



Friction Stir Welding European Qualifications

## UC02 – Definição e preparação de junta Especialista e Engenheiro SFL



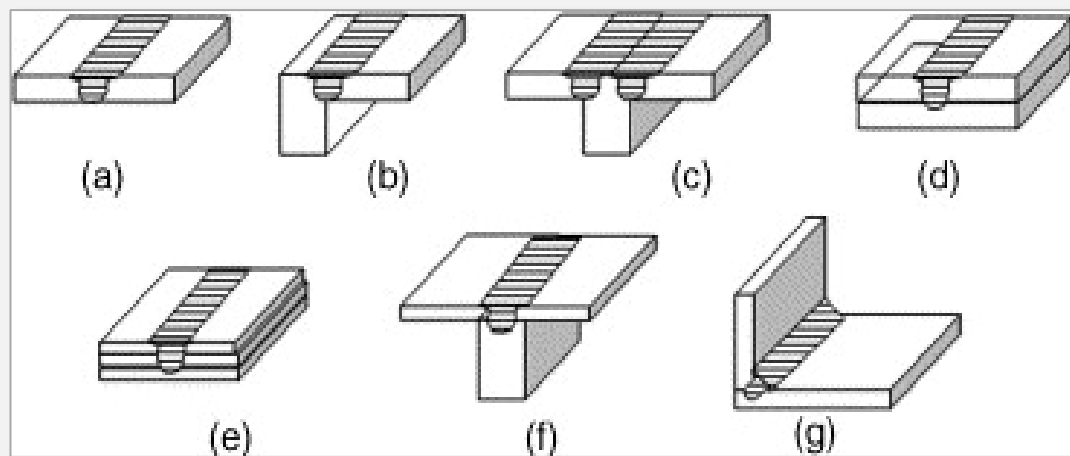
Cofinanciado pelo  
Programa Erasmus+  
da União Europeia

## 2. Definição de junta

- 2.1 Considerações para o projeto de junta
- 2.2 Métodos de limpeza
- 2.3 Ferramentas
- 2.4 Fixação
- 2.5 Placas de suporte
- 2.6 Materiais base
- 2.7 Equipamento SFL
- 2.8 Parâmetros SFL-Tech
- 2.9 Programas
- 2.10 Referências

## 2.1 – Considerações para o projeto de junta

### 2.1.1 Tipo de juntas



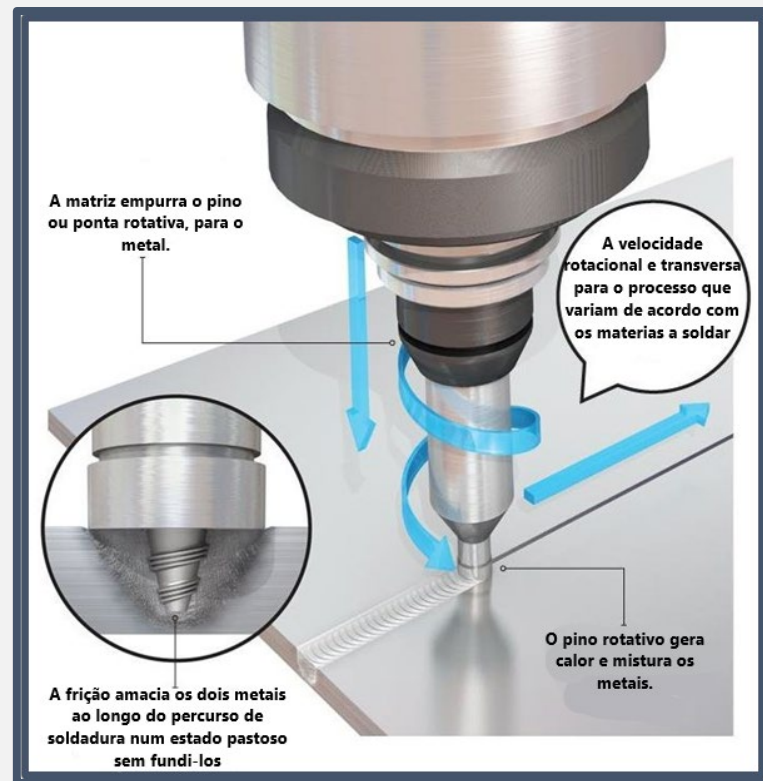
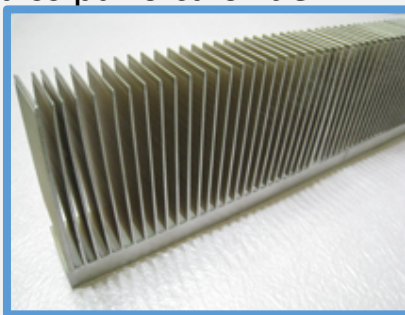
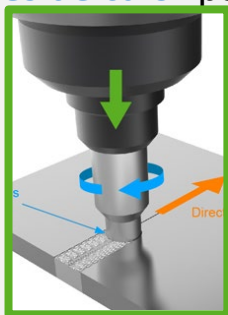
- a. Topo-a-topo ângulos retos
- b. Junta topo-a-topo de aresta
- c. Junta topo-a-topo em T
- d. Junta sobreposta
- e. Múltiplas juntas sobrepostas
- f. Junta sobreposta em T
- g. Junta de ângulo

## 2.1 – Considerações para o projeto de junta

### 2.1.2 Considerações de projeto

O projeto de junta deve tomar em conta:

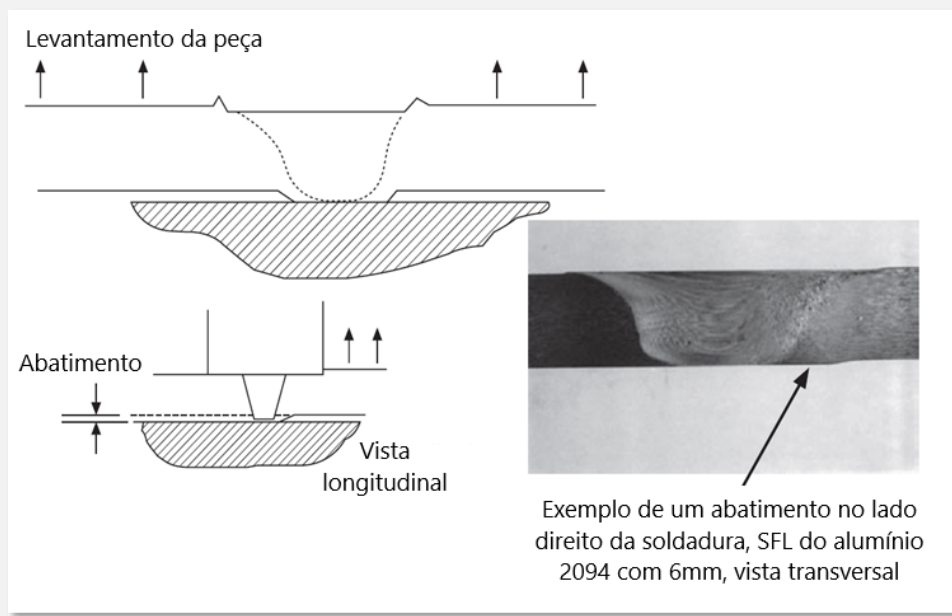
- ✓ Área para a passagem da base da ferramenta de soldadura - função da espessura do material e da liga
- ✓ Contenção de metal de soldadura amolecido ao longo de todo o comprimento da junta
- ✓ **Força** para impedir o movimento das peças de trabalho
- ✓ **Dissipadores de calor** para dissipar o calor de soldadura



## 2.1 – Considerações para o projeto de junta

### 2.1.2 Considerações do projeto

- A fixação inadequada pode levar a “**abatimento**”, isto é o resultado de uma força vertical inadequada na soldadura topo-a-topo, impedindo que a peça de trabalho se levante da placa de suporte.
- Isso é prevenido adequadamente, garantindo um bom projeto de fixação, em vez de **tentar corrigir durante o processo de soldadura**.



Abatimento numa soldadura topo-a-topo produzido pela aplicação de uma força de fixação vertical inadequada na peça de trabalho.

## 2.2 – Métodos de limpeza

### 2.2.1 Importância da limpeza

- Etapa necessária para uma junta bem sucedida
- Remover pó, gordura ou humidade
- Resultados negativos de uma limpeza inadequada da superfície:
  - Pobre desempenho à fadiga
  - Baixa ductilidade localizada
  - Defeitos volumétricos

Métodos de limpeza mais comuns :

- ✓ Utilização de um solvente e limpeza com uma toalha de papel

Outros métodos de limpeza:  
*(não utilizados normalmente):*

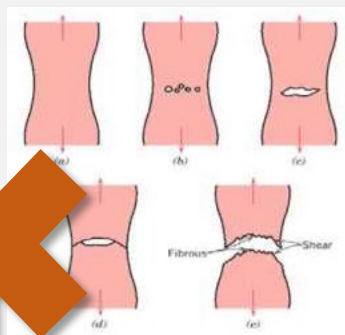
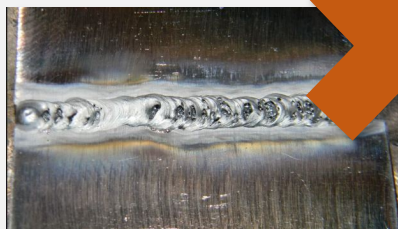
- ✓ Desbaste
- ✓ Escovagem de fio
- ✓ Remoção de tinta
- ✓ Decapagem

## 2.2 – Métodos de limpeza

### *Vantagens*

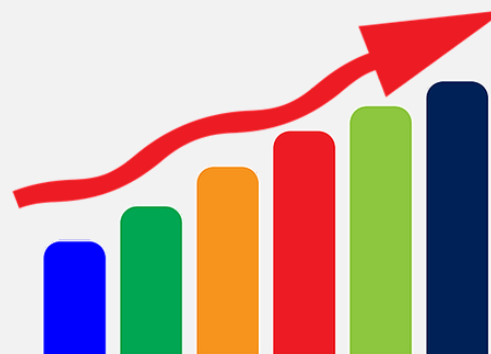
Evita:

- Mau desempenho á fadiga deficiente
- Baixa ductilidade localizada e defeitos volumétricos produzidos durante o aquecimento pós-soldadura



### *Desvantagens*

Aumento do preço do processo



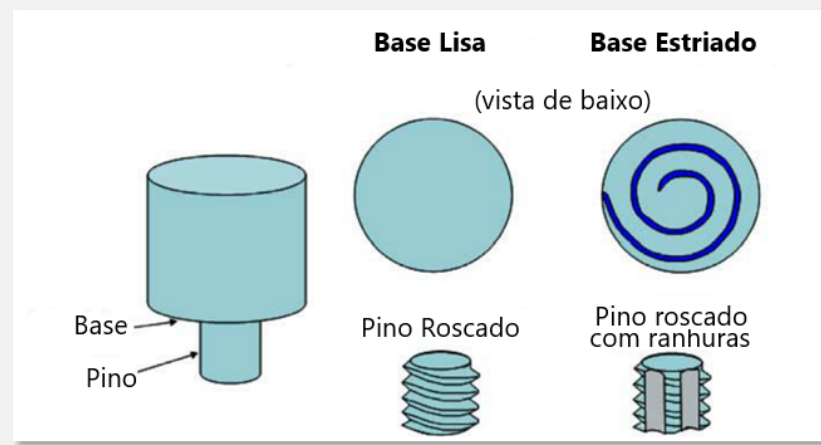
## 2.3 – Ferramentas

Ferramentas SFL:

- ✓ Não consumíveis
- ✓ Componente chave do processo SFL

**Material e geometria** da ferramenta depende:

- ✓ Material a soldar
- ✓ Dimensões
- ✓ Configuração da junta
- ✓ Outras especificações



Características básicas da base e pino da ferramenta

## 2.3 – Ferramentas

### 2.3.1 Tipos de ferramentas e suas características

Seis características básicas para selecionar a ferramenta:

- ✓ Resistência à temperatura ambiente e do processo
- ✓ Fadiga à temperatura de processo
- ✓ Tenacidade à fratura
- ✓ Características ao desgaste
- ✓ Estabilidade térmica a longo prazo
- ✓ Estabilidade química (*nula ou reação limitada com a peça de trabalho*)

Como selecionar  
a ferramenta?



## 2.3 – Ferramentas

### 2.3.1 Tipos de ferramentas e suas características

#### *Alguns exemplos*

- Para soldar alumínio (aplicação mais comum do SFL) → Aços ferramenta
  - Ligas de alumínio (espessura de 6 a 12 mm) → usualmente utiliza-se o aço ferramenta H13
  - Para espessuras maiores ou se um aumento de produtividade seja necessário:
    - o **pino** pode ser fabricado em **materiais de alta resistência** à temperatura de soldadura
    - mas a **base** da ferramenta ainda pode ser fabricada em **H13**
- Para alguns casos específicos - desenvolvimento de projetos de ferramentas mais elaborados, proporcionando melhores desempenhos
- Para soldar outros materiais, como titânio, aço ou cobre, podem ser necessárias ferramentas feitas de tungstênio, nitreto de boro cúbico policristalino ou outros materiais de alto desempenho que suportam altas temperaturas.

## 2.3 – Ferramentas

### 2.3.2 Positionamento

#### Posição Offset

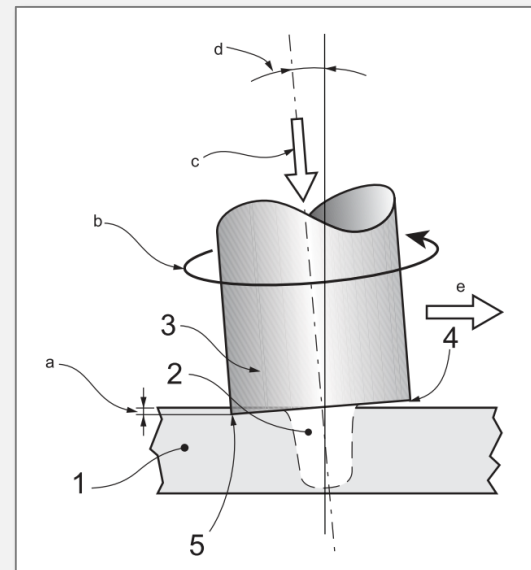
- A posição de offset corresponde ao deslocamento lateral do eixo da ferramenta para a superfície a ligar

#### Posição Z

- O movimento da ferramenta através da peça de trabalho é predeterminado ao longo de três dimensões (x, y, z).

#### Profundidade de penetração

- Distância do calcanhar se estende para o metal de soldadura é referenciada como profundidade de penetração do calcanhar
- Parâmetro programado e crítico para passes controlados por posição



#### Vista lateral da junta topo-a-topo

- Peça de trabalho
  - Pino
  - Ferramenta
  - Base (aresta de avanço)
  - Calcanhar (Aresta de arrasto da base)
- a) Profundidade de penetração do calcanhar  
b) Direção da rotação da ferramenta  
c) Força axial  
d) Ângulo de ataque  
e) Direção de soldadura

## 2.4 – Fixação

### 2.4.1 – Métodos de fixação e suas características

*Grampos de  
atuação  
mecânica*

- Maneira simples e económica de fixar chapas ou placas
- Elevadas forças de fixação
- Grampos colocados perto da soldadura devido a diferentes condutividades térmicas
- Grandes tempos de montagem (para fixar as peças de trabalho)

*Grampos  
pneumáticos e  
hidraulicos*

- Para produção em série de forma a reduzir os tempos de montagem
- Estas fixações são caras e apenas razoáveis em situações de produção em lote

*Fixação a  
vácuo*

- Sistemas muito flexíveis e fáceis de usar
- Permitir a fixação de peças de diferentes dimensões
- Baixos tempos de montagem
- As forças de aperto nem sempre são suficientes para chapas espessas

## 2.4 – Fixação

### 2.4.2 – *Importância da fixação*

***A fixação adequada é um aspecto importante, pois está sempre presente durante o processo de soldadura***

Mecanismos de fixação:

- ✓ Deve permitir que a ferramenta SFL aceda ao caminho de soldadura
- ✓ Deve impedir que a peça deslize longitudinalmente, dobre ou separe devido às forças de torque
- ✓ Influencia a qualidade da soldadura e o ciclo de produção

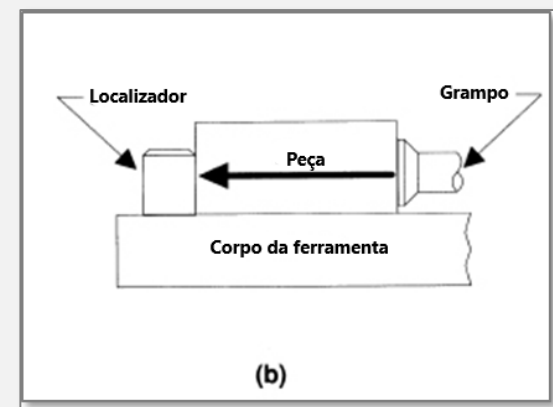
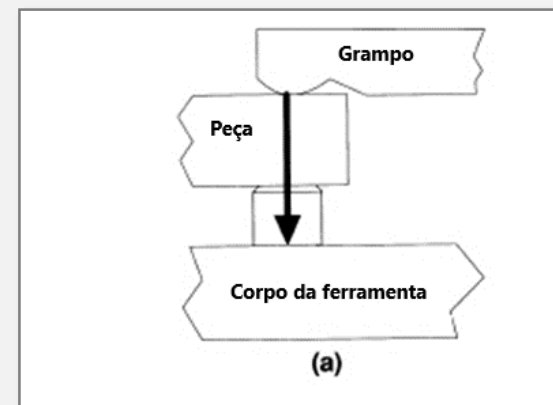
## 2.4 – Fixação

### 2.4.3 – Arranjos de fixação

- **Localizadores** – resistir a todas as forças primárias geradas na operação
- **Grampos** – precisa segurar a peça de trabalho contra os localizadores e resistir a quaisquer forças secundárias geradas na operação

Localização/posicionamento dos grampos:

- Nos pontos mais rígidos da peça de trabalho - evitando danos
- Deve assegurar uma distribuição igual de forças ao longo de todo o processo
- Deve ser selecionado para garantir que não interfira no caminho de operação de soldadura

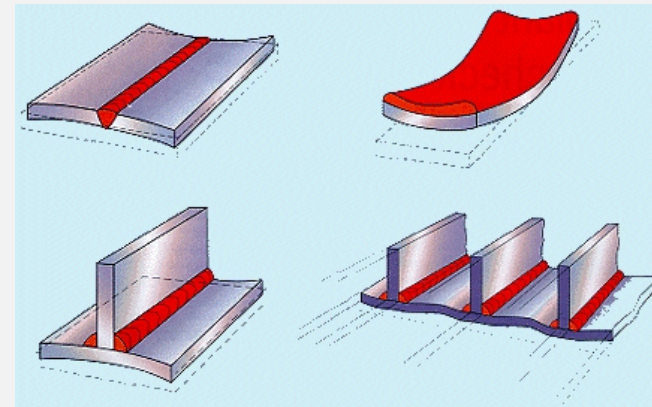


## 2.4 – Fixação

### 2.4.4 – *Influência da fixação no processo de soldadura*

Fatores influenciadores na distorção:

- ✓ Localização do grampo
- ✓ Tempo de fixação
- ✓ Tempo de libertação da fixação
- ✓ Pré-aquecimento dos grampos



**Pré-aquecimento dos grampos** → deformação mais homogénea → amplitude de deflexão reduzida

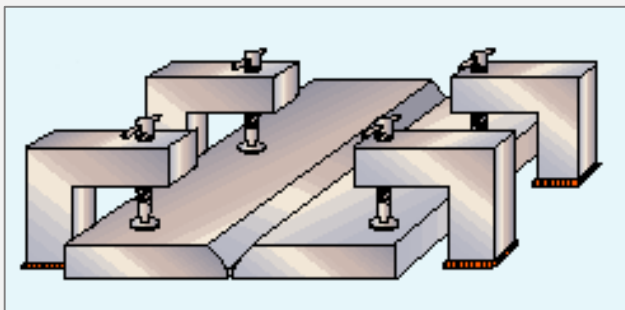
**Tempos de libertação longos** → distorção angular reduzida

**Tempos de fixação longos** → amplitude de dobragem reduzida

**Maior proximidade dos grampos à soldadura** → menor a distorção final

## 2.4 – Fixação

### 2.4.5 – *Jigs and fixtures*



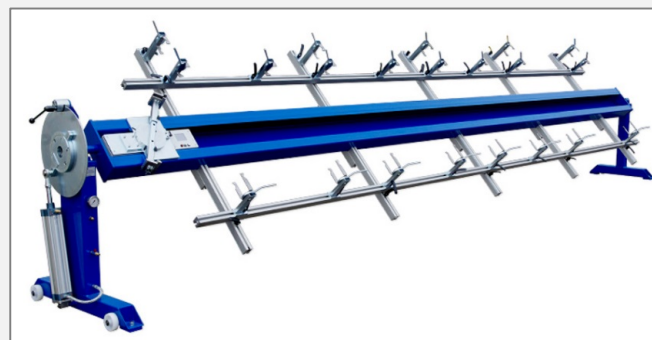
Gabarito de soldadura (Fonte: TWI)



Fixação a vácuo



Estrutura de guia

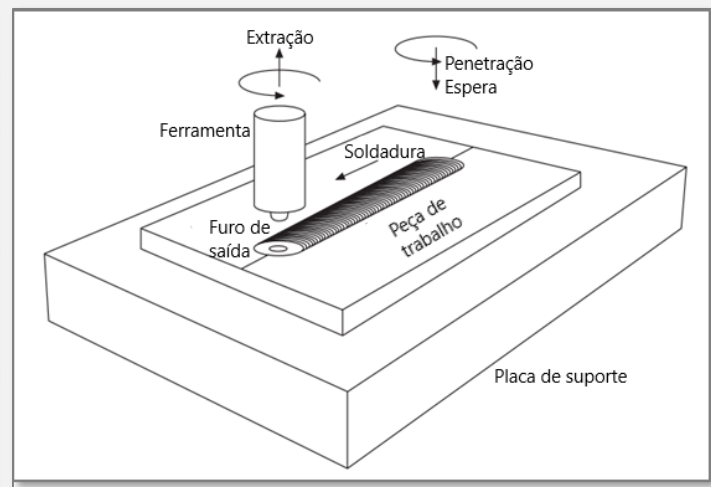


Estrutura de guia de soldadura

## 2.5 – Placas de suporte

- ✓ Resistir às forças normais aplicadas no SFL
- ✓ Providenciar um objeto rígido para fixar as chapas ou placas a serem soldadas
- ✓ Os materiais da placa de suporte influenciam o consumo de energia e a qualidade da soldadura

Material	Condutividade térmica [W/mK]
Aço carbono	40-60
Aço inoxidável	15-25
X33CrS16 (1.2085)	17
RAMAX	24
Latão	110-150
Cobre	180-400
Ligas de alumínio	110-235



## 2.6 – Materiais base

### ***2.6.1 Materiais adequados ao SFL***

- Ligas de alto ponto de fusão (e.g. titânio, aços, níquel)
- Liga de baixo ponto de fusão (e.g. alumínio, magnésio, cobre)
- Materiais dissimilares (e.g. alumínio ao aço, alumínio ao magnésio)
- Termoplásticos

## 2.6 – Materiais base

### ***2.6.2 Soldabilidade dos materiais para SFL***

- ✓ O FSW melhora a soldabilidade de certos materiais
- ✓ A principal limitação para a soldabilidade de metais com alto ponto de fusão é a disponibilidade de materiais adequados para ferramentas de soldadura que possam suportar essas condições de operação.
- ✓ O calor gerado por atrito, trabalho plástico ou aquecimento auxiliar deve ser suficiente para superar a perda de calor da zona de soldadura por condução na peça de trabalho.
- ✓ Certas ligas de alumínio são difíceis ou impossíveis de soldar por processos tradicionais de soldadura por arco devido a problemas de formação de fases frágeis e fissuras, então a soldadura por fricção linear é uma alternativa viável

## 2.6 – Materiais base

### ***2.6.2 Soldabilidade dos materiais para SFL***

- ✓ O aço SFL mostrou que a menor temperatura de soldadura conduza uma distorção muito baixa e a propriedades únicas da junta
- ✓ Ao aplicar o SFL ao titânio, é necessária uma entrega térmica baixa da ferramenta, minimizando o diâmetro da base ou eliminando a rotação da base, devido à sua baixa condutividade térmica.
- ✓ O SFL tem sido aplicado no cobre para a construção de contentores para armazenamento de lixo nuclear por vários anos. Embora se esperasse que a alta condutividade térmica fosse um problema, esta foi corrigida com o aumento velocidade do rotação, o que ajudou a fornecer uma intensidade de calor suficiente para produzir soldaduras de alta qualidade.
- ✓ A utilização do FSW também permite a ligação de ligas dissimilares, que podem atrair certas aplicações

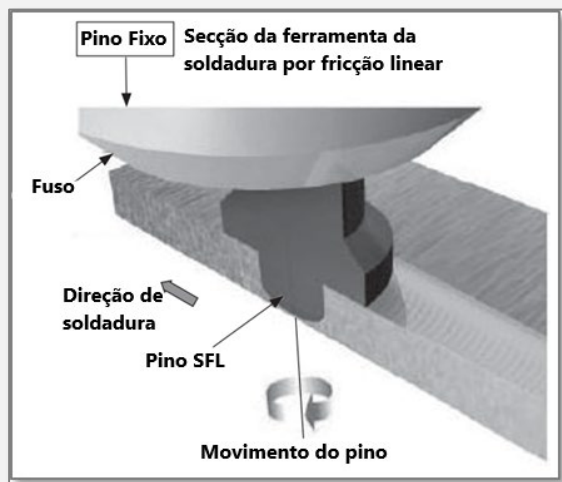
## 2.7 – Equipamento para o SFL

### 2.7.1 – *Tipos de equipamentos e suas características*

- O equipamento SFL deve ser projetado de forma a **assegurar**:
  - Ajuste apropriado
  - Fixação adequada (incluindo rigidez suficiente para impedir que a peça se mova)
  - Dissipação do calor gerado pelo processo
- Os parâmetros críticos controlados pelo equipamento SFL são:
  - Posição do pino
  - Orientação
  - Cargas
  - Velocidades de rotação e avanço
- As máquinas SFL são geralmente projetadas para uma aplicação específica, embora existam algumas máquinas de configuração geral que possam lidar com situações diferentes.

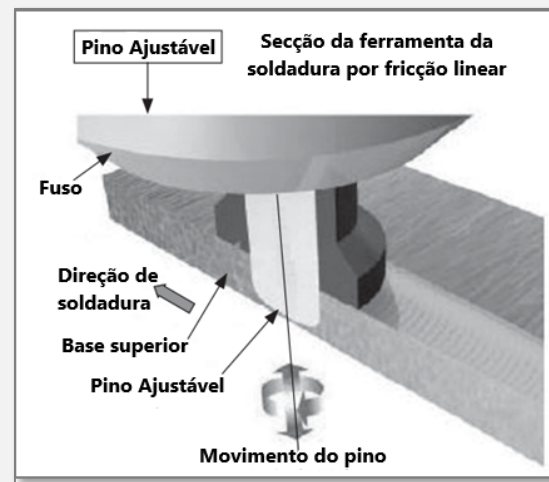
## 2.7 – Equipamento para o SFL

### 2.7.1 – Tipos de equipamentos e suas características



Pino fixo

- ✓ Ferramenta de peça única, base e pino
- ✓ Movimento da junta do eixo da cabeça de soldadura
- ✓ Forma mais tradicional do SFL



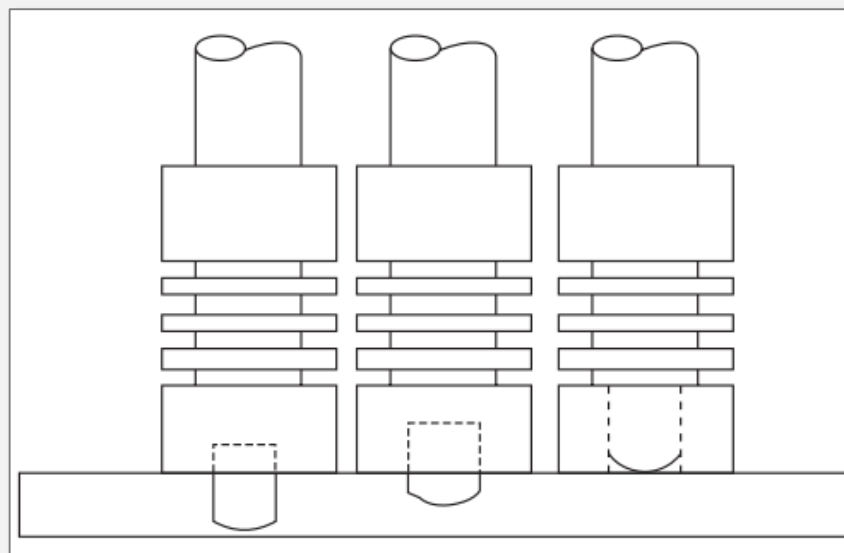
Pino ajustável

- ✓ Desacoplamento entre o pino e o ombro
- ✓ Útil para soldar peças com espessura variável
- ✓ Utilizado para fechar o orifício do pino

## 2.7 – Equipamento para o SFL

### 2.7.1 – *Tipos de equipamentos e suas características*

Fecho do furo do pino com pino ajustável



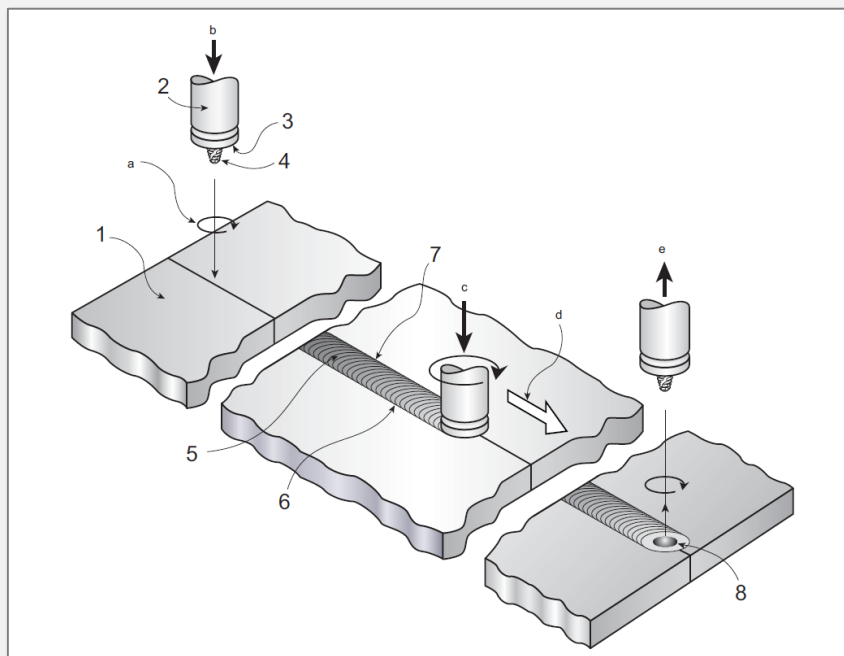
- Implica um esquema de projeto e controle de máquinas mais sofisticados
- Pode mover o pino e base independentemente

## 2.7 – Equipamento para o SFL

### 2.7.2 – *Produtividade e eficiência do equipamento*

- Aumentar a velocidade de soldadura para melhorar a produtividade não é a solução ideal
- Soluções automatizadas e robóticas fixas podem ser utilizadas, e a sua escolha se resume a fatores técnicos e econômicos
  - ✓ Automação fixa - máquina construída para uma única finalidade e para os requisitos exatos de uma aplicação específica
  - ✓ Soluções robóticas - maior flexibilidade
- A produtividade e a eficiência do processo também são influenciadas pelo projeto da ferramenta

## 2.8 – Parâmetros SFL



- a) Direção da rotação da ferramenta
- b) Movimento descendente da ferramenta
- c) Força axial
- d) Direção de soldadura
- e) Movimento ascendente da ferramenta

### Variáveis do processo SFL principais

Variáveis do projeto da ferramenta	Variáveis da máquina	Outras variáveis
Materiais do pino e base	Velocidade de soldadura	Materiais da placa de suporte
Diâmetro da base Diâmetro do pino	Velocidade do fuso Força e profundidade de penetração	Dimensão da placa de suporte Dimensão da peça de trabalho
Comprimento do pino	Ângulo de ataque	Propriedades da peça de trabalho
Passo de rosca Geometria da ferramenta		

- 1) Peça de trabalho
- 2) Ferramenta
- 3) Base
- 4) Pino
- 5) Face da soldadura
- 6) Lado de retrocesso da soldadura
- 7) Lado de avanço da soldadura
- 8) Furo de saída

## 2.8 – Parâmetros SFL

- ✓ Velocidade de rotação [rpm]
- ✓ Profundidade de penetração do calcanhar [mm]
- ✓ Força axial [kN]
- ✓ Ângulo de ataque[°]
- ✓ Ângulo de ataque lateral [°]
- ✓ Tempo de espera [s]
- ✓ Velocidade de soldadura [mm/min]
- ✓ Temperatura de pré-aquecimento [°C]
- ✓ Tratamentos pós soldadura
- ✓ Taxas de aquecimento e arrefecimento



## 2.9 – Programas



## 2.10 – Referências

1. S. Ebnesajjad and H. A. Landrock, "Joint Design," *Adhes. Technol. Handb.*, pp. 183–205, 2014.
2. R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005.
3. D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction Stir Welding: From Basics to Applications*. 2010.
4. R. Miller, "GUIDELINES FOR FRICTION STIR WELDING," Detroit, 2011.
5. R. S. Mishra and M. W. Mahoney, "Friction Stir Welding and Processing," *ASM Int.*, p. 368, 2007.
6. I. O. for S. (ISO), *Final Draft ISO/FDIS 25239-5*, 1st ed. ISO, 2011.
7. ESAB, "Handbook - Joint Design & Prep." [Online]. Available: [https://www.esabna.com/euweb/sa\\_handbook/585sa2\\_26.htm](https://www.esabna.com/euweb/sa_handbook/585sa2_26.htm). [Accessed: 18-Jul-2018].
8. [N. Mendes, P. Neto, A. Loureiro, and A. P. Moreira, "Machines and control systems for friction stir welding: A review," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 256–265, 2016.
9. G. K. Padhy, C. S. Wu, and S. Gao, "Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 1–38, 2017.
10. P. S. D. N. K. Mishra, S. R., *Friction stir welding and processing*. 2014.
11. F. C. Liu, Y. Hovanski, M. P. Miles, C. D. Sorensen, and T. W. Nelson, "A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 39–57, 2017.
12. I. O. for S. (ISO), *Final Draft ISO/FDIS 25239-1*, 1st ed. ISO, 2011.
13. A. Fehrenbacher, N. A. Duffie, N. J. Ferrier, F. E. Pfefferkorn, and M. R. Zinn, "Toward Automation of Friction Stir Welding Through Temperature Measurement and Closed-Loop Control," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 133, no. 5, p. 051008, 2011.
14. Future Weld, *Mechanized Welding - Mechanized, Orbital and Robot Welding*. 2014.
15. D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction stir welding : from basics to applications*. Woodhead Publishing, 2009.

## 2.10 – Referências

16. T. Schenk, I. M. Richardson, M. Kraska, and S. Ohnimus, "A study on the influence of clamping on welding distortion," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 999–1005, 2009.
17. W. J. Choi, J. D. Morrow, F. E. Pfefferkorn, and M. R. Zinn, "The Effects of Welding Parameters and Backing Plate Diffusivity on Energy Consumption in Friction Stir Welding," *Procedia Manuf.*, vol. 10, pp. 382–391, 2017.
18. "3.1 Material Certificates | Classic Filters." [Online]. Available: <https://www.classicfilters.com/blog/materialcertificates/>. [Accessed: 03-Jan-2019].
19. "How to view the material certificate? – Part 1 – AMARINE." [Online]. Available: <https://amarineblog.wordpress.com/2017/09/22/how-to-view-the-material-certificate/>. [Accessed: 03-Jan-2019].
20. W. M. Syafiq, M. Afendi, R. Daud, M. N. Mazlee, and N. A. Jaafar, Variation of tool offsets and its influence on mechanical properties of dissimilar friction stir welding of aluminum alloy 6061 and S235JR mild steel by conventional belting milling machine. 2017.
21. "What Is a Welding Jig? - Tulsa Welding School." [Online]. Available: <https://www.weldingschool.com/blog/welding/what-is-a-welding-jig/>. [Accessed: 19-Jul-2018].
22. "UNIT 4 JIGS AND FIXTURES Structure 4.1 Introduction."
23. "Welding Fixtures and How They Work | Forster America." [Online]. Available: <https://www.forsteramerica.com/welding-fixtures-and-how-they-work/>. [Accessed: 19-Jul-2018].
24. D. Lohwasser and Z. Chen, Friction stir welding Related titles : 2010.
25. [26] HSE Gov.UK, "Welding fume - Reducing the risk." [Online]. Available: <http://www.hse.gov.uk/welding/fume-welding.htm>. [Accessed: 07-Aug-2018].
26. ESAB AB Welding Automation and ESAB, "Friction Stir Welding - Technical Handbook." [Online]. Available: [https://www.esabna.com/euweb/sa\\_handbook/585sa2\\_26.htm](https://www.esabna.com/euweb/sa_handbook/585sa2_26.htm). [Accessed: 18-Jul-2018].
27. D. Veljić et al., "Advantages of friction stir welding over arc welding with respect to health and environmental protection and work safety," *Struct. Integr. Life*, vol. 15, no. 2, pp. 111–116, 2015
28. S. B.; D. R. D.Muruganandam, "HEALTH HAZARDS DUE TO VARIOUS WELDING TECHNIQUES AND ITS REMEDY BY FRICTION STIR WELDING (FSW)," *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 96–101, 2014.



Cofinanciado pelo  
Programa Erasmus+  
da União Europeia



Friction Stir Welding European Qualifications

# Obrigado