



Friction Stir Welding European Qualifications

Operador



Cofinanciado pelo
Programa Erasmus+
da União Europeia

1. Noções Básicas de SFL

1.1 – Introdução ao SFL

1.1 – Introdução ao SFL

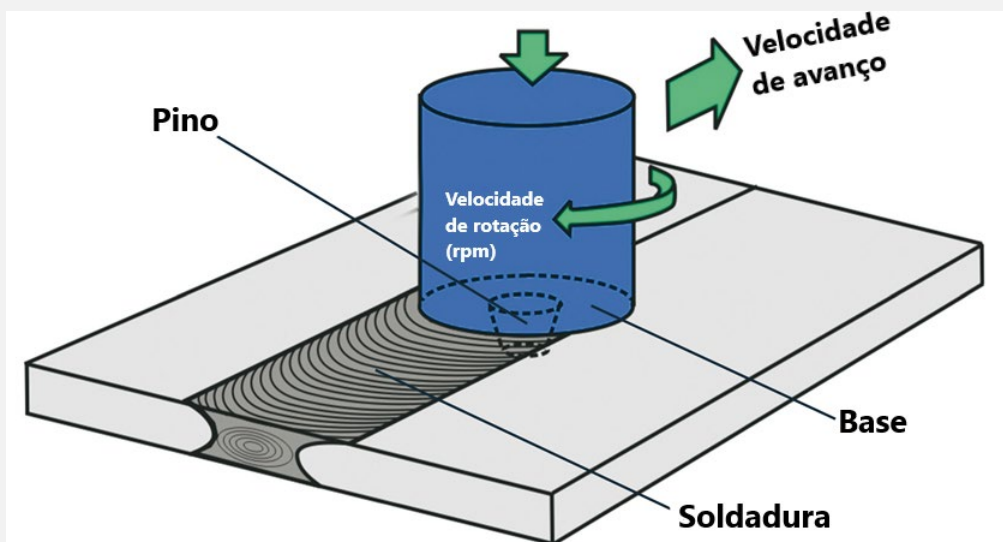
Soldadura por Fricção linear (SFL)

- 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 se movimenta ao longo da soldadura.

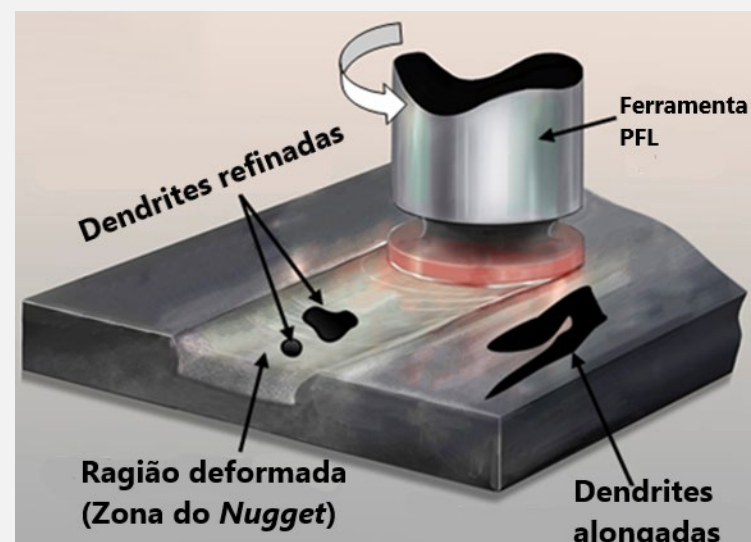
Processamento por Fricção Linear (PFL)

- 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 movimenta-se para a frente e para trás mudando as propriedades do material.

1.1 – Introdução ao SFL

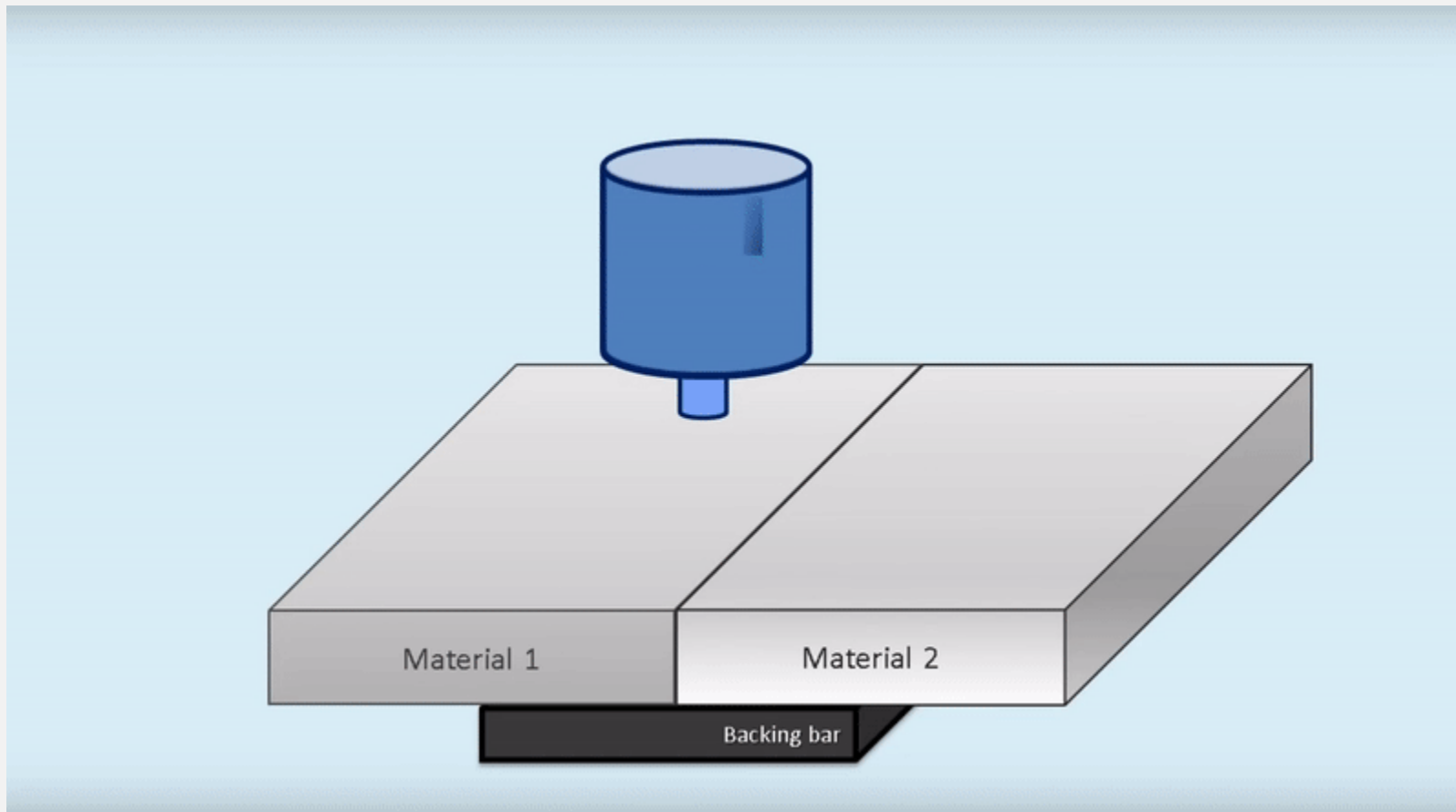


Soldadura por Fricção Linear (SFL)



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)

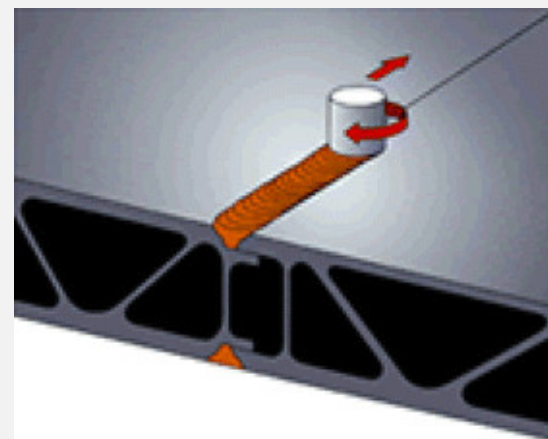
1.1 – Introdução ao SFL

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



Ferroviária – 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

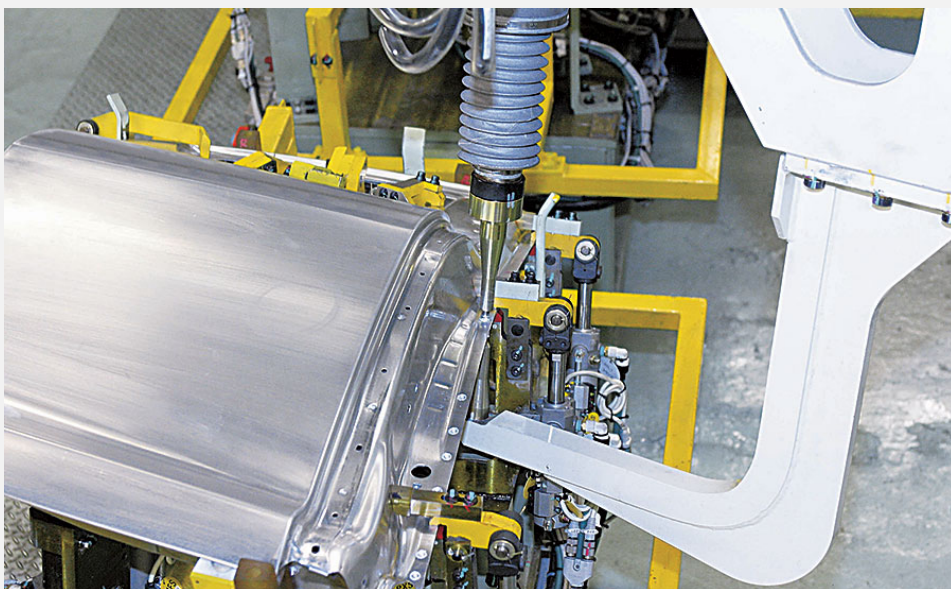


Automóvel – fabrico de rodas.



SFL robótico do painel do corpo de um carro

1.1 – Introdução ao SFL



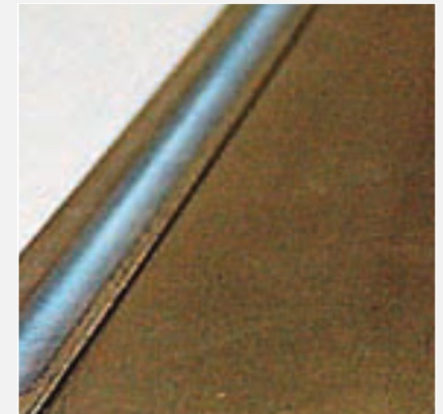
Soldadura por fricção linear por pontos



**Estrutura frontal híbrida
de aço e alumínio**

Ligação de metais dissimilares

1.1 – Introdução ao SFL



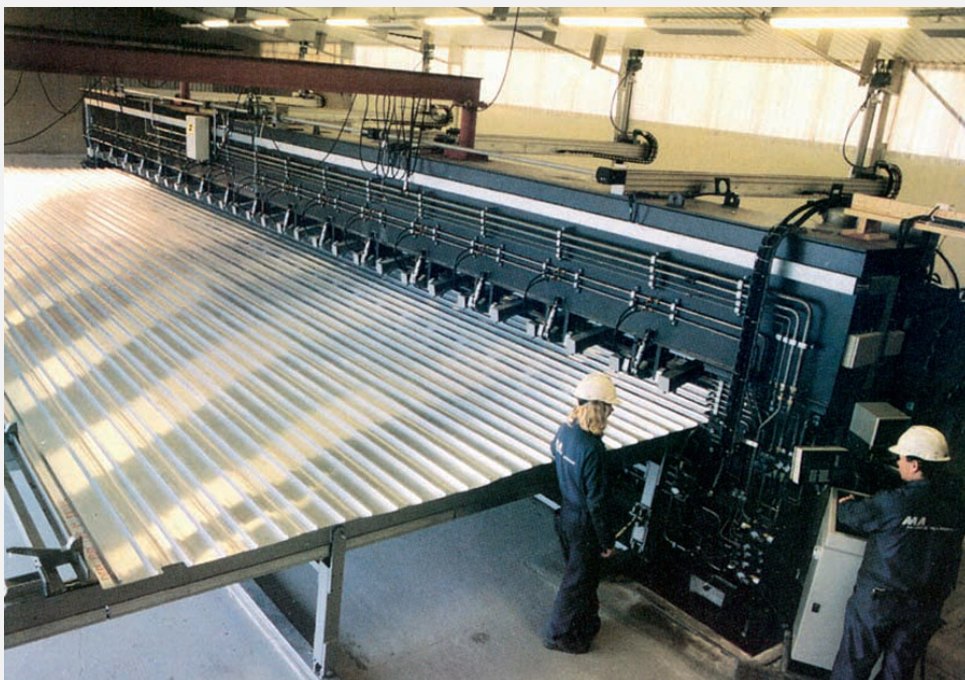
Potenciais aplicações automóveis para soldadura por fricção linear: soldadura dissimilar com duas espessuras diferentes, soldadura de selagem em dobra e junta sobreposta.

1.1 – Introdução ao SFL

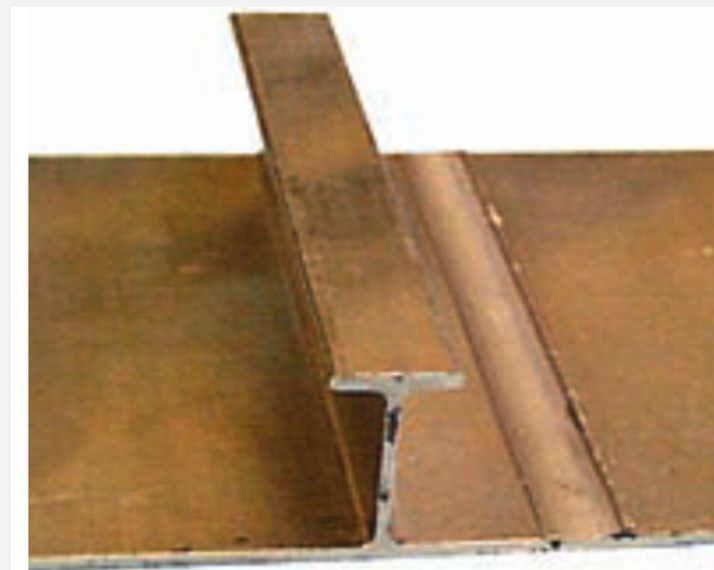
O Processo de Soldadura por Fricção Linear para Construção Naval pode ser utilizado para:

- 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

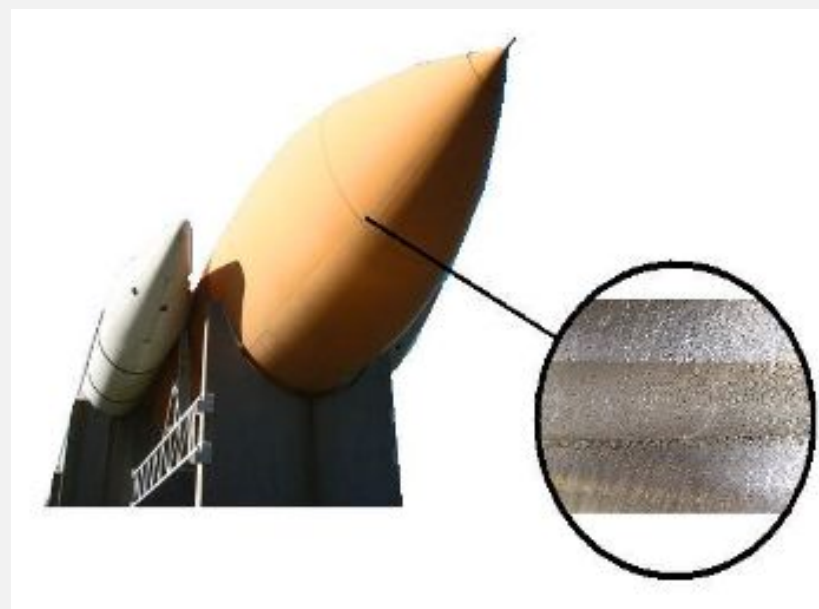
O processo de Soldadura por Fricção Linear no **ramo Aeroespacial** pode ser utilizada para :

- 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

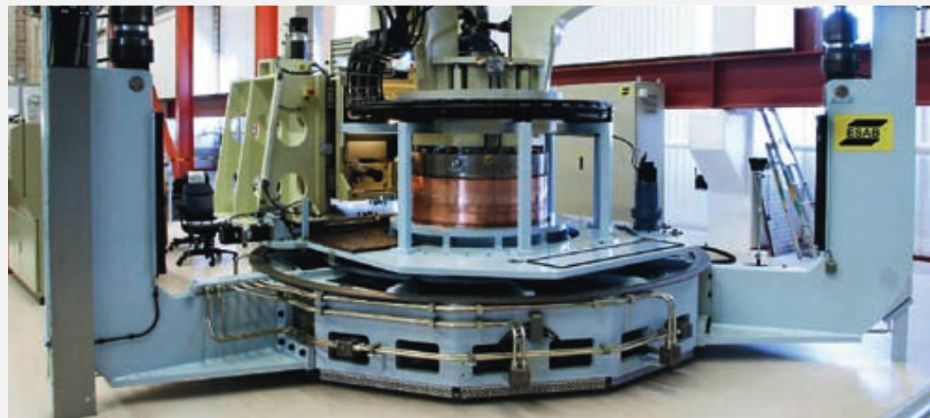
O processo de Soldadura por Fricção Linear pode também ser utilizado para:

- 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

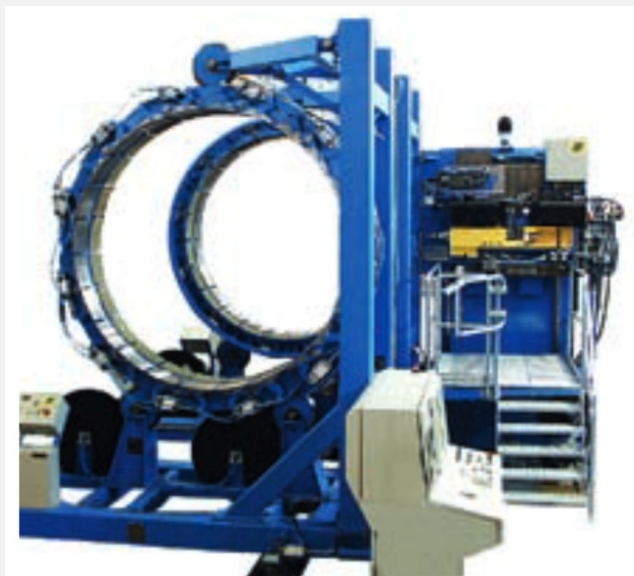


1.1 – Introdução ao SFL

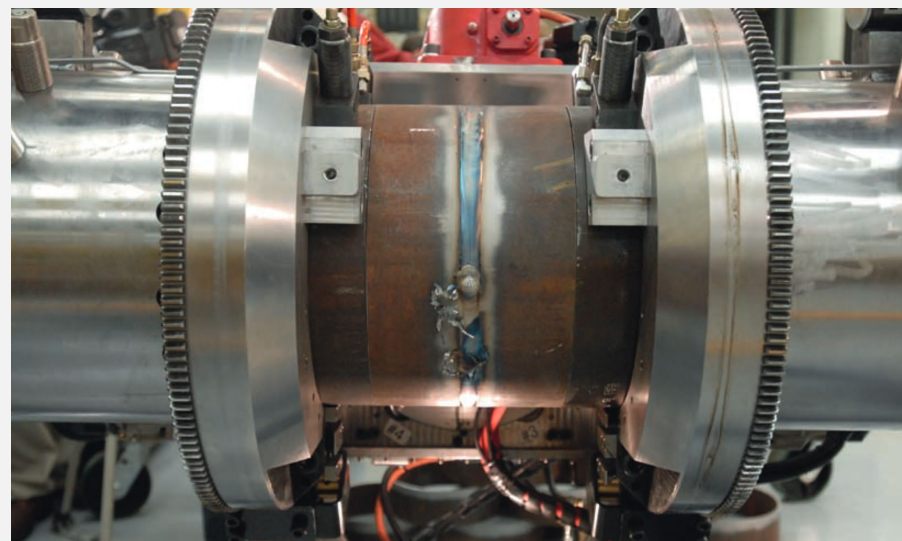


Indústria nuclear – Cilindro de cobre com inserção de ferro fundido, soldado por SFL, para combustível nuclear

1.1 – Introdução ao SFL



Máquina de soldadura circumferencial



Soldadura por Fricção Linear Orbital de tubo de aço

1.1 – Introdução ao SFL



1.1 – Introdução ao SFL



Superfície com o furo de saída preenchido

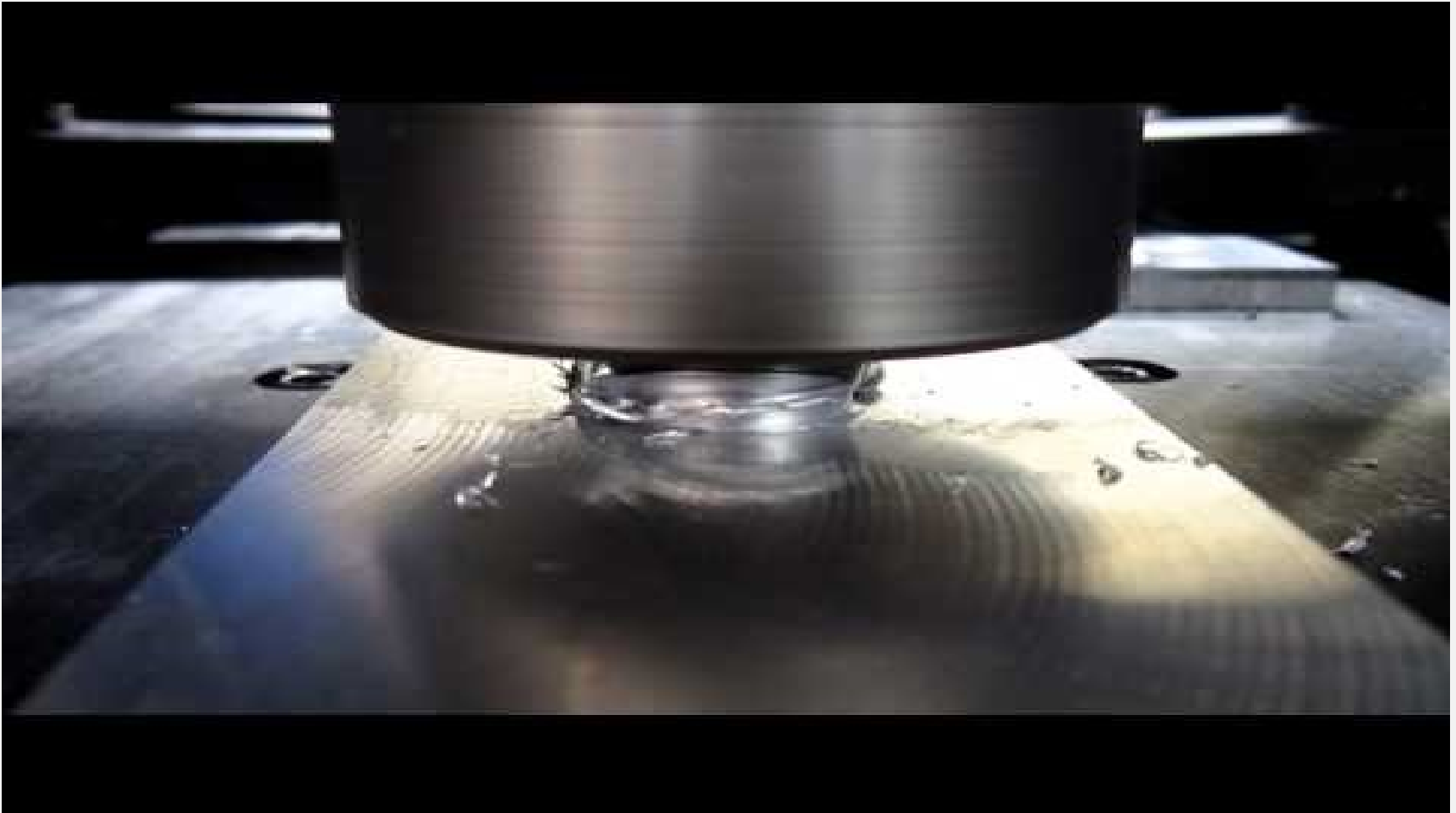


Furos de saída do SFL Tandem

1.1 – Introdução ao SFL



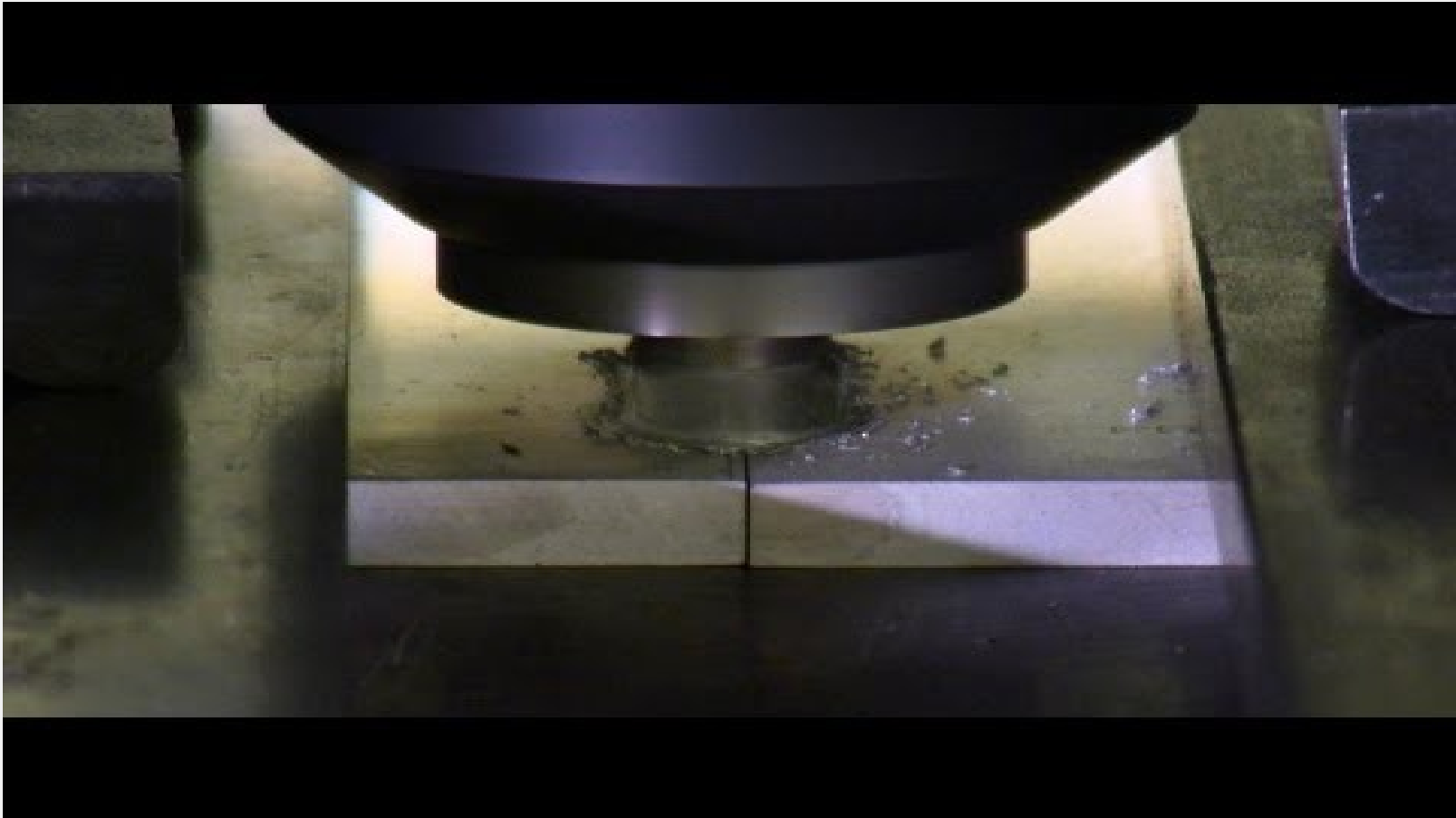
1.1 – Introdução ao SFL



1.1 – Introdução ao SFL

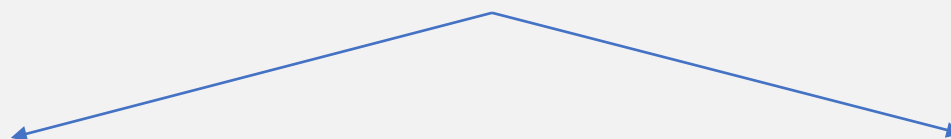


1.1 – Introdução ao SFL



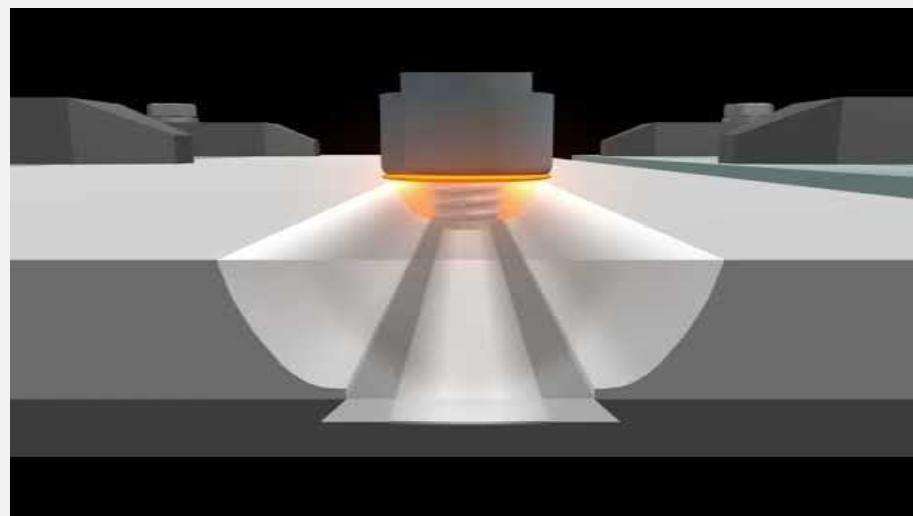
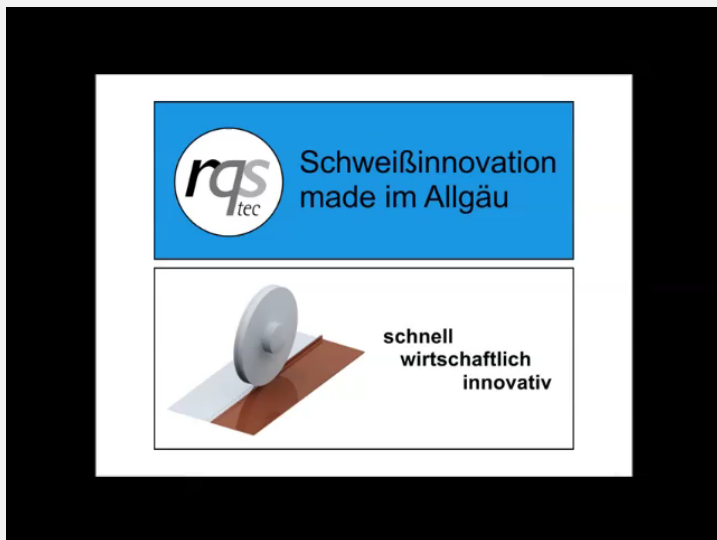
1.1 – Introdução ao SFL

Desenvolvido com base na soldadura por fricção linear



Soldadura por fricção por esmagamento

Soldadura por fricção linear *Dovetailing*



1. Noções Básicas de SFL

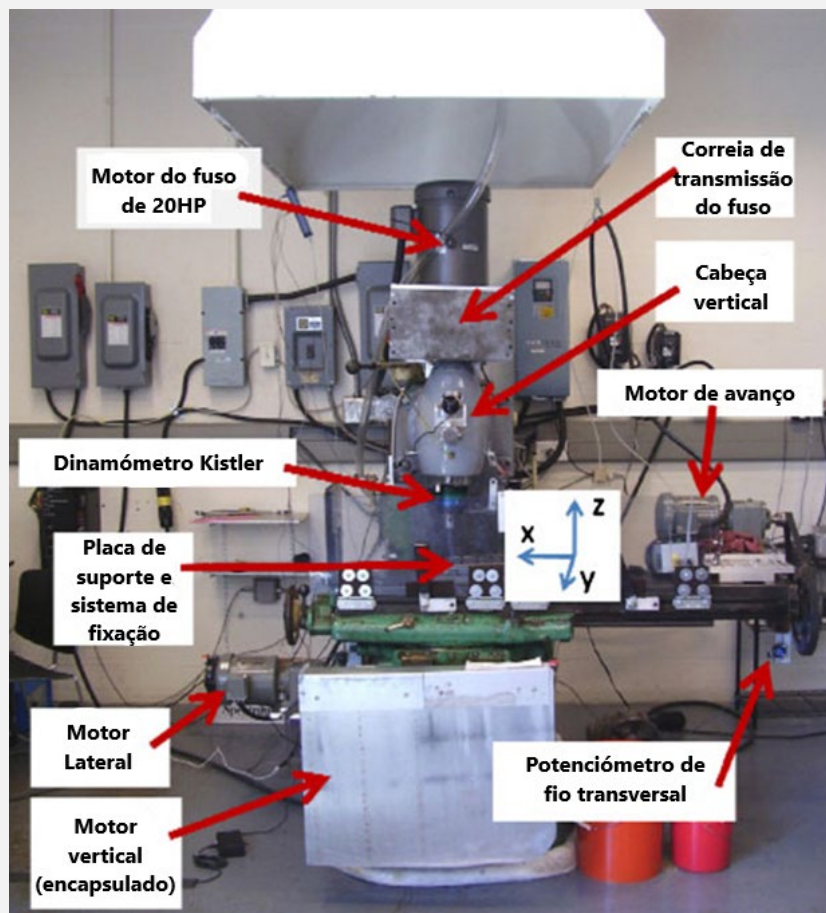
1.2 – Equipamento de soldadura

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

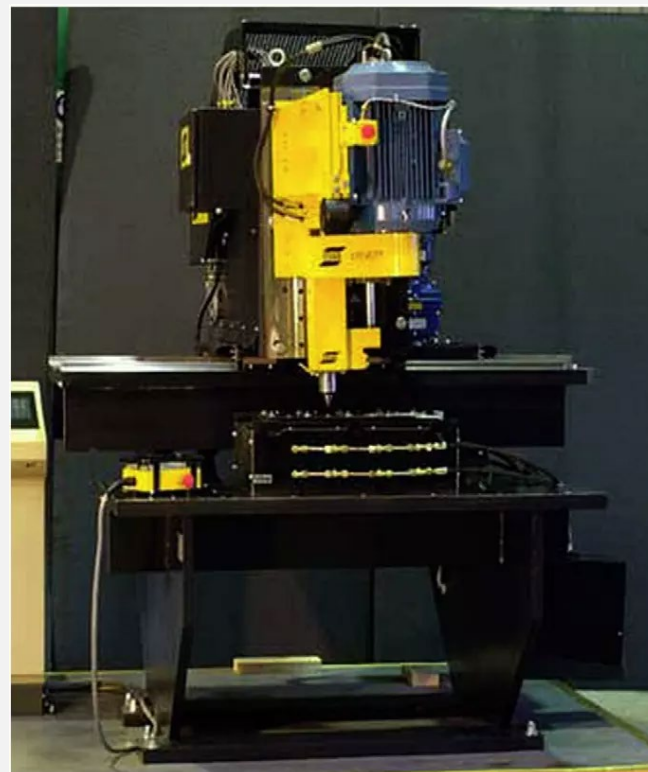


1.2 – Equipamento de soldadura

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

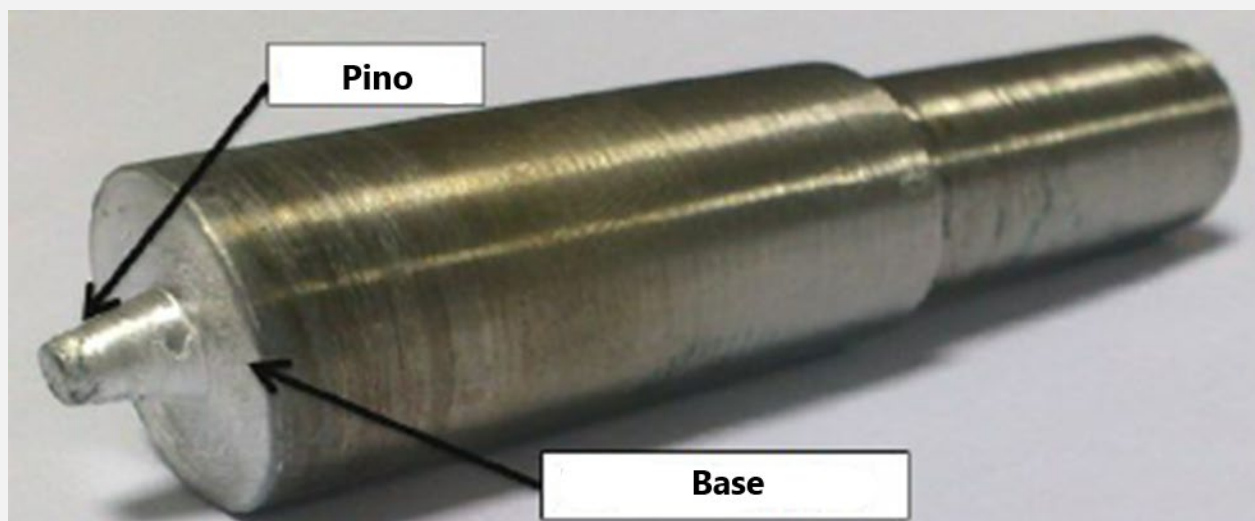
Máquina SFL dedicada



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



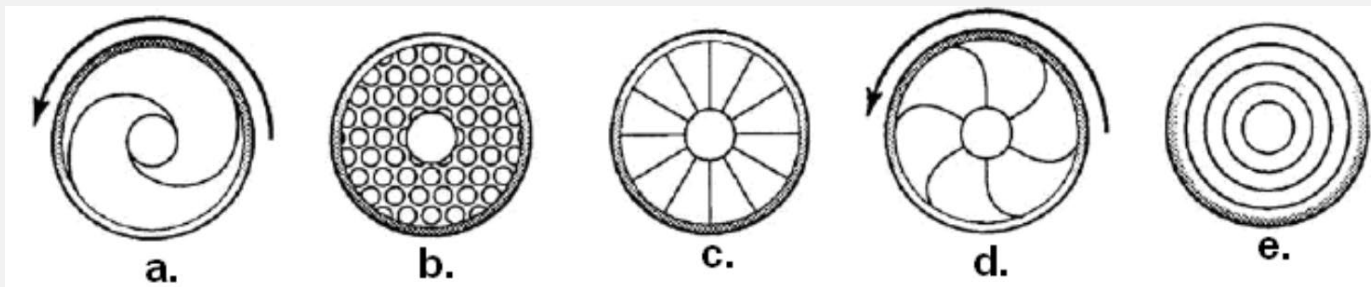
Exemplo da geometria da ferramenta

1.2 – Equipamento de soldadura



Diferentes tipos de geometrias dos pinos

1.2 – Equipamento de soldadura



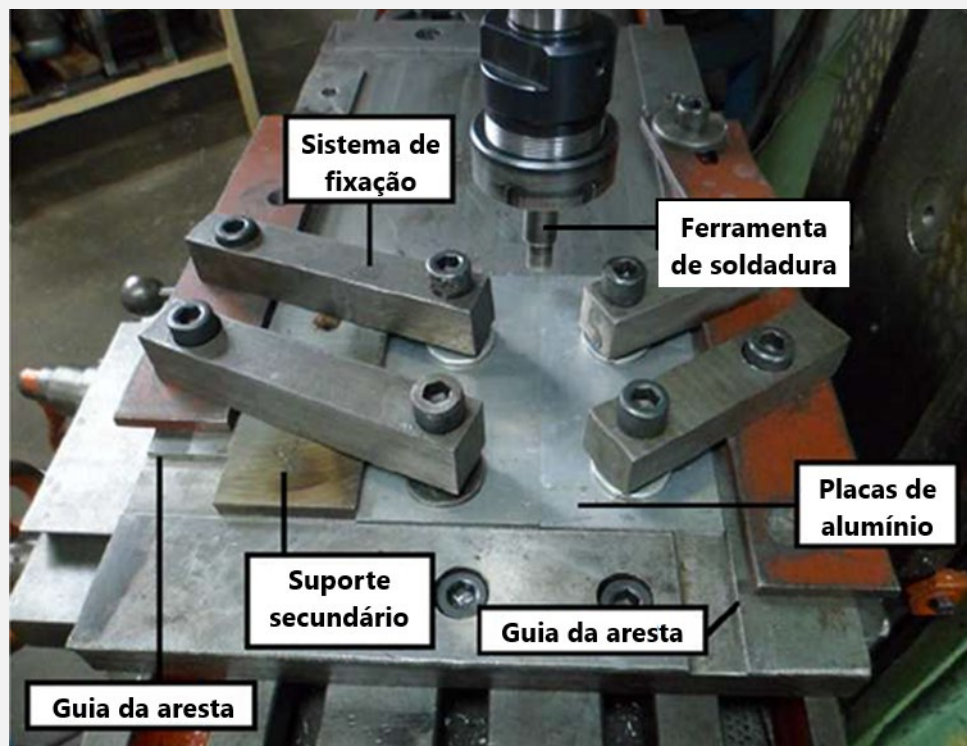
Diferentes tipos de bases (acima) e exemplo de uma base convexo e com estrias (baixo)

1.2 – Equipamento de soldadura

Possíveis sistemas de fixação incluem:

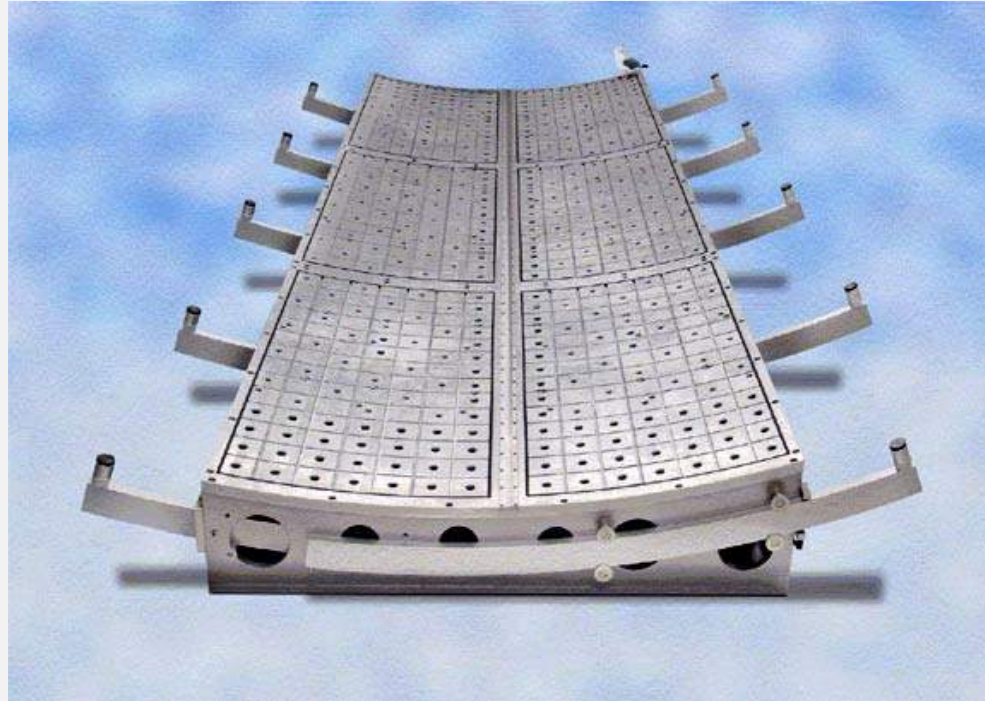
- Garras de fixação
- Sistemas hidráulicos e pneumáticos
- Sistemas de fixação por vácuo

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
- CO₂ 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

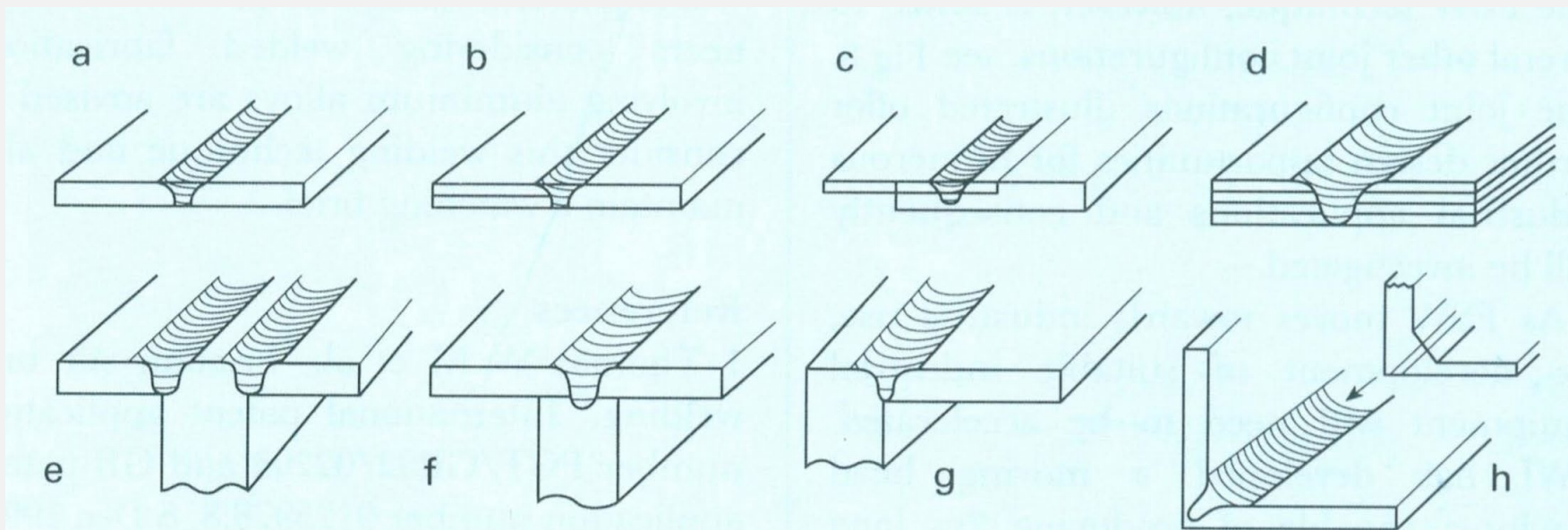
1.3 – Processos de soldadura

1.3 – Processos de soldadura

Implicações no Design do SFL:

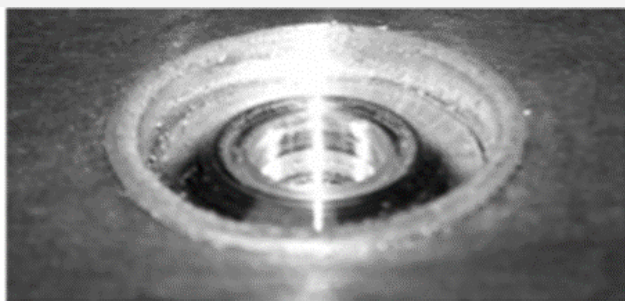
- Limitações mecânicas
- Limitações de fixação
- Limitações no design da junta
- Limitações do furo de saída “*Keyhole*”
- Limitações da espessura do componente de trabalho e material base
- Material

1.3 – Processos de soldadura

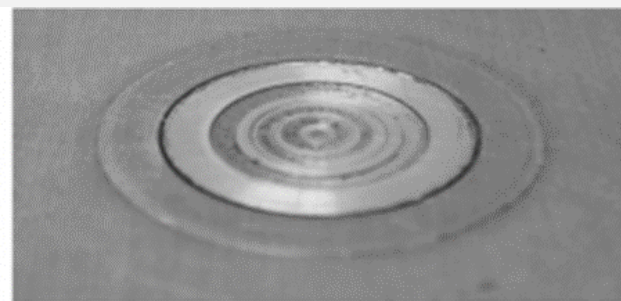


Configurações de juntas possíveis: topo-a-topo bordos rectos; (b) e (c) junta sobreposta; (d) junta sobreposta com multiplas chapas; (e) junto topo-a-topo em T (f) junta sobreposta em T (g) topo-a-topo em aresta (h) junta de canto

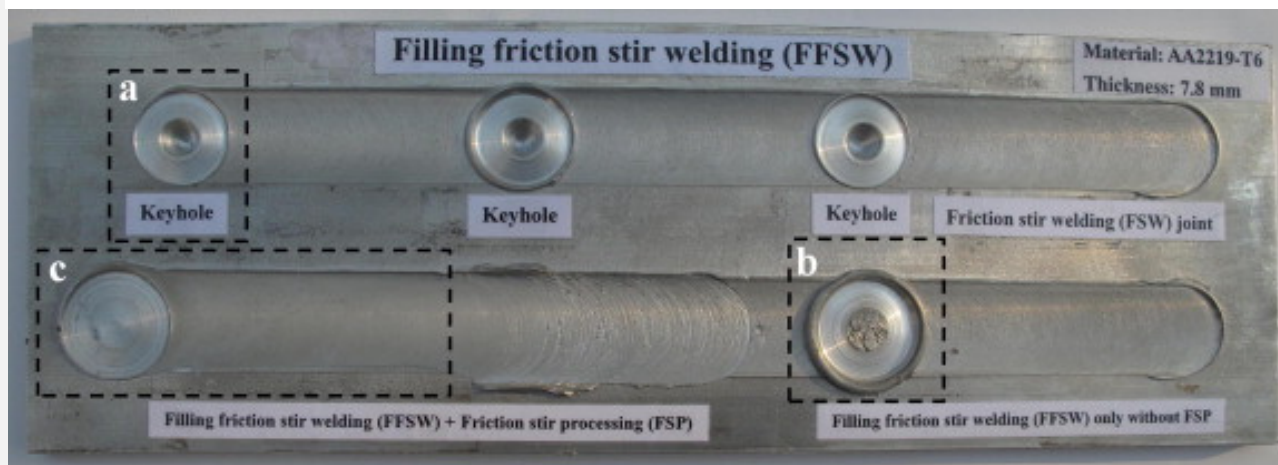
1.3 – Processos de soldadura



(a) Soldadura por fricção linear por ponto convencional

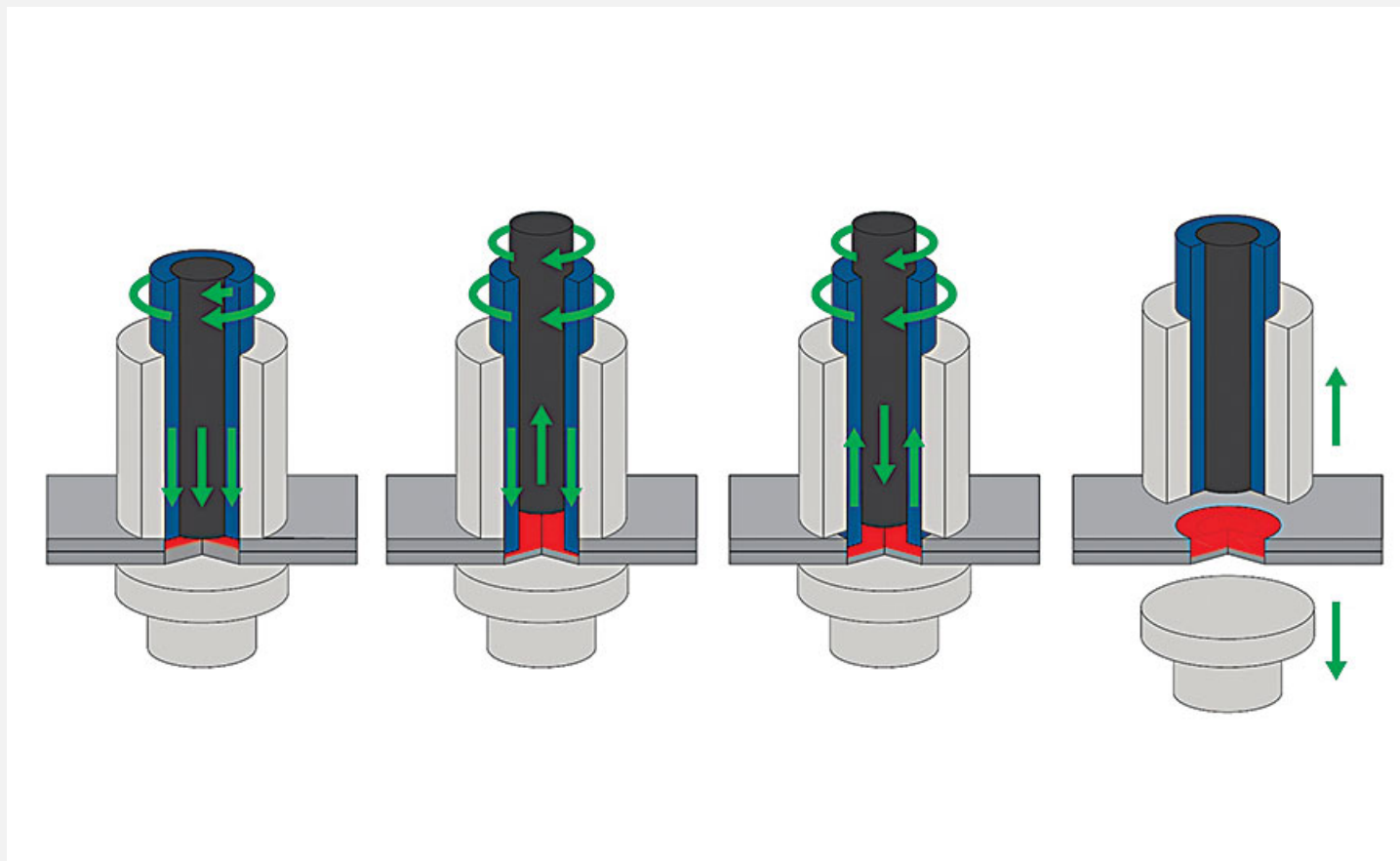


(b) Soldadura por fricção linear por pontos com enchimento



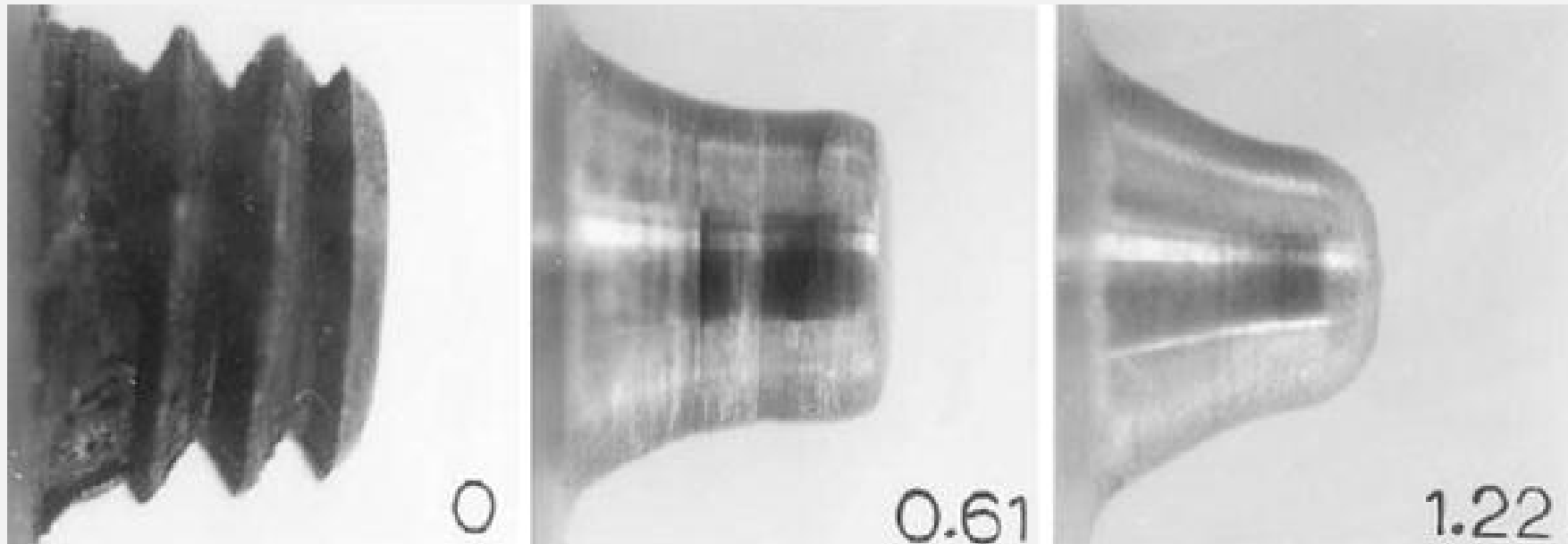
Preenchimento do furo de saída “keyhole”

1.3 – Processos de soldadura



Processo SFL com enchimento

1.3 – Processos de soldadura



Desgaste da ferramenta

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

Referências

Slide:

[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_processing

[4] 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

[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>

[28] 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.

[28] https://www.researchgate.net/figure/Tandem-twin-stirTM-lead-and-follow-exit-holes_fig4_228600743

[36] 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.

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

[39] https://www.asiamachinery.net/supplier/product_details.asp?ProID=13282&SupID=7312

[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.

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

[42] [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.

[43] 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

Referências

Slide:

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

[45] 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.

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

[48] https://www.aerospace-technology.com/contractors/sub_contract/horst/attachment/horst3/

[54] 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.

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

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

[56] 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.

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