



Friction Stir Welding European Qualifications

# UC1 – Noções Básicas de SFL

## Especialista e Engenheiro SFL



Cofinanciado pelo  
Programa Erasmus+  
da União Europeia

# 1. Noções Básicas de SFL

## 1.1 – Introdução ao SFL

## 1.1 – Introdução ao SFL

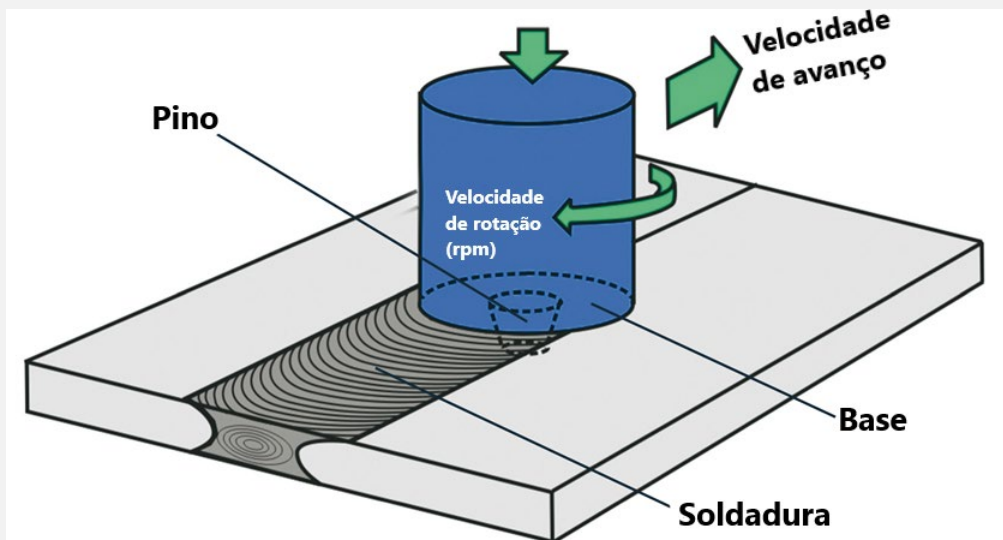
### Soldadura por Fricção linear (SFL)

- Um processo de ligação de materiais onde dois ou mais componentes são ligados através do calor gerado por fricção e mistura o material num estado plástico causado por uma ferramenta rotativa não-consumível que movimentasse ao longo da soldadura.

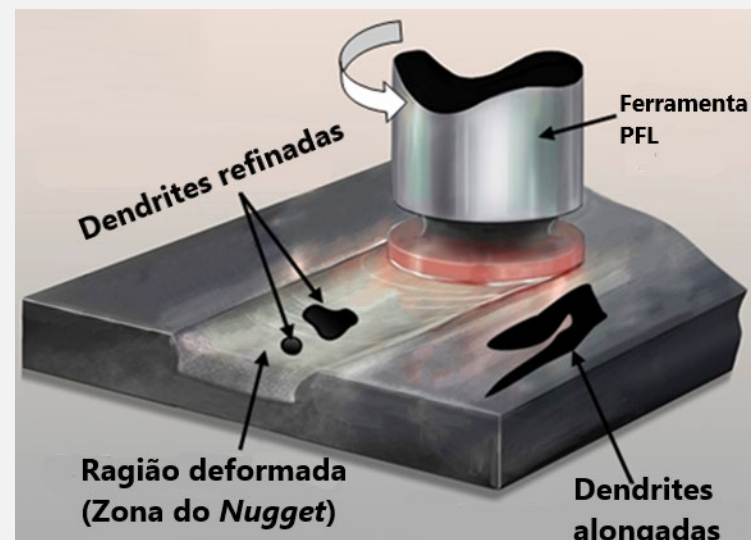
### Processamento por Fricção Linear (PFL)

- É uma variação da operação do SFL.
- O processo SFL altera localmente a microestrutura e propriedades da região de soldadura.
- O processamento por fricção linear aplica o processo SFL a toda extensão das peças. A ferramenta é inserida e movimentada para a frente e para trás mudando as propriedades do material.

## 1.1 – Introdução ao SFL

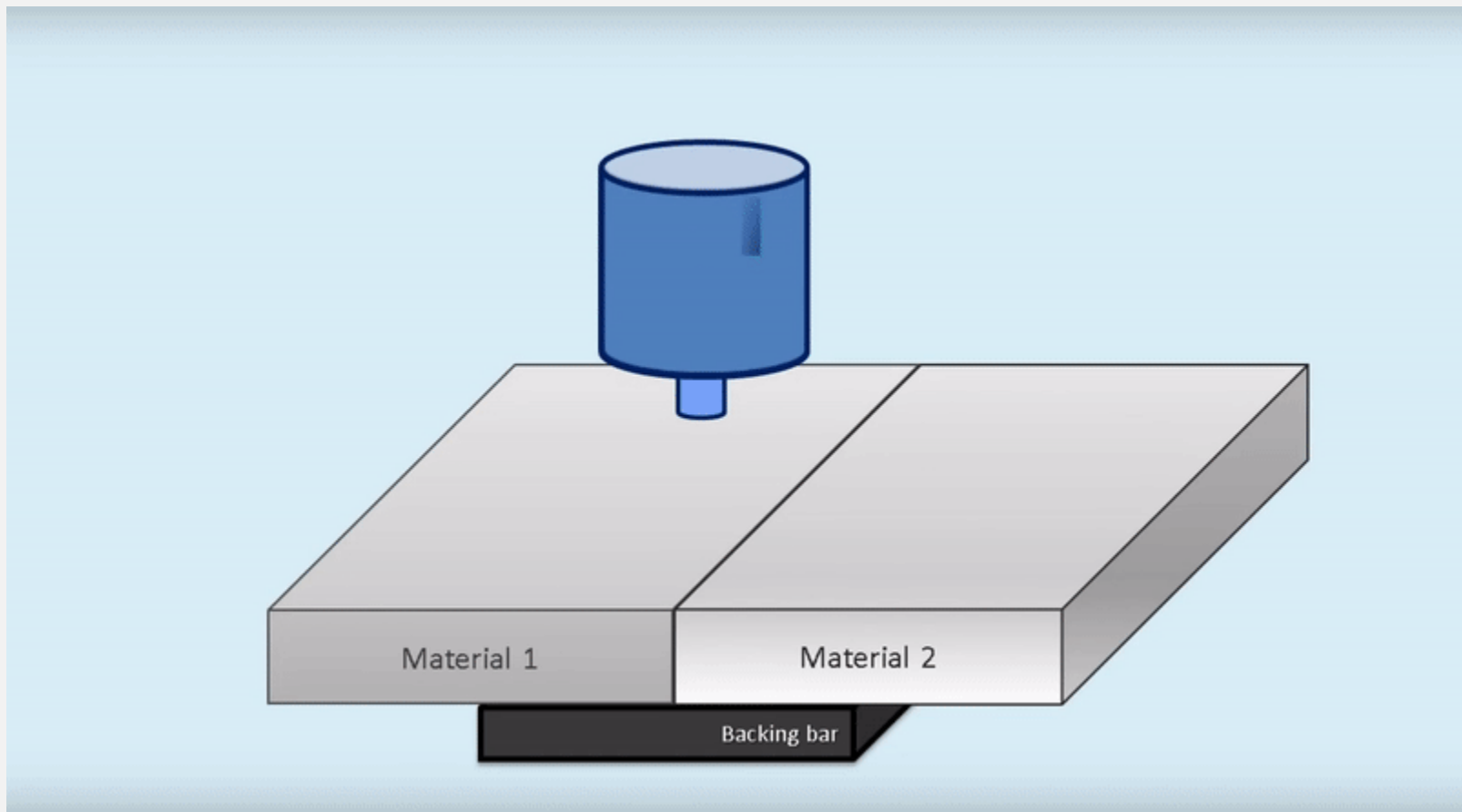


Soldadura por Fricção Linear (SFL)



Processamento por Fricção linear (PFL)

## 1.1 – Introdução ao SFL



## 1.1 – Introdução ao SFL

### Benefícios metalúrgicos:

- Processo de ligação no estado sólido
- Distorção reduzida
- Grande estabilidade dimensional e repetibilidade
- Nenhuma perda de elementos de liga
- Excelentes propriedades mecânicas da junta
- Estrutura recristalizada fina
- Não ocorre a fissuração na solidificação

## 1.1 – Introdução ao SFL

### Benefícios ambientais:

- Não requer gás de proteção
- Requer uma preparação mínima de superfície
- Elimina resíduos de preparação
- Elimina solventes e desengordurantes
- Poupança em materiais consumíveis
- Ausência de emissões nocivas

## 1.1 – Introdução ao SFL

### Benefícios de energia:

- Consumo de energia reduzido em comparação com a soldadura laser
- O peso minimizado da junta conduz a uma redução do consumo de combustível em aplicações automóveis, navais e aeronáuticas.
- Redução no peso resulta da utilização melhorada do material

## 1.1 – Introdução ao SFL

### Desvantagens do processo SFL:

- O maior nível de desgaste da ferramenta ocorre durante a etapa de penetração,
- As velocidades de soldadura numa única passagem em algumas ligas são mais lentas do que em algumas técnicas de soldadura por arco.
- O equipamento utilizado para o FSW é enorme e caro, devido às altas forças de soldadura
- Materiais de alta temperatura de fusão, como aço e aço inoxidável, são conhecidos por terem limitações na ferramenta de soldadura
- A ausência de um fio de enchimento significa que o processo não pode ser utilizado facilmente para fazer soldaduras de canto
- Presença de um orifício de saída após o término da soldadura (Processo convencional de FSW)

## 1.1 – Introdução ao SFL

SFL pode ser utilizados nas seguintes indústrias:

- Construção naval e offshore
- Automóvel
- Ferroviária
- Aeroespacial
- Indústria de produção
- Outras (elétrica, petróleo e gás, indústria nuclear, construção)

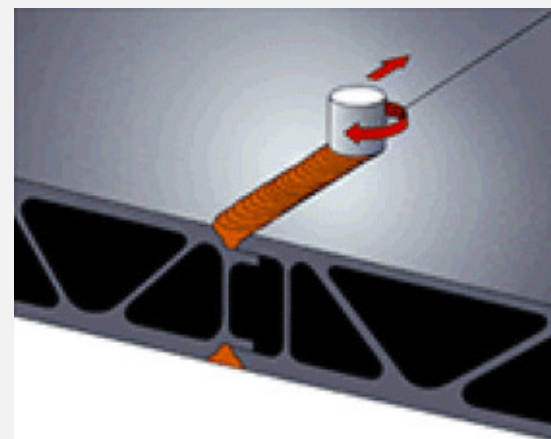
## 1.1 – Introdução ao SFL

O processo de Soldagem por Fricção Linear para a **Indústria Ferroviária** pode ser utilizado principalmente para produção de painéis de alumínio para frota circulante ferroviária

## 1.1 – Introdução ao SFL



Ferrovária – soldadura totalmente automática  
de painéis perfilados extrudidos



Soldadura de perfil extrudido

## 1.1 – Introdução ao SFL

O processo de Soldadura por Fricção Linear para o **Ramo Automóvel** pode ser utilizado para:

- Estruturas de fecho
- Tanques
- Suspensões
- Pistões
- Rodas
- Atrelados

## 1.1 – Introdução ao SFL

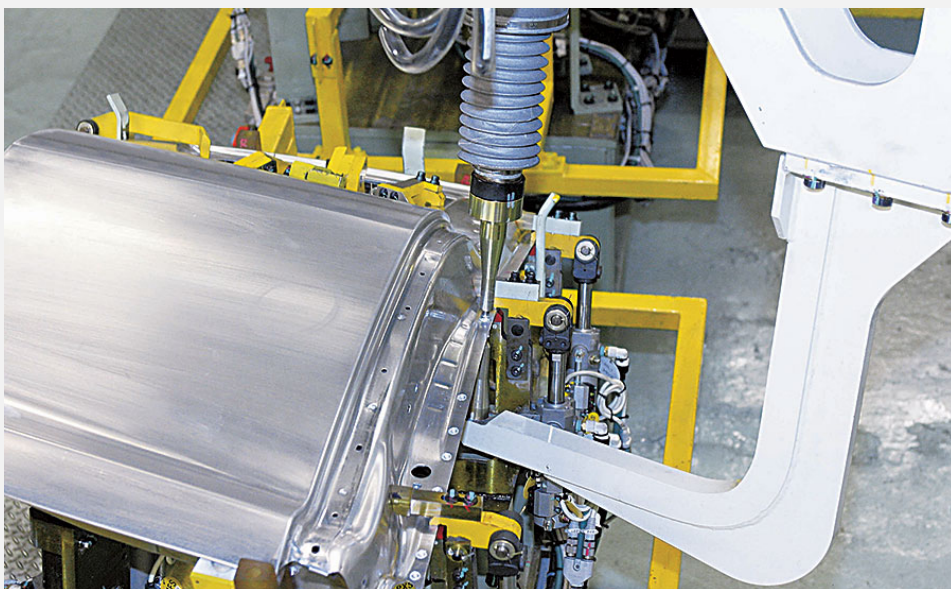


Automóvel – fabrico de rodas.



SFL robótico do painel do corpo de um carro

## 1.1 – Introdução ao SFL

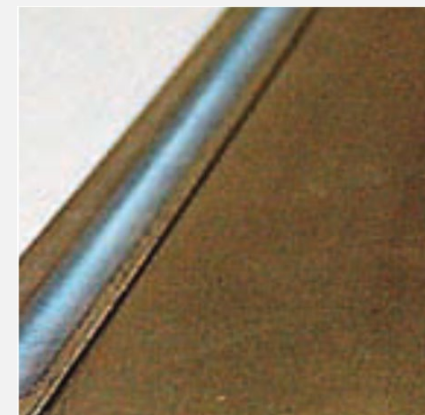


Soldadura por fricção linear por pontos



Ligação de metais dissimilares

## 1.1 – Introdução ao SFL



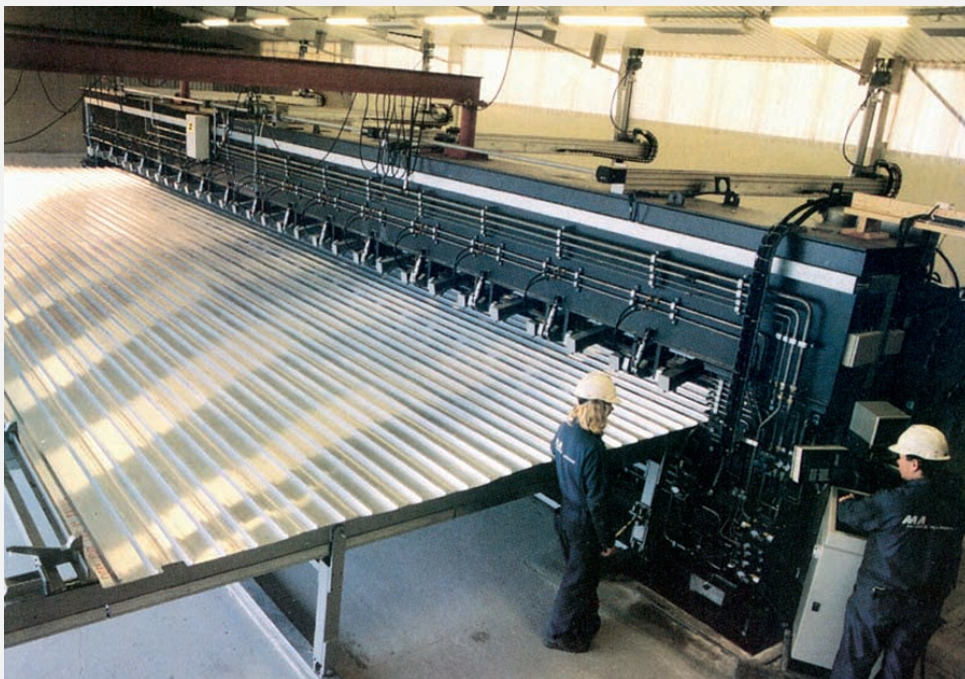
Potenciais aplicações automóveis para soldadura por fricção linear: soldadura dissimilar com duas espessuras diferentes, soldadura de selagem em dobra e junta sobreposta.

## 1.1 – Introdução ao SFL

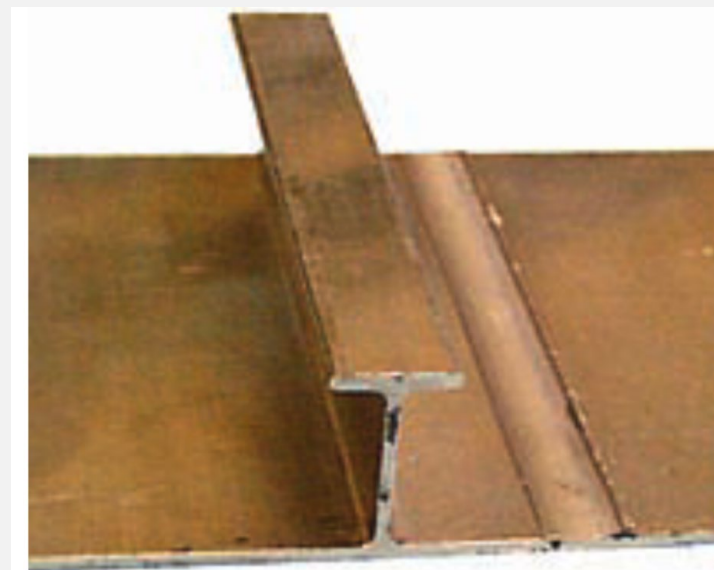
O Processo de Soldadura por Fricção Linear para Construção Naval pode ser utilizado para:

- Painéis de alumínio para congelamento de peixes em barcos de pesca
- Ligação de extrusões para criar painéis para decks e anteparas
- Painéis em favos de mel
- Painéis resistentes à água do mar

## 1.1 – Introdução ao SFL



Construção naval – extenso painel por SFL



Painel soldado por SFL

## 1.1 – Introdução ao SFL

O processo de Soldadura por Fricção Linear na **Arquitetura e Indústria de Construção** pode ser utilizado em:

- Pavimentos
- Decks
- Passagens
- Corredores
- Paredes
- Toldos
- Proteções contra o tempo
- Sistemas Suspensos
- Suportes

## 1.1 – Introdução ao SFL



Construção – cobertura fabricada por SFL



Corredor/passagem e proteção contra o tempo

## 1.1 – Introdução ao SFL

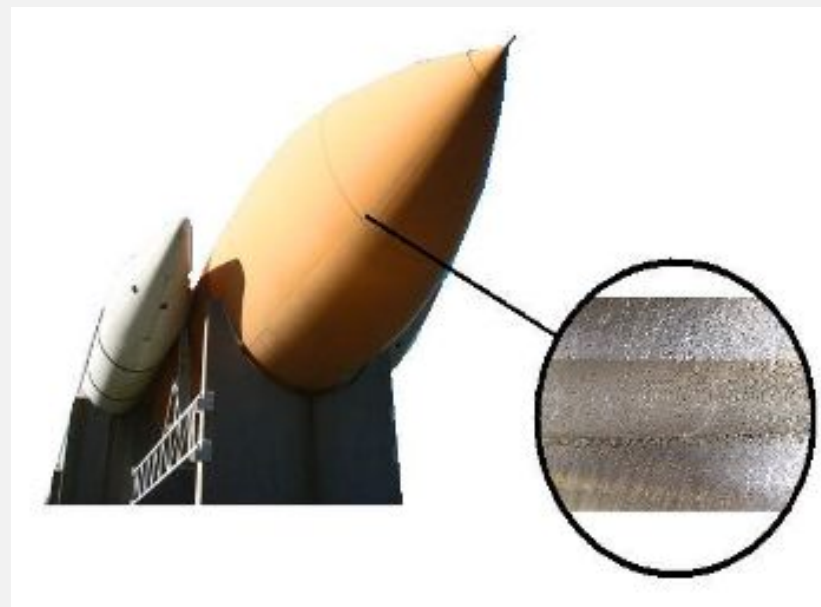
O processo de Soldadura por Fricção Linear no **ramo Aeroespacial** pode ser utilizada para :

- Tanques de combustível para naves espaciais
- Zona de apoio de uma rampa de carga
- Painéis de alumínio
- Assemblagens em sanduíche
- Portas do trem de aterragem
- Fuselagens de aeronaves
- Asas

## 1.1 – Introdução ao SFL



Indústria aeroespacial – painéis de avião



Tanque de combustível de foguetão

## 1.1 – Introdução ao SFL

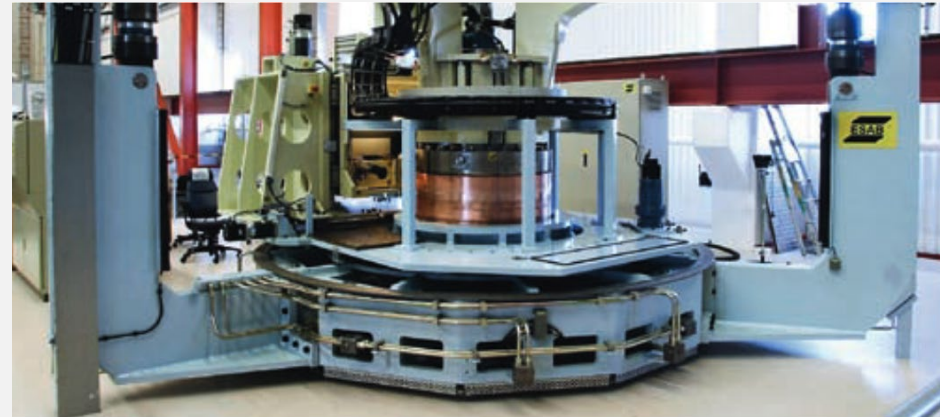
O processo de Soldadura por Fricção Linear pode também ser utilizado para:

- Invólucros do motor e do altifalante
- Dissipadores de calor
- Aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado
- Equipamentos para vácuo
- Bandejas de secagem - indústria alimentar

## 1.1 – Introdução ao SFL

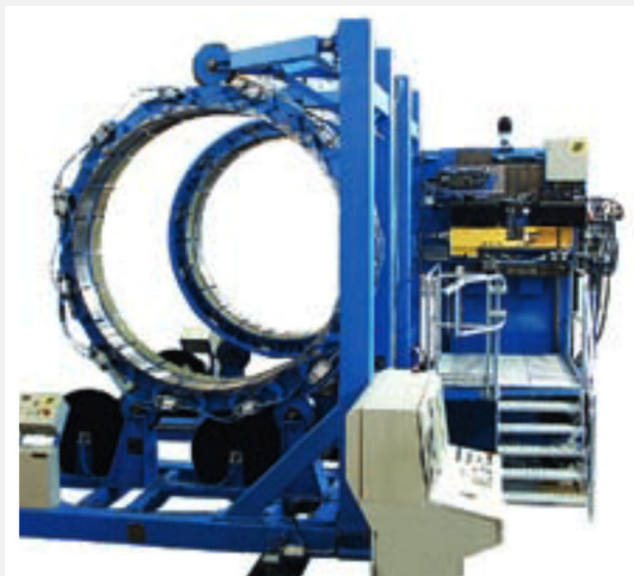


## 1.1 – Introdução ao SFL

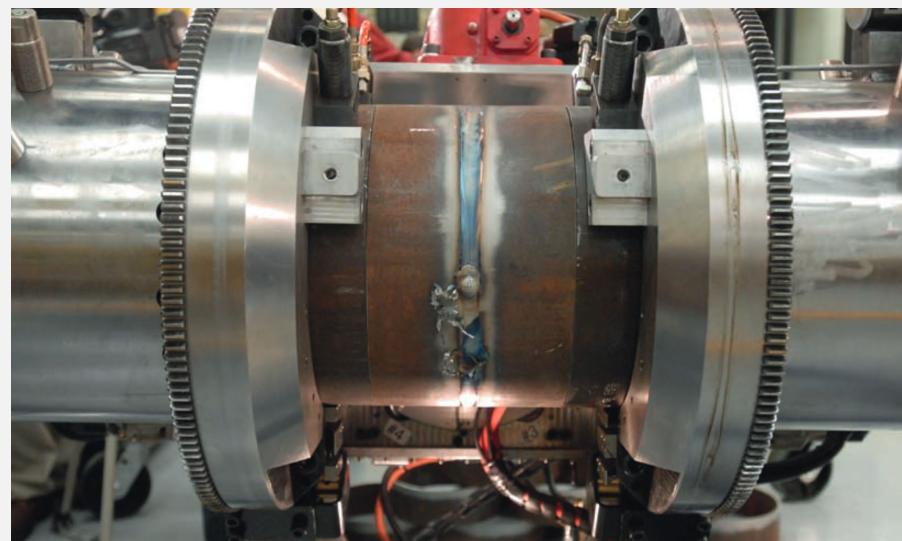


Indústria nuclear – Cilindro de cobre com inserção de ferro fundido, soldado por SFL, para combustível nuclear

## 1.1 – Introdução ao SFL

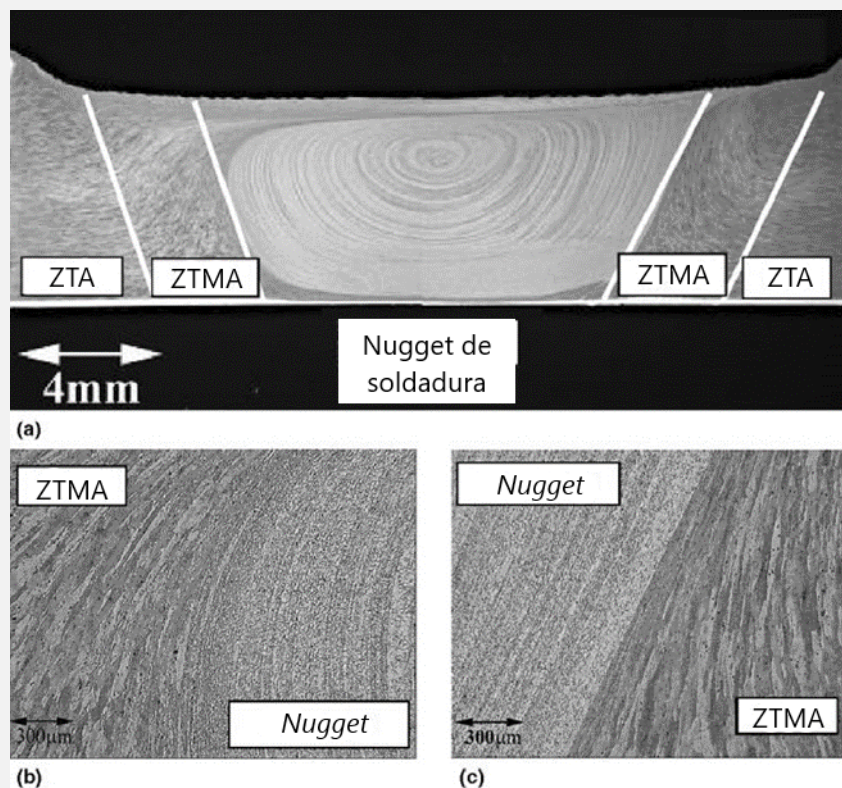


Máquina de soldadura circumferencial



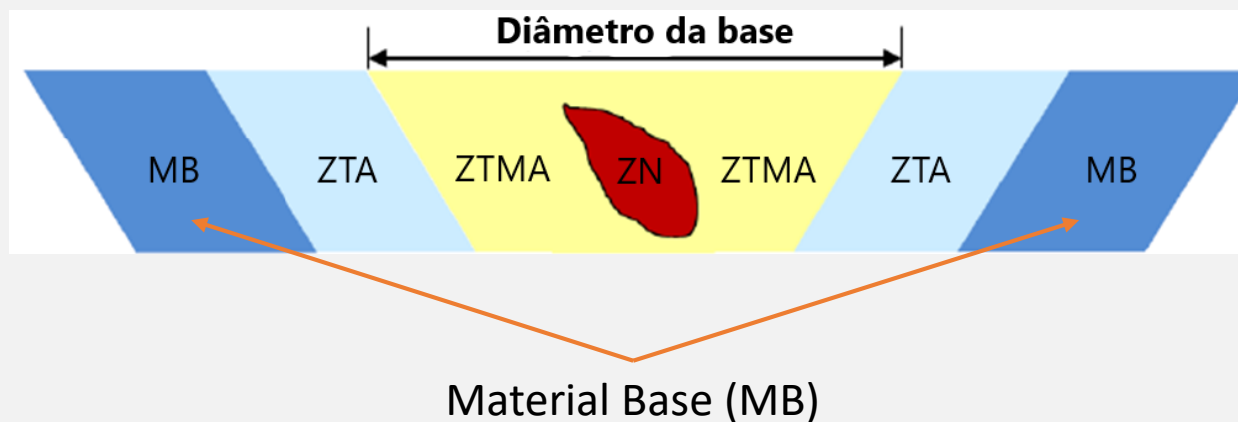
Soldadura por Fricção Linear Orbital de tubo de aço

## 1.1 – Introdução ao SFL



(a) Micrografia ilustrando as diferentes zonas de uma liga de alumínio soldado por fricção linear. (b) Lado de retrocesso. (c) Lado de avanço.

## 1.1 – Introdução ao SFL

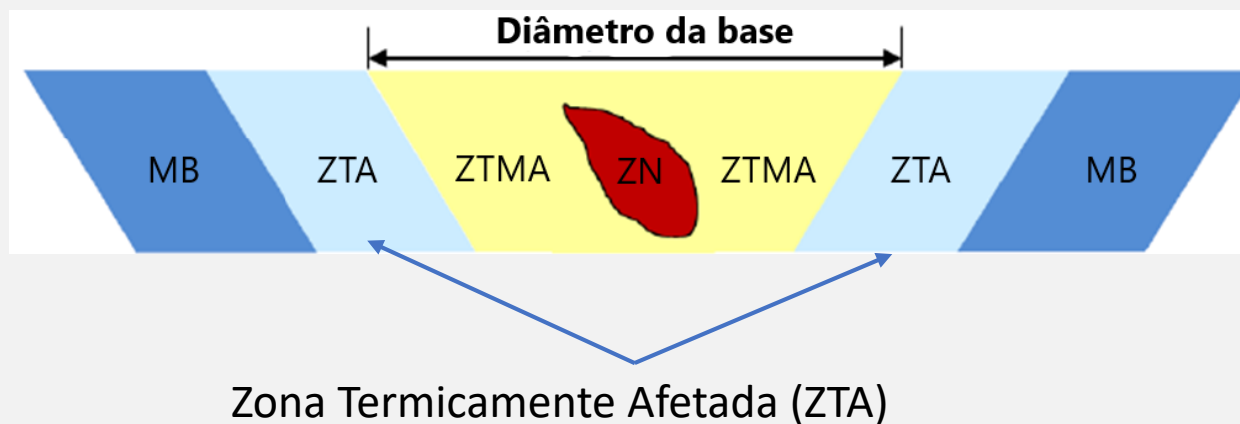


## 1.1 – Introdução ao SFL

### Material base não afetado

- É a zona localizada mais distante da soldadura, que possui a mesma microestrutura e propriedades mecânicas antes de serem processadas pelo processo SFL. Possíveis variações da temperatura, mas não são suficientes para modificar a microestrutura e / ou propriedades mecânicas. A interface entre a zona processada e o material de base é relativamente difusa e suave no lado de recuo da ferramenta, enquanto é bastante afiada no lado de avanço.

# 1.1 – Introdução ao SFL

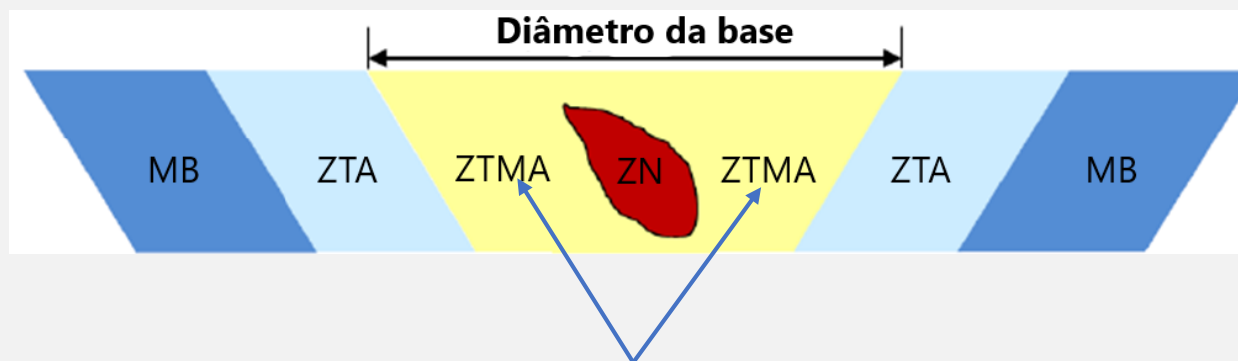


## 1.1 – Introdução ao SFL

### Zona Termicamente Afetada (ZTA) ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

- Ao mover para o centro da soldadura, encontramos a zona termicamente afetada. Nesta zona, a microestrutura e as propriedades mecânicas são afetadas pelo calor gerado pelo processo de FSW, mas não existe deformação plástica.

## 1.1 – Introdução ao SFL



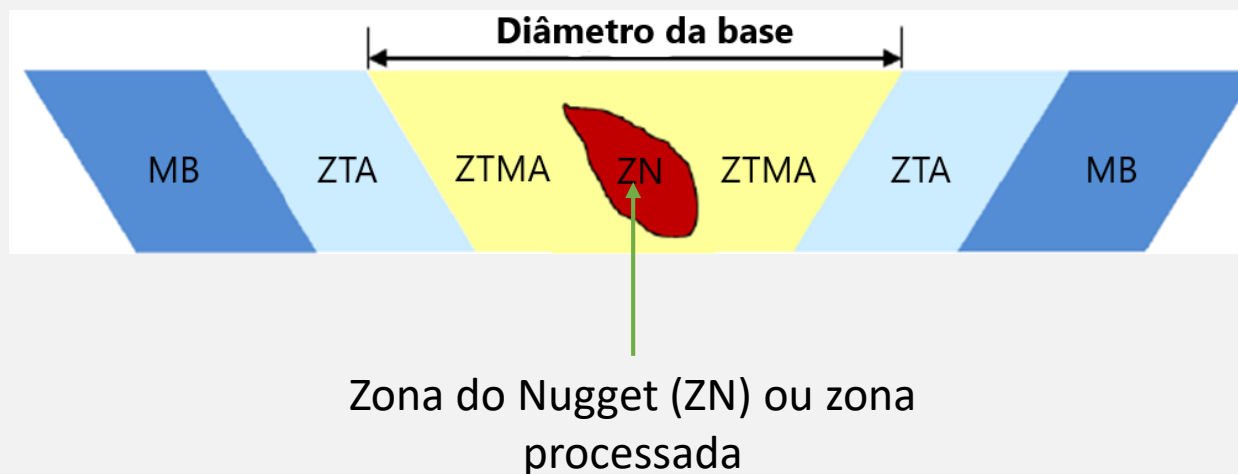
Zona termomecanicamente afetada (ZTMA)

## 1.1 – Introdução ao SFL

### Zona Termomecanicamente Afetada(ZTMA)

- Zona que sofre deformação mecânica
- Nesta zona o material é plasticamente deformado e o processo é comparável ao trabalho a quente
- Frequentemente definido como sem recristalização. Isto é verdade para o alumínio, que é um dos materiais mais comumente aplicados na soldadura por fricção linear, mas outros materiais podem sofrer recristalização nesta zona.
- Estes materiais incluem titânio e suas ligas, aço inoxidável austenítico e cobre.
- Existe um limite distinto entre o nugget de soldadura e a ZTMA.

## 1.1 – Introdução ao SFL



## 1.1 – Introdução ao SFL

### Zona processada (ZP) ou Nugget de soldadura

- Região com intensa deformação plástica e elevado aquecimento por atrito durante o processo SFL, formam uma microestrutura de grãos finos recristalizada.
- Esta foi a zona anteriormente ocupada pelo pino de ferramenta.
- O termo zona processada é frequentemente utilizado no processamento por fricção linear, no qual grandes volumes de material são processados.
- O *nugget* contém grãos finos e equiaxiais e apresenta zonas de espessura variável, como “anéis de cebola” (também conhecidos como “banda metalúrgica”).
- Este padrão repetitivo macroscopicamente perceptível na seção transversal e lateral da solda é uma característica única que ocorre durante o SFL e processos afins.
- Como resultado, a microestrutura de grãos finos promove excelentes propriedades mecânicas, de fadiga, maior capacidade de deformação e excepcional superplasticidade.

## 1.1 – Introdução ao SFL



## 1.1 – Introdução ao SFL



Superfície com o furo de saída preenchido

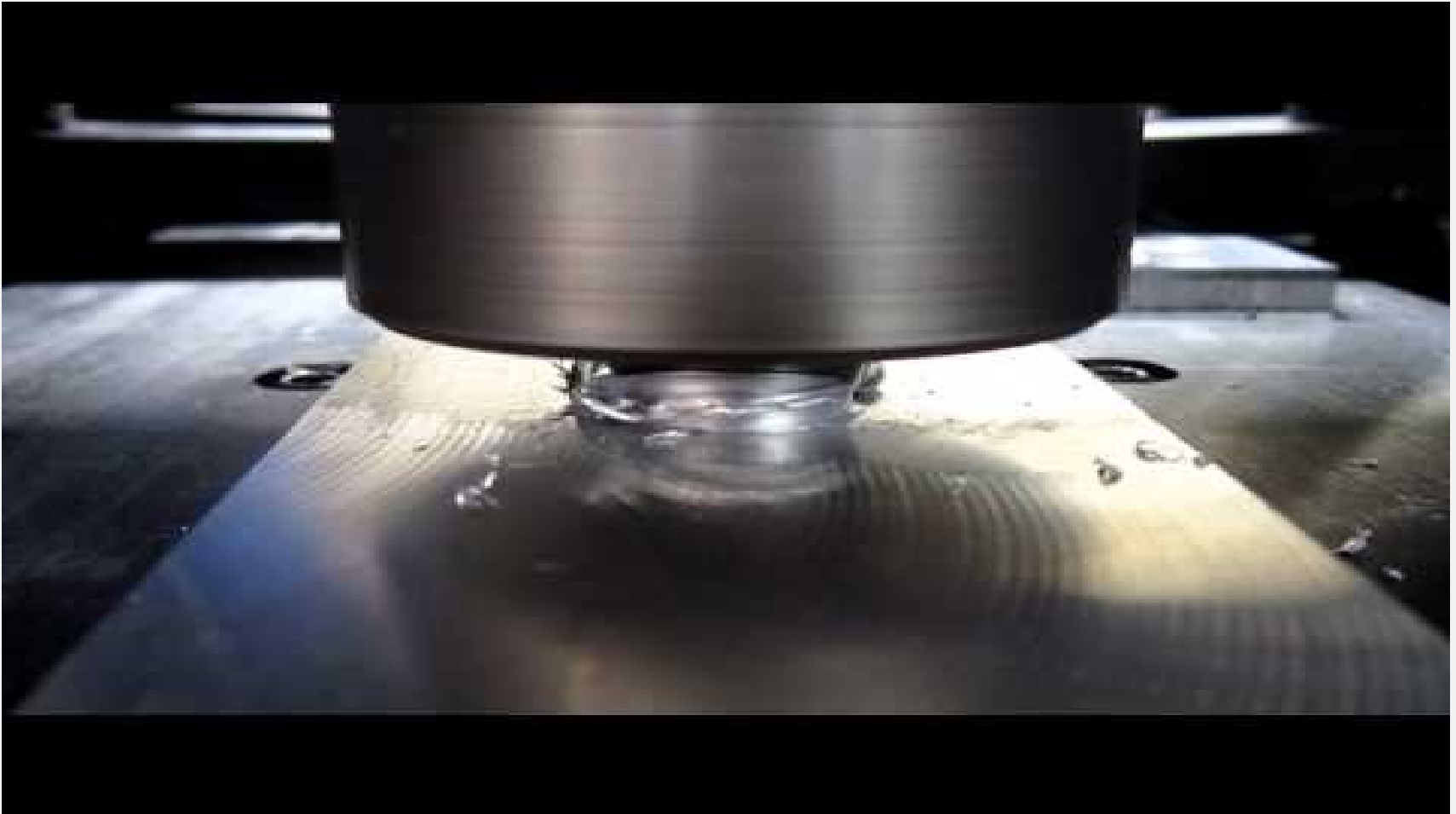


Furos de saída do SFL Tandem

## 1.1 – Introdução ao SFL



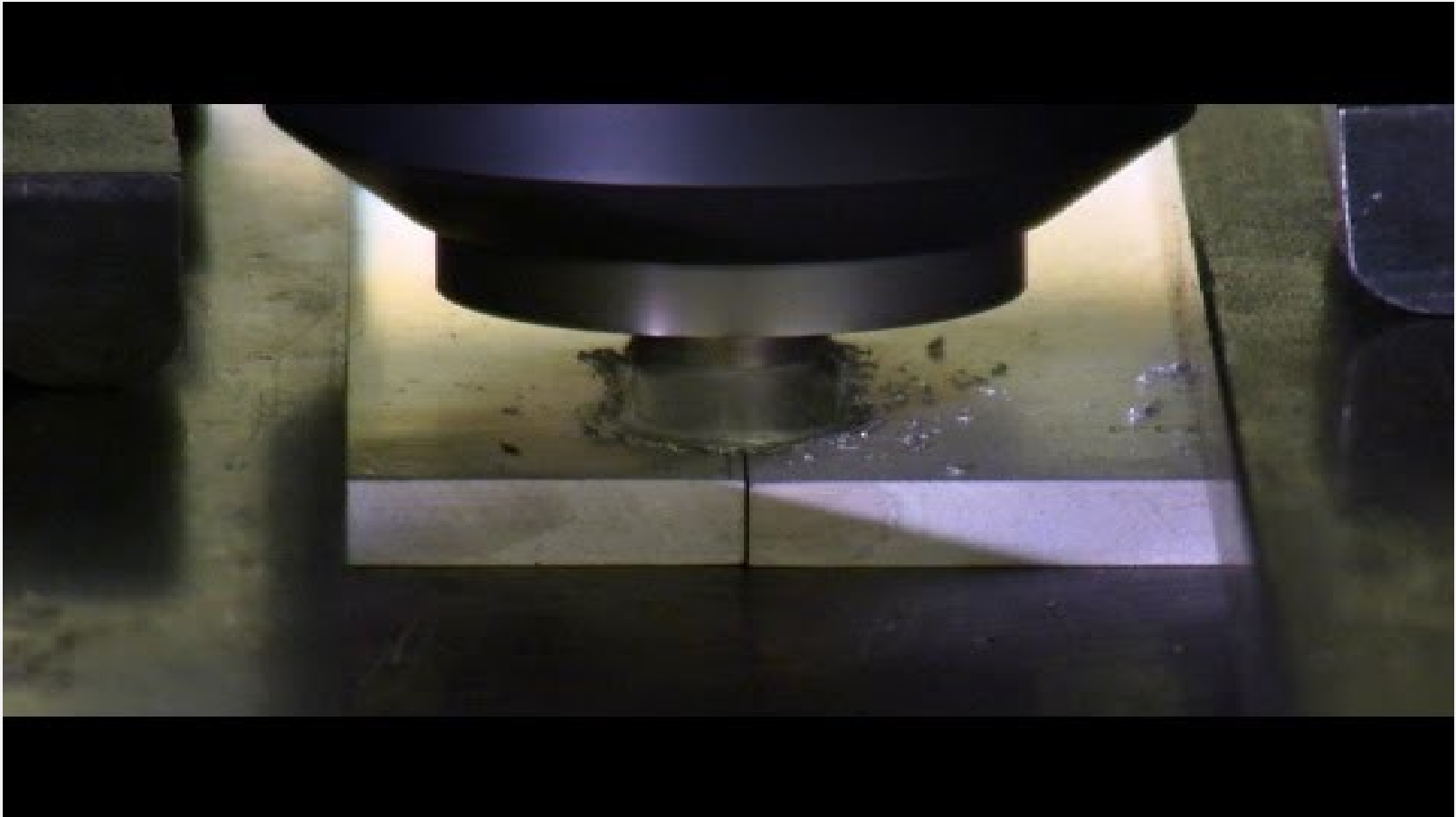
## 1.1 – Introdução ao SFL



## 1.1 – Introdução ao SFL

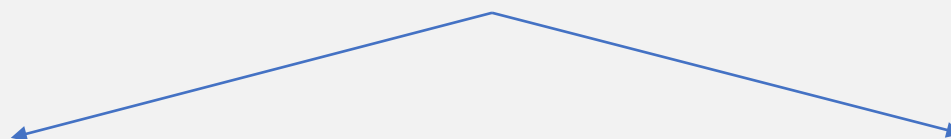


## 1.1 – Introdução ao SFL



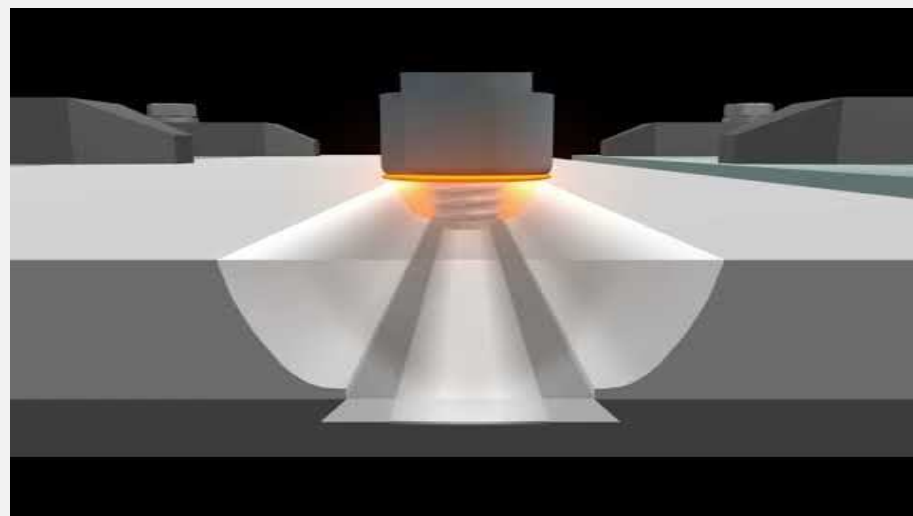
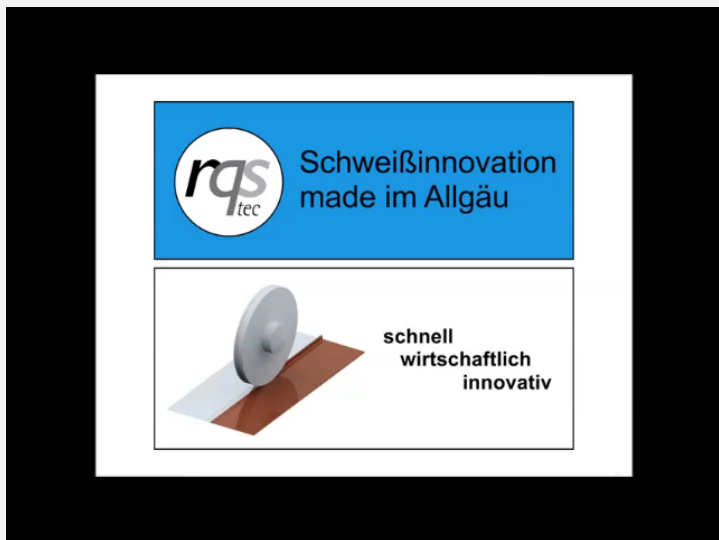
## 1.1 – Introdução ao SFL

Desenvolvido com base na soldadura por fricção linear

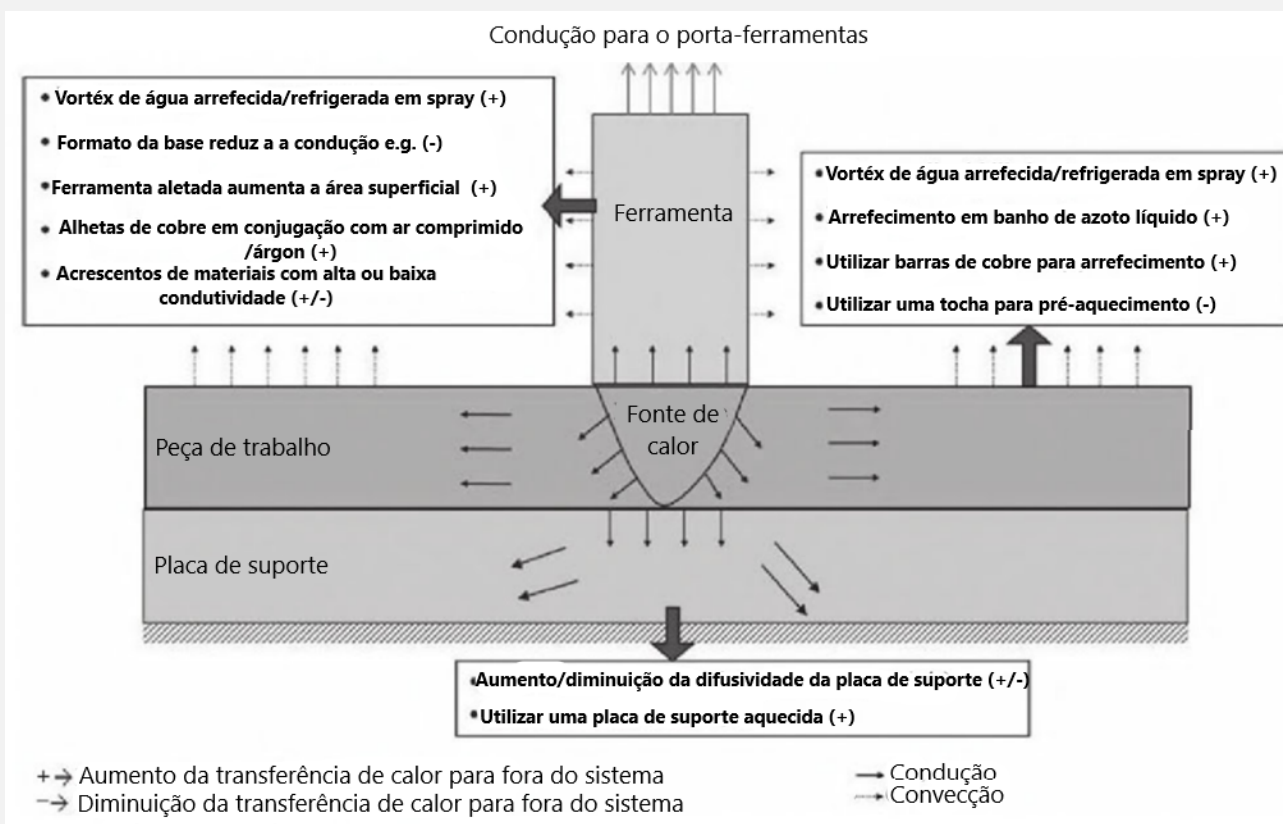


Soldadura por fricção por esmagamento

Soldadura por fricção linear *Dovetailing*

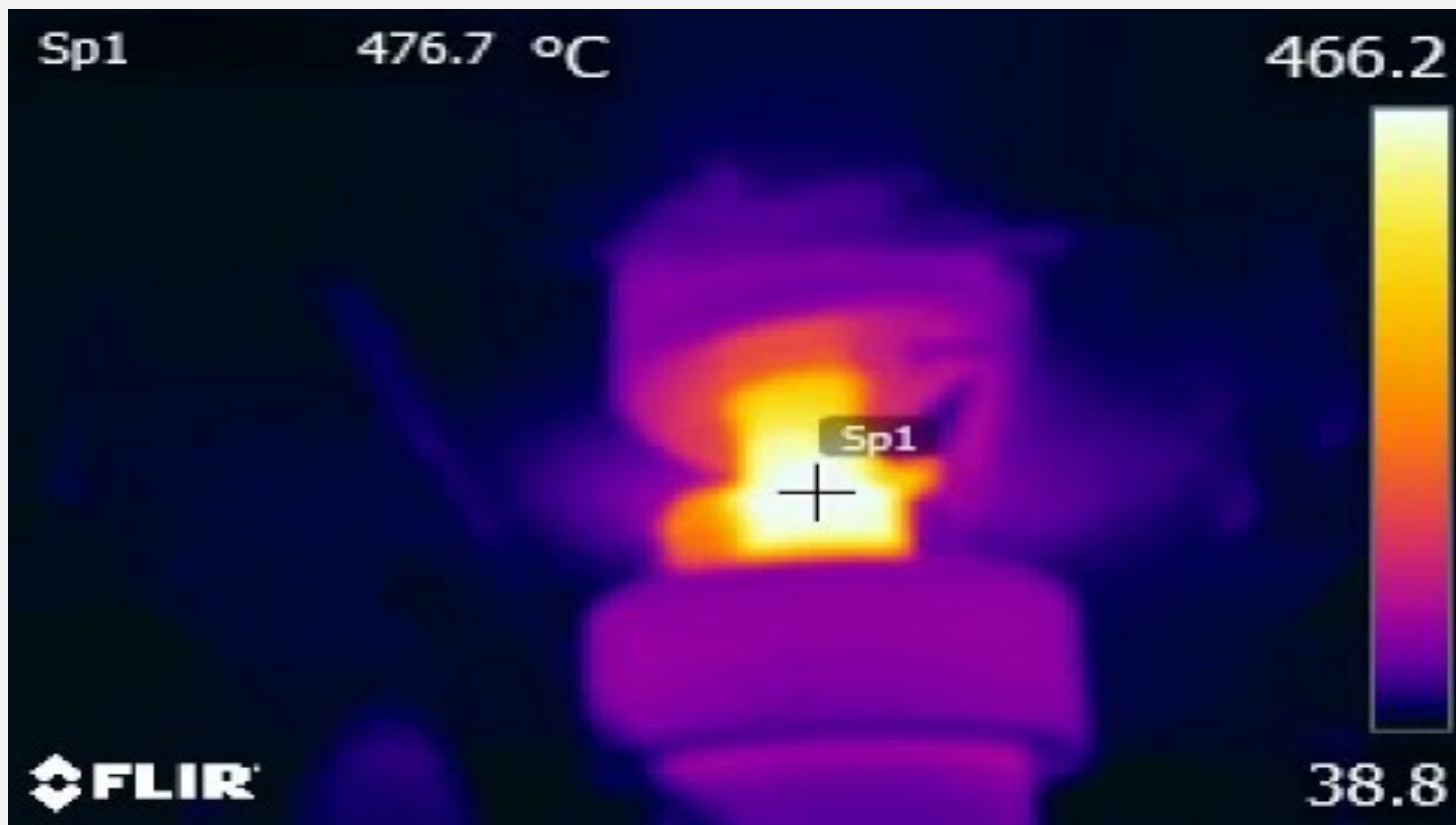


## 1.1 – Introdução ao SFL



Métodos de gestão térmica que podem ser utilizados no processo de soldadura por fricção linear. As setas indicam a transferência de calor.

## 1.1 – Introdução ao SFL



# 1. Noções Básicas de SFL

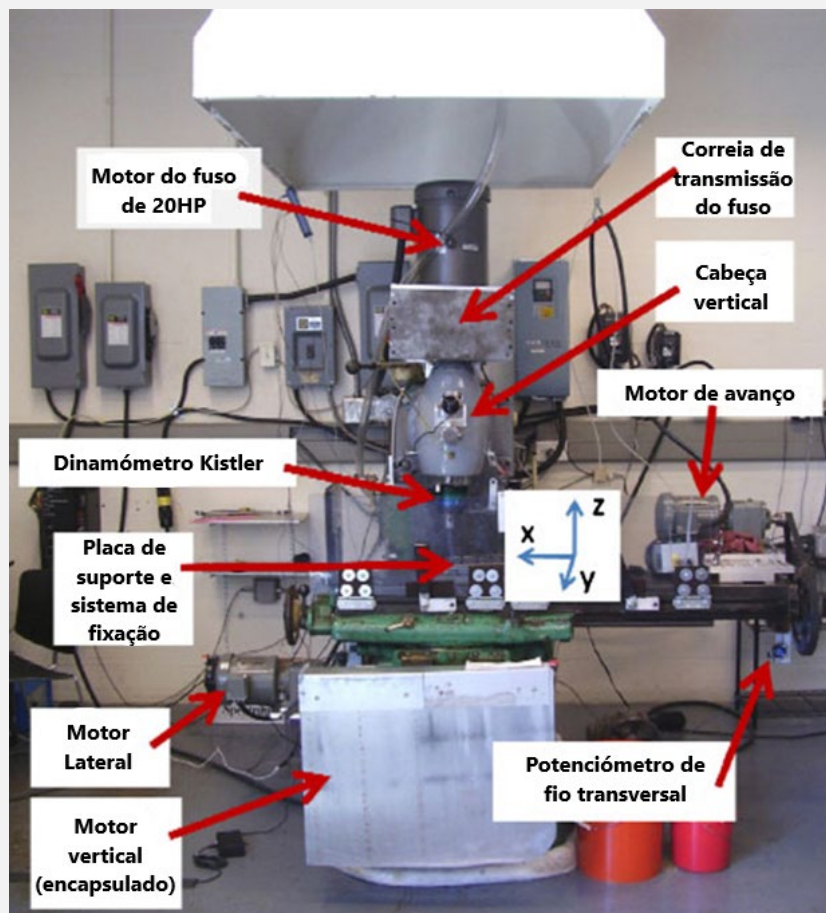
## 1.2 – Equipamento de soldadura

## 1.2 – Equipamento de soldadura

Um sistema básico inclui os seguintes componentes:

- Fuso de rotação
- Motores
- Mecanismo de ligação do motor
- Ferramenta SFL

## 1.2 – Equipamento de soldadura



Exemplo da configuração de um Sistema SFL

## 1.2 – Equipamento de soldadura

Características adicionais, que podem ser incorporadas na máquina, incluem:

- Controlo CNC
- Monitorização de produção
- Monitorização da temperatura de soldadura
- Seguimento de junta
- Proteção por gás
- Acessórios da máquina
- Sistema de aquisição de dados
- Detecção de altura

## 1.2 – Equipamento de soldadura

### Maquina-ferramenta convencionais

- Baixo custo inicial
- A flexibilidade pode ser melhorada pela introdução de motores adicionais (Graus de liberdade adicionais)
- Rigidez da máquina - precisa ser reforçada
- Soluções de controle por força são necessárias para evitar danos ao equipamento, garantir a segurança humana e alcançar boa qualidade da soldadura

### Fresadora adaptada para SFL



## 1.2 – Equipamento de soldadura

### Máquinas SFL robóticas

- Alta repetibilidade e flexibilidade
- Custo relativo baixo
- Soldadura com trajetos 3D
- Automação do processo
- Baixa precisão que piora quando estão sujeita a cargas elevadas
- Rigidez relativamente baixa e capacidade de carga moderada

### Braços robotizados articulados



## 1.2 – Equipamento de soldadura

### Máquinas SFL robóticas

- Suporta cargas mais elevadas
- Rigidez significativamente maior do que o braço robotizado articulado
- Soldadura por trajetos 3D
- Automação do processo
- O custo pode ser notavelmente maior e seu volume é significativamente menor do que o robô braço articulado

### Robôs cinemáticos paralelos

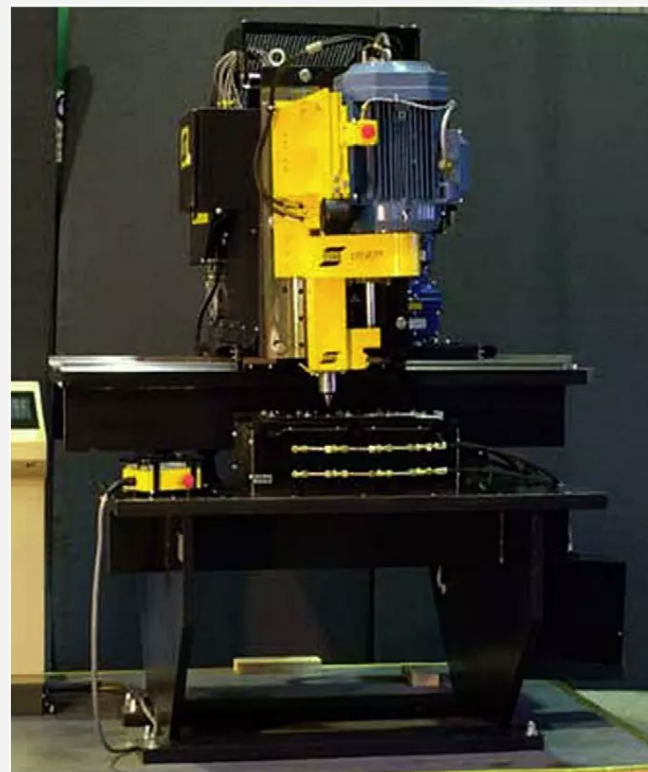


## 1.2 – Equipamento de soldadura

### Máquinas SFL dedicadas

- Alta capacidade de carga, rigidez, precisão e disponibilidade
- Diferentes configurações possíveis, apresentando níveis de flexibilidade
- As máquinas dedicadas da SFL são máquinas mais robustas e estruturalmente rígidas (soldadura de materiais de alta temperatura)
- Bastante caro e seu custo aumenta com o aumento da flexibilidade

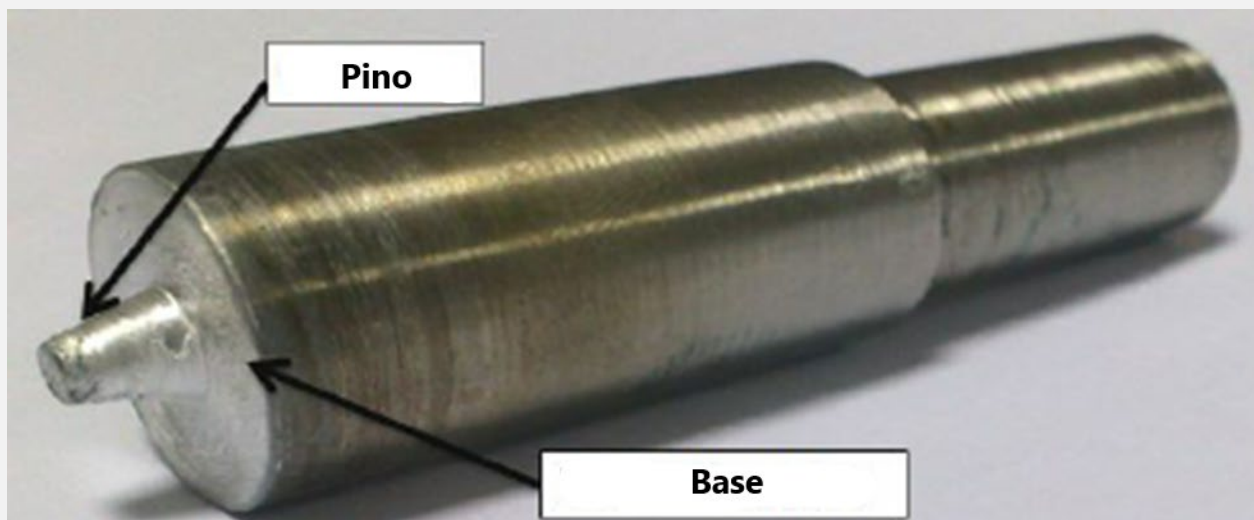
### Máquina SFL dedicada



## 1.2 – Equipamento de soldadura

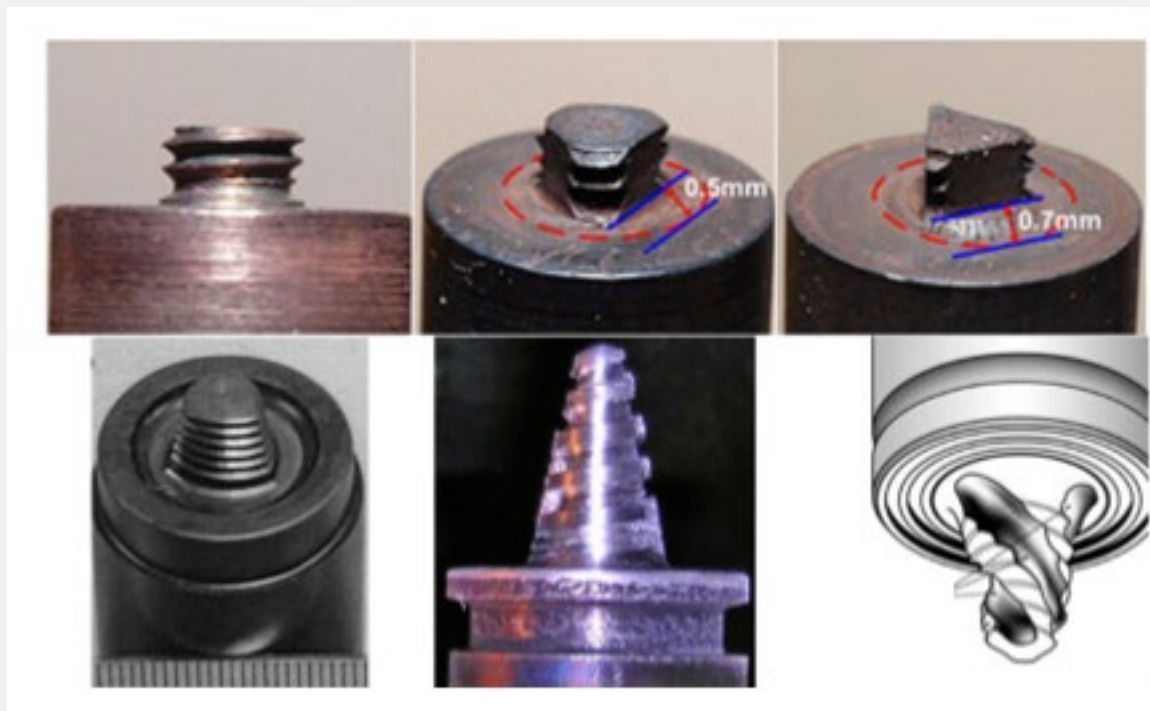
	Fresadora	Máquina SFL	Robô paralelo	Robô articulado
Flexibilidade	Baixo	Baixo/Médio	Alto	Alto
Custo	Médio	Alto	Alto	Baixo
Rigidez	Alto	Alto	Alto	Baixo
Volume de trabalho	Médio	Médio	Baixo	Alto
Tempo de preparação	Baixo	Alto	Médio	Médio
Número de opções de programação	Baixo	Médio	Alto	Alto
Capacidade de produzir soldaduras complexas	Baixo	Médio	Alto	Alto
Tipo de controlo	Posição	Posição/força	Posição	Posição

## 1.2 – Equipamento de soldadura



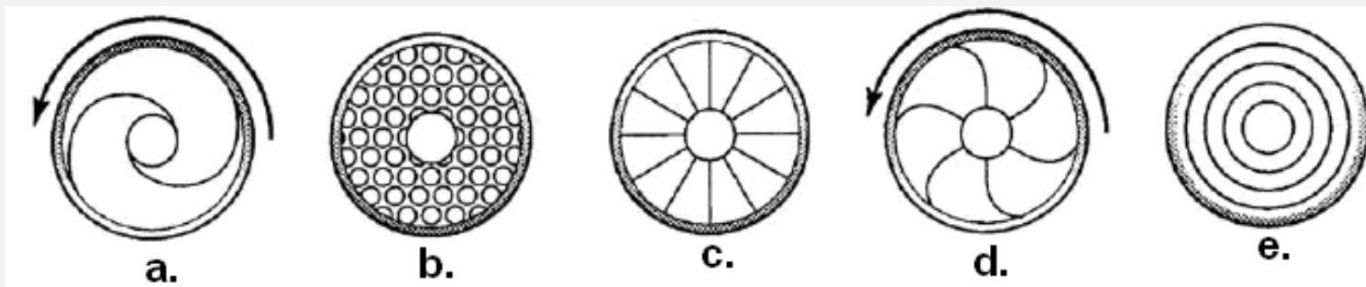
Exemplo da geometria da ferramenta

## 1.2 – Equipamento de soldadura



Diferentes tipos de geometrias dos pinos

## 1.2 – Equipamento de soldadura



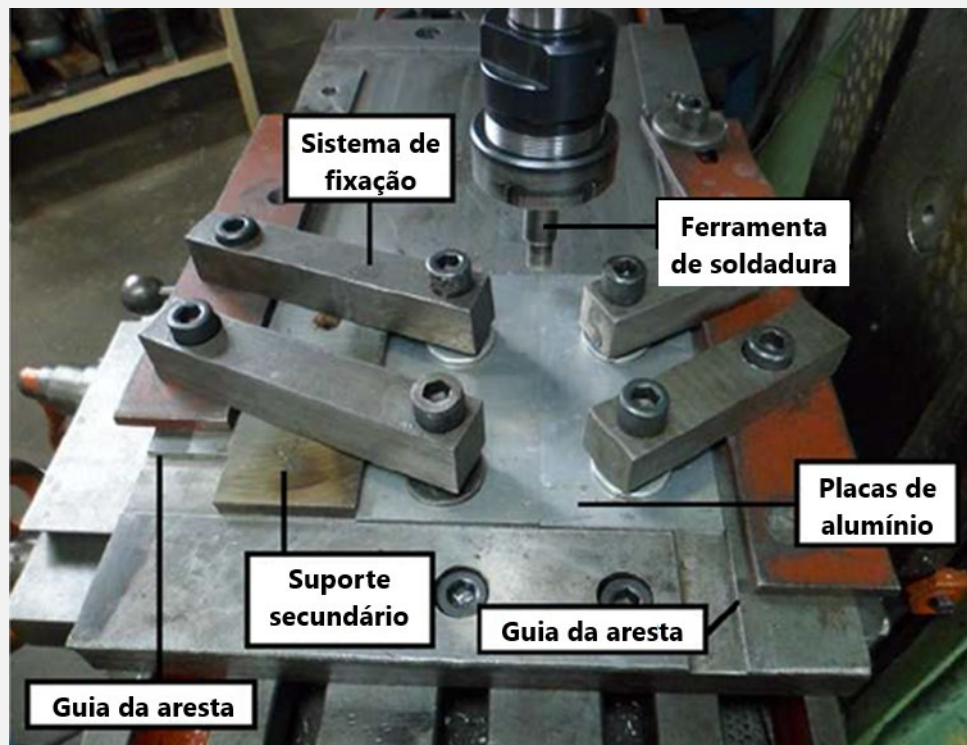
Diferentes tipos de bases (acima) e exemplo de uma base convexo e com estrias (baixo)

## 1.2 – Equipamento de soldadura

Possíveis sistemas de fixação incluem:

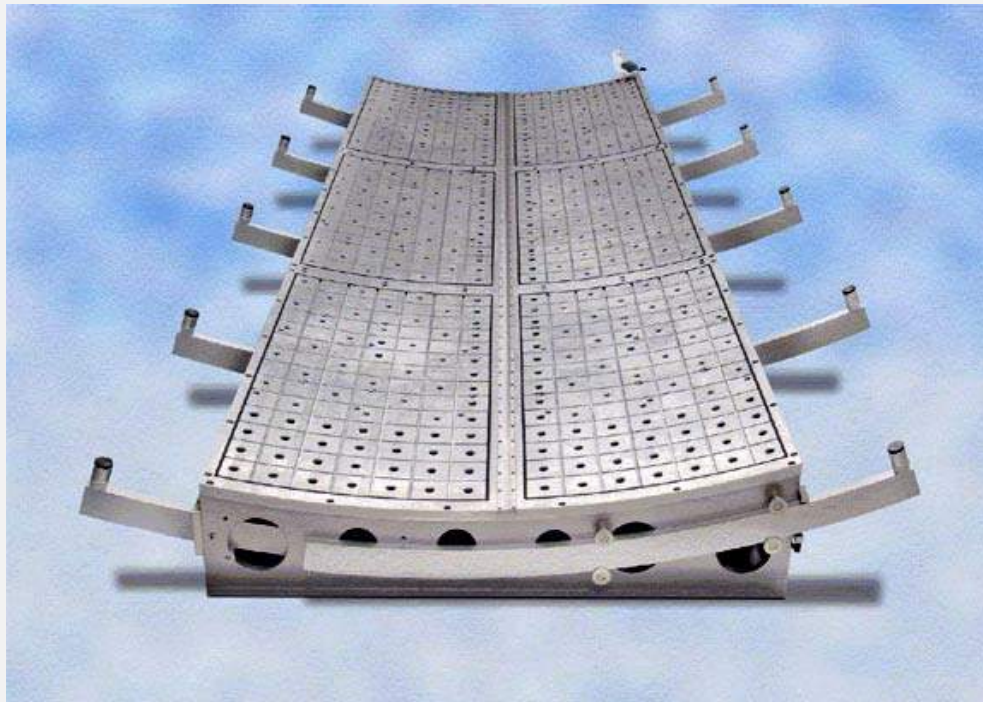
- Garras de fixação
- Sistemas hidráulicos e pneumáticos
- Sistemas de fixação por vácuo

## 1.2 – Equipamento de soldadura



Sistema de fixação

## 1.2 – Equipamento de soldadura



Sistema de fixação por vácuo

## 1.2 – Equipamento de soldadura

### SFL com arrefecimento aumentado

- Água
- CO<sub>2</sub> Líquido
- Azoto líquido
  
- Aço, titânio, aço inoxidável e ligas de alta temperatura são soldadas por fricção linear com ferramentas arrefecidas

### Aquecimento

- SFL assistido eletricamente
- SFL assistido por laser
- SFL assistido por arco
- SFL assistido por energia ultrassónica
  
- O aquecimento pode minimizar o desgaste da ferramenta (especialmente durante a etapa de penetração) e aumento da velocidade de avanço.

## 1.2 – Equipamento de soldadura

Os componentes chave da máquina de SFL incluem:

- Cabeça de soldadura e o seu motor
- Trilhos de guiamento e seus componentes
- Unidades hidráulicas

Planos de manutenção, inspeções e documentação completa devem garantir uma operação a longo prazo e sem problemas

# 1. Noções Básicas de SFL

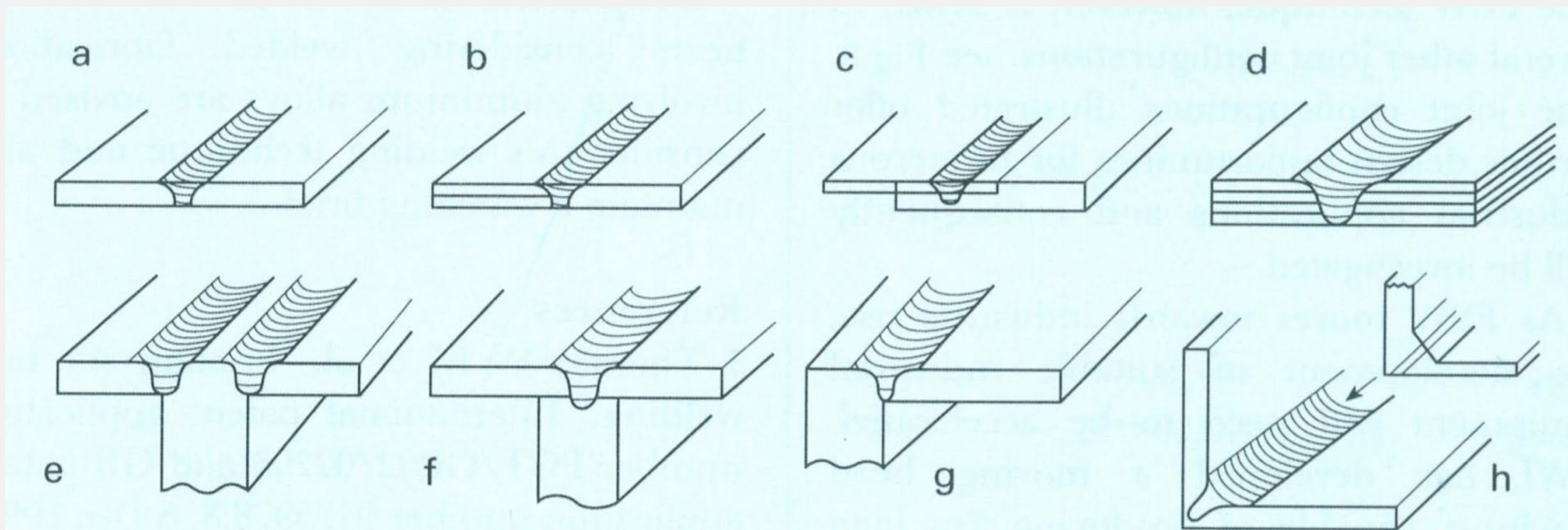
## 1.3 – Processos de soldadura

## 1.3 – Processos de soldadura

### Implicações no Design do SFL:

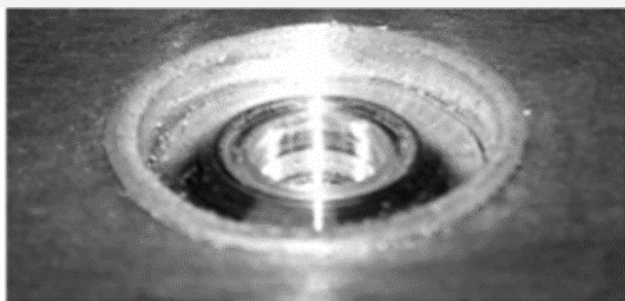
- Limitações mecânicas
- Limitações de fixação
- Limitações no design da junta
- Limitações do furo de saída “*Keyhole*”
- Limitações da espessura do componente de trabalho e material base
- Material

## 1.3 – Processos de soldadura

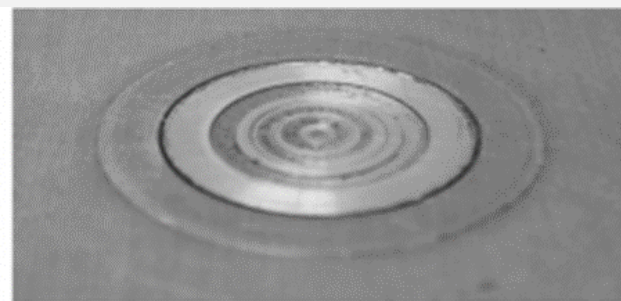


Configurações de juntas possíveis: topo-a-topo bordos rectos; (b) e (c) junta sobreposta; (d) junta sobreposta com multiplas chapas; (e) junto topo-a-topo em T (f) junta sobreposta em T (g) topo-a-topo em aresta (h) junta de canto

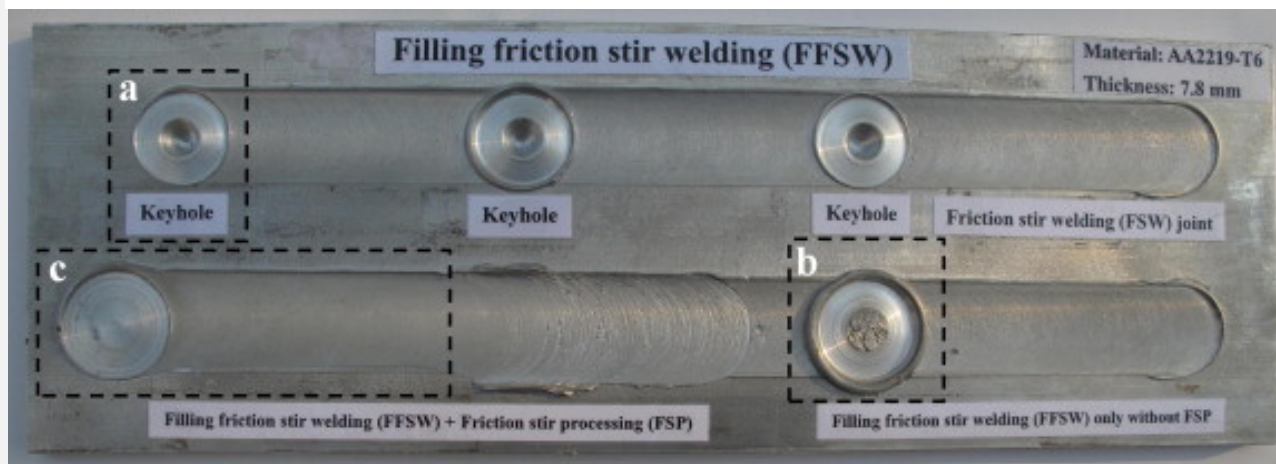
## 1.3 – Processos de soldadura



(a) Soldadura por fricção linear por ponto convencional

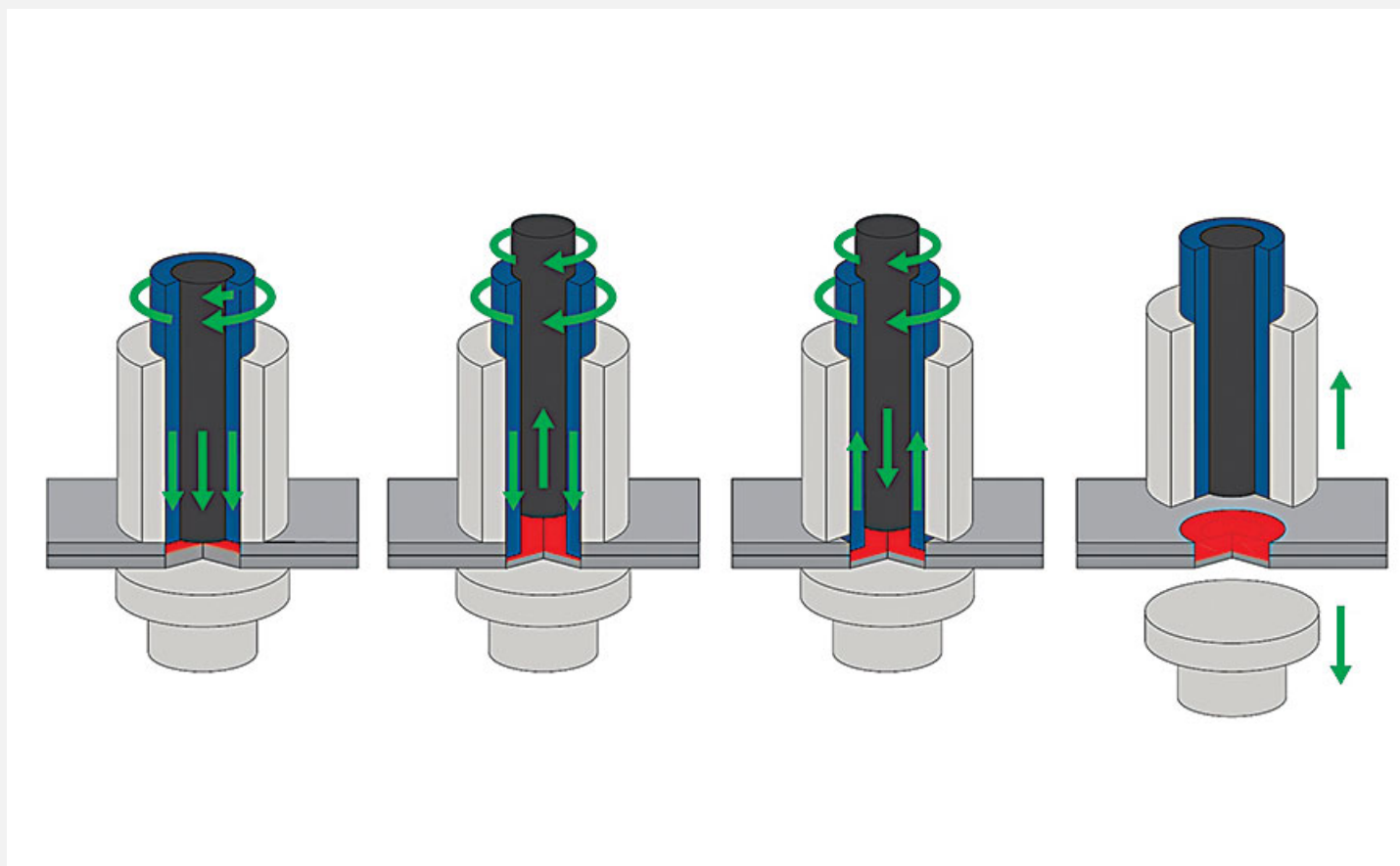


(b) Soldadura por fricção linear por pontos com enchimento



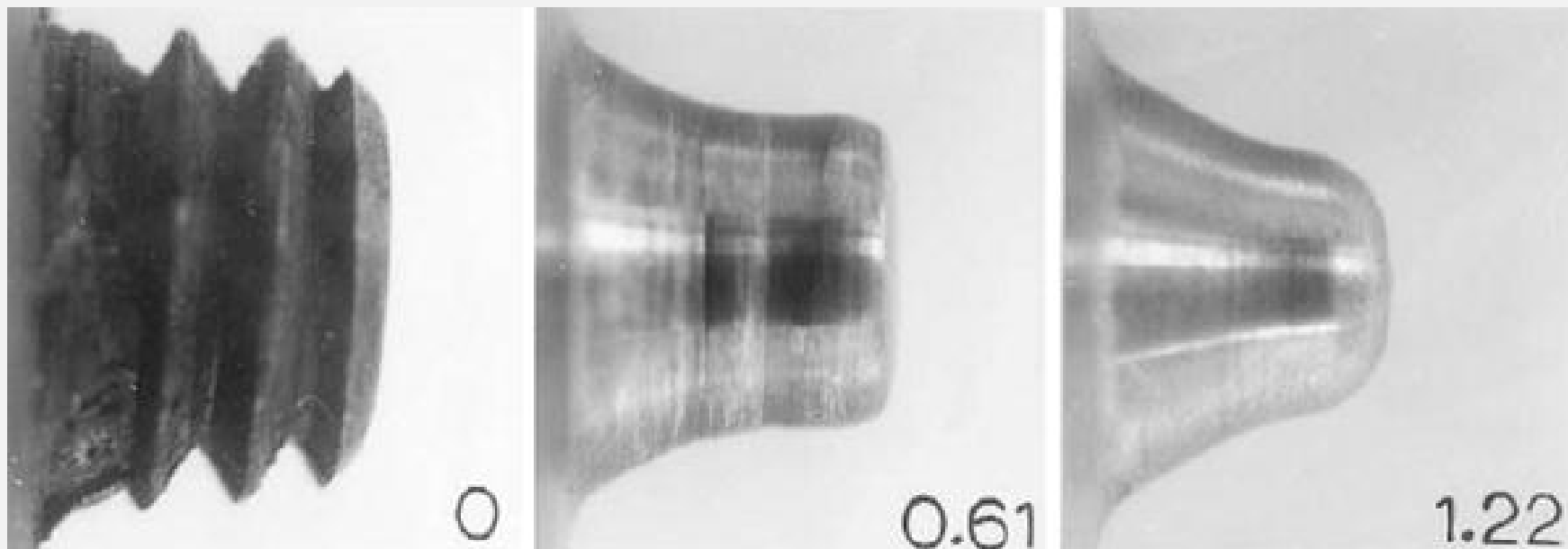
Preenchimento do furo de saída “keyhole”

## 1.3 – Processos de soldadura



Processo SFL com enchimento

## 1.3 – Processos de soldadura



Desgaste da ferramenta (o número na imagem corresponde à perda de espessura do pino)

# 1. Noções Básicas de SFL

## 1.4 – Materiais Base

## 1.4 – Materiais Base

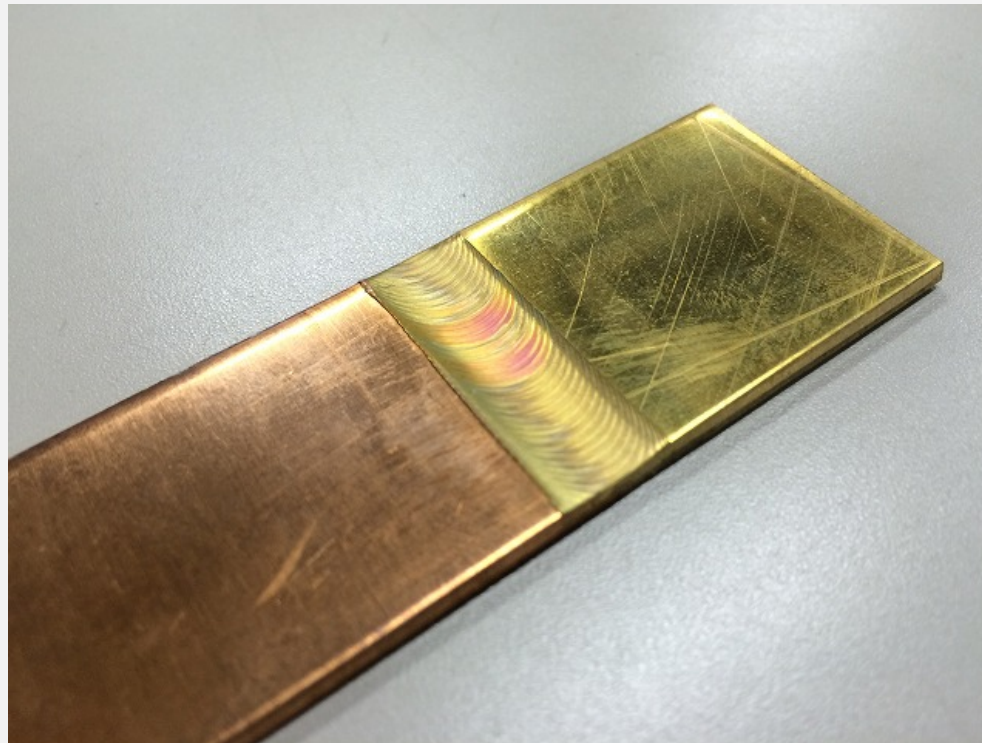
- O FSW pode ser utilizado na ligação de materiais como alumínio, cobre, magnésio, aço, termoplásticos e titânio.
- Também é possível realizar soldadura de materiais dissimilares.
- A soldadura de materiais de alto ponto de fusão é mais difícil, porque o material da ferramenta de soldadura está trabalhando em condições adversas de operação.

## 1.4 – Materiais Base

- A rigidez e o manuseamento de força são fatores importantes para a máquina FSW, o que limita a espessura do componente de trabalho. A espessura do material deve estar na gama de 0,8 mm a 65 mm.

Liga	Espessura, mm	Material da ferramenta
Ligas de alumínio	<12	Aços ferramenta, WC-Co
	<26	MP159
Ligas de magnésio	<6	Aços ferramenta, WC
Cobre e ligas de cobre	<50	Ligas de níquel, PCBN, ligas de tungsténio
	<11	Aços ferramenta
Ligas de titânio	<6	Ligas de tungsténio
Aços inoxidáveis	<6	PCBN, Ligas de tungsténio
Aços de baixa liga	<10	WC, PCBN
Ligas de níquel	<6	PCBN

## 1.4 – Materiais Base



Metais dissimilares

## 1.4 – Materiais Base

- O FSW pode ser utilizado na ligação de materiais como alumínio, cobre, magnésio, aço, termoplásticos e titânio.
- Também é possível realizar soldadura de materiais dissimilares.
- A soldadura de materiais de alto ponto de fusão é mais difícil, porque o material da ferramenta de soldadura está trabalhando em condições adversas de operação.

## 1.4 – Materiais Base



## 1.4 – Materiais Base

**As ligas tratáveis termicamente têm as seguintes propriedades:**

- O perfil de dureza depende principalmente da dissolução e/ou do aumento e crescimento dos precipitados.
- As temperaturas atingidas durante a soldadura levam à dissolução e crescimento dos precipitados, o que diminui ainda mais a dureza na zona de soldadura.
- Uma redução de dureza na zona de soldadura é comum na SFL do alumínio envelhecido artificialmente da série 6xxx.
- A temperatura alcançada durante o SFL tem um grande impacto no sobreenvelhecimento e na diminuição da densidade de deslocações, consequentemente diminuindo a dureza localizada. A dureza mínima pode ser encontrada no ZTMA - perda de grãos alongados, processos de envelhecimento e recozimento.
- O lado em retrocesso mostra uma mudança mais suave na microestrutura do que o lado em avanço
- As ligas de alumínio 2xxx envelhecem naturalmente à temperatura ambiente, o que leva a um aumento da dureza e a uma melhoria nas propriedades mecânicas (o maior efeito ocorre na primeira semana de envelhecimento).

## 1.4 – Materiais Base

### As ligas não tratáveis termicamente têm as seguintes propriedades :

- A zona de soldadura macias não são verificadas nessas ligas.
- Ligas tratáveis pelo calor e ligas não tratáveis pelo calor:
- Redução na força e na ductilidade em comparação com o metal original não-soldado.
- Diferentes zonas têm diferentes resistências à deformação devido a diferenças no tamanho do grão, tamanho e distribuição do precipitado.

## 1.4 – Materiais Base

### Ligas de cobre:

- Mostra uma maior dissipação de calor através da peça de trabalho, causada pela sua maior difusividade térmica, exigindo uma maior entrega térmica durante a soldadura - as temperaturas apropriadas para uma junta SFL foram definidas como estando entre 460 e 530 ° C.
- A zona do *nugget* apresenta grãos finos recristalizados, a ZTMA grandes grãos deformados e a ZAC é caracterizada por grãos equiaxiais maiores que os do metal base (MB).
- A resistência à tração da junta SFL de cobre pura é ligeiramente menor do que a do metal base - a falha ocorre perto da ZAC.

## 1.4 – Materiais Base

### Ligas de magnésio:

- A ocorrência de fases líquidas e a geração de microestrutura complexas na soldadura são causadas por picos de temperatura na faixa de 370 ° C a 500 ° C.
- No geral, as juntas SFL de liga de magnésio apresentam maior dureza do que a da MB devido a uma estrutura de grãos refinada.
- A temperatura mais baixa alcançada no *nugget* durante a soldadura tende a apresentar as melhores propriedades mecânicas.
- As juntas de ligas de magnésio fundidas por FSW mostram melhor desempenho em comparação com o metal de base, mas nas ligas de magnésio forjado é relatada uma diminuição dessas propriedades.
- A falha da junta soldada está localizada principalmente no metal base.

## 1.4 – Materiais Base

### Aços:

- A alta temperatura durante a soldadura ( $> 1000$  ° C) - Geralmente a dureza na zona central é muito maior que a do material base.
- As juntas de aço por SFL apresentam maiores tensões de cedência ou rotura quando comparado ao metal base.

## 1.4 – Materiais Base

### Ligas de titânio:

- A transformação da fase alotrópica, juntamente com a deformação e arrefecimento contínuo, produz uma complexa microestrutura de soldadura.
- ZTMA muito estreita aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  ou ausência de ZTMA - há apenas presença de ZAC e *nugget*.
- A tensão de cedência e rotura exibem juntas com quase 100% de eficiência.

## Referências

Slide:

[4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Friction\\_stir\\_processing](https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_processing)

[4] [http://www.uqac.ca/ceeuqac/index/csfm\\_english](http://www.uqac.ca/ceeuqac/index/csfm_english)

[5] <https://www.youtube.com/watch?v=ZpGfjg6BI5o>

[12] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[12] Cam, G., & Mistikoglu, S. (2014). Recent developments in friction stir welding of Al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1936-1953.

[14] [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2008/ip\\_4.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2008/ip_4.html)

[14] <https://phys.org/news/2014-06-lighter-cars-robotic-welding-method.html>

[15] <https://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding>

[15] <http://www.ftech.co.jp/en/development/>

[16] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[18] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[20] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[20] <https://www.productionfrictionstirwelding.com/architecture-and-construction-products>

## Referências

Slide:

[22] <http://www.gatwicktechnologies.com/applications/body-panels>

[25] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[26] <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12296.pdf>

[27] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, 2007

[28] [30] [32] [34] Dawood, Hasan & Mohammed, Kahtan & Rahmat, Azmi & Basheer, Uday. (2015). Microstructural Characterizations and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Technique of Dissimilar (Al-Cu) Sheet. JOURNAL OF APPLIED SCIENCE AND AGRICULTURE. 10. 149-158.

[37] Behmand, S. A., Mirsalehi, S. E., Omidvar, H., & Safarkhanian, M. A. (2015). Filling exit holes of friction stir welding lap joints using consumable pin tools. Science and Technology of Welding and Joining, 20(4), 330-336.

[37] [https://www.researchgate.net/figure/Tandem-twin-stirTM-lead-and-follow-exit-holes\\_fig4\\_228600743](https://www.researchgate.net/figure/Tandem-twin-stirTM-lead-and-follow-exit-holes_fig4_228600743)

[43] Rajiv S. Mishra (Author), Harpreet Sidhar, Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys including Al-Li Alloys, Butterworth-Heinemann, 2016

[38] Longhurst, W. R., Strauss, A. M., Cook, G. E., & Fleming, P. A. (2010). Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(9-12), 905-913.

[47] <http://www.bil-ibs.be/en/friction-stir-welding>

# Referências

Slide:

[50] [https://www.asiamachinery.net/supplier/product\\_details.asp?ProID=13282&SupID=7312](https://www.asiamachinery.net/supplier/product_details.asp?ProID=13282&SupID=7312)

[51] Mendes, N., Neto, P., Loureiro, A., & Moreira, A. P. (2016). Machines and control systems for friction stir welding: a review. *Materials & Design*, 90, 256-265.

[52] <http://www.directindustry.com/prod/esab/product-18224-981963.html>

[53] [40] Mendes, N., Neto, P., Loureiro, A., & Moreira, A. P. (2016). Machines and control systems for friction stir welding: a review. *Materials & Design*, 90, 256-265.

[54] Maria Asli Sicilan and S. Senthil Kumar "Analysis of Surface Quality of Friction Stir Welding Joints using Image Processing Techniques "International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, Travancore Engineering College, Kollam, Kerela, India. 03/2014

[55] <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2011/tools.html>

[56] Pasha, A., Reddy, R., Laxminarayana, P., & Khan, I. A. (2014). INFLUENCE OF PROCESS AND TOOL PARAMETERS ON FRICTION STIR WELDING—OVER VIEW. *Int J App Eng Technol*, 4(3), 54-69.

[58] Pastor, A., & Svoboda, H. G. (2013). Time-evolution of heat affected zone (HAZ) of friction stir welds of AA7075-T651.

## Referências

Slide:

[59] [https://www.aerospace-technology.com/contractors/sub\\_contract/horst/attachment/horst3/](https://www.aerospace-technology.com/contractors/sub_contract/horst/attachment/horst3/)

[65] Han, B., Huang, Y., Lv, S., Wan, L., Feng, J., & Fu, G. (2013). AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding. *Materials & Design*, 51, 25-33.

[65] <https://uwaterloo.ca/centre-advanced-materials-joining/laboratory-facilities-and-equipment/production-equipment/friction-stir-welding-equipment>

[66] <https://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding>

[67] Wang, D., Xiao, B. L., Ni, D. R., & Ma, Z. Y. (2014). Friction stir welding of discontinuously reinforced aluminum matrix composites: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27(5), 816-824.

[70] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, 2007

[71] <https://www.kikukawa.com/en/technology/friction-stir-welding/>