



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL
DO PAMPA CAMPUS ALEGRETE CURSO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

THAUAN DE OLIVEIRA LITTIERE

**ANÁLISE TRIBOLÓGICA EM FERRAMENTAS DE AÇO AISI H13 APÓS
CICLO DE SOLDA POR FRICÇÃO EM LIGA DE ALUMÍNIO**

Alegrete

2024

THAUAN DE OLIVEIRA LITTIERE

**ANÁLISE TRIBOLÓGICA EM FERRAMENTAS DE AÇO AISI H13 APÓS
CICLO DE SOLDA POR FRICÇÃO EM LIGA DE ALUMÍNIO**

Projeto de TCC apresentado a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito de avaliação.

Orientador: Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhoft

Alegrete

2024

THAUAN DE OLIVEIRA LITTIERE

**ANÁLISE TRIBOLÓGICA EM FERRAMENTAS DE AÇO AISI H13 APÓS
CICLO DE SOLDA POR FRICÇÃO EM LIGA DE ALUMÍNIO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em 09 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

Orientador

(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 17:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 17:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 17:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_exter no=0, informando o código verificador **1620693** e o código CRC **B0199050**.

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Irene de Oliveira Littiere e Marcos Netto Littiere, a minha irmã, Thayssa de Oliveira Littiere, e a minha companheira, Carla Moraes de Menezes, que sempre me apoiaram e me incentivaram em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a meu orientador, Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhof, pelo apoio, orientação, mentor e modelo de excelência durante os anos de graduação.

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes pela disponibilidade, auxílio para os testes de fluorescência de raio X e discussões durante o processo.

Gostaria de agradecer ao Técnico em Mecânica Ivan Mangini Lopes Júnior, pelas ideias, orientações na confecção das ferramentas e tempo para auxílio ao longo do trabalho.

Gostaria de agradecer ao Mestre Dieison Gabbi Fantineli por todo o tempo de auxílio, dicas e discussões durante o processo.

Gostaria de agradecer ao Dr. Clarissa Coussirat Angrizani pelo tempo de auxílio durante o processo de preparação para os ensaios de microdureza HV e as dicas durante o trabalho.

Gostaria de agradecer ao Engenheiro Mecânico Deividi do Amaral Mengotti pelo apoio, discussões e feedbacks durante o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer a acadêmica em Engenharia Mecânica Carla Moraes de Menezes pelo auxílio nos ensaios de desgaste e microdureza HV.

Também gostaria de agradecer a acadêmica em Engenharia Mecânica Felix Vietta Filho pelo auxílio nos tratamentos térmicos, condicionamento das amostras para ensaios de microdureza HV.

Em especial gostaria de agradecer à minha família, amigos e companheira por todo o apoio, amor e incentivo ininterrupto que me proporcionaram ao longo dos anos. Ter vocês fazendo parte da minha vida foi a energia que me moveu até esse momento.

RESUMO

Este trabalho explora como a tribologia pode ser aplicada para melhorar o desempenho de ferramentas de aço AISI H13 no processo de soldagem por fricção (FSW) em ligas de alumínio, analisando especialmente o impacto de diferentes tratamentos térmicos no desgaste e na resistência mecânica. A tribologia, que estuda atrito, desgaste e lubrificação, é essencial para reduzir custos, aumentar a eficiência e prolongar a vida útil de componentes industriais. O aço AISI H13, conhecido por sua resistência à deformação em altas temperaturas e sua tenacidade, foi submetido a têmpera, revenido simples e duplo revenido, com os resultados mostrando que este último oferece maior durabilidade, reduzindo significativamente o desgaste devido ao alívio de tensões internas do material. Ensaios de microdureza confirmaram maior resistência nas ferramentas tratadas termicamente, enquanto análises estatísticas validaram a eficácia dos tratamentos. Esse estudo destaca a importância de compreender os mecanismos tribológicos para otimizar processos industriais, reduzir desperdícios e garantir maior confiabilidade e eficiência em aplicações críticas, contribuindo para avanços sustentáveis na engenharia mecânica, apresentando resultados em que as amostras com duplo revenido obtiveram uma redução de massa de 0,002 gramas, com melhor resultado quando em comparação a de único revenido que perdeu 0,007 gramas e a com tratamento de têmpera, atingindo 0,264 gramas de massa perdida por desgaste durante os ensaios.

Palavras-chave: AISI H13, tribologia, solda por fricção.

ABSTRACT

This work explores how tribology can be applied to improve the performance of AISI H13 steel tools in the friction stir welding (FSW) process on aluminum alloys, particularly analyzing the impact of different heat treatments on wear and mechanical resistance. Tribology, which studies friction, wear, and lubrication, is essential for reducing costs, increasing efficiency, and extending the lifespan of industrial components. AISI H13 steel, known for its resistance to deformation at high temperatures and its toughness, underwent quenching, single tempering, and double tempering, with results showing that the latter offers greater durability, significantly reducing wear due to the relief of internal stresses in the material. Microhardness tests confirmed higher resistance in heat-treated tools, while statistical analyses validated the efficacy of the treatments. This study highlights the importance of understanding tribological mechanisms to optimize industrial processes, reduce waste, and ensure greater reliability and efficiency in critical applications, contributing to sustainable advancements in mechanical engineering. The results show that samples with double tempering achieved a mass reduction of 0.002 grams, with better performance compared to single tempering, which lost 0.007 grams, and quenching treatment, which reached 0.264 grams of mass loss due to wear during the tests.

Keywords: AISI H13, tribology, friction stir welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comprimentos de onda e energias dos fótons correspondentes.....	18
Figura 2: Princípio de operação do processo de solda por fricção linear.....	19
Figura 3: Passos das operações do processo de solda por fricção.....	20
Figura 4: Exemplos de variação na geometria do ombro de ferramentas para FWS.....	21
Figura 5: Principais componentes da solda FSW.....	21
Figura 6: Quatro modos de desgaste: (I) desgaste adesivo, (II) desgaste abrasivo, (III) desgaste corrosivo e (IV) desgaste por fadiga.....	22
Figura 7: Cortadora metalográfica da marca Fortel e modelo CF III.....	26
Figura 8: Usinagem da ferramenta confeccionada com pino cônico.....	27
Figura 9: Geometria da ferramenta confeccionada com pino cônico.....	27
Figura 10: Microdurometro Buehler modelo MicroMet 6010.....	29
Figura 11: Equipamento para fluorescência de raio X PANalytical.....	30
Figura 12: Pesagem das ferramentas antes (A) e após (B) o teste de desgaste.....	30
Figura 13: Cunha de 3 graus aplicada a placa para teste FSW.....	31
Figura 14: Centro de usinagem CNC Romi D800.....	32
Figura 15: Ilustração da deposição de alumínio na ferramenta interação com soda caustica.....	32
Figura 16: Dureza média das amostras em cada tratamento.....	36
Figura 17: Massas perdidas pelas amostras.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de aços ferramentas	15
Tabela 2 – Classificação de aços ferramentas	16
Tabela 3 – Ligas de alumínio e seus principais constituintes	23
Tabela 4 - Exemplo de tabela ANOVA	24
Tabela 5 - Tratamentos térmicos aplicados as amostras de AISI H13	28
Tabela 6 - Composição da amostra do aço AISI H13	33
Tabela 7– Composição de outros elementos da amostra do aço AISI H13	33
Tabela 8 - Composição da amostra do alumínio	34
Tabela 9 – Elementos encontrados na amostra do alumínio.....	34
Tabela 10 – Médias de dureza, DP e variância das amostras	35
Tabela 11- Composição da amostra do alumínio	35
Tabela 12 – Massas antes e depois do desgaste das amostras do aço AISI H13	36
Tabela 13– Inclinação da reta de desgaste e porcentagem de massa perdida.....	37
Tabela 14– ANOVA das médias de massa perdida X Tratamento térmico	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ANOVA – Análise de Variância

C – Carbono

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Cúbica de Face Centrada

CNC – Controle Numérico Computadorizado

Cr – Cromo

DR – Duplo Revenimento

DP – Desvio Padrão

FRX – Fluorescência de Raio X

FSW – Solda por Fricção

ISO – *International Organization for Standardization*

Kgf – Quilograma força

Mg₂Si – Silicato de Magnésio

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

Ni – Níquel

P – Fósforo

S – Enxofre

SAE – *Society of Automotive Engineers*

Si – Silício

TWI – *The Welding Institute*

UR – Único Revenimento

V – Vanádio

g – Gramas

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Classificação do aço ferramenta	15
2.2. Aço AISI H13	16
2.3. Tratamentos térmicos aço AISI H13	16
2.4. Fluorescência de raio X	18
2.5. Soldagem por fricção (FSW)	18
2.6. Geometria da ferramenta	20
2.7. Tribologia	21
2.8. Ligas de alumínio	23
2.9. Análise de variância (ANOVA).....	24
3. METODOLOGIA.....	26
3.1. Confeção das ferramentas	26
3.2. Tratamentos térmicos.....	27
3.3. Análise de microdureza	28
3.4. Fluorescência de raio X	29
3.5. Pesagem das ferramentas.....	30
3.6. Simulação de ciclo de trabalho para desgaste.....	31
3.7. Remoção do alumínio incrustado na ferramenta	32
4. RESULTADOS.....	33
4.1. Fluorescência de raio X.....	33
4.1.1 Aço H13.....	33
4.1.2 Alumínio.....	34
4.2. Dureza Vickers	34
4.3. Ensaio de desgaste	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
6. SUGESTÕES DE TABALHOS FUTUROS.....	40
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

Em ambientes industriais, onde o desgaste compromete a produtividade ou acarreta elevados custos de manutenção, é insuficiente limitar-se ao conhecimento de materiais e processos metalúrgicos. Segundo Cozza (2006), torna-se essencial aprofundar o conhecimento por meio da pesquisa e do estudo dos mecanismos de desgaste que operam sob condições específicas.

De acordo com Holmberg et al. (2014), nos setores fabris, tornaram-se cada vez mais relevantes as necessidades em reduzir ou controlar o atrito e o desgaste, com o objetivo de prolongar a vida útil de máquinas e biosistemas, aumentar a eficiência dos dispositivos, conservar recursos materiais, diminuir o consumo energético e aprimorando a segurança dos sistemas. Esses requisitos de vida útil e propriedades da ferramenta tem se tornado cada vez mais exigentes, dessa forma, a prevenção de falha da ferramenta e a tentativa de aumentar a vida útil das mesmas é um tópico importante em estudos recentes (KUMAR et al., 2018).

Outro aspecto de relevância na indústria de ferramentas e componentes mecânicos é a constante demanda por alta produtividade e desempenho. No caso de ferramentas para trabalho a quente, como matrizes e moldes, essas devem atender a requisitos que garantam a realização de operações com precisão e custo competitivo.

A escolha adequada do material de fabricação, considerando as exigências do trabalho, e o desenvolvimento otimizado da ferramenta são essenciais para alcançar propriedades como maior resistência ao desgaste, tenacidade e dureza em altas temperaturas, sendo esses fatores determinantes para aprimorar a eficiência do processo, a qualidade das peças produzidas e a durabilidade das ferramentas em serviço (PALDEY; DEEVI, 2003).

Segundo Kumar e Chauhan (2015), os aços pertencentes a série “H” são para trabalhos a quente, onde o aço AISI H13, com elementos de liga como cromo e molibdênio, é utilizado geralmente para fabricação de matrizes por possuir a característica de manter dureza, resistência mecânica e tenacidade mesmo em elevadas temperaturas.

Conforme mencionado por Silva e Mei (2006), o aço ferramenta AISI H13 possui ampla aplicação em operações de trabalho a quente devido às suas notáveis características, tais como elevadas resistências mecânicas e à deformação em altas temperaturas, alta tenacidade, temperabilidade e excelente resistência à fadiga e trincas térmicas.

A soldagem por fricção é destacada quando se busca por desempenho e ferramentas com desgaste reduzido na aplicação em ligas não ferrosas, pois o processo de soldagem por fricção, *Friction Stir Welding* (FSW), consiste em unir dois ou mais materiais sólidos sem necessariamente a fusão dos mesmos, causando deformação plástica, para uma união fixa utilizando uma ferramenta não consumível, constituída de um ombro concêntrico a um pino responsável por penetração na região de união, com patenteamento e estudos realizados em 1991 pelo *The Welding Institute* (TWI) no Reino Unido (THOMAS et al., 1991).

Fatores como o material a ser soldado, rotação, velocidade de avanço, tempo de atuação da ferramenta e geometria da mesma são determinantes para a qualidade do processo e resultado da união e se selecionadas adequadamente garantem propriedades mecânicas finais ao processo próximas às do estado primário do material soldado.

O ciclo de vida esperado para uma ferramenta depende diretamente da escolha do material adequado para constituí-la e de seus tratamentos térmicos, adequando-se a condição de trabalho imposta, assim a proposta do presente trabalho é estudar os efeitos da variação dos tratamentos térmicos em ferramentas de mesmo material constituinte e avaliar o desgaste ocorrido.

No presente trabalho buscamos entender melhor o ciclo de vida e o desgaste de ferramentas usadas na indústria, com o objetivo de aumentar sua durabilidade, em particular as ferramentas de aço AISI H13 usadas em solda por fricção em ligas de alumínio. Através de estudos tribológicos e das propriedades mecânicas, esperamos prevenir problemas e enriquecer o conhecimento sobre o processo de soldagem por fricção e o desgaste dessas ferramentas. Para isso, verificamos a variação de massa das ferramentas após a solda, analisamos os efeitos dos tratamentos térmicos em suas propriedades mecânicas, comparamos curvas de desgaste dos diferentes tratamentos e realizamos análises macroestruturais para entender melhor os resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Classificação do aço ferramenta

A classificação dos aços ferramentas é realizada por dois grandes grupos, a *American Iron and Steel Institute* (AISI) e a *Society of Automotive Engineers* (SAE), se toma como base sua aplicabilidade, composição química ou meio de endurecimento (AWS, 1998), (KRAUS, 2015), como mostra a tabela 1, classificando os principais tipos de aço ferramenta.

Os aços ferramenta englobam aços carbono, ligados ou de alta velocidade, que podem passar por processos de têmpera e revenimento. Em geral são produzidos em fornos elétricos, seguem práticas específicas para atender a requisitos particulares de ferramentas. Esses aços encontram aplicação em ferramentas manuais e acessórios mecânicos destinados ao corte, modelagem e forjamento de materiais em temperaturas normais ou elevadas. São também empregados em diversas outras aplicações, escolhidos por suas propriedades como resistência ao desgaste, força mecânica, tenacidade, visando um desempenho otimizado. (MESQUITA, 2016; AWS, 1992; TOTTEN, 2006).

Tabela 1 – Classificação de aços ferramentas

Grupo	Série AISI	Especificação
Aço rápido	T	Tungstênio
	M	Molibdênio
Trabalho a frio	O	Temperável em óleo
	A	Média liga - Temperável ao ar
	D	Alto carbono - Alto cromo
Trabalho a quente	H	Cromo (H1 - H19)
		Tungstênio (H20 - H39)
		Molibdênio (H40 - H59)
Moldes	P	Baixo carbono
Aplicação especial	L	Baixa liga
	F	Tungstênio - Alto carbono
Resistência ao impacto	S	Médio carbono
Temperáveis em água	W	Aço ao carbono

Fonte: Adaptado de AWS, 1998.

2.2. Aço AISI H13

O aço AISI H13 pertence à categoria dos aços ferramenta destinados a operações de trabalho a quente, sendo seu principal elemento de liga o cromo, como mostra a tabela 2, que contribui para uma maior uniformidade das propriedades mecânicas entre a superfície e o núcleo da peça, possibilitando atingir durezas de até 60 HRC, caracterizadas pela presença de uma fase martensítica metaestável. (Cardarelli, 2008), assegurando ao aço AISI H13 características notáveis, como tenacidade e resistência ao impacto, tais atributos o tornam uma escolha preferencial em muitas aplicações (SILVA; MEI, 2006).

Sua composição química possibilita possuir características distintivas, incluindo alta temperabilidade, resistência elevada em condições de altas temperaturas, boa resistência ao desgaste em ambientes térmicos elevados, excelente tenacidade, boa usinabilidade em comparação com outros aços ferramenta, e uma resistência excepcional a choques térmicos resultantes de ciclos contínuos de aquecimento e resfriamento. Essas propriedades contribuem para a redução da probabilidade de formação de trincas térmicas, conforme destacado por Lee et al. em 2009.

Tabela 2 – Composição química em % AISI H13

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	P	S
0,32 - 0,45	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	4,75 - 5,50	0,00 - 0,15	1,10 - 1,75	0,80 - 1,20	0,01 - 0,035	0,00 - 0,04

Fonte: Adaptada de *American Welding Society. AWS Vol. 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys. 10. ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1998.*

O AISI H13 adquire resistência por meio de um processo de tratamento térmico, que envolve têmpera seguida de revenimento ao ar, graças à sua notável temperabilidade, (Umbrello et al., 2008), de forma que esta característica é atribuída não apenas ao elevado teor de carbono, mas também aos elementos de liga presentes em sua composição.

2.3. Tratamentos térmicos aço AISI H13

Têmpera é um processo térmico que envolve elevar a temperatura do material até atingir a faixa de austenitização. Esse procedimento facilita a transformação da célula de

ferrita CCC em austenita CFC, caracterizada por interstícios de maior tamanho. Isso, por sua vez, permite uma maior dissolução de elementos de ligas, tudo isso com um menor consumo de energia

A têmpera é o processo realizado com a intenção de aumentar a dureza, convertendo a austenita em martensita. A taxa de resfriamento, ajustável de acordo com os meios de têmpera utilizados, deve ser suficientemente elevada para assegurar a formação de martensita em toda a espessura da ferramenta, ao mesmo tempo em que deve ser suficientemente baixa para prevenir a ocorrência de tensões internas que podem deformar ou trincar o material. Os aços AISI H13 possuem como os meios de têmpera mais comuns o resfriamento ao ar e em óleo (GERODE, 2006).

Segundo Roberts; Kraus; Kennedy (1998), o aço ferramenta AISI possui uma faixa de temperatura para têmpera que varia de 995 a 1040 °C com duração de 15 a 40 minutos.

No processo de têmpera do aço ABNT H13, a temperatura de pré-aquecimento situa-se na faixa de 815 °C, para pequenas geometrias, ou por cerca de 650 °C, em caso de grandes geometrias ou complexidade da peça, por 10 a 15 minutos. Após o ciclo de pré-aquecimento, o forno deve ser ajustado para atingir 1010 °C, que corresponde à temperatura de austenitização específica para o aço ABNT H13 (BRYSON, 2009).

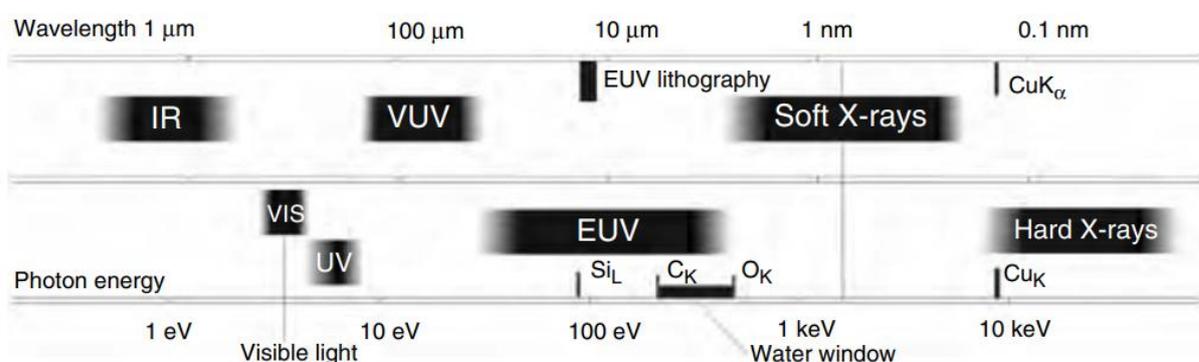
O revenido consiste em um tratamento térmico no qual o aço é aquecido a uma faixa de temperatura entre 150°C e 600°C. Seu principal objetivo é aliviar as tensões presentes na martensita. Contudo, nos aços que retêm austenita, o revenido desempenha uma função adicional, convertendo a austenita retida em martensita por meio de múltiplos ciclos de revenimento. Por não atingir a temperatura de austenitização dos aços, não ocorre o crescimento de grãos. Portanto, é possível considerar o tamanho de grão semelhante para peças que passaram apenas pelo processo de têmpera e aquelas que foram submetidas ao revenimento.

Esse tratamento visa eliminar as tensões residuais que poderiam ocasionar distorções durante os processos subsequentes de aquecimento e têmpera dos aços ferramenta. Sua eliminação é crucial para garantir a integridade dimensional e as propriedades desejadas dos materiais, conforme destacado por Krauss em 2005.

2.4. Fluorescência de raio X

Segundo Holler (2009), a técnica de espectrometria por fluorescência de raios-X é uma abordagem analítica, tanto quantitativa quanto qualitativa, não destrutiva, possibilitando a identificação dos elementos presentes e suas respectivas proporções. Neste método, a excitação dos átomos na amostra ocorre devido à incidência de raios X provenientes de uma fonte de alta energia que é excitado, absorvendo energia, que varia de acordo com seu número atômico, e quando decai libera energia em um determinado comprimento de onda, mostrado na figura 1, possibilitando assim identificar a composição do material.

Figura 1: Comprimentos de onda e energias dos fótons correspondentes.



Fonte: *Handbook of Practical X-ray Fluorescence Analysis*. BARRY. N, 2006.

2.5. Soldagem por fricção (FSW)

O processo de solda por fricção opera gerando calor entre uma ferramenta rotativa, de material mais duro do que a peça a ser soldada, de modo a condicionar a região de solda adjacente no material mais macio. (THOMAS et al., 1997).

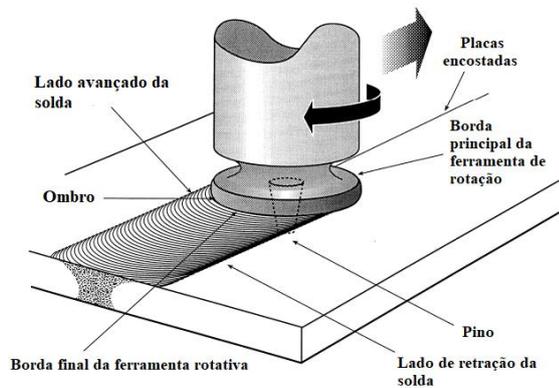
Devido à ausência de fusão localizada do material de base, muitos dos problemas metalúrgicos geralmente associados à formação de fase líquida durante os processos de soldagem por fusão não são observados em soldas realizadas por processos de soldagem no estado sólido. (GIPIELA, 2007).

Quando comparado aos métodos tradicionais de soldagem, o processo de soldagem por fricção (FSW) se destaca por seu baixo consumo energético. Especificamente, ele utiliza apenas

2,5% da energia necessária no processo de soldagem a laser, conforme destacado por Mishra et al. em 2005. Isso representa uma economia significativa de energia, tornando o FSW uma opção mais sustentável e eficiente.

No processo de FSW, uma ferramenta cilíndrica e não consumível, composta por um ombro, que aplica fricção e calor adicional para região em solda para evitar alta plastificação do material durante a operação, e um pino perfilado, que penetra e na região da solda e aquece a região, gira a uma velocidade específica enquanto avança transversalmente com uma velocidade constante ao longo de uma junta de topo entre duas peças rigidamente fixadas, como mostra a figura 2.

Figura 2: Princípio de operação do processo de solda por fricção linear.



Fonte: Adaptada de Thomas et al, 1997.

Como mencionado anteriormente, o calor necessário para facilitar a soldagem é gerado pelo atrito da ferramenta, que ocorre devido ao movimento de rotação em conjunto com a deformação plástica, apresentado da figura 3. O aquecimento local resultante aumenta a plasticidade do material nas proximidades da ferramenta. Com o movimento de rotação da ferramenta, o material é deslocado da frente para trás do pino, promovendo a ligação entre os materiais e formando a junta (Vilaça, P, IST 2003).

Figura 3: Passos das operações do processo de solda por fricção.



Fonte: Adaptada de KUKA System, 2024.

A figura 3 mostra o FSW dividido em quatro etapas principais para realizar uma solda linear. Para início da solda a ferramenta em rotação é imersa no material. Em seguida, há um período de tempo de aquecimento, chamado dwell time, no qual a ferramenta e a peça a ser soldada atingem a temperatura necessária para a soldagem. A soldagem propriamente dita ocorre no terceiro passo, onde a união é realizada, e por último, a ferramenta é removida das peças. Durante a inserção da ferramenta na junta, o calor gerado é transferido pelo material e pela barra ou chapa de apoio, conforme descrito por Kozminski em 2015.

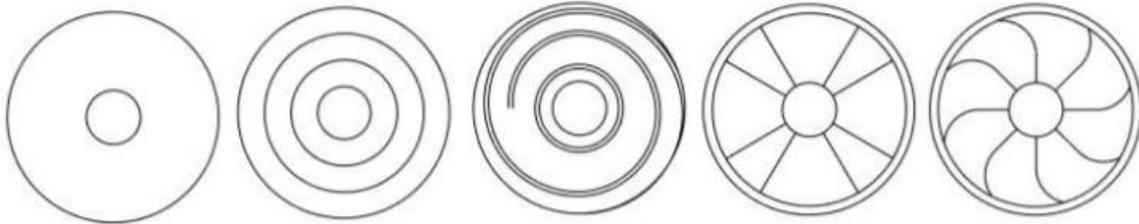
2.6. Geometria da ferramenta

A seleção e configuração da ferramenta desempenham um papel significativo no resultado do processo de soldagem, destacando a relevância desses aspectos. A geometria escolhida para a ferramenta exerce uma influência direta na geração de calor e no fluxo plástico do material durante o processo. Esses fatores, por sua vez, têm impactos consideráveis nas propriedades mecânicas da junta resultante. Portanto, a cuidadosa definição da geometria da ferramenta é crucial para otimizar o desempenho e as características da solda (ZHAO, 2005).

A configuração geométrica da ferramenta de soldagem representa um fator crucial para alcançar êxito no FSW, sendo que suas características fundamentais incluem o tamanho do ombro e a configuração do pino de penetração (HE et al., 2014). Conforme destacado por Guerra (2003), o pino desempenha um papel crucial na deformação plástica e na mistura dos materiais, contribuindo com uma parcela menor na geração total de calor durante o processo. Por outro lado, Mishra (2005) enfatiza que o ombro da ferramenta, apresentado na figura 4, desempenha o papel de conter o material, evitando expulsões, e

favorece o fluxo do material ao redor do pino de penetração. Além disso, o atrito gerado pelo ombro é responsável por uma parte significativa do calor gerado durante o processo.

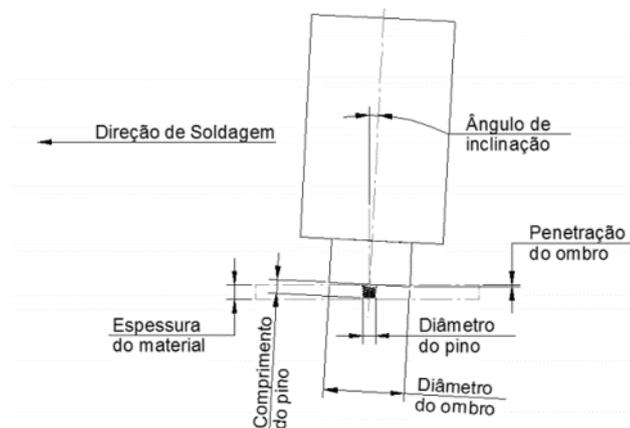
Figura 4: Exemplos de variação na geometria do ombro de ferramentas para FWS.



Fonte: Adaptado de MISHRA et al., 2005.

Um aspecto crucial na soldagem por fricção é o ângulo de inclinação do eixo ou da ferramenta em relação à superfície das peças a serem soldadas, como mostra a figura 5. Esse ângulo deve ser cuidadosamente ajustado para garantir que o ombro da ferramenta retenha adequadamente o material deslocado pelo pino rosqueado. Com uma inclinação apropriada no sentido de arrasto, o pino movimenta o material de forma eficiente da frente para a parte traseira, promovendo uma união consistente e de qualidade. (MISHRA et al., 2005).

Figura 5: Principais componentes da solda FSW.



Fonte: Adaptado de KOZMINSKI, 2015.

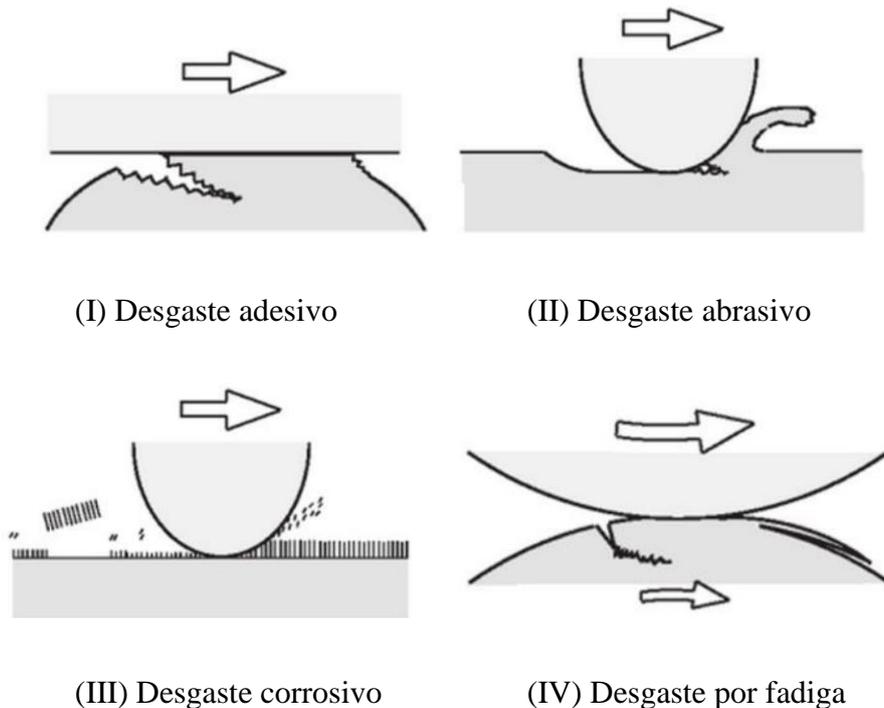
2.7. Tribologia

Rutherford; Hutchings (1996) propôs estudos com a finalidade de realizar investigações sobre desgaste e atrito ocorrido em mecanismos, com técnicas e ferramentas adequadas, que caracterizam a tribologia.

O desgaste representa um desperdício de materiais e uma diminuição no desempenho dos equipamentos. O atrito, por sua vez, é o principal agente causador do desgaste e da dispersão de energia. No entanto, é possível reduzir os custos por meio da minimização desses fatores (STACHOWIAK et al., 2006).

As três grandes áreas estudadas na tribologia dos materiais são: o desgaste, o atrito e a rugosidade (JOST, H. P., 1996). O desgaste pode ser definido como o dano a uma superfície sólida causado pela remoção ou alteração do material pela ação mecânica de um sólido, líquido ou gás. Em sistemas de desgaste por deslizamento são descritos quatro modos de desgaste: desgaste adesivo, apresentado na figura 6 (I) ocorre quando a ligação entre as superfícies é forte o suficiente para resistir ao deslizamento, resultando em deformação plástica na região de contato, desgaste abrasivo, que ocorre de acordo com a forma e a diferença de dureza entre os materiais, demonstrado na figura 6 (II), desgaste corrosivo, ocorrendo em ambientes com presença de fluidos que causa reações eletroquímicas ou químicas através de interações, figura 6 (III), e desgaste por fadiga, apresentado na figura 6 (IV), que é causado por repetições de movimentos do material (KATO, K., 2001).

Figura 6: Quatro modos de desgaste: (I) desgaste adesivo, (II) desgaste abrasivo, (III) desgaste corrosivo e (IV) desgaste por fadiga.



Fonte: Adaptado de KATO, K., 2001.

2.8. Ligas de alumínio

As ligas de alumínio destacam-se como materiais leves promissores, principalmente devido a um conjunto de propriedades como baixa densidade, elevada resistência à corrosão, resistência específica, capacidade de absorver impactos e alta reciclagem (ZHAOHUA ZHANG et al., 2011).

As ligas de alumínio são classificadas conforme a norma NBR ISO 209:2010, que adota uma nomenclatura baseada em séries de quatro dígitos. O primeiro dígito indica o principal elemento de liga presente na composição, como ilustrado na Tabela 3. O segundo dígito informa sobre as modificações nos níveis de impurezas: quando é igual a zero, as impurezas decorrem diretamente do processo de fabricação; valores diferentes de zero indicam um controle especial na concentração dessas impurezas. O terceiro e o quarto dígitos especificam o percentual de alumínio presente na liga, além dos 99% estabelecidos como base.

A liga de alumínio 6060, por exemplo, contém magnésio e silício em sua composição (série 6xxx), apresenta impurezas resultantes do processo de fabricação (x0xx) e possui 99,60% de alumínio, sendo os 0,40% restantes compostos por outros elementos (CAPELARI, 2006), os quais podem incluir traços de ferro, cobre ou zinco, dependendo do processo produtivo.

Tabela 3 – Ligas de alumínio e seus principais constituintes

Série	Principal elemento de liga
1xxx	Alumínio $\geq 99\%$
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos
9xxx	Série não utilizada

Fonte: Adaptado de CAPELARI, 2006.

2.9. Análise de variância (ANOVA)

De acordo com Fogliatto (2008), o ANOVA é uma ferramenta estatística muito utilizada por pesquisadores para analisar diferenças significativas entre médias e avaliar se determinados fatores influenciam uma variável dependente, sendo para Pedott (2015) o mais conhecido, que permite decompor a variância de acordo com suas fontes e verificar sua significância (PEDOTT et al.2013). Seu uso principal é comparar médias de diferentes grupos, frequentemente chamados de tratamentos.

Segundo AIAG (2002) o ANOVA é uma ferramenta poderosa para a análise de experimentos, pois é capaz de tratar diferentes estruturas experimentais e pode fornecer informações detalhadas e mais exatas sobre as variâncias presentes nos dados experimentais (Botero-Arbeláez et al., 2007).

A hipótese nula sempre será rejeitada quando F calculado for maior que o valor F crítico (Montgomery e Runger, 1999).

Tabela 4 - Exemplo de tabela ANOVA

Fonte de Variação	Variância			Teste F
	SQ	GDL	MQ	
Entre Grupos	SQG	K-1	MQG	MQG/MQR
Dentro dos Grupos	SQR	N-K	MQR	
Total	SQT	N-1		

Fonte: Montgomery & Runger,1999

- $SQT = SQG + SQR$; (mede a variação geral de todas as observações).

É a soma dos quadrados totais. Onde:

- SQG - soma dos quadrados dos grupos (tratamentos), associada exclusivamente a um efeito dos grupos.

- SQR - soma dos quadrados dos resíduos, devidos exclusivamente ao erro aleatório, medido dentro dos grupos.

- $MQG = SQG / (K - 1)$; (Média quadrada dos grupos).
- $MQR = SQR / (N - K)$; (Média quadrada dos resíduos (entre os grupos)).
- $F = MQG / MQR$
- $N - 1 = (K - 1) + (N - K)$; (Grau de liberdade).

Observações:

- N: número de grupos;
- K: número de elementos;
- Variação das observações dos grupos é dada por SQR e MQR
- Variação total entre médias é dada por SQG e MQG medem a variação total entre as médias.

3. METODOLOGIA

3.1. Confeção das ferramentas

A confecção da ferramenta foi feita através do corte de uma barra de aço AISI H13, com diâmetro aproximado de 19 milímetros, em 9 amostras, com comprimento igual a 52 milímetros, utilizando uma cortadora metalográfica da marca Fortel e modelo CF III (figura 7) que se encontra no laboratório de metalografia da Universidade Federal do Pampa.

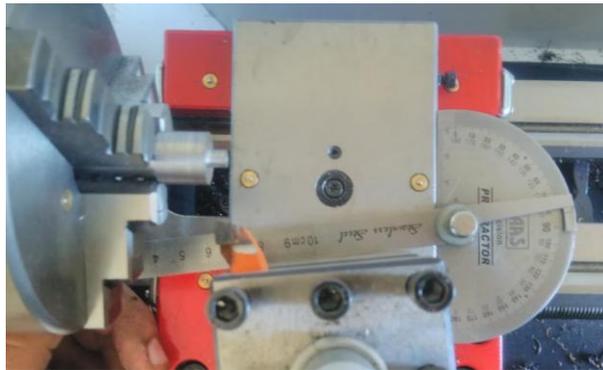
Figura 7: Cortadora metalográfica da marca Fortel e modelo CF III.



Fonte: Autor.

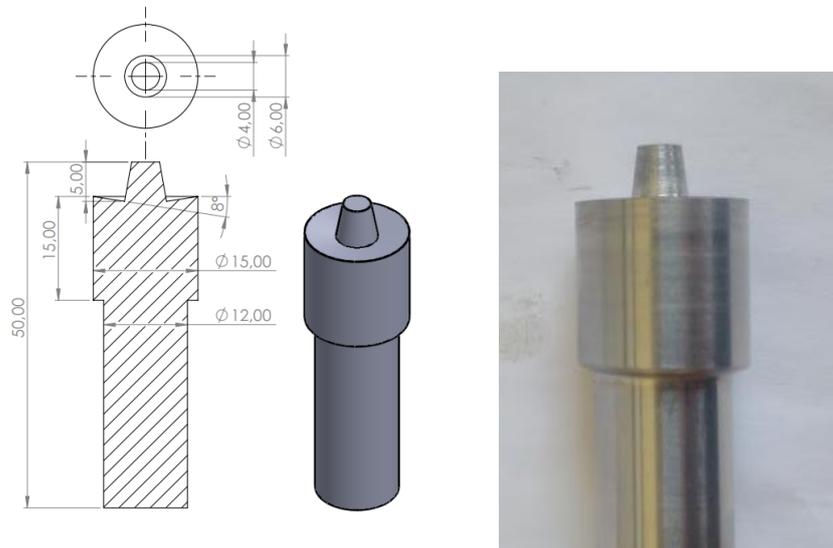
Após o corte, as 9 amostras foram usinadas em um torno da marca Clark e modelo BV20B x 550, figura 8, que está localizado no laboratório de usinagem da Universidade Federal do Pampa, sofrendo faceamento de 1 milímetro em ambas extremidades para atingir comprimento total de 50 milímetros, seguido de desbaste da geometria do pino central, com 5,0 milímetro de comprimento, proeminente, desbaste da base cilíndrica de 5 milímetros de diâmetro e 4 milímetros na extremidade gerando uma conicidade lisa, um ombro cilíndrico com 15 milímetros de diâmetro externo e 15 milímetros de comprimento, uma angulação interna ao ombro até a base do pino central com inclinação de 8° graus, garantidos com movimentação do castelo de usinagem e conferência com goniômetro, apresentado na figura 8, e uma proeminência cilíndrica de 12 milímetros de diâmetro com comprimento de 30 milímetros para fixação a pinça de ferramenta, conforme figura 9.

Figura 8: Usinagem da ferramenta confeccionada com pino cônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 9: Geometria da ferramenta confeccionada com pino cônico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.2. Tratamentos térmicos

Tempera e revenido serão realizados no laboratório de fundição da Universidade Federal do Pampa, em um forno de tipo mufla, os tratamentos teóricos foram escolhidos por serem de fácil acesso e produção dentro da universidade.

As ferramentas foram separadas em 3 grupos, cada grupo contendo 3 ferramentas, onde todos os grupos receberam o tratamento de tempera, a qual o forno foi preaquecido por 30 minutos, ao mesmo tempo utilizando uma porta amostra, em que a temperatura escolhida para o aquecimento foi de 1040 °C por 40 minutos, para garantir a

homogeneização de temperatura no interior nas amostras e seu resfriamento foi feito em óleo sem agitação.

Para a realizar o revenido deve haver o preaquecimento da mufla até a temperatura desejada antes de colocar a amostra. O primeiro grupo recebeu duplo revenido (DR), a 500 °C com duração de 2 hora cada, o segundo grupo recebera um revenido (UR), a 500 °C com duração de 2 hora, e o terceiro grupo sofrera apenas tempera, apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Tratamentos térmicos aplicados as amostras de AISI H13

Ferramentas	Têmpera (Cº)	Têmpera (Min)	UR (Cº)	UR (Min)	DR (Cº)	DR (Min)
1	1040	40	500	120	500	120
2	1040	40	500	120	500	120
3	1040	40	500	120	500	120
4	1040	40	500	120	N/A	N/A
5	1040	40	500	120	N/A	N/A
6	1040	40	500	120	N/A	N/A
7	1040	40	N/A	N/A	N/A	N/A
8	1040	40	N/A	N/A	N/A	N/A
9	1040	40	N/A	N/A	N/A	N/A

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3. Análise de microdureza

Os ensaios de microdureza serão realizados no microdurometro Buehler MicroMet 6010, localizado no laboratório de Pós-graduação da UNIPAMPA campus Alegrete. Para cada amostra foram feitas 3 coletas de dados em diferentes regiões, este teste foi executado após os tratamentos térmicos e a sua escala de dados em Vickers, utilizando uma carga 0.5kgf para adquirir os dados com tempo de permanência de 10 segundos por endentação.

Figura 10: Microdurometro Buehler modelo MicroMet 6010.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.4. Fluorescência de raio X

A análise por fluorescência de raio X será realizada na Universidade Federal do Pampa através de um equipamento PANalytical Epsilon1, figura 11, com o objetivo de caracterizar a composição química tanto do aço AISI H13 quanto do alumínio, utilizado para desgaste.

O processo consiste em obter uma amostra com espessura limitada de 5 milímetros, inserida no equipamento responsável por produzir ondas no espectro de raio X, variando seu comprimento de 0,01 a 10 nanômetros, que provocam mudança de eletrosfera por parte dos elétrons, que quando decaem, emitem comprimento de onda, através de fótons, que são característicos de cada elemento químico, possibilitando assim a obtenção da composição química da amostra em análise para comparação com a literatura.

Figura 11: Equipamento para fluorescência de raio X PANalytical.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.5. Pesagem das ferramentas

A pesagem das ferramentas será realizada antes e depois dos testes como mostra a figura 12, logo após o ciclo do banho em soda caustica solubilizada em água para remoção do alumínio incrustado a ferramenta, utilizando uma balança de precisão localizada no laboratório de metalografia da Universidade Federal do Pampa.

Este processo terá o objetivo de obter a variação das massas, se houver, causadas por desgaste da ferramenta proporcionado pelo do ciclo de solda por fricção.

Figura 12: Pesagem das ferramentas antes (A) e após (B) o teste de desgaste



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

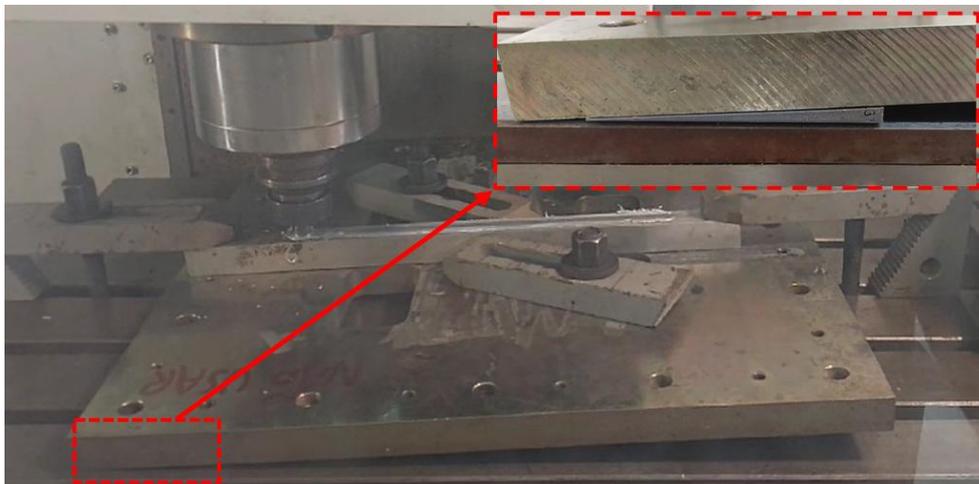
3.6. Simulação de ciclo de trabalho para desgaste

Para a simulação de ciclo de trabalho para desgaste foi utilizado um centro de usinagem da marca Romi, modelo D-800, que está localizado no laboratório de usinagem da Universidade Federal do Pampa.

O ensaio de desgaste visa simular um ciclo de trabalho com um total de 10 metros de cordão de solda em uma barra de liga de alumínio, caracterizada por análise de fluorescência de raio X, em um centro de usinagem CNC com avanço de 30 milímetros por minuto e 2000 RPM (rotações por minuto).

O material de alumínio, fixado ao barramento do centro de usinagem através de suportes parafusados que garantiam o travamento da barra sobre uma placa de aço inclinada a 3 graus em relação ao barramento através do uso de cunhas feitas em polímero utilizando impressão 3D com camadas de 0,2 mm de altura (Figura 13). A barra possui uma seção de 300 milímetros onde a ferramenta simulara um ciclo de solda, com 34 passes, totalizando 10,2 metros de comprimento de solda efetivo e um tempo para cada ciclo por ferramenta de 340 minutos.

Figura 13: Cunha de 3 graus aplicada a placa para teste FSW.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A ferramenta penetra um comprimento aproximado de 4,5 centímetros, apoiando assim o ombro sobre a superfície do alumínio e iniciar a movimentação ao longo dos 300 milímetros, afastando-se do alumínio e retornando ao ponto inicial de penetração para reiniciar o ciclo de desgaste.

Figura 14: Centro de usinagem CNC Romi D800.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

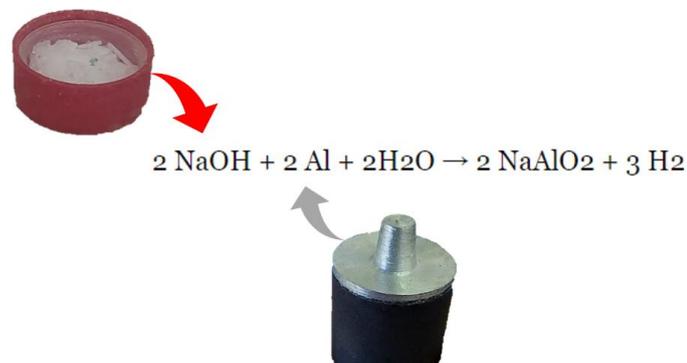
3.7. Remoção do alumínio incrustado na ferramenta

Após o término do ensaio de desgaste a ferramenta apresenta incrustação de alumínio em sua superfície, que deve ser removido através de banho químico em soda caustica para verificar a variação de massa através da pesagem.

As amostras foram submersas em solução aquosa de forma individual, utilizando sete gramas e meio de soda caustica para 100 mililitros de água em um becker de vidro, já que a solução é exotérmica e não deve ser realizada em polímeros, e deixada submersa por 24 horas, garantindo a remoção total do alumínio.

A reação entre alumínio e soda cáustica (hidróxido de sódio) gera hidrogênio gasoso, que é inflamável, e aluminato de sódio, esta reação é exotérmica e deve ser realizada em recipiente resistente a temperatura, além de ser realizada longe de fontes de fagulhas e em ambiente ventilado para evitar riscos de chamas. Esta reação está presente na figura 15.

Figura 15: Ilustração da deposição de alumínio na ferramenta interação com soda caustica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4. RESULTADOS

Nesta seção será apresentado a análise do material através de Fluorescência de raio X (FRX). A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, no qual foram realizados através de Microdureza Vickres e Ensaio de Desgaste.

4.1. Fluorescência de raio X

4.1.1 Aço H13

A tabela 6 apresenta os dados obtidos através da análise feita por fluorescência de raio X apresentando os principais elementos de liga do aço H13 encontrados na amostra em comparação com *AWS Vol. 1– Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys*. (1998), o resultado da comparação corrobora o aço usado nas amostras como AISI H13.

A mostra apresentou uma concentração de 0,057% do elemento lantânio, que é da família de elementos das terras raras, possui como característica alta ductibilidade podendo ser aplicado ao aço para melhorar absorção de impactos, embora segundo Santaella (2020), o material seja mais comumente utilizado para catalizadores veiculares e imãs.

Tabela 6 - Composição da amostra do aço AISI H13

AISI H13	Si	P	S	C	V	Cr	Mn	Ni	Mo
Amostra	1,057	0,002	0,000	0,371	0,878	4,957	0,427	0,207	1,208
Referencia Welding Society. AWS Vol. 1 (1998)	0,80 - 1,20	0,01 - 0,035	0,00 - 0,04	0,32 - 0,45	0,80 - 1,20	4,75 - 5,50	0,20 - 0,50	0,00 - 0,15	1,10 - 1,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 7– Composição de outros elementos da amostra do aço AISI H13

AISI H13	Ca	Cu	La
Amostra	0,033	0,062	0,057

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.1.2 Alumínio

Análise na liga de alumínio utilizada nos testes através da técnica de FRX mostra composição similar a liga 6060, apresentado na tabela 8, onde a resistência mecânica elevada é consequência da presença de silicato de magnésio (Mg_2Si), também conferindo a liga boa resistência à corrosão, boa usinabilidade e soldagem (CERVEIRA, 2008).

Tabela 8 - Composição da amostra do alumínio

Aluminio	Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Al
Amostra	0,510	0,460	0,140	0,049	0,030	94,641
Referencia AITA (2021)	0,47	0,41	0,16	0,06	0,01	--

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A tabela 9 apresenta outros elementos encontrados na amostra. Os elementos de cobre (Cu) e cálcio (Ca) encontrados apresentam a função de melhorar usinabilidade, enquanto o elemento titânio (Ti) é aplicado as ligas de alumínio comumente para refino de grão.

Tabela 9 – Elementos encontrados na amostra do alumínio

Aluminio	Sc	Cu	Ca
Amostra	0,014	0,003	0,028

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.2. Dureza Vickers

Na Tabela 10 foram apresentados os resultados das médias de dureza Vickers, desvio padrão (DP) e variância de aumento de dureza das amostras tratadas em relação às amostras sem tratamento.

Percebe-se que o coeficiente de variação é muito baixo, significando que os resultados das médias são representativos e o desvio padrão nos mostra que os dados estão com uma variação muito pequena nas médias. Ainda no que se refere, podemos

notar que o melhor resultado de dureza foi obtido pela amostra com duplo revenimento (DR) após tempera.

Os dados possuem uma distribuição normal distante de 0. No entanto, foi realizado a análise de variância (ANOVA) onde foi constatado uma significância maior do que 1%.

Na figura 16 podemos visualizar o comportamento de dureza para cada tratamento escolhido e a amostra de controle. O tratamento com tempera apresenta uma dureza de 258% em relação ao controle, a amostra com UR teve um resultado de 252% de ganho na dureza, porém o resultado com a maior diferença, atingindo 264% em relação a amostra controle foi a com DR.

H0 considera que a aplicação de diferentes tratamentos térmicos na amostra não gera diferença significativa para a microdureza, enquanto H1 considera que há.

Tabela 10 – Médias de dureza, DP e variância das amostras

Grupo	Contagem	Soma	Média HV	Variância	DP
Têmpera 1	3	1971,1	657,033	45,743	
Têmpera 2	3	1972,1	657,367	62,813	4,962
Têmpera 3	3	1973,1	657,700	232,33	
UR 4	3	1875,5	625,167	135,363	
UR 5	3	1867,3	622,433	207,573	1,258
UR 6	3	1902,1	634,033	6,143	
DR 7	3	1915,7	638,567	68,573	
DR 8	3	1935,9	645,3000	15,250	6,471
DR 9	3	1925,8	641,933	36,931	

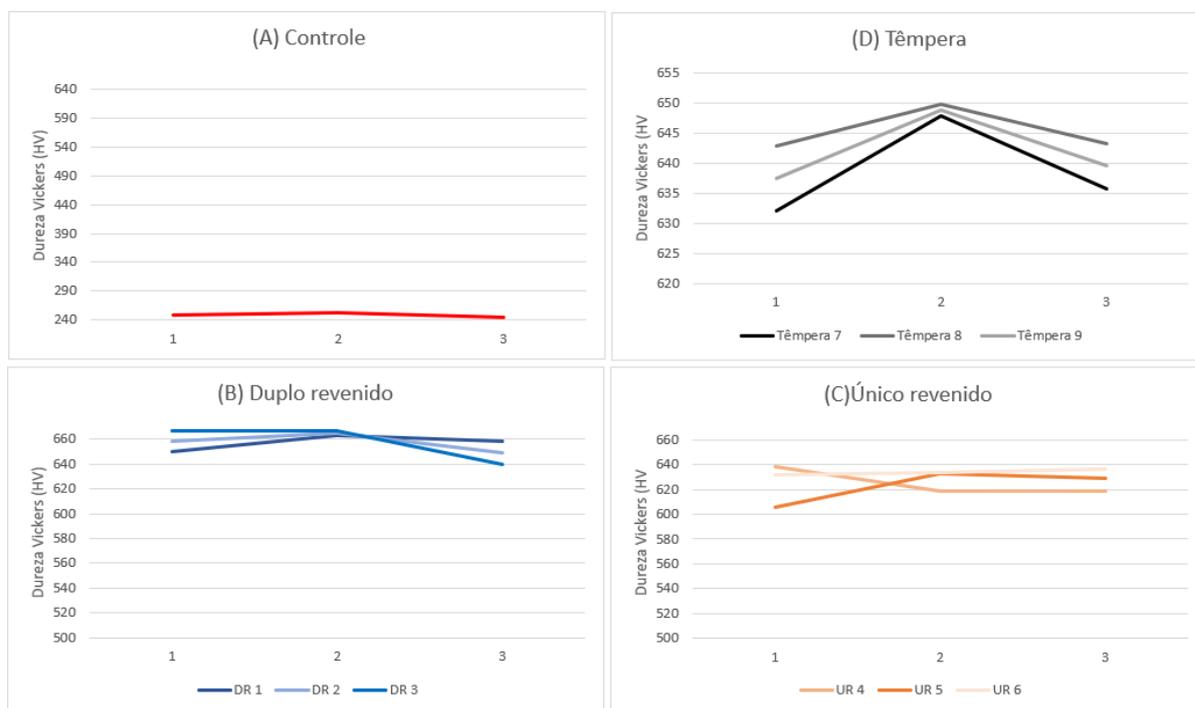
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 11- ANOVA influência do tratamento térmico na microdureza

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4382,190	8	547,774	6,081	0,000732	3,705
Dentro dos grupos	1621,442	18	90,080			
Total	6003,631	26				

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 16: Dureza média das amostras em cada tratamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.3. Ensaio de desgaste

Os resultados que a tabela 12 apresenta correspondem as massas das amostras pesadas antes dos testes de desgaste causado pela simulação do ciclo de trabalho com duração total de 339 minutos em cada ferramenta, com todas as ferramentas sofrendo redução de sua massa por conta de desgaste.

As amostras submetidas aos tratamentos térmicos de duplo revenimento (DR) apresentara uma média de perda de massa em 0,004%, enquanto a com único revenimento (UR) apresenta 0,017% de redução de massa meia inicial e as amostras com apenas com têmpera tem uma média de redução de massa em 0,654%.

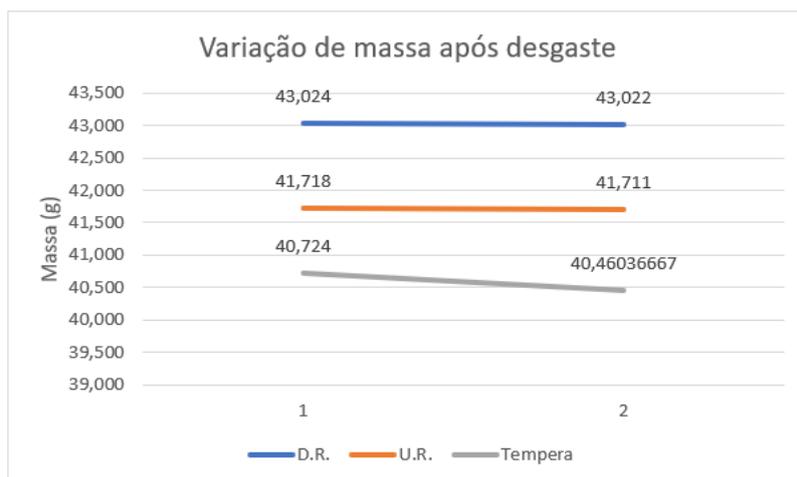
Tabela 12 – Massas antes e depois do desgaste das amostras do aço AISI H13

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Massa antes	42,664	42,674	43,732	42,152	41,012	41,989	39,269	42,339	40,565
Massa depois	42,663	42,674	43,729	42,149	41,009	41,974	38,873	42,156	40,353
Massa perdida em %	0,003	0,002	0,008	0,009	0,007	0,036	1,008	0,433	0,522

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

É possível notar que as ferramentas que receberam tratamento de duplo revenido (DR) após tempera, são as menores desgaste em comparação com as demais, enquanto as ferramentas apenas com tratamento térmico de tempera registraram maior percentual em perda de massa, como mostra a figura 17.

Figura 17: Massas perdidas pelas amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tomando como base os pontos das medidas antes como $x_1=1$ e o ponto após como $x_2=2$, podemos calcular a inclinação da reta de desgaste com a variação de massa, apresentado na tabela 13.

Tabela 13– Inclinação da reta de desgaste e porcentagem de massa perdida

Amostras	Inclinação da reta	Massa perdida em %
DR	0,002	0,0039
UR	0,007	0,0176
Tempera	0,264	0,6545

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A tabela 14 apresenta uma análise de variância para o ensaio de desgaste com foco na perda de massa em comparação com tratamento térmico recebido pela amostra. O fator crítico do ANOVA se mostra inferior ao fator F, o que apresenta uma ligação entre a condição de redução da massa com influência do tratamento térmico recebido pela amostra.

Tabela 14– ANOVA das médias de massa perdida X Tratamento térmico

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	30,916	8	3,865	29,532	5,7E-10	5,467
Dentro dos grupos	0,118	9	0,013			
Total	31,034	17				

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste estudo com o objetivo geral investigar o ciclo de vida e o desgaste de ferramentas usadas no processo de soldagem FSW em particular as ferramentas de aço AISI H13 variando seu tratamento térmico. Os objetivos específicos foram a verificação da variação da massa após os ensaios, avaliar os efeitos do tratamento térmico na dureza das amostras e a comparação da curva de desgaste dos diferentes tratamentos.

- 1) A classificação das propriedades químicas através da fluorescência de raio X validam que o material para produção das amostras é o aço AISI H13 diante de sua composição.
- 2) A análise estatística ANOVA apresenta que F maior ao $F_{critico}$, corroborando a H_1 e conclui que a aplicação de tratamentos térmicos as amostras criam significativa diferenças não só entre amostra sem tratamento e as que receberam tratamentos, como também entre os tipos de tratamento recebidos
- 3) As amostras com tratamento de duplo revenido apresentaram uma menor variação de massa, média de 0,004%, quando em comparação com único revenido, média de 0,017%, e têmpera, média de 0,65%, mostrando ser mais eficiente para aplicação de ferramentas para FSW com maior vida útil.
- 4) A massa perdida das amostras apenas com tratamento térmico de tempera foi consideravelmente superior as com tratamento térmico de revenimento, apontando que o relaxamento das tensões internas do material causadas pelo mesmo reduz o desgaste significativamente das ferramentas em FSW, assim como o ANOVA apresenta um fator F maior que o $F_{critico}$, confirmando a importância do tratamento na influência do desgaste da ferramenta e o cálculo das inclinações das retas relacionadas à perda de massa.

6. SUGESTÕES DE TABALHOS FUTUROS

- Estudo da variação de microestrutura.
- Desenvolver geometrias de ferramentas diferentes.
- Testar novos parâmetros de processo.
- Testar novos tratamentos térmicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP – AIAG. -Measurement Systems Analysis. 3rd ed. Detroit: Chrysler Corporation; Ford Motor Company and General Motors Corporation, 2002.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS Vol. 4, Welding Handbook – Materials and Applications – part 2. 8. ed. Miami, 1998.

BARRY. N. Handbook of Practical X-ray Fluorescence Analysis. Springer, Berlin, 2006.

BRYSON, W. E. Heat treatment, selection, and application of tool steels. 2nd editio ed. Cincinnati, USA: Hanser Publications, 2009.

BOTERO Arbeláez, Marcela, Arbeláez Sañazar, Osiel, Mendoza Vargas Jairo A. . Método Anova utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control decalidad de un sistema de medición. Scientia Et Technica [em linea]. 2007, XIII(37), 533-537

CARDARELLI, F., 2008. Materials Handbook 2ª ed., Tucson: Springer, 1365p

COZZA, R. C. Estudo de Comportamento de Coeficiente de Desgaste e dos Modos de Desgaste Abrasivos em Ensaio de desgaste Micro Abrasivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2006. 197 p.

FOGLIATTO, F. S. Multiresponse optimization of products with functional quality characteristics. Quality and Reliability Engineering International, v. 24, n. 8, p. 927-939, 2008. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.939>

GEROGE, E. Totten, 2006, Steel Heat Treatment Handbook, 2ed., Ed. CRC Press

GUERRA, M.; SCHMIDT, C.; MCCLURE, J.C.; MURR, L.E.; NUNESB, A.C. Flow patterns during friction stir welding. Materials Characterization, 49, p. 95– 101, 2003.

HOLLER, F. James; SKOOG, Douglas A.; CROUCH Stanley R., Princípios de Análise Instrumental, 6ª ed.,Porto Alegre, Bookman, 2009.

HOLMBERG, K. et al. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. Tribology International, v. 78, p. 94–114, 2014.

JOST, H. P., Department of Education and Science, Lubrication (tribology) education and research, London, 1966, p.4.

KATO, K., ADACHI, K., “Wear Mechanisms”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22, 2001.

KOZMINSKI, EMÍLIA L.O. Análise Microestrutural e Avaliação Mecânica de Juntas Soldadas por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) do Aço Inoxidável Dúplex UNS S31803. Dissertação de Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, 2015.

KRAUSS, G. Steels: processing, structure and performance. Materials Park.: ASM International®, 2005

KRAUSS, G. Steels – Processing, Structure, and Performance, 2nd Edition. ASM International, U.S., 2015.

KUMAR, P., CHAUHAN, S. R., 2015. “Machinability Study on Finish Turning of AISI H13 Hot Working Die Tool Steel With Cubic Boron Nitride (CBN) Cutting Tool Inserts Using Response Surface Methodology (RSM)”, Arabian Journal for Science and Engineering, v. 40, p. 1471-1485.

KUMAR, S.; NAGRAJ, M.; BONGALE, A. et al. Deep Cryogenic Treatment of AISI M2 Tool Steel and Optimisation of Its Wear Characteristics Using Taguchi’s Approach. Arabian Journal for Science and Engineering, 43, n. 9, p. 4917-4929, 2018/09/01 2018.

MESQUITA, R. A. Tool steels: Properties and performance. CRC press, 2016. 1439881723.

MISHRA, R.S., MA, Z.Y. Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering, v. 50, p. 1-78, 2005

MONTGOMERY, D.C., Runger, G.C., Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Ed. LTC, Rio de Janeiro 1999.

PALDEY, S.; DEEVI, S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review. Materials Science and Engineering A, v. 342, n. 1–2, p. 58–79, 2003.

PEDOTT, Alexandre. Análise de Dados Funcionais Aplicada à Engenharia da Qualidade, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

PEDOTT, A. H. et al. - Estudos de repetitividade e reprodutividade para dados funcionais. *Produção*, v. 23, n. 3, p. 548-560, 2013.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. *Tool steels*. 5. ed. [s.l.] ASM International®, 1998.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A micro-abrasive wear test with particular application to coated systems. *Surface e Coatings Technology*, Lausanne, v. 79, p. 231-239, 19

SILVA, A. L. V. DA C.; MEI, P. R. *Aços e Ligas Especiais*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, G. W.; BRANDT, J. M.; Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles. *Tribology International*, v. 39, p. 1-11, 2006.

SANTAELLA, Cesar Roberto Kiral. Efeito da adição de terras raras no processo de boretação do aço AISI 1045. 2020. 188 p. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

THOMAS, W. M. et al. "Friction Stir Butt Welding" International patent application No.PCT/GB92/02203 and GB patent application No.9125978.8, 6 Dezembro, 1991.

THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design*, Vol. 18, n. 4/6, p. 269-273, 1997.

TOTTEN, G. E. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. CRC press, 2006. 0849384559.

Umbrello, D., Rizzuti, S., Outeiro, J.C., Shivpuri, R., M'Saoubi, R., 2008. "Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel", *journal of materials processing technology*, v. 199, p. 64-73.

VILAÇA, P.; *Fundamentos dos Processos de Soldadura por Fricção Linear: Análise Experimental e Modelação Analítica*, PhD Thesis, IST, 2003;

ZHAO, Y.; LIN, S.; WU, L.; QU, F. The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy. *Materials Letters*, 59, p. 2948–2952, 2005

WIEDENHÖFT, A.; Estudo do comportamento mecânico, metalúrgico e elétrico de juntas sobrepostas dissimilares da liga de Cobre ASTM C110 e de Alumínio AA6060-T5 produzidas pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) modificado, Porto Alegre, 2018.