



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS CARVALHO DE LIMA

ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS NA SOLDAGEM: RECICLAGEM E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

João Pessoa – PB

2024

LUCAS CARVALHO DE LIMA

**ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS NA SOLDAGEM: RECICLAGEM E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba para conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Siderley F. Albuquerque.

João Pessoa – PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L732a Lima, Lucas Carvalho de.

ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS NA SOLDAGEM: RECICLAGEM E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA / Lucas Carvalho de Lima. - João
Pessoa, 2024.

42 f.

Orientação: Siderley Albuquerque.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Soldagem. 2. Sustentabilidade. 3. Economia
Circular. 4. Reciclagem. 5. Eficiência Energética. I.
Albuquerque, Siderley. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 621(043.2)

LUCAS CARVALHO DE LIMA

**ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS NA SOLDAGEM: RECICLAGEM E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresento a Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Siderley Fernandes Albuquerque.

DATA DE APROVAÇÃO 22 / 10 / 2024

BANCA EXAMINADORA

Siderley Fernandes Albuquerque

Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque (Orientador)

Jacques Cesar dos Santos

Prof. Dr. Jacques Cesar dos Santos (Avaliador)

Koje Daniel U. Mishina

**Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina
(Avaliador)**

JOÃO PESSOA – PB
2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar e me dar forças em cada etapa dessa jornada. Sem Sua graça e proteção, eu não estaria aqui hoje.

A minha mãe, Maria Auxiliadora Leite de Carvalho, que foi a principal responsável por eu chegar até aqui. Sua dedicação e apoio incondicional foram a base de tudo.

A minha eterna gratidão à minha querida avó Josefa e ao meu padrasto Gervalho, que sempre estiveram ao meu lado com amor e encorajamento.

Aos meus colegas de trabalho e aos amigos do curso, Atilyo, Tonny, Ruy, Pedro, Matheus, Sandro, Bruno, Dennis, Eduardo, Raphael William e Ivo, que compartilharam comigo os desafios e conquistas desta trajetória acadêmica.

Por fim, ao meu orientador, professor Siderley, pela paciência, orientação e compreensão durante esta reta final de curso. Seu apoio foi fundamental para a conclusão deste trabalho. A todos, o meu muito obrigado!

EPÍGRAFE

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza dos seus sonhos. A perseverança, mais do que a sorte, é o que transforma esforço em realização. Dedicar-se com fé e determinação ao que se faz hoje é plantar as sementes de um amanhã próspero.”

(Adaptado de Eleanor Roosevelt)

RESUMO

Este trabalho investiga abordagens sustentáveis nos processos de soldagem, com foco na reciclagem de resíduos, na eficiência energética e na economia circular. A soldagem, essencial em diversos setores industriais, apresenta desafios ambientais significativos, como a geração de resíduos metálicos, escórias e gases poluentes. Dentro do conceito de economia circular, a reciclagem de subprodutos da soldagem é analisada como uma solução viável para reduzir o desperdício e a extração de novas matérias-primas. A reutilização de subprodutos da soldagem em materiais de construção e outras indústrias abre portas para uma integração mais eficiente da soldagem nos processos produtivos sustentáveis. Tecnologias avançadas, como a soldagem a laser e por fricção, também são discutidas por sua eficiência energética e capacidade de gerar menos resíduos, alinhando-se aos princípios da economia circular. A automação e o controle digital de parâmetros são destacados como ferramentas que podem otimizar o consumo de energia e minimizar o impacto ambiental. O trabalho aponta que práticas sustentáveis de soldagem, quando alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), têm o potencial de transformar a produção industrial, promovendo um ciclo de reaproveitamento contínuo de materiais e energia.

Palavras-chave: Soldagem; Sustentabilidade; Economia Circular; Reciclagem; Eficiência Energética.

ABSTRACT

This paper investigates sustainable approaches in welding processes, focusing on waste recycling, energy efficiency, and the circular economy. Welding, essential in various industrial sectors, presents significant environmental challenges, such as the generation of metal waste, slag, and polluting gases. Within the circular economy concept, recycling welding by-products is analyzed as a viable solution to reduce waste and the extraction of new raw materials. The reuse of welding by-products in construction materials and other industries opens doors for more efficient integration of welding into sustainable production processes. Advanced technologies, such as laser and friction welding, are also discussed for their energy efficiency and ability to generate less waste, aligning with the principles of the circular economy. Automation and digital control of parameters are highlighted as tools that can optimize energy consumption and minimize environmental impact. The paper points out that sustainable welding practices, when aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), have the potential to transform industrial production, promoting a continuous cycle of material and energy reuse.

Keywords: *Welding; Sustainability; Circular Economy; Recycling; Energy Efficiency.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução dos processos de soldagem ao longo da noite	17
Figura 2 - Tecnologias utilizadas nos processos de soldagem	20
Figura 3 - Ilustração da comparação da economia circular e linear.....	21
Figura 4 - Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	23
Figura 5 - Sistema básico de uma máquina de soldagem laser	26
Figura 6 - Processo de solda por fricção	27
Figura 7 - Resultados dos ensaios de microdureza ao longo do cordão de solda	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais processos de soldagem e aplicações	17
Tabela 2 - Materiais tóxicos possíveis de serem encontrados durante a soldagem	24
Tabela 3 - Matriz de resultados da avaliação dos processos GMAW, LW e FW.	30
Tabela 4 - Principais matérias-primas utilizadas na fabricação de consumíveis de soldagem	34

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV – Análise do Ciclo de Vida

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

LBW - *Laser Beam Welding* (Soldagem a Laser)

FW - *Friction Welding* (Soldagem por Fricção)

MAG - *Metal Active Gas* (Soldagem MAG)

GMAW - *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco de Gás Metálico)

CPS - *Cyber Physical System* (Sistemas Ciberfísicos)

PNRS - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

AWS - *American Welding Society*

ZTA - Zona Termicamente Afetada

SAE - *Society of Automotive Engineers*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivos Gerais	13
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 HISTÓRICO E IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS	15
2.1.1 Automação e Indústria 4.0 nos Processos de Soldagem	19
2.2 ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM	20
2.2.1 Integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) na Indústria	22
2.3 CONTROLE AMBIENTAL E REDUÇÃO DE EMISSÕES NA SOLDAGEM	23
2.3.1 Reutilização e Reciclagem de Resíduos na Soldagem	24
2.4 SOLDAGEM A LASER E POR FRICÇÃO VERSUS SOLDAGEM TRADICIONAL MAG	25
2.4.1 Solda a Laser (Laser Beam Welding – LBW)	25
2.4.2 Solda por Fricção (Friction Willing – FW)	27
2.4.3 Comparação entre Solda a Laser e Solda por Fricção	28
2.4.4 Impactos Ambientais dos Processos de Soldagem	30
3 METODOLOGIA	31
4 ESTUDOS DE CASO SOBRE SUSTENTABILIDADE NA SOLDAGEM	32
4.1 RECICLAGEM DE CAVACOS DE TITÂNIO PARA A CONFECÇÃO DE ELETRODOS DE SOLDA.....	32

4.2 REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE FABRICAÇÃO DE CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM EM TIJOLOS DE CERÂMICA VERMELHA	34
5. DISCUSSÕES.....	36
6. CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos industriais mais antigos e fundamentais, essencial para a união de materiais metálicos em diversos setores da economia. Sua aplicação vai desde a fabricação de componentes em indústrias automotivas e aeroespaciais até grandes obras de infraestrutura, como pontes e navios. Com o passar dos anos, a soldagem evoluiu significativamente, incorporando novas tecnologias e métodos, como a automação e a robótica, que permitiram um salto na precisão, controle e eficiência dos processos. A chegada da Indústria 4.0, que introduziu conceitos como sistemas ciberfísicos e a integração de dados em tempo real, revolucionou ainda mais o setor, proporcionando um ambiente em que a soldagem se tornou mais flexível, conectada e produtiva.

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, a soldagem enfrenta grandes desafios quando se trata de sustentabilidade. A crescente preocupação com os impactos ambientais gerados pela indústria como um todo exige que se repensem os processos produtivos, incluindo a soldagem. Promover a sustentabilidade na indústria é crucial para atender às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que buscam equilibrar o crescimento econômico com a preservação ambiental e o uso consciente dos recursos naturais. Nesse contexto, os resíduos gerados pela soldagem, como escórias e gases poluentes, representam uma significativa fonte de impacto ambiental, especialmente quando não tratados adequadamente.

A reciclagem de resíduos gerados pela soldagem se apresenta como uma solução prática para reduzir o impacto ambiental. Um exemplo é a reutilização de escórias em materiais de construção, como argamassas, contribuindo para um ciclo de produção mais sustentável, ou o reaproveitamento de cavacos de metal em revestimentos protetores e peças de alta resistência. Esses processos não apenas reduzem o volume de resíduos descartados em aterros industriais, como também promovem a economia circular, transformando subprodutos em recursos valiosos para outras etapas de produção.

Além disso, há uma crescente preocupação com o consumo de energia nos processos de soldagem. Métodos convencionais, como a soldagem a arco elétrico, demandam grandes quantidades de energia e, em muitos casos, são responsáveis por emissões significativas de gases de efeito estufa. A adoção de tecnologias mais sustentáveis, como a soldagem a laser, que consome menos energia e gera menor quantidade de resíduos, é uma alternativa promissora. Contudo, a transição para esses métodos exige investimentos em pesquisa e desenvolvimento, além de um esforço coordenado entre governos, indústrias e centros de inovação para viabilizar sua implementação em larga escala.

Outra área que merece destaque é o desenvolvimento de novos materiais que promovam a sustentabilidade nos processos de soldagem. O uso de ligas metálicas de alta durabilidade e resistência, que necessitam de menos manutenção e substituição, pode reduzir o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do produto. Da mesma forma, a utilização de consumíveis de soldagem projetados para gerar menos resíduos durante o processo também representa uma área importante de inovação. A pesquisa em novos revestimentos e materiais que sejam compatíveis com os princípios da sustentabilidade pode abrir novas frentes de atuação na indústria de soldagem.

Neste contexto, este trabalho busca explorar o potencial transformador das práticas sustentáveis na soldagem, abordando temas como a reciclagem de resíduos, a eficiência energética, o desenvolvimento de novos materiais e a adoção de tecnologias mais limpas. Por meio de uma revisão abrangente da literatura e análise de estudos de caso, serão examinados os avanços e desafios que envolvem a sustentabilidade nos processos de soldagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Analisar a viabilidade e os impactos da implementação de práticas sustentáveis nos processos de soldagem, com foco em reciclagem de resíduos e eficiência energética, visando a redução dos impactos ambientais, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a economia circular.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais resíduos gerados nos processos de soldagem e analisar os impactos ambientais associados, com foco na reciclagem e redução de emissões poluentes;
- Avaliar as tecnologias emergentes que promovem a sustentabilidade nos processos de soldagem, como soldagem a laser, fricção e o uso de robótica e automação;
- Analisar os desafios técnicos e econômicos na implementação de práticas sustentáveis, incluindo a viabilidade de adotar soluções de reciclagem e tecnologias limpas na soldagem;
- Estudar casos de sucesso na reutilização de subprodutos da soldagem e na aplicação da economia circular, promovendo práticas que reduzam o impacto ambiental e aumentem a eficiência dos processos industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A soldagem é um processo amplamente utilizado em diversos setores industriais, sendo essencial para a fabricação, manutenção e reparo de componentes metálicos. Sua importância reside na capacidade de unir peças metálicas com alta resistência, permitindo a criação de estruturas robustas e duradouras. Esse processo evoluiu ao longo dos séculos, acompanhando o desenvolvimento tecnológico e as crescentes demandas da indústria moderna, desde a simples junção de peças metálicas até a construção de produtos altamente complexos, como navios, aeronaves e estruturas metálicas para grandes obras de engenharia (Pinheiro e Reis filho, 2023).

No contexto da indústria moderna, destaca-se a crescente integração da economia circular. A economia circular visa prolongar o ciclo de vida dos materiais, promovendo o reaproveitamento de resíduos, a reciclagem e a redução do consumo de novos recursos (Miyashiro *et al.*, 2023). Além disso, no contexto da economia circular na soldagem, busca-se não apenas prolongar o ciclo de vida dos materiais, mas também reduzir a geração de resíduos tóxicos associados aos processos de soldagem, como escórias e gases poluentes.

A automação no setor de soldagem também tem desempenhado um papel fundamental no aumento da eficiência industrial. De acordo com Faria, Filleti e Helleno (2022), a introdução de robôs em células de soldagem e a aplicação de tecnologias ligadas à Indústria 4.0 têm permitido um controle mais preciso sobre os parâmetros de soldagem, garantindo maior repetibilidade e qualidade nas juntas metálicas. A automação permite a realização de soldas complexas com maior velocidade e menor margem de erro humano, além de possibilitar a execução de tarefas em ambientes adversos, reduzindo a exposição dos trabalhadores a riscos. O uso de sensores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real contribui não só para a eficiência do processo, mas também para a redução de retrabalho e desperdícios.

Outro aspecto relevante na evolução dos processos de soldagem é o impacto ambiental gerado por resíduos, emissões de gases e consumo energético. Dentro da economia circular, a preocupação com a sustentabilidade é central. Estudos, como o realizado por Murad *et al.* (2020), demonstram que é possível reduzir significativamente a quantidade de resíduos perigosos gerados pelos processos de soldagem através da escolha correta de parâmetros operacionais, como a velocidade de aplicação de revestimentos e o tipo de material utilizado.

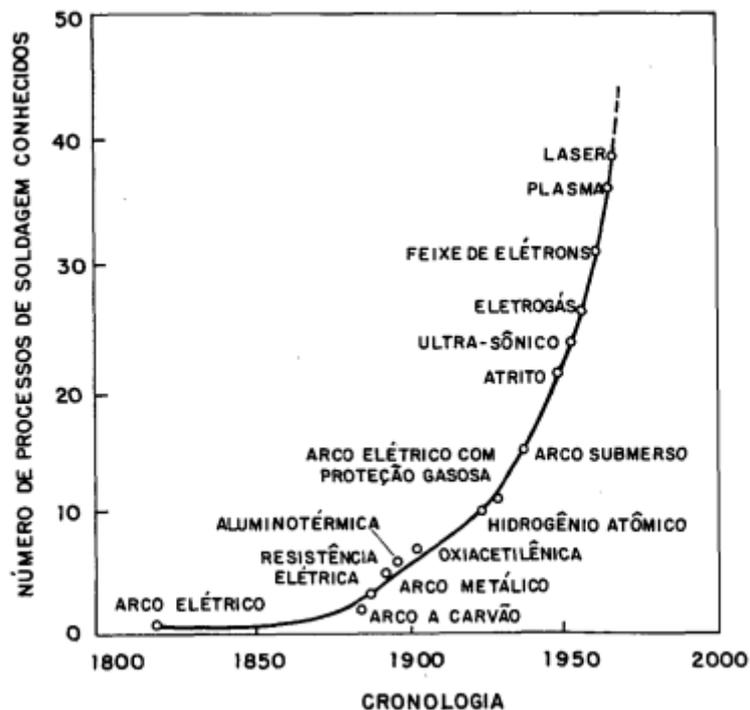
Portanto, o processo de soldagem na era moderna se encontra em uma interseção entre eficiência, inovação tecnológica e sustentabilidade. A incorporação de princípios da economia circular e o uso de novas tecnologias de automação tornam a soldagem não apenas um processo técnico, mas uma ferramenta estratégica para a criação de valor em sistemas produtivos mais sustentáveis e competitivos.

2.1 HISTÓRICO E IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS

A soldagem é um dos processos industriais mais antigos e essenciais, com origens que remontam a milhares de anos. Desde as primeiras técnicas de forjamento usadas por ferreiros na antiguidade, a soldagem passou por transformações significativas ao longo da história. No século XIX, a invenção da

soldagem a arco elétrico por Humphry Davy e, mais tarde, a introdução de eletrodos revestidos, revolucionaram a forma como os metais eram unidos, permitindo maior controle e eficiência no processo (Modenesi; Marques; Santos, 2012). A Figura 1 mostra a evolução dos tipos de processos de soldagem ao longo dos anos.

Figura 1 - Evolução dos processos de soldagem ao longo da noite



Fonte: Wainer; Brandi; Mello (2011, p.1).

A importância da soldagem nos processos industriais está diretamente relacionada à sua versatilidade e capacidade de unir diferentes tipos de materiais metálicos de maneira eficiente e durável. Nos setores automotivo e aeroespacial, por exemplo, a soldagem é fundamental para garantir a integridade estrutural de componentes críticos, permitindo a construção de veículos e aeronaves mais seguros e leves. Além disso, a soldagem desempenha um papel crucial na fabricação de infraestrutura pesada, como pontes e plataformas de petróleo, onde a resistência e durabilidade das juntas soldadas são essenciais para suportar condições extremas de operação (Pinheiro e Filho, 2023).

Conforme Bianchi (2014), a Tabela 1 descreve os principais processos de soldagem, suas fontes de calor, agentes protetores e aplicações. Processos como a soldagem por eletro-escória são usados em aços de grande espessura, enquanto a soldagem MIG/MAG, que utiliza gases como argônio e dióxido de carbono, é amplamente empregada em tubos e chapas. Métodos mais especializados, como a soldagem a laser e por feixe eletrônico, são comuns nas indústrias aeroespacial e nuclear devido à precisão e à versatilidade para soldar diversos materiais.

Tabela 1 - Principais processos de soldagem e aplicações

Processo	Fontes de Calor	Principais Aplicações	Principais Agentes Poluentes e Metais Tóxicos
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da eletro-escória	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Soldagem de materiais com grandes espessuras.	Óxidos de nitrogênio (NOx), fumos metálicos, gases tóxicos. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Manganês (Mn)
Soldagem por arco submerso	Arco elétrico	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.	Fumos metálicos, partículas finas. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Silício (Si)
Soldagem com eletrodos revestidos	Arco elétrico	Soldagem de quase todos os metais exceto cobre puro, metais reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.	Óxidos metálicos, monóxido de carbono, dióxido de enxofre. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Manganês (Mn)
Soldagem com arame tubular	Arco elétrico	Soldagem de aços carbono.	Óxidos de nitrogênio (NOx), fumos metálicos, monóxido de carbono (CO). Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Ferro (Fe)

Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Soldagem de aço carbono, baixa e alta liga. Não ferrosos. Todas as posições. Soldagem de tubos e chapas.	Gases como CO ₂ , óxidos de nitrogênio, ozônio, fumos metálicos. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Manganês (Mn)
Soldagem a plasma	Arco elétrico	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn e Be.	Óxidos de nitrogênio (NO _x), ozônio (O ₃), fumos metálicos. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Chumbo (Pb)
Soldagem TIG	Arco elétrico	Soldagem de todos os metais exceto Zn e Be. Soldagem de não ferrosos e aço inox.	Óxidos de nitrogênio, fumos metálicos, ozônio. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Titânio (Ti)
Soldagem por feixe eletrônico	Feixe eletrônico	Soldagem de praticamente todos os materiais. Indústria nuclear e aeroespacial.	Gases tóxicos, radiação. Metais: Tório (Th), Berílio (Be), Urânio (U)
Soldagem a laser	Feixe de luz	Soldagem de praticamente todos os materiais. Indústria nuclear e aeroespacial.	Fumos metálicos, gases tóxicos. Metais: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Berílio (Be)
Soldagem a gás	Chama oxiacetilênica	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas.	Gases de combustão (CO, CO ₂), vapores de metais. Metais: Chumbo (Pb), Zinco (Zn), Cobre (Cu)

Fonte: Modificada pelo autor (2024) e adaptada de Modenesi (2011) *apud* Bianchi (2014).

Ao longo do século XX, o avanço da tecnologia de soldagem, especialmente com a automação e a robótica, tornou o processo ainda mais eficiente e seguro. A introdução de robôs de soldagem e sistemas de controle automatizados possibilitou a padronização da qualidade das juntas soldadas, reduzindo a variabilidade causada pela operação manual e aumentando a produtividade em linhas de montagem. Esses avanços tecnológicos têm sido

particularmente importantes em indústrias de grande escala, onde a repetitividade e a precisão são cruciais para garantir produtos de alta qualidade e reduzir custos de produção (Faria; Filleti; Helleno, 2022).

2.1.1 Automação e Indústria 4.0 nos Processos de Soldagem

A Indústria 4.0 trouxe avanços significativos para os processos de soldagem, integrando tecnologias digitais e automação que aprimoram a precisão, a eficiência e a segurança nas operações. Um dos principais benefícios é a introdução dos sistemas ciberfísicos – CPS (Cyber Physical System), que permitem o monitoramento e o ajuste automático de variáveis, como temperatura e corrente elétrica, em tempo real, que vai além do processo automatizado, como ilustra a Figura 2. Isso resulta em menos desperdício de material e menor consumo de energia, otimizando a produtividade e garantindo a qualidade das soldas (Vaidya; Ambad; Bhosle, 2018 apud Faria; Filleti; Helleno, 2022).

A implementação de robôs de soldagem tem sido uma estratégia eficaz para aumentar a repetibilidade e a precisão do processo, eliminando as variações comuns nas operações manuais. Esses robôs podem ser programados para lidar com diversos métodos de soldagem, como MIG, TIG e soldagem a laser, oferecendo maior flexibilidade nas linhas de produção. Outra inovação relevante é o uso da inteligência artificial (IA) e do aprendizado de máquina, que permitem ajustes automáticos durante a soldagem, melhorando a qualidade das juntas e prevenindo erros operacionais (Pinheiro e Filho, 2023).

Tecnologias como realidade aumentada (AR) e realidade virtual (VR) também têm contribuído significativamente para os processos de soldagem, ao permitir simulações que otimizam as operações antes de sua execução real. Essas ferramentas proporcionam economia de tempo e recursos, além de melhorar a capacitação dos operadores (Faria; Filleti; Helleno, 2022).

Figura 2 - Tecnologias utilizadas nos processos de soldagem

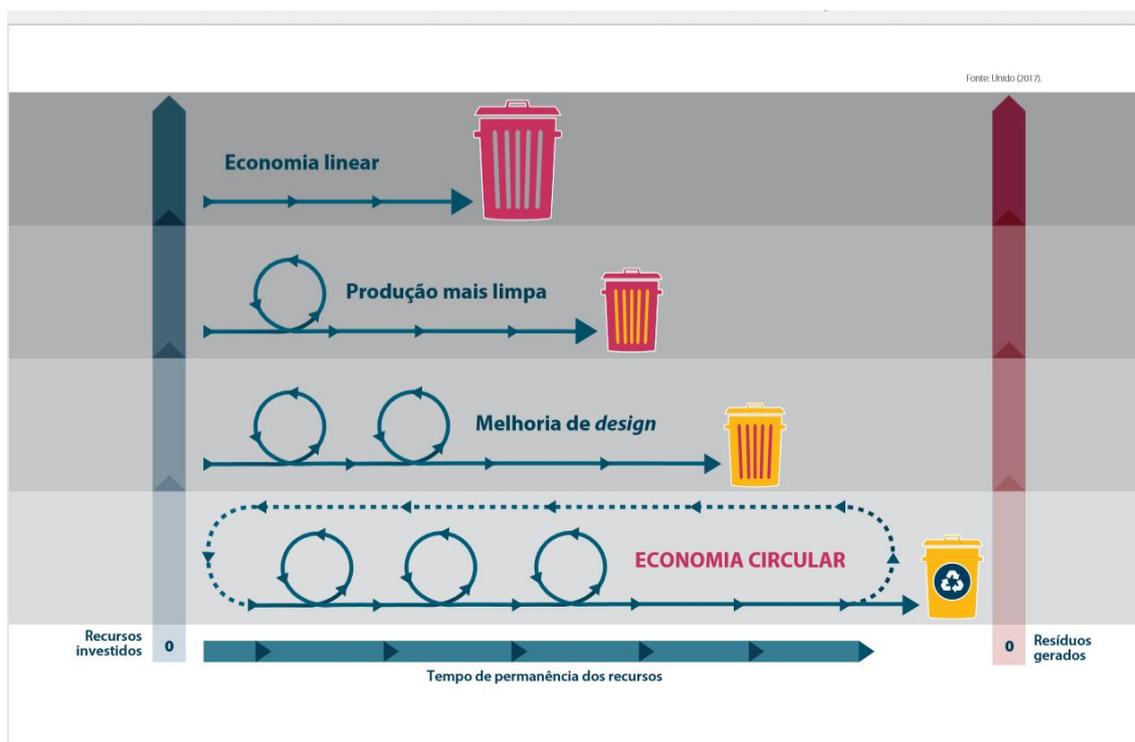


Fonte: Faria; Filleti; Helleno (2022, p. 11).

2.2 ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

A economia circular é um modelo econômico que visa transformar a maneira como a sociedade produz e consome, buscando reduzir o desperdício e maximizar o uso dos recursos disponíveis. Em vez de seguir o modelo linear tradicional de "extrair, usar e descartar", a economia circular propõe um ciclo contínuo em que os materiais e produtos são reutilizados, reciclados e regenerados, prolongando ao máximo sua vida útil, conforme ilustra a Figura 3. Esse sistema é baseado em três princípios fundamentais: preservar e aprimorar o capital natural, otimizar o uso dos recursos e eliminar resíduos e externalidades negativas (Wautelet, 2018 apud Klug *et al.*, 2021).

Figura 3 - Ilustração da comparação da economia circular e linear



Fonte: SENAI.

Na prática, a economia circular funciona ao manter os produtos e materiais em circulação pelo maior tempo possível, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos e minimizando a geração de resíduos. Esse modelo incentiva práticas como a reciclagem, a reutilização, a remanufatura e o design de produtos mais duráveis e fáceis de reparar. Com isso, evita-se o descarte prematuro de itens e o acúmulo de resíduos em aterros sanitários, promovendo uma economia mais eficiente e sustentável (Miyashiro *et al.*, 2023).

Apenas 9% da economia global pode ser considerada circular, de acordo com dados da ONU (2019 apud Miyashiro *et al.*, 2023). Isso significa que, das 92,8 bilhões de toneladas de resíduos gerados anualmente por indústrias e residências, menos de 10% são reciclados ou reaproveitados no ciclo produtivo. Esses números indicam uma enorme oportunidade para expandir o reaproveitamento de materiais e avançar rumo a uma economia mais eficiente e sustentável.

Além disso, a economia circular incentiva a inovação nos processos produtivos, ao propor que os resíduos gerados em uma etapa do ciclo de produção sejam reaproveitados como insumos em outras indústrias ou processos. Essa interligação entre diferentes setores econômicos cria novos fluxos de valor, onde subprodutos que antes eram considerados lixo podem ser transformados em novos recursos. Assim, o modelo circular não apenas preserva o meio ambiente, mas também promove oportunidades econômicas ao reduzir custos com matérias-primas e gerar novos negócios baseados no reaproveitamento de materiais (*Ellen MacArthur Foundation, 2021 apud Klug et al., 2021*).

2.2.1 Integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) na Indústria

A integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) na indústria é uma iniciativa global que visa reduzir os impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável, Figura 4. A soldagem, como processo essencial em diversas áreas industriais, pode contribuir significativamente para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), que busca uma industrialização sustentável e a inovação (Smallbone; Paes, 2022).

Práticas relacionadas à economia circular e à gestão eficiente de resíduos são diretamente ligadas ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). A reutilização de materiais, como resíduos de soldagem e subprodutos industriais, ajuda a minimizar a geração de resíduos e a otimizar o uso de recursos naturais (Trigo *et al.*, 2023). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) desempenha um papel fundamental na promoção de práticas industriais mais sustentáveis e está alinhada aos ODS, incentivando a reciclagem e a reutilização de resíduos (Trigo *et al.*, 2023).

A implementação dessas práticas enfrenta desafios, como o alto custo inicial para a adaptação das indústrias e a necessidade de qualificação técnica. Entretanto, as iniciativas em curso, como o suporte da Associação Brasileira de Soldagem (ABS) e da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), demonstram que é possível avançar na integração das metas dos ODS, especialmente em

termos de capacitação e desenvolvimento de tecnologias que reduzam os impactos ambientais (Smallbone; Paes, 2022).

Além disso, a seleção de materiais com critérios ambientais visa reduzir os impactos ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração até o descarte ou reciclagem. Segundo Paschoalino (2013), fatores como reciclabilidade, energia incorporada, durabilidade e potencial de reutilização são fundamentais para minimizar o consumo de recursos e a geração de resíduos. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) torna-se crucial para avaliar esses impactos em todas as fases de uso do material, permitindo decisões mais sustentáveis. O Ecodesign, por exemplo, propõe soluções que promovem a eficiência dos processos, o uso racional de recursos e a minimização de desperdícios.

Figura 4 - Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Organização das Nações Unidas.

2.3 CONTROLE AMBIENTAL E REDUÇÃO DE EMISSÕES NA SOLDAGEM

Na soldagem, o controle dos gases de proteção é crucial para reduzir os impactos ambientais e melhorar a qualidade do processo. Gases como o argônio e o dióxido de carbono, quando utilizados de forma adequada, ajudam a proteger o cordão de solda e minimizam a liberação de fumos tóxicos, que podem ser prejudiciais tanto para o meio ambiente quanto para os trabalhadores (Ferreira Filho, Teixeira e Ferraresi, 2011). Conforme Bianchi (2014), a emissão de fumos

metálicos é um dos maiores desafios ambientais enfrentados nas indústrias de soldagem, sendo necessária a implementação de medidas que controlem essas emissões para garantir um ambiente de trabalho mais seguro e sustentável.

Apesar da prioridade dada à substituição do chumbo em ligas de soldagem, o desenvolvimento de alternativas tem encontrado desafios. As ligas de estanho-prata-cobre, por exemplo, têm demonstrado bons resultados na eletrônica, mas apresentam um custo consideravelmente maior. Além disso, a adaptação dos processos industriais para essas novas ligas requer modificações significativas nas cadeias de suprimento e maquinários, o que retarda a adoção em larga escala (Brandi, 2012).

A Tabela 2 apresenta uma visão detalhada dos materiais base ou de adição utilizados na soldagem e os metais que podem estar presentes nesses processos, destacando a variedade de elementos químicos envolvidos e seu potencial influência no meio ambiente e na saúde ocupacional.

Tabela 2 - Materiais tóxicos possíveis de serem encontrados durante a soldagem

Material base ou metal de adição	Metais que podem estar presentes
Aços carbono e baixa liga	Crômio, Manganês, Vanádio
Aços inoxidáveis	Crômio, Níquel
Aços ao manganês e aços de elevada dureza	Crômio, Cobalto, Manganês, Níquel, Vanádio
Ligas de cobre	Berílio, Crômio, Cobre, Chumbo, Níquel
Aços revestidos ou cobreados	Cádmio, Crômio, Cobre, Chumbo, Níquel, Prata

Fonte: AWS Welding Handbook v. 5, p. 395 *apud* BIANCHI, 2014

2.3.1 Reutilização e Reciclagem de Resíduos na Soldagem

A reutilização de resíduos gerados durante o processo de soldagem como respingos e consumíveis, é uma prática importante para reduzir o impacto

ambiental. Cavacos metálicos, por exemplo, podem ser reaproveitados na fabricação de eletrodos e na deposição de revestimentos duros por soldagem, como no caso do titânio, evitando o descarte de cavacos e promovendo a sustentabilidade industrial (Fagundes Júnior; Ventrella; Gallego, 2015). Os respingos de solda, por sua vez, podem ser incorporados na fabricação de cimento, agregando valor ao material de construção e evitando o descarte inadequado de resíduos industriais (Paranhos e Dias, 2007).

Consumíveis da soldagem, como escórias e outros materiais ricos em metais tóxicos, podem ser reciclados e utilizados na produção de tijolos de cerâmica vermelha, o que impede que esses metais, como cádmio, chumbo e níquel, sejam enviados para aterros sanitários, onde poderiam causar sérios impactos ambientais (Groenner, 2007). Esses tipos de reaproveitamento de resíduos são fundamentais para minimizar o impacto ambiental e fomentar a economia circular na indústria, permitindo que subprodutos que seriam descartados retornem ao ciclo produtivo de forma útil e eficiente.

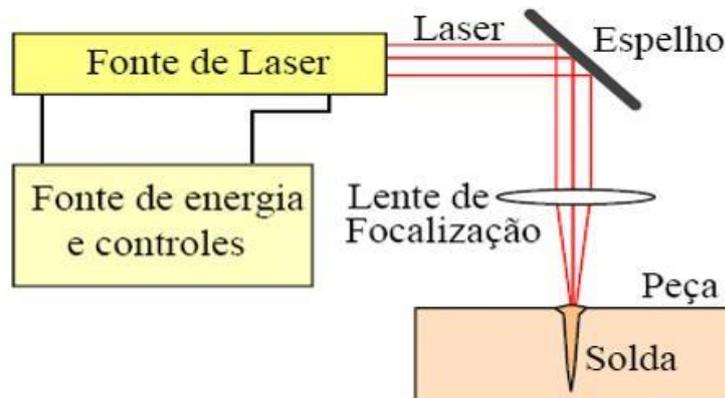
2.4 SOLDAGEM A LASER E POR FRICÇÃO VERSUS SOLDAGEM TRADICIONAL MAG

2.4.1 Solda a Laser (Laser Beam Welding – LBW)

A solda a laser, conhecida como Laser Beam Welding (LBW), é um processo de união que utiliza a energia de um feixe de laser altamente concentrado para fundir e unir as superfícies dos materiais. O laser é gerado por meio da excitação de um meio ativo (como gás CO₂ ou cristais de Nd), que emite fótons coerentes em um comprimento de onda específico. Esses fótons são amplificados e direcionados através de lentes focais, formando um feixe de alta intensidade (Modenesi; Bracarense; Marques, 2012, apud Sommacal, 2015).

O feixe de fótons é então focalizado sobre a região de solda, aquecendo-a rapidamente até a temperatura de fusão. O processo é caracterizado pela capacidade de concentrar uma grande quantidade de energia em uma área extremamente pequena, gerando uma solda precisa e com mínima distorção térmica (Sommacal, 2015). A Figura 5 ilustra como funciona o sistema LBW.

Figura 5 – Sistema básico de uma máquina de soldagem laser



Fonte: Modenesi, Bracarense e Marques (2014) *apud* SOMMACAL (2015, p. 26).

A soldagem a laser permite uma alta concentração de energia em uma pequena área, resultando em uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC) reduzida, o que minimiza deformações e tensões residuais. O processo é rápido e adequado para automação, proporcionando maior produtividade e permitindo a soldagem de materiais dissimilares sem a necessidade de material de adição (Sommacal, 2015).

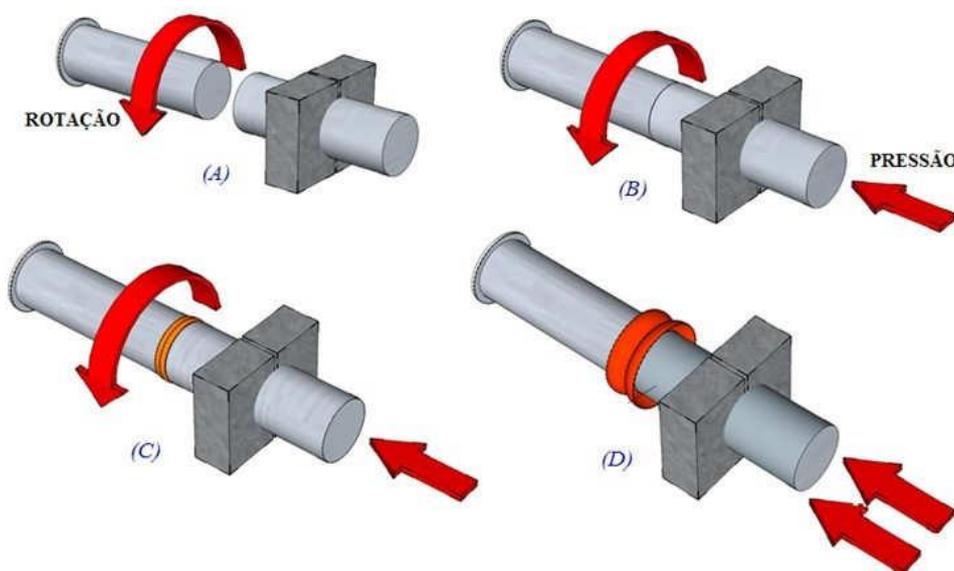
O alto custo inicial dos equipamentos é uma das principais desvantagens da soldagem a laser. Além disso, o processo exige um ambiente controlado e apresenta limitações para soldagem de peças muito espessas. A precisão na preparação das juntas e o controle rigoroso dos parâmetros do feixe são essenciais para garantir a robustez da solda (Sommacal, 2015).

Do ponto de vista da sustentabilidade, a solda a laser apresenta benefícios importantes. O processo gera menos resíduos e consome menos energia quando comparado aos métodos de soldagem tradicionais, como a soldagem MAG. Isso faz com que o laser seja uma opção mais alinhada com as práticas industriais sustentáveis, que buscam minimizar o impacto ambiental das operações de fabricação.

2.4.2 Solda por Fricção (Friction Willing – FW)

A soldagem por fricção (Friction Welding - FW) é um processo de união em estado sólido no qual o calor é gerado pelo atrito entre duas superfícies metálicas. As principais variáveis controladas no processo são a velocidade de rotação, a pressão axial e o tempo de solda. Uma peça é mantida estacionária enquanto a outra é rotacionada em alta velocidade, gerando calor suficiente para amolecer as superfícies sem atingir o ponto de fusão, conforme Figura 6. Após o aquecimento, a rotação é interrompida e uma força axial elevada é aplicada para consolidar a junta por deformação plástica. O processo resulta em uma ligação sólida e sem necessidade de material de adição (ASM Metals Handbook, 1993, apud Sbalchiero, 2016).

Figura 6 – Processo de solda por fricção



Fonte: Fusion (2009) apud Sbalchiero (2016, p. 13).

Entre as principais vantagens da soldagem por fricção, destaca-se sua alta eficiência energética, pois não exige a fusão completa do material. Esse processo também é altamente eficaz para unir materiais dissimilares, como alumínio e aço, sem comprometer a resistência da junta devido à ausência de

fusão e segregação na zona soldada. Além disso, a menor geração de calor contribui para a redução de distorções e defeitos estruturais nas peças, o que torna o processo especialmente indicado para componentes cilíndricos e de grandes dimensões (Sbalchiero, 2016).

O processo de soldagem por fricção apresenta algumas limitações: a principal delas é a necessidade de que ao menos uma das peças seja rotacionada, o que limita sua aplicação a geometrias simples. Além disso, o controle preciso dos parâmetros do processo já mencionados é crucial para garantir a qualidade da solda. Variações nesses parâmetros podem influenciar diretamente a resistência e morfologia da junta (Sommacal, 2015).

Do ponto de vista da sustentabilidade, a soldagem por fricção se destaca como um processo limpo e eficiente. Ela consome menos energia que os métodos de soldagem tradicionais e não emite gases tóxicos, o que a torna ambientalmente vantajosa. Além disso, a ausência de material de adição contribui para a redução de resíduos e simplifica o processo, aumentando sua eficiência global.

2.4.3 Comparação entre Solda a Laser e Solda por Fricção

No estudo de Siqueira *et al.* (2014), foram comparadas as técnicas LBW e FW em relação à rebitagem, com foco em estruturas de alumínio na indústria aeronáutica. Os resultados mostraram que o LBW se destacou pela melhor distribuição de tensões, enquanto o FW apresentou maior resistência em cenários de alta deformação plástica. Ambas as técnicas superaram a rebitagem em eficiência energética, menor geração de resíduos e maior resistência mecânica. O uso do LBW pode levar a uma redução de 5% no peso dos componentes estruturais da aeronave. Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de novos materiais, essa redução pode chegar a até 15% no peso total da aeronave, contribuindo para maior eficiência e economia de combustível (Rötzer, 2005 *apud* Siqueira *et al.*, 2014).

Sommacal (2015) analisou os processos de soldagem GMAW, laser e fricção na fabricação de cilindros hidráulicos telescópicos a partir de tubos

mecânicos ST52 BKW, com o objetivo de melhorar o aproveitamento de materiais e reduzir desperdícios. Sua pesquisa avaliou a qualidade das juntas soldadas através de ensaios destrutivos e não destrutivos, como tração e dobramento, além de análises metalográficas. Entre os três processos, o GMAW destacou-se pela resistência mecânica e ductilidade superiores, além de apresentar menor incidência de defeitos como porosidade e trincas. Esse resultado foi atribuído a uma ZTA bem definida, garantindo maior uniformidade microestrutural e confiabilidade nas aplicações industriais dos cilindros. A Tabela 3 apresenta a Matriz de resultados do estudo.

Tabela 3 – Matriz de resultados da avaliação dos processos GMAW, LW e FW

Critérios de Avaliação		Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
Objetivos Obrigatórios		GMAW			LW			FW		
LR do Material Base	565 MPa	640 MPa			739 – 740 MPa			611 – 654 MPa		
Defeitos	Porosidade, Trincas, Falta de Fusão	Nenhum			Trinca, Porosidade e falta de Fusão			Falta de Adesão		
		Aprovado			Reprovado			Reprovado		
Objetivos Desejáveis	Peso	Comentários	Pontos		Comentários	Pontos		Comentários	Pontos	
			Nota	Total		Nota	Total		Nota	Total
Consumo de Energia	5	1790 J/mm	5	25	50 J/mm	10	50	120 MJ/mm	1	5
Material de Adição	3,33	Arame de Solda	5	16,65	Não Utiliza	10	33,33	Anel Intermediário	1	3,33
Volumes de Fabricação	3,66	Baixos	10	36,6	Médio	5	18,3	Altos	1	3,66
Geometrias	5,33	Não há	10	53,3	Não há	10	53,3	Limitado	5	26,65
Investimento	2,66	Baixo	10	26,6	Médio	5	13,3	Alto	1	2,66
Manutenção Equipamento	5,33	Fácil	10	53,3	Médio	5	26,65	Difícil	1	5,33
Abertura de Novos Negócios	5,66	Não	1	5,66	Corte a Laser	5	28,3	Linha Pesada	10	56,6
Facilidade de Operação	5	Fácil	10	50	Média	5	25	Difícil	1	5
Pontuação Total		267,11			248,18			108,23		

Fonte: Sommacal (2015, p. 67).

No estudo de Sbalchiero (2016), foi comparada a soldagem MAG com a soldagem por fricção em tubos hidráulicos fabricados com aço SAE 1026, enquanto o fundo e o flange foram feitos com os aços SAE 1029 e SAE 1030, respectivamente. O processo de fricção apresentou melhor desempenho em termos de resistência à tração e integridade estrutural, com uma ZTA menor e menor geração de calor, o que reduziu deformações térmicas e tensões residuais. Embora o investimento inicial tenha sido maior que no MAG, a fricção gerou uma redução de 12% nos custos do processo, com retorno do investimento em 4 anos. O tempo de soldagem foi reduzido em mais de 70%, já

que não há necessidade de operações de ponteamento, aumentando a eficiência produtiva e diminuindo o impacto ambiental.

2.4.4 Impactos Ambientais dos Processos de Soldagem

A soldagem a laser (LBW), avaliada no estudo de Siqueira *et al.* (2014), foi considerada uma solução viável para aplicações de alta precisão, como estruturas aeronáuticas. Embora o laser exija um controle rigoroso dos parâmetros e maior investimento inicial, ele se destaca pela eficiência energética e pelo controle preciso da zona de aquecimento, o que reduz deformações e o retrabalho. Esses benefícios resultam em menor consumo de energia e, portanto, contribuem para uma pegada ambiental reduzida em processos industriais de grande escala.

Por mais que o processo MAG tenha sido considerado o mais adequado no estudo de Sommacal (2015) para a soldagem de tubos hidráulicos, o autor sugere que, com o aprimoramento dos parâmetros, técnicas e a utilização de novos equipamentos, as técnicas de soldagem mais sustentáveis, como a fricção e o laser, poderão se tornar viáveis em aplicações onde, atualmente, o MAG é preferido. Isso mostra que o avanço tecnológico pode permitir que processos mais limpos e eficientes se tornem competitivos em uma ampla gama de aplicações industriais. Vale observar que o material utilizado foi o ST52 BKW.

Já soldagem por fricção (FW), conforme o estudo de Sbalchiero (2016), mostrou-se altamente sustentável ao não utilizar material de adição, o que reduz significativamente a necessidade de extração de matéria-prima virgem. Além disso, o processo não utiliza gases nocivos ao meio ambiente, como o dióxido de carbono, o que minimiza o impacto ambiental em termos de emissões. No caso específico dos tubos hidráulicos com aços SAE 1026, 1029 e 1030, o processo de fricção proporcionou um ciclo de produção mais limpo, além de uma redução de 12% nos custos do processo.

3 METODOLOGIA

Este trabalho será conduzido por meio de uma revisão de literatura, cujo objetivo é sintetizar e analisar as principais contribuições científicas existentes relacionadas à sustentabilidade nos processos de soldagem, reciclagem de resíduos e avanços tecnológicos que promovem a eficiência energética e redução de impacto ambiental. A revisão abordará as práticas emergentes, comparações entre tecnologias tradicionais e inovadoras, e as soluções para mitigar os efeitos negativos desses processos.

Os dados e artigos científicos serão obtidos em bases de dados acadêmicas, como Google Scholar, Scielo, Web of Science e Periódicos Capes. Além disso, documentos técnicos e relatórios da indústria de soldagem, junto a fontes secundárias confiáveis, como publicações de conferências especializadas e diretrizes ambientais de organismos internacionais (ex: ONU), serão consultados para fornecer embasamento atualizado sobre o tema.

Os estudos incluídos na revisão deverão atender aos seguintes critérios: (i) estar publicados nos últimos 15 anos, (ii) abordar diretamente as práticas de sustentabilidade em soldagem, (iii) apresentar dados empíricos ou estudos de caso sobre reciclagem de resíduos ou eficiência energética. Serão excluídos artigos com foco exclusivamente em aspectos econômicos ou que não apresentem relação direta com as tecnologias de soldagem. Trabalhos que não possuam revisão por pares ou que estejam em bases não indexadas também serão desconsiderados.

A coleta de dados será feita por meio da busca sistemática de artigos e relatórios nas bases de dados previamente mencionadas. Palavras-chave como “sustentabilidade em soldagem”, “reciclagem de resíduos de soldagem”, “tecnologias limpas em soldagem” e “eficiência energética na soldagem” serão utilizadas para filtrar os artigos mais relevantes. Os artigos selecionados serão analisados quanto ao seu conteúdo teórico e metodológico, e as informações extraídas serão agrupadas conforme as categorias estabelecidas nos objetivos do trabalho, como reciclagem, inovação tecnológica, e impacto ambiental.

A análise dos dados coletados será qualitativa, focada na identificação de padrões, lacunas e contribuições importantes sobre as práticas sustentáveis em

soldagem. Serão utilizadas técnicas de análise de conteúdo para agrupar as informações em categorias específicas, como tipos de resíduos, tecnologias inovadoras e medidas de eficiência energética. Ferramentas como Mendeley ou Zotero serão usadas para organizar as referências e facilitar a comparação entre os diferentes estudos selecionados. A análise será discutida em função dos desafios atuais e propostas de soluções tecnológicas que visam reduzir o impacto ambiental.

Essa metodologia garante uma abordagem sistemática e bem fundamentada para a realização de um estudo profundo sobre a sustentabilidade nos processos de soldagem, focando nas inovações e práticas de reciclagem que podem contribuir para a redução do impacto ambiental da indústria.

4 ESTUDOS DE CASO SOBRE SUSTENTABILIDADE NA SOLDAGEM

4.1 RECICLAGEM DE CAVACOS DE TITÂNIO PARA A CONFECÇÃO DE ELETRODOS DE SOLDA

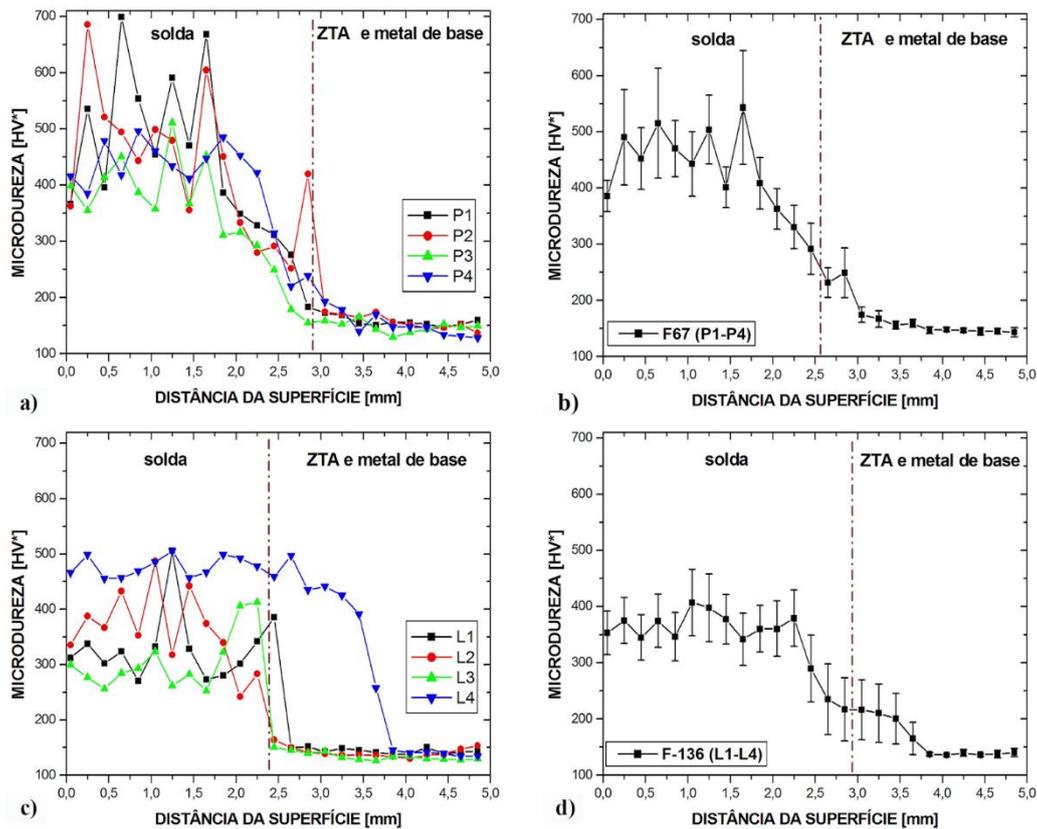
A reciclagem de cavacos de titânio tem se mostrado uma solução viável e sustentável para a redução de resíduos gerados no processo de usinagem de ligas de titânio. Este estudo de caso foca na reutilização desses cavacos na confecção de eletrodos de solda, aplicando-os em revestimentos duros antidesgaste, com potencial uso na indústria sucroalcooleira.

O titânio é um metal amplamente utilizado na fabricação de implantes dentários e componentes industriais devido às suas excelentes propriedades mecânicas e biocompatibilidade. No entanto, o processo de usinagem gera grandes quantidades de resíduos na forma de cavacos. Estudos recentes, como o de Fagundes Júnior, Ventrella e Gallego (2015), exploram a possibilidade de reutilizar esses cavacos para a produção de consumíveis de soldagem, destacando o carboneto de titânio (TiC) como uma adição valiosa em revestimentos antidesgaste.

O processo de reciclagem envolve a limpeza e moagem dos cavacos de titânio, que são então combinados com carbono (grafite) para formar a pré-camada a ser utilizada no processo de soldagem a arco elétrico com proteção

gasosa (GTAW). A microestrutura do revestimento produzido é composta por partículas de TiC distribuídas em uma matriz ferrítica, o que confere alta dureza e resistência ao desgaste (Fagundes Júnior; Ventrella; Gallego, 2015). Os resultados de microdureza do estudo são mostrados na Figura 7.

Figura 7 - Resultados dos ensaios de microdureza ao longo do cordão de solda



Fonte: Fagundes Júnior; Ventrella; Gallego (2015, p. 126).

A liga de titânio mais pura (ASTM F67) obteve os melhores resultados, apresentando uma microestrutura mais homogênea e partículas de carboneto de titânio (TiC) melhor distribuídas na matriz ferrítica. Isso se deve à maior pureza da liga, que facilita a formação de TiC de forma mais eficiente, resultando em um revestimento mais resistente ao desgaste. A ausência de outros elementos de liga que possam interferir no processo de formação dos carbonetos também contribui para essa melhoria na qualidade do revestimento.

4.2 REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE FABRICAÇÃO DE CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM EM TIJOLOS DE CERÂMICA VERMELHA

A geração de resíduos na fabricação de consumíveis para soldagem ocorre em diversas etapas dos processos produtivos, como na produção de eletrodos revestidos, arames tubulares, fluxos aglomerados e placas anti-desgaste. Esses resíduos contêm uma mistura de metais pesados, compostos tóxicos e partículas de revestimento, que representam um desafio ambiental significativo devido ao seu potencial de contaminação.

Entre os materiais gerados nesse processo, destacam-se metais como chumbo, cádmio, níquel e cromo. Quando dispostos de forma inadequada, esses metais podem infiltrar-se no solo e nas águas subterrâneas, causando impactos ecológicos e prejudicando a saúde humana. Além disso, resíduos de compostos como o carboneto de titânio (TiC) também estão presentes no processo de fabricação de consumíveis de soldagem (Groenner, 2007). Como mostra a Tabela 4 com alguns dos principais elementos presentes.

Tabela 4 - Principais matérias-primas utilizadas na fabricação de consumíveis de soldagem

Ácido Bórico	Dolomita	Óxido Manganoso
Alginato de Cálcio	Feldspato de Potássio	Paraloid B66
Alumina Magnésio	Ferro-Boro	Pigmento Aéreo
Areia de Quartzo	Ferro-Cromo	Pigmento Azul
Bauxita Calcinada	Ferro-Manganês	Óxido de Ferro
Bentonita	Ferro-Niobídio	Pó de Alumínio
Bifluoreto de Potássio	Ferro-Niobio	Pó de Boro
Borax	Ferro-Silício	Pó de Cromo
Cálcio	Ferro-Titânio	Pó de Estanho
Cálcio-Silício	Ferro-Tungstênio	Pó de Ferro
Carbonato de Potássio	Fluoraluminato de Potássio	Pó de Ferro-Silico-Magnésio
Carbonato de Estrôncio	Fluoreto de Potássio	Pó de Magnésia
Carbonato de Bário	Fluoreto de Bário	Pó de Magnésio
Carbonato de Lítio	Fluoreto de Lítio	Pó de Mica
Carbonato de Magnésio	Fluoreto de Magnésio	Pó de Manganês

Carbonato de Cromo	Fluoreto de Sódio	Pó de Níquel
Carbonato de Boro	Fluorita	Pó de Silicato de Sódio
Carbureto de Silício	Fluosilicato de Potássio	Politetrafluoretileno
Carvão	Fonólio	Potássio Cáustica Líquida
Cera	Grafite	Rutílio
Caulim	Hematita	Sílica Micronizada
Celulose	Hidróxido de Potássio	Silica-Quartzo
Chamote	Hidróxido de Sódio	Silicato de Potássio
Cloreto de Lítio	Ilmenita	Sulfato de Sódio
Cloreto de Magnésio	Leucovence	Talco
Cloreto de Potássio	Mangesilicato de Sódio	Tetraborato de Sódio
CMC	Óxido de Alumínio	Titânio
Criolita	Nitreto de Manganês	Tetraborato de Sódio
Cromo	Negro de Fumo	Titanato de Bário
Pó de Ferro	Óxido de Alumínio Fundido	Titanato de Potássio
Dióxido de Titânio	Óxido de Cromo	Titânio de Sódio
Dextrina em pó	Óxido de Lítio Aglomerado	Titânia Alumina
Dicromato de Potássio	Óxido de Ferro Vermelho	Wollastonita
Dióxido de Titânio	Óxido de Magnésio Calcinado	Zircônia

Fonte: Groenner (2007, p. 21).

O estudo conduzido por Groenner (2007) avalia a viabilidade técnica e ambiental do uso de resíduos da fabricação de consumíveis para soldagem como matéria-prima na produção de tijolos de cerâmica vermelha. A pesquisa foi realizada em escala laboratorial, incorporando até 10% em peso desses resíduos em misturas de argila destinadas à fabricação dos tijolos.

Os ensaios laboratoriais, que incluíram testes de absorção de água, resistência à compressão, lixiviação e solubilização, confirmaram que a adição de resíduos à argila não compromete as propriedades mecânicas dos tijolos nem apresenta riscos ambientais. A estabilidade química dos compostos formados durante o processo de queima, ricos em materiais vítreos, garante que os tijolos

contendo até 10% de resíduos atendem aos requisitos técnicos e ambientais, conforme a norma NBR 10004:2004.

Esse modelo de reciclagem é uma aplicação direta dos princípios da economia circular, que busca transformar subprodutos industriais em insumos para novos ciclos produtivos. Ao incorporar resíduos na fabricação de cerâmica vermelha, a indústria de soldagem contribui para a redução de impactos ambientais, promovendo um ciclo produtivo mais sustentável, alinhado às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). De forma similar, conforme discutido no item 3.1, o reaproveitamento de cavacos de titânio na confecção de eletrodos de soldagem reforça a economia circular, ao converter resíduos em insumos valiosos. Ambas as práticas demonstram como os resíduos industriais podem ser reintegrados ao ciclo produtivo, minimizando a extração de novas matérias-primas e promovendo uma produção mais sustentável.

5 DISCUSSÕES

A implementação dos princípios da economia circular nos processos de soldagem revela-se uma abordagem promissora para a sustentabilidade industrial. Este trabalho mostrou como a economia circular, ao reaproveitar materiais ao longo de diversos ciclos produtivos, pode transformar resíduos que antes eram descartados em insumos valiosos para novas aplicações. Um exemplo claro desse conceito é a reciclagem de cavacos de titânio, um subproduto comum do processo de usinagem, que pode ser reutilizado para a fabricação de eletrodos de soldagem. Esses eletrodos, enriquecidos com partículas de carboneto de titânio, não apenas aumentam a eficiência do processo, como também reduzem a necessidade de extração de matérias-primas virgens, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

Além disso, a economia circular se manifesta em outros estágios, como no reaproveitamento dos resíduos gerados pelos eletrodos após sua aplicação. Esses resíduos, em vez de serem descartados em aterros, podem ser direcionados para indústrias como a construção civil, onde são utilizados na produção de argamassas e materiais de construção. Este ciclo fechado, em que

os resíduos de um processo são continuamente reintegrados em outros, exemplifica como diferentes setores industriais podem colaborar para reduzir o desperdício e otimizar o uso de recursos, ampliando os benefícios da economia circular.

A integração de novas tecnologias também desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade na soldagem. A soldagem a laser, por exemplo, permite uma concentração precisa de energia em uma pequena área, reduzindo a distorção térmica e o consumo de energia em comparação com métodos tradicionais. Essa tecnologia, que gera menos resíduos e demanda menor quantidade de insumos, está alinhada com os objetivos de eficiência energética e redução de emissões, essenciais para alcançar uma produção industrial mais sustentável. Da mesma forma, a soldagem por fricção, que não necessita atingir o ponto de fusão dos materiais, resulta em menor consumo de energia e menos emissão de gases poluentes, além de ser altamente eficaz na união de materiais dissimilares.

A Indústria 4.0 complementa esse cenário ao incorporar automação, robótica e sistemas ciberfísicos nos processos de soldagem, promovendo uma operação mais eficiente e sustentável. A capacidade de monitorar parâmetros em tempo real e ajustar automaticamente variáveis como temperatura e corrente elétrica minimiza o desperdício de material e energia. Além disso, o uso de realidade aumentada e virtual permite simular operações de soldagem, otimizando o processo antes de sua execução real e reduzindo o consumo de recursos. Essas novas tecnologias, quando aplicadas dentro da economia circular, ajudam a tornar a produção industrial mais eficiente e sustentável.

O trabalho também destacou os desafios para a implementação dessas práticas, como o alto custo inicial de adaptação tecnológica e a necessidade de qualificação da mão de obra. No entanto, os benefícios a longo prazo, como a redução de custos operacionais e a diminuição da dependência de recursos naturais, superam esses obstáculos, tornando a adoção de práticas sustentáveis um investimento estratégico para as indústrias.

Implementar práticas sustentáveis na soldagem, com o apoio de novas tecnologias e da economia circular, não é só possível, mas também essencial

para a modernização das indústrias. A reciclagem de resíduos, o uso eficiente de energia e a automação proporcionada pela Indústria 4.0 apontam para um futuro em que a soldagem pode se tornar um processo chave no desenvolvimento de uma economia mais verde e sustentável.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que a aplicação dos princípios da economia circular nos processos de soldagem oferece soluções viáveis para reduzir os impactos ambientais, aumentar a eficiência energética e otimizar o uso de materiais. A reciclagem de cavacos de titânio para a fabricação de eletrodos, bem como o reaproveitamento dos resíduos desses eletrodos para outras indústrias, como a construção civil, são exemplos práticos de como os resíduos podem ser transformados em recursos valiosos, contribuindo para um ciclo produtivo mais sustentável.

Além disso, a implementação dessas tecnologias, apesar de seu grande potencial para inovação, enfrenta barreiras práticas significativas. A soldagem a laser, por exemplo, requer investimentos iniciais elevados, e sua aplicação é mais restrita a indústrias que já possuem alta automação. Além disso, a transição para esses processos pode encontrar resistência em setores onde os métodos tradicionais ainda são economicamente viáveis. Portanto, a efetiva aplicação de soldagem por fricção e a laser dependerá não apenas do avanço tecnológico, mas de políticas de incentivo e apoio à capacitação de mão de obra.

Portanto, este estudo não apenas confirma a viabilidade das práticas sustentáveis na soldagem, como também aponta o caminho para futuras pesquisas e inovações que integrem ainda mais os conceitos de economia circular e tecnologias emergentes. Ao promover uma conexão entre diferentes setores industriais, a soldagem pode desempenhar um papel central na transformação para uma economia mais sustentável, resiliente e integrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIANCHI, Henrique. **Riscos existentes nos ambientes de soldagem em uma indústria metalúrgica**. 2014. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BRANDI, Sérgio Duarte. **Ligas isentas de chumbo para soldagem branda para aplicação em eletrônica: uma abordagem ambiental**. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 26, p. 18-19, 2012. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/304. Acesso em: 27 ago. 2024.

FAGUNDES JÚNIOR, José Gedael; VENTRELLA, Vicente Afonso; GALLEGO, Juno. **Reciclagem de cavacos de titânio para a deposição de revestimentos duros por soldagem**. *Soldagem & Inspeção*, v. 20, n. 1, p. 117-127, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2001.12>. Acesso em: 25 set. 2024.

FARIA, I. C. S.; FILLETI, R. A. P.; HELLENO, A. L. **Evolução dos processos de automação em células de soldagem: uma revisão de literatura**. *Soldagem & Inspeção*, v. 27, p. 1-16, 2022.

GIUBINE, Giovana Dicara; RODRIGUES, Flávio Luiz; OLIVEIRA NETO, Geraldo Cardoso de. **Economia circular em empresas que adotaram tecnologias da indústria 4.0**. XIII Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI, São Bernardo do Campo, 2023.

GROENNER, Patrícia Elaine Moura. **Reaproveitamento do resíduo de fabricação de consumíveis para soldagem em tijolos de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2007.

KLUG, William Dietrich; MATTOSO, Bianca Rodrigues; PEREIRA, Aline Soares; RODRIGUEZ, Alejandro Martins. **Existem relações benéficas entre as tecnologias habilitadoras para a indústria 4.0 e os princípios da economia circular? Revista Gestão e Produção**, Pelotas, v. 28, n. 3, p. 1-20, 2021.

MIYASHIRO, Marianna Konyosi; PIZZINATTO, Nadia Kassouf; LAS CASAS, Alexandre Luzzi; KUNIYOSHI, Márcio Shoiti. **Empreendedorismo na economia circular: uma revisão sistemática em ciclos de materiais e modelos de negócios**. *Cadernos EBAPE.BR*, v. 21, n. 5, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1679-395120220210>. Acesso em: 15 set. 2024.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

MODENESI, Paulo Jorge. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2011.

MURAD, M. Q.; FERARESSI, V. A.; SALES, W. F.; SOUSA, J. A. G. **Processos de soldagem sustentável – Estudo de caso de aplicação de revestimento**

duro em moendas de cana de açúcar. IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 set. 2024.

PASCHOALINO, Marina de Jesus. **Critérios ambientais para seleção de materiais na construção civil.** 2013. Monografia (Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PINHEIRO, M. A.; REIS FILHO, R. R. **Soldagem industrial: tipos, aplicações e inovações tecnológicas para produtos mais eficientes.** Interface Tecnológica, v. 20, n. 2, p. 666-669, 2023.

SBALCHIERO, Jeferson André. **Substituição da soldagem MAG por soldagem por fricção em tubos hidráulicos.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI). Economia Circular. Disponível em: <https://senai.es.com.br/news/economiacircular/>. Acesso em: 15 set. 2024.

SIQUEIRA, Rafael Humberto Mota de; OLIVEIRA, Aline Capella de; RIVA, Rudimar; ABDALLA, Antonio Jorge; LIMA, Milton Sérgio Fernandes de. **Comparação das propriedades mecânicas de juntas de alumínio obtidas por soldagem a laser (LBW), por friction stir welding (FSW) e rebitadas para aplicação em estruturas aeronáuticas.** Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 145-151, abr./jun. 2014.

SMALLBONE, Chris; PAES, Luiz Eduardo dos Santos. **O papel da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e da Associação Brasileira de Soldagem (ABS) em relação à capacidade nacional de soldagem no Brasil para se alcançarem os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).** Soldagem & Inspeção, v. 27, e2719, 2022.

SOMMACAL, Luciano Gotardo. **Análise dos processos de soldagem GMAW, Laser e fricção aplicados no reaproveitamento de tubos mecânicos para fabricação de cilindros hidráulicos.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

TEIXEIRA, Cleiton Rodrigues; FERREIRA FILHO, Demostenes; FERRARESI, Valtair Antônio. **Influência do gás de proteção utilizado na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados no ensaio de dobramento.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, 2011.

TRIGO, Aline Guimarães Monteiro; TRIGO, José Aires; MARUYAMA, Ursula Gomes Rosa; MELO, Vinicius Monteiro da Silva. **A Política Nacional de Resíduos Sólidos e a redução de impactos ambientais negativos: viabilizando cidades e comunidades sustentáveis. Gestão e**

Desenvolvimento, Novo Hamburgo, v. 20, n. 1, p. 130-149, jan./jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.25112/rgd.v20i1.2910>. Acesso em: 27 ago. 2024.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Decourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blucher, c1992, 2011. 494p.