



Guilherme Dembogurski

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO AÇO VF800 REPARADO COM O ARAME TUBE-
ALLOY 260-G PELO PROCESSO GMAW-CMT**

Horizontalina - RS

2025

Guilherme Dembogurski

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO AÇO VF800 REPARADO COM O ARAME TUBE-
ALLOY 260-G PELO PROCESSO GMAW-CMT**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin.

Horizontina - RS

2025

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“Avaliação tribológica do aço VF800 reparado com o arame Tube-Alloy 260-G
pelo processo GMAW-CMT”**

Elaborada por:
Guilherme Dembogurski

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 28/11/2025
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Me. Eduardo Turra Moos
Faculdade Horizontina (FAHOR)

Prof. Dr. Cristiano José Scheuer
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Horizontina - RS
2025

AGRADECIMENTO

A Deus, pela força e sabedoria concedidas em todos os momentos desta caminhada acadêmica. Aos meus familiares, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo durante todos os desafios enfrentados nesta jornada. À minha esposa Anna Julia Oliveira Dembogurski, por compreender as ausências, oferecer palavras de encorajamento e estar sempre ao meu lado, tornando possível a conclusão deste trabalho. Ao professor Rafael Luciano Dalcin, pela orientação dedicada, pela paciência e pela partilha de conhecimento técnico e científico que foram fundamentais para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Seu comprometimento e disponibilidade foram essenciais para transformar ideias em resultados concretos.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) [Processo no. 24/2551-0000770-9].

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho tribológico do aço VF800 reparado pelo processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) com o modo Cold Metal Transfer (CMT). O estudo buscou verificar a viabilidade da recuperação desse material, amplamente utilizado na fabricação de ferramentas de conformação a frio. Amostras com dimensões de 20 × 75 × 250 mm foram preparadas, pré-aquecidas a 450 °C e soldadas utilizando o processo GMAW-CMT. Posteriormente, foram realizados ensaios metalográficos, medições de microdureza e ensaios tribológicos em tribômetro linear recíproco, em conformidade com a norma ASTM G133. Os resultados revelaram alterações microestruturais significativas na zona termicamente afetada (ZTA), que apresentou o maior pico de dureza, superior a 900 HV_{0,3} em comparação ao metal de solda (600–700 HV_{0,3}) e ao metal de base (400–500 HV_{0,3}). Nos ensaios tribológicos, o metal de solda apresentou os menores coeficientes de atrito e desgaste, enquanto o metal de base mostrou maior suscetibilidade à remoção de material. As morfologias das trilhas de desgaste indicaram predominância do mecanismo abrasivo, com boa integridade superficial das regiões reparadas. A análise do desgaste indicou boa integridade superficial das regiões reparadas, evidenciando a viabilidade técnica do processo GMAW-CMT para a recuperação do aço VF800 em aplicações industriais que exigem resistência ao desgaste e estabilidade dimensional.

Palavras-chave: Aço VF800. Reparo. Processo GMAW-CMT. Dureza. Coeficiente de atrito. Desgaste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de revenimento do aço VF800.....	17
Figura 2 – Tensão de ruptura em flexão do aço VF800AT.....	18
Figura 3 – (a) Diagrama TTT. (b) Diagrama CCT.....	19
Figura 4 – Regiões da ZTA e respectivas temperaturas	21
Figura 5 – Esquema do perfil de medições de microdureza	22
Figura 6 – Principais modos de desgaste em ferramentas de estampagem: (a) adesivo, (b) abrasivo, (c) fadiga e (d) corrosivo	24
Figura 7 – Exemplos de desgaste adesivo e abrasivo observados em punções de estampagem.....	25
Figura 8 – Fluxograma do planejamento de estudo	27
Figura 9 – A microestrutura do metal base foi atacada com o reagente de Vilella e revelada sob microscópio óptico	28
Figura 10 – (a) Retífica usada na preparação das amostras; (b) Amostra do aço VF800 após a retificação.....	29
Figura 11 – (a) Robô durante o processo de GMAW-CMT; (b) amostra soldada.....	29
Figura 12 – Microscópio óptico usado para fazer a macrografia	31
Figura 13 – Microdurômetro Shimadzu usado para medição	32
Figura 14 – Ensaio de desgaste no tribômetro	33
Figura 15 – Microscópio óptico para registro das trilhas desgastadas	34
Figura 16 – Balança analítica para medição da perda de massa.....	34
Figura 17 – Macrofotografia do aço VF800 reparado pelo processo GMAW-CMT ...	36
Figura 18 – Perfil de microdureza Vickers sobre a seção transversal do aço VF800 reparado pelo processo GMAW-CMT	37
Figura 19 – Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento: (a) 10 N; (b) 15 N; (c) 20 N.....	38
Figura 20 – Variação do coeficiente de desgaste em função da carga aplicada.....	40
Figura 21 – Morfologia superficial das trilhas desgastadas (meio da trilha) após ensaios de deslizamento recíproco: (a) 10 N; (b) 15 N; (c) 20 N. (i) MB, (ii) ZTA, (iii) MS	41
Figura 22 – Morfologia superficial das trilhas desgastadas (ponta da trilha) após ensaios de deslizamento recíproco: (a) 10 N; (b) 15 N; (c) 20 N. (i) MB, (ii) ZTA, (iii) MS	42

Figura 23 – Dureza média do MS, ZTA e MB.....	43
Figura 24 – Variação do coeficiente de atrito (a) e da perda de massa (b) em função da carga aplicada	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Famílias de aços ferramenta	15
Tabela 2 – Comparação entre aços ferramenta para trabalho a frio	16
Tabela 3 – Composição química do aço VF800 (em % em peso).....	28
Tabela 4 – Composição química do arame Tube-Alloy 260-G (em % em peso).....	28
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem utilizados para o reparo do aço VF800 pelo processo GMAW-CMT	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	TEMA	10
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	10
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.4	OBJETIVO.....	11
1.4.1	Objetivo geral	11
1.4.2	Objetivos específicos.....	12
1.5	JUSTIFICATIVA	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	AÇOS PARA FERRAMENTAS DE TRABALHO A FRIO	14
2.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS FERRAMENTA	16
2.3	REPARO DE AÇOS FERRAMENTA PELO PROCESSO GMAW	19
2.4	DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO RECUPERADAS POR SOLDAGEM.....	23
3	METODOLOGIA	27
3.1	METAL BASE E METAL DE ADIÇÃO	27
3.2	PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E SOLDAGEM	29
3.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	30
3.4	ENSAIO DE MICRODUREZA	31
3.5	ENSAIO TRIBOLÓGICO	32
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA.....	36
4.2	ANÁLISE DOS PERFIS DE MICRODUREZA	37
4.3	AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA.....	37
4.4	DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS	42
	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eficiência produtiva e redução de custos na indústria metalmeccânica tem impulsionado o desenvolvimento de aços ferramenta de alto desempenho, capazes de suportar altas tensões mecânicas e condições severas de desgaste. Entre esses materiais, destaca-se o aço VF800, amplamente empregado na fabricação e recuperação de ferramentas utilizadas em processos de conformação a frio, devido à sua elevada dureza, boa tenacidade e resistência ao desgaste, características resultantes de sua microestrutura martensítica com carbonetos primários e secundários (Pellin; Israel; Dalcin, 2024).

Apesar de suas excelentes propriedades, o aço VF800 está sujeito a falhas durante o uso, especialmente em regiões de contato submetidas a atrito intenso e esforços cíclicos. As falhas mais recorrentes incluem trincas, lascamentos e desgaste superficial, que comprometem a integridade da ferramenta, reduzindo significativamente sua vida útil e elevando os custos de manutenção (Marques, 2019; Both, 2011). Tais danos estão associados à concentração de tensões na aresta de corte e à degradação progressiva da microestrutura martensítica em função das altas temperaturas e pressões envolvidas no processo de trabalho a frio. Nesse contexto, os processos de soldagem de reparo surgem como uma alternativa viável e economicamente vantajosa para a recuperação de componentes danificados, possibilitando a reconstrução de superfícies desgastadas e o restabelecimento das propriedades mecânicas originais, prolongando a durabilidade das ferramentas e reduzindo a necessidade de substituição completa (Altan; Oh; Gegel, 1999).

Entre os processos de soldagem empregados em reparos industriais, o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) destaca-se por oferecer elevada taxa de deposição, boa qualidade do cordão de solda e facilidade de automação, sendo amplamente utilizado em aplicações que exigem produtividade e controle dimensional rigoroso. Contudo, sua aplicação em aços-ferramenta de alta resistência, como o VF800, requer atenção especial aos parâmetros de processo — especialmente o pré-aquecimento, a temperatura de interpasse e a energia de soldagem — de modo a reduzir tensões residuais e evitar a formação de microestruturas frágeis na zona termicamente afetada (ZTA), que comprometem o desempenho mecânico e a integridade metalúrgica da junta soldada (Pellin; Israel; Dalcin, 2024; Both, 2011;

Tobola *et al.*, 2017). O controle preciso do aporte térmico e dos parâmetros de soldagem é fundamental para assegurar a integridade metalúrgica do conjunto. A manutenção adequada dessas condições permite preservar a dureza e a tenacidade do material base, além de garantir uma boa aderência entre o metal de adição e o substrato, evitando a formação de zonas fragilizadas e descontinuidades indesejadas (Dieter, 1981).

A avaliação do desempenho tribológico de aços reparados é igualmente essencial para validar a eficácia dos procedimentos de soldagem, uma vez que propriedades como coeficiente de atrito, taxa de desgaste e microdureza superficial estão diretamente relacionadas à integridade metalúrgica da interface e à compatibilidade entre o metal de adição e o metal base. Ensaio tribológicos padronizados permitem compreender os mecanismos de desgaste predominantes e estimar a durabilidade das superfícies em condições reais de serviço, auxiliando na previsão da vida útil e na otimização dos processos de reparo (Tobola *et al.*, 2017; Both, 2011). Assim, a integração entre a caracterização metalográfica e os testes de desgaste fornece subsídios técnicos para aprimorar o desempenho de ferramentas de conformação a frio reparadas por GMAW-CMT, aumentando sua confiabilidade e reduzindo custos operacionais.

1.1 TEMA

Recuperação do aço VF800 com o processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) com o modo *Cold Metal Transfer* (CMT).

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho delimita-se à investigação do comportamento tribológico do aço ferramenta VF800 submetido a reparo pelo processo GMAW-CMT. A pesquisa concentra-se na avaliação das alterações microestruturais, de dureza e de resistência aos desgastes decorrentes do processo de soldagem, considerando condições específicas de pré-aquecimento e parâmetros de soldagem previamente definidos por Pellin, Israel e Dalcin (2024).

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O aço-ferramenta VF800 é amplamente empregado em processos de conformação a frio, sendo reconhecido por sua alta dureza, resistência ao desgaste e boa tenacidade, propriedades resultantes de sua microestrutura martensítica revenida com carbonetos primários e secundários finamente distribuídos (Mesquita; Barbosa, 2005; Villares *Metals*, 2001). Apesar de suas excelentes características, esse material está sujeito a danos por trincas, lascamentos e desgaste superficial durante o serviço, principalmente em regiões de contato submetidas a elevadas tensões e atrito intenso, o que leva à redução da vida útil das ferramentas e ao aumento dos custos de manutenção e substituição (Gonçalves, 2016).

A soldagem de reparo surge como uma alternativa viável para restaurar a funcionalidade de componentes desgastados, reduzindo o descarte e o custo de produção. Entre os processos disponíveis, o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW-CMT) destaca-se pela alta taxa de deposição, versatilidade e qualidade metalúrgica do depósito, sendo amplamente utilizado em reparos industriais (Kou, 2003). Contudo, a aplicação desse processo em aços-ferramenta de alta liga, como o VF800, requer controle rigoroso dos parâmetros de pré-aquecimento, temperatura de interpasse e energia de soldagem, para evitar a formação de microestruturas frágeis na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e preservar o desempenho tribológico do material (Tobola *et al.*, 2017; Pellin, 2018).

Diante desse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: O processo de soldagem GMAW-CMT é tecnicamente viável para o reparo do aço ferramenta VF800, mantendo ou melhorando seu desempenho tribológico em relação ao material original?

1.4 OBJETIVO

1.4.1 Objetivo geral

Investigar a viabilidade da recuperação do aço VF800 por meio do processo de soldagem GMAW-CMT, avaliando as alterações microestruturais e as propriedades mecânicas resultantes, a fim de verificar sua aplicabilidade em reparos industriais.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Analisar a microestrutura do aço VF800 reparado por soldagem GMAW-CMT;
- b) Avaliar a dureza do aço reparado, da ZTA e do MS;
- c) Avaliar o comportamento tribológico (coeficiente de atrito e taxa de desgaste).

1.5 JUSTIFICATIVA

A crescente busca por eficiência produtiva e redução de custos na indústria metalmeccânica tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias voltadas à recuperação e prolongamento da vida útil de ferramentas e componentes de alto valor agregado. Nesse contexto, a aplicação de processos de soldagem de reparo representa uma alternativa tecnicamente viável e economicamente vantajosa em relação à substituição completa de ferramentas danificadas, contribuindo para a redução do consumo de matérias-primas e do impacto ambiental associado ao descarte de resíduos metálicos (Gonçalves, 2016; Both, 2011).

O aço ferramenta VF800 destaca-se entre os materiais empregados em operações de conformação a frio, devido à sua elevada dureza, resistência ao desgaste e boa tenacidade, propriedades resultantes de sua microestrutura martensítica revenida, com carbonetos primários e secundários finamente distribuídos (Mesquita; Barbosa, 2005; Tobola *et al.*, 2017). Entretanto, as condições severas de serviço — que envolvem altas pressões de contato, atrito intenso e esforços cíclicos — favorecem o surgimento de trincas, lascamentos e desgaste superficial, comprometendo a durabilidade e o desempenho das ferramentas (Gonçalves, 2016; Both, 2011).

Entre as técnicas de recuperação disponíveis, o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) apresenta alta taxa de deposição, estabilidade do arco elétrico e facilidade de automação, sendo amplamente utilizado na manutenção e restauração de componentes metálicos. No entanto, sua aplicação em aços de alta liga exige controle rigoroso de variáveis operacionais, como pré-aquecimento, temperatura de interpasse e energia de soldagem, pois essas influenciam diretamente a formação microestrutural, a distribuição de tensões residuais e as propriedades tribológicas do material reparado (Kou, 2003; Mesquita; Barbosa, 2005; Tobola *et al.*, 2017).

Dessa forma, a investigação do comportamento tribológico do aço VF800 após o reparo por GMAW-CMT justifica-se pela necessidade de compreender os efeitos metalúrgicos e funcionais do processo, possibilitando a definição de parâmetros de soldagem adequados e o aprimoramento das práticas de recuperação de ferramentas. Além de sua relevância técnica, o estudo também possui importância ambiental e econômica, ao prolongar a vida útil dos componentes metálicos e reduzir o consumo de recursos e o descarte industrial (Gonçalves, 2016; Both, 2011).

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura apresenta um panorama dos aços ferramenta para trabalho a frio, abordando os tratamentos térmicos empregados, as técnicas de reparo por soldagem e o desempenho de ferramentas recuperadas por esse processo.

2.1 AÇOS PARA FERRAMENTAS DE TRABALHO A FRIO

As ferramentas utilizadas em processos de trabalho a frio são fabricadas em aços especiais, desenvolvidos para oferecer alta dureza, resistência ao desgaste e boa tenacidade — propriedades fundamentais para suportar as elevadas cargas de contato e atrito presentes na conformação mecânica. Entre os materiais mais empregados destacam-se os aços da série AISI, especialmente os tipos D2 e A2, amplamente utilizados na fabricação de punções, matrizes e insertos de corte (Hillskog, 2015).

Apesar da excelente resistência ao desgaste, a baixa tenacidade dos aços da classe D — em especial do AISI D2 — os torna suscetíveis à formação de trincas sob impacto ou carregamentos severos, o que limita seu uso em determinadas operações de conformação. Para compreender melhor o comportamento desses materiais, é importante conhecer a classificação geral das famílias de aços-ferramenta, organizada segundo suas características metalúrgicas, meio de têmpera e aplicação típica, conforme apresentado na Tabela 1.

Nesse contexto, o aço VF800AT surgiu como uma alternativa moderna aos aços da série D, oferecendo maior tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade dimensional. Sua composição química balanceada, com teores controlados de C, Cr, Mo, V e Nb, resulta em uma microestrutura martensítica refinada, elevada temperabilidade e menor suscetibilidade à formação de trincas (Villares *Metals*, 2001; Mesquita; Barbosa, 2005; Both, 2011).

Tabela 1 – Famílias de aços ferramenta

Grupo	Característica	Aplicação
W	Temperáveis em água (<i>water quench</i>)	Trabalho a frio
L	Baixa liga para aplicações especiais (<i>low alloy</i>)	Trabalho a frio
S	Resistentes ao choque (<i>shock resistant</i>)	Trabalho a frio ou a quente
O	Temperáveis em óleo (<i>oil quench</i>)	Trabalho a frio
A	Temperáveis ao ar (<i>air quench</i>)	Trabalho a frio
D	Alta temperabilidade (<i>deep hardening</i>)	Trabalho a frio
H	Aços para trabalho a quente (<i>hot work</i>)	Trabalho a quente
T	Aços rápidos ao tungstênio	Usinagem
M	Aços rápidos ao molibdênio	Usinagem
P	Aços para moldes	Moldes para injeção de plásticos

Fonte: Adaptado de Froehlich, 2003

Pesquisas recentes, como as de Kim *et al.* (2015) e Tobola *et al.* (2017), destacam a evolução dos aços com 8% de cromo, que podem ser considerados versões modificadas do AISI D2. Esses aços apresentam menores teores de carbono e cromo, o que reduz a formação de carbonetos primários frágeis, conferindo maior tenacidade e melhor desempenho em condições severas de operação.

Estudos microestruturais indicam que o refinamento dos carbonetos M_7C_3 e $M_{23}C_6$ desempenha papel fundamental no aumento da resistência à propagação de trincas e na estabilidade dimensional após o tratamento térmico, além de favorecer a soldabilidade e os reparos por processos de arco elétrico (Tobola *et al.*, 2017; Macek; Hájek; Tobola, 2019). Conforme apresentado na Tabela 2, os aços ferramenta com teor de 8% de cromo, como o VF800AT, apresentam uma combinação superior de dureza e tenacidade em comparação ao aço AISI D2, tradicionalmente utilizado em aplicações de conformação a frio. Dessa forma, esses materiais vêm se consolidando como alternativas promissoras para a substituição de ligas convencionais, proporcionando maior vida útil, resistência mecânica e confiabilidade operacional em ferramentas submetidas a elevadas solicitações mecânicas e térmicas.

Tabela 2 – Comparação entre aços ferramenta para trabalho a frio

Aço	Composição típica (Cr, C, outros)	Propriedades principais	Limitações
AISI D2	~12% Cr, 1,5% C	Alta dureza e resistência ao desgaste	Baixa tenacidade, suscetível a trincas
Aços 8% Cr	~8% Cr, 0,8-1,2% C, Mo, V	Combinação de dureza e tenacidade superior ao D2	Em consolidação industrial
VF800AT	C 0,85%; Cr 8,5%; Mo 2,0%; V 0,5%; Nb 0,15%	Alta tenacidade, resistência ao desgaste, menor risco de trinca	Custo mais elevado

Fonte: Adaptado de Villares *Metals*, 2001, 2003; Mesquita; Barbosa, 2005; Kim *et al.*, 2015; Tobola *et al.*, 2017

A compreensão da relação entre composição química, microestrutura e propriedades mecânicas é essencial para otimizar tanto o desempenho quanto os procedimentos de recuperação por soldagem. O VF800AT, por combinar alta dureza com boa tenacidade, apresenta excelente resposta ao processo GMAW, permitindo restaurar componentes danificados sem comprometer significativamente suas propriedades originais (Böhler, 2008; Tonkovič *et al.*, 2015; Both, 2011).

Além disso, estudos recentes sobre aços de 8% Cr, como os de Tobola *et al.* (2017) e Macek, Hájek e Tobola (2019), confirmam a tendência de substituição progressiva do AISI D2, graças à maior resistência à propagação de trincas, melhor tenacidade transversal e microestrutura mais homogênea. A distribuição uniforme dos carbonetos M_7C_3 e $M_{23}C_6$ reduz concentrações de tensões, garantindo estabilidade dimensional durante o revenimento e em processos de soldagem, fatores que reforçam o potencial do VF800AT como material de alto desempenho para ferramentas de conformação a frio e aplicações submetidas a desgaste severo.

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS FERRAMENTA

O desempenho dos aços-ferramenta está diretamente associado à aplicação de tratamentos térmicos adequados, os quais permitem ajustar a microestrutura e, consequentemente, as propriedades finais do material. Entre esses tratamentos, destacam-se a têmpera e o revenimento, amplamente empregados na indústria metalúrgica para equilibrar dureza, resistência ao desgaste e tenacidade (Callister; Rethwisch, 2012; Krauss, 1990).

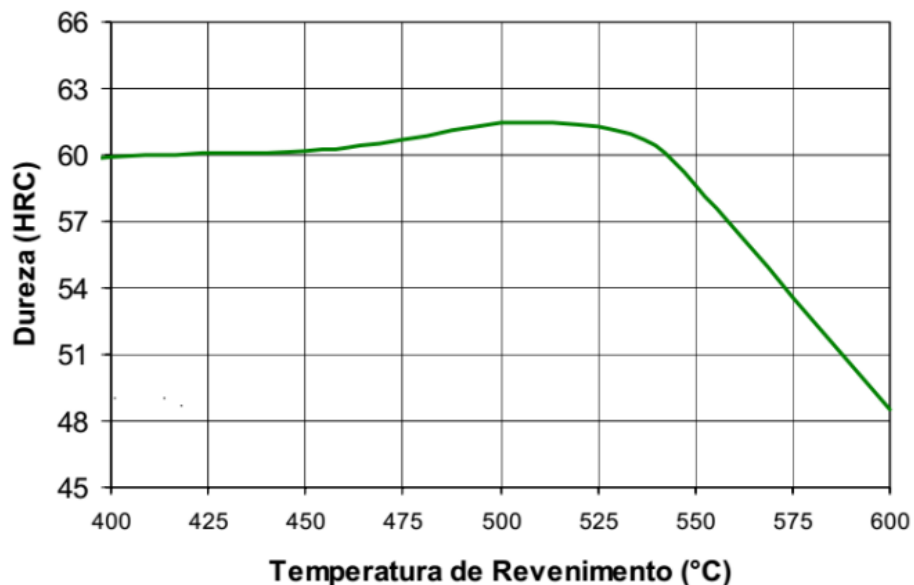
A têmpera consiste no aquecimento do aço até a temperatura de austenitização — geralmente entre 980 e 1100 °C, dependendo da composição —

seguido de um resfriamento rápido em meio adequado, como óleo, ar ou polímero. Esse processo promove a formação de martensita, uma fase supersaturada de carbono responsável pela alta dureza e resistência ao desgaste. Entretanto, essa estrutura também apresenta baixa tenacidade, o que torna o material mais propenso à formação de trincas e fraturas frágeis (Krauss, 1990; Mesquita; Barbosa, 2005).

Para reduzir essas tensões e restaurar parte da ductilidade, o aço temperado é submetido ao revenimento, um reaquecimento controlado geralmente realizado entre 450 °C e 600 °C. Nessa etapa ocorre a precipitação de carbonetos finos (Fe_3C , M_7C_3 , M_{23}C_6) e a transformação parcial da martensita, melhorando a tenacidade e a resistência à fadiga, enquanto se mantêm níveis adequados de dureza (Callister; Rethwisch, 2012; Both, 2011).

Segundo Both (2011), o controle preciso das temperaturas de têmpera e revenimento é essencial para garantir microestruturas estáveis e homogêneas, especialmente em aços de alta liga como o VF800AT. Um revenimento insuficiente mantém tensões residuais que favorecem a nucleação de trincas, enquanto um revenimento excessivo pode reduzir a dureza de forma indesejada, comprometendo o desempenho em serviço ou em reparos por soldagem.

Figura 1 – Curva de revenimento do aço VF800



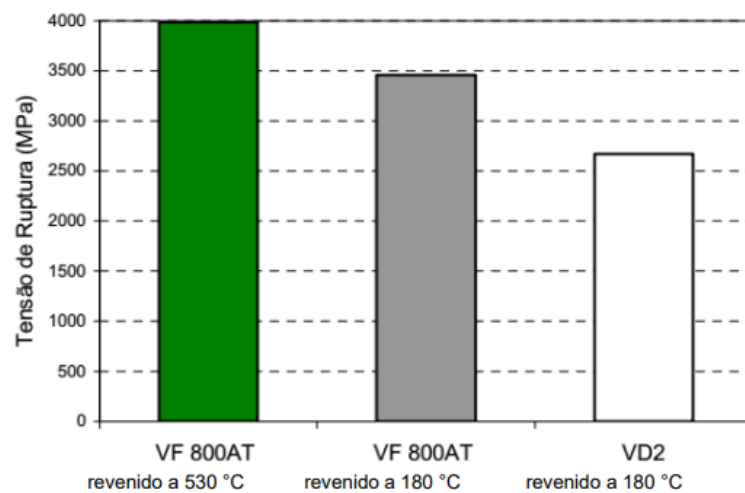
Fonte: Adaptado de Mesquita; Barbosa, 2005; Villares *Meta/s*, 2022

A Figura 1 apresenta a variação da dureza do VF800AT em função da temperatura de revenimento. Observa-se que a dureza permanece praticamente constante até cerca de 520 °C, com leve aumento atribuído à precipitação

secundária de carbonetos finos. Acima dessa faixa, ocorre uma redução significativa da dureza, associada à coalescência dos carbonetos e à decomposição parcial da martensita revenida (Mesquita; Barbosa, 2005; Villares *Metals*, 2022).

Resultados mecânicos apresentados por Villares *Metals* (2001) também demonstram a influência direta do revenimento na resistência mecânica. Conforme mostrado na Figura 2, o aço VF800AT revenido a 530 °C apresentou maior tensão de ruptura em flexão em comparação ao revenido a 180 °C e ao aço VD2, evidenciando sua superioridade em tenacidade e resistência ao revenido.

Figura 2 – Tensão de ruptura em flexão do aço VF800AT



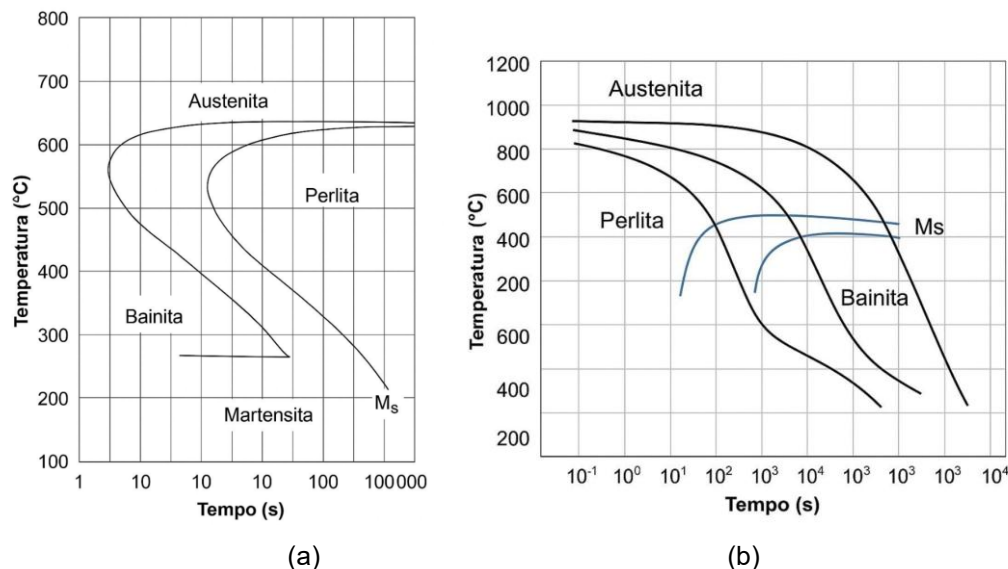
Fonte: Adaptado de Villares *Metals*, 2022

Nos aços para trabalho a frio, como o AISI D2 e o VF800AT, o revenimento exerce papel essencial na estabilidade dimensional e na resistência à fadiga sob carregamentos cíclicos. O aço VF800AT, em particular, apresenta revenimento secundário em temperaturas mais elevadas (acima de 500 °C), o que confere maior resistência ao revenido e permite sua aplicação em condições industriais severas (Villares *Metals*, 2001).

Os efeitos combinados dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento podem ser compreendidos por meio dos diagramas TTT (*Time–Temperature–Transformation*) e CCT (*Continuous–Cooling–Transformation*), apresentados na Figura 3. O diagrama TTT (Figura 3a) descreve as transformações de fase sob condições isotérmicas, evidenciando as regiões de formação de perlita, bainita e martensita em função do tempo e da temperatura. Já o diagrama CCT (Figura 3b) representa as transformações sob resfriamento contínuo, sendo mais representativo

das condições reais de fabricação e tratamento térmico dos aços ferramenta (Krauss, 1990).

Figura 3 – (a) Diagrama TTT. (b) Diagrama CCT



Fonte: Adaptado de Krauss, 1990

Nos aços ferramenta de alto cromo, como o D2 e o VF800AT, a presença de elementos de liga desloca a região de formação de perlita e bainita para tempos mais longos, aumentando a temperabilidade. Essa característica permite realizar têmperas em seções maiores com menor risco de trincas, resultando em propriedades mecânicas mais uniformes (Mesquita; Leiva; Barbosa, 2001).

Assim, o controle adequado dos ciclos térmicos é fundamental para maximizar o desempenho desses aços. A análise dos diagramas TTT e CCT auxilia na definição de parâmetros capazes de equilibrar dureza e tenacidade, garantindo confiabilidade em serviço e maior vida útil das ferramentas (Callister; Rethwisch, 2012; Kou, 2003). A microestrutura martensítica revenida do aço VF800AT combina resistência ao desgaste, estabilidade dimensional e tenacidade aprimorada, características essenciais tanto para o uso prolongado de ferramentas submetidas a elevadas solicitações mecânicas quanto para o sucesso de processos de recuperação por soldagem GMAW.

2.3 REPARO DE AÇOS FERRAMENTA PELO PROCESSO GMAW

A recuperação de aços ferramenta por soldagem tem se mostrado uma alternativa eficiente e economicamente vantajosa em relação à substituição

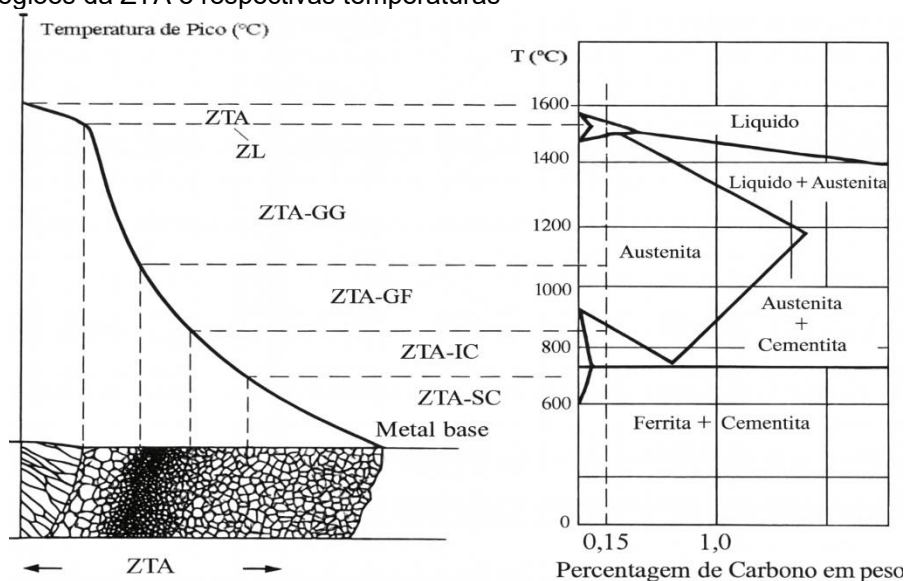
completa de componentes danificados. Em ferramentas submetidas a altos esforços mecânicos e térmicos — como as utilizadas em processos de conformação a frio — é comum o surgimento de trincas, lascamentos e desgaste superficial, que reduzem a vida útil e comprometem o desempenho produtivo. O uso de processos de soldagem controlados permite restaurar dimensões originais, corrigir defeitos e prolongar o tempo de serviço das ferramentas, reduzindo significativamente os custos de manutenção (Böhler, 2008; Tonkovič *et al.*, 2015).

Entre os diferentes processos de recuperação, o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) destaca-se pela alta produtividade, facilidade de automação e boa qualidade metalúrgica do depósito. Quando corretamente parametrizado, o GMAW possibilita a recuperação de aços de alta liga, como o VF800AT, minimizando distorções térmicas e reduzindo o risco de trincas na zona afetada termicamente (ZTA). Além disso, a seleção adequada de arames e gases de proteção garante uma solda homogênea, com propriedades mecânicas compatíveis com o material de base.

A compreensão dos fundamentos do processo de soldagem GMAW, dos modos de transferência metálica e das transformações microestruturais resultantes é fundamental para garantir a qualidade e a confiabilidade do reparo. Durante a soldagem, ocorrem intensos ciclos térmicos que promovem modificações significativas tanto no metal depositado quanto no material base, com destaque para a Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Embora essa região não atinja temperaturas de fusão, ela é submetida a variações térmicas severas que alteram a microestrutura e as propriedades mecânicas do material, influenciadas por parâmetros como energia de soldagem, velocidade de avanço e espessura da peça. A Figura 4 ilustra as regiões da ZTA e suas respectivas faixas de temperatura de pico, evidenciando as subdivisões em ZTA de grão grosseiro (ZTA-GG), grão fino (ZTA-GF), intercrítica (ZTA-IC) e subcrítica (ZTA-SC). Cada uma dessas zonas apresenta diferentes graus de transformação de fases, responsáveis pela variação de dureza e comportamento mecânico ao longo da junta soldada.

Figura 4 – Regiões da ZTA e respectivas temperaturas



Fonte: adaptado de Aguiar, 2001

A ZTA pode ser subdividida em quatro regiões distintas: grãos grossos (ZTA-GG), grãos finos (ZTA-GF), intercrítica (ZTA-IC) e subcrítica (ZTA-SC). Cada uma apresenta microestruturas e propriedades específicas conforme as temperaturas atingidas e o tempo de exposição térmica (AWS, 2000; ASM, 1993; Aguiar, 2001).

Na ZTA-GG, região mais próxima da zona fundida, as temperaturas excedem a linha crítica A_{c3} , promovendo austenitização completa e dissolução dos carbonetos primários. Durante o resfriamento, forma-se martensita de alto carbono, com alta dureza, porém baixa tenacidade — o que eleva a susceptibilidade à formação de trincas a frio, especialmente quando associada a tensões residuais e hidrogênio difusível (Kou, 2003; Modenesi, 2012).

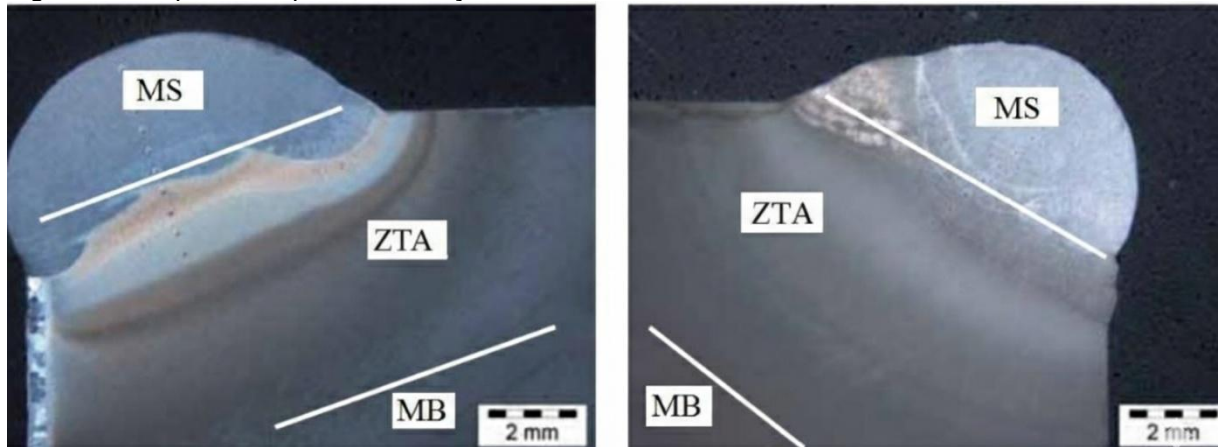
A ZTA-GF, localizada ligeiramente mais distante da zona fundida, também atinge temperaturas acima de A_{c3} , porém com menor tempo de exposição. O resultado é uma microestrutura mais refinada, composta por martensita revenida e carbonetos secundários, que proporciona um equilíbrio adequado entre dureza e tenacidade, apresentando maior resistência à propagação de trincas (Mesquita; Barbosa, 2005).

Na ZTA-IC, as temperaturas variam entre as linhas críticas A_{c1} e A_{c3} , ocasionando austenitização parcial. Nessa condição, coexistem ferrita, martensita e carbonetos, originando uma microestrutura heterogênea e instável. O endurecimento localizado observado nessa região está relacionado à formação parcial de martensita, o que eleva a dureza, mas também a fragilidade local, tornando a ZTA-

IC uma das zonas mais críticas para a integridade metalúrgica (AWS, 2000; Both, 2011).

Conforme ilustrado na Figura 5, a Zona Termicamente Afetada Subcrítica (ZTA-SC) não atinge o limite de transformação Ac_1 , impossibilitando a ocorrência de austenitização. Nessa região, ocorre apenas um revenimento localizado da martensita previamente formada, resultando em redução da dureza e alívio das tensões residuais. Esse efeito contribui para o aumento da tenacidade e para a transição gradual entre a zona termicamente afetada e o metal base, garantindo uma melhor integridade metalúrgica da junta soldada (ASM, 1993).

Figura 5 – Esquema do perfil de medições de microdureza



Fonte: Adaptado de Böhler, 2008

Estudos realizados com o aço AISI D2 demonstram comportamento semelhante, porém com maior tendência à formação de martensita frágil e trincas na ZTA-GG, devido ao elevado teor de carbono e cromo (~12%). Já o aço VF800AT, pertencente à classe dos aços de 8% Cr, apresenta microestrutura mais refinada e maior tenacidade transversal, reduzindo as concentrações de tensão e melhorando a resposta ao revenimento após a soldagem (Tobola *et al.*, 2017; Pellin, 2018).

Em síntese, o controle do aporte térmico, da temperatura interpasse e da taxa de resfriamento é essencial para minimizar o endurecimento excessivo e evitar o surgimento de trincas na ZTA. A compreensão detalhada das transformações microestruturais que ocorrem durante o processo é, portanto, fundamental para o sucesso da recuperação de aços ferramenta pelo processo GMAW, garantindo desempenho mecânico e confiabilidade comparáveis ao material original.

2.4 DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO RECUPERADAS POR SOLDAGEM

As ferramentas utilizadas em processos de estampagem a frio são submetidas a condições severas de contato e atrito, tornando o desempenho tribológico um fator decisivo para sua durabilidade e eficiência (Lange, 1990; Jost, 1990). Durante a conformação, as superfícies ativas do punção e da matriz entram em contato direto com a chapa metálica, sendo expostas a elevadas pressões, tensões cíclicas e movimento relativo — condições que favorecem o desgaste progressivo e a perda de precisão dimensional. Compreender os mecanismos de falha e correlacioná-los às condições de carregamento e vida útil é fundamental para estabelecer estratégias eficazes de manutenção. A soldagem de reparo, quando corretamente aplicada, representa uma alternativa eficiente para restaurar componentes danificados e prolongar o tempo em serviço das ferramentas, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do processo produtivo (Böhler, 2008; Tonkovič *et al.*, 2015).

O desgaste é um fenômeno tribológico resultante da interação entre superfícies sólidas em movimento relativo, podendo provocar a remoção ou deformação de material. Entre os principais mecanismos de desgaste que ocorrem em ferramentas de conformação e estampagem destacam-se o adesivo, o abrasivo, o corrosivo e o por fadiga (Marques, 2019). Cada mecanismo manifesta-se sob condições específicas de carga, temperatura, lubrificação e rugosidade superficial, podendo inclusive ocorrer de forma simultânea.

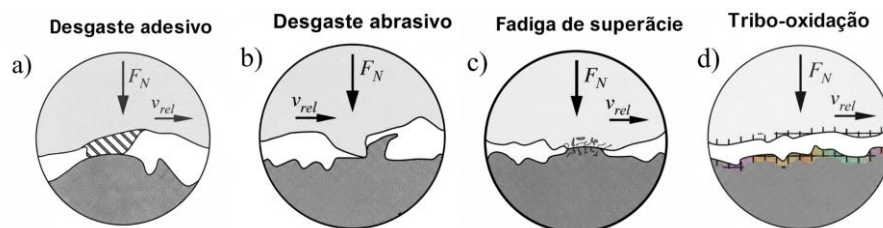
O desgaste abrasivo caracteriza-se pela remoção de partes da superfície da matriz devido à ação de partículas duras que se intercalam entre o material e a ferramenta (Pellin, 2018). Esse tipo de desgaste ocorre sempre que um corpo sólido é pressionado contra partículas de dureza igual ou superior, o que resulta em cortes, sulcos e perda de material. Uma das maiores dificuldades no controle desse fenômeno é que o termo “desgaste abrasivo” engloba diferentes micromecanismos que atuam em conjunto, dificultando sua caracterização precisa.

Em muitos casos, o desgaste abrasivo ocorre pela ação de dois corpos, deixando marcas paralelas à direção do deslizamento; em outros, envolve a ação de três corpos, quando partículas soltas atuam como intermediárias entre as superfícies em movimento. Esses micromecanismos podem envolver deformação plástica ou

fratura frágil, que representa os principais tipos de interação entre partículas e superfícies durante o desgaste abrasivo.

As ferramentas utilizadas em processos de conformação a frio estão submetidas a altas solicitações mecânicas e tribológicas, que favorecem o surgimento de diversos mecanismos de desgaste e falha. Os principais tipos de desgaste observados em ferramentas de estampagem são o adesivo, o abrasivo, o de fadiga superficial e o corrosivo. Esses mecanismos podem atuar isoladamente ou de forma combinada, provocando remoção progressiva de material, formação de microtrincas, oxidação superficial e, em casos mais severos, fratura catastrófica. Tais fenômenos comprometem diretamente a eficiência operacional, a precisão dimensional e a vida útil das ferramentas (Cordeiro, 2016; Gonçalves, 2016). O desgaste tende a se concentrar nas regiões de maior contato e atrito, levando à perda progressiva de material e à alteração das dimensões originais da ferramenta. Em ferramentas de estampagem, esse fenômeno ocorre principalmente nas arestas de corte, reduzindo a precisão dimensional das peças produzidas (Bianco, 2003). A Figura 6 apresenta os principais modos de desgaste que ocorrem em ferramentas de conformação a frio, incluindo o desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo.

Figura 6 – Principais modos de desgaste em ferramentas de estampagem: (a) adesivo, (b) abrasivo, (c) fadiga e (d) corrosivo



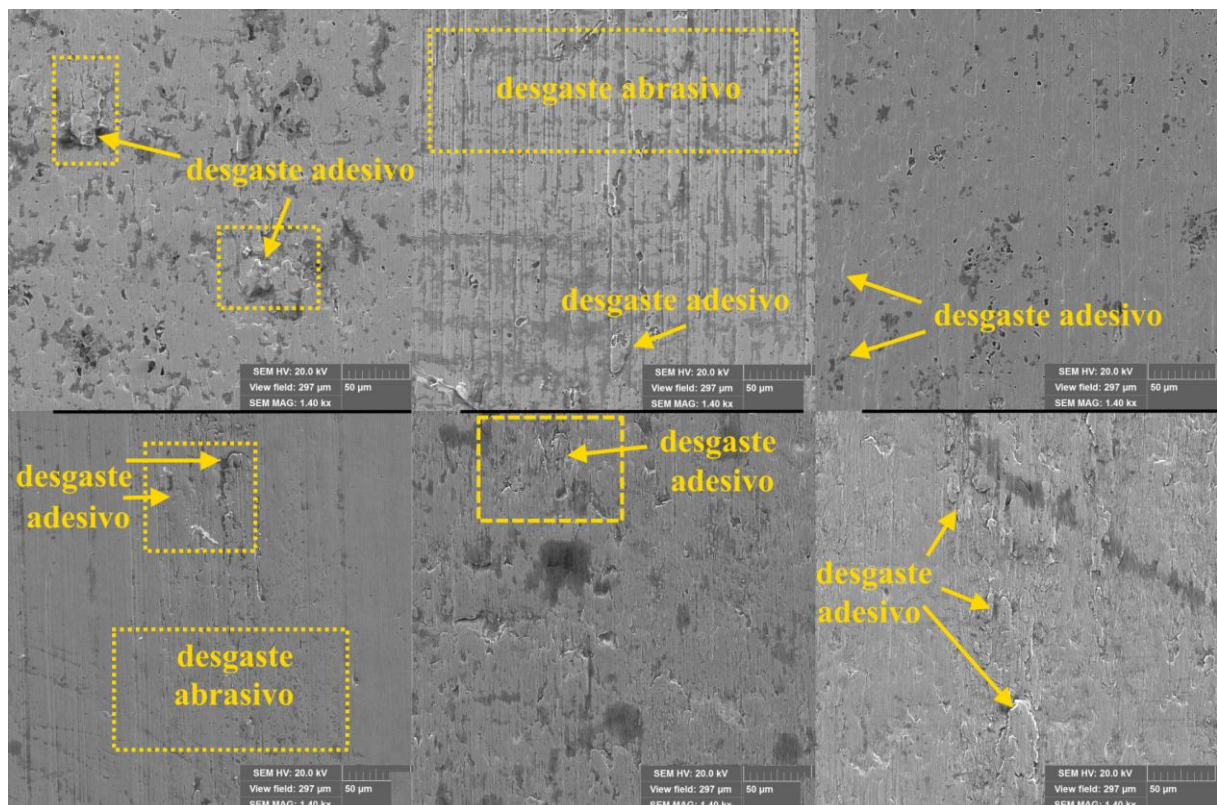
Fonte: Adaptado de Jost, 1990 e Bernardi, 2011

Estudos indicam que aproximadamente 52% das falhas em ferramentas de estampagem estão relacionadas a trincas e quebras superficiais (Gonçalves, 2016). Essas trincas podem se iniciar de forma localizada e, com o acúmulo de ciclos de carregamento, evoluir para falhas severas, diminuindo significativamente a vida útil do componente. O desempenho das ferramentas de estampagem está diretamente relacionado às condições tribológicas existentes na interface ferramenta–chapa, onde atuam simultaneamente forças normais e tangenciais sob altas pressões de contato. O atrito desempenha papel crucial nesse processo, influenciando o fluxo do

material, a força necessária para a conformação e a ocorrência de falhas como rugas e trincas superficiais (Gallo, 2012; Pantaleón; Tanaka; Bernardes, 2012).

A rugosidade da superfície da chapa metálica é outro fator determinante para o comportamento tribológico. Superfícies excessivamente rugosas podem aumentar o atrito local, gerar pressões de contato elevadas e favorecer a adesão entre o material da chapa e o da ferramenta (Lange, 1990). Com o avanço do ciclo de conformação, o lubrificante é gradualmente removido da interface, o que leva à predominância de contato direto entre as superfícies e intensifica o desgaste. Os dois mecanismos mais comuns observados em ferramentas de estampagem são o desgaste adesivo e o desgaste abrasivo (ver Figura 7). O primeiro caracteriza-se pela transferência localizada de material da chapa para a ferramenta, enquanto o segundo envolve o riscamento e remoção mecânica de material devido à ação de partículas duras ou asperidades (Fotes; Cláudio, 2007).

Figura 7 – Exemplos de desgaste adesivo e abrasivo observados em punções de estampagem



Fonte: Adaptado de Pellin, Israel e Dalcin, 2024

Diferentes mecanismos de desgaste, como o adesivo e o abrasivo, podem atuar simultaneamente na interface ferramenta-peça, afetando diretamente a

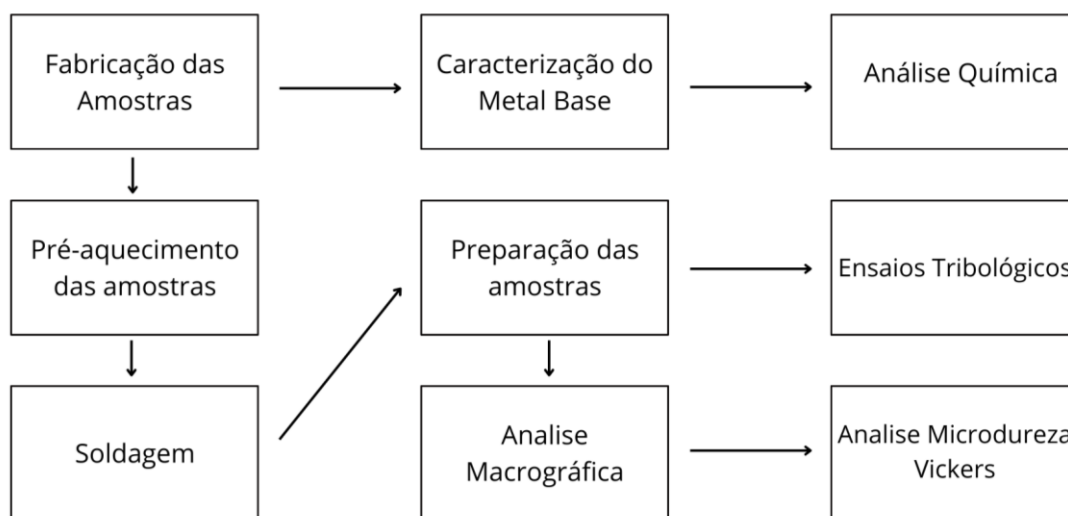
integridade superficial e a durabilidade da ferramenta. A compreensão desses fenômenos é essencial para otimizar o desempenho de ferramentas fabricadas ou reparadas em aços de alta resistência, como o VF800, cuja microestrutura martensítica revenida e a presença de carbonetos finos contribuem para reduzir a adesão, minimizar o desgaste e prolongar a vida útil da superfície ativa (Böhler, 2008; Both, 2011).

Pesquisas recentes demonstram que ferramentas recuperadas por soldagem podem atingir desempenho equivalente ou até superior ao de ferramentas novas, desde que respeitados os parâmetros adequados de soldagem e tratamento térmico subsequente (Tonkovič *et al.*, 2015; Both, 2011). De acordo com Tobola *et al.* (2017) e Macek, Hájek e Tobola (2019), a combinação de uma microestrutura martensítica revenida com carbonetos finamente distribuídos garante elevada resistência à fadiga e reduz o risco de falhas prematuras por delaminação na interface soldada. O aço VF800, portanto, apresenta excelente equilíbrio entre dureza e tenacidade, sendo ideal para ferramentas submetidas a pressões elevadas e esforços cíclicos. Estudos de Pellin, Israel e Dalcin (2024) comprovam que o reparo por soldagem GMAW, quando realizado sob condições adequadas de pré-aquecimento e revenimento, pode preservar — e em alguns casos até aprimorar — o desempenho tribológico do metal base.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e os procedimentos experimentais empregados no desenvolvimento do presente estudo. Os ensaios foram conduzidos com o intuito de avaliar o desempenho tribológico do aço VF800 após o reparo por meio do processo de soldagem GMAW-CMT. Para tal, corpos de prova com dimensões de 20 × 75 × 250 mm foram inicialmente submetidos à operação de retífica. Em seguida, as peças foram pré-aquecidas a 450 °C e submetidas ao processo de soldagem. Após o reparo, realizaram-se análises metalográficas, medições de microdureza e ensaios tribológicos para determinação do coeficiente de atrito e da resistência ao desgaste do material soldado. A Figura 8 apresenta o fluxograma com a sequência planejada das etapas de soldagem e caracterização.

Figura 8 – Fluxograma do planejamento de estudo



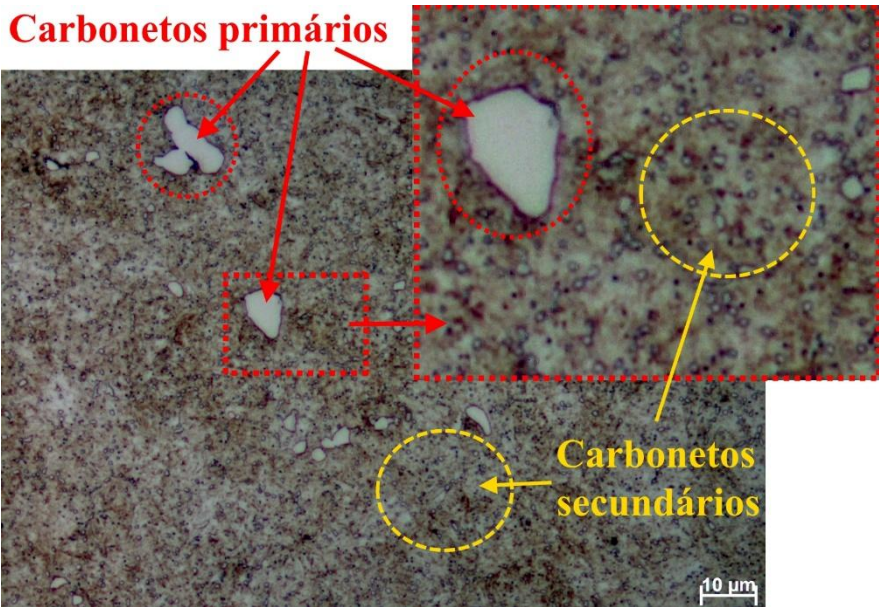
Fonte: Autor, 2025

3.1 METAL BASE E METAL DE ADIÇÃO

O metal base utilizado neste estudo foi o aço para trabalho a frio VF800, fornecido pela empresa Villares *Metals*. O material passou pelos processos de alívio de tensões, têmpera e revenimento, apresentando dureza final de 59 HRC. A composição química do aço VF800 é apresentada na Tabela 3. Sua microestrutura é caracterizada por uma matriz martensítica contendo carbonetos primários e

secundários, Figura 9, conferindo elevada resistência mecânica e ao desgaste (Pellin; Israel; Dalcin, 2024).

Figura 9 – A microestrutura do metal base foi atacada com o reagente de Vilella e revelada sob microscópio óptico



Fonte: adaptado de Pellin, Israel e Dalcin, 2024

Neste estudo, foi avaliado um arame tubular metálico *Tube-Alloy 260-G* com diâmetro de 1,2 mm, que deposita uma liga de aço martensítico. Esse material apresenta uma combinação favorável entre dureza, resistência ao desgaste e ao impacto, além de excelente aderência ao metal base. A composição química do arame *Tube-Alloy 260-G* é apresentada na Tabela 4.

Tabela 3 – Composição química do aço VF800 (em % em peso)

C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V	W	Nb
0,037	0,96	0,37	0,022	0,001	0,03	5,12	1,3	0,38	0,9	0,05	0,13

Fonte: Autor, 2025

Tabela 4 – Composição química do arame *Tube-Alloy 260-G* (em % em peso)

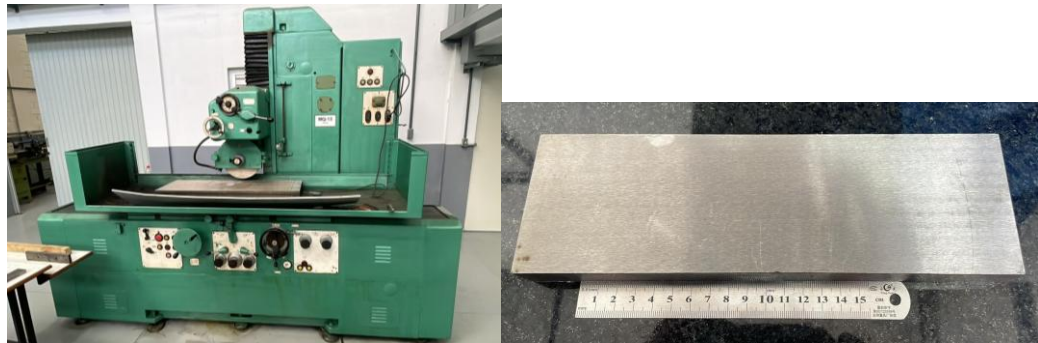
C	Cr	Ni	Mn	Si	V	Cu
0,62	5,73	0,03	1,98	0,86	0,04	0,05

Fonte: Autor, 2025

3.2 PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E SOLDAGEM

Inicialmente, as superfícies do aço VF800 foram preparadas por retificação, Figura 10, utilizando um rebolo com granulometria 46, a fim de garantir uniformidade e remoção de impurezas superficiais. Em seguida, foram realizados os reparos nas superfícies retificadas, empregando um robô de soldagem ABB IRB1600, controlado por um sistema IRC5M2004, utilizando o processo GMAW-CMT, Figura 15.

Figura 10 – (a) Retífica usada na preparação das amostras; (b) Amostra do aço VF800 após a retificação

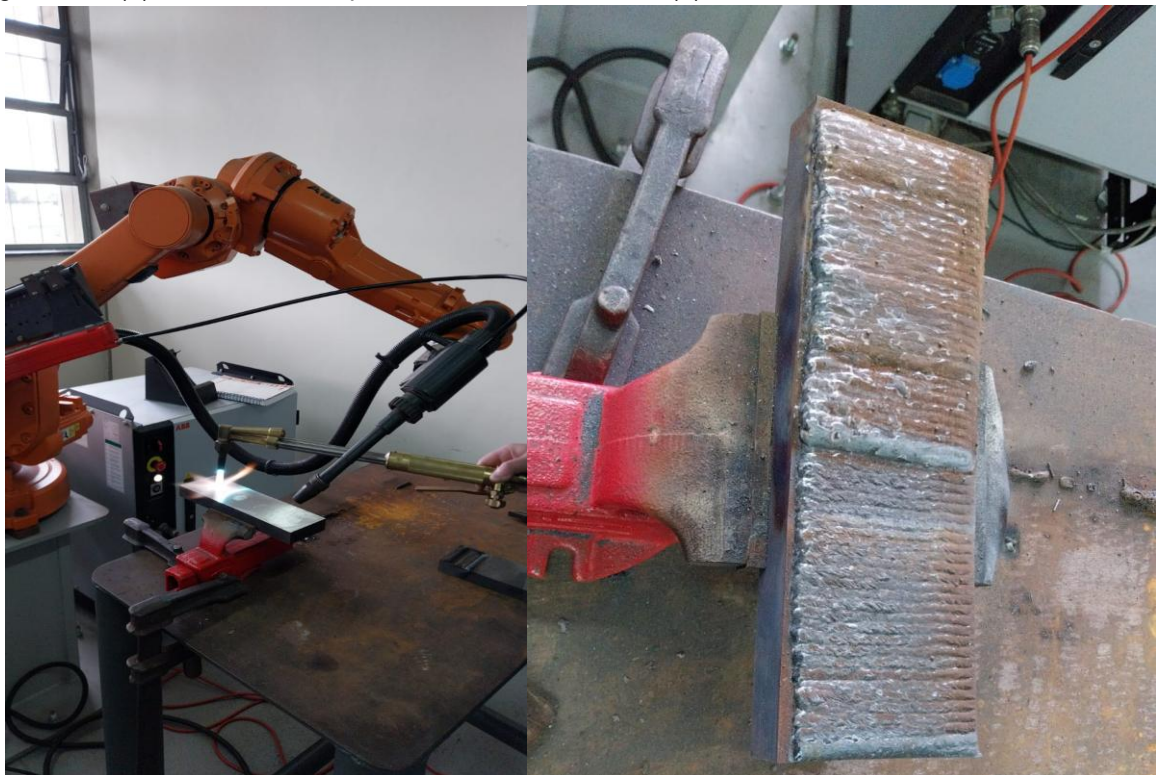


(a)

(b)

Fonte: Autor, 2025

Figura 11 – (a) Robô durante o processo de GMAW-CMT; (b) amostra soldada



(a)

(b)

Fonte: Autor, 2025

A fonte de energia utilizada foi uma *Fronius TransPlus Synergic 4000 CMT MVR*, que possibilitou o controle preciso da corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame durante o processo. Os parâmetros de soldagem empregados no reparo do aço VF800 estão apresentados na Tabela 5. As amostras com dimensões de 20 × 75 × 250 mm foram reparadas pelo processo GMAW-CMT. Durante o processo de soldagem, o aço VF800 foi pré-aquecido a 450 °C devido aos resultados de estudos anteriores (Pellin; Israel; Dalcin, 2024) que indicaram melhor desempenho nessa temperatura. A temperatura entre passes foi mantida em 450 °C, com o controle térmico realizado por meio de um termômetro infravermelho *Equitherm TR882*, com faixa de medição de 18 a 1650 °C.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem utilizados para o reparo do aço VF800 pelo processo GMAW-CMT

Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame (mm/s)	Distância bico-peça (mm)	Gás de proteção	Vazão (L/min)	Temperatura pré-aquecimento (°C)
17,4	183	10	6	12	17% CO ₂ + 83% Ar	15	450

Fonte: Autor, 2025

3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

As amostras soldadas foram preparadas para análise metalográfica conforme a norma ASTM E3-11 (2017) – *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Inicialmente, os corpos de prova foram seccionados transversalmente à região soldada utilizando uma cortadora metalográfica de precisão equipada com disco abrasivo refrigerado por líquido, a fim de evitar alterações microestruturais causadas por aquecimento excessivo. As superfícies obtidas foram lixadas manualmente com lixas de carbeto de silício de granulometria progressiva, variando de #220 a #1200, e posteriormente polidas mecanicamente com suspensão de alumina de 1 µm, obtendo-se uma superfície espelhada adequada para observação microscópica. Para a revelação da microestrutura, foi aplicado ataque químico com reagente de Vilella (1 g de ácido pícrico, 5 mL de HCl concentrado e 100 mL de etanol), com imersão da amostra por aproximadamente 15 s. Esse reagente é indicado para aços-ferramenta, permitindo evidenciar de forma nítida a matriz martensítica, a zona afetada pelo calor (ZTA) e os carbonetos presentes na microestrutura. A caracterização macroestrutural foi realizada por meio de

microscopia óptica, em equipamento *Zeiss modelo Stemi 508* mostrado na Figura 12. As imagens foram adquiridas com diferentes ampliações, de forma a possibilitar a análise detalhada da região de solda, ZTA e metal de base.

Figura 12 – Microscópio óptico usado para fazer a macrografia



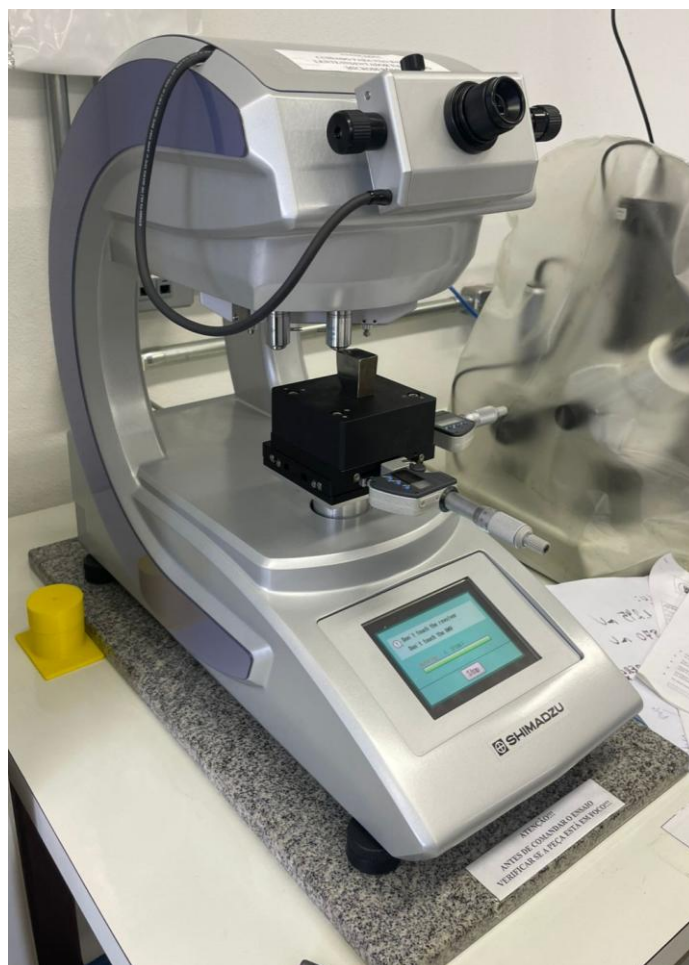
Fonte: Autor, 2025

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA

Os ensaios de microdureza foram realizados de acordo com a norma ASTM E384-17 (2017) – *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, a qual estabelece os procedimentos para medições de dureza por microindentação Vickers. As medições foram executadas em um microdurômetro Shimadzu HMV-G 20DT, Figura 13, utilizando carga de 300 gf ($HV_{0,3}$) aplicada por 15 s em cada ponto de medição.

As indentações foram dispostas ao longo de um perfil transversal à junta soldada, abrangendo o metal de solda, a Zona Afetada pelo Calor (ZTA) e o metal de base, de modo a permitir a observação da variação de dureza entre as diferentes regiões. O espaçamento entre as indentações foi de 0,1 mm. Foram realizadas no mínimo 170 medições, permitindo a construção de perfis médios de dureza representativos para a condição de reparo por soldagem.

Figura 13 – Microdurômetro *Shimadzu* usado para medição



Fonte: Autor, 2025

3.5 ENSAIO TRIBOLÓGICO

Após a soldagem foi realizada a retífica das amostras com o objetivo de garantir a planicidade e o acabamento da superfície. A peça utilizada para a realização dos ensaios foi retirada da região retificada, garantindo que a área analisada apresentasse as condições ideais de acabamento e preparação superficial.

Os ensaios tribológicos foram conduzidos em condições controladas de laboratório, à temperatura ambiente (25 °C), utilizando um tribômetro TRB³ (Anton Paar), conforme ilustrado na Figura 14. O equipamento operou no modo de deslizamento linear recíproco, em conformidade com a norma ASTM G133, que estabelece os procedimentos para avaliação do desgaste por deslizamento. O contracorpo empregado consistiu em uma esfera de alumina (Al₂O₃) com diâmetro de 6 mm, posicionada em contato com a superfície das amostras sob cargas normais de 10 N, 15 N e 20 N, aplicadas individualmente em ensaios distintos. O

movimento de deslizamento foi configurado para ocorrer em um curso linear de 10 mm, com frequência de 2 Hz, até atingir uma distância total de deslizamento de 1000 m para cada condição experimental.

Figura 14 – Ensaios de desgaste no tribômetro



Fonte: Autor, 2025

Após os ensaios, a morfologia das trilhas de desgaste foi examinada em um microscópio óptico *Leica* (modelo *DMRX*), Figura 15, possibilitando a avaliação qualitativa dos danos superficiais e a identificação dos mecanismos de desgaste predominantes. A perda de massa das amostras foi quantificada por meio de uma balança analítica *Shimadzu AUW220D*, conforme ilustrado na Figura 16. Com resolução de 0,00001 g (cinco casas decimais), assegurando alta precisão na determinação da taxa de desgaste.

A perda de massa obtida antes e após o ensaio tribológico ($m_{\text{antes}} - m_{\text{após}}$) foi utilizada para determinar o volume desgastado (v) das amostras, conforme apresentado na Equação 1. Nessa equação, ρ representa a densidade dos materiais envolvidos, sendo 7,85 g/cm³ (7850 kg/m³) para o arame *Tube-Alloy 260-G* (Hobart *Brothers* LLC, 2019) e 7,70 g/cm³ (7700 kg/m³) para o aço VF800 (Villares *Metals*, 2001). Esse parâmetro é essencial para o cálculo do volume efetivamente removido durante o ensaio, permitindo correlacionar o comportamento tribológico com as condições de soldagem e as características microestruturais do revestimento aplicado sobre o aço VF800.

$$v = \frac{(m_{\text{antes}} - m_{\text{após}})}{\rho} \quad (1)$$

Figura 15 – Microscópio óptico para registro das trilhas desgastadas



Fonte: Autor, 2025

Figura 16 – Balança analítica para medição da perda de massa



Fonte: Autor, 2025

O coeficiente de desgaste dimensional (k) foi determinado conforme apresentado na Equação 2, considerando-se o volume de material desgastado (v), a carga normal aplicada (N) e a distância de deslizamento (L). Esse parâmetro permite avaliar a severidade do desgaste em função das condições de contato tribológico, possibilitando a comparação entre o desempenho do aço VF800, da ZTA e do MS. A determinação do coeficiente k fornece uma medida adimensional da resistência ao desgaste, sendo essencial para interpretar os resultados obtidos nos ensaios tribológicos e correlacioná-los com as características microestruturais do aço VF800 após o processo de soldagem.

$$k = \frac{v}{N.L} \quad (2)$$

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados com o aço VF800 reparado pelo processo de soldagem GMAW-CMT, abrangendo as análises metalográficas, perfis de dureza e análises tribológicas. O objetivo é compreender os efeitos do reparo sobre a integridade metalúrgica e o comportamento de atrito e desgaste das diferentes regiões avaliadas — metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS).

4.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

A análise macroestrutural da região soldada Figura 17 evidencia um cordão de solda contínuo e homogêneo, com boa fusão entre o metal de solda (MS) e o metal de base (MB). Não foram identificadas descontinuidades, trincas ou porosidades aparentes, o que confirma a eficiência dos parâmetros empregados no processo GMAW-CMT, garantindo um reparo uniforme e de alta qualidade. Tais resultados corroboram com Becker (2024), que destaca o GMAW-CMT como um processo de baixa energia e elevada estabilidade, capaz de produzir depósitos com excelente molhabilidade e mínima ocorrência de defeitos típicos, como as trincas a frio em aços ferramenta.

Figura 17 – Macrofotografia do aço VF800 reparado pelo processo GMAW-CMT

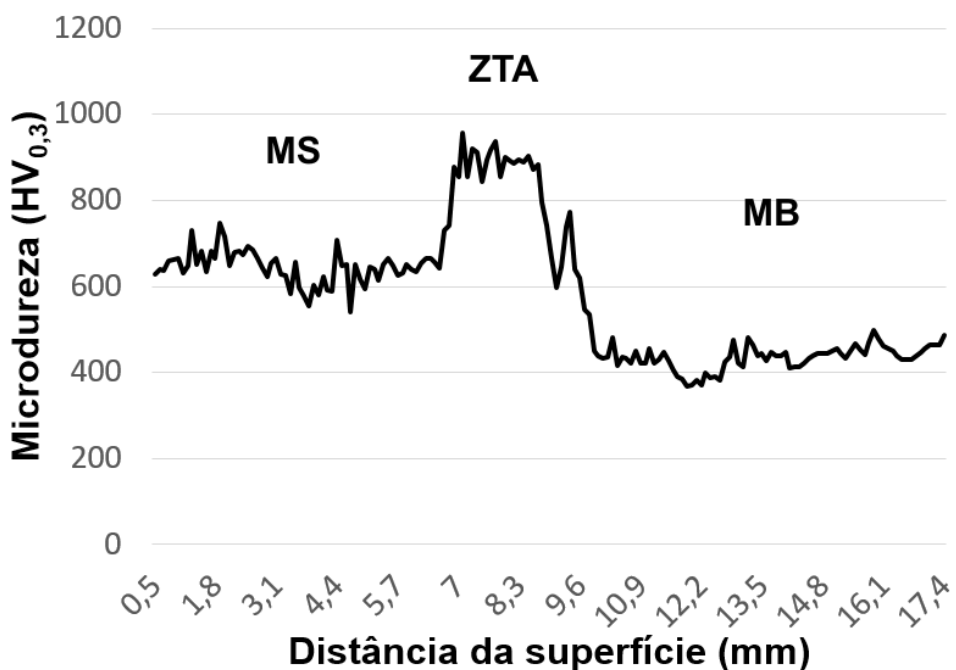


Fonte: Autor, 2025

4.2 ANÁLISE DOS PERFIS DE MICRODUREZA

A Figura 18 apresenta o perfil de microdureza obtido na seção transversal da amostra soldada, abrangendo as regiões do metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB). Na região do metal de solda (MS), os valores de dureza variam entre 600 e 700 $HV_{0,3}$. A zona termicamente afetada (ZTA) apresenta o maior valor de microdureza entre as regiões analisadas, ultrapassando 900 $HV_{0,3}$. Essa elevação é consequência da formação de martensita não revenida, proveniente do aquecimento intenso seguido de rápido resfriamento, o que resulta em uma região mais dura, porém também mais frágil, suscetível à nucleação de trincas durante esforços mecânicos (Pellin; Israel; Dalcin, 2024). Por fim, o metal base (MB) apresenta os menores valores de dureza, estabilizando-se na faixa de 400 a 500 $HV_{0,3}$.

Figura 18 – Perfil de microdureza Vickers sobre a seção transversal do aço VF800 reparado pelo processo GMAW-CMT



Fonte: Autor, 2025

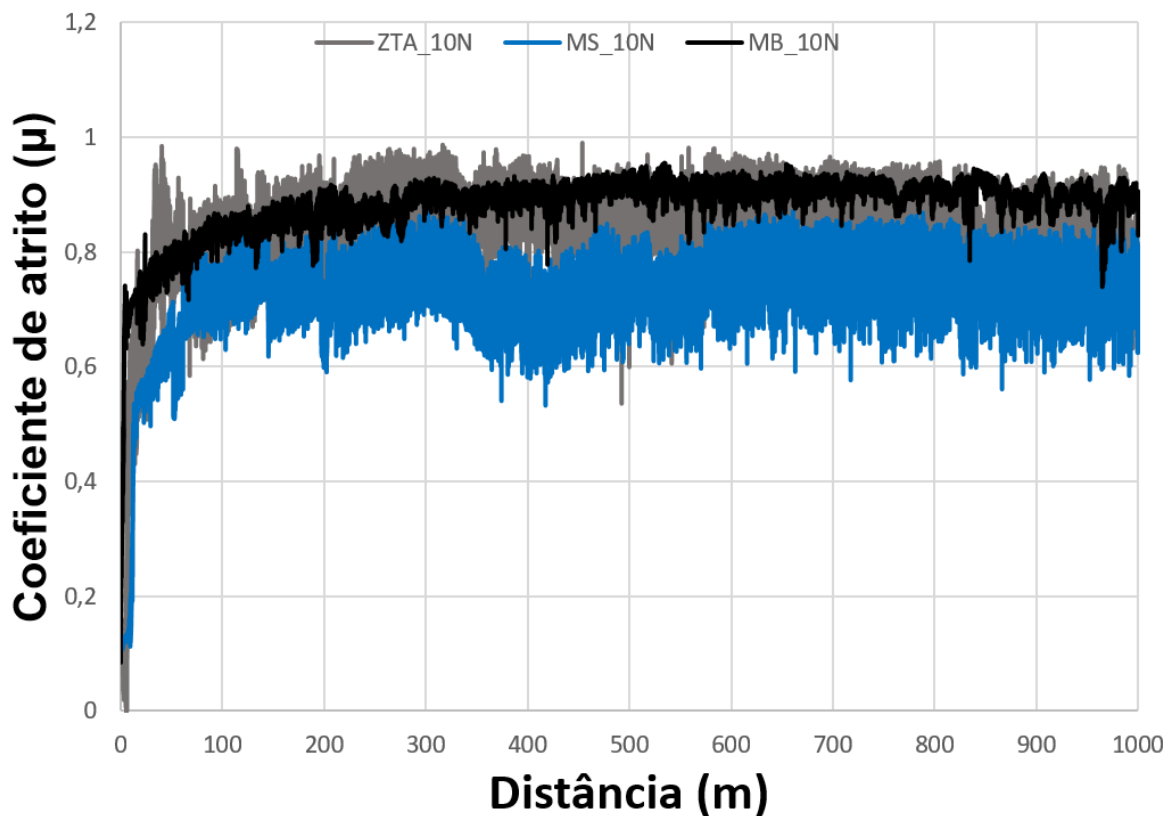
4.3 AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA

Os ensaios tribológicos foram realizados para avaliar o comportamento de atrito e de desgaste das diferentes regiões da amostra. As Figuras 19(a–c) apresentam a evolução representativa do coeficiente de atrito (COF) em função da

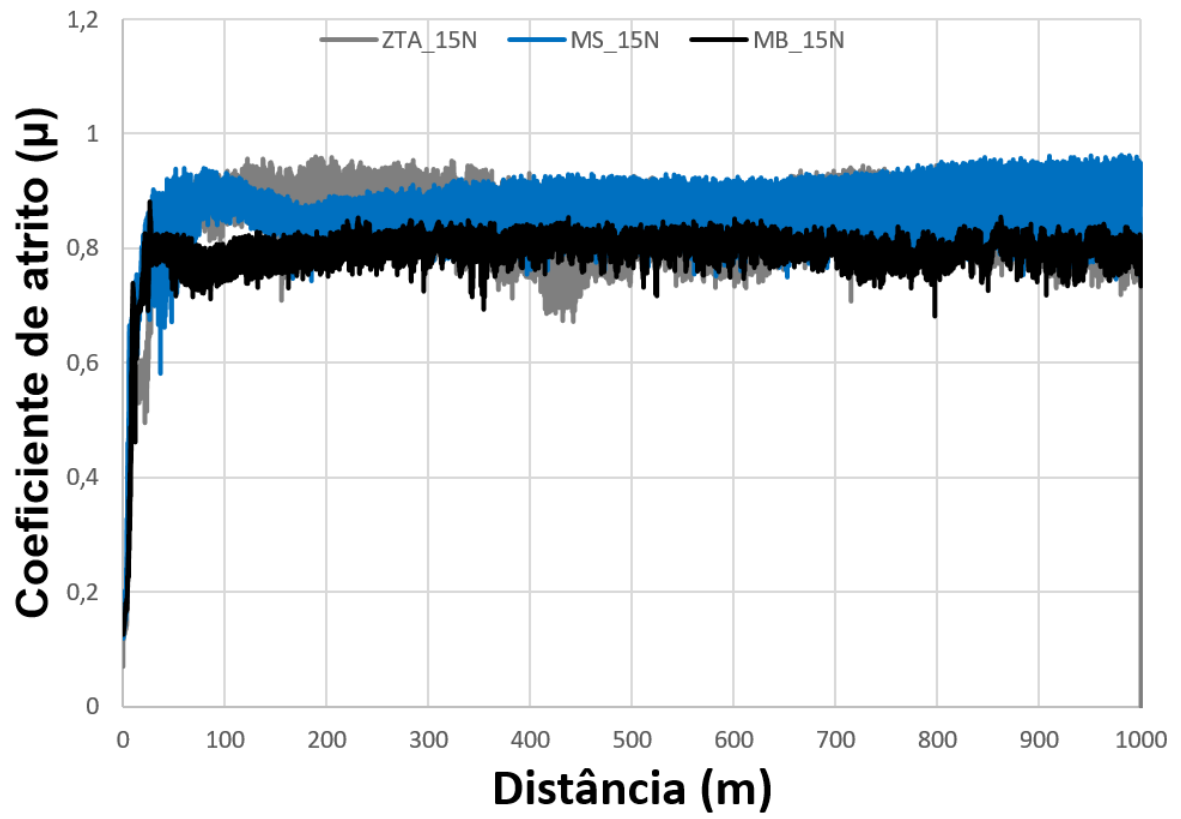
distância de deslizamento sob diferentes cargas normais (10 N, 15 N e 20 N), para o metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS).

Observou-se que os valores de COF permaneceram relativamente estáveis ao longo dos ensaios, após um curto período de acomodação inicial, Figura 19. Em geral, o metal de solda (MS) apresentou os menores coeficientes de atrito em todas as cargas testadas, enquanto o metal base (MB) apresentou valores ligeiramente mais elevados. A ZTA exibiu comportamento intermediário, refletindo a transição microestrutural entre o material base e o metal de solda. A tendência de redução do COF com o aumento da carga normal foi observada em todas as regiões, comportamento típico de sistemas tribológicos sob deslizamento a seco, no qual o aumento da carga promove maior acomodação superficial e estabilização do desgaste.

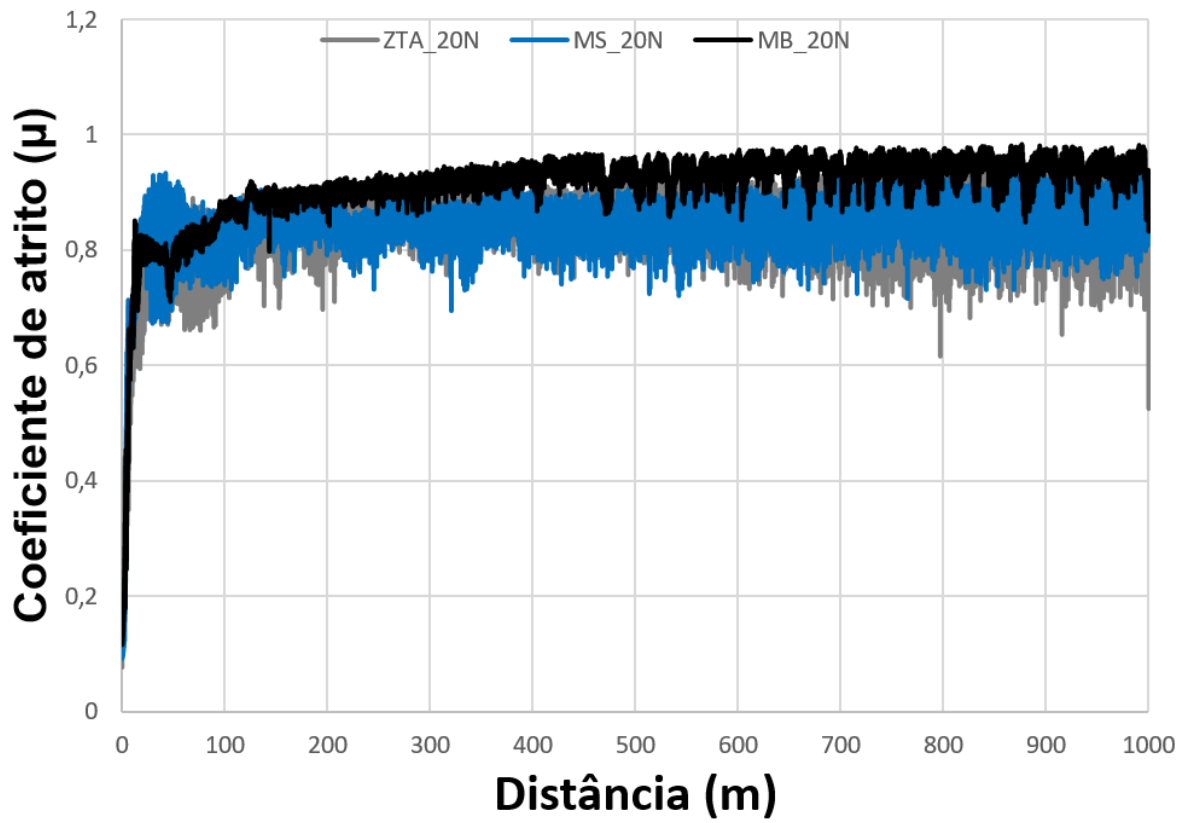
Figura 19 – Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento: (a) 10 N; (b) 15 N; (c) 20 N



(a)



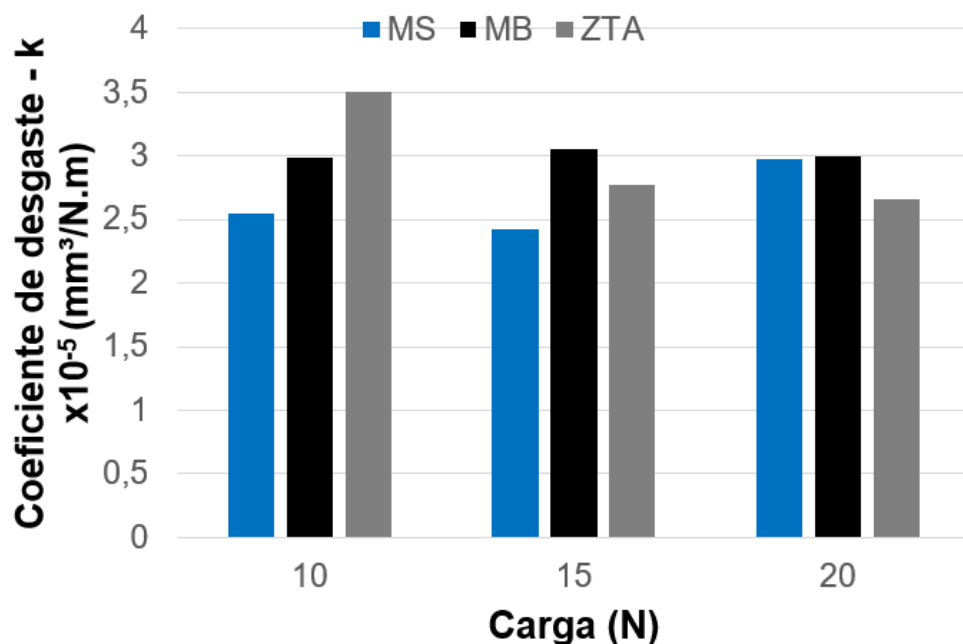
(b)



(c)

A Figura 20 apresenta a variação do coeficiente de desgaste (k) em função da carga aplicada. Os resultados indicam que o metal de solda (MS) apresentou menor coeficiente de desgaste em todas as condições testadas, evidenciando sua maior resistência à remoção de material. A ZTA apresentou desempenho intermediário, enquanto o metal de base (MB) foi a região mais suscetível ao desgaste, principalmente sob cargas mais elevadas. Essa diferença pode ser atribuída à maior dureza e presença de microestruturas martensíticas refinadas do metal de solda, que conferem maior estabilidade e resistência durante o deslizamento.

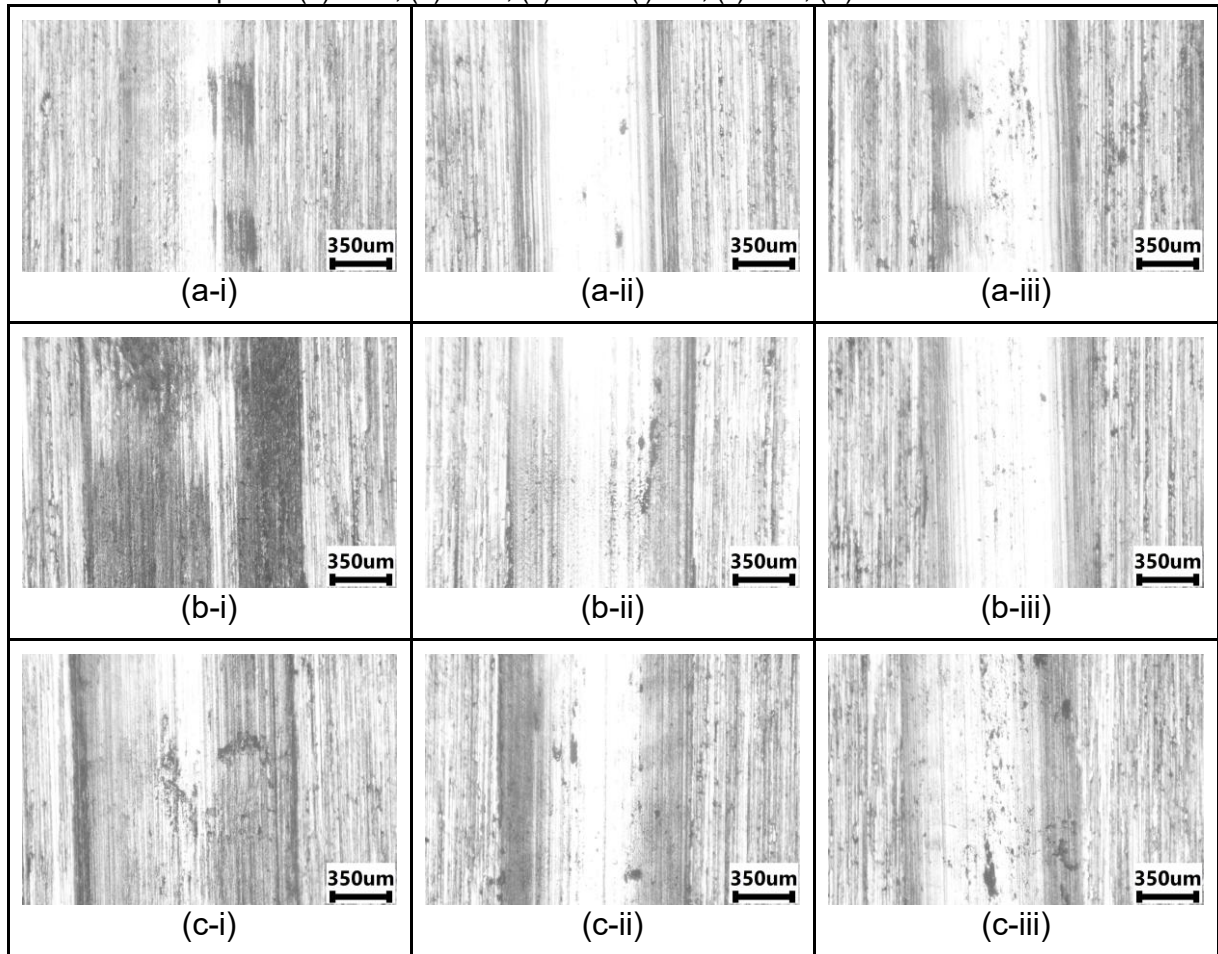
Figura 20 – Variação do coeficiente de desgaste em função da carga aplicada



Fonte: Autor, 2025

Figura 21 ilustra as morfologias típicas das trilhas de desgaste obtidas após os ensaios. Em todas as condições, o desgaste predominante foi do tipo abrasivo, caracterizado pela presença de sulcos paralelos à direção de deslizamento e pela ausência de trincas ou delaminações significativas. Sob cargas mais elevadas (20 N), observou-se leve aumento na largura das trilhas e maior densidade de marcas abrasivas, indicando intensificação do desgaste, mas sem evidências de transição para mecanismos severos.

Figura 21 – Morfologia superficial das trilhas desgastadas (meio da trilha) após ensaios de deslizamento recíproco: (a) 10 N; (b) 15 N; (c) 20 N. (i) MB, (ii) ZTA, (iii) MS

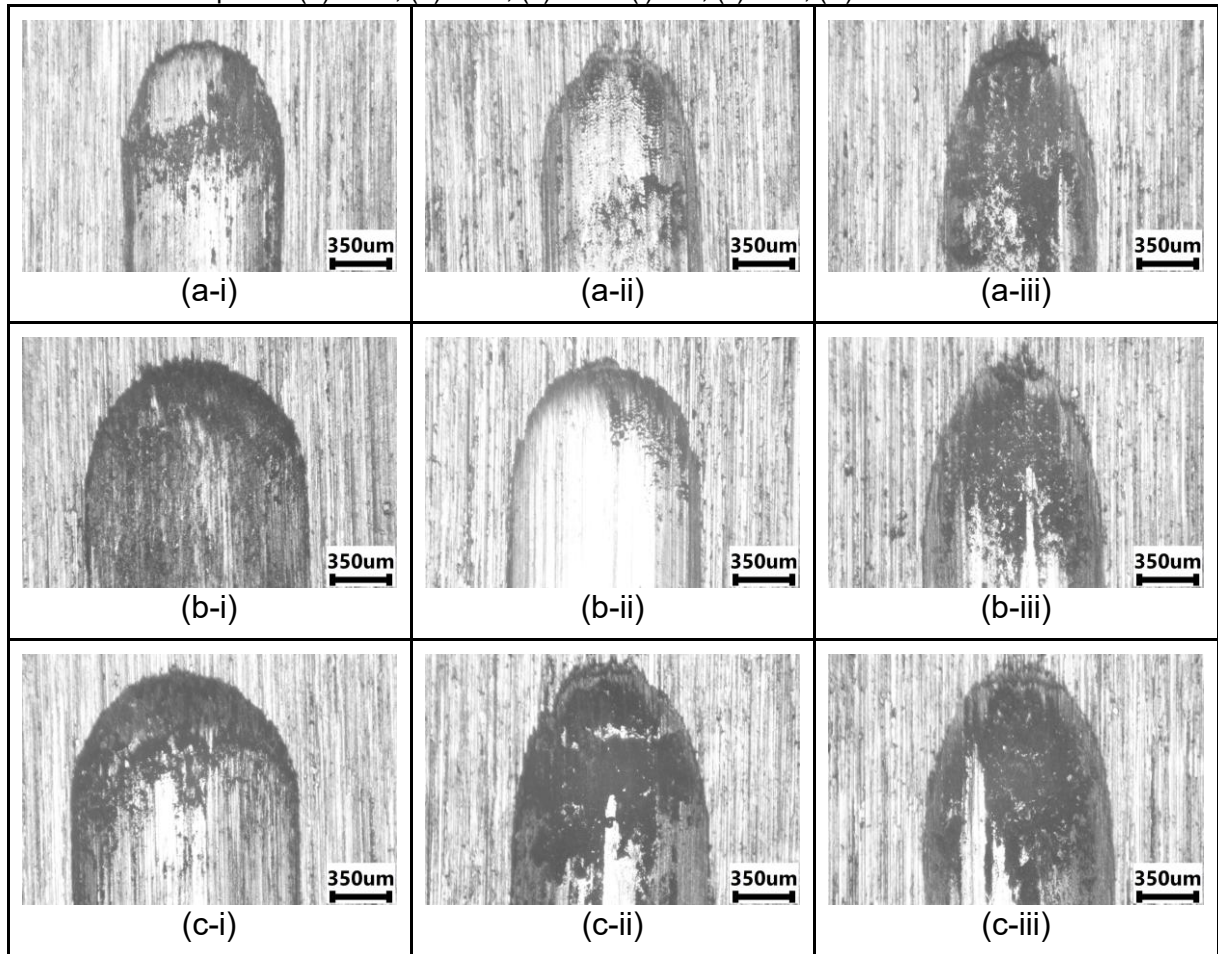


*Meio das trilhas

Fonte: Autor, 2025

Na Figura 22, observa-se a morfologia superficial das trilhas de desgaste após os ensaios tribológicos, evidenciando uma relação direta entre o aumento da carga aplicada e a severidade do desgaste. À medida que a carga cresce, ocorre uma ampliação da largura das trilhas e maior remoção de material, indicando intensificação do processo. As regiões do metal de solda (MS) apresentaram menor degradação superficial, com trilhas mais uniformes e contínuas, demonstrando maior resistência ao desgaste. Em contrapartida, as regiões da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal base (MB) mostraram danos mais severos, com sulcos, delaminações e indícios de desgaste adesivo. Esse comportamento está de acordo com Marques (2019), que destaca que o aumento da carga normal intensifica o desgaste abrasivo e favorece a transição para o regime adesivo, devido ao aumento da deformação plástica e à formação de microjunções soldadas entre as superfícies em contato.

Figura 22 – Morfologia superficial das trilhas desgastadas (ponta da trilha) após ensaios de deslizamento recíproco: (a) 10 N; (b) 15 N; (c) 20 N. (i) MB, (ii) ZTA, (iii) MS



*Ponta das trilhas

Fonte: Autor, 2025

Esses resultados demonstram que o metal de solda apresentou comportamento comparável ou até superior ao do material original, validando a viabilidade técnica do reparo.

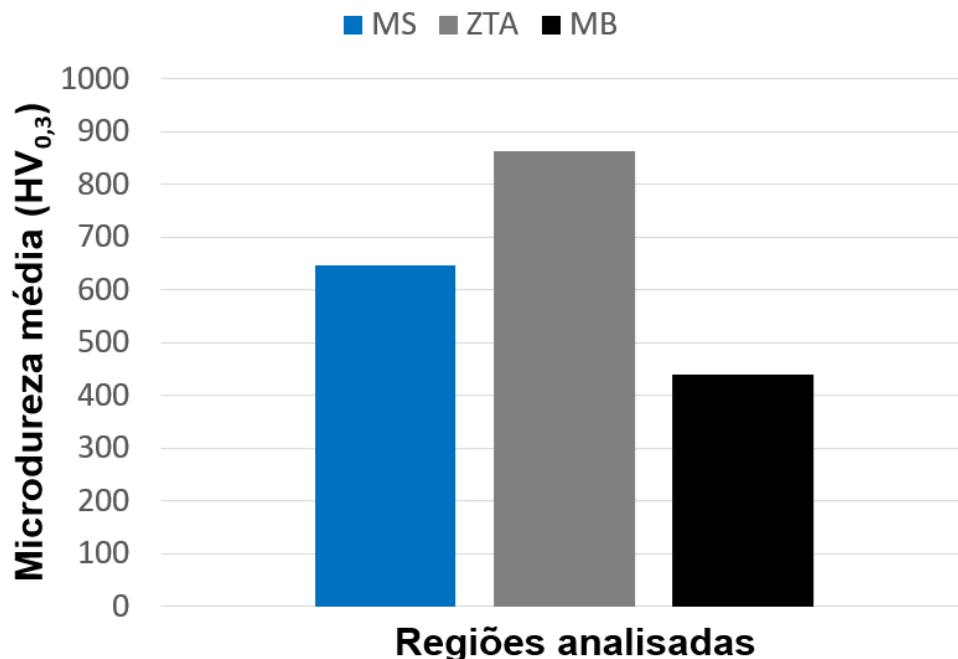
4.4 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

A análise integrada dos resultados metalográficos, perfis de microdureza e resultados tribológicos permite concluir que o reparo do aço VF800 pelo processo GMAW-CMT foi bem-sucedido, tanto do ponto de vista microestrutural quanto funcional. A continuidade metalúrgica observada entre as regiões soldadas e o material base, aliada à ausência de defeitos macroscópicos, confirma a boa qualidade do reparo.

A Figura 23 apresenta os valores médios de microdureza obtidos nas regiões do metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB).

Observa-se que a ZTA apresentou a maior dureza média, aproximadamente 870 HV, seguida pelo MS, com cerca de 650 HV, enquanto o MB apresentou o menor valor, em torno de 430 HV. O aumento da dureza na ZTA está associado à formação de martensita decorrente do rápido resfriamento após a soldagem. Esse comportamento é típico em aços ferramenta, nos quais a elevada taxa de resfriamento favorece a transformação de austenita em martensita, elevando a dureza local (Pellin; Israel; Dalcin, 2024). Por outro lado, a região do MS apresentou dureza intermediária devido à composição do arame *Tube-Alloy 260-G*. Já o MB manteve os menores valores de dureza, pois durante a soldagem, foi submetido a um aquecimento moderado que promoveu o retemperamento parcial da martensita originalmente presente no material. Como o VF800 já é fornecido temperado de fábrica, esse ciclo térmico adicional atua como um revenido extra, aliviando tensões e promovendo precipitação de carbonetos finos, resultando em redução da dureza (Pellin; Israel; Dalcin, 2024).

Figura 23 – Dureza média do MS, ZTA e MB



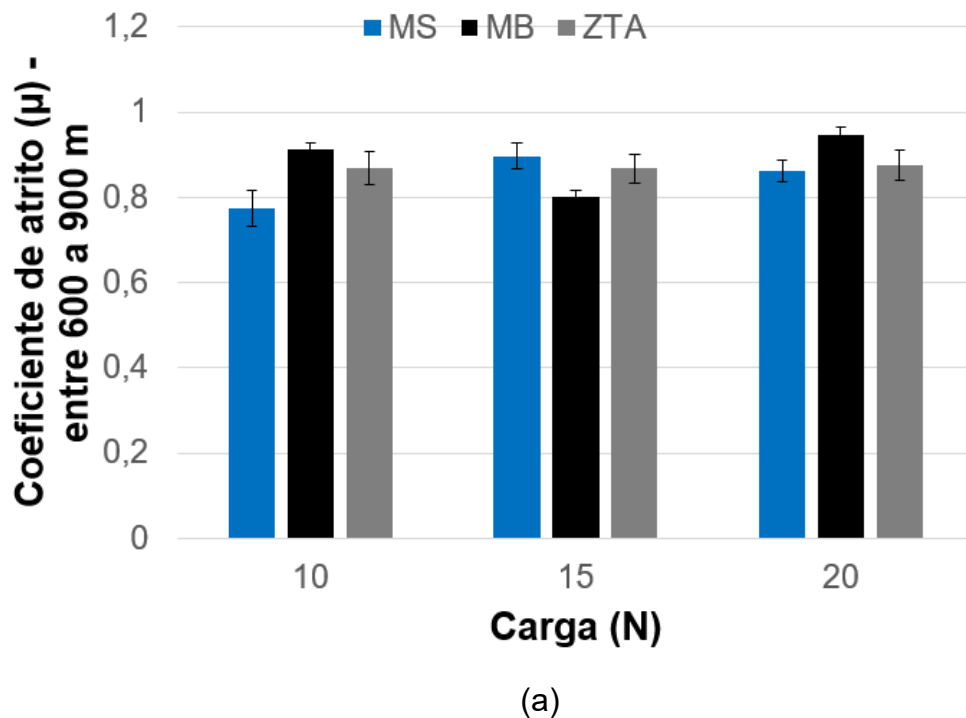
Fonte: Autor, 2025

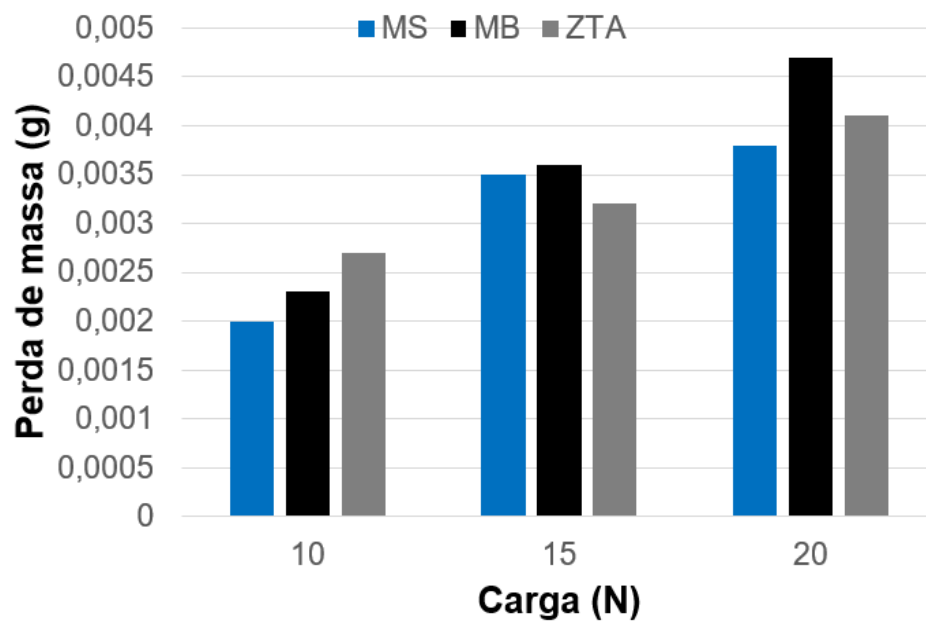
A Figura 24 apresenta a variação do coeficiente de atrito e da perda de massa em função da carga aplicada. Observa-se que o metal de solda (MS) apresentou os menores valores de coeficiente de atrito quase em todas as condições, enquanto o metal base (MB) exibiu os maiores, especialmente sob 20 N, evidenciando maior resistência ao deslizamento e tendência à adesão superficial. A zona termicamente

afetada (ZTA) manteve comportamento intermediário, refletindo sua microestrutura de transição.

Com o aumento da carga, a perda de massa aumentou proporcionalmente em todas as regiões, com o MS apresentando melhor desempenho tribológico — menor desgaste e menor atrito — resultado atribuído à sua maior tenacidade e ductilidade. Já a ZTA, embora apresente dureza elevada, mostrou maior desprendimento de material, evidenciando que alta dureza nem sempre implica melhor resistência ao desgaste. Assim, os resultados demonstram que o processo de soldagem GMAW-CMT foi eficaz na recuperação do aço VF800, restabelecendo propriedades tribológicas adequadas na região soldada e assegurando desempenho compatível ou superior ao do material original.

Figura 24 – Variação do coeficiente de atrito (a) e da perda de massa (b) em função da carga aplicada





(b)

De modo geral, o conjunto dos resultados demonstra que o processo GMAW-CMT aplicado ao aço VF800 é tecnicamente viável para a recuperação de ferramentas de conformação a frio, preservando a integridade microestrutural e o desempenho tribológico do material. O reparo realizado apresentou comportamento estável, sem indícios de fragilização ou perda significativa de resistência ao desgaste, validando sua aplicação em ambientes industriais. No entanto, recomenda-se em trabalhos futuros fazer análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar os mecanismos de desgaste.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o processo GMAW-CMT aplicado ao aço VF800 apresentou desempenho satisfatório, tanto do ponto de vista metalúrgico quanto tribológico.

A análise macroestrutural evidenciou a boa qualidade do reparo, ausência de trincas, porosidades e fusão adequada entre o metal base e o metal de solda, confirmando a eficácia dos parâmetros empregados no modo *Cold Metal Transfer* (CMT).

Os perfis de microdureza mostraram variações significativas entre as regiões avaliadas. A zona termicamente afetada (ZTA) apresentou o maior pico de dureza, superior a 900 HV_{0,3}, sendo aproximadamente 100% mais dura que o metal base (MB) e cerca de 38% superior ao metal de solda (MS), devido à formação de martensita não revenida. O MS, por sua vez, apresentou valores intermediários, entre 600 e 700 HV_{0,3}, correspondendo a uma dureza cerca de 44% maior que a do MB, enquanto o MB exibiu os menores valores, entre 400 e 500 HV_{0,3}.

Nos ensaios tribológicos, o metal de solda demonstrou o melhor desempenho, com menores coeficientes de atrito e menores taxas de desgaste em todas as condições de carga analisadas. A ZTA apresentou comportamento intermediário, enquanto o metal de base mostrou-se mais suscetível à remoção de material, especialmente sob cargas elevadas. As análises morfológicas das trilhas de desgaste confirmaram a predominância do mecanismo abrasivo, caracterizado por sulcos paralelos à direção de deslizamento, sem indícios de delaminações ou fraturas superficiais.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o processo GMAW-CMT é tecnicamente viável para o reparo do aço VF800, preservando suas propriedades tribológicas e garantindo a confiabilidade do componente reparado. O estudo reforça o potencial desse procedimento para a recuperação de ferramentas de conformação a frio, representando uma alternativa eficiente e economicamente vantajosa em relação à substituição completa das peças danificadas.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a investigação sobre o comportamento tribológico do aço VF800 reparado por GMAW-CMT, considerando testar outros metais de adição e parâmetros de soldagem, bem como avaliar os efeitos de tratamentos térmicos pós-soldagem na homogeneização

microestrutural e na estabilidade da dureza. Estudos complementares utilizando técnicas de microscopia eletrônica (MEV/EDS) e ensaios em ferramentas de forjamento e estampagem são recomendados para simular de forma mais realista as condições de operação industrial.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, W. M. **Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais), Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.
- ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de Metais: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC/USP, Projeto REENGE, 1999.
- ASM HANDBOOK. ***Metallography and Microstructures***. Vol. 9. Ohio: ASM International, 1993. 1128 p.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E3-11: ***Standard guide for preparation of metallographic specimens***. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/e0003-11r17.html>. Acesso em: 30 set. 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E384-17: ***Standard test method for microindentation hardness of materials***. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/e0384-17.html>. Acesso em: 30 set. 2025.
- AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. ***Structural Welding Code – Steel*** (AWS D1.1/D1.1M). Miami: AWS, 2000.
- BECKER, R. L. **Manufatura aditiva por deposição a arco e arame do metal AWS ER 308LSi: impacto da trajetória de deposição no desempenho tribológico e à corrosão dos depósitos**. 2024. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2024.
- BERNARDI, C. **Produção e caracterização de nanopartículas de MoS₂ e sua estabilização em óleos visando a lubrificação limite**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- BIANCO, D. L. D. **Desgaste de ferramentas de puncionamento**. 2003. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2003.
- BÖHLER. ***Welding In Tool Making: A guideline for welding of cold work steels, hot work steels, high speed steels, plastic mold steels including PM steels***. 2008. Disponível em: http://www.bucorp.com/media/bohler_welding_in_tool_making.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.
- BOTH, G. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CORDEIRO, I. J. P. **Desgaste de ferramentas em operações de conformação plástica de chapas com aços de alta resistência**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FOTES, C.; CLÁUDIO, V. **Produtos e soluções por categoria**. 2007. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/>. Acesso em: 30 Outubro 2025.

FROELICH, A. R. **Tratamento superficial DUPLEX com TiN e CrN de aços-ferramenta da classe AISI H13 para matrizes de injeção de alumínio**. 2003. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

GALLO, S. C. **Engenharia de Superfícies**: palestra-simecs-2010-0505. Disponível em: <http://www.slideshare.net/>. Acesso em: 30 Outubro 2025.

GONÇALVES, S. G. Impacto da escolha de aço e tratamento térmico na produção e qualidade das ferramentas: uma visão através de casos. *In: ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES – MOLDES ABM*, 14, 2016.

HILLSKOG, H. **Cold Work Tool Steels: Properties and Applications**. Uddeholm AB, 2015.

HOBART BROTHERS LLC. **Tube-Alloy Build Up-G: Ficha técnica**. Troy, OH: Hobart Brothers LLC, 2019. 2 p. (Revisão 190304).

JOST, H. P. **Tribology - origin and future**. [S.l.]: [s.n.], v. 136, 1990. p. 1-17.

KIM, H., KANG, J. Y., SON, D., LEE, T. H., CHO, K. M. *Evolution of carbides in cold-work tool steels*. **Journal materials characterization**, v. 107, ago. 2015, p. 376–385.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, *Second Edition*, 2003.

KRAUSS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. Ohio: ASM International, 1990.

LANGE, K. **Handbuch für Industrie und Wissenschaft**. Berlin: Springer, 1990

MACEK, P.; HÁJEK, M.; TOBOLA, D. *Microstructure and wear resistance of 8%Cr tool steels*. **Metals**, v. 9, n. 10, p. 1053–1061, 2019.

MARQUES, A. S. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a quente**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MESQUITA, R. A., BARBOSA, C. A. Uma avaliação das propriedades de desgaste e tenacidade em aços para trabalho a frio. **Tecnologia em metalurgia e materiais**. São Paulo, v. 2, n. 2, p. 12 - 18, out./dez. 2005.

MESQUITA, R. A., LEIVA, D. R., BARBOSA, C. A. Efeito das Condições de Tratamento Térmico na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Aços Ferramenta. 2001. Disponível em: http://villaresMetals.asia/portuguese/files/Falhas_Trat_Termico.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

MODENESI, P. J. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

PANTALEÓN, E. M.; TANAKA, D. K.; BERNARDES, F. G. Análise das variações do coeficiente de atrito e as correlações com os mecanismos de desgaste. **HOLOS**, v. 1, n. 28, 2012.

PELLIN, A. **Estudo do procedimento de recuperação por soldagem de ferramentas de estampagem do aço VF800AT**. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2018.

PELLIN, A.; ISRAEL, C. L.; DALCIN, R. L. *An investigation on the suitability of different welding recovery procedures for cold stamping punches in VF800AT steel*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 132, p. 2823–2838, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13540-9> . Acesso em: 04 nov. 2025.

TOBOLA, D., BROSTOW, W., CZECHOWSKI, K., RUSEK, P. *Improvement of wear resistance of some cold working tool steels*. **Journal wear**, mar., p. 29–39, 2017.

TONKOVIČ, Z.; *et al.* Numerical and experimental investigation of residual stresses in welded joints. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 115, p. 394–403, 2015.

VILLARES METALS. **Recomendações sobre temperaturas de tratamento térmico do aço VF800AT**. out. 2001. Disponível em: http://www.villaresMetals.nl/portuguese/files/Recom_Trat_Termico_VF800AT.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.

VILLARES METALS S.A. **VF800AT/ATIM – Aço para trabalho a frio**: ficha técnica. Sumaré, 2022. Disponível em: https://www.villaresMetals.com.br/app/uploads/sites/189/2025/05/VF800AT_ATIM_PT.pdf. Acesso em: 30 set. 2025.