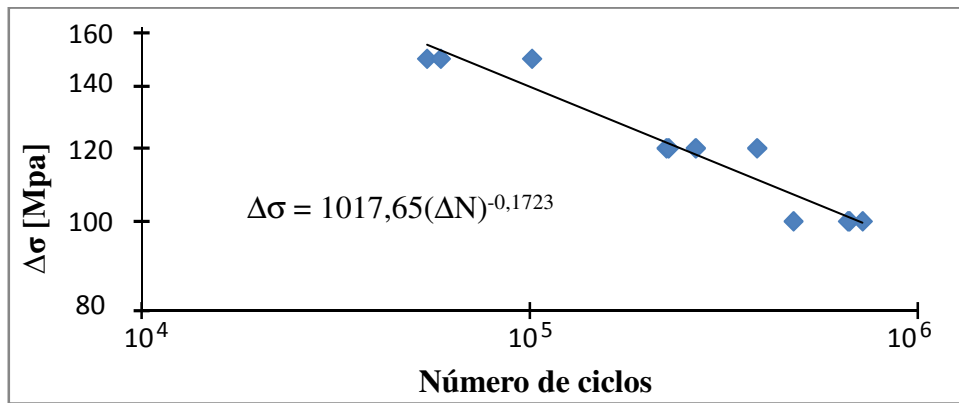


Figura 36 – Curva S-N obtida

Na Figura 36 está representada a curva S-N obtida que será utilizada para o cálculo de dano nos ensaios de amplitude variável. A curva foi obtida só com resultados válidos.

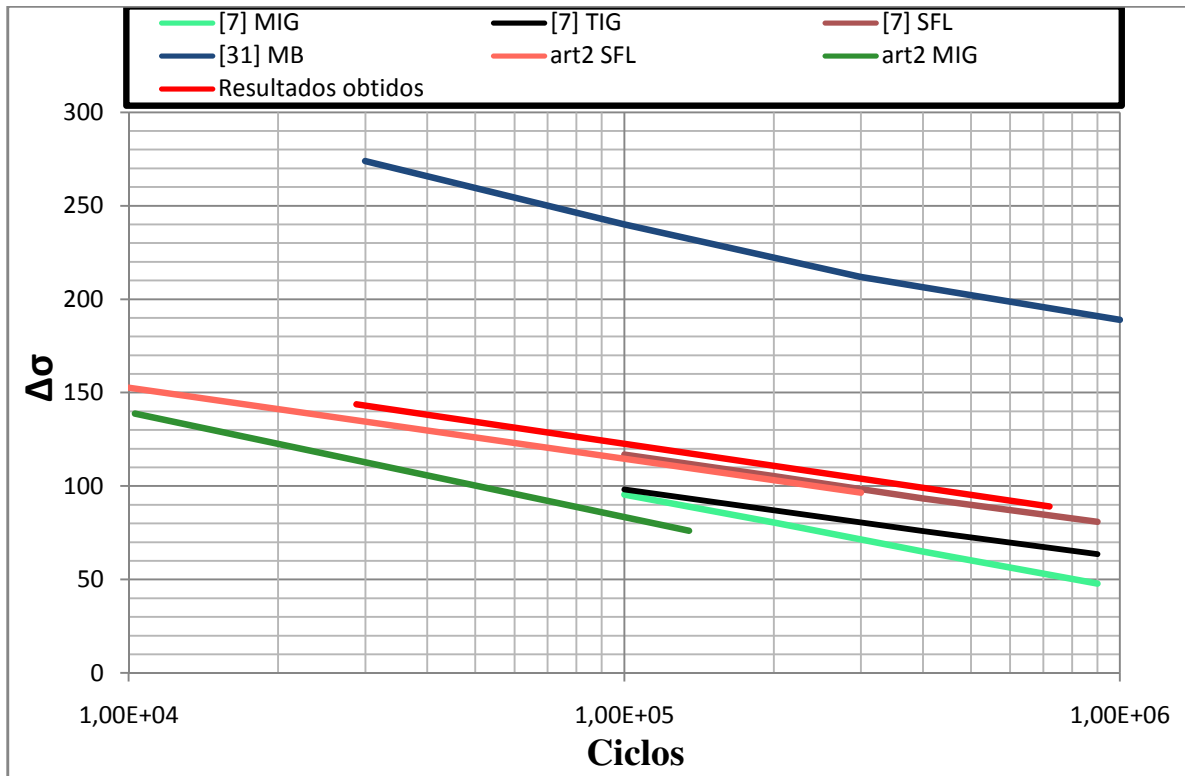


Figura 37 – Comparação de ensaios à fadiga

Através da análise da Figura 35 é fácil verificar que os provetes com iniciação de fenda a partir do defeito apresentam vidas inferiores aos provetes onde a iniciação de fenda se dá à superfície. Na Figura 34 verificou-se que a velocidade da soldadura não tem uma influência muito significativa na vida à fadiga.

Para o caso de juntas topo-a-topo, sem defeito, soldadas por fricção linear em chapas de AA6082-T651, a equação que descreve a curva S-N é

$$\Delta\sigma = 1017,65(\Delta N)^{-0,1723} \quad (4)$$

Observando a Figura 37 pode afirmar-se que os resultados obtidos neste trabalho estão semelhantes aos resultados obtidos por outros autores. A SFL apresenta melhor comportamento à fadiga quando comparada com a soldadura TIG e MIG. A SFL apresenta piores resultados quando comparada com o Material Base.

5.1.4 Ensaio de fadiga a tensão variável

5.1.4.1 Determinação do espectro de tensões utilizado nos ensaios de fadiga a amplitude variável

Geralmente determina-se o comportamento do material e estruturas à fadiga utilizando cargas de amplitude constante, que podem ser descritas através de poucos parâmetros (tensão máxima, mínima, gama e média).

A maioria das estruturas situam-se em ambientes sob cargas de amplitude variável e, como é sabido, a resposta à fadiga é sensível às especificidades das cargas encontradas. Por isso, testes com frequências de cargas realísticas (espectro) são frequentemente utilizados. Normalmente possuem uma história típica de cargas em função do tempo em que estão aplicadas para determinadas utilizações específicas. No ensaio de fadiga a tensão variável uma sequência de níveis de carga é continuamente repetida até à ocorrência de falha.

Uma vez que queremos determinar o comportamento do material à fadiga com amplitude variável, terá de ser utilizado um espectro de cargas.

Após uma aprofundada pesquisa bibliográfica [15] optou-se pela utilização de um espectro determinado segundo a equação (4).

Segundo Heuler [15] o factor SSF (factor de forma do espectro) que representa a distância entre a curva S-N (curva amplitude de carga/ciclos de vida) de Wohler, e a curva do espectro da vida à fadiga associada, curva de Gassner (amplitude de tensão máxima/ciclos de vida), está representado na figura seguinte:

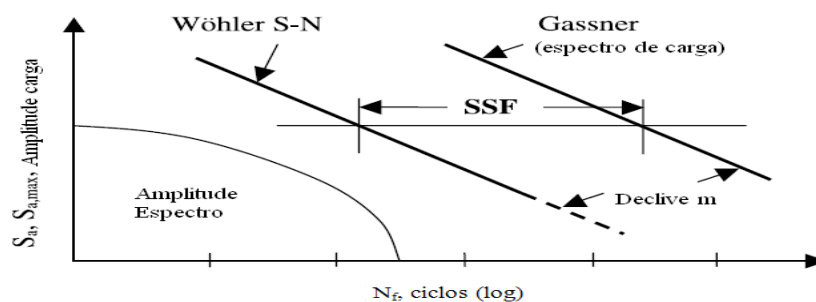


Figura 38 – Curva S-N de Wohler e Gassner e factor SSF

A curva de Gassner tem como objectivo podermos representar no mesmo gráfico os resultados obtidos em ensaios de fadiga a tensão constante e variável. A curva S-N e a curva de Gassner apresentam o mesmo declive e encontram-se distanciadas. SSF é a distancia entra a curva S-N e a curva de Gassner e varia consoante o espectro utilizado, sendo menor em espectros com o valor de v mais elevado pois esses representam uma curva de espectro mais próximo da curva de amplitude de tensão constante.

Outra forma de podermos representar os valores obtidos nos ensaios de fadiga a tensão constante e variável no mesmo gráfico é através do cálculo da tensão equivalente. Esta é forma mais simples de se analisar os resultados obtidos. No subcapítulo (5.1.4.3) será explicado como é obtida a gama de tensão equivalente.

O factor SSF é calculado segundo a regra de dano de Miner através seguinte equação:

$$SSF = \log \left[\frac{\sum ni}{\sum ni \cdot \left(\frac{S_{a,i}}{S_{a,max}} \right)^m} \right] \quad (5)$$

onde

- m é o simétrico do inverso do declive b da curva de Wohler que para o caso dos metais pode variar entre 3 em estruturas com entalhes acentuados e 12/15 para provetes sem entalhes e polidos. Para o cálculo de espectros típicos irá propor-se um valor intermédio de $m=5$ que representa uma qualidade média dos componentes. Para o presente trabalho irá ser utilizado um valor $m=5,8$ que foi o obtido experimentalmente nos ensaios de amplitude de tensão constante.
 - $S_{a,i}$ é a amplitude de cargas
 - ni é o número de ciclos associados a cada valor do espectro
 - $S_{a,max}$ é a carga máxima do espectro.

Para uma interpretação da variável **SSF**, foram considerados espectros típicos de amplitude que podem ser descritos por:

$$\ln H_i = \left[1 - \left(\frac{S_{a,i}}{S_{a,max}} \right)^v \right] \cdot \ln H_0 \quad (6)$$

onde:

- H_i é a frequência acumulada de ciclos de carga para valores de carga de $S_{a,i}$.
- H_0 é o número total de ciclos, normalmente 10^6 .
- v forma exponencial (vamos considerar para efeito de estudo os valores 1,5; 2; 4 e 5).

A tabela da Figura 39 foi utilizada para verificação dos resultados obtidos. O cálculo dos espectros encontra-se em anexo (8.6).

O resultado obtido encontra-se representado no seguinte gráfico:

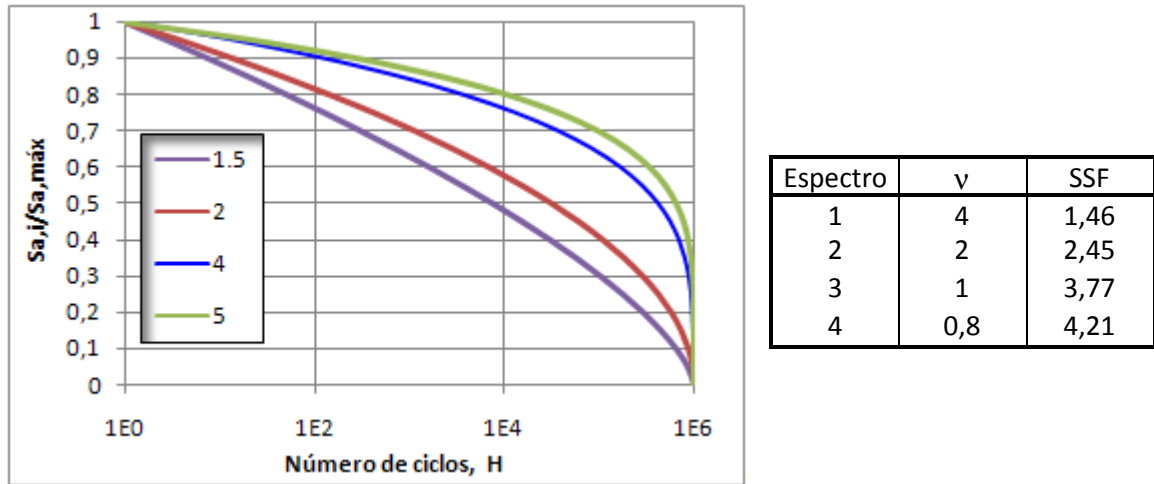


Figura 39 – Espectros de tensão associados a diferentes valores de v [15].

A forma mais comum de apresentar tensões de amplitude variável é em forma de histograma ou (espectro de tensões), que consiste num determinado número de blocos a tensão constante, cada bloco é caracterizado por um número de ciclos associado a uma tensão. No gráfico seguinte está representado o histograma relativo às tensões e números de ciclos calculados para os diferentes valores de v.

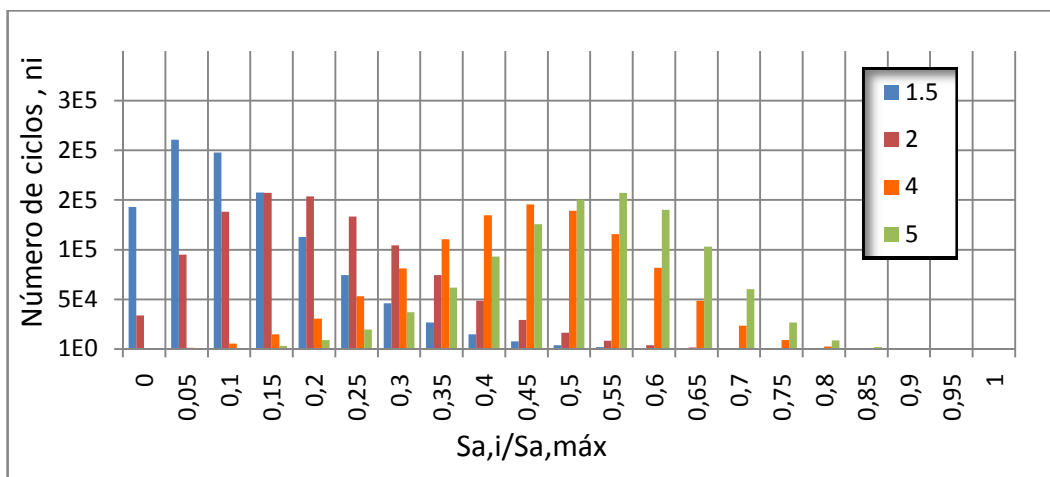


Figura 40 – Número de ciclos que determinada tensão é aplicada para diferentes valores de v

Nos ensaios foram utilizados espectros que tiveram como base os valores de v igual a 1,5, 2, 4 e 5.

Em todos os espectros o número de ciclos máximo por sequência foi reduzido de 1E6 para 1E4 de modo a que se garanta que todo o espectro é percorrido um número elevado de vezes pois se cada sequência tivesse 1E6 ciclos o provete corria o risco de falhar antes de ter percorrido todo o espectro o que nos levava a obter resultados incorrectos. O cálculo encontra-se efectuado em anexo (8.6).

Para o cálculo do espectro, foram multiplicados os valores relativos à tensão (em percentagem) por um factor. Esse factor foi determinado com base na tensão equivalente e na carga máxima realizada pelo espectro. A tensão máxima teria de ser inferior à tensão de rotura do material para que não ocorresse rotura instantânea e teria de ter uma amplitude de tensão equivalente próxima dos valores aplicados nos ensaios de amplitude de tensão constante para facilitar a análise de resultados.

Em todos os espectros foram efectuadas algumas alterações. Foram retirados os valores de tensão máxima superiores à tensão de cedência do material já que o número de ciclos relativos a esses valores de tensão é tão pequeno que não terá influência significativa no dano acumulado.

Em ensaios de amplitude variável as máquinas servohidráulicas não cumprem com rigor o espectro programado. Assim o espectro realmente realizado pela máquina é um pouco diferente do espectro que tinha sido introduzido no software. Em anexo encontra-se a diferença entre o espectro pedido e o espectro realizado pela máquina (8.6). Está também presente o número de ciclos a que cada carga foi sujeita. Resta salientar que todos os cálculos foram efectuados com base no espectro realizado e não no que foi introduzido.

De seguida apresenta-se o gráfico relativo aos espectros realmente realizados pela máquina e que foram utilizados no cálculo da gama de tensões equivalente:

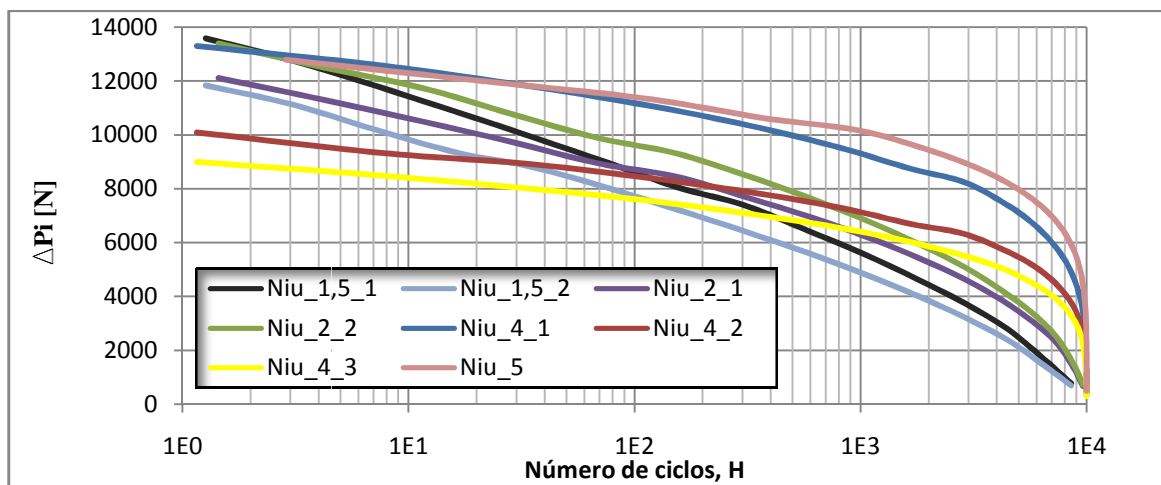


Figura 41 – Espectros realizados pela máquina de ensaios de fadiga

Na Figura 41 está representado o espectro de tensão realizado pela máquina. Para não se correr o risco da falha se dar logo nos primeiros ciclos começou-se pela gama de tensões baixas, assim com o aumento progressivo da tensão o provete vai-se deformando plasticamente adaptando-se às tensões mais altas e não corre o risco de ocorrência de rotura instantânea.

5.1.4.2 Cálculo do dano associado a cada ciclo de tensão (variável)

Um dos objectivos desta tese passa por determinar o dano que o provete sofreu desde o início do ensaio até à falha. Para tal foi utilizada a lei de Miner expressa pela seguinte equação:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (7)$$

onde

- **D** corresponde ao dano sofrido
- n_i/N_i dano sofrido pelo bloco i
- n_i o número de ciclos do bloco i
- N_i o número de ciclos de rotura correspondente à tensão σ_i na curva **S-N** do material

Sabendo que a curva S-N básica pode ser dada por:

$$\log \sigma = b \log N + \log C \quad (8)$$

Onde **b** e **C** são constantes retiradas da equação da curva S-N obtida nos ensaios de amplitude de tensão constante.

$$b \log N = \log N^b \text{ e } \log N^b + \log C = \log(C \cdot N^b) \quad (9)$$

$$\log \sigma = \log(C \cdot N^b) \rightarrow \Delta \sigma = (C \cdot N^b) \rightarrow \left(\frac{\Delta \sigma}{C}\right)^{\frac{1}{b}} = N \rightarrow \left(\frac{\Delta \sigma}{C}\right)^{-m} = N \quad (10)$$

$$N = \left(\frac{C}{\sigma}\right)^m \quad (11)$$

A expressão simplificada para o cálculo do dano é a seguinte:

$$D = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_i}{C}\right)^m \quad (12)$$

Em anexo (8.7) encontra-se um exemplo de cálculo de dano. Todos os outros danos foram calculados da mesma forma.

5.1.4.3 Cálculo da tensão equivalente associada aos ensaios de amplitude variável

A fim de se representar no mesmo gráfico os ensaios obtidos por amplitude constante e variável tem de se calcular a tensão equivalente associada aos ensaios de amplitude variável.

Para esse cálculo utilizou-se a seguinte equação:

$$\Delta\sigma_{equi} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n ni(\Delta\sigma_i)^m}{\sum_{i=1}^n ni} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

Todas as variáveis desta expressão já foram definidas anteriormente.

Como pode ser verificado a tensão equivalente depende apenas do espectro utilizado e da constante m (declive da curva S-N determinada no ensaio a amplitude de tensão constante).

Em anexo (8.8) encontra-se um exemplo de cálculo da tensão equivalente. Todas as outras tensões equivalentes foram calculadas da mesma forma.

5.1.4.4 Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a amplitude variável

5.1.4.4.1 R = 0

Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a amplitude variável (R=0)

Ref Provete	Espectro Niu	B (mm)	W (mm)	σ_{equi} [N]	Nº Ciclos	Início da falha	σ_{max} [MPa]	Dano
AC_3.46	2_1	3,95	15,25	86,86	1835210	Iniciação em defeito	201	1,16
AC_3.47	2_1	3,92	15,19	87,87	1246010	Iniciação na superfície	203	0,84
AC_3.34	2_2	3,9	15,21	97,3	849992	Iniciação em defeito	225	1,04
AC_3.48	2_2	3,97	15,12	96,16	705106	Iniciação em defeito	223	0,8
AC_3.49	4_1	3,94	15,2	128,38	279972	Iniciação na superfície	222	1,71
AC_3.50	4_1	3,99	15,24	126,44	229976	Iniciação na superfície	218	1,28
AC_3.51	4_2	3,97	15,2	97,4	1119808	Iniciação na superfície	167	1,38
AC_3.52	4_2	3,99	15,17	97,11	539142	Iniciação na superfície	166	0,65
AC_3.53	4_3	3,96	15,18	86,88	2019610	Iniciação na superfície	149	1,28
AC_3.54	4_3	3,99	15,25	85,83	2219778	Iniciação na superfície	147	1,31
AC_3.55	1,5_1	3,98	15,23	84,48	1336608	Iniciação na superfície	224	0,72
AC_3.56	1,5_1	3,97	15,19	84,92	1088136	Iniciação na superfície	225	0,6
AC_3.57	5_1	3,92	15,2	140,72	199998	Iniciação na superfície	214	2,01
AC_3.58	5_2	3,93	15,23	140,09	309640	Iniciação na superfície	213	2,81
AC_3.59	1,5_2	3,96	15,21	74,52	5312160	iniciação à superfície	196	1,39
AC_3.44	1,5_2	3,95	15,22	75,69	4104000	iniciação à superfície	197	1,17
Média								1,26
Desvio padrão								0,56

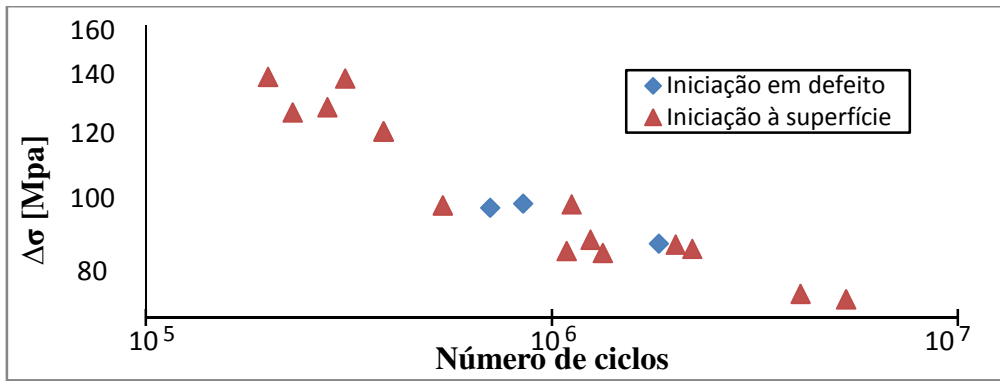


Figura 42 – Resultados obtidos nos ensaios de amplitude variável (R=0)

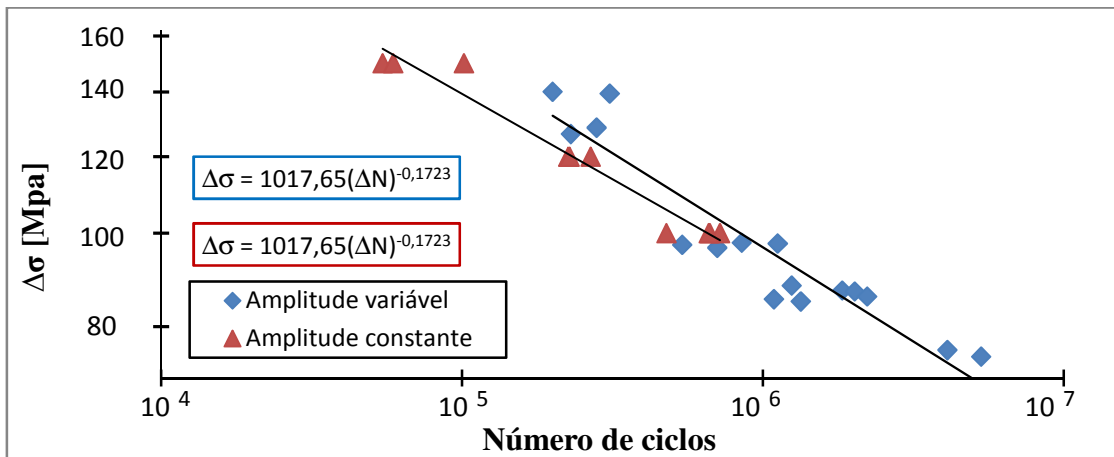


Figura 43 – Ensaio válidos de amplitude constante e variável (R=0)

Na Figura 43 estão representados todos os resultados obtidos assim como as equações das linhas de tendência para o caso dos ensaios de fadiga a amplitude constante e variável R=0.

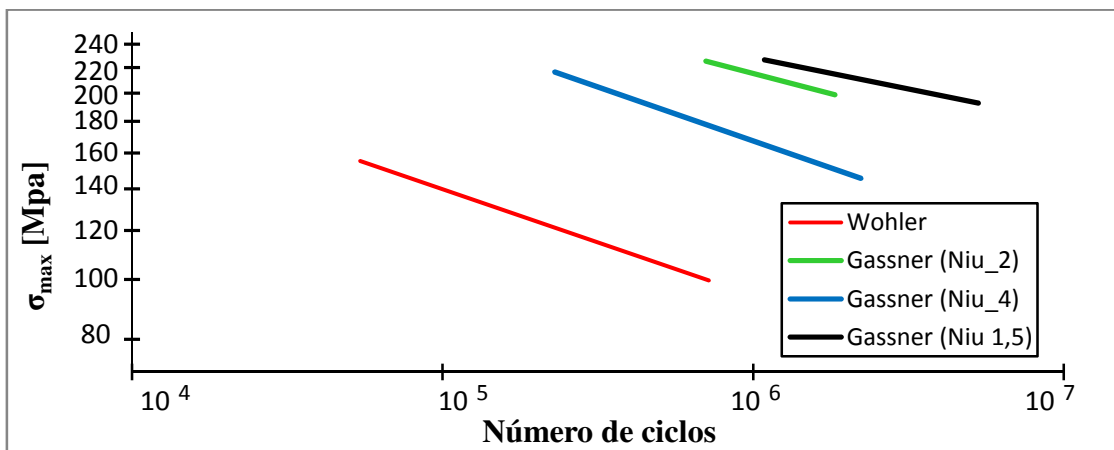


Figura 44 – Curvas de Wohler e Gassner dos ensaios realizados

Na Figura 44 está representada a curva de Wohler (curva S-N) obtida nos ensaios de amplitude constante e as curvas de Gassner relativas a diferentes espectros utilizados nos ensaios de fadiga (R=0). Como se pode observar à medida que v aumenta mais o número de ciclos obtidos nos ensaios de amplitude variável se aproxima dos obtidos nos ensaios de amplitude de tensão constante. A distância entre a curva de Wohler e a curva de Gassner é dada pelo factor SSF e está determinada no anexo (8.6).

5.1.4.4.2 $R = -1$

Tabela 9 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga a amplitude variável $R = -1$.

REF ^a PROVETE	Espectro Niu	B (mm)	W (mm)	$\Delta\sigma_{emi}$ [N]	Nº Ciclos	Início da falha
AC_3.43	2_1_R-1	3,95	15,24	176,85	231812	Iniciação à superfície
AC_3.42	2_1_R-1	3,94	15,23	177,42	193174	Iniciação à superfície

Por insuficiência de resultados não foi possível, no momento de entrega da dissertação, tirar conclusões sobre os resultados obtidos com $R = -1$.

5.1.4.5 Análise dos valores de dano obtidos

Como a dimensão da amostra é pequena foi necessário utilizar um modelo de distribuição de probabilidades. O modelo escolhido foi o de Weibull.

A distribuição de Weibull é utilizada na análise de danos de vida. É muito usada para a estimativa de falhas devido à sua versatilidade e simplicidade.

A distribuição de Weibull é dada pela expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (14)$$

Onde:

- β – Parâmetro de forma ou inclinação da distribuição de Weibull;
- η – Parâmetro de escala;
- γ – Parâmetro de posição;
- $R(t)$ – Probabilidade de ocorrência do dano (t);
- t – Dano acumulado no momento da rotura.

De forma a se obter a equação de uma recta temos que a equação 14 simplificada em anexo, (8.9) pode ser descrita da seguinte forma:

$$\ln(t - \gamma) = \frac{1}{\beta} \ln \left[\ln \frac{1}{R(t)} \right] + \ln \eta \quad (15)$$

A obtenção da distribuição característica de Weibull encontra-se em anexo (8.10) e está representada na Figura 45.

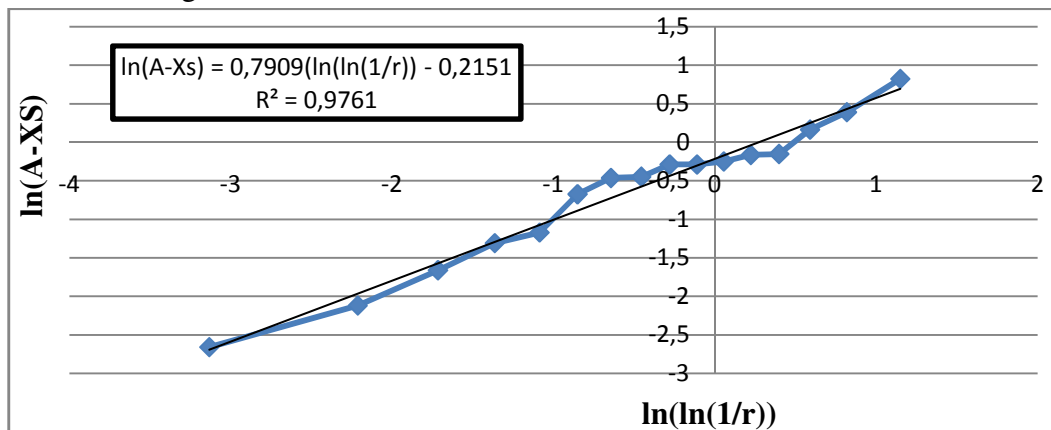


Figura 45 – Distribuição característica de Weibull

Analisando a equação da recta da Figura 45 obtemos os parâmetros de Weibull:

$$\beta = \frac{1}{0,7909} = 1,26$$

$$\eta = e^{-0,2151} = 0,81$$

$$\gamma = 0,53$$

O gráfico seguinte traduz a probabilidade de ocorrência de um determinado valor de dano

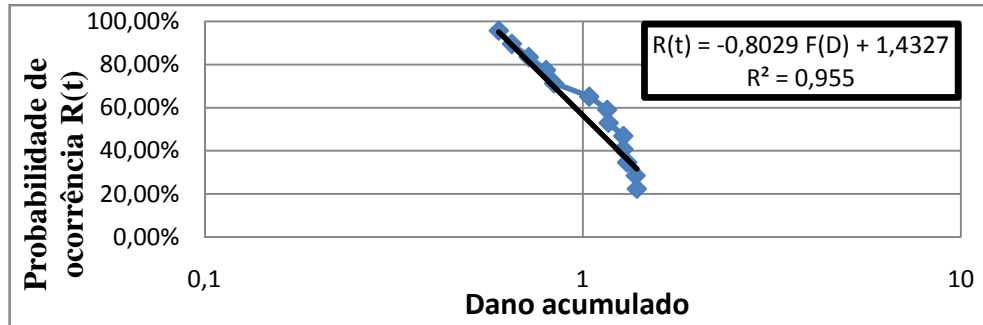


Figura 46 – Probabilidade de ocorrência para um determinado valor de dano

O gráfico da figura anterior pode servir de consulta a quando da utilização da lei de Miner no dimensionamento de peças à fadiga com amplitude variável.

Através da análise do gráfico conseguimos verificar que em cerca de 65% dos casos o dano acumulado é superior a 1. Ou seja, uma estimativa com vida à fadiga $D = 1$, para este caso significa um dimensionamento seguro.

Como se viu no gráfico da Figura 43 foi representada a curva S-N obtida nos ensaios de amplitude constante e os resultados obtidos nos ensaios de amplitude variável. Se os pontos de amplitude variável estivessem posicionados em cima da curva S-N teriam um dano acumulado igual à unidade, quanto mais afastado para a direita maior será o dano acumulado, quanto mais para a esquerda menor será. Logo verifica-se que na maioria dos casos o dano acumulado é superior a 1.

Pode assim concluir-se que ao contrário de soldaduras executadas por outros processos no caso da SFL a falha por fadiga a amplitude variável não ocorre geralmente para valores de dano acumulado inferiores à unidade. Isto pode dever-se à maior homogeneidade do material resultante da SFL quando comparado a outros tipos de soldadura e à ausência de defeitos de grande severidade que reduzem fortemente a fase de iniciação de fenda.

5.1.4.6 % de replicação

Em anexo (8.11) está determinado a percentagem de replicação segundo (ASTM E739). É necessário saber que universo pode representar o número de provetes ensaiados.

Tabela 10 – Percentagem de replicação e tipo de ensaio associado

	% de replicação	Tipo de ensaio
Amplitude constante	68,75	Permite dimensionamento em projecto
Amplitude variável	85,71	Dados confiáveis

6 Conclusão

As principais conclusões que podemos retirar do trabalho realizado nesta dissertação são:

- A fresadora que foi utilizada para a realização das soldaduras, apresenta limitações para a realização do processo, nomeadamente, limitação na escolha dos valores dos parâmetros do processo, falta de robustez, e ausência de controlo de carga.
 - Existe dificuldade em produzir uma junta com iguais propriedades e características do princípio da soldadura ao fim.
 - Existe dificuldade em produzir duas soldaduras iguais, ou seja, ausência da repetibilidade do processo.
 - Dificuldade em produzir soldaduras sem defeito só com uma passagem.
- O processo de SFL na liga AA6082-T651 apresenta bons resultados à fadiga.
- Na liga AA6082-T651 não existem diferenças significativas do comportamento à fadiga quando se utilizam diferentes parâmetros de soldadura.
- Existem diferenças no comportamento à fadiga entre soldaduras com 1 e 2 passagens. A soldadura com 2 passagens apresenta comportamento à fadiga, pois a segunda passagem permitiu obter uma soldadura isenta de defeitos, com o tamanho de grão mais refinado e sem baixar muito a dureza do material.
- O defeito que foi encontrado nas soldaduras foi sempre do tipo “vazios do lado interno do avanço” devido à falta de pressão da ferramenta sobre a soldadura. Este defeito deve-se principalmente à falta de controlo de carga da máquina.
- Os defeitos da soldadura têm grande influência na vida à fadiga do material. Soldaduras cuja iniciação de fenda se dá a partir dos defeitos possuem vidas muito inferiores a soldaduras com iniciação de fenda à superfície.
- As juntas obtidas por SFL apresentam valores de dureza superiores a outros processos de soldadura mas inferiores ao material base.
- A zona da soldadura que possui menor dureza é a zona de interface entre a ZATM e a ZAC pois é a zona mais quente.
- Em provetes sem defeito interno a zona por onde se deu a iniciação da fenda na maioria dos provetes foi na interface entre a soldadura e o material base, além ser a zona que tem menor dureza, em alguns provetes possuiu um pequeno degrau provocado pela ferramenta aquando da realização do processo. Esse degrau é uma zona onde existem elevadas concentrações de tensão o que leva a ser a zona mais propícia à iniciação de fendas.
- Se o provete possui-se um defeito significativo, era na zona do defeito que se iniciava a fenda.
- A SFL apresenta melhor comportamento à fadiga quando comparada a outros processos de soldadura. Embora com uma menor resistência à fadiga que o material base.
- Em cerca de 60% dos casos o dano acumulado é superior à unidade.

7 Bibliografia



- [1]. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Much, P. Templesmith, C. J. Dawes, G. B. patent application No. 9125978.8 (December 1991).
- [2]. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. “*Friction stir welding and processing*”, Materials Science and Engineering:R:Reports, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005
- [3]. (www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/FSW/aaa.html)
- [4]. M.W. Mahoney and S.P. Lynch, “Friction Stir Processing”
- [5]. Friction Stir Welding – “Space Shuttle Technology Summary”
- [6]. http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding
- [7]. Ericsson, M., and Sandstrom, R., “Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG”, International Journal of Fatigue, 25, 1379–1387 (2003).
- [8]. C.M. Branco, J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa e A. Ribeiro “*Projecto de Órgãos de Máquinas*”, Ed. Fundação C. Gulbenkian, Lisboa, 2005.
- [9]. C.M. Branco, “*Mecânica dos Materiais*”. 3ª edição, Ed. Fundação C. Gulbenkian, Lisboa, 1999.
- [10]. H. Hori, S. Makita, H. Hino, in: Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999.
- [11]. M. Czechowski, Fatigue life of friction stir welded Al-Mg alloys, Proceedings of the 13th Scientific International Conference „Achievements in Mechanical and Materials Engineering” AMME’2005, Gliwice – Zakopane, 2005, 83-86.
- [12]. Fatigue behavior of friction stir welded butt joints in AA6056 alloy for airframe applications. Lomolino, R. Tovo, J. dos Santos.
- [13]. João Paulo Nobre, Slides das aulas de Introdução ao projecto mecânico 2007/08 Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [14]. www.aalco.co.uk/technical/datasheets/Aalco_Datasheet_Al_Alloy_6082.pdf

- [15]. Heuler P, Klatschke H. Generation and use of standardized load spectra and load–time histories. *Int J Fatigue* 2005;27(8):974–90.
- [16]. K. Kumar and Satish V. Kailas. On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy *Materials & Design* Volume 29, Issue 4, 2008, Pages 791-797
- [17]. Caizhi Zhou, Xinqi Yang and Guohong Luan. Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys *Materials Science and Engineering: A* Volume 418, Issues 1-2, 25 February 2006, Pages 155-160
- [18]. H.G. Salem, Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA2095 weldments, *Scripta Materialia* 49 (2003) 1103-1110.
- [19]. K.N. Krishnan, On the formation of onion rings in friction stir welds, *Materials Science and Engineering A327* (2002) 246-251.
- [20]. Dulce Rodrigues, Altino Loureiro, Rui Leal. Soldadura por fricção linear
- [21]. <http://techtran.msfc.nasa.gov/pdf/FSW11.20.01.pdf>
- [22]. Mahoney, M.W., Rhodes, C.G., Flintoff, J.G., Spurling, R.A., and Bingel, W.H., “Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29A, 1955-1964, 1998.
- [23]. N. Jayaraman, Paul S. Prevéy, Murray Mahoney, “Fatigue Life Improvement of an Aluminum Alloy FSW with Low Plasticity Burnishing,” *Proceedings 132nd TMS Annual Meeting, San Diego, CA, Mar. 2-6, 2003.*
- [24]. S. Di, X. Yang, G. Luan, B. Jian, "Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials", *Mat., Sci., Eng., A*, Vol. 436, 2006, P. 389-395.
- [25]. PMGP Moreira, AMP Jesus, AS Ribeiro, PMST de Castro, “Fatigue crack growth behavior of the friction stir welded 6082-t& aluminium alloy”, 7° Congresso Nacional de Mecânica Experimental, APAET, Vila Real, Jan 23-25, 2008, in: *Livro de Resumos, AMP de Jesus, JTQS Pinto, eds., pp.259-261*
- [26]. D.-A. Wang and C.-H. Chen, 2009, Fatigue Lives of Friction Stir Spot Welds in Aluminum 6061-T6 Sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Jan 2009, v. 209, pp. 367-375.
- [27]. D. Booth and I. Sinclair: “*Fatigue of Friction Stir Welded. 2024-T351 Aluminum Alloy*,”*Mater.Sci.Forum*, 2002,396-. 402, pp. 1671-76

- [28]. S.Kainuma, H.Katsuki, I.Iwai and M.Kumagai: Evaluation of Fatigue Strength of Friction Stir Butt-Welded Aluminum Alloy Joints Inclined to Applied Cyclic Stress, *International Journal of Fatigue*, Volume 30, Issue 5, pp.870-876, 2008.
- [29]. LIN, P.-C.; PAN, J.; PAN, T. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool. *International Journal of Fatigue*, v.30, n. 1, p. 90-105, 2008
- [30]. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney *Friction Stir Welding and Processing ASM international*
- [31]. P M G P Moreira, V Richter-Trummer, P M S T de Castro, “Fatigue behaviour of FS, LB and MIG welds of AA6061-T6 and AA6082-T6”, invited book chapter, in: George C Sih, ed, “Multiscale Fatigue Crack Initiation and Propagation of Engineering Materials - Structural Integrity and Microstructural Worthiness”, Springer Science + Business Media BV, pp.85-111, 2008

8 Anexos

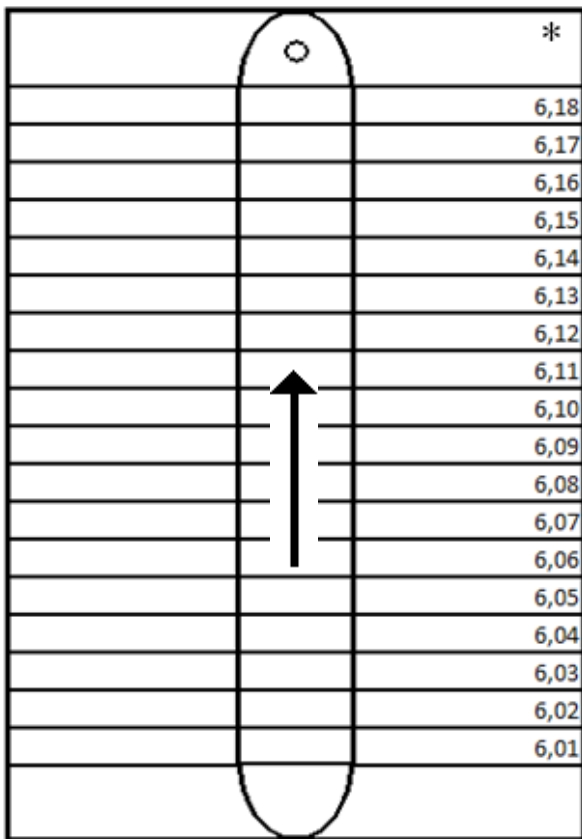
8.1 Esquemas dos provetes das soldaduras

	*
	3,8
	3,7
	3,6
	3,5
	3,4
	3,3
	3,2
	3,1
	
	6,23
	6,22
	6,21
	6,20
	6,19
	*

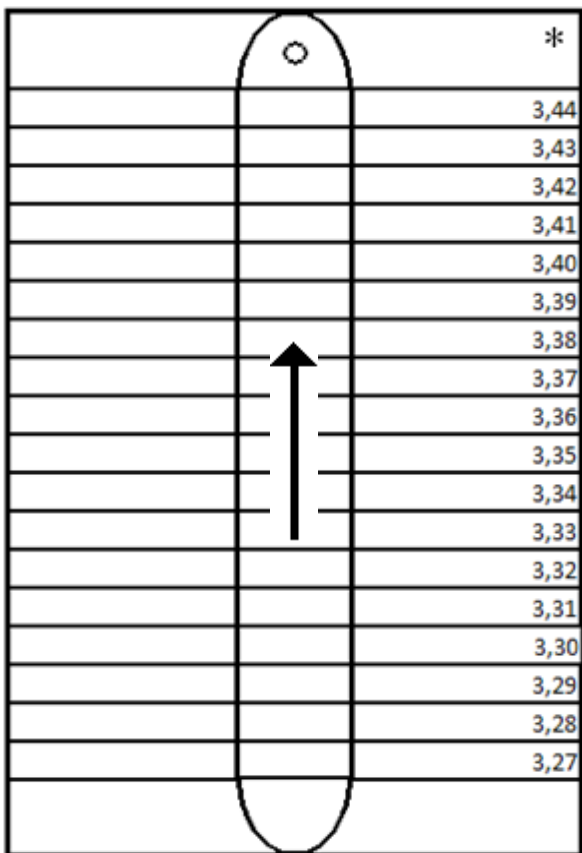
Nome:	Soldadura 1
Ferramenta:	Cone de 2°
Vel. Avanço:	300 mm/min
Profundidade:	3,9 mm
Vel. Rotação:	1140 rpm

Nome:	Soldadura 2
Ferramenta:	Cone de 2°
Vel. Avanço:	600 mm/min
Profundidade:	3,9 mm
Vel. Rotação:	1500 rpm

*	Amostra para análise da soldadura
---	-----------------------------------



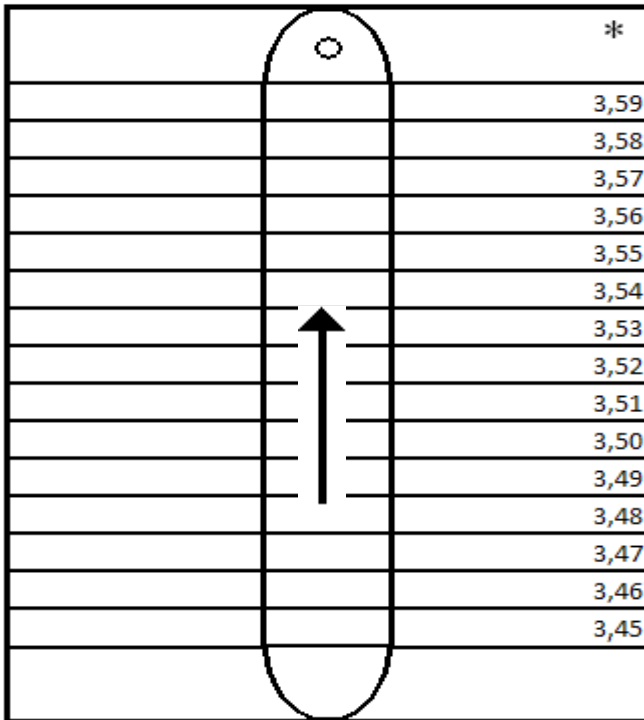
Nome:	Soldadura 3
Ferramenta:	Cone de 2°
Vel. Avanço:	600 mm/min
Profundidade:	3,9 mm
Vel. Rotação:	1500 rpm



Nome:	Soldadura 6
Ferramenta:	Cone de 5°
Vel. Avanço:	300 mm/min
Profundidade:	4,1 mm
Vel. Rotação:	1500 rpm

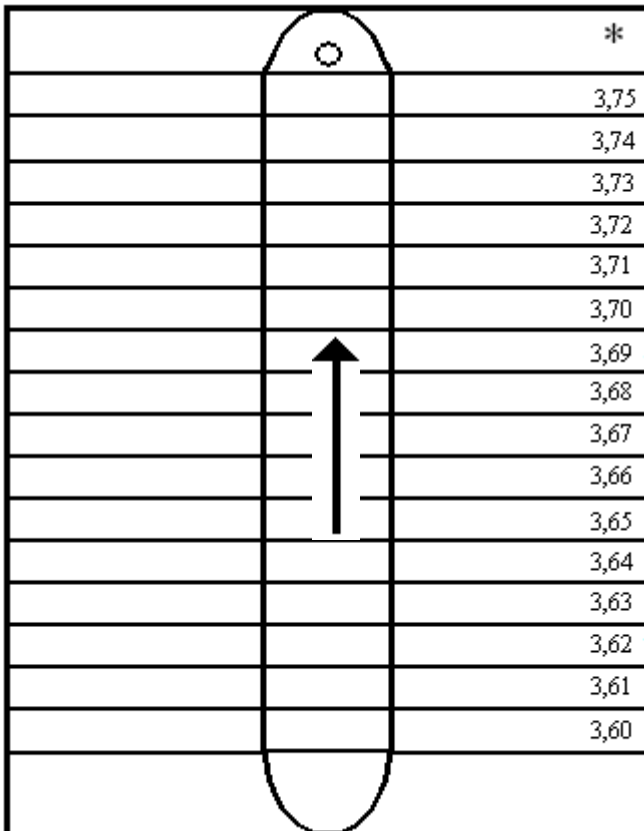
*	Amostra para análise da soldadura
---	-----------------------------------

Soldadura efectuada com duas passagens



Nome:	Soldadura 7
Ferramenta:	Cone de 5°
Vel. Avanço:	300 mm/min
Profundidade:	4,15 mm
Vel. Rotação:	1500 rpm

*	Amostra para análise da soldadura
---	-----------------------------------



Nome:	Soldadura 8
Ferramenta:	Cone de 5°
Vel. Avanço:	300 mm/min
Profundidade:	4,15 mm
Vel. Rotação:	1500 rpm

8.2 Desenho da ferramenta utilizada

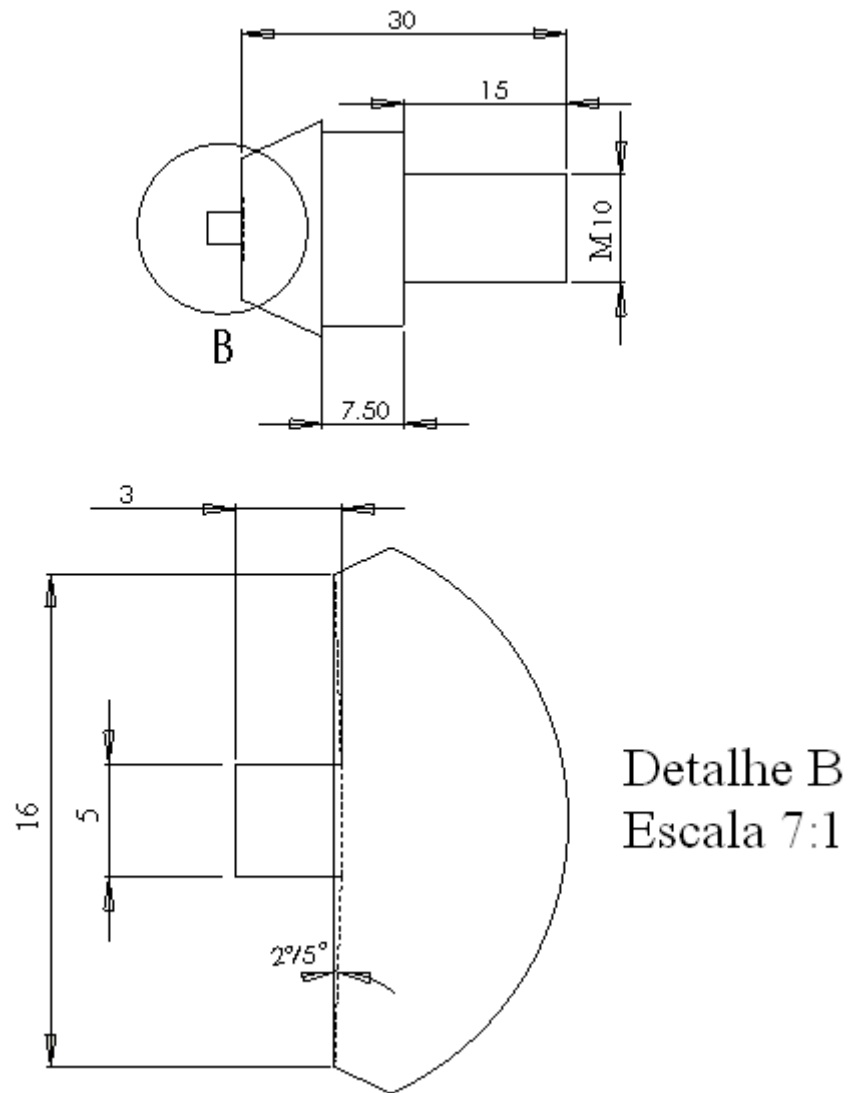


Figura 47 – Desenho da ferramenta cotada

8.3 Procedimento da análise metalográfica

O procedimento para a realização dos ensaios de análise da metalográfica dos cordões obtidos foi o seguinte:

1. Cortar as amostras com dimensões adequadas de maneira a que seja possível analisar toda a junta da soldadura e uma parte do material base;
2. Identificar cada uma das amostras;
3. Limpar as arestas das amostras, para remoção das rebarbas;
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 320 mesh, 600 mesh, 1000 mesh, 2400 mesh
6. Proceder ao polimento das amostras, utilizando uma pasta de 3 micrómetros de granulometria, com uma mistura de lubrificante e pó diamante até ficar sem riscos.
7. Lavar a amostra com água e detergente e depois lavar com álcool e secar.
8. Proceder ao ataque químico das amostras com Poulton, mergulhando a amostra durante cerca de 15 segundos depois passar por água corrente e detergente e secar. Observar ao microscópio caso não esteja bem contrastada repetir o processo com pequenos intervalos de tempo.

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

Na figura seguinte encontra-se apresentada uma amostra no fim do procedimento da análise metalográfica:



Figura 48 – Amostra analisada metalograficamente

8.4 Procedimento da medição de durezas

O procedimento utilizado durante a realização dos ensaios de dureza vickers, nas amostras de cordões de soldadura encontra-se aqui descrito:

1. Leva-se a amostra que foi analisada metalograficamente que se encontra na Figura 49 ao torno para que se coloquem as 2 faces da amostra paralelas.
2. Ligar a máquina de medição presente na Figura 49.
3. No menu do equipamento escolher 0,2 Hv como carga a utilizar.
4. Colocar a amostra com a zona superior da soldadura virada para cima no equipamento para que seja possível fazer identações ao longo de toda a amostra sem esta ter de se mover.
5. Com a máquina com a lente posicionada nivelar a amostra para que se consiga fazer uma linha de identações paralelas à superfície, fixar a amostra com plasticina para que ao longo das medições esta não se mova.
6. Percorrer a amostra com a mesa até ao ponto onde se quer efectuar a primeira identação ou seja a 0,5 mm do topo da superfície para a linha 1, a meio da soldadura para a linha 2 e a 0,5mm da base para a linha 3 e na zona mais à esquerda da soldadura MB.
7. Focar o ponto onde se pretende fazer a identação.
8. Mudar na máquina a lente para a pirâmide de diamante.
9. Clicar para iniciar teste.
10. Depois do teste efectuado mudar para a posição da lente.
11. Através do sistema de medida (dois traços verticais para medir a área da superfície impressa no material) medir a área da superfície impressa.
12. Registrar o valor de dureza que nos é dado pela máquina.
13. Avançar a amostra 1mm
14. Repetir os passos de 6 a 12 até chegar ao fim da soldadura.

Nas figuras seguintes está ilustrada a máquina utilizada e a identação realizada:

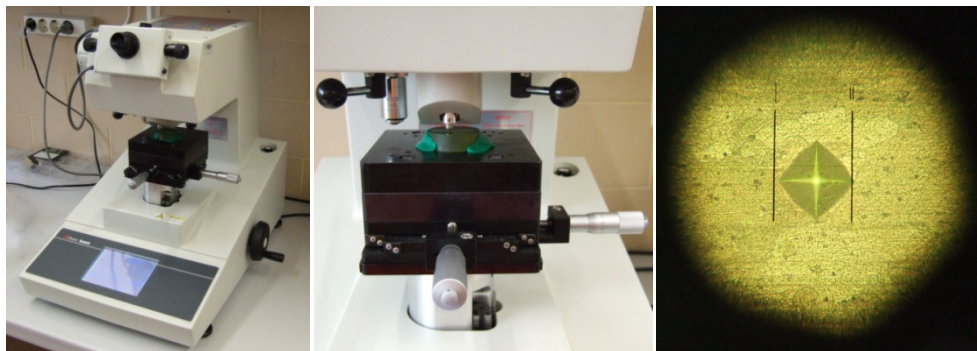


Figura 49 – Máquina utilizada nas medições de dureza e identação realizada

8.5 Procedimento dos ensaios de fadiga

8.5.1 Tensão constante:

1. Obtenção dos provetes, a partir das chapas soldadas.
2. Preparação das faces laterais dos provetes, arredondando os bordos com uma lima e retirando rebarba em excesso do cordão de soldadura. Rectificação dos provetes e novamente com a lima, limar os bordos.
3. Efectuar a medição da espessura e da largura do provete na zona da soldadura.
4. Decidir as tensões a aplicar no provete de acordo com os valores de tensão de cedência e rotura do mesmo e a frequência a aplicar.
5. Calcular a carga correspondente à tensão máxima.
6. Ligar a máquina.
7. Colocar o provete na máquina, fechando as amarras.
8. Introduzir os parâmetros a utilizar no ensaio no software de controlo.
9. Iniciar o ensaio
10. Quando o ensaio acabar, devido à ocorrência de fractura no provete ou o número de ciclos chegar aos 2,5 milhões registar o valor de ciclos obtidos.
11. Retirar o provete ensaiado.

8.5.2 Tensão alternada

1. Obtenção dos provetes, a partir das chapas soldadas.
2. Preparação das faces laterais dos provetes, arredondando os bordos com uma lima e retirando rebarba em excesso do cordão de soldadura. Rectificação dos provetes e novamente com a lima, limar os bordos.
3. Efectuar a medição da espessura e da largura do provete na zona da soldadura.
4. Determinar o espectro a utilizar
5. Ligar a máquina.
6. Colocar o provete na máquina, fechando as amarras.
7. Introduzir os parâmetros a utilizar no ensaio no software de controlo (espectro e numero máximo de ciclos).
8. Iniciar o ensaio
9. Quando o ensaio acabar, devido à ocorrência de fractura no provete ou o número de ciclos chegar aos 2,5 milhões registar o valor de ciclos obtidos.
10. Retirar o provete ensaiado.

8.6 Cálculo dos espectros utilizados no ensaio à fadiga de amplitude variável

Os dados necessários para o cálculo do espectro encontram-se na tabela seguinte:

Para o cálculo dos espectros utilizados basta substituir m por o valor obtido nos ensaios de fadiga a tensão constante e v pelos valores pretendidos.

Tabela 11 – Dados necessários para o cálculo do espectro

H_0	10^6
m	5
v	0,8 ; 1; 2; 4

Admitindo os valores da tabela seguinte para a relação $S_i/S_{m\acute{a}x}$ e utilizando uma simplificação da fórmula (4) seguidamente representada (16), procedeu-se ao cálculo de H_i e posteriormente utilizou-se a definição de n_i 17 e efectuou-se o cálculo de n_i .

$$H_i = e \left[\left(1 - \left(\frac{S_i}{S_{m\acute{a}x}} \right)^v \right) \cdot \ln H_0 \right] \quad (16)$$

$$n_i = H_n - H_{n+1} \quad (17)$$

Tabela 12 – Cálculo de H_i e n_i

$S_i/S_{m\acute{a}x}$	v	H_i	H_i	H_i	H_i	v	n_i	n_i	n_i	n_i
		0,8	1	2	4		0,8	1	2	4
0		1000000	1000000	1000000	1000000		715665	498813	33949	86
0,05		284335	501187	966051	999914		172375	249999	95087	1294
0,1		111960	251189	870964	998619		63576	125296	138139	5589
0,15		48384	125893	732825	993030		26287	62797	157385	14893
0,2		22097	63096	575440	978138		11607	31473	153743	30674
0,25		10489	31623	421697	947464		5361	15774	133293	53335
0,3		5128	15849	288403	894129		2561	7906	104326	81368
0,35		2567	7943	184077	812760		1257	3962	74429	110659
0,4		1310	3981	109648	702102		630	1986	48694	134606
0,45		680	1995	60954	567496		322	995	29331	145799
0,5		358	1000	31623	421697		167	499	16312	139233
0,55		191	501	15311	282464		88	250	8393	115585
0,6		103	251	6918	166878		47	125	4001	81968
0,65		56	126	2917	84911		25	63	1769	48653
0,7		31	63	1148	36258		14	31	726	23623
0,75		17	32	422	12635		8	16	277	9148
0,8		10	16	145	3487		4	8	98	2749
0,85		5	8	46	738		2	4	32	622
0,9		3	4	14	116		1	2	10	103
0,95		2	2	4	13		1	1	3	12
1		1	1	1	1		1	1	1	1
$\sum n_i$							1000000	1000000	1000000	1000000

Após o cálculo de H_i e n_i efectuou-se o cálculo de SSF utilizando a fórmula (). O cálculo encontra-se efectuado na tabela seguinte:

Tabela 13 – Cálculo de SSF

$S_i/S_{m\acute{a}x}$		$n_i (S_i/S_{m\acute{a}x})^m$	$N_i (S_i/S_{m\acute{a}x})^m$	$N_i (S_i/S_{m\acute{a}x})^m$	$N_i (S_i/S_{m\acute{a}x})^m$
	v	0,8	1	2	4
0		0	0	0	0
0,05		0,053867177	0,07812456	0,029714778	0,000404454
0,1		0,635763153	1,25296102	1,381390568	0,055891033
0,15		1,996202928	4,768632511	11,95139274	1,130906453
0,2		3,714383652	10,07134651	49,19789885	9,815737174
0,25		5,235624186	15,40414519	130,1692902	52,08486148
0,3		6,223616928	19,21072847	253,5120589	197,7249538
0,35		6,599734404	20,8102732	390,9170621	581,2001019
0,4		6,452813818	20,33468816	498,6278901	1378,366039
0,45		5,940237591	18,36538889	541,2378403	2690,403425
0,5		5,221564243	15,58789895	509,746937	4351,028027
0,55		4,426186862	12,58203844	422,3846784	5817,225304
0,6		3,644266669	9,743024889	311,1086384	6373,803354
0,65		2,930045249	7,286254613	205,287133	5645,166199
0,7		2,309978403	5,289660025	122,0956478	3970,325988
0,75		1,791451845	3,743207282	65,76959366	2170,874255
0,8		1,370165573	2,590523254	32,2128691	900,707915
0,85		1,035627522	1,758053911	14,39125324	276,0391745
0,9		0,774862239	1,172600587	5,88005503	60,67112472
0,95		0,57469347	0,770115007	2,202116959	9,262678332
1		1	1	1	1
$\sum n_i \left(\frac{S_i}{S_{max}}\right)^m$		61,93108591	171,8196655	3569,103461	34486,88634
$SSF = \log \left[\frac{\sum ni}{\sum ni \cdot \left(\frac{S_{a,i}}{S_{a,max}}\right)^m} \right]$	sff	4,208091305	3,764927131	2,447440863	1,462346014

A tabela seguinte mostra os valores de SSF obtidos nos espectros utilizados:

Tabela 14 – Valores de SSF obtidos

m = 5,8	v = 1,5	v = 2	v = 4	v = 5
SSF	3,28	2,74	1,66	1,40

Diferenças entre o espectro pedido e o espectro realmente realizado pela máquina:

Tabela 15 – Espectro realizado no ensaio de fadiga

Factor	15394	Niu_2_1	16933	Niu_2_2	15035	Niu_4_1	11500	Niu_4_2	10000	Niu_4_3	18500	Niu_1,5_1	16100	Niu_1,5_2	14500	Niu_5
Si/Smáx	Carga		Carga		Carga		Carga		Carga		Carga		Carga		Carga	
	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado	Pedido	Efectuado
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	770	660	847	730	752	440	575	340	500	300	925	770	805	694	725	500
0,1	1539	1390	1693	1540	1504	1270	1150	900	1000	700	1850	1690	1610	1460	1450	1200
0,15	2309	2300	2540	2530	2255	2210	1725	1560	1500	1300	2775	2790	2415	2390	2175	2100
0,2	3079	3070	3387	3400	3007	3000	2300	2250	2000	1850	3700	3740	3220	3220	2900	2900
0,25	3848	3860	4233	4230	3759	3750	2875	2880	2500	2520	4625	4650	4025	4040	3625	3630
0,3	4618	4640	5080	5100	4511	4510	3450	3470	3000	3030	5550	5580	4830	4850	4350	4350
0,35	5388	5400	5927	5930	5262	5270	4025	4030	3500	3540	6475	6480	5635	5650	5075	5100
0,4	6158	6170	6773	6780	6014	6010	4600	4620	4000	4040	7400	7400	6440	6440	5800	5820
0,45	6927	6930	7620	7630	6766	6770	5175	5200	4500	4530	8325	8060	7245	7230	6525	6540
0,5	7697	7670	8467	8480	7518	7520	5750	5760	5000	5050	9250	8980	8050	8040	7250	7260
0,55	8467	8450	9313	9320	8269	8270	6325	6340	5500	5530	10175	9910	8855	8800	7975	7980
0,6	9236	8940	10160	9890	9021	8740	6900	6690	6000	6020	11100	10860	9660	9350	8700	8710
0,65	10006	9720	11007	10760	9773	9480	7475	7260	6500	6520	12025	11820	10465	10190	9425	9430
0,7	10776	10500	11853	11750	10525	10250	8050	7810	7000	7010	12950	12770	11270	11130	10150	10170
0,75	11545	11300	12700	12510	11276	11030	8625	8360	7500	7520	13875	13590	12075	11840	10875	10620
0,8	12315	12110	13547	13400	12028	11800	9200	8910	8000	8000	14800	14800	12800	12800	11600	11370
0,85	13085	12800	14603	14600	12780	12590	9775	9340	8500	8500	15725	15725	13625	13625	12325	11990
0,9	13854	13600	15440	15400	13532	13300	10350	10090	9000	9000	16650	16650	14500	14500	13050	12790
0,95	14624	14400	16287	16200	14383	14200	10925	10600	9500	9500	17575	17575	15400	15400	13900	13600
1	15394	15200	17133	17000	15035	14800	11500	11300	10000	10000	18500	18500	16100	16100	14500	14500

Tabela 16 – Distribuição de ciclos em cada espectro

	v = 1,5	v = 2	v = 4	v = 5
Si/Smáx	Ni / 100	Ni / 100	Ni / 100	Ni / 100
0	1451	335	1	0
0,05	2108	951	13	1
0,1	1979	1381	56	9
0,15	1575	1574	149	34
0,2	1128	1537	307	90
0,25	745	1333	533	196
0,3	461	1043	814	370
0,35	269	744	1107	619
0,4	149	487	1346	931
0,45	79	293	1458	1256
0,5	40	163	1392	1505
0,55	19	84	1156	1574
0,6	9	40	820	1402
0,65	4	18	487	1032
0,7	2	7	236	604
0,75	1	3	91	269
0,8	0	1	27	86
0,85	0	0	6	19
0,9	0	0	1	3
0,95	0	0	0	0
1	0	0	0	0
	10000	10000	10000	10000

8.7 Cálculos do dano acumulado

Para calcular o dano total acumulado num provete até a rotura são necessários os dados da tabela seguinte: (como exemplo vamos calcular o dano do provete AC_3.49).

Tabela 17 – Dados necessários para cálculo do dano

Referência	B (mm)	W (mm)	Nº Ciclos até rotura	Espectro utilizado
AC_3.49	3,94	15,2	279972	4_1

Como já foi anteriormente determinado no nosso caso temos: $m=5,8$ e $C=1017,65$

Para calcular o número de sequências de carga a que o provete foi sujeito utilizou-se a seguinte expressão:

$$N_{Sequências} = \frac{N_{ciclos\ até\ rotura}}{N_{ciclos\ por\ frequência}} = \frac{279972}{9999} = 28 \text{ Sequências de carga} \quad (18)$$

Estamos agora em condições de calcular o valor de dano acumulado até à rotura.

Tabela 18 – Exemplo de cálculo de dano acumulado

n_i (espectro v = 4)	$n_{i_{total}} = N_{cicl} * Seq$	$\Delta\sigma = \frac{P_{efect}}{WxB}$	$N_i = \left(\frac{C}{\Delta\sigma}\right)^m$	$Dano = \frac{n_i}{N_i}$
13	362	7,347047823	2,63406E+12	1,37579E-10
56	1565	21,20625167	5631049112	2,77914E-07
149	4170	36,90221747	226556073,5	1,84057E-05
307	8589	50,09350788	38489974,14	0,000223143
533	14934	62,61688485	10550415,02	0,001415467
814	22783	75,30724018	3617653,384	0,006297758
1107	30984	87,99759551	1466051,844	0,021134592
1346	37690	100,3539941	684193,5238	0,055086272
1458	40824	113,0443495	342954,5889	0,11903535
1392	38985	125,5677264	186460,7476	0,209079846
1156	32364	138,0911034	107428,3589	0,301259832
820	22951	145,9390863	77962,29003	0,294384917
487	13623	158,2954849	48658,92837	0,279965903
236	6614	171,1528186	30935,16789	0,213816503
91	2561	184,1771306	20216,82373	0,126698992
27	770	197,0344643	13668,95313	0,056306239
6	174	210,2257547	9386,456289	0,018558042
1	29	222,0812183	6828,280906	0,004213237
$Dano\ total = \sum \frac{n_i}{N_i}$				1,707494777

8.8 Cálculo da tensão equivalente

Para calcular a tensão equivalente a que um provete está sujeito no ensaio, são necessários os dados da tabela seguinte: (como exemplo vamos calcular a tensão equivalente para o provete AC_3.49).

Tabela 19 – Dados necessários para o cálculo da tensão equivalente

Referência	B	W	Espectro utilizado	m
AC_3.49	3,94	15,2	4_1	5,8

Utilizando a equação (1a de cima) estamos em condições de calcular a tensão equivalente:

n_i	$\Delta\sigma = \frac{P_{efect}}{WxB}$	$\Delta\sigma^m$	$n_i * \Delta\sigma^m$
13	7,347047823	105549,1225	1366073,676
56	21,20625167	49373132,82	2759515374
149	36,90221747	1227168759	1,82757E+11
307	50,09350788	7223245583	2,21567E+12
533	62,61688485	26351810342	1,40547E+13
814	75,30724018	76851623459	6,25329E+13
1107	87,99759551	1,8964E+11	2,09853E+14
1346	100,3539941	4,06351E+11	5,46973E+14
1458	113,0443495	8,10669E+11	1,18195E+15
1392	125,5677264	1,49105E+12	2,07603E+15
1156	138,0911034	2,58798E+12	2,99132E+15
820	145,9390863	3,56612E+12	2,92306E+15
487	158,2954849	5,7137E+12	2,77989E+15
236	171,1528186	8,98726E+12	2,12307E+15
91	184,1771306	1,3752E+13	1,25804E+15
27	197,0344643	2,03397E+13	5,59086E+14
6	210,2257547	2,96195E+13	1,8427E+14
1	222,0812183	4,07163E+13	4,18348E+13
$\sum n_i$	9999	$\sum n_i * \Delta\sigma^m$	16954369759879900
		$\sigma_{equi} = \left(\frac{\sum n_i * \Delta\sigma^m}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{m}}$	128,3820402

8.9 Simplificação da expressão da distribuição de Weibull:

Partindo da expressão da distribuição de Weibull presente na equação 14.

$$\begin{aligned}R(t) &= e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \\ \ln R(t) &= -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \\ \ln \frac{1}{R(t)} &= \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \\ \ln \left(\ln \frac{1}{R(t)}\right) &= \ln \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \\ \ln \left(\ln \frac{1}{R(t)}\right) &= \beta \ln \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right) \\ \frac{1}{\beta} \ln \left(\ln \frac{1}{R(t)}\right) &= \ln \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right) \\ \frac{1}{\beta} \ln \left(\ln \frac{1}{R(t)}\right) &= \ln(t-\gamma) - \ln \eta \\ \ln(t-\gamma) &= \frac{1}{\beta} \ln \left[\ln \frac{1}{R(t)}\right] + \ln \eta\end{aligned}$$

Como queria ser demonstrado da expressão 14 obteve-se a equação 15.

8.10 Obtenção da distribuição característica de Weibull para os valores de dano calculados:

1. Organizar os danos da forma crescente
2. Numerar os danos obtidos (coluna i)
3. Cálculo da probabilidade de não ocorrência $F(t) = \frac{i-0,3}{N_{(i)}+0,4}$, pois $N < 20$
4. Cálculo de $R(t) = 1 - F(t)$
5. Cálculo de $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{R(t)} \right) \right]$
6. Cálculo de $\ln(A - XS)$ para este caso o valor que minimiza r^2 é $XS=0,53$
7. Representar graficamente os pontos $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{R(t)} \right) \right]$ em função dos respectivos valores de $\ln(A - XS)$.

i	Dano (A)	$F(t) = \frac{i - 0,3}{N_{(i)} + 0,4}$	$R(t) = 1 - F(t)$	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{R(t)} \right) \right]$	$\ln(A - XS)$
1	0,6	0,042683	0,957317	-3,13223	-2,65926
2	0,65	0,103659	0,896341	-2,21244	-2,12026
3	0,72	0,164634	0,835366	-1,71543	-1,66073
4	0,8	0,22561	0,77439	-1,36383	-1,30933
5	0,84	0,286585	0,713415	-1,08562	-1,17118
6	1,04	0,347561	0,652439	-0,85088	-0,67334
7	1,16	0,408537	0,591463	-0,64406	-0,46204
8	1,17	0,469512	0,530488	-0,45577	-0,44629
9	1,28	0,530488	0,469512	-0,27963	-0,28768
10	1,28	0,591463	0,408537	-0,11074	-0,28768
11	1,31	0,652439	0,347561	0,05526	-0,24846
12	1,38	0,713415	0,286585	0,222919	-0,16252
13	1,39	0,77439	0,22561	0,39807	-0,15082
14	1,71	0,835366	0,164634	0,590023	0,165514
15	2,01	0,896341	0,103659	0,818304	0,392042
16	2,81	0,957317	0,042683	1,148658	0,824175

8.11 Cálculo da percentagem de replicação

Segundo a norma (ASTM E 739) a percentagem de replicação é dada pela seguinte expressão:

$$\% R = 100 \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ niveis de tensão}}{n^{\circ} \text{ provetes}} \right) \quad (19)$$

Para o caso em estudo temos:

Amplitude constante:

$$\% R = 100 \left(1 - \frac{3}{21} \right) = 85,71\%$$

Amplitude variável:

$$\% R = 100 \left(1 - \frac{5}{16} \right) = 68,75\%$$

Consultando a tabela da norma vem que:

Tipo de ensaio	Percentagem de replicação
Permite dimensionamento em projecto	50 a 75
Dados confiáveis	75 a 88