



Friction Stir Welding European Qualifications

UC11 – Implementação do Sistema SFL

Engenheiro SFL



Cofinanciado pelo
Programa Erasmus+
da União Europeia

11. Implementação do Sistema SFL

11.1 Custos

11.2 Requisitos da Instalação de um Sistema SFL

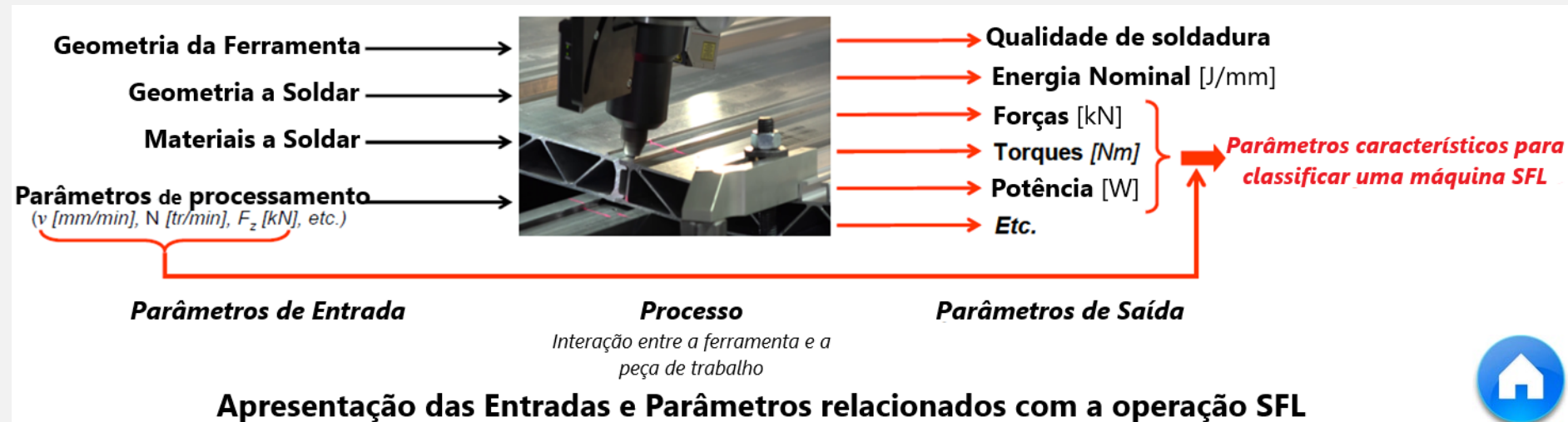
11.3 Operações de Pós Processamento

11.2 Referências

11.1 Equipamento SFL

Três tipos de máquinas são referidos na literatura como viáveis para executar o SFL. Essas máquinas são:

- [Máquinas Ferramentas Convencionais](#) como fresadoras;
- [Máquinas SFL Dedicadas](#) ou máquina feitas à medida;
- [Robôs Industriais](#).



11.1.1 Máquinas SFL Convencionais

- O processo SFL é semelhante em termos de princípio de operação do equipamento, como outros processos de fabrico, como maquinagem, rebarbadora, retificadora ou furação. Assim, uma **máquina convencional**, como uma fresadora, pode ser utilizada para executar o SFL de peças finas de ligas de alumínio.
- **As cargas envolvidas no FSW são maiores que as cargas geradas no processo de fresagem.**
- Por esse motivo, as máquinas-ferramentas convencionais precisam ser reforçadas para aumentar a sua **capacidade de carga e rigidez.**



11.1.2 Máquinas SFL Dedicadas

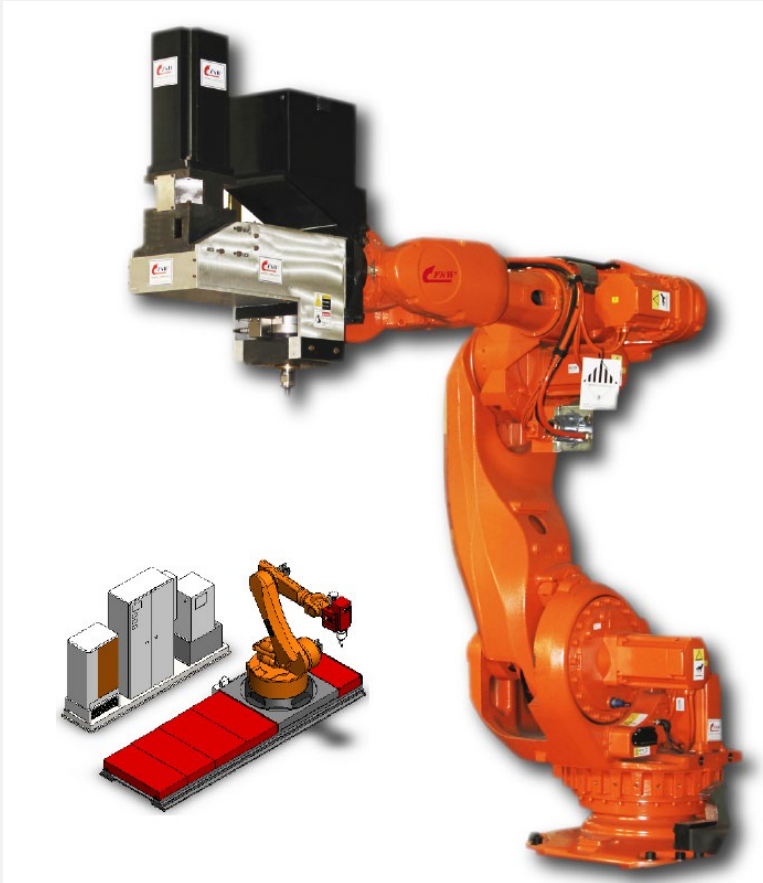
- Tipicamente, as máquinas dedicadas de SFL tendem a ter a **maior capacidade de carga, rigidez, precisão e disponibilidade** [23].
- Normalmente, as máquinas dedicadas da FSW são relativamente caras e o **seu custo aumenta com a capacidade de flexibilidade**.
- A utilização de máquinas SFL dedicadas é recomendada para a produção de soldaduras de grandes séries de peças espessas/finas em aplicações nas quais:
 - alta rigidez é necessária;
 - aplicações de eixo único ou multi-eixo;
 - cordões longos de soldadura.



Máquinas SFL dedicadas



11.1.3 Robôs Industriais



Equipamento SFL e Sistemas de Controlo [12]

Classificação

Sistema SFL Robotizado Geral
Sistema SFL por Pontos Robotizado
Sistema SFL *Bobbin* (i.e. com ferramenta de base dupla) Robotizada
Sistema SFL *Bobbin* Flutuante Robotizada
Sistema SFL com base Estacionária Robotizadas

- Maior processamento de soldadura automatizada
- Estrutura mais complexas, e.g. 2D, 3D.
- Modelos de multicontrolos, e.g. modelos de controlo de pressão, posição e torção
- Maior qualidade com menor deformação da junta
- Maior estabilidade



Sistema Robotizado SFL com duas estações de soldadura para poder simultaneamente soldar e carregar/descarregar componentes



- | | |
|---|--|
| A) Sistema de controlo e processamento HMI | D) Estação de soldadura 2 |
| B) Cabeça de soldadura SFL com Ferramenta SFL | E) Robô industrial |
| C) Estação de soldadura 1 | F) Invólucro de segurança com sistema de fecho automáticos |

Parâmetros de Soldadura de um Sistema Robotizado SFL

Velocidade de soldadura – até 2000mm/min

Profundidade de Soldadura – até 10mm

Força axial do processo – Até 10kN

Forças radiais do processo – até 5kN

Rotação do fuso – até 10000min⁻¹

As **soluções robotizadas** estão disponíveis em duas categorias básicas [23]:

- **Braços robotizados articulados**
- **Robôs cinemáticos paralelos**

Os braços robotizados articulados apresentam elevada **repetibilidade** e **flexibilidade**, mas **baixa precisão** que piora quando estão sujeitos a altas cargas.

Comparando robôs articulados a máquinas SFLW dedicadas, esses robôs apresentam **maior flexibilidade** e **capacidade de tomada de decisão**, além do fato de terem um custo consideravelmente menor. No entanto, esses tipos de robôs têm uma **rigidez** relativamente **baixa** e **capacidade de carga moderada**, o que limita sua aplicação.

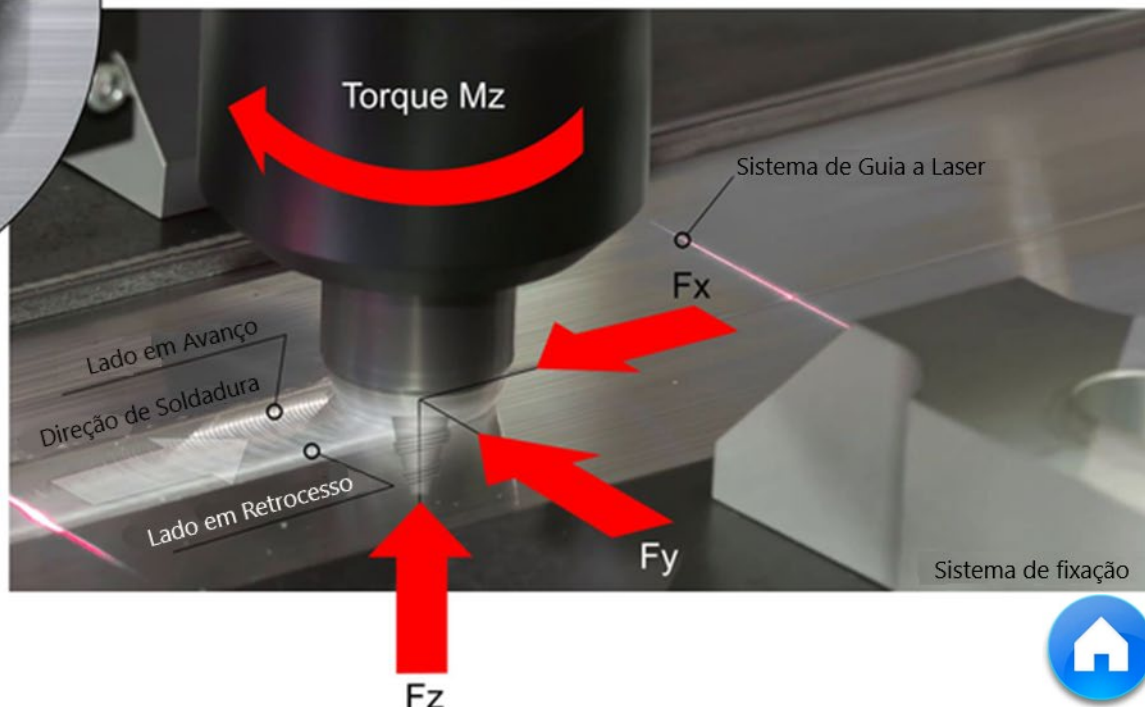
11.1.4 Capacidade da força do equipamento



Um desafio importante na SFL é ter uma máquina capaz de **suportar as elevadas cargas** geradas durante o processo de soldadura, o que depende muito do **tipo de material** e da **espessura** das peças de trabalho.

As **cargas mais relevantes** a atuar na máquina SFL:

1. a força axial (F_z),
2. a força transversal (F_x),
3. a força lateral (F_y),
4. o torque (M_z).



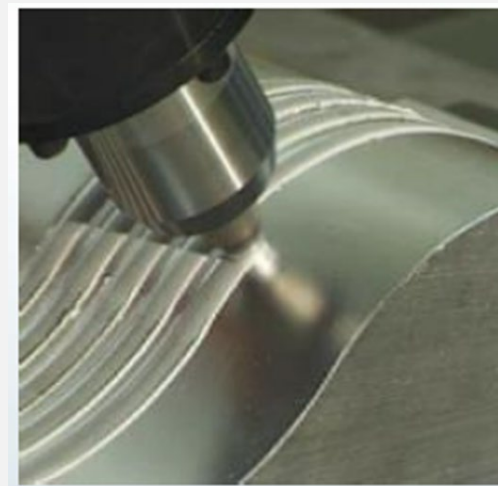
Capacidade de força

Força Axial (F_z)	Força Lateral (F_y)	Força Transversal (F_x)	Torque (M_z)
<p>A força axial é um dos principais parâmetros do processo. Assegura o atrito entre a ferramenta SFL e as peças de trabalho e também a pressão de forjamento necessária para obter uma soldadura sã. O calor produzido no processo SFL depende diretamente da força axial.</p>	<p>A força lateral (força radial) resulta da assimetria das forças FSW causada pela rotação da ferramenta.</p> <p>O lado avançado é mais macio e, portanto, menos resistente. Esta força é orientada do lado em retrocesso para o lado em avanço da soldadura.</p>	<p>A força transversal é produzida pela resistência do material ao movimento da ferramenta ao longo da linha de ligação (é oposta à direção de soldadura).</p>	<p>O torque é a manutenção da força de atrito entre a ferramenta SFL e a peça de trabalho, garantindo o processamento do material e a formação do <i>nugget</i>.</p>



11.1.5 Sistema de controlo

- Todas as máquinas são controladas utilizando a mais recente tecnologia CLP (Controlador Lógico Programável) e unidades de alta precisão. Isto permite que a posição e a velocidade dos eixos da máquina sejam controladas de maneira delicada e precisa.
- O controle do eixo Z funciona tanto em modo de controlo por posição ou por força.
- A interface HMI por touch-screen foi projetada especificamente para o SFL. É a interface para configurar os parâmetros do processo, o caminho de soldadura e os parâmetros mais comuns da máquina. Ele também fornece recursos de monitorização dos parâmetros do processo, alarmes e estado do sistema.

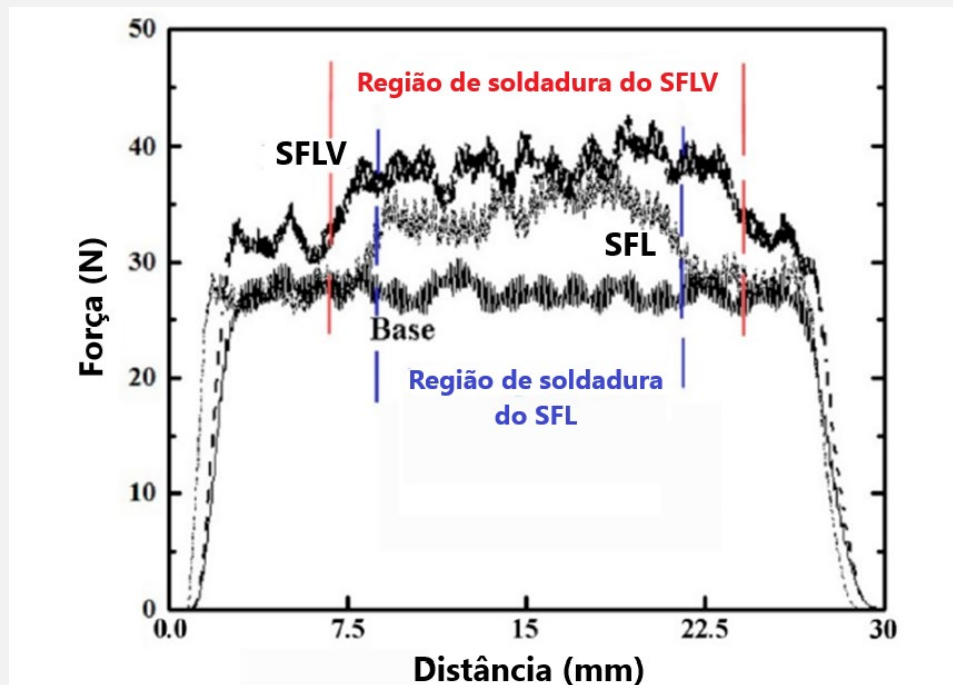
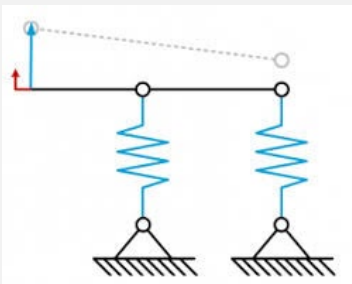


11.1.6 Capacidade de rigidez e precisão

Esta é a capacidade do equipamento SFL para suportar cargas **sem sofrer deformação ou deflexão**.

Quando uma máquina SFL apresenta **baixa rigidez**, a ferramenta FSW desvia-se do caminho de soldadura desejado, **afetando fortemente a qualidade da soldadura**.

Além disso, máquinas de baixa rigidez tendem a causar **vibração excessiva** que, por sua vez, pode levar à instabilidade do processo de SFL.



11.1.7 Capacidade de deteção

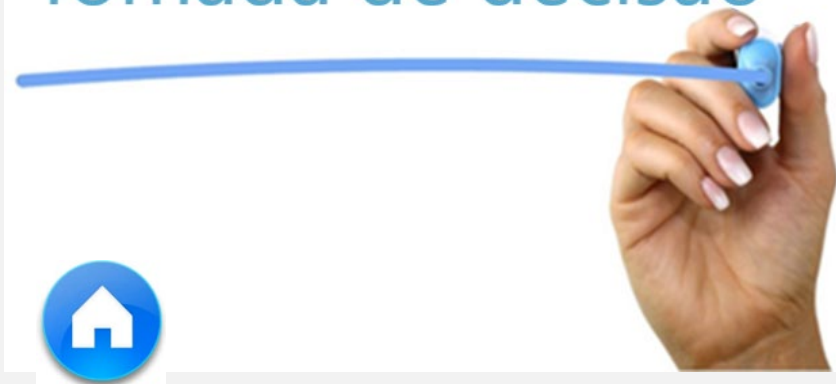
- **A capacidade de deteção** consiste na **capacidade da máquina** de estar ciente de **alguns fenômenos que ocorrem na junta de soldadura**, ou seja, valores das **variáveis de soldadura direta e indireta** envolvidas no processo de SFL que refletem a evolução do material e consequente formação de soldadura.
- **variáveis de soldadura direta** os parâmetros de soldadura que podem ser acionados de forma direta (as **velocidades de rotação e transversal**, o **ângulo de ataque** e a **entrega térmica externa**)
- **variáveis indiretas** todas aquelas variáveis que não podem ser acionadas de maneira direta, ou seja dependem de outras variáveis. Este grupo de variáveis é composto pelas cargas envolvidas no processo de soldadura (**força axial, força transversal, força lateral e torque**), a **temperatura** alcançada na zona de soldadura, o **fluxo do material processado** e a **mistura do material processado**.

11.1.8 Capacidade de tomada de decisão

Os métodos de controlo podem ser implementados no sistema de controle do equipamento, a fim de permitir a **auto-adaptação do processo**.

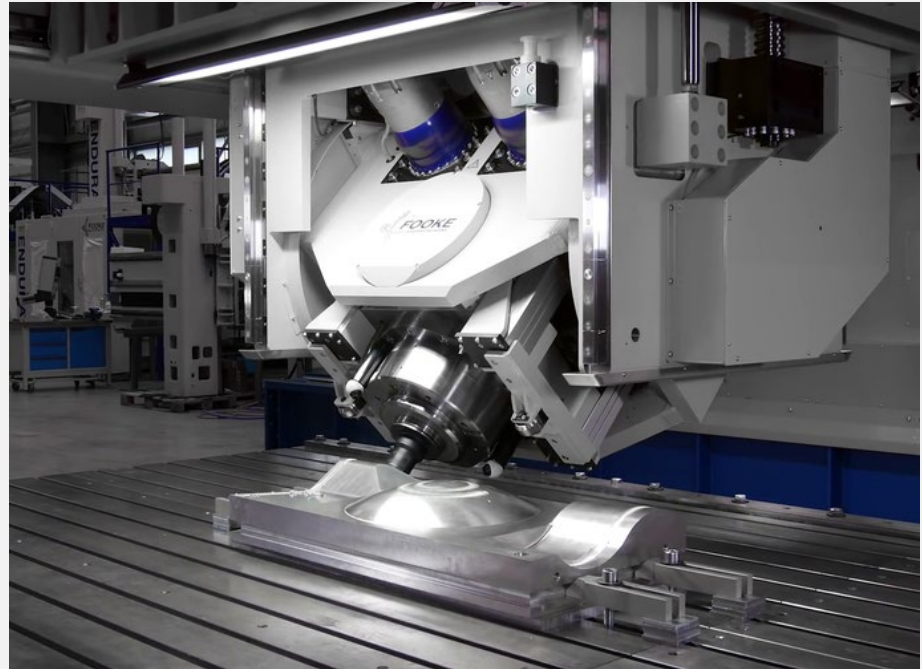
Os dados fornecidos pelos sensores (valores das variáveis diretas e indiretas) são utilizados como **feedback** para o **sistema de controlo**.

Tomada de decisão



11.1.9 Capacidade de flexibilidade

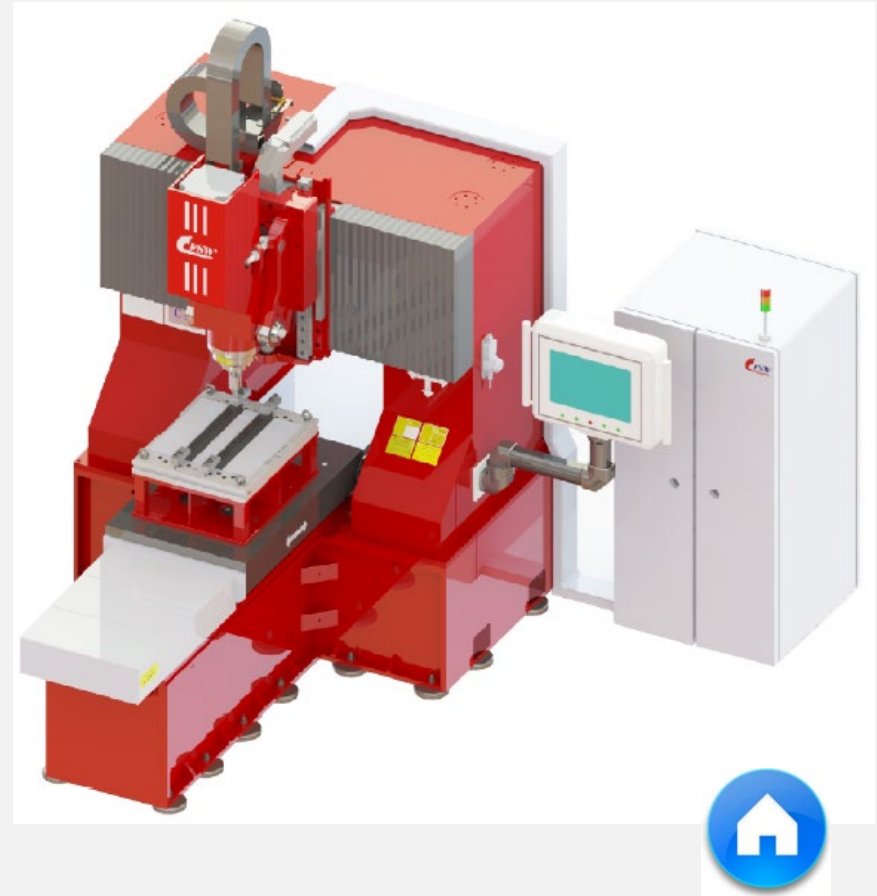
- A flexibilidade de uma máquina limita a complexidade de um caminho de soldadura (linear, curva) que pode ser executado.
- O número de eixos (**graus de liberdade - DOF**) que uma máquina possui normalmente estabelece a flexibilidade da máquina.



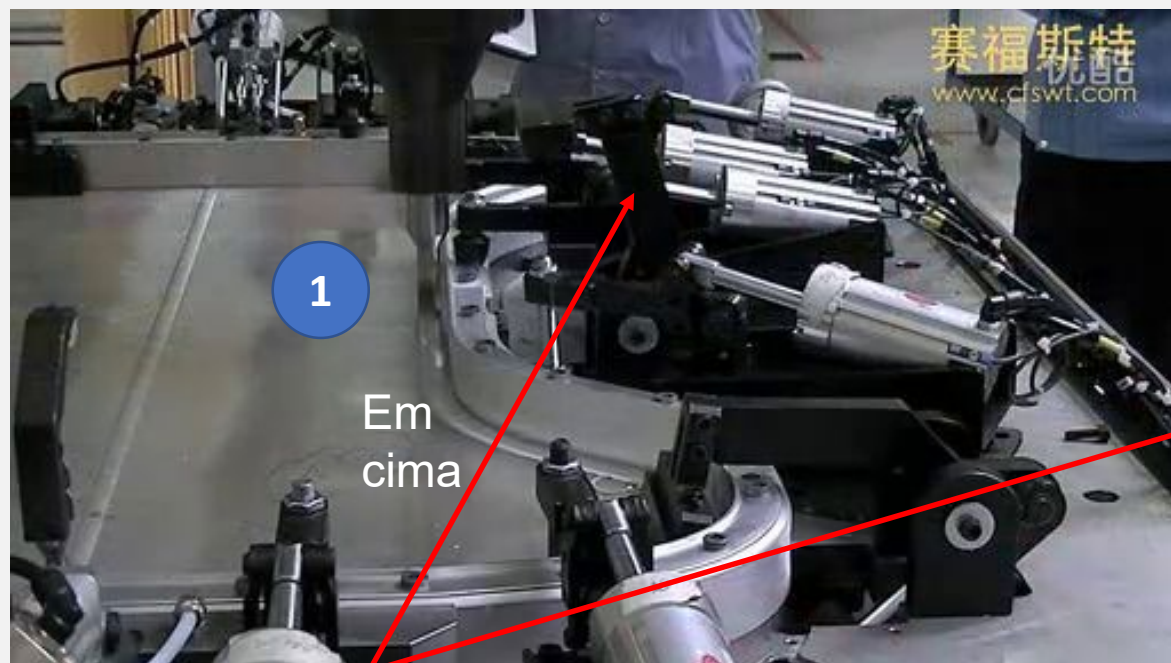
- Um caminho de soldadura tridimensional (3D) é o mais exigente em termos de flexibilidade. Uma máquina para executar o caminho 3D mais simples deve ter pelo menos cinco eixos. Muitas aplicações exigem várias soldaduras em diferentes direções, o que impõe a flexibilidade necessária da máquina.

11.2 Componentes do Equipamento

- Estrutura rígida
- Componentes de movimento resistentes e rápidos
- Sistema avançado de controle de ferramentas (CNC)
- 5 eixos para os caminhos de soldadura 3D
- Sistema de controlo por Força e por Posição
- Sistema para registo e monitorização dos parâmetros de soldadura
- Cabeças SFL com tecnologia de bobina para soldadura de peças mais espessas
- Soluções de rastreamento a laser do cordão
- Monitorização do sistema por vídeo



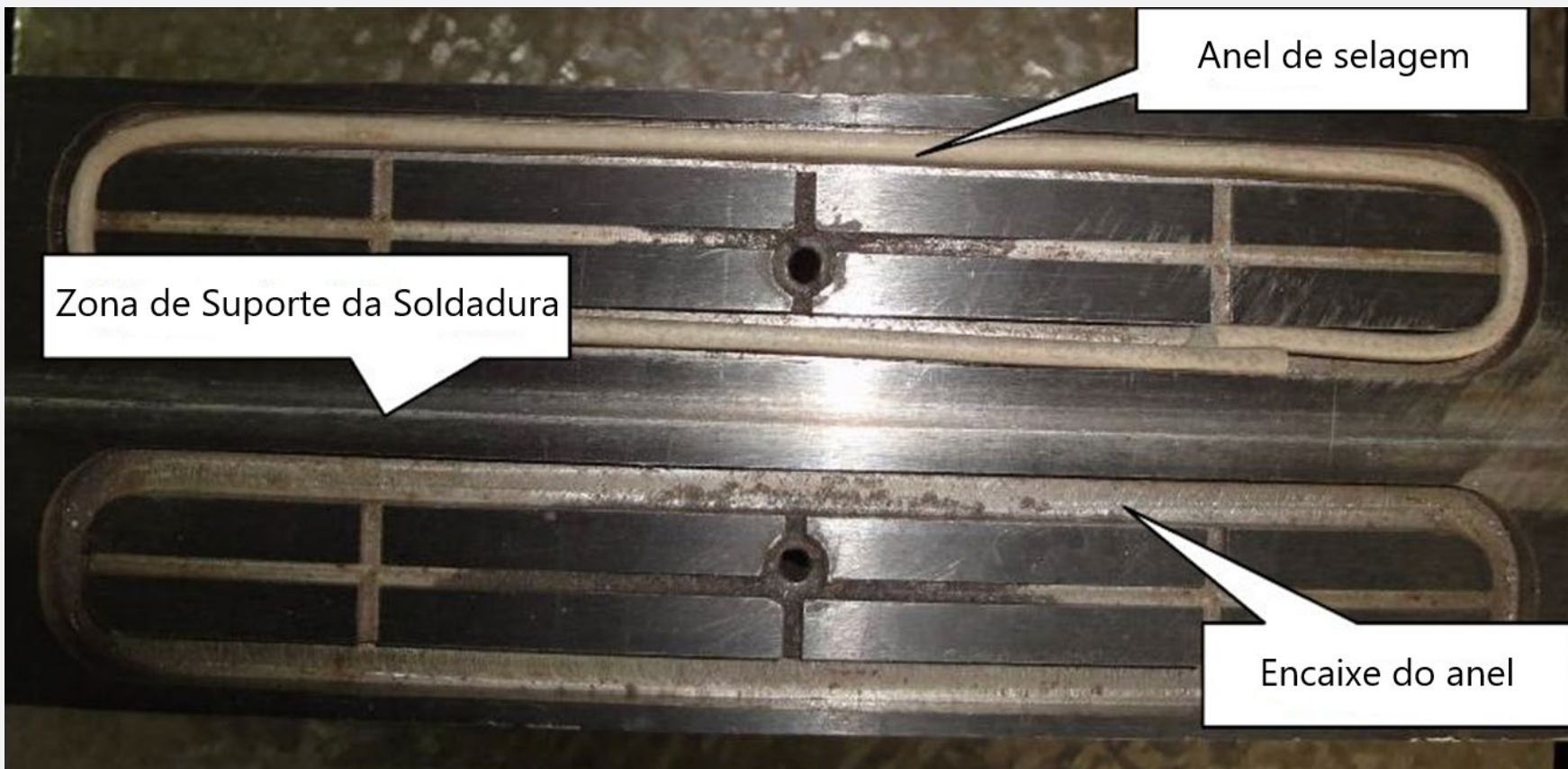
11.3 Sistema de fixação



Sistemas avançados de fixação podem ser controlados individualmente de acordo com a posição da ferramenta. As sapatas de fixação levantam e baixam automaticamente com base na posição da ferramenta SFL. Pode ser feito utilizando sensores de proximidade ou por um programa.

Ação/controlo pneumático do sistema de fixação composto por várias sapatas que garantem a fixação adequada dos componentes.

11.3 Sistema de fixação

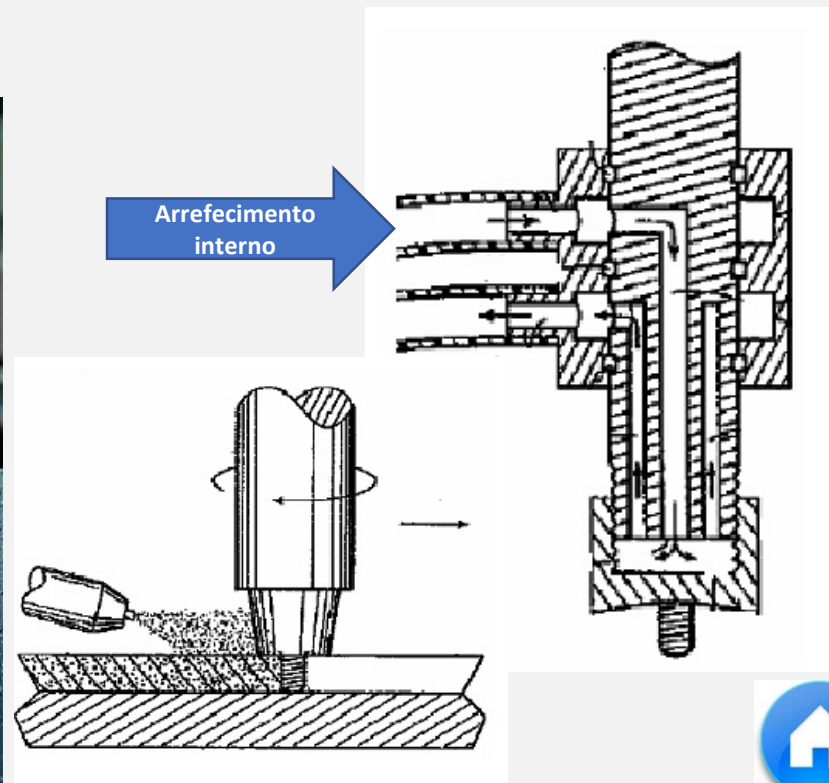
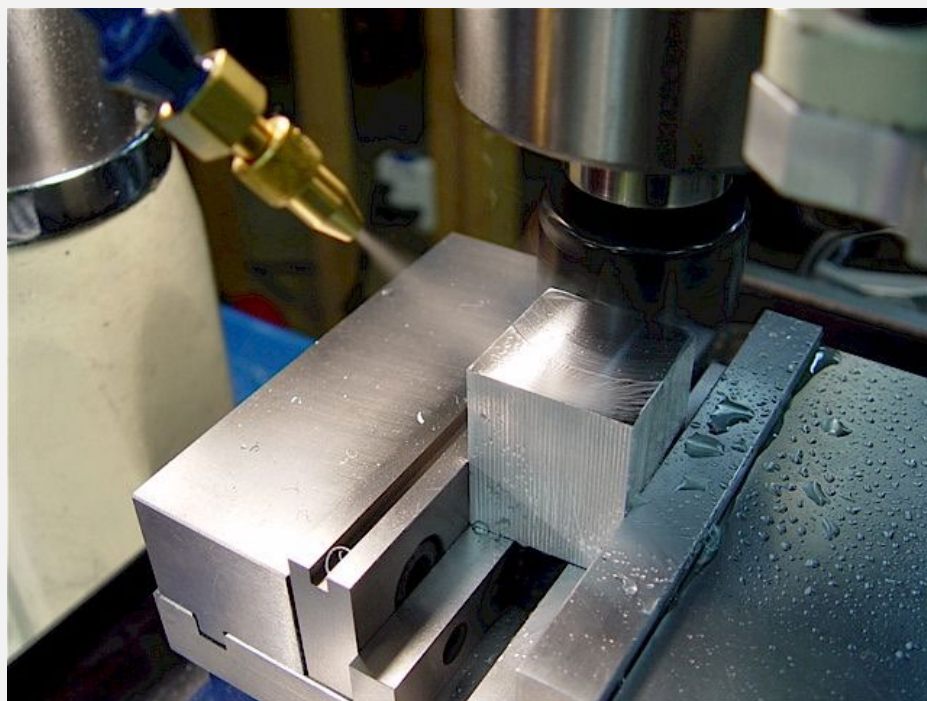


Placa de suporte com adsorção a vácuo

11.4 Sistema de arrefecimento

- uma taxa de arrefecimento de 0,01 Gpm para arrefecimento direto
- uma taxa de arrefecimento de 0,1 Gpm para arrefecimento interno
- ar arrefecido ou gás pulverizado nas aletas

Gpm – galões por minuto
1 Gpm = 3.78 Litros por minuto



11.5 Sistema de rastreamento a laser



11.6 Custos de produção

Em termos de custo esta questão depende do **tamanho** da **máquina SFL**, se considerarmos um pequeno robô que tem uma pequena mesa na qual as amostras serão soldadas, o preço estar à volta dos 100.000 Euros mas se discutirmos sobre equipamentos de grande porte o preço pode chegar a 3-4 milhões de euros.

A seleção de máquinas para SFL deve considerar:

- o tamanho da peça de trabalho,
- o volume de produção,
- forças envolvidas no SFL,
- rigidez do sistema,
- capacidade de precisão,
- capacidade de deteção,
- capacidade de tomada de decisão,
- capacidade de flexibilidade.

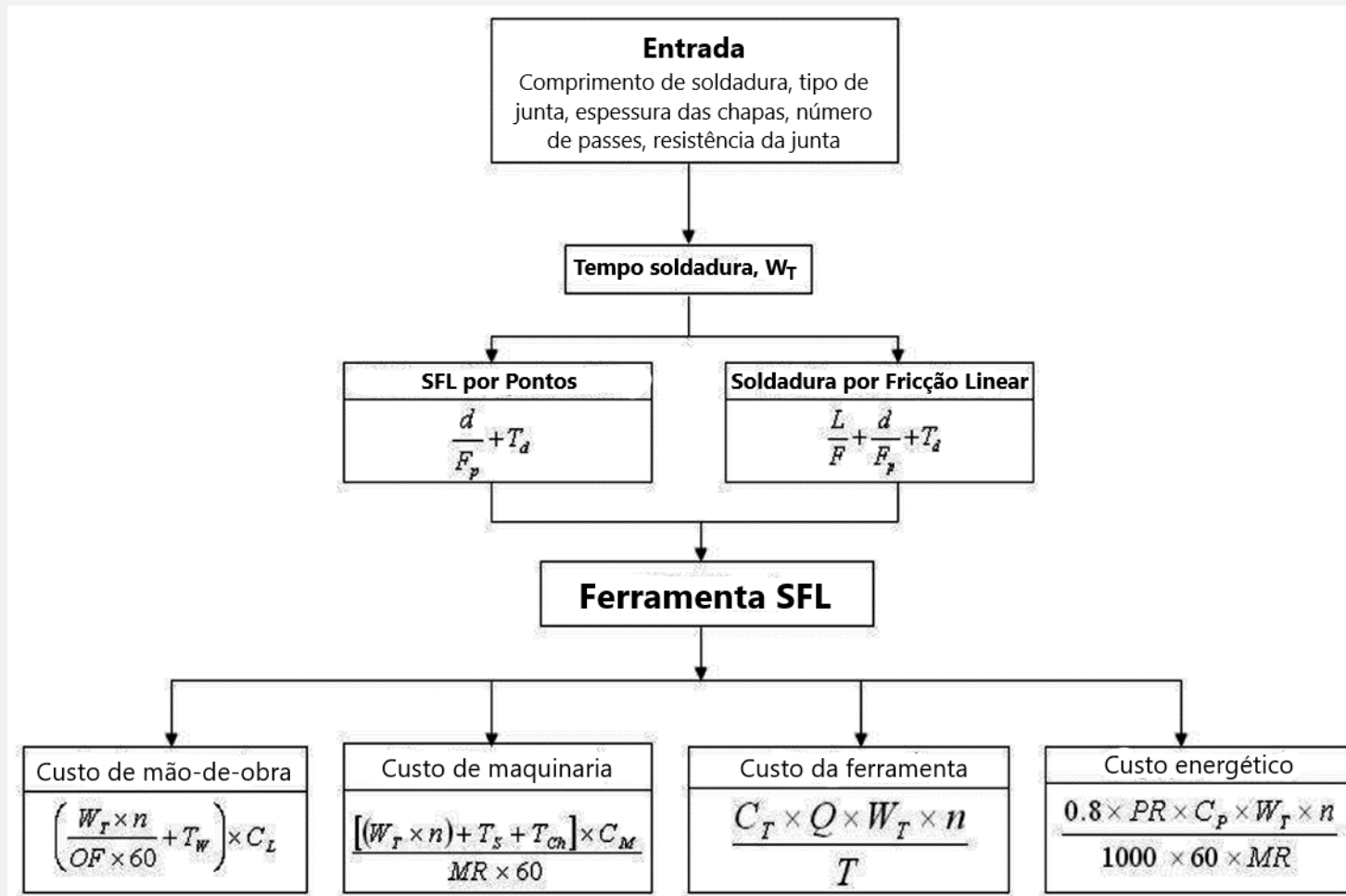
Levar o SFL para o chão de fábrica, no entanto, não é um esforço simples nem isento de riscos. A implementação bem sucedida deste processo em rápida evolução requer:

- Considerável experiência com o processo,
- **um plano de desenvolvimento sólido,**
- equipamento **fiável** e tecnologicamente avançado.

Ponderando cuidadosamente fatores como **limitações de orçamento, restrições de tempo** e o nível de **conhecimento em desenvolvimento de processos** de SFL da sua organização.

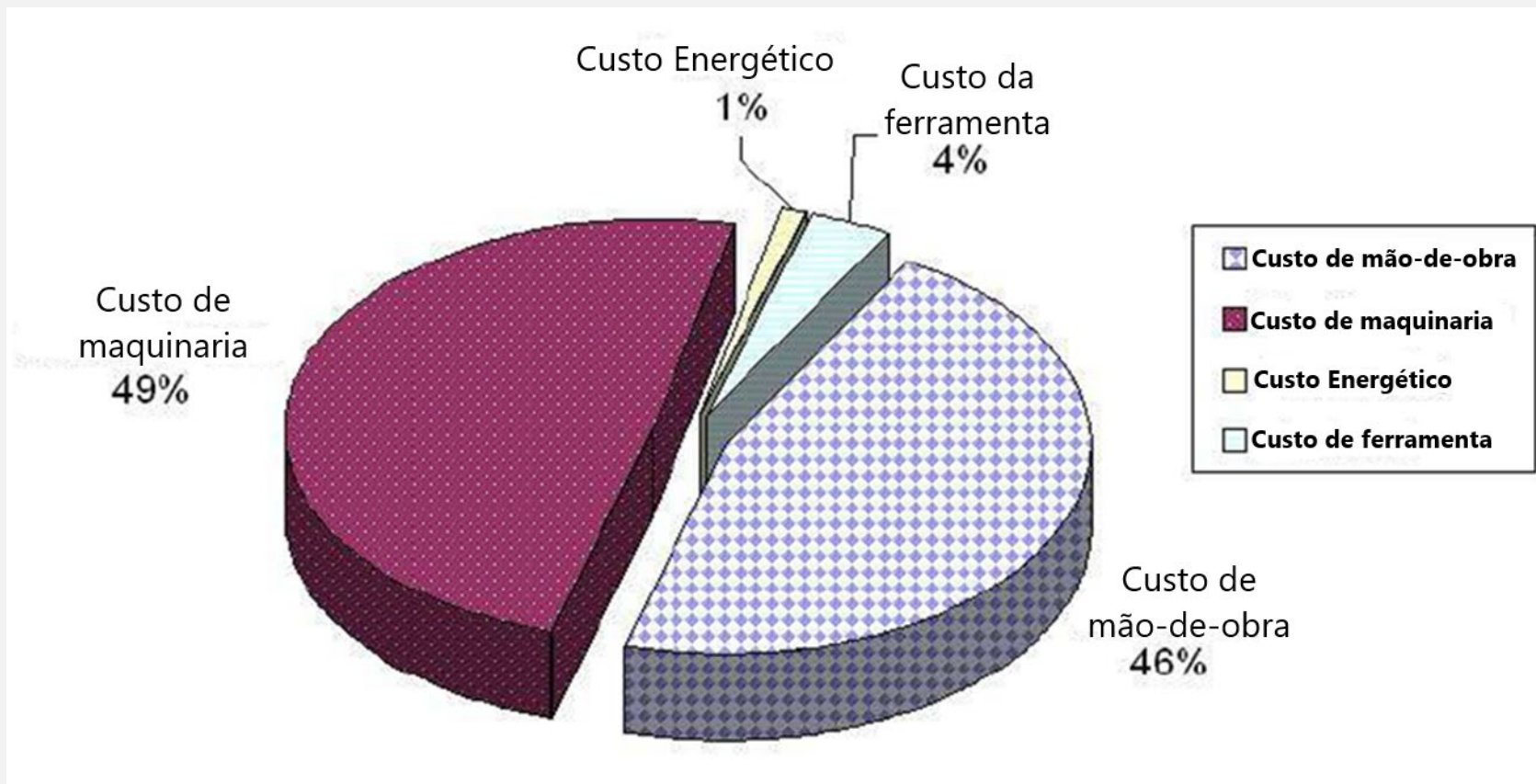


11.6 Custos de produção



Fluxo e vários custo no modelo de custo do SFL [15]





Distribuição das componentes de custo do processo SFL [15].



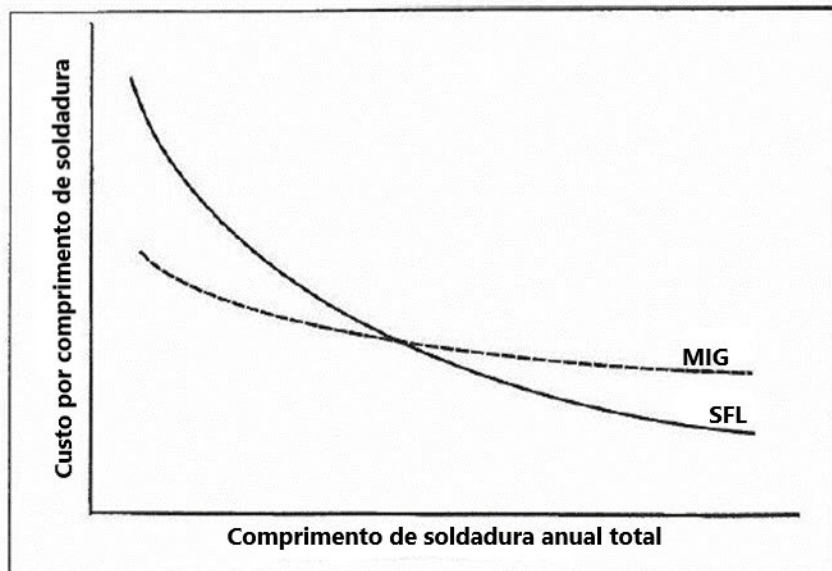


Fig. 3. Representação esquemática dos custos por comprimentos de soldadura vs. Total da produção anual dos processos SFL e MIG

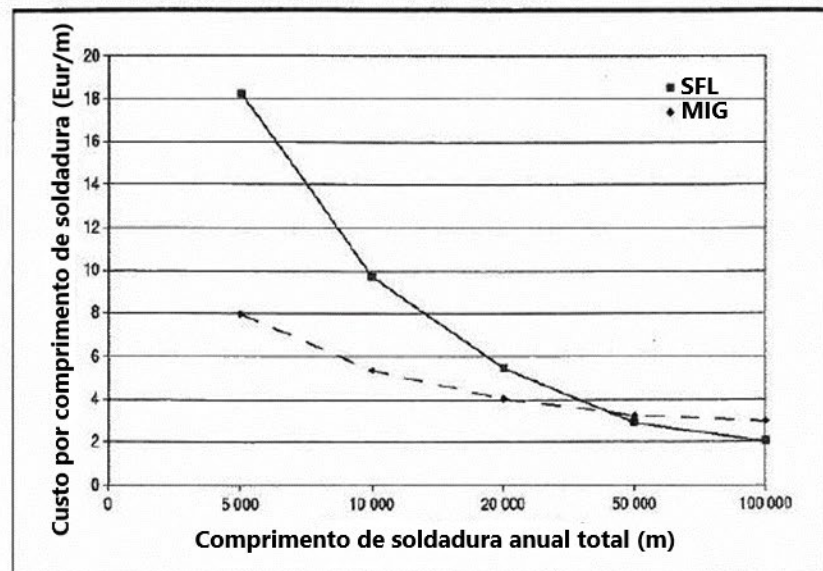
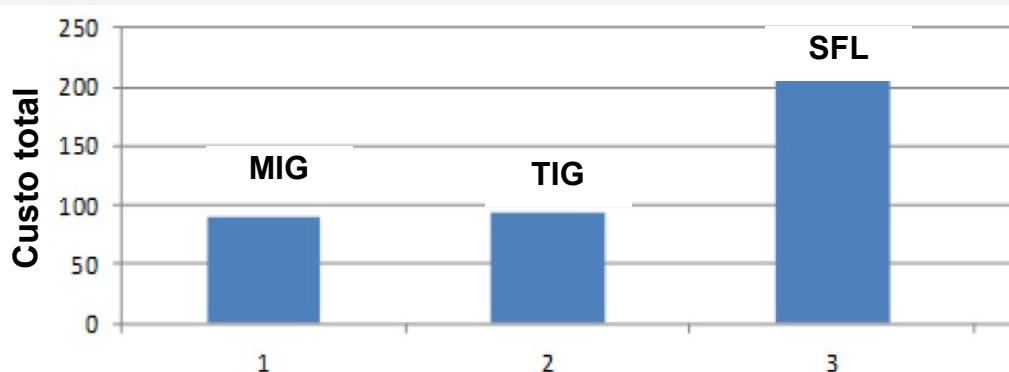


Fig. 4. Custos de soldadura MIG e SFL para diferentes quantidades de produção anual.

[10] Comparação de custo de painéis de alumínio soldados por MIG e SFL

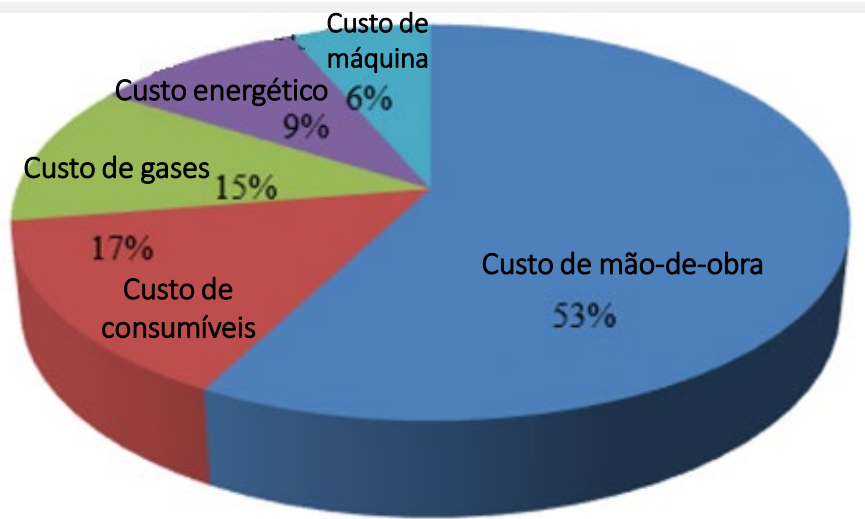
SFL vs. MIG – Custos do processo [10]



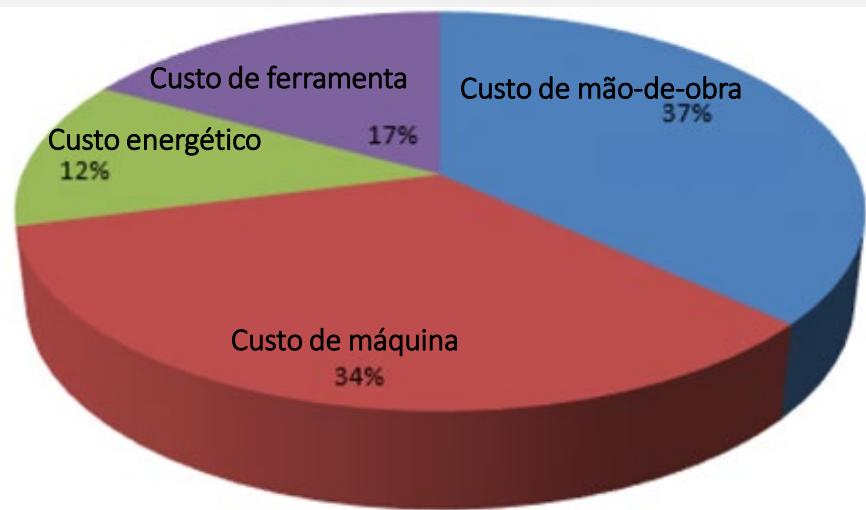


[16] Uma comparação entre SFL, MIG e TIG baseado na Estimação Total de Custo para Tubos de Alumínio

Relação entre o custo total e o tipo de soldadura (SFL, MIG e TIG)



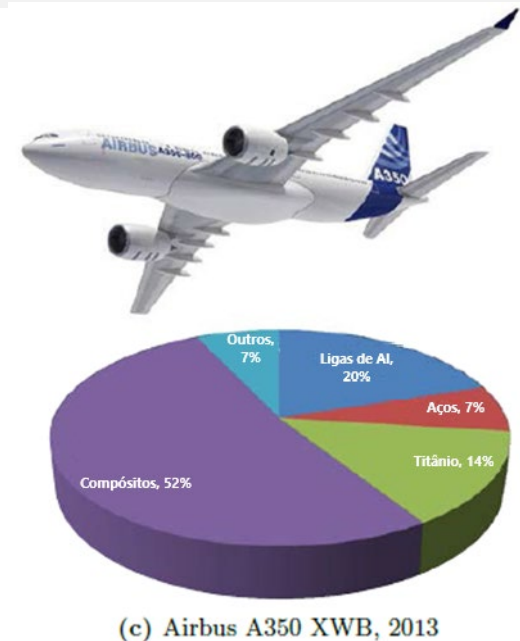
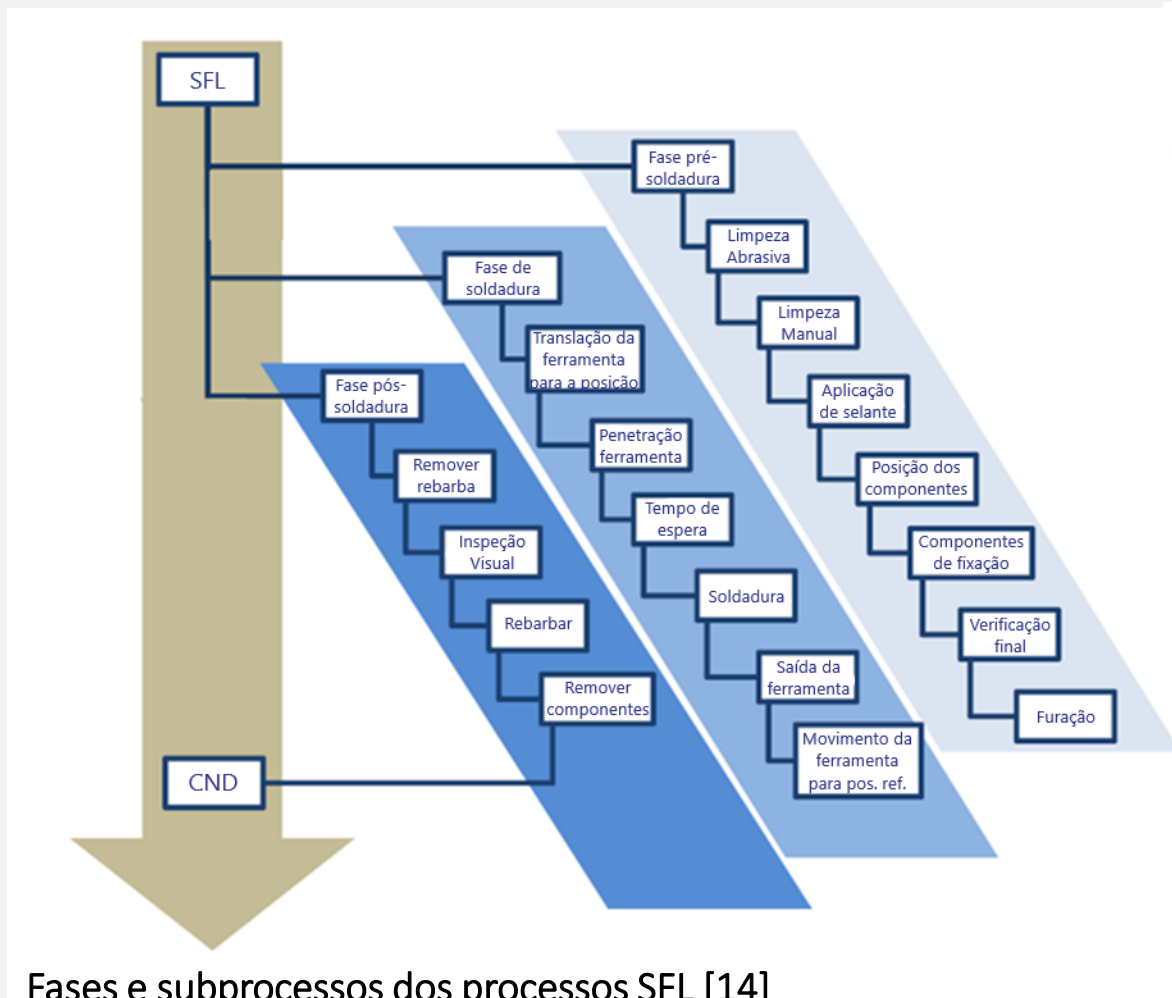
A distribuição de custo de uma junta soldada fabricada utilizando os processos MIG e TIG



A distribuição de custos para uma junta soldada fabricada pelo processo SFL

MIG e TIG vs SFL – Custos do Processo [16]

11.7 Requisitos para instalação de um Sistema SFL



[14] Projeto e Fabrico Avançado de Estruturas de Aeronaves com Soldadura por Fricção Linear



Fases e subprocessos dos processos SFL [14]



Implementação de Produção SFL [18]

[18] Um programa de três fases progressivas para ajudar a introdução do SFL na produção o mais eficientemente e com maior viabilidade económica quanto possível

11.7 Requisitos para instalação de um Sistema SFL

A FUNDAÇÃO POR SAPATA ISOLADA é necessária para **reduzir** as **vibrações ativas** e **passivas**. Montagens de isolamento de vibração são necessárias para reduzir a transmissão de vibrações e choques.

Um **bloco de fundação** ou **montagens de isolamento de vibração** para máquinas altamente dinâmicas como máquinas SFL, prensa de força, martelos de forjamento, compressores, equipamentos de teste de motores etc. **é necessário para reduzir a transmissão de vibração e choque para equipamentos de precisão** ou estruturas de edifícios próximas. Controlar a fonte de vibração através da utilização de materiais isolantes resilientes é conhecido como **ISOLAMENTO DE VIBRAÇÃO ATIVA**.

Quando não for possível eliminar ou reduzir suficientemente a transmissão de choque e vibração da fonte, um bloco de base de isolamento de vibração suportado de forma resiliente pode ser utilizado para o **ISOLAMENTO DE VIBRAÇÃO PASSIVA** de equipamentos sensíveis como equipamentos CNC, Sistemas de Medição e Controlo e Sistemas de Rastreamento a Laser.

A FUNDAÇÃO POR SAPATA ISOLADA desce o centro de gravidade do sistema de fundação da máquina e **aumenta a estabilidade da máquina**. A máquina permanece alinhada durante mudanças de cargas dinâmicas e movimentos rápidos dentro das máquinas.



Restos de cortiça
plastificada
PVC

Bloco de cimento

Placa de madeira de 25
Conjunto de placa de
isolamento de vibração

PVC

Espuma de
enchimento

O nivelamento preciso garante a geometria angular correta dos eixos da máquina e é necessário também para a drenagem de óleo e líquido refrigerante.

Exemplo de um **bloco de fundação** ou **montagens de isolamento de vibração para máquinas muito dinâmicas**

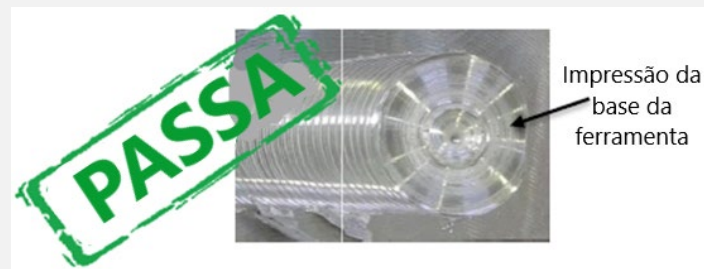


11.8 Controlo de Qualidade

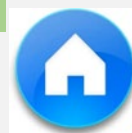
Análise

De acordo com a norma DIN EN ISO 25239-5, os defeitos superficiais podem ser detetados por **inspeção visual** (exame macroscópico), com a exceção da **falta de penetração**. Outros ensaios para avaliação da qualidade da soldadura são:

- ✓ Ensaio de tração
- ✓ Ensaio de dobragem
- ✓ Ensaio de dureza
- ✓ Exame macroscópico
- ✓ Controlo CND



DIN EN ISO 25239-4, uma inspeção visual a 100% das soldaduras por fricção linear é obrigatória, de forma a responder aos requisitos para a qualificação do processo de soldadura para soldadura por fricção linear de alumínio.



11.9 Logística

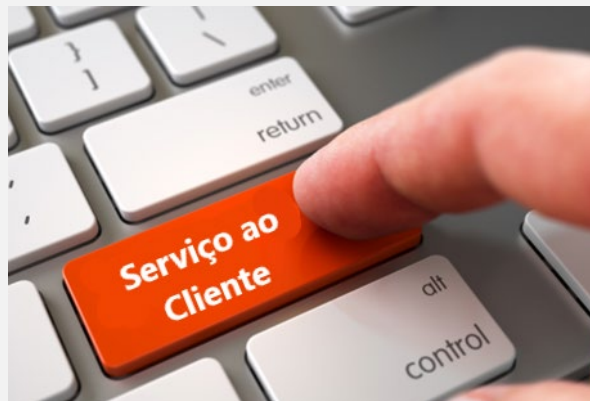


11.9 Logística

Os 6 Certos da logística

O produto CERTO
na quantidade CERTA
na condição de CERTA
entregue ...
no lugar CERTO
no tempo CERTO
ao custo CERTO

Estas expectativas do cliente definem a finalidade de um sistema de logística - garantir que os produtos certos, nas quantidades certas, na condição certa, sejam entregues no lugar certo, no tempo certo, pelo custo certo. Em logística, estes certos são designados os seis certos.



11.10 Rede de engenharia (eletricidade, pressão do ar)

Utilidades típicas de processo incluem **eletricidade**, vapor do processo, fluidos refrigerantes, **ar comprimido**, **água de arrefecimento**, água aquecida, óleo quente, água de processo, água desmineralizada, água municipal.

Os custos de serviços públicos são úteis para engenheiros de processo, projetistas e engenheiros de serviços públicos em todas as indústrias de fabrico, onde as instalações de utilidades são partes essenciais de todas as operações de produção.

Os **sistemas de tubagens** de serviços públicos são especificados num DFP separado para cada utilidade, geralmente conhecido como **diagramas de fluxo de serviços públicos**. Estes diagramas indicam onde a tubagens das utilidades ligam-se a linhas de processo ou a equipamentos e mostram as zonas de interconexão. A tubagem de utilidades consiste principalmente em sistemas de vapor, **ar comprimido**, **água de processo e arrefecimento**, mas também incluem **gás inerte**, vácuo e água de combate a incêndios.

Os símbolos mais comuns de DFP em utilização hoje vêm de agências como a [Organização Internacional de Normalização](#) (ISO 10628 – Diagramas de fluxo para Instalações do Processo), o [Instituto Alemão para Normalização \(DIN\)](#) e o [Instituto Nacional Americano de Norma \(ANSI.\)](#)

Um **DFP típico** para um único processo deverá incluir os seguintes elementos:

- **Equipamento principal:** inclui nome e números ID. Exemplos incluem máquinas SFL, compressores, bombas, equipamentos CNC e unidades de arrefecimento.
- **Tubagem do processo:** Movimenta o produto, geralmente fluidos, entre peças do equipamento.
- **Direção do fluxo do processo**
- **Válvulas de controlo e válvulas críticas do processo**
- **Sistemas principais de *bypass* e recirculação**
- **Dados operacionais:** como pressão, temperatura, densidade, taxa de fluxo mássica e balanço massa-energia. Os valores geralmente incluem mínimo, normal e máximo.
- **Composição de fluidos**
- **Nomes de fluxo do processo**
- **Conexões com outros sistemas**



11.13 Operações de pós-processamento SFL

- Operações de pós-processamento SFL é, por exemplo, o **preenchimento das crateras** deixadas pela ferramenta. Em HZG - Hamburgo desenvolveu-se uma tecnologia para o enchimento de crateras. A cratera é formada no final da soldadura e pode exigir uma **operação de pós-processamento** (ou rebitagem por fricção).
- **Operações de desbaste**, se necessário, se a cratera for muito grande e puder ser preenchida. Em geral, é preferível evitar muitas operações após o processo de FSW.



Referências

- 1) P. PODRŽAJ, B. JERMAN, D. KLOBČAR , **Welding defects at friction stir welding**, ISSN 0543-5846, METABK 54(2) 387-389 (2015)
- 2) David G. Kinchen, Lockheed Martin Michoud Space Systems, NASA, **NDE of Friction Stir Welds in Aerospace Applications**
- 3) R Hartl*, A Bachmann, S Liebl, A Zens and M F Zaeh , **Automated surface inspection of friction stir welds by means of structured light projection**, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 480 (2019) 012035, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/480/1/012035
- 4) Neetesh Soni¹, Sangam Chandrashekhar², A. Kumar³, V.R. Chary , **Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review**, International Journal of Engineering and Management Research, Volume-7, Issue-3, May-June 2017
- 5) Bob Carter, NASA Glenn Research Center **Introduction to Friction Stir Welding (FSW)**, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150009520> 2019-05-03T14:29:39+00:00Z
- 6) Telmo Santos, Pedro Vilaça*, Luísa Quintino Technical University of Lisbon, IST, Secção de Tecnologia Mecânica, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon **Developments in NDT for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds in Aluminium Alloys**
- 7) Jorma Pitkänen, Jonne Haapalainen, Aarne Lipponen, Matti Sarkimo , **NDT of Friction Stir Welds** PLFW 1 to PLFW 5 (FSWL 98, FSWL 100, FSWL 101, FSWL 102, FSWL 103) NDT Data Report, 2014
- 8) Zhili Feng, Yong Chae Lim, **Final Technical Report. Flexible Friction Stir Joining Technology**, Oak Ridge National Laboratory , 2015.
- 9) ESAB, FSW Technical Handbook, 2018.
- 10) Cost Comparison of FSW and MIG Welded Aluminium Panels
- 11) Nuno Mendes, Pedro Neto, Altino Loureiro, António Paulo Moreira, **Machines and control systems for friction stir welding: A review**, Materials and Design 90 (2016) 256–265.
- 12) China FSW Center, **Friction Stir Welding Equipment and System**, 2014-2015.

Referências

- 12) Sandra Zimmer, Laurent Langlois, Julien Laye,, Jean-Claude Goussain, Patrick Martin, et al. **Methodology for qualifying a Friction Stir Welding equipment**, 7th International Symposium on Friction Stir Welding - Awaji Island, Japan, May 2008, Awaji Island, Japan. 20p. hal-01088138.
- 13) Sergio M. O. Tavares, **Design and Advanced Manufacturing of Aircraft Structures using Friction Stir Welding**, July 2011 MIT-Portugal Program.
- 14) Pradeep Kumar Tipaji, **E-design tools for friction stir welding: cost, estimation tool**, Master Thesis
- 15) Ahmed M. El-Kassas and Ibraheem Sabry, **A Comparison between FSW, MIG and TIG based on Total Cost Estimation for Aluminum Pipes**, European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2017, 4 (3): 158-163
- 16) João Filipe Gomes Duarte Prior, APPLICATION AND OPTIMIZATION OF FRICTION STIR WELDING ON ELECTRICAL TRANSFORMERS COMPONENTS, Master Thesis
- 17) MTS System Corporation, **ISTIR™ Friction Stir Welding Solutions**, 2018.
- 18) Fabrice SCANDELLA, **Friction-stir welding of high strength, materials: a literature survey**, 2017, Soudage et techniques connexes.
- 19) Max Hossfeld, Dave Hofferbert, **Challenges and State of the Art in Industrial FSW – Pushing the Limits by High Speed Welding of Complex 3D Contours**, The 12th International Symposium on Friction Stir Welding.
- 20) TWI, **Friction Stir Welding. Future Trends – Internet of Things, Automated Welding and Additive Manufacturing in India**, 2016.
- 21) Wei Tang, Brian T. Gibson, Zhili Feng, Scarlett R. Clark, Oak Ridge National Laboratory, **Report Detailing Friction Stir Welding Process Development for the Hot Cell Welding System**, 2016
- 22) Wang Yisong, Tong Jianhua, Li Congqing, **Application of Friction Stir Welding on the Large Aircraft Floor Structure**, China FSW Center, BAMTRI



Cofinanciado pelo
Programa Erasmus+
da União Europeia



Friction Stir Welding European Qualifications

