



Friction Stir Welding European Qualifications

# ENGENHEIRO (EFSW-E) E ESPECIALISTA (EFSW-S) EUROPEU DE SOLDADURA POR FRICÇÃO LINEAR



Cofinanciado pelo  
Programa Erasmus+  
da União Europeia



# 7. Qualidade

## Âmbito:

7.1 Ensaios Destrutivos

7.2 Normas para ensaios destrutivos e critérios de aceitação

7.3 Ensaios não destrutivos (END)

7.4 Normas para ensaios não destrutivos e critérios de aceitação

7.5 Calibração de equipamentos e reprodutibilidade

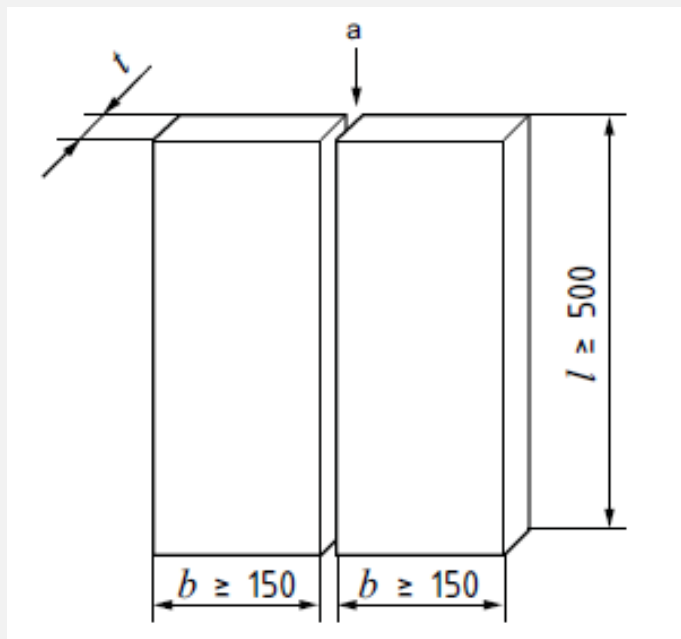
## 7.1 Ensaio destrutivos

Ensaio destrutivos de juntas soldadas por SFL estão **associados com a qualificação de procedimentos de soldadura (QPS)**. Como a maioria das aplicações comerciais de SFL envolve **alumínio e ligas de alumínio**, as normas:

- ISO 25239-4:2011 Friction stir welding – Aluminium – Specification and qualification of welding procedures i.e. “Soldadura por Fricção Linear – Alumínio – Especificação e qualificação de procedimentos de soldadura”
- AWS D17.3/D17.3M:2016 Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications i.e. “Especificação de Soldadura por Fricção Linear de Ligas de Alumínio para Aplicações Aeroespaciais”

Estas duas norma cobrem **juntas de soldadura topo-a-topo e sobrepostas**. As juntas de soldadura topo-a-topo representam mais de **85% de todas as soldaduras produzidas pelo processo SFL**.

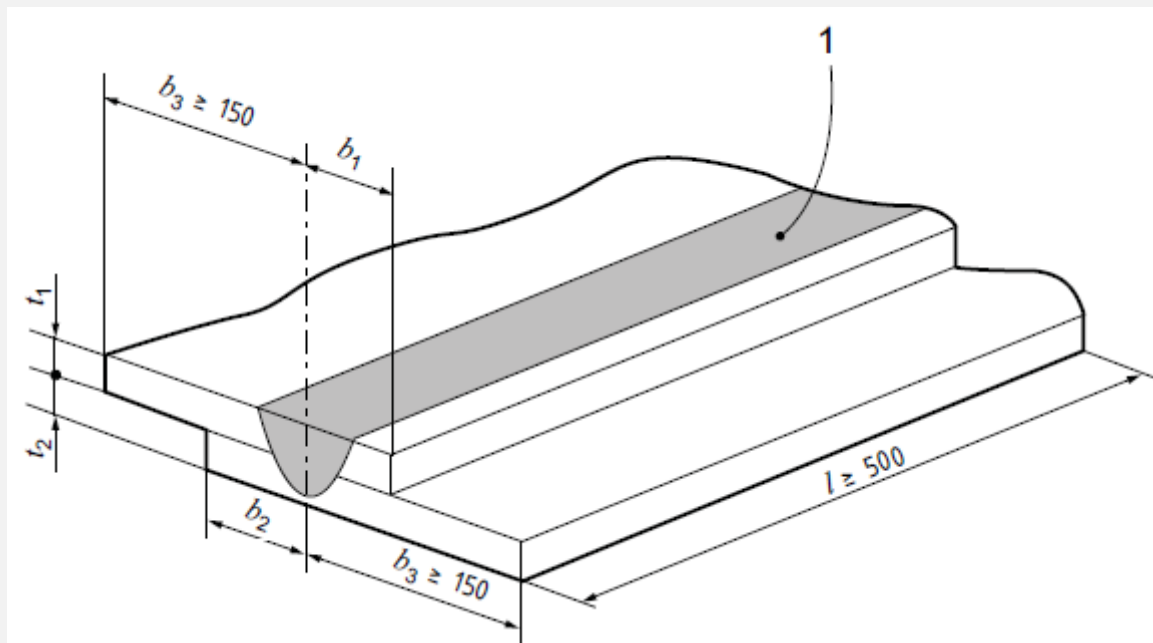
## Provetes de ensaio (forma e dimensão) de acordo com a ISO 25339-4



### Chave

- b largura dos componentes
- l comprimentos dos componentes
- t espessura do material
- a Preparação da junta e ajuste

Proвете para soldadura topo-a-topo em chapa/placa com penetração total



**Chave**

- 1 soldadura
- $b_1$  distância da aresta à linha central de soldadura da chapa superior
- $b_2$  distância da aresta à linha central de soldadura da chapa inferior
- $b_3$  distância entre o centro da soldadura e a aresta da peça de trabalho
- $l$  comprimento da peça de trabalho
- $t_1$  espessura do material da chapa superior
- $t_2$  espessura do material da chapa inferior

## Provete de ensaio para juntas sobrepostas de chapas

## Extensão de ensaios destrutivos para juntas topo-a-topo por SFL

Tipo de ensaio	ISO 25329-4	AWS D17.3
Ensaio de tração transversal	2 provetes	4 provetes
Ensaio de dobragem transversal (materiais trabalhados)	2 provetes (raiz) 2 provetes (face)	/
Ensaio de fratura (materiais vazados)	2 provetes (raiz) 2 specimens (face)	/
Ensaio macroscópico	1 provete	2 provetes
Tenacidade à fratura	/	Se necessário

**Ensaios destrutivos especiais** em juntas topo-a-topo incluem:

- Ensaio de fadiga
- Ensaios de dureza e microdureza

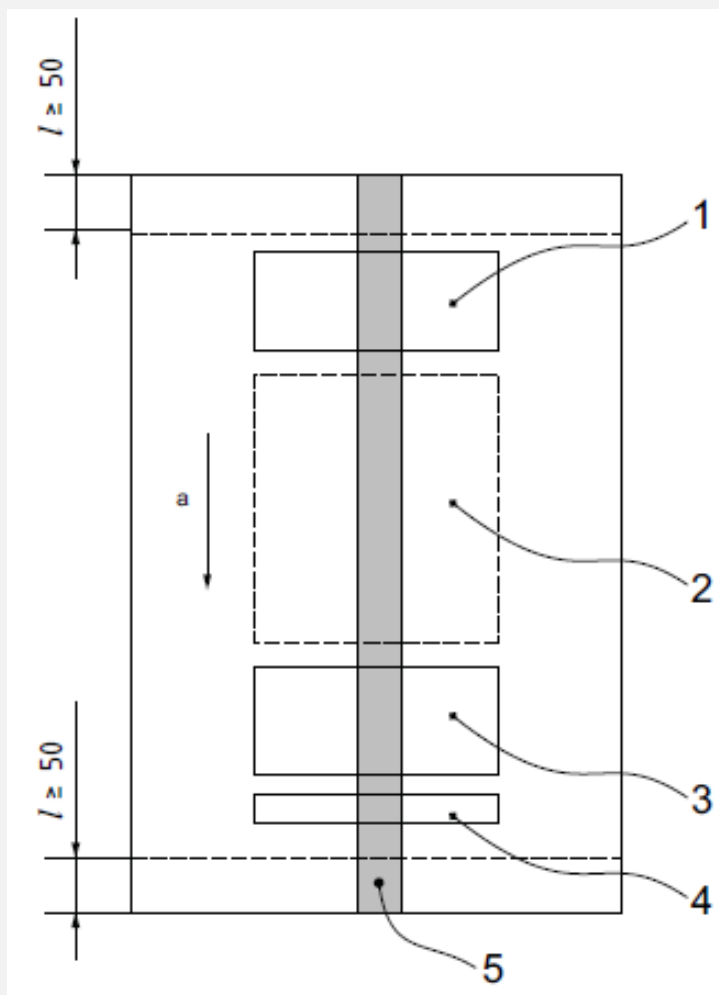
## Extensão de ensaios destrutivos para juntas sobrepostas por SFL

Tipo de ensaio	ISO 25239-4	AWS D17.3
Ensaio macroscópico	2 provetes	2 provetes
Ensaio ao corte	Se necessário	2 provetes
Ensaio de arrancamento	Se necessário	/
Teste do martelo S	Se necessário	/

**Ensaios destrutivos especiais** em juntas sobrepostas incluem:

- Ensaio de fadiga
- Ensaios de dureza e microdureza

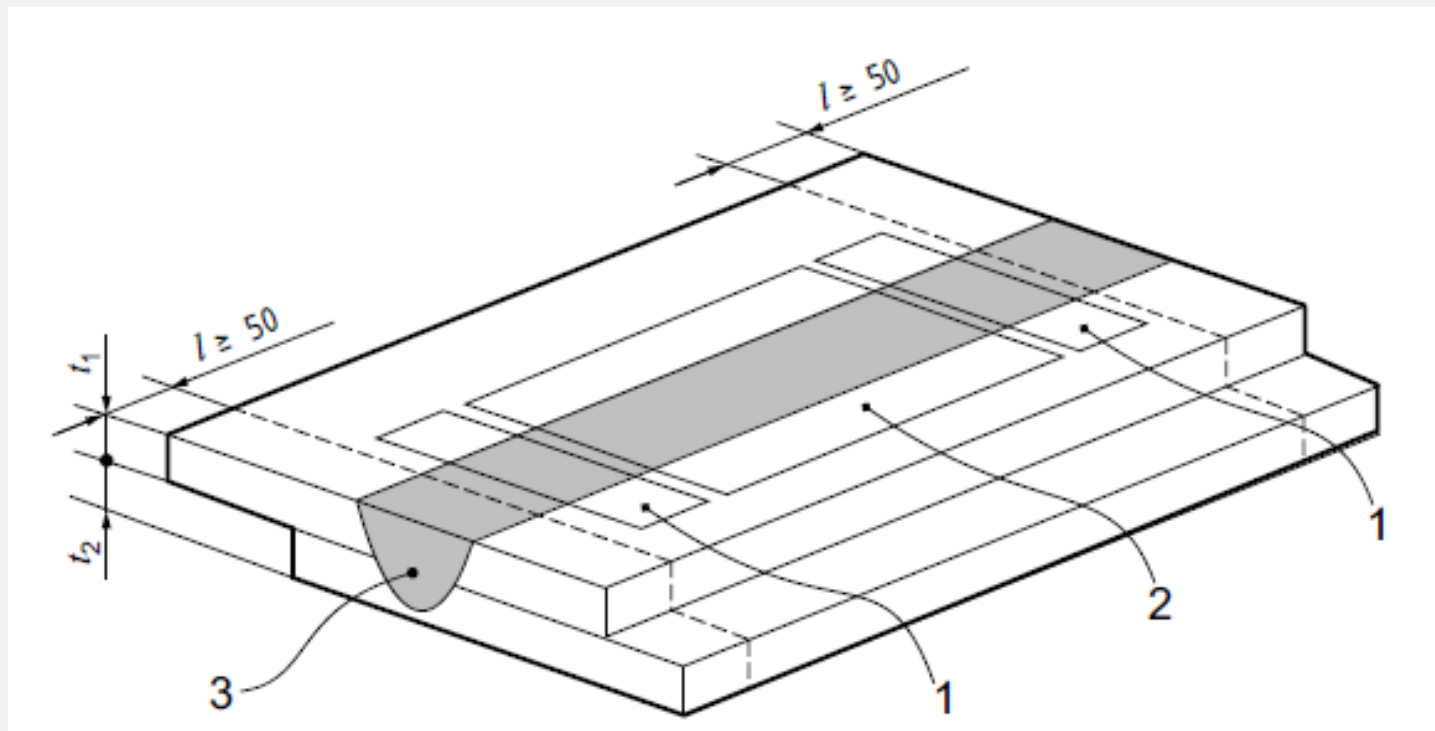
## Localização dos provetes de ensaio para uma junta de soldadura de chapa/placa de acordo com a ISO 25239-4



### Chave

- 1 área para um provete de tração, provetes de dobragem ou fratura
- 2 área para provetes de ensaios adicionais, se necessário
- 3 área para um provete de tração, provetes de dobragem ou fratura
- 4 área para um provete de exame macrográfico
- 5 soldadura
- l comprimento descartado do final de aresta da soldadura
- a Direção de soldadura

## Localização dos provetes de ensaio para uma junta sobreposta de acordo com a ISO 25239-4

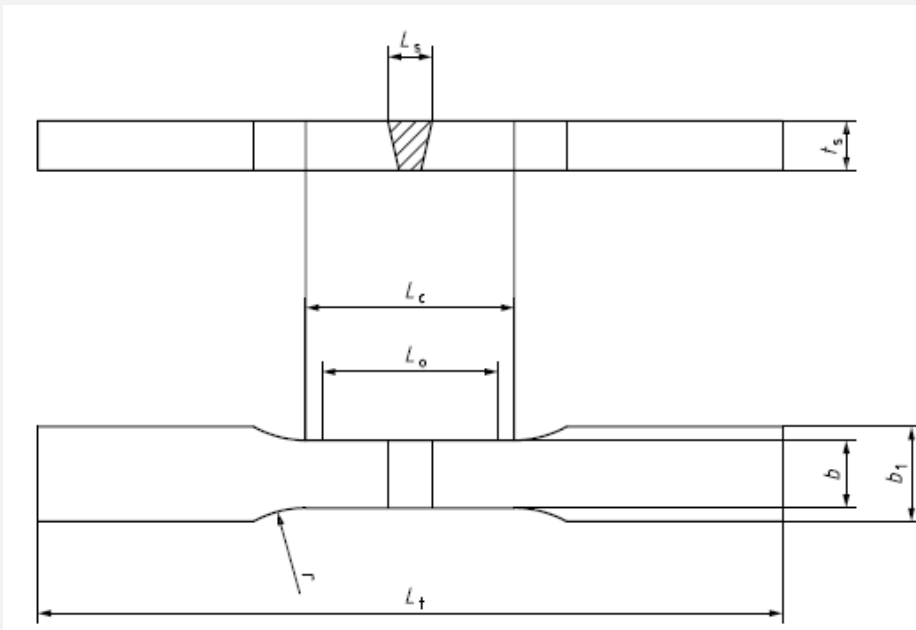


### Chave

- 1 área para dois provetes para exame macrográfico
- 2 área para provetes para os ensaios de arrancamento, ao corte e dobragem por martelagem S, se necessário
- 3 soldadura
- l comprimento descartado do final de cada aresta da soldadura

## 7.2 Normas para ensaios destrutivos e critérios de aceitação

### ➤ Ensaio de tração transversal de juntas de soldadura em chapas: ISO 4136:2012



Denominação	Simbolo	Dimensões
Comprimento total do provete de ensaio	$L_t$	De forma a adequar-se à máquina de ensaios
Largura da base	$b_1$	$B + 12$
Largura do comprimento paralelo	$b$	12 para $t_s \leq 2$ 25 para $t_s > 2$
Comprimento paralelo	$L_c$	$\geq L_s + 60$
Raio da base	$r$	$\geq 25$
<sup>a</sup> para alguns materiais metálicos (e.g. alumínio, cobre e suas ligas) $L_c \geq L_s + 100$ pode ser necessário		

➤ Ensaio de dobragem transversal de juntas topo-a-topo em chapas:  
EN ISO 5174:2010

Os lados de avanço e retrocesso dos provetes devem ser identificados antes do ensaio. **Para todos os materiais o ângulo de dobragem mínimo deve ser 150°**, utilizando o **diâmetro máximo da matriz (d)** baseado no alongamento (A) mínimo do material base como (para A>5%):

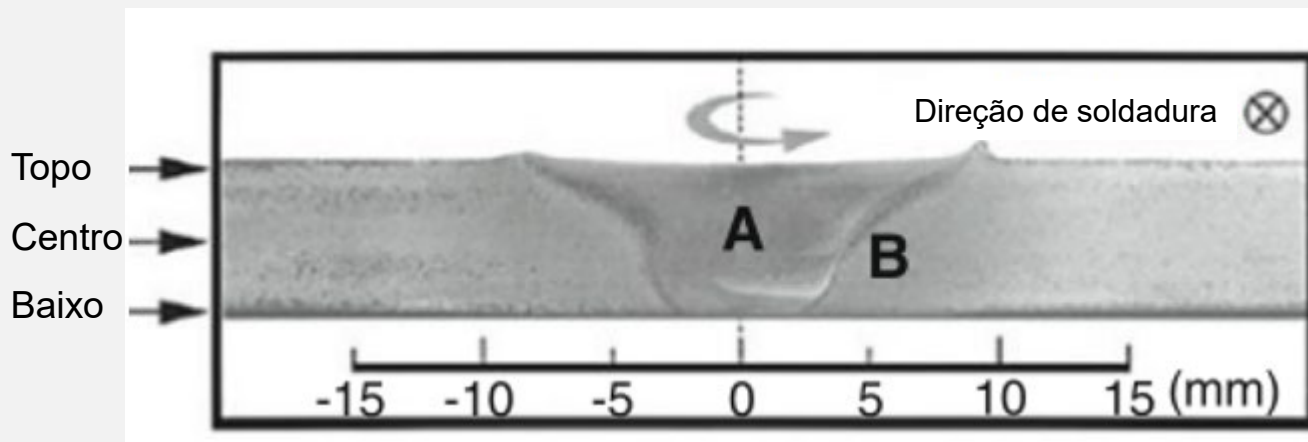
$$d = \frac{100 \times t_s}{A} - t_s$$

$t_s$  – espessura do provete de dobragem (inclui dobragens laterais) [mm]

Para uma alongamento  **$A \leq 5\%$** , **um recozimento deve ser realizado** antes do ensaio. O diâmetro da matriz deve ser calculado com o alongamento dado pela condições de tratamento “O” especificados. Se os ensaios de dobragem falharam devido ao aumento do tamanho de grão que ocorreu durante o processo de recozimento, um ensaio de dobragem adicional deve ser realizado. **Durante o ensaio, os provetes de ensaio não devem revelar nenhuma fissura superior a 3mm em qualquer direção.**

➤ Exame macroscópico (ME) das juntas topo-a-topo e sobrepostas: ISO 17639:2013

O provete deve ser preparado e analisado **num lado para revelar claramente a região de soldadura**. O exame macroscópico deve incluir material base não afetado. O exame macroscópico antes da contrastação **não deverá revelar fissuras**.



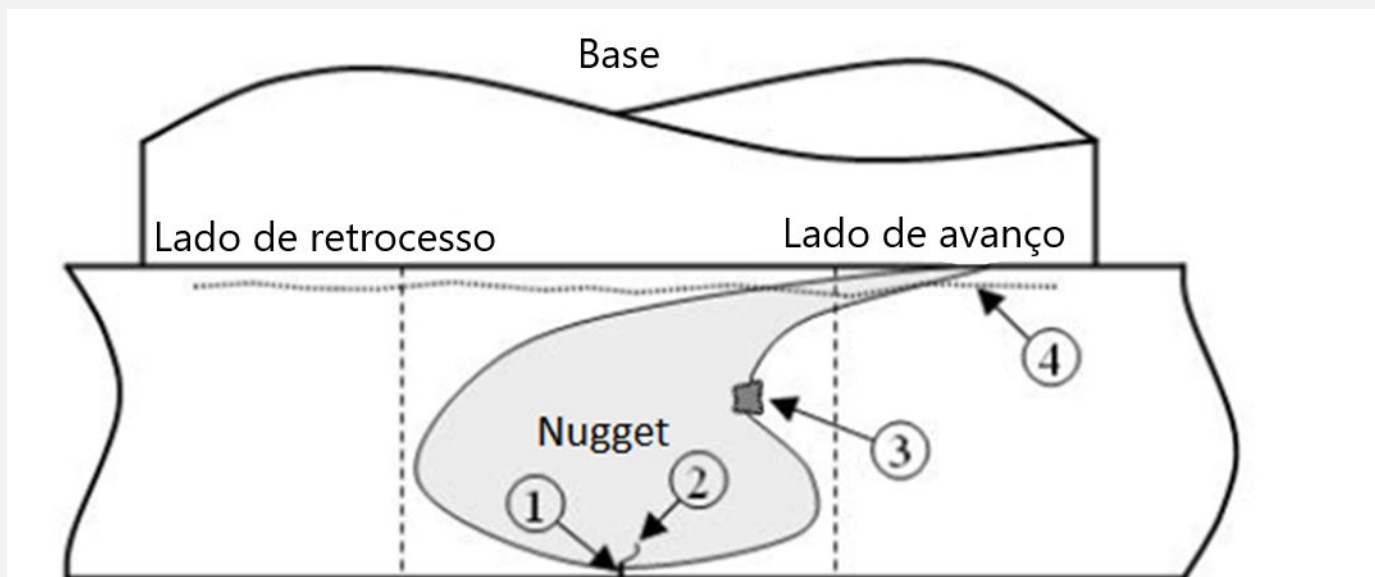
Exame macroscópico da soldadura topo-a-topo SFL da liga de alumínio AA6063-T5

➤ Análise Visual (VT) de juntas topo-a-topo e sobrepostas: ISO 17637:2016

Este tipo de inspeção é **geralmente o primeiro a ser realizado** e é o ensaio de inspeção mais simples. A inspeção por VT na face e raiz de soldadura **deve ser feita realizada a 100%** nas juntas SFL dos componentes soldados por este processo.

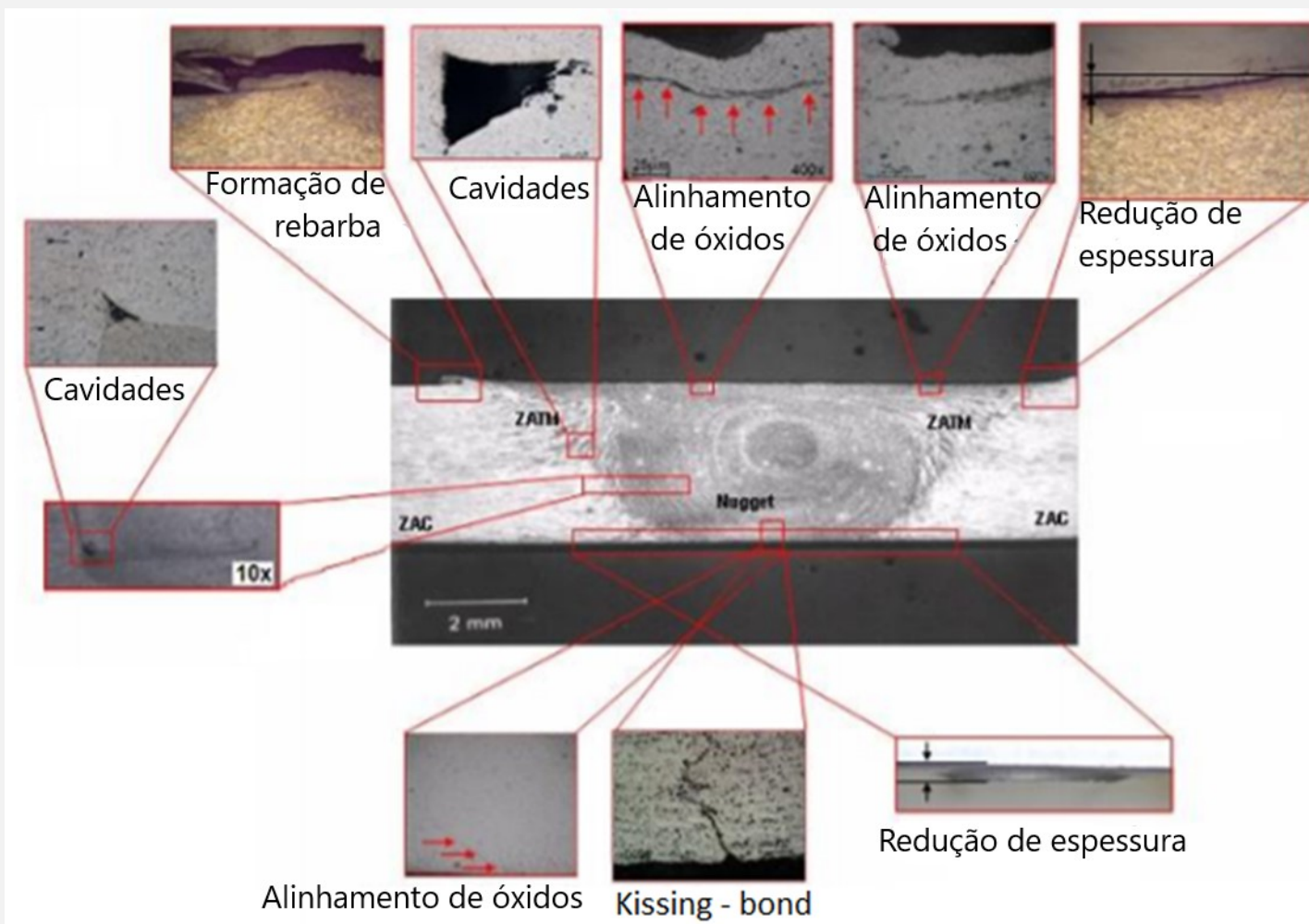
- **Para ambos os testes (ME, VT), devem ser aplicados os níveis de aceitação da ISO 25239-5: 2011 - Anexo A.** Outras imperfeições devem estar dentro dos limites especificados dos requisitos relevantes ou da especificação do projeto.

## Tipos de imperfeições típicas em juntas topo-a-topo soldadas por FSW

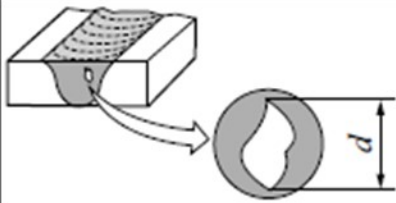
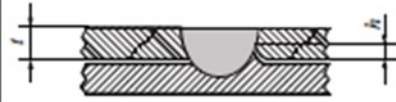


- 1) Falta de penetração (*Kissing bonds*)
- 2) Falha na raiz (ligações intermitentes ou fracas)
- 3) Cavidades do lado de avanço
- 4) Alinhamento de partículas de segundo constituinte e óxidos debaixo da base

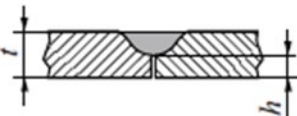
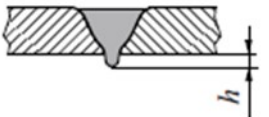

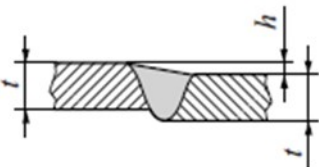
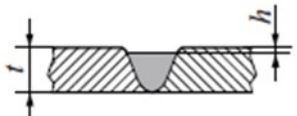
## Imperfeições reveladas com exame macroscópico (ME)



## Imperfeições internas e níveis de aceitação para os ensaios de VT, ME - ISO 25239-5

Designação de imperfeições	Observações	Ensaio e análise na ISO 25239-4 <sup>a</sup>	Níveis de aceitação <sup>a</sup>	Número de referência na ISO 6520-1 <sup>[3]</sup>
<b>Imperfeições Internas</b>				
<b>Cavidade</b>		ME	$d \leq 0,2s$ or 4 mm, o menor	200
<b>Gancho</b>		ME	— <sup>b</sup>	— <sup>c</sup>
<p><b>Simbolos e termos abreviados</b></p> <p><i>d</i> dimensão transversal máxima de uma cavidade (mm)</p> <p><i>h</i> altura de uma imperfeição (mm)</p> <p><i>s</i> espessura nominal de uma soldadura topo-a-topo (penetração) (mm)</p> <p><i>t</i> espessura nominal do material base (mm)</p> <p>ME Exame macroscópico</p> <p>VT Análise visual</p>				
<p><sup>b</sup> Níveis de aceitação devem estar dentro de limites especificados dos requisitos relevantes ou especificação de projecto</p> <p><sup>c</sup> Ver ISO 25239-1</p>				

## Imperfeições superficiais e níveis de aceitação para os ensaios de VT, ME – ISO 25239-5

Designação de imperfeições	Observações	Ensaio e análise na ISO 25239-4 <sup>a</sup>	Níveis de aceitação <sup>a</sup>	Número de referência na ISO 6520-1 <sup>[3]</sup>
<b>Imperfeições superficiais</b>				
Penetração incompleta		ME	Não permitido	—c
Penetração excessiva		VT, ME	$h \leq 3 \text{ mm}$	504
Rebarba		VT, ME	—b	—c
Desalinhamento Linear		VT, ME	$h \leq 0,2t \text{ or } 2 \text{ mm, o menor}$	507
Falta de enchimento		VT, ME	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1t$ para $t \geq 2 \text{ mm}$ : $h \leq 0,15t$ para $t < 2 \text{ mm}$	—c
Espessura irregular	Varição excessiva na largura da soldadura	VT	—b	513
Superfície irregular	Rugosidade superficial excessiva	VT	—b	514

## 7.3 Ensaaios não destrutivos (END)

Os métodos END utilizados para inspecionar juntas de soldadura por SFL **são fundamentalmente os mesmos** que os utilizados para outros tipos de soldadura.

### Métodos END Obrigatórios:

- Ensaios de Líquidos Penetrantes (PT)
- Ensaio radiográfico (RT)
- Ensaio por ultrassons (UT)

### Métodos END Especiais:

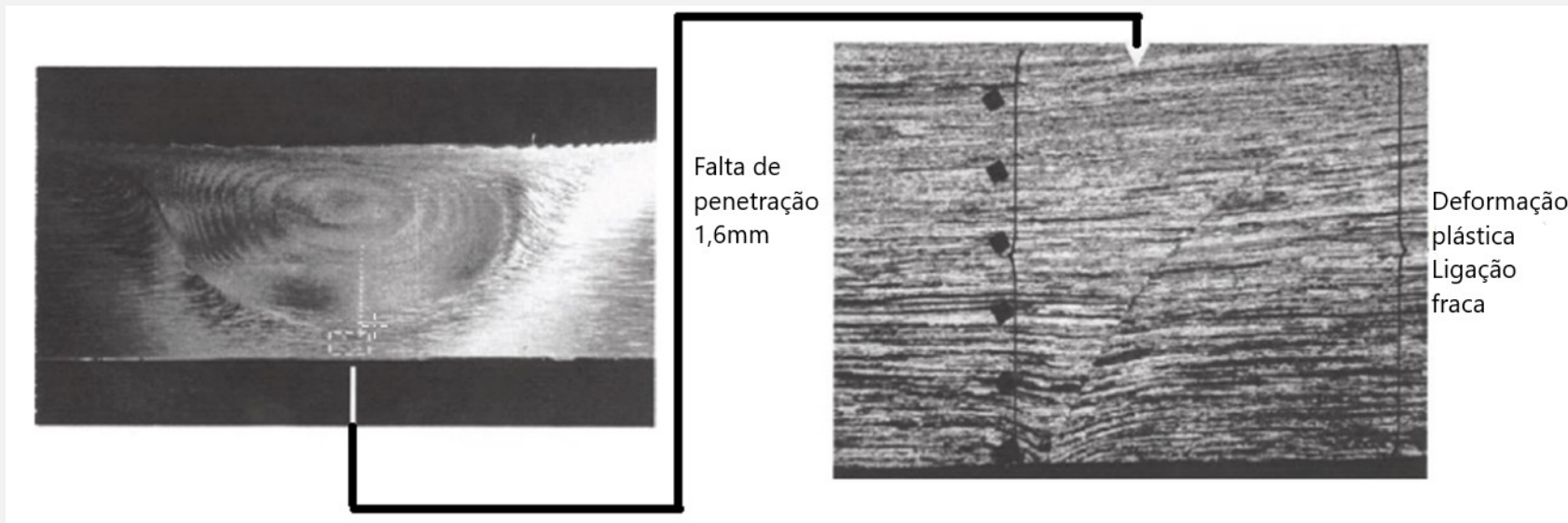
- Ensaio por correntes de Eddy (ET)

## ➤ Ensaio de Líquidos Penetrantes (PT):

Este é um método de inspeção amplamente aplicado e de baixo custo utilizado **para localizar imperfeições de fratura na superfície em todos os materiais não porosos** (metais, plásticos, cerâmicas). O PT baseia-se na ação capilar, em que o fluido com baixa tensão superficial (corante) penetra nas descontinuidades superficiais limpas e secas.

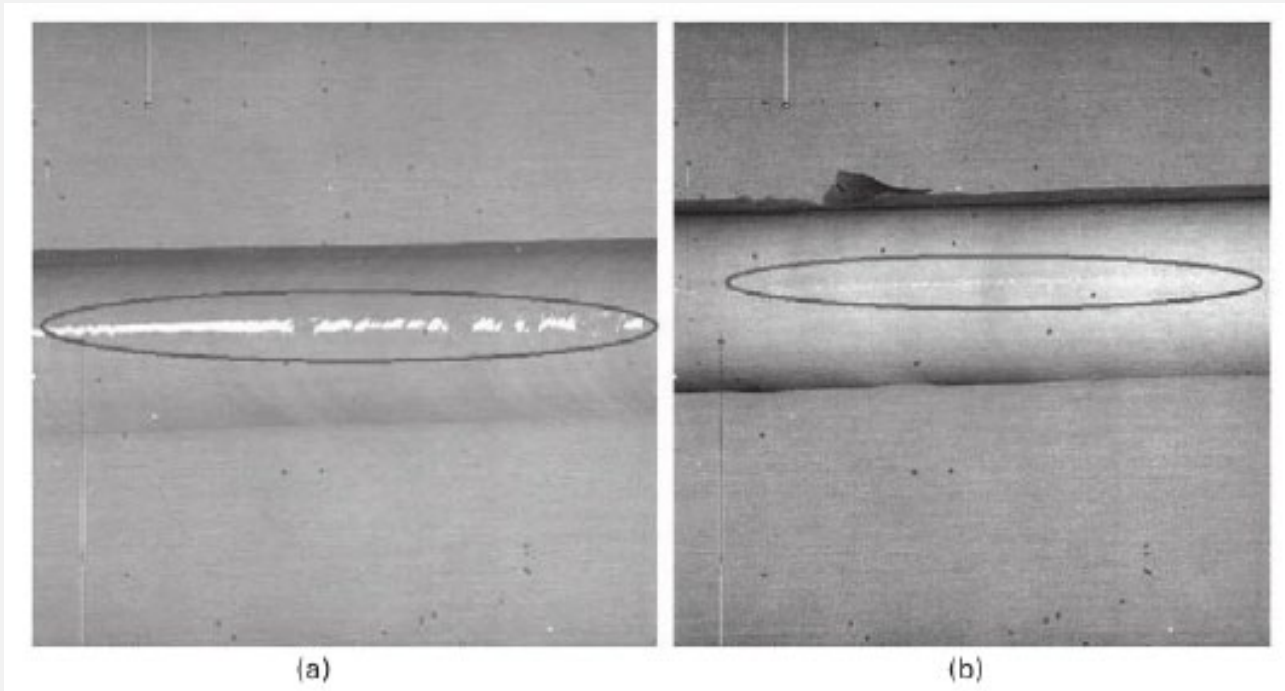
## Características da inspeção PT

Aplicação (tipos de imperfeições)	Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• Fissuras</li><li>• Porosidades</li><li>• Caminhos de fuga</li><li>• Cordões</li><li>• Sobreposições</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Barato</li><li>• Sensível</li><li>• Pouco Equipamento</li><li>• Aplicação para formas irregulares</li><li>• Versátil</li><li>• Requer pouca formação</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Apenas superfícies não porosas</li><li>• Detecção de apenas imperfeições superficiais</li><li>• Requisitos de ventilação</li><li>• Sujo</li></ul>




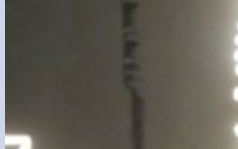

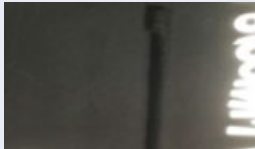

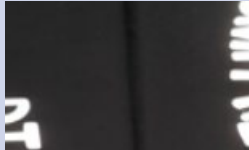
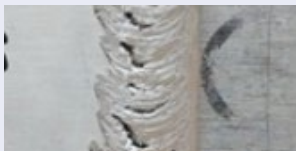

Seção transversal macroscópica da imperfeição da falta de penetração, **revelada pela inspeção por PT**. Esta imperfeição é a **mais comum em soldadura por SFL** e é muito influenciada pela **profundidade de penetração do pino da ferramenta SFL**.

- Ensaio radiográfico (RT): É amplamente utilizado na análise de peças vazadas e juntas de soldadura, especialmente quando há uma necessidade crítica de **garantir a ausência de imperfeições internas**.



Exemplo RT mostrando (a) grandes e (b) pequenos **canais vazios** na soldadura topo-a-topo de Al

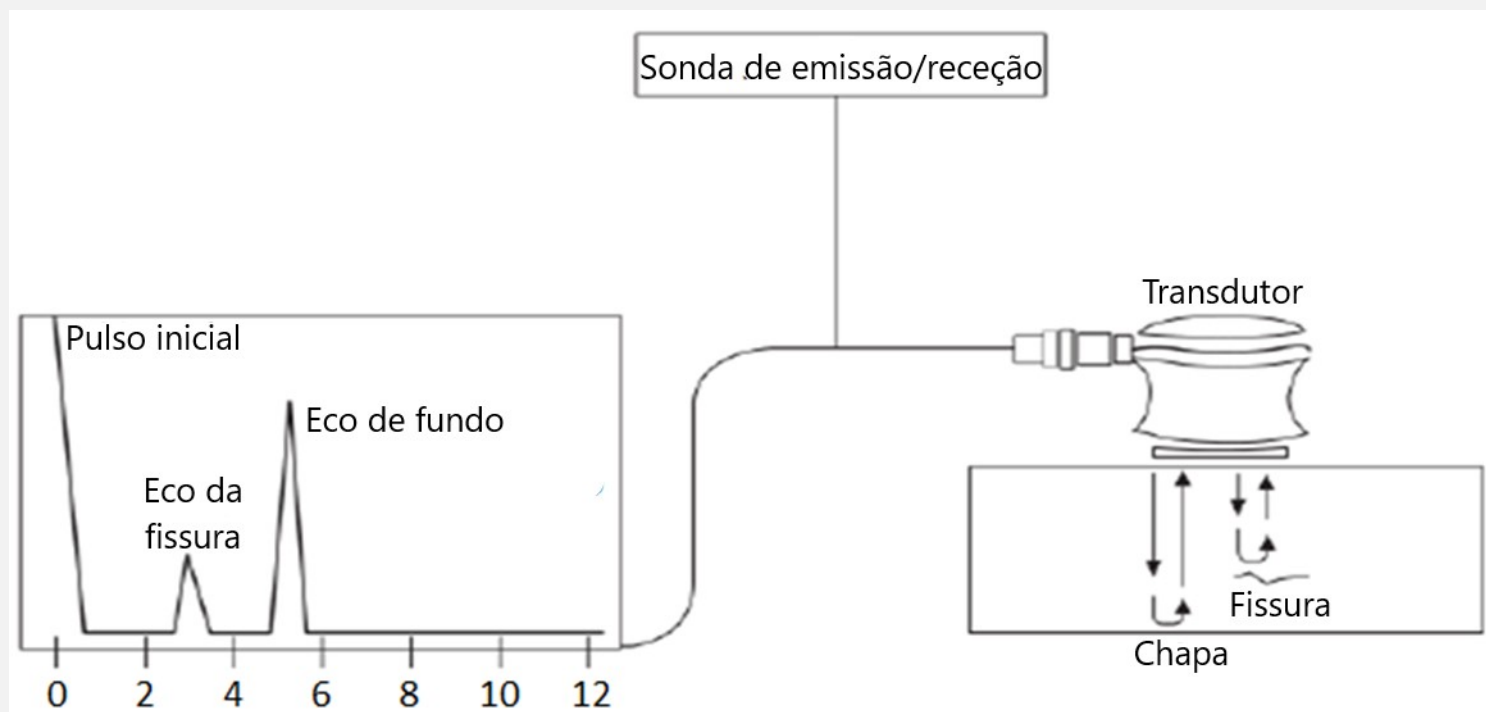
## Algumas radiografias típicas de juntas de soldadura SFL em ligas de alumínio

Foto da soldadura	Radiografia	Imperfeições
		<p>Falta de penetração, canal vazio</p>
		<p>Falta de penetração, fissura, cavidades</p>
		<p>Falta de penetração, fissura, fusão incompleta</p>
		<p>Falta de penetração, fissura, fusão incompleta</p>

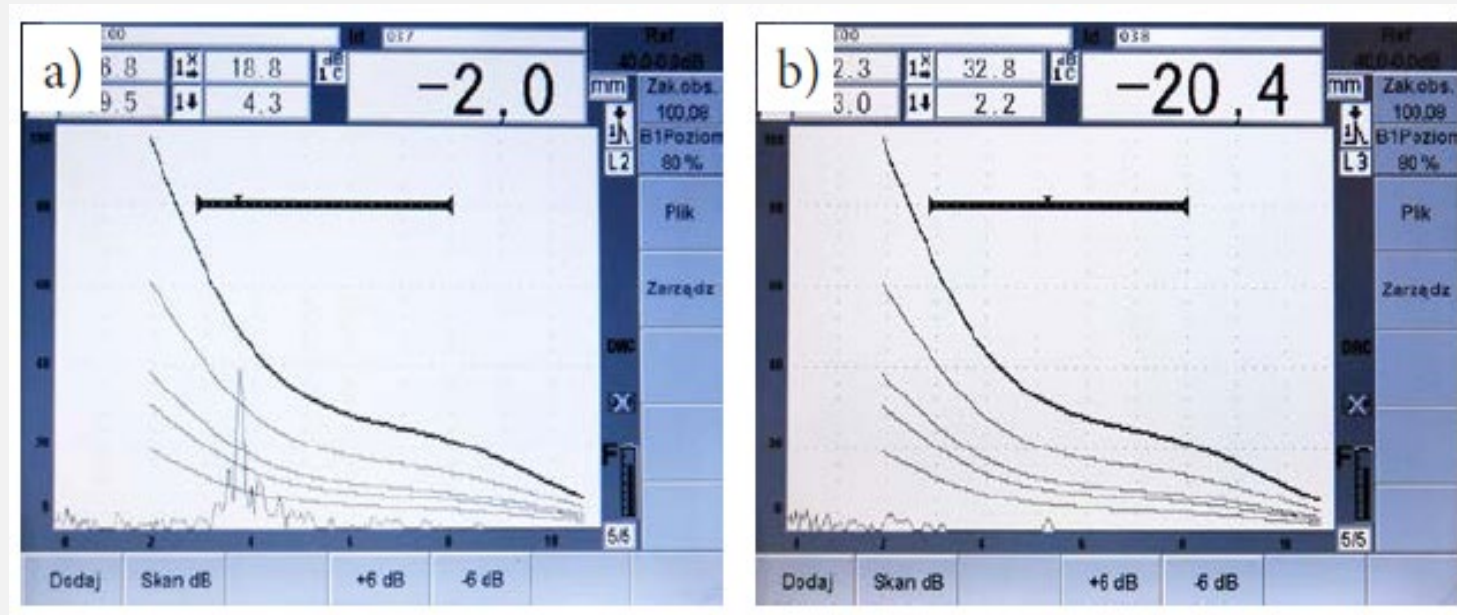
## Características da inspeção RT

Aplicação (tipos de imperfeições)	Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fissuras</li> <li>• Inclusões</li> <li>• Porosidades</li> <li>• Detritos</li> <li>• Falta de fusão</li> <li>• Falta de penetração</li> <li>• Caminhos de fuga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensível a encontrar imperfeições no volume total dos materiais</li> <li>• Registo permanente e de fácil compreensão</li> <li>• Exame volumétrico completo</li> <li>• Portabilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perigo de radiação</li> <li>• Relativamente barato</li> <li>• Longo tempo de montagem</li> <li>• Acesso necessário aos dois lados da junta de soldadura</li> <li>• Profundidade de indicação não indicada</li> <li>• Elevado grau de habilidade necessário para a execução e interpretação dos resultados</li> </ul>

- Ensaio por ultrassons (UT): Utiliza **ondas sonoras de alta frequência** para realizar ensaios e realizar medições. O ensaio UT permite **detetar imperfeições internas** que não chegam à superfície. UT pode ser aplicado para **analisar juntas por um só lado**.



## Exemplo de ensaio UT da junta de soldadura por FSW com o método de pulso-eco da liga AA6082-T6



a) com uma imperfeição deliberadamente introduzida com um diâmetro de 3 mm, localizada no meio de uma soldadura

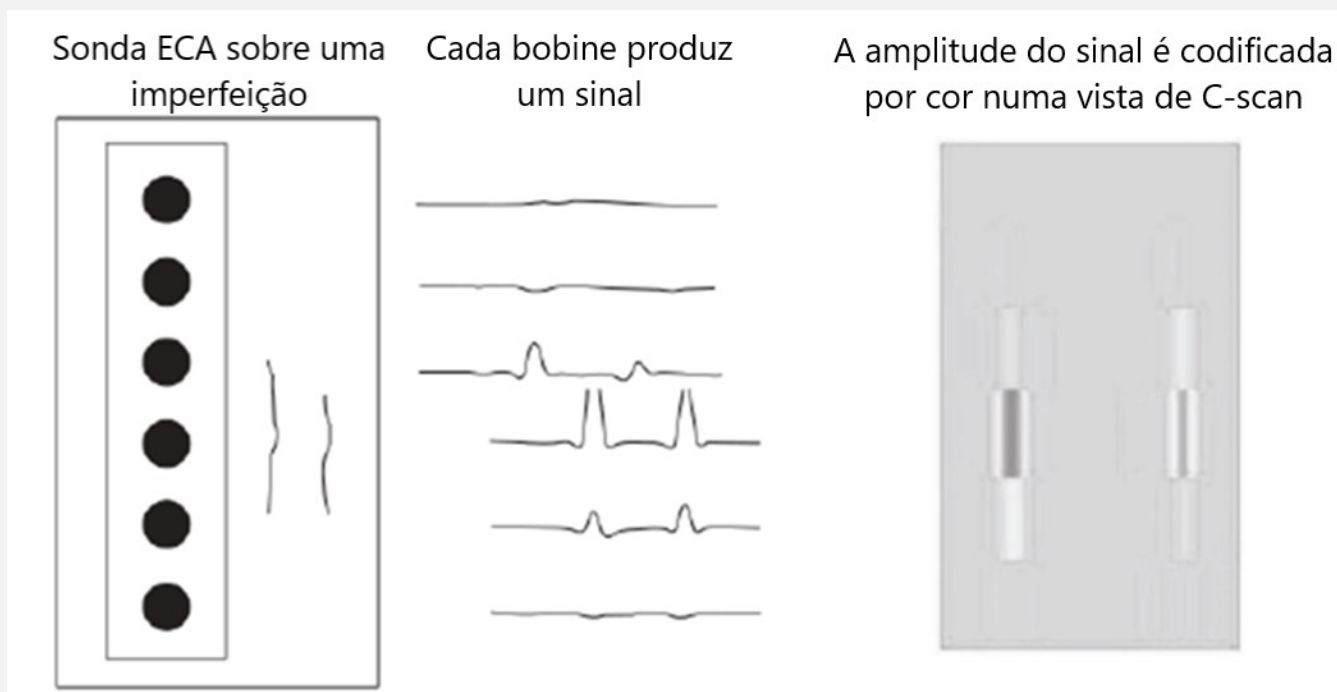
b) uma junta de soldadura livre de imperfeições

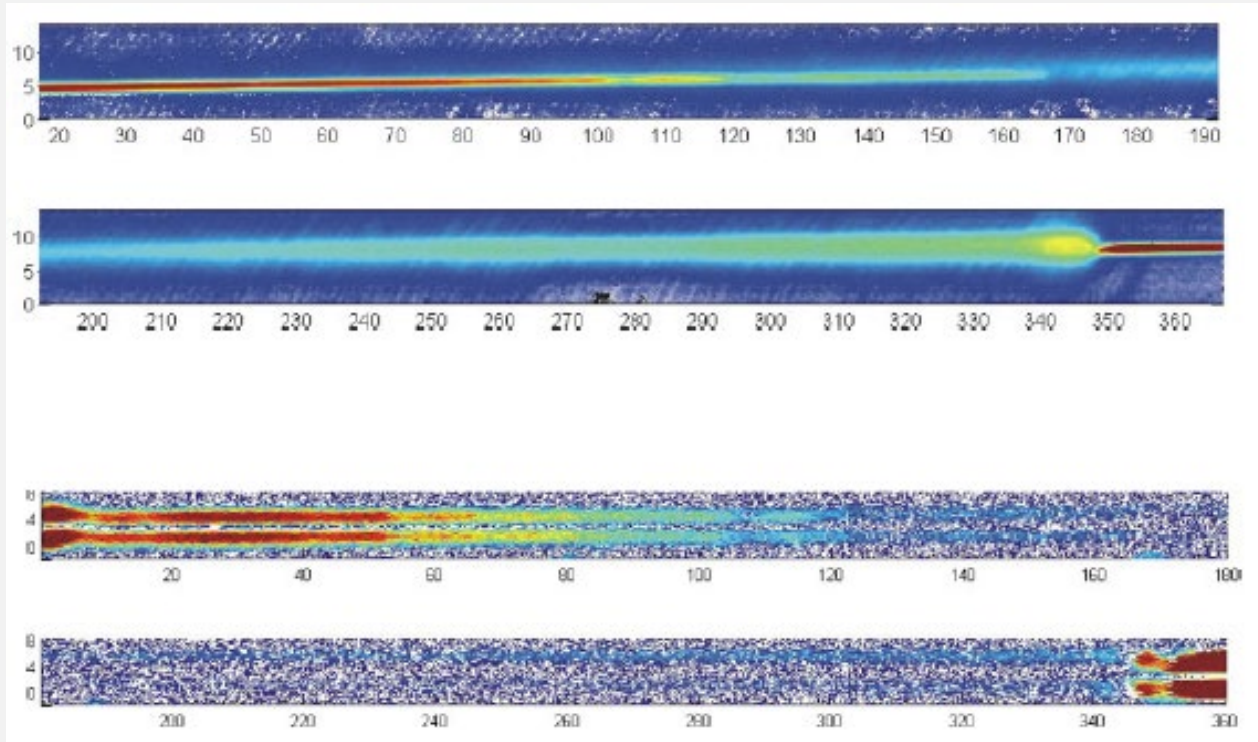
## Características da inspeção UT

Aplicação (tipos de imperfeições)	Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de penetração</li> <li>• Canais vazios</li> <li>• Imperfeições superficiais e subsuperficiais</li> <li>• Medição de espessura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método rápido</li> <li>• Apenas é necessário acesso de um único lado</li> <li>• Exame volumétrico completo</li> <li>• É necessária uma preparação mínima da peça</li> <li>• Resultados instantâneos</li> <li>• Imagens detalhadas podem ser produzidas automaticamente</li> <li>• Registo permanente</li> <li>• Pode ser utilizado para medições de espessura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A superfície deve ser acessível e lisa</li> <li>• Os resultados dos ensaios dependem da experiência dos operadores</li> <li>• Localização de uma imperfeição em relação a uma onda afeta a detetabilidade da imperfeição</li> <li>• Interpretação pode ser difícil</li> <li>• Necessidade de padrões de referência e blocos de calibração</li> <li>• Dificuldade com geometrias complexas de juntas soldadas</li> <li>• Uso obrigatório de acoplante</li> </ul>

- Ensaio por correntes induzidas (Eddy) (ET): Esta inspeção utiliza o princípio do eletromagnetismo como base para a realização de ensaios, sendo **criadas correntes induzidas (Eddy) por indução eletromagnética**. Quando a corrente alterna (CA) é aplicada ao condutor (fio de cobre), um campo magnético se desenvolve dentro e ao redor do condutor. Se outro condutor estiver próximo da mudança do campo magnético, **a corrente será induzida neste segundo condutor. Na presença de imperfeição, o fluxo de correntes induzidas é perturbado, criando uma perturbação no campo magnético** na superfície da peça examinada.
- A frequência de CA utilizada para induzir as correntes induzidas e a condutividade elétrica do material a ser **inspecionado determina a profundidade e a penetração do campo da corrente de Eddy** e a profundidade resultante do ensaio. O ensaio ET é um **método superficial e próximo da superfície** devido à penetração limitada das correntes parasitas na profundidade.

Múltiplas sondas podem ser integradas numa única cabeça de inspeção para aumentar a cobertura, a sensibilidade e a velocidade do teste. **Este método é designado de ensaio de corrente induzidas em matriz de fases (*phased array*).** Além de aumentar a superfície coberta por múltiplas sondas, a **frequência de CA pode ser variável para otimizar a sensibilidade** para imperfeições superficiais e subsuperficiais. ET para juntas de soldadura SFL são realizadas principalmente com ensaios de correntes induzidas por *phased array*.





Cima: Ensaio ET mostra falta de penetração como uma linha fina no final da soldadura

Baixo: Ensaio ET pulsado mostra falta de penetração até 160 mm do início da soldadura

## Características da inspeção ET

Aplicação (tipos de imperfeições)	Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fissuras, inclusões, entalhes, buracos</li> <li>• Falta de penetração</li> <li>• Desgaste por <i>Galling</i></li> <li>• Tamanho da largura do cordão (deteção indireta de camadas de óxido)</li> <li>• Imperfeições superficiais e subsuperficiais</li> <li>• Tamanho do grão, dureza</li> <li>• Dimensões e geometria</li> <li>• Classificação de ligas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rápido</li> <li>• A inspeção é feita numa passagem</li> <li>• Cobertura total da junta de soldadura</li> <li>• Imagem C-scan para fácil interpretação</li> <li>• Fácil de operar</li> <li>• Automação disponível</li> <li>• Registo permanente disponível</li> <li>• Não é necessário contato com a amostra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O teste de superficial manual é lento</li> <li>• Interpretação pode ser difícil</li> <li>• Profundidade de penetração é limitada</li> <li>• Orientação da imperfeição é crítica</li> <li>• O corpo de prova deve ser condutor elétrico</li> <li>• Sensível a vários parâmetros de amostra</li> <li>• Rugosidade da superfície pode produzir indicações não relevantes</li> </ul>

## 7.4 Normas para ensaios não destrutivos e critérios de aceitação

➤ Líquidos penetrantes (PT), método:

ISO 3452-1:2013 END - Ensaios de Líquidos Penetrantes - Princípios gerais

➤ Ensaio radiográfico (RT), método:

ISO 17636-1:2013 END de soldaduras – Ensaios radiográfico – Técnicas de raios-X e gama com filme

ISO 17636-2:2013 END de soldaduras – Ensaios radiográfico – Técnicas de raios-X e gama com detetores digitais

**Ensaio por ultrassons (UT) pode ser utilizado em vez do ensaio radiográfico (RT) quando especificado pela especificação de projeto ou por desenhos de engenharia.**

➤ Ensaio por ultrassons (UT), método:

ISO 17640:2017 END de soldaduras – Ensaio por Ultrassons – Técnicas, níveis de teste e avaliação

➤ Ensaio por correntes induzidas (ET), método:

ISO 17643:2015 END de soldaduras – Ensaio por correntes induzidas de soldadura num plano complexo

➤ Níveis de aceitação para todos os métodos END:

ISO 23277:2015 END de soldaduras – Ensaio por líquidos penetrantes –  
Níveis de aceitação

ISO 10675-2:2017 END de soldaduras – Níveis de aceitação por ensaio  
radiográfico – Alumínio e suas ligas

ISO 11666:2018 END de soldaduras – Ensaio por ultrassons – Níveis de  
aceitação

Para **ensaios de ET**, requisitos relevantes ou especificações de projeto devem ser utilizados para a determinação dos níveis de aceitação, porque **este método é utilizado quando são exigidos requisitos rigorosos para a integridade da soldadura.**

## 7.5 Calibração de equipamentos e reprodutibilidade

- Calibração: Dispositivos de medição, sondas e mostradores instalados em equipamentos de soldadura automática, mecanizada ou robótica **devem ser calibrados utilizando um procedimento estabelecido. O fabricante deve estabelecer e documentar os procedimentos de calibração aplicáveis.**
- Capacidades e desempenho do equipamento: Os equipamentos de soldadura (máquinas de soldadura e ferramentas SFL) **devem ser capazes de produzir soldaduras que atendam aos critérios de aceitação** especificados na ISO 25239-5 ou AWS D17.3. **O equipamento de soldadura deve ser capaz de manter a qualidade e a consistência da soldadura.**

- Testes de reprodutibilidade para configurações de soldadura de máquina qualificadas: Devem ser realizados para demonstrar que o **equipamento de soldadura pode produzir repetidamente soldaduras que atendam aos níveis de aceitação** da norma ISO 25239-5 ou AWS D17.3.
- Os testes de reprodutibilidade **devem ser realizados quando ocorrer uma das seguintes situações:**
  - um componente crítico do equipamento de soldadura é danificado, reparado ou substituído
  - soldar numa área dentro do envelope de trabalho da máquina **onde o fabricante determina uma diferença na rigidez da máquina referente à qualificação original resultando em soldaduras inaceitáveis**

**O teste de reprodutibilidade deve ser executado de acordo com uma EPS que é utilizada na produção para aquela máquina.** Um mínimo de três soldaduras teste devem ser realizadas em sucessão.



Cofinanciado pelo  
Programa Erasmus+  
da União Europeia



Friction Stir Welding European Qualifications

# Obrigado pela vossa atenção