

## **Friction Stir Welding (FSW): Sustentabilidade e perspectivas futuras na união de metais**

## **Friction Stir Welding (FSW): Sustainability and future perspectives in metal joining**

## **Friction Stir Welding (FSW): Sostenibilidad y perspectivas futuras en la unión de metales**

Bianca Freitas Borges<sup>1</sup>  
André Alves de Resende<sup>2</sup>

**Resumo:** Este artigo apresenta uma revisão exploratória da literatura sobre a soldagem por fricção (*Friction Stir Welding* - FSW), comparando sua viabilidade operacional com outros processos de soldagem. A pergunta de pesquisa que orienta o estudo é: pode o FSW ser considerado uma alternativa mais sustentável e eficiente em relação a outros processos de soldagem para aplicações industriais? Para responder essa questão, adotou-se a metodologia de revisão exploratória da literatura, com busca em bases nacionais e internacionais dos últimos dez anos, seguindo critérios de qualidade metodológica. Foram analisados os artigos completos após triagem de títulos e resumos, organizando os resultados em tabelas, gráficos e figuras. Os achados indicam que o FSW apresenta vantagens em eficiência energética, redução de resíduos, menor emissão de gases nocivos, maior segurança ocupacional e eficácia na soldagem de materiais dissimilares. Conclui-se que o FSW é promissor, sustentável e economicamente competitivo para algumas aplicações industriais.

**Palavras-chave:** Friction Stir Welding. Impacto ambiental. Eficiência energética. Perspectivas futuras.

**Abstract:** This article presents an exploratory literature review on Friction Stir Welding (FSW), comparing its operational feasibility with other welding processes. The research question guiding the study is: can FSW be considered a more sustainable and efficient alternative compared to other welding processes for industrial applications? To answer it, an exploratory literature review methodology was employed, analyzing national and international publications from the last ten years, selected through rigorous methodological quality criteria. Full texts were examined after title and abstract screening, and the results were organized into tables, graphs, and figures. Findings indicate that FSW offers advantages in energy efficiency, waste reduction, lower emission of harmful gases, improved occupational safety, and effectiveness in welding dissimilar materials. It is concluded that FSW reduces defects and operational costs, consolidating itself as a promising, sustainable, and economically competitive solution for some industrial welding applications.

**Keywords:** Friction Stir Welding. Environmental impact. Energy efficiency. Future perspectives.

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Catalão (UFCAT). <https://orcid.org/0009-0001-8276-9061>. E-mail: [freitasborges7@gmail.com](mailto:freitasborges7@gmail.com).

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Catalão (UFCAT). <https://orcid.org/0000-0001-6636-9968>. E-mail: [aaresende@ufcat.edu.br](mailto:aaresende@ufcat.edu.br).

**Resumen:** Este artículo presenta una revisión exploratoria de la literatura sobre la soldadura por fricción (Friction Stir Welding – FSW), comparando su viabilidad operacional con otros procesos de soldadura. La pregunta de investigación que guía el estudio es: ¿puede el FSW considerarse una alternativa más sostenible y eficiente en comparación con otros procesos de soldadura para aplicaciones industriales? Para responderla, se adoptó la metodología de revisión exploratoria de la literatura, con búsqueda en bases nacionales e internacionales de los últimos diez años, siguiendo criterios de calidad metodológica. Se analizaron artículos completos tras la selección de títulos y resúmenes, organizando los resultados en tablas, gráficos y figuras. Los hallazgos muestran que el FSW presenta ventajas en eficiencia energética, reducción de residuos, menor emisión de gases nocivos, mayor seguridad ocupacional y eficacia en la soldadura de materiales disímiles. Se concluye que el FSW es prometedor, sostenible y competitivo para aplicaciones industriales.

**Palabras clave:** Soldadura por fricción. Impacto ambiental. Eficiencia energética. Perspectivas futuras.

Submetido 06/08/2025

Aceito 25/09/2025

Publicado 01/10/2025

### Considerações Iniciais

Diante do agravamento das mudanças climáticas e da intensificação das restrições de recursos, as indústrias globais enfrentam pressão para adotar tecnologias mais sustentáveis. Esse imperativo é reforçado pela participação da indústria no consumo global de energia, que chega a quase 25% na Europa (Hoyos et al., 2023), exigindo a integração urgente de práticas sustentáveis nos sistemas de produção. É amplamente conhecido que a soldagem por fricção (FSW) é uma tecnologia mais limpa e segura do que os métodos convencionais de soldagem, uma vez que fumos, arcos elétricos, respingos de metal fundido (característicos de GMAW e PAW) ou riscos de radiação não estão associados a esse processo em estado sólido (Ferreira et al., 2023).

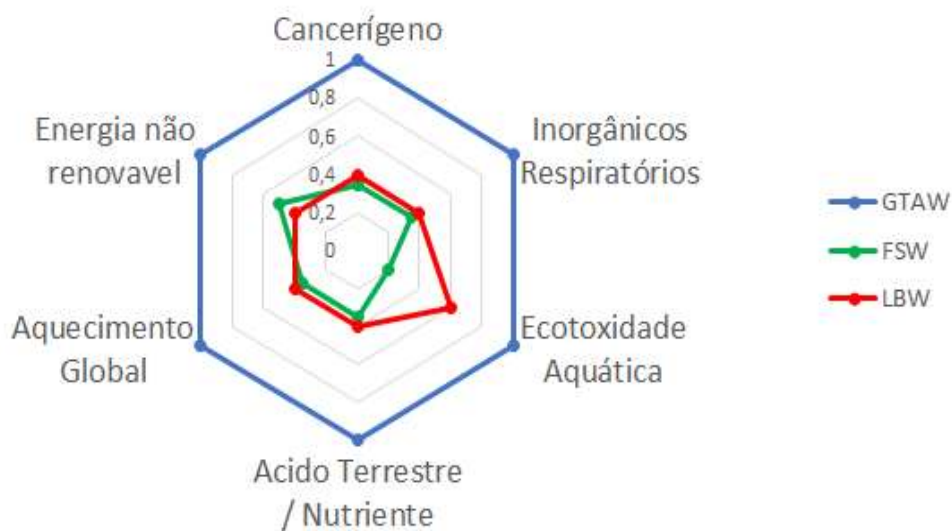
A técnica de soldagem *Friction Stir Welding* (FSW), também denominada em português por soldagem por fricção e mistura, foi inventada e patenteada pelo *The Welding Institute* (TWI) em 1991 (Thomas, 1995). A FSW é uma técnica de união sólida utilizada principalmente para componentes não ferrosos, como ligas de alumínio. Essa inovação preenche a lacuna inerente aos métodos de soldagem convencionais, evitando zonas defeituosas, reduzindo a distorção térmica e prevenindo problemas de fusão do material de enchimento (Feddal, Chairi e Bella, 2025).

Bevilacqua, et al. (2019) estabeleceram um comparativo entre os processos FSW, LBW (*Laser Beam Welding*) e GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*). Os autores concluíram que o FSW possibilitou uma significativa diminuição das emissões de gases de efeito estufa em comparação com os processos LBW (-12,4%) e GTAW (-49,4%). Esses resultados, expressos em termos de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente, estão alinhados com as conclusões de outros estudos. Um exemplo é o trabalho de Shrivastava, Kronen e Pfefferkorn (2015), que demonstraram que o processo FSW resulta em uma redução de 31% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). A Figura 1 apresenta uma comparação dos valores de caracterização dos processos de soldagem FSW, LBW e GTAW, levando em consideração os aspectos de sustentabilidade.

Lohwasser e Chen (2010) relataram que, não muito tempo após a primeira aplicação importante do FSW, a Hitachi, no Japão, iniciou um intensivo desenvolvimento dessa tecnologia. Uma das principais aplicações surgiu na soldagem de peças longas de alumínio produzidas por extrusão. A utilização do FSW, com sua baixa distorção, elimina a necessidade

de pós-soldagem para alisamento e preenchimento. Devido a essa característica na soldagem de longas peças extrudadas em alumínio com distorção mínima, a Hitachi incorporou o FSW em seu projeto no ano de 2000, visando a fabricação de carrocerias de vagões de trem com alta integridade e produtividade.

Figura 1 - Comparação dos valores de caracterização dos processos FSW, LBW e GTAW



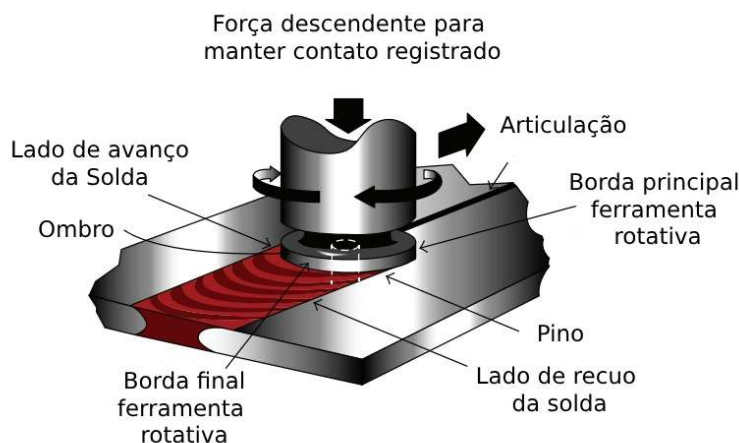
Fonte: Adaptado de Bevilacqua et al. (2019)

Lohwasser e Chen (2010) acrescentam que é relevante destacar a experiência da Eclipse Aviation, que foi uma precursora no emprego do FSW desde os estágios iniciais da fabricação de seus pequenos jatos em 2000. Em 2001, eles iniciaram a construção de máquinas FSW em colaboração com a *MTS Systems Corporation*, simultaneamente estabelecendo uma estreita parceria com a Administração Federal de Aviação (FAA – *Federal Aviation Administration*) para a certificação da tecnologia FSW. Em 2002, a *Eclipse Aviation* obteve a aprovação da especificação do processo FSW pela FAA, enquanto o FSW foi utilizado com êxito na montagem da cabine inferior do primeiro jato Eclipse 500.

Adicionalmente, Lohwasser e Chen (2010) evidenciam que certas ligas de alumínio apresentam desafios na soldagem por fusão, como evidenciado durante a produção do foguete Delta 2 pela Boeing. Ao empregar o método de soldagem a arco plasma de polaridade variável, a taxa de defeitos ultrapassou 90%. No entanto, a adoção da técnica FSW possibilitou uma redução significativa, praticamente eliminando a taxa de defeitos.

Conforme mostrado por Majeed et al. (2021) e Mishra e Ma (2005), o processo de soldagem FSW representa uma revolução significativa na indústria de soldagem, introduzindo uma abordagem inovadora, sustentável e eficiente para unir metais. O princípio do FSW é simples: uma ferramenta rotativa não consumível, com pino e ressalto projetados, é inserida nas bordas das chapas a serem unidas. Segundo Buffa et al. (2017), a união ocorre graças ao fluxo plástico do material, promovido pela rotação da ferramenta ao longo da linha de soldagem. O processo dispensa material de enchimento e ocorre abaixo do ponto de fusão do metal de base, evitando problemas de fusão e solidificação. Inicialmente, a ferramenta penetra até próximo ao fundo da chapa, gerando extrusão inversa e calor por fricção, que amolecem o material e permitem a agitação pelo ombro e pino. Com o material plastificado, a ferramenta avança, formando a solda. Os parâmetros principais são a rotação, a taxa de avanço e a geometria da ferramenta, que controlam o calor e a eficiência da agitação. A Figura 2 ilustra o esquema do processo.

Figura 2 - Desenho esquemático do processo de união *Friction Stir Welding* (FSW)



Fonte: Adaptado de Dawood, Mohammed e Rajab (2014)

Como destacado por Dawood, Mohammed e Rajab (2014), o FSW apresentou uma economia substancial no consumo de energia. A potência consumida no GMAW foi quatro vezes maior que a do FSW para execução de juntas semelhantes. Isso resultou em uma redução na área onde a microdureza muda. O processo GMAW liberou maiores quantidades de gases nocivos, como monóxido de carbono e dióxido de carbono, para o ambiente (2,7 ppm e 346

ppm, respectivamente), em oposição a 0,6 ppm e 211,6 ppm, respectivamente, para FSW que mostrou resultados favoráveis referentes a emissão de gases no FSW comparado ao GMAW.

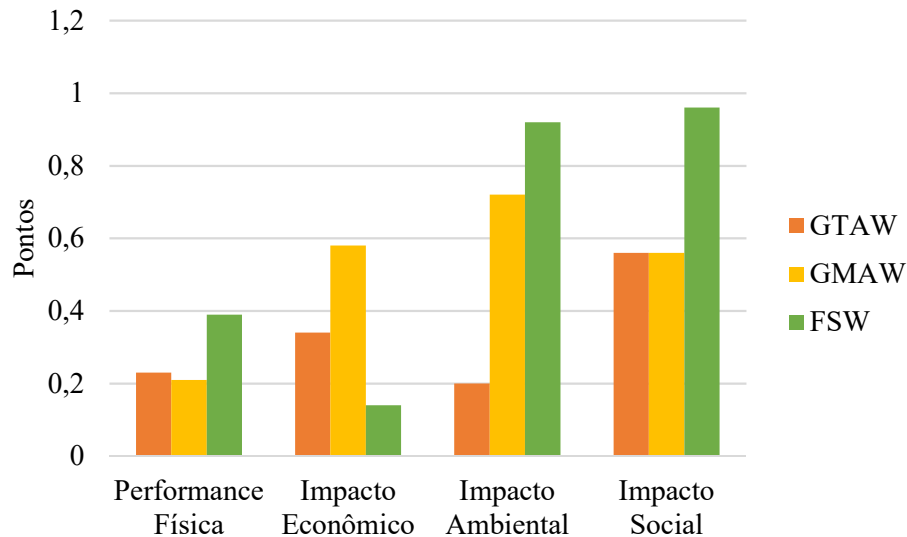
Jamal, Darras e Kishawy (2019) demonstraram em seu estudo que o custo do equipamento no FSW é menor, devido à longa vida útil da ferramenta, enquanto os processos GTAW e GMAW são mais caros. O processo GTAW consumiu mais energia que o GMAW, e o FSW apresentou o menor consumo energético entre os três processos. Na categoria de impacto ambiental, foram consideradas as emissões de soldagem e o desperdício de materiais. Tanto o FSW quanto o GTAW não produziram partículas metálicas significativas. Em termos de pegada de carbono, que está diretamente associada ao consumo de energia, o FSW e o GMAW tiveram pegadas relativamente baixas em comparação com o GTAW. O consumo de energia do GTAW excedeu o limite, e o FSW não utilizou nenhum material auxiliar, ao contrário dos outros processos de soldagem a arco.

Mohamed e Mohamed (2025) reforçam que a resistência à corrosão aprimorada das juntas FSW se traduz diretamente em requisitos de manutenção reduzidos, minimizando a necessidade de revestimentos protetores e tratamento químico. Os métodos tradicionais de proteção contra corrosão frequentemente envolvem substâncias ambientalmente problemáticas, como compostos orgânicos voláteis (COVs), metais pesados e poluentes orgânicos persistentes. Ao reduzir a dependência de tais revestimentos, o FSW contribui para uma menor pegada ambiental global. A Figura 3 ilustra as avaliações abrangentes de sustentabilidade dos processos de soldagem GTAW, GMAW e FSW. Na Figura 3, “impactos” são expressos como um índice de sustentabilidade; portanto, pontuações mais altas correspondem a impacto positivo (desempenho mais sustentável) e pontuações mais baixas a impacto negativo (desempenho menos sustentável). Pelos resultados sintetizados, o FSW apresenta a maior pontuação global, seguido por GMAW, enquanto o GTAW tende a ser o menos sustentável.

Como foi conduzido por Majeed et al. (2021), a adesão no processo FSW ocorre abaixo do ponto de fusão, oferecendo uma série de vantagens que resultam em juntas livres de defeitos associados à solidificação, como porosidade e trincas. Essa característica fundamental do FSW contribui para a obtenção de soldas de alta qualidade, uma vez que os materiais não passam pelo estado líquido durante o processo eliminando a necessidade de preocupações com a solidificação, comuns em métodos de soldagem por fusão convencionais.



Figura 3 - Avaliações globais de sustentabilidade para os processos de soldagem GTAW, GMAW e FSW



Fonte: Adaptado de Jamal, Darras e Kishawy (2019)

Mendonça (2014) demonstra que outro benefício notável do FSW é a prevenção da formação de fases desnecessárias na microestrutura, um fenômeno que pode ocorrer na soldagem convencional quando há mistura de material de base e material de enchimento. Ao evitar esse problema, o FSW assegura a integridade das propriedades mecânicas e químicas do material, resultando em juntas mais homogêneas e com características desejadas para diversas aplicações.

Quanto à eficiência energética, Shrivastava, Krones e Pfefferkorn (2015), fizeram uma comparação entre FSW e GMAW com base no consumo de energia e impacto ambiental e concluíram que FSW consome 42% menos energia, produz 31% menos gases de efeito estufa, consome 10% menos material que GMAW para a mesma resistência de junta. Wahid, Khan e Siddiquee (2018) adicionam que o FSW não requer preparação pré-processamento de placas, mesmo para soldas com espessura de 50 mm.

A ausência de gases de proteção e materiais de enchimento, aliada à prevenção de fases indesejadas, torna o FSW uma escolha tecnicamente eficiente e ambientalmente amigável. O processo contribui para práticas sustentáveis ao evitar emissões nocivas e reduzir a geração de resíduos. A Figura 4 ilustra as variáveis que influenciam essa sustentabilidade.

Figura 4 - Variáveis que influenciam a sustentabilidade do procedimento de soldagem



Fonte: Adaptado de Majeed et al. (2021)

Conforme Lohwasser e Chen (2010), apesar das vantagens, o FSW apresenta limitações práticas. Não é adequado para ligas de alto ponto de fusão, pois exige ferramentas caras, resistentes a altas temperaturas e com elevada dureza a quente. A soldagem de materiais com espessuras desiguais ou em altas taxas de avanço pode gerar juntas de menor qualidade e deixar um orifício de saída, implicando desperdício de material. Defeitos também podem ocorrer por parâmetros inadequados, resultando em calor insuficiente, mistura deficiente e consolidação incompleta.

Neste contexto, este artigo propõe uma revisão exploratória da literatura sobre FSW, enfocando seus princípios fundamentais, aplicações atuais e seu papel nas direções futuras de pesquisa. O objetivo geral do trabalho consiste em analisar a viabilidade do processo FSW, comparando-o com métodos convencionais de soldagem, enquanto destaca seus aspectos ambientais e suas perspectivas futuras. A pergunta de pesquisa que orienta este estudo é: “O processo FSW pode ser considerado uma alternativa mais sustentável e eficiente em relação a outros processos de soldagem para aplicações industriais?”. Como objetivos específicos, serão analisados aspectos de eficiência energética, redução de resíduos e impacto ambiental e,



também, será realizada uma avaliação comparativa com métodos tradicionais de soldagem, considerando desempenho, custos e facilidade de operação. Com ênfase na aplicabilidade industrial, o trabalho explorará as perspectivas futuras do FSW, considerando avanços tecnológicos, novos materiais e sua implementação potencial em setores específicos da indústria, oferecendo uma visão abrangente do estado atual e futuro dessa tecnologia na indústria.

A realização deste trabalho se justifica uma vez que, apesar dos inegáveis benefícios do FSW e seu potencial para transformar a indústria de soldagem, a substituição de processos consolidados, como o MIG/MAG, apresenta desafios substanciais. A adoção generalizada, principalmente do processo MIG/MAG, ao longo das décadas estabeleceu padrões e confiança na eficácia desse método. Dessa forma, as organizações enfrentam resistência à mudança devido à familiaridade, investimentos prévios e uma vasta base de conhecimento construída em torno deste e de outros processos tradicionais de soldagem.

### **Metodologia**

O presente estudo foi conduzido sob a perspectiva de uma revisão exploratória da literatura (*scoping review*), modalidade que busca mapear, organizar e analisar o conhecimento existente sobre determinado tema de forma ampla, sem a pretensão de exaurir todas as evidências ou seguir protocolos rígidos das revisões sistemáticas. De acordo com Grant e Booth (2009), esse tipo de revisão é adequado quando o objetivo é identificar conceitos-chave, evidências e lacunas em campos emergentes de investigação.

Considerando que os objetivos desta revisão exploratória são compreender os princípios fundamentais, analisar aplicações atuais, investigar sua viabilidade operacional em comparação aos métodos convencionais, examinar seus aspectos ambientais e apresentar perspectivas futuras do FSW. Esta revisão visa consolidar o entendimento sobre o FSW, destacando potenciais contribuições para a indústria, meio ambiente e avanço tecnológico.

A abordagem adotada neste artigo é qualitativa, uma vez que realiza uma análise interpretativa dos dados obtidos em publicações científicas, buscando compreender os aspectos técnicos, ambientais e operacionais do processo FSW. A natureza da pesquisa é básica, pois visa à ampliação do conhecimento teórico sobre o FSW e suas aplicações sustentáveis. Quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, por investigar um tema emergente e com potencial de

inovação na indústria, e também descritiva, por apresentar características, vantagens e limitações do FSW com base em estudos já realizados. Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, fundamentada na análise de artigos científicos, livros e periódicos publicados entre os anos de 2005 e 2025.

Para tanto foram realizadas buscas em bases de dados como *IOPScience*, UFPE Periódicos, Catálogo USP, *ScienceDirect*, *SageJournals* e *Hindawi*. A seleção dessas bases justifica-se pela sua abrangência temática e relevância científica: *IOPScience*, *ScienceDirect* e *SageJournals* são bases consolidadas na área de engenharia e ciências aplicadas, assegurando acesso a periódicos de alto impacto; *Hindawi* oferece amplo acervo de acesso aberto, ampliando a recuperação de artigos internacionais; já UFPE Periódicos e Catálogo USP foram incluídos para garantir representatividade da produção científica nacional. Assim, buscou-se combinar bases de alta visibilidade internacional com fontes nacionais, de forma a compor um panorama mais completo sobre o estado do conhecimento em FSW.

Foram utilizados os termos "*Friction Stir Welding*", "*FSW applications*", "*FSW sustainability*", "*Green welding*", "*Welding process*", "*Welding health*", "*Friction Stir Welding Energy Efficiency*", "Soldagem por fricção e mistura", "Saúde dos soldadores", "Riscos ocupacionais na soldagem", entre outros relacionados ao escopo da revisão. A pesquisa foi conduzida empregando palavras-chave nos idiomas inglês e português. A utilização de termos em ambas as línguas foi adotada com o intuito de abarcar tanto a produção científica internacional quanto a nacional, permitindo a coleta de dados abrangentes, possibilitando uma análise exploratória dos princípios, aplicações e tendências futuras relacionadas ao FSW.

Para a elaboração deste estudo, foram selecionados artigos científicos, livros e periódicos que desenvolvem o tema em questão, com publicações feitas ao longo dos anos 2005 a 2025, com exceção dos artigos que se referem ao surgimento do processo e/ou das principais evidências do FSW. Os critérios de seleção consideraram a pertinência aos objetivos da revisão, a qualidade metodológica (verificada pela presença de descrição dos materiais e dos parâmetros de soldagem, pela explicitação do método de mensuração e pela apresentação de dados/imagens suficientes para interpretação, e o potencial de contribuição para a compreensão do FSW. Fontes não científicas e duplicadas foram excluídas, assegurando a integridade e relevância dos materiais analisados.

O processo de desenvolvimento deste estudo teve início com a formulação do tema e a elaboração da sua justificativa, visando estabelecer uma base concreta para a pesquisa. Foram realizadas buscas nas bases de dados, resultando na identificação de 956 trabalhos. Em seguida, analisou-se a triagem dos títulos, etapa na qual 503 trabalhos foram excluídos. Na sequência, os resumos disponíveis foram lidos com o intuito de identificar a pertinência e a aderência dos artigos à temática em questão, levando à exclusão de mais 351 trabalhos. Posteriormente, os últimos 102 trabalhos restantes foram submetidos a uma leitura completa, permitindo uma análise mais aprofundada, onde foram finalmente identificados os artigos mais aderentes aos objetivos estabelecidos para a revisão. Esse processo possibilitou uma abordagem abrangente e detalhada dos materiais selecionados, que incluem 16 artigos científicos, 1 dissertação de mestrado, 1 monografia institucional, 1 livro técnico e 1 documento de patente, contribuindo para a qualidade e a relevância do trabalho realizado. Os resultados e conclusões dos estudos revisados foram analisados visando a comparação e constatação, identificando padrões e permitindo a identificação de lacunas na literatura existente, destacando áreas específicas que necessitam de futuras pesquisas visando contribuir para o avanço do conhecimento na área em questão.

Os dados selecionados foram organizados destacando as principais descobertas, conclusões e tendências nos estudos revisados. Esta distribuição foi conduzida por meio de uma análise dos resultados obtidos por meio da análise de conteúdo dos artigos selecionados, com o objetivo, de identificar padrões significativos e possíveis correlações entre variáveis, ampliando assim a compreensão das relações exploradas.

### **Análise de dados e resultados**

Os resultados obtidos a partir das referências citadas indicam uma série de vantagens do processo de soldagem FSW em comparação com o método convencional GMAW. Segundo o *IARC Working Group* (2018), o número de pessoas expostas a fumos de soldagem pode ser 10 vezes maior que o número de pessoas com título ocupacional de soldador. Isso indicaria que o número de pessoas expostas a fumos de soldagem em todo o mundo pode aproximar-se de 110 milhões de trabalhadores.

Balthazar *et al.* (2018) apontam que a exposição a vapores, gases, poeiras e fumos de soldagem eleva o risco de Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). Entre os fatores de

risco estão os insumos metálicos em estado sólido e gasoso, capazes de gerar distúrbios respiratórios, como os fumos do aço inoxidável, que podem causar lesões pulmonares agudas. O tamanho das partículas e o tempo de exposição são determinantes, reforçando a necessidade de medidas preventivas e de proteção aos trabalhadores.

O estudo de Dawood, Mohammed e Rajab (2014) demonstrou que o *FSW* libera menores quantidades de gases nocivos para o ambiente em comparação com o *GMAW*. Os valores de monóxido de carbono e dióxido de carbono emitidos no *FSW* foram significativamente menores do que as emissões no processo de soldagem *GMAW*, apontando uma vantagem ambiental significativa. Os autores Shrivastava, Krones e Pfefferkorn (2015) também apresentaram que o processo *FSW* resulta em uma redução de 31% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação ao processo *GMAW*.

Dawood, Mohammed e Rajab (2014) utilizaram o dispositivo *Indoor Air Quality Pro* com um determinado volume, confinado em uma cabine de soldagem de 7,2 m<sup>3</sup> para mensurar e analisar a quantidade de gases emitidos durante o processo de soldagem. As quantidades dos gases detectados para o *FSW* e processos *GMAW* foram comparadas para determinar qual técnica de soldagem resulta na liberação de substâncias mais prejudiciais para o ambiente. A Tabela 1 mostra as quantidades medidas de dióxido de carbono e monóxido de carbono antes e depois da soldagem.

Tabela 1 - Comparação dos gases liberados antes e depois da soldagem

Número do teste	Atmosfera (antes da soldagem)		GMAW		FSW	
	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	0,4	121	2,8	361	0,5	197
2	0,3	118	2,0	354	0,3	241
3	0,5	122	2,2	344	0,6	196
4	0,7	119	2,7	338	0,7	201
5	0,9	117	3,9	333	1,0	223

Fonte: Adaptado de Dawood, Mohammed e Rajab (2014)

Além das vantagens ambientais, os autores Dawood, Mohammed e Rajab (2014) notaram uma economia no consumo de energia. O *FSW* consome 42% menos energia em comparação ao *GMAW*, o que representa uma redução significativa no impacto ambiental e nos

custos operacionais associados à produção de energia. Em conjunto, esses resultados destacam o *FSW* como uma escolha ambientalmente amigável na indústria de soldagem, contribuindo com práticas sustentáveis e com a redução no impacto ambiental associado à fabricação e união de metais. A Figura 5 representa a abordagem de sustentabilidade do processo *FSW*.

Figura 5 - Diagrama ilustrando a sustentabilidade do *FSW*



Fonte: Adaptado de Majeed et al. (2021)

Em síntese, Mohamed e Mohamed (2025) destacam que a manufatura sustentável ultrapassa os benefícios ambientais, trazendo também ganhos econômicos e sociais. Mais que uma necessidade para a preservação ambiental, trata-se de uma estratégia para alcançar metas industriais e econômicas de longo prazo. Ao reduzir sua pegada ambiental, as indústrias podem diminuir custos operacionais, fortalecer a reputação e atender à crescente demanda por produtos ecologicamente corretos.

A soldagem de materiais dissimilares tem sido desafiadora devido às disparidades estruturais e de propriedades entre os metais envolvidos. Gupta, Singh e Chhibber (2023) explicam que as juntas soldadas de aço austenítico e ferrítico necessitam simultaneamente de técnicas específicas para evitar defeitos como trincas por corrosão, trincas devido à temperatura, trincas por corrosão sob tensão, trincas por imersão em ductilidade e fusão. Esses defeitos são

causados por vários fatores como a inclusão de carbono, variações no desempenho mecânico da junta soldada, tensão residual, variações no coeficiente de temperatura e elementos de liga. Os aços austeníticos SS304L e SS316L são amplamente aplicados em setores aeroespacial, navais e industrial como em fornos industriais e trocadores de calor e devido à sua melhor qualidade intergranular como a resistência em ambientes corrosivos.

Os resultados obtidos do estudo realizado por Lohwasser e Chen (2010) destacam os desafios enfrentados na soldagem por fusão de certas ligas de alumínio, como observado durante a produção do foguete Delta 2 pela Boeing. Ao utilizar o método de soldagem a arco plasma de polaridade variável, a taxa de defeitos ultrapassou 90%. No entanto, ao adotar a técnica de *FSW*, foi possível alcançar uma redução significativa nessa taxa de defeitos, praticamente eliminando-os. Majeed *et al.* (2021) evidenciam que o *FSW* é amplamente utilizado para unir as chamadas ligas de alumínio não soldáveis, como as séries de ligas 2xxx (Cobre) e 7xxx (Zinco), que encontram uma ampla gama de aplicações em ônibus espaciais, automóveis, asas de aeronaves e painéis. Evidenciam também que o *FSW* é aplicado em tanques de combustível de foguete Boeing, tanques de combustível externos, estruturas aeroespaciais. Além disso, o *FSW* substituiu 70% dos rebites em aeronaves, reduzindo assim o custo, os materiais, o peso total e o aumento na taxa de produção de aeronaves comerciais.

Gupta, Singh e Chhibber (2023) enfatizam que o mundo está buscando recursos de energia renováveis para satisfazer as futuras exigências energéticas, tendo simultaneamente em conta o impacto ambiental. Lohwasser e Chen (2010) destacaram a aplicação pioneira da Riftec no fornecimento de *blanks* soldados sob medida usando o método de soldagem *FSW* desde 2006. Esses *blanks*, com espessuras dissimilares de 1,7 mm e 2,4 mm, apresentando um comprimento de atrito longo de 240 mm, desempenham um papel crucial na produção em série do painel central de fechamento do Audi R8. A Riftec tem uma produção significativa, fornecendo aproximadamente 7000 unidades ou 14 toneladas por ano, resultando em uma economia de material superior a 20%, o que equivale a cerca de 1 kg de economia de peso por veículo.

A implementação do *FSW* pela Audi proporcionou aumento da eficiência devido a redução dos custos de material e conformação do processo além da redução do peso. Esse caso demonstra os avanços técnicos do *FSW* e seus impactos positivos na indústria automotiva, tanto em termos de desempenho quanto de economia. A figura 6 mostra a placa soldada sob medida



da Riftec para o Audi R8. Mohamed e Mohamed (2025) adicionam que ao adotar o FSW, os fabricantes podem produzir veículos mais leves e eficientes, ao mesmo tempo em que atendem a rigorosos padrões ambientais. A integração de estratégias de manufatura sustentável visa aumentar a longevidade e a resiliência dos sistemas industriais, ao mesmo tempo em que mitiga o esgotamento de recursos finitos.

Figura 6 - *Blank* soldado da Riftec utilizando o FSW



Fonte: Lohwasser e Chen (2010)

Majeed et al. (2021) explica que no processo de soldagem FSW o calor necessário para a união é gerado pelo efeito combinado do atrito entre a ferramenta (pino) e a deformação plástica do material da peça de trabalho. À medida que a ferramenta avança ao longo da linha de solda, o pino move na direção da solda e o material deformado plasticamente em combinação com a ação de forjamento do ressalto da ferramenta, resulta em uma junta em estado sólido. O *FSW* contribui para a redução do consumo de energia ao unir materiais semelhantes e diferentes com espessuras iguais ou desiguais abaixo do ponto de fusão. Na Tabela 2 estão destacados os principais benefícios do FSW.

Tabela 2 - Principais benefícios do FSW

Benefícios Metalúrgicos	Benefícios Ambientais	Benefícios Energéticos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo de fase sólida;</li> <li>- Baixa distorção da peça de trabalho;</li> <li>- Boa estabilidade dimensional e repetibilidade;</li> <li>- Sem perda de elementos de liga;</li> <li>- Excelentes propriedades metalúrgicas na área da junta;               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Microestrutura fina;</li> <li>- Ausência de rachaduras;</li> </ul> </li> <li>- Substitui várias peças unidas por fixadores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é necessário gás de proteção;</li> <li>- Não é necessária limpeza de superfície;</li> <li>- Eliminação de resíduos de moagem;</li> <li>- Economia de materiais consumíveis, como tapete, fios ou quaisquer outros gases.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução de peso devido ao uso aprimorado de materiais (por exemplo, união de diferentes espessuras);</li> <li>- Apenas 2,5% da energia necessária para uma solda a laser;</li> <li>- Redução do consumo de combustível em aeronaves leves;</li> <li>- Aplicações automotivas e marítimas.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Mishra e Ma (2005)

Majeed et al. (2021) demonstrou que no processo *FSW* a adesão acontece abaixo do ponto de fusão, possibilitando vantagens significativas ao produzir juntas livres de defeitos que são comuns em métodos convencionais de soldagem por fusão, como por exemplo as trincas e a porosidade. Isso contribui para a obtenção de soldas de alta qualidade e previne a formação de fases desnecessárias na microestrutura, garantindo a integridade das propriedades mecânicas e químicas do material.

Shrivastava, Kronos e Pfefferkorn (2015) também constataram que o *FSW* consome 10% menos material que o *GMAW* para alcançar a mesma resistência de junta, contribuindo para a redução dos custos de material e para a minimização da geração de resíduos. Wahid, Khan e Siddiquee (2018) ressaltaram que o *FSW* não requer pré-processamento de placas, mesmo para soldas com espessura de 50 mm, e não exige operações de pós-processamento devido à ausência de material de enchimento. Resultando em uma maior eficiência operacional e em uma redução nos custos associados a etapas adicionais de processamento.

Lohwasser e Chen (2010) observaram que o *FSW* auxilia na redução de distorções nas chapas a serem soldadas, resultando em juntas mais homogêneas e adequadas para aplicações diversas. No entanto, o processo de soldagem *FSW* enfrenta algumas limitações práticas que podem resultar de parâmetros de processo mal ajustados, como a dificuldade na união de ligas/materiais de alto ponto de fusão, a necessidade de ferramentas de materiais mais resistentes para a união desses materiais e a formação de juntas de qualidade inferior em materiais com espessuras desiguais.

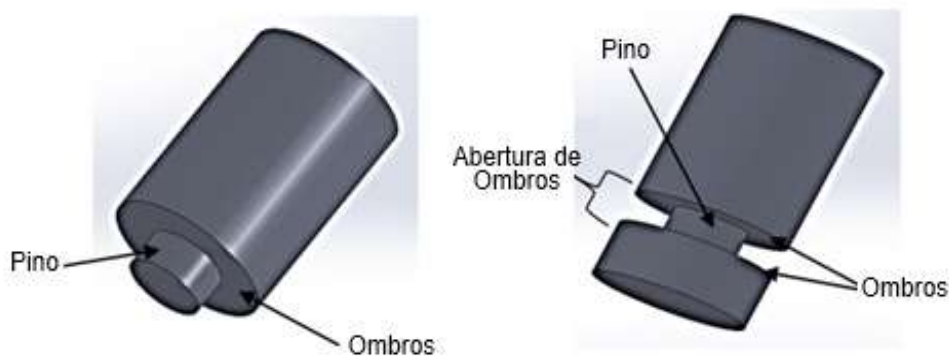
Mishra e Ma (2005) explicaram que o rápido desenvolvimento do processo *FSW* em ligas de alumínio e sua implementação bem-sucedida em aplicações comerciais motivou sua aplicação em outros materiais não ferrosos (Mg, Cu, Ti, e seus compósitos), aço e até mesmo termoplásticos. No entanto, além dos esforços contínuos para otimizar os parâmetros do *FSW* e compreender a evolução microestrutural, uma questão crítica é identificar a escolha de ferramentas adequadas para o *FSW* de aços. Um requisito essencial para *FSW* é manter um diferencial adequado entre a dureza e as propriedades de temperatura elevada da ferramenta e do material da peça. Ao contrário das ligas de alumínio de alta resistência que não são soldáveis pela maioria das técnicas de soldagem por fusão, as ligas e aços de titânio podem ser soldados por várias técnicas de fusão e altas eficiências de soldagem podem ser alcançadas. Portanto, não é apenas importante mostrar a viabilidade do *FSW*, mas também apresentar as suas vantagens sobre outras técnicas.

Choi et al. (2017) destacaram que a utilização da taxa de avanço viável para uma determinada máquina-ferramenta com base no limite de potência mecânica no *FSW* é uma vantagem clara. No entanto, manter a qualidade ao mesmo tempo exige conhecimento sobre como manter a temperatura de solda adequada nessas taxas de alimentação elevadas. O método sugerido é a utilização de placa de suporte de baixa difusividade para auxiliar na manutenção da temperatura da solda. Atualmente, os testes estão sendo conduzidos próximo à potência máxima de saída da máquina-ferramenta utilizada, e eles demonstram que a utilização de um suporte feito de placa de titânio poderia permitir que uma máquina-ferramenta operasse com maior produtividade.

Sued et al. (2014) evidenciaram a complexa interação de variáveis do processo *FSW* que afetam a energia térmica (geração de calor e gradientes de temperatura), os regimes de fluxo e mudanças metalúrgicas no nível de grão. Essa interação multifásica é impulsionada pela

geometria da ferramenta e pelas configurações do processo, influenciando diretamente a qualidade e a integridade da junta soldada. As aplicações industriais tendem a operar com configurações específicas de ferramentas e processos que provaram funcionar apenas em situações específicas, evidenciando a falta de uma compreensão abrangente dos limites operacionais e dos mecanismos mecânicos relacionados ao desempenho do sistema. A falta de conhecimento impacta diretamente a capacidade do material de fluir dentro de uma determinada configuração de processo, afetando a granulação e a qualidade da solda. Além disso, o processo *Bobbin Friction Stir Welding (BFSW)* surge como uma alternativa promissora, eliminando a necessidade do *Conventional Friction Stir Welding (CFSW)* e da utilização de uma placa de suporte (bigorna) na parte inferior da solda. No *CFSW*, esse suporte pode induzir resfriamento desigual, levando ao desenvolvimento de tamanhos de grãos não uniformes na região soldada. Por outro lado, a ferramenta *BFSW* gira perpendicularmente à placa a ser soldada, criando um regime de fluxo mais uniforme e, conseqüentemente, contribuindo para a obtenção de soldas de maior qualidade e integridade estrutural. A figura 7 ilustra os tipos de ferramentas utilizadas nesses processos.

Figura 7 - Tipos de FSW: (a) CFSW; (b) BFSW



Fonte: Adaptado de Sued et al. (2018)

Apesar das limitações, Majeed et al. (2021) mostraram que para aumentar a eficiência e reduzir erros na execução dos processos de soldagem a implementação da automação e a mudança de união manual para semiautomática e/ou para totalmente automática é essencial. A automação e a robotização reduzem a mão-de-obra humana, reduzindo assim o risco de

acidentes e doenças ocupacionais que poderiam ocorrer. No que diz respeito ao aspecto econômico do processo *FSW* a modelagem matemática e a simulação numérica dos parâmetros do processo *FSW* resultaram na minimização do número de experimentos a serem realizados para a obtenção dos parâmetros ideais do processo. Por exemplo, a empresa Boeing relatou uma economia de custos de 60% e uma redução de 26% no tempo de produção no projeto de Delta IV e Delta II fabricados em *FSW* para veículos lançadores de satélites e uma empresa norueguesa de extrusão informou que os painéis pré-fabricados *FSW* para estaleiros resultaram na redução da taxa de homem-hora por tonelada em 15%.

Para conferir maior robustez à análise, elaborou-se uma síntese própria dos estudos incluídos. A Tabela 3 consolida as tendências relativas de desempenho por processo e indicador de sustentabilidade. Os símbolos significam: ↑ melhor, = similar, ↓ pior; “↑↑” indica vantagem recorrente e consistente em múltiplos estudos; “?” indica evidência insuficiente ou divergente. Para indicadores de custo, “↑” significa menor custo relativo (melhor).

Tabela 3 — Matriz de tendências de sustentabilidade por processo

Indicador	FSW	GMAW	GTAW	LBW	PAW
Energia específica	↑↑	↓	↓↓	↑↑	↓
Emissões	↑↑	↓	↓↓	↑	↓
Consumíveis/Gases	↑↑	↓↓	↓	↑	↓
Fumos de solda	↑↑	↓	↓	↑↑	↓

Conforme Tabela 3, a energia específica confirma a vantagem de FSW e LBW (maior eficiência térmica), enquanto GTAW tende a ser o mais oneroso e GMAW ocupa posição intermediária; PAW situa-se entre GMAW e GTAW. Em emissões, o padrão acompanha energia e consumíveis: FSW e LBW permanecem melhores, GMAW/GTAW piores pela soma de energia e gases/consumíveis, e PAW se mantém desfavorável. Em consumíveis/gases, FSW é vantajoso (ausência de arame/gás), LBW é favorável (geralmente sem arame; pode requerer gás), GTAW/PAW são desfavoráveis pelo uso de gás (e, às vezes, arame), e GMAW é o mais penalizado (arame + gás). Em fumos de solda, FSW e LBW apresentam os menores níveis, GMAW os maiores, GTAW costuma emitir menos que GMAW, porém permanece acima de FSW/LBW, e PAW segue desfavorável.

Embora esta revisão tenha identificado vantagens importantes do FSW em relação a outros processos de soldagem, deve ser reconhecido que processos convencionais mantêm relevância em diversos contextos devido à maturidade tecnológica, ampla disponibilidade de mão de obra especializada, menores custos de implementação inicial e adaptabilidade a diferentes tipos de ligas e configurações. As vantagens do FSW são consistentes em cenários específicos analisados nesta revisão, reforçando a necessidade de avaliação caso a caso.

### Considerações Finais

O *FSW* proporciona adesão abaixo do ponto de fusão, evitando defeitos comuns, como porosidade e trincas, que são frequentes em métodos convencionais de soldagem. Resultando em soldas de alta qualidade, mantendo a integridade das propriedades mecânicas e químicas dos materiais. Considerando a pergunta de pesquisa “O processo FSW pode ser considerado uma alternativa mais sustentável e eficiente em relação a outros processos para aplicações industriais?” os achados da literatura demonstram que sim, confirmando que o objetivo central desta investigação foi alcançado. O processo de soldagem *FSW* demonstra ser altamente eficaz para unir ligas de alumínio não soldáveis, como as séries 2xxx e 7xxx, que são fundamentais para indústrias aeroespaciais e automotivas. A aplicação do *FSW* substitui processos de rebite em aeronaves, resultando em redução de custos, materiais, peso e aumento da taxa de produção. Pela experiência da Boeing na produção do foguete Delta 2 foi evidenciado que a utilização do *FSW* resultou em uma significativa redução de defeitos em ligas de alumínio em comparação com a soldagem a arco plasma de polaridade variável.

O sucesso do *FSW* em ligas de alumínio motivou sua aplicação em outros materiais não ferrosos, aço e termoplásticos. Os aços austeníticos SS304L e SS316L, frequentemente utilizado nos setores aeroespacial, naval e industrial devido à sua resistência à corrosão, exigem técnicas específicas para sanar defeitos comuns como trincas por corrosão e tensões residuais. A interação complexa de variáveis no *FSW*, influenciada pela geometria da ferramenta e configurações do processo, impacta a qualidade da solda. O *BFSW* surge como uma alternativa promissora ao *CFSW*, eliminando a necessidade de uma placa de suporte inferior, promovendo um regime de fluxo mais uniforme e resultando em soldas de maior qualidade e integridade estrutural.



Quanto aos objetivos específicos de avaliar sustentabilidade e eficiência, os resultados encontrados confirmam que o *FSW* libera menores quantidades de gases nocivos, como monóxido de carbono e dióxido de carbono e reduz significativamente a exposição a fumos de soldagem em comparação ao *GMAW*, representando uma vantagem ambiental expressiva. O *FSW* consome 42% menos energia que o *GMAW*, levando a uma redução significativa nos custos operacionais e no impacto ambiental relacionado à produção de energia. Essa eficiência energética é crucial para a sustentabilidade ambiental e econômica. O *FSW* consome 10% menos material que o *GMAW* para atingir a mesma resistência da junta, resultando em redução de custos de material e minimização da geração de resíduos. O *FSW* contribui para a saúde e segurança dos trabalhadores, bem como para a sustentabilidade ambiental e eficiência econômica dos processos de soldagem. A sustentabilidade do processo *FSW* é quantificada através da sua otimização de recursos, consumo específico mínimo de energia e emissão mínima de gases nocivos e redução máxima de resíduos.

A avaliação do processo *FSW* para os próximos anos na indústria aponta uma tendência promissora, com foco em sustentabilidade, eficiência e segurança ocupacional. Os estudos revisados demonstraram que o *FSW* apresenta vantagens significativas em relação aos métodos convencionais como o *GMAW*, especialmente na redução de emissões de gases nocivos e no consumo de energia. A adoção de processos automatizados e testes de simulação pode aumentar ainda mais essa eficiência. Como a revisão demonstrou, tais características respondem diretamente à pergunta de pesquisa e confirmam o atendimento dos objetivos propostos.

Apesar dos avanços, ainda há poucos estudos referentes à viabilidade econômica da implementação do *FSW* em escala industrial. A automação do processo apresenta inúmeros benefícios, incluindo aumento de eficiência e contribuição para a sustentabilidade, mas torna-se essencial expandir pesquisas que detalhem custos e retorno econômico. Além disso, a busca por novos materiais para fabricação de ferramentas mais resistentes ao desgaste e à estabilidade térmica permanece necessária. A viabilidade de ferramentas compostas que combinem diferentes materiais deve ser explorada para melhorar durabilidade e desempenho durante o *FSW*, sobretudo em ligas de alto ponto de fusão e materiais dissimilares como o aço e o titânio.

## Referências

BALTHAZAR, Marco Antonio Pinto; ANDRADE, Marilda; SOUZA, Deise Ferreira de; BRAGA, André Luiz de Souza. Riscos ocupacionais, condições de trabalho e a saúde dos soldadores. **Revista de Enfermagem UFPE on line**, Recife, v. 12, n. 4, p. 997–1008, 2018. DOI: 10.5205/1981-8963-v12i4a230640p997-1008-2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistaenfermagem/article/view/230640>. Acesso em: 6 ago. 2025.

Bevilacqua M; Ciarapica F; Forcellese A; Simoncini M. Comparison among the environmental impact of solid state and fusion welding processes in joining an aluminium alloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**. Londres, 234(1-2), 2019, 140-156. doi:10.1177/0954405419845572.

BUFFA, Gianluca; CAMPANELLA, Davide; DI LORENZO, Rosa; FRATINI, Livan; INGARAO, Giuseppe. Analysis of Electrical Energy Demands in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, **Procedia Engineering**. Amsterdam, Volume 183, 2017, Pages 206-212, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.022>.

CHOI, Woong Jo; MORROW, Justin D.; PFEFFERKORN, Frank & ZINN, Michael R. The Effects of Welding Parameters and Backing Plate Diffusivity on Energy Consumption in Friction Stir Welding. **Procedia Manufacturing**. Amsterdam, 2017, 10, 382-391. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.011>.

DAWOOD, Hasan I.; MOHAMMED, Kahtan S.; RAJAB, Mumtaz Y. Advantages of the Green Solid State FSW over the Conventional GMAW Process, **Advances in Materials Science and Engineering**. Londres, 105713, 2014, 10 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/105713>.

FEDDAL, I.; CHAIRI, M.; DI BELLA, G. (2025). Analysis of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. **Metals**. Basileia .15(5), 532. <https://doi.org/10.3390/met15050532>.

FERREIRA, Francisco B.; FELICE, Igor; BRITO, Isaque; OLIVEIRA, João Pedro and SANTOS, Telmo. A Review of Orbital Friction Stir Welding. **Metals**. Basileia, 13, nº 6, 2023, 1055. <https://doi.org/10.3390/met13061055>.

GUPTA, A.; SINGH, J.; CHHIBBER, R. Dissimilar welding of austenitic and ferritic steels using nickel and stainless-steel filler: Associated issues. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**. Londres, 238(5), 2023, 2524-2544. doi:10.1177/09544089231159776.

GRANT, Maria J.; BOOTH, Andrew. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information & Libraries Journal**. Nova Jersey. v. 26, n. 2, p. 91-108, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>

HOYOS, E.; SERNA, M.C.; DE BACKER, J.; MARTIN, J. Sustainability Score Comparison of Welding Strategies for the Manufacturing of Electric Transportation Components. **Sustainability**. Basileia, 15, 2023, 8650. <https://doi.org/10.3390/su15118650>.

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. 1st. ed. Lyon (FR): **International Agency for Research on Cancer**. Lyon, 2018. p. 310. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31268644/>. Acesso em: 28 jan. 2025.

JAMAL, Jaber; DARRAS, Basil; KISHAWY, Hossam. A Study on sustainability assessment of welding processes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**. Londres, 234(3), 2019, 501-512. doi:10.1177/0954405419875355.

LOHWASSER, Daniela.; CHEN, Zhan. Friction stir welding: from basics to applications. A volume in **Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies**. Sawston. 2010. 424 p.

MAJEED, Tanveer; WAHID, Mohd Atif.; ALAM, Md Nadeem; MEHTA, Yashwant; SIDDIQUEE, A. N. Friction stir welding: a sustainable manufacturing process. **Materials Today: Proceedings**. Amsterdam. Volume 46, Part 15, 2021, Pages 6558-6563, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.025>.

MENDONÇA, Roberto Ramon. **Soldagem por fricção e mistura mecânica de aço austenítico alto manganês com efeito TRIP**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MISHRA, Rajiv S.; MA, Zongyi. Friction Stir welding and processing. **Materials Science and Engineering: R: Reports**. Amsterdam. Volume 50, Issues 1–2, 2005, Pages 1-78, ISSN 0927-796X, <https://doi.org/10.1016/j.msar.2005.07.001>.

MOHAMED, I. A. Habba.; MOHAMED, M. Z. Ahmed. Friction stir welding-based technologies: A comprehensive review from the sustainable manufacturing perspectives. **Journal of Materials Research and Technology**. Rio de Janeiro. Volume 38, 2025, Pages 1-29, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.184>.

SHRIVASTAVA, Amber; KRONES, Manuela; PFEFFERKORN, Frank. E. Comparison of energy consumption and environmental impact of friction Stir welding and gas metal arc welding for aluminum. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. Amsterdam. Volume 9, 2015, Pages 159-168, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.10.001>.

SUED, M. K.; PONS, D.; LAVROFF, J.; WONG, E.H. Design features for bobbin friction stir welding tools: development of a conceptual model linking the underlying physics to the production process. **Materials & Design**. Amsterdam. Volume 54, 2014, Pages 632-643, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.057>.



SUED, M. K.; SAMSURI, S. S. M.; KASSIM, M. K. A. M. and NASIR, S. N. N. M. Sustainability of welding process through bobbin friction stir welding. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Bristol. 318. 2018. DOI 10.1088/1757-899X/318/1/012068.

THOMAS, Wayne Morris; MURCH, Michael George; NICHOLAS, Edward David; TEMPLE-SMITH, Peter; NEEDHAM, James Christopher; DAWES, Christopher John. **Improvements relating to friction welding**. European Patent Office (EP). Patent EP0615480A1, 17 mai. 1995.

WAHID, Mohd. Atif; KHAN, Zahid A.; SIDDIQUEE, Arshad Noor. Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. Pequim. Volume 28, Issue 2, 2018, Pages 193-219, ISSN 1003-6326, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64653-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64653-9).