

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

MAXWELL MORSOLIN

**INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DE TORÇÃO NA INTEGRIDADE DA
INTERFACE SOLDADA POR CALDEAMENTO ENTRE OS AÇOS SAE 1084 E UHB
15N20 NA PRODUÇÃO DE AÇO DAMASCO PARA CUTELARIA ARTESANAL**

CAXIAS DO SUL

2026

MAXWELL MORSOLIN

**INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DE TORÇÃO NA INTEGRIDADE DA
INTERFACE SOLDADA POR CALDEAMENTO ENTRE OS AÇOS SAE 1084 E UHB
15N20 NA PRODUÇÃO DE AÇO DAMASCO PARA CUTELARIA ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica da
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta

CAXIAS DO SUL

2026

MAXWELL MORSOLIN

**INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DE TORÇÃO NA INTEGRIDADE DA
INTERFACE SOLDADA POR CALDEAMENTO ENTRE OS AÇOS SAE 1084 E UHB
15N20 NA PRODUÇÃO DE AÇO DAMASCO PARA CUTELARIA ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

Aprovado em 9 de julho de 2026

Banca Examinadora

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul

Dr. Tiago Marcelo Reis

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão durante toda a minha trajetória acadêmica, e ao meu filho Dante, que está a caminho e que, mesmo antes de nascer, já se tornou minha maior motivação para continuar evoluindo pessoalmente e profissionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela iluminação continua.

À minha esposa, pelo apoio, paciência e companheirismo durante toda essa trajetória, principalmente neste momento tão especial de nossas vidas com a chegada do nosso filho Dante.

À minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo de toda a graduação, especialmente nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta, pela orientação, pelos ensinamentos e pelo acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao couteleiro Ismael Biegelmeier, pela disponibilidade, paciência e por compartilhar seu conhecimento técnico e experiência prática na execução das etapas experimentais deste estudo.

À empresa TForce, pelo suporte fornecido e pela disponibilização da estrutura necessária para a realização das atividades práticas.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória e contribuíram para a realização deste trabalho.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.” Ayrton Senna

RESUMO

O aço damasco é amplamente utilizado na cutelaria artesanal por combinar características mecânicas e estética diferenciada, resultantes da união de diferentes ligas metálicas por meio do caldeamento. Este trabalho teve como objetivo analisar a qualidade da união metalúrgica obtida por caldeamento entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20 na produção de aço damasco em padrão torcido, buscando correlacionar a integridade das interfaces com o comportamento mecânico do material produzido. Para isso, foi fabricado um *billet* com camadas intercaladas dos dois aços, posteriormente submetido aos processos de caldeamento, forjamento, torção, tratamentos térmicos e preparação dos corpos de prova. As amostras foram avaliadas por meio dos ensaios de tração, impacto Charpy, dureza Rockwell C e análise metalográfica nas seções longitudinal e transversal. Os resultados demonstraram que o processo de caldeamento foi eficiente na formação das camadas características do aço damasco e na união dos materiais em grande parte das regiões analisadas. Entretanto, foram identificadas descontinuidades localizadas nas interfaces, as quais influenciaram o desempenho mecânico do material. Os ensaios indicaram elevada dureza, baixa tenacidade ao impacto e comportamento predominantemente frágil em alguns corpos de prova. A comparação entre as amostras com 40 e 50 voltas indicou que o aumento da torção promoveu maior deformação das camadas, porém também favoreceu a propagação de descontinuidades. Concluiu-se que a qualidade da união obtida por caldeamento exerce influência direta sobre as propriedades mecânicas do aço damasco, sendo fundamental o controle adequado das etapas de fabricação e tratamento térmico para obtenção de maior uniformidade estrutural e mecânica.

Palavras-chave: Aço Damasco; Caldeamento; SAE 1084; UHB 15N20; Ensaios Mecânicos.

ABSTRACT

Damascus steel is widely used in artisanal knifemaking due to its combination of mechanical properties and distinctive aesthetics, resulting from the joining of different metallic alloys through forge welding. This study aimed to analyze the quality of the metallurgical bonding obtained by forge welding between SAE 1084 and UHB 15N20 steels in the production of twisted-pattern Damascus steel, seeking to correlate the integrity of the interfaces with the mechanical behavior of the produced material. For this purpose, a billet composed of alternating layers of both steels was manufactured and subsequently subjected to forge welding, forging, twisting, heat treatment, and specimen preparation processes. The samples were evaluated through tensile testing, Charpy impact testing, Rockwell C hardness testing, and metallographic analysis in both longitudinal and transverse sections. The results demonstrated that the forge welding process was effective in forming the characteristic Damascus steel layers and in bonding the materials in most analyzed regions. However, localized discontinuities were identified at the interfaces, which influenced the mechanical performance of the material. The tests indicated high hardness, low impact toughness, and predominantly brittle behavior in some specimens. The comparison between the samples with 40 and 50 twists indicated that the increase in torsion promoted greater deformation of the layers, but also favored the propagation of discontinuities. It was concluded that the quality of the bonding obtained through forge welding directly influences the mechanical properties of Damascus steel, making proper control of the manufacturing and heat treatment stages essential to achieve greater structural and mechanical uniformity.

Keywords: Damascus Steel; Forge Welding; SAE 1084; UHB 15N20; Mechanical Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de padrões de aço damasco	15
Figura 2 – Lâmina confeccionada em aço wootz.....	18
Figura 3 – Lâmina confeccionada em aço damasco	19
Figura 4 – Micrografia damasco SAE 5160 e UHB 15N20 ampliação 500X.....	22
Figura 5 – Micrografia damasco SAE 5160 e UHB 15N20 ampliação 1000X.....	23
Figura 6 – Micrografia damasco SAE 1084 e UHB 15N20, com delaminação entre as camadas	24
Figura 7 – Defeitos de delaminação visíveis nos corpos de prova SAE 1084 e UHB 15N20 .	24
Figura 8 – Micrografia soldagem por fricção, evidenciando a presença de descontinuidade na região central da junta.....	25
Figura 9 – Micrografia da junta soldada por fricção entre aços SAE 1020, evidenciando descontinuidade na interface caracterizada como falta de fusão.	26
Figura 10 – Imagens metalográficas da junta soldada por fricção evidenciando a presença de inclusões, vazios e trincas ao longo da interface de união	27
Figura 11 – Gráfico da distribuição da dureza	30
Figura 12 – Referências de cor do aço nas faixas de temperatura de revenimento	31
Figura 13 – Gráfico da tensão em função da deformação para o aço damasco.....	32
Figura 14 – Corpos de prova após ensaio de impacto	34
Figura 15 – Fluxograma do processo	35
Figura 16 – Lâminas de aço SAE 1084 e UHB 15N20	36
Figura 17 – Lâminas de aço SAE 1084 e UHB 15N20 intercaladas para formar o <i>billet</i>	37
Figura 18 – <i>Billet</i> soldado pronto para o caldeamento	37
Figura 19 – Fornalha a gás para caldeamento de aço damasco	38
Figura 20 – <i>Billet</i> coberto de fluxo de solda.....	39
Figura 21 – Prensa hidráulica para cutelaria	39
Figura 22 – <i>Billet</i> em processo de caldeamento	40
Figura 23 – Forjamento da barra	40
Figura 24 – Forjamento da barra	41
Figura 25 – Torcedor de barra	42
Figura 26 – Barras torcidas.....	42
Figura 27 – Amostras após preparação.....	43
Figura 28 – Forno de temperatura controlada	45
Figura 29 – Gráfico ensaio de tração (CP 1.1 e 1.2 amostras 50 voltas) (CP 2.1 e 2.2 amostras 40 voltas)	49
Figura 30 – Superfície de fratura do corpo de prova submetido ao ensaio de tração.....	50

Figura 31 – Superfície de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de impacto Charpy	51
Figura 32 – Aspecto macroscópico das amostras após o preparo metalográfico e ataque químico. (A) Amostra 1 (50 voltas) e (B) Amostra 2 (40 voltas).....	55
Figura 33 – Identificação dos aços por meio de ataques químicos. (A) Ataque com Nital (B) Ataque com Vilella, ampliação de 50x.....	56
Figura 34 – Micrografias da seção longitudinal da amostra com 50 voltas em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x	57
Figura 35 – Micrografias da seção transversal da amostra com 50 voltas em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x	57
Figura 36 – Micrografias da seção longitudinal da amostra com 40 voltas em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x	58
Figura 37 – Micrografias da seção transversal da amostra com 40 voltas em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x	59
Figura 38 – Comparação da microestrutura das amostras, (A) 50 voltas e (B) 40 voltas. Ampliação de 500x.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição SAE 1084.....	19
Tabela 2 – Composição UHB 15N20	20
Tabela 3 – Resultados do ensaio Charpy	33
Tabela 4 – Resultados Ensaio de Tração	48
Tabela 5 – Resultados Ensaio de Impacto Charpy	51
Tabela 6 – Resultados Ensaio de Dureza.....	52
Tabela 7 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers convertidos para dureza Rockwell C (HRC)	53

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>American Bladesmith Society</i>
AGC	Associação Gaúcha de Cutelaria
DIN	Deutsches Institut Fur Normung
HRC	Dureza Rockwell C
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TCC	Trabalho de Conclusão do Curso
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UHB	Bohler Uddeholm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	HISTÓRIA E ORIGEM DO AÇO DAMASCO	17
2.2	AÇO SAE 1084	19
2.3	AÇO UHB 15N20.....	20
2.4	COMBINAÇÃO SAE 1084 E UHB 15N20.....	21
2.5	SOLDAGEM POR FORJAMENTO	21
2.6	FALHAS CALDEAMENTO DO AÇO DAMASCO	22
2.7	FALHAS NA MICROESTRUTURA DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO	25
2.8	TRATAMENTO TERMICO AÇO DAMASCO	27
2.8.1	Recozimento.....	27
2.8.2	Normalização.....	28
2.8.3	Têmpera	29
2.8.4	Revenimento	30
2.9	ANÁLISE DE TRAÇÃO.....	32
2.10	ANÁLISE DE IMPACTO CHARPY.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	PREPARAÇÃO DOS AÇOS E MONTAGEM DO BILLET.....	36
3.2	CALDEAMENTO	38
3.3	FORJAMENTO DA BARRA	40
3.4	TORÇÃO DA BARRA	41
3.5	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	43
3.5.1	Ensaio de Tração.....	43
3.5.2	Ensaio de Impacto.....	44
3.5.3	Análise Metalográfica.....	44
3.5.4	Ensaio de Dureza.....	45
3.6	TRATAMENTOS TÉRMICOS	45

3.6.1	Normalização.....	46
3.6.2	Têmpera.....	46
3.6.3	Revenimento	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	47
4.2	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	50
4.3	ENSAIO DE DUREZA	52
4.4	ANÁLISE METALOGRÁFICA	54
5	CONCLUSÃO.....	61
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A espécie humana fez uso da extração de materiais da natureza para a sua transformação em ferramentas úteis à sobrevivência. Exemplifica-se isso pela fabricação de utensílios de metais, inicialmente de forma rudimentar, que auxiliaram na obtenção de alimentos. Com o desenvolvimento dos conhecimentos e das técnicas metalúrgicas, tornou-se possível produzir objetos mais eficientes e adequados às necessidades. A integração de diferentes processos contribuiu significativamente para o desenvolvimento tecnológico da sociedade (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, pg. 2).

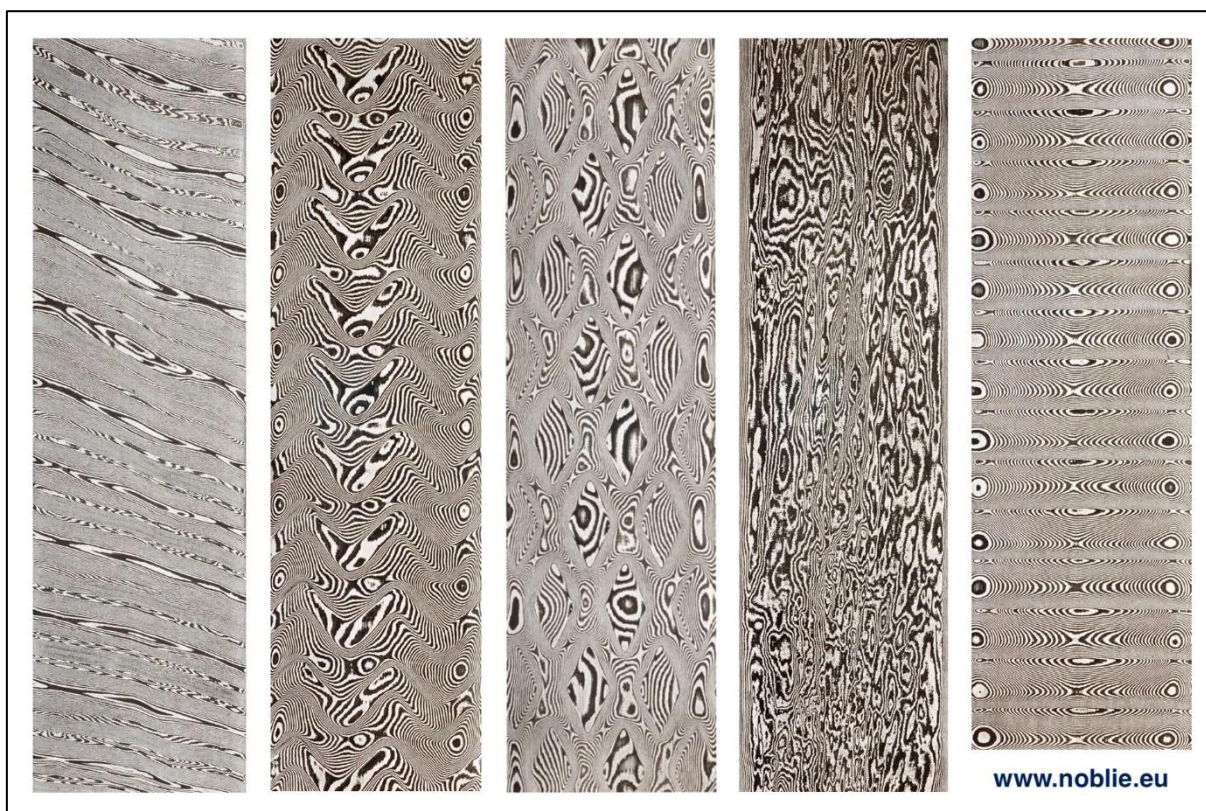
Entre essas técnicas, destacam-se a fundição, a usinagem, a soldagem e a conformação mecânica. Cada uma delas possui finalidades específicas, sendo aplicadas de acordo com o tipo de material e o resultado desejado. Dentro do campo da soldagem, existe um processo tradicional chamado de soldagem por forjamento. Nessa técnica, duas ou mais peças metálicas são unidas por meio da aplicação de calor e pressão, sem o uso de material de adição. Apesar de antiga, essa prática ainda é bastante utilizada (MACHADO, 1996, pg. 10).

O aço damasco, é um exemplo tradicional do uso da soldagem por deformação plástica, que na cutelaria também é chamado de caldeamento, sendo reconhecido tanto por seu padrão estético singular, resultante da combinação de diferentes ligas metálicas unidas, quanto por suas propriedades funcionais. Tradicionalmente aplicado na confecção de facas artesanais de alto valor agregado, esse material alia beleza e desempenho (KREUTZ; IZQUIERDO, 2022, pg. 7).

O aço damasco é obtido através de uma técnica artesanal de precisão, repetição e método. Inicia-se pela organização de diferentes tipos de aços em camadas, submetendo-os ao caldeamento, processo em que os materiais são aquecidos até temperatura que permite que sejam trabalhados e unidos por martelamento ou prensagem. Posteriormente, o bloco é estirado, dobrado e novamente passa pelo processo de caldeamento por diversas vezes, podendo chegar até centenas de repetições. Podem ser aplicadas diferentes técnicas que geram variados padrões visuais através da retorção, recorte ou reempilhamento das camadas. O polimento e ataque químico, em seguida, faz com se evidenciem os contrastes entre os metais e técnicas utilizadas, garantindo com que cada peça produzida seja única (GIOPATO; GONÇALVES, 2022, pg. 15).

A aparência do aço damasco é marcada por diferentes padrões, que variam conforme a técnica de caldeamento utilizada, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Modelos de padrões de aço damasco



Fonte: Adaptado de Noblie (2025).

No contexto da cutelaria artesanal, a união de aços com características complementares, como o SAE 1084, rico em carbono, e o UHB 15N20, com teor significativo de níquel, permite obter lâminas com excelente capacidade de corte, durabilidade do fio e resistência ao desgaste (DUSTRE, 2024).

O aço damasco está presente na cutelaria há séculos, todavia, percebe-se que há uma certa carência de investigações sobre o assunto, destacando que existe a possibilidade de aprofundamento de estudos para melhor entendimento desta técnica artesanal. Enquanto os aços industriais são submetidos a ensaios normativos rigorosos para definição de suas propriedades, os aços damascos são elaborados de forma artesanal, o que torna suas características mecânicas e microestruturais variáveis. A ausência de uniformidade abre espaço para estudos que analisem como o processo de fabricação interfere diretamente no desempenho do material resultante.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo do aço damasco, embora amplamente reconhecido, ainda carece de pesquisas acadêmicas que relacionem diretamente o processo de caldeamento com o desempenho estrutural das peças produzidas. Nesse sentido, investigar a união entre os aços SAE 1084 e

UHB 15N20 torna-se relevante, visto que são materiais com características complementares e empregados na cutelaria brasileira, motivo também que justifica a combinação escolhida.

Além disso, a escolha deste tema também possui uma motivação pessoal, uma vez que o autor é iniciante na prática da cutelaria e buscou unir o interesse pelo ofício artesanal ao desenvolvimento acadêmico. Essa combinação permite adquirir experiência prática, compreender melhor os fenômenos metalúrgicos envolvidos e, ao mesmo tempo, gerar conhecimento útil tanto para a comunidade científica quanto para profissionais da área.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que orientam o desenvolvimento deste trabalho, voltado à análise do processo de caldeamento na fabricação de aço damasco.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade do caldeamento entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20 na produção de aço damasco em padrão torcido, correlacionando a integridade das interfaces com o comportamento mecânico do material produzido.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, os seguintes objetivos específicos são previstos:

- Avaliar a influência do processo de caldeamento na integridade da união entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20.
- Correlacionar os resultados dos ensaios mecânicos com a qualidade da união soldada obtida.
- Comparar o comportamento mecânico das amostras submetidas a dois níveis de torção.
- Investigar, por meio de análise metalográfica, a presença de descontinuidades nas interfaces soldadas.
- Analisar a influência do número de voltas no processo de torção sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço damasco.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento deste trabalho, reunindo os principais conceitos, estudos e referências relacionadas ao aço damasco e aos processos metalúrgicos envolvidos em sua fabricação. São abordadas as origens do aço damasco, as características dos aços SAE 1084 e UHB 15N20, bem como os fundamentos dos processos de soldagem por forjamento e fricção, que possuem relação direta com o caldeamento do aço damasco. A partir dessa base conceitual, busca-se compreender os fenômenos metalúrgicos que influenciam a integridade da soldagem e o desempenho mecânico do material, fornecendo subsídios teóricos para a análise experimental e a interpretação dos resultados apresentados nos capítulos seguintes.

2.1 HISTÓRIA E ORIGEM DO AÇO DAMASCO

O aço damasco é conhecido desde a Antiguidade por unir desempenho mecânico e beleza estética. Sua denominação vem da cidade de Damasco, na Síria, que foi um importante centro comercial na Idade Média, de onde espadas e lâminas produzidas com esse material ganharam fama pela resistência e capacidade de manter o fio cortante (GIOPATO; GONÇALVES, 2022, pg. 13).

Historicamente, o damasco original era obtido a partir de lingotes de *wootz*, aço produzido na Ásia em especial na Índia, que apresentava alto teor de carbono e microestruturas diferenciadas. Esse material era exportado e trabalhado por ferreiros do Oriente Médio, resultando em armas de qualidade superior, bastante valorizadas pelos povos europeus durante as cruzadas (PAZINI, 2011, pg. 13-14).

A Figura 2 ilustra uma lâmina confeccionada com esse material, evidenciando a aparência típica obtida após polimento e ataque ácido.

Figura 2 – Lâmina confeccionada em aço *wootz*

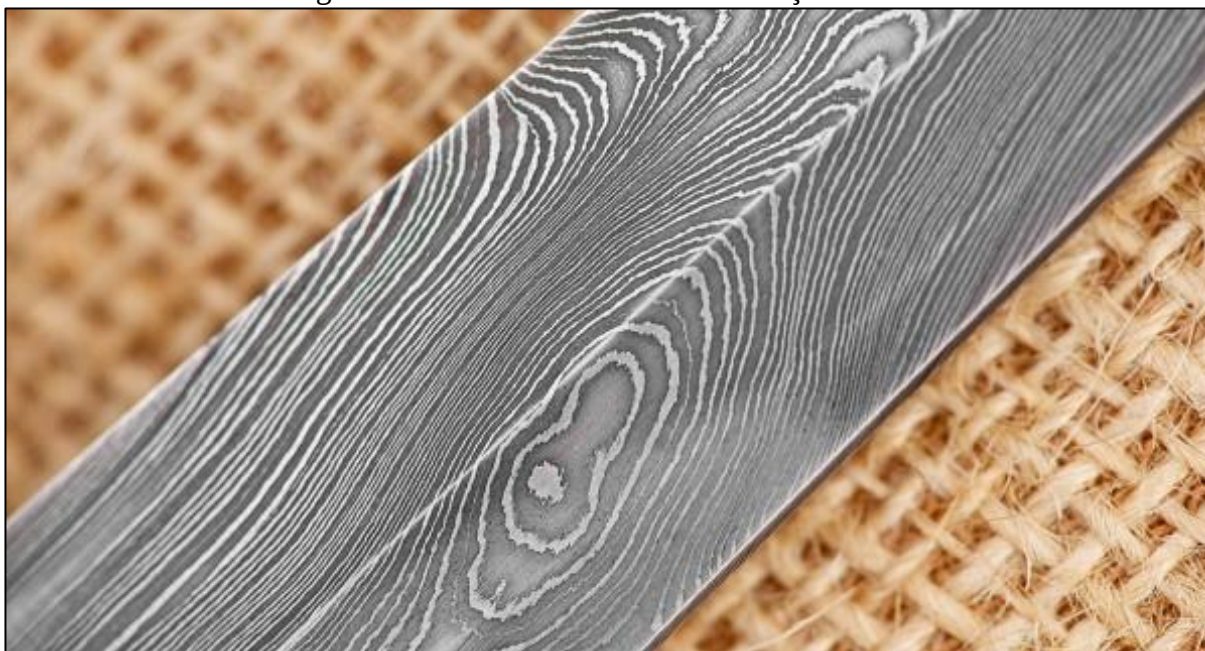


Fonte: Adaptado de Nemtsev (2025).

Com o passar dos séculos, a técnica original se perdeu, mas seu prestígio permaneceu. Atualmente, o termo “aço damasco” passou a ser aplicada a uma técnica diferente, baseada no caldeamento de aços de diferentes ligas, empilhados e forjados sob alta temperatura, formando blocos com múltiplas camadas. O contraste entre os dois aços é revelado posteriormente por ataque químico, dando origem ao chamado padrão aleatório. (GIOPATO; GONÇALVES, 2022, pg. 13).

Entre os diferentes padrões obtidos no aço damasco, o padrão aleatório é um dos mais comuns, a Figura 3 apresenta um exemplo desse padrão.

Figura 3 – Lâmina confeccionada em aço damasco



Fonte: Adaptado de Pahl (2024).

Dessa forma, enquanto o aço damasco histórico esteve associado às técnicas do *wootz*, atualmente o termo refere-se principalmente ao aço produzido por caldeamento e conformação.

2.2 AÇO SAE 1084

O aço SAE 1084 é um aço carbono e recebe essa denominação devido a sua composição química, que contém cerca de 0,84% de carbono. A sua nomenclatura segue a padronização da ABNT, inspirada no sistema americano, conforme explica Chiaverini (1986, pg. 115). Ainda segundo Chiaverini, os aços com até 1% de carbono, contendo elementos usuais como manganês, silício, fosforo e enxofre, podendo conter pequenas quantidades de elementos de ligas, são classificados por meio de quatro algarismos, os dois finais indicam o teor médio de carbono e os dois iniciais apontam a presença ou ausência de elementos de liga. Assim, quando a designação começa pelos números 1 e 0, trata-se de um aço carbono, já variações nesses algarismos correspondem a outras categorias de aços.

Na Tabela 1 está listada composição do aço SAE 1084.

Tabela 1 – Composição SAE 1084

Composição Aço SAE 1084				
Elemento	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
Concentração (%)	0,80-0,93	0,60-0,90	≤ 0,040	≤ 0,050

Fonte: Adaptado de ArcelorMittal (s.d.).

O aço SAE 1084 apresenta excelente resposta aos tratamentos térmicos devido ao seu elevado teor de carbono. Segundo a New Jersey Steel Baron (2024), recomenda-se a têmpera entre 815 e 830 °C, seguida resfriamento em óleo. Após esse tratamento, a microestrutura esperada é predominantemente martensítica, proporcionando elevada dureza e resistência mecânica, numa faixa de dureza entre 60 e 65HRC. Posteriormente, o revenimento é realizado em temperaturas compatíveis com a dureza desejada para a aplicação, promovendo o alívio das tensões internas e melhorando a tenacidade do material, mantendo elevados níveis de dureza.

2.3 AÇO UHB 15N20

O aço UHB 15N20 é um aço de denominação comercial produzido pela Uddeholm, sendo equivalente ao aço designado pela norma DIN 75Ni8 (W Nr. 1,5634) (MAXIME FERRUM, 2019).

Conforme Dias (2018, pg. 15) o aço 15N20 é uma liga caracterizada pelo elevado teor de níquel, em torno de 2,0%. É bastante utilizada na cutelaria, principalmente na fabricação de lâminas e na combinação com aços de alto teor de carbono para a produção do aço damasco. Essa liga apresenta boas propriedades mecânicas, possuindo dureza intermediária, boa tenacidade e resistência satisfatória à fadiga.

Ainda conforme Dias (2018), o níquel presente na liga contribui para aumentar a resistência do material e a sua capacidade de suportar a ação de agentes químicos.

Na Tabela 2 está listada a composição do aço UHB 15N20.

Tabela 2 – Composição UHB 15N20				
Composição aço UHB 15N20				
Elemento	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Níquel (Ni)
Concentração (%)	0,71 - 0,78	0,30 - 0,50	0,15 - 0,35	1,90 - 2,10

Fonte: Adaptado de Maxime Ferrum (2019).

Segundo Maxime Ferrum (2019), o aço UHB 15N20 apresenta boa resposta aos tratamentos térmicos, sendo recomendado o recozimento a aproximadamente 950 °C, têmpera entre 820 e 850 °C com resfriamento em óleo e revenimento em torno de 350 °C. Após a têmpera, a microestrutura esperada é predominantemente martensítica, com presença de austenita retida, enquanto após o revenimento a dureza típica situa-se entre 55 e 59 HRC.

2.4 COMBINAÇÃO SAE 1084 E UHB 15N20

Thomas (2025) afirma em sua pesquisa que a combinação entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20 tornou-se muito utilizada, embora sua popularidade só tenha se consolidado a partir da década de 1990. Um exemplo é o livro *The Pattern Welded Blade*, de Jim Hrisoulas (1994), que sequer faz menção ao 15N20, concentrando-se principalmente em misturas entre aços de alto e baixo teor de carbono. A combinação entre 1084 e 15N20 ganhou destaque em parte graças ao grupo conhecido como “Máfia de Montana”, formado por Rick Dunkerley e Shane Taylor.

Segundo Thomas (2025), Dunkerley começou a empregar essa combinação em 1995, muitos ferreiros recorriam a ele por dificuldades relacionadas à soldagem e à gravação, frequentemente usando aços de difícil trabalho. Nesse contexto, ele avaliou que o 1084 e o 15N20 apresentavam maior facilidade de forjamento e soldagem, além de proporcionarem um contraste estético satisfatório.

2.5 SOLDAGEM POR FORJAMENTO

Segundo Chiaverini (1986, pg. 161), a soldagem é um processo de união que consiste no aquecimento das superfícies de materiais metálicos até que atinjam o estado de fusão ou de plasticidade, formando assim a junta soldada. Esse procedimento pode ser empregado tanto na fabricação de componentes e estruturas quanto na recuperação de peças desgastadas.

Na soldagem por forjamento, Machado (1996, pg. 10) afirma ser um processo bem antigo, que consistem em aquecer as regiões das peças a serem unidas, muitas vezes de forma rudimentar, em seguida, submetê-las a martelamento nas áreas de contato. Esse procedimento expulsa os óxidos superficiais e promove a deformação plástica dos metais, resultando em uma união metalúrgica. Existe ainda variações desse método, como a utilização de prensas ou matrizes de forjamento.

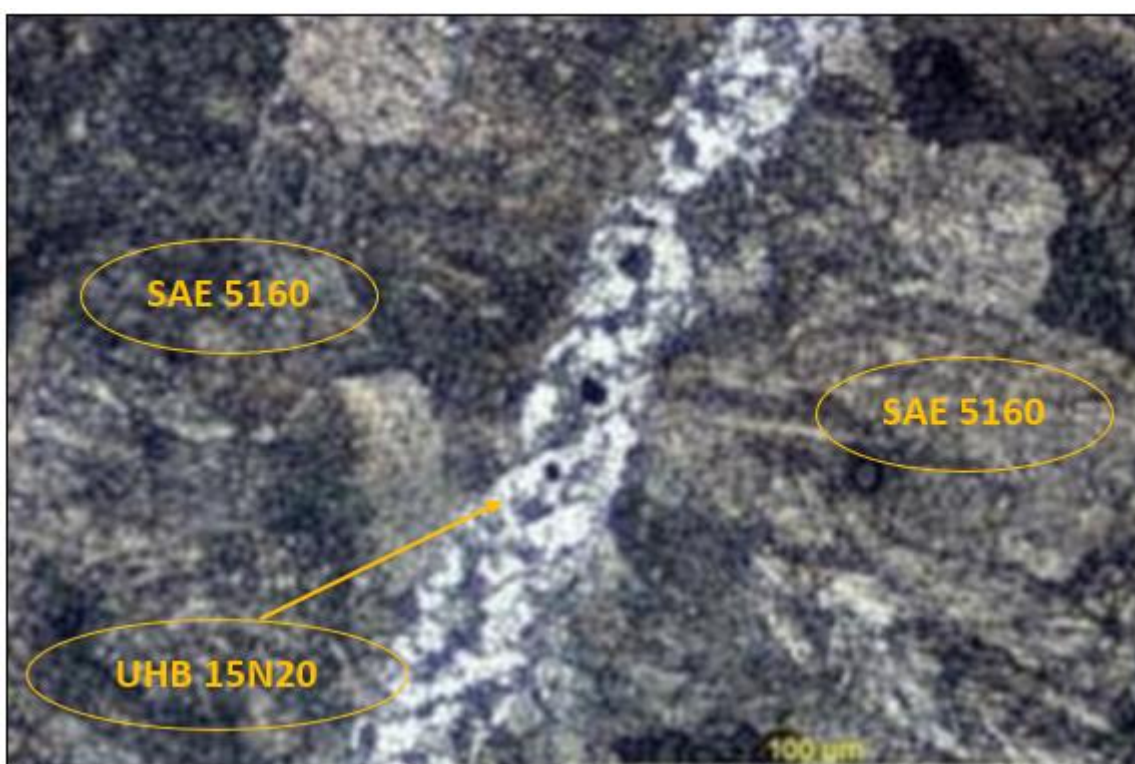
Segundo CALLISTER e RETHWISCH (2016) o caldeamento pode ser definido como o processo de soldagem de duas ou mais peças de aço por meio de aquecimento seguido de impacto mecânico. Já o forjamento corresponde à deformação plástica de uma única peça metálica, geralmente à quente, realizada pela aplicação de golpes sucessivos ou de compressões contínuas. Segundo eles, o aço damasco é obtido através desse processo de soldagem. Além disso, os mesmos autores destacam que o caldeamento, como processo de união de materiais

dissimilares, pode ser objeto de pesquisas futuras por apresentar similaridade metalúrgica ao processo de soldagem por fricção, evidenciando a relação conceitual entre ambos os métodos.

2.6 FALHAS CALDEAMENTO DO AÇO DAMASCO

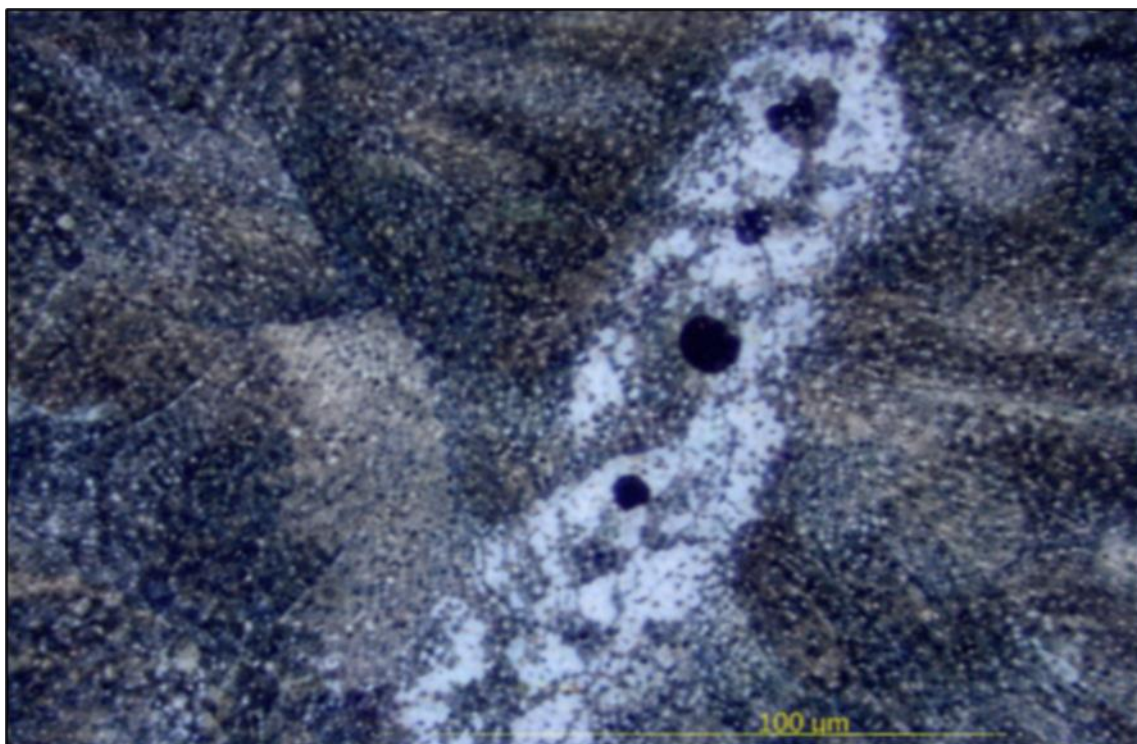
Giopato e Gonçalves (2022, p. 55), ao analisarem o caldeamento entre os aços SAE 5160 e UHB 15N20, identificaram inclusões por meio da análise metalográfica, conforme apresentado nas Figuras 4 e 5. Essas inclusões podem ter se formado devido as superfícies não estarem perfeitamente limpas e protegidas pelo fluxo durante o caldeamento, ou se a temperatura não estava corretamente adequada para o escoamento plástico necessário. A região clara observada na micrografia corresponde ao aço UHB 15N20, enquanto as regiões mais escuras correspondem ao aço SAE 5160, evidenciando o contraste metalográfico entre os materiais.

Figura 4 – Micrografia damasco SAE 5160 e UHB 15N20 ampliação 500X



Fonte: Adaptado de Giopato e Gonçalves (2022).

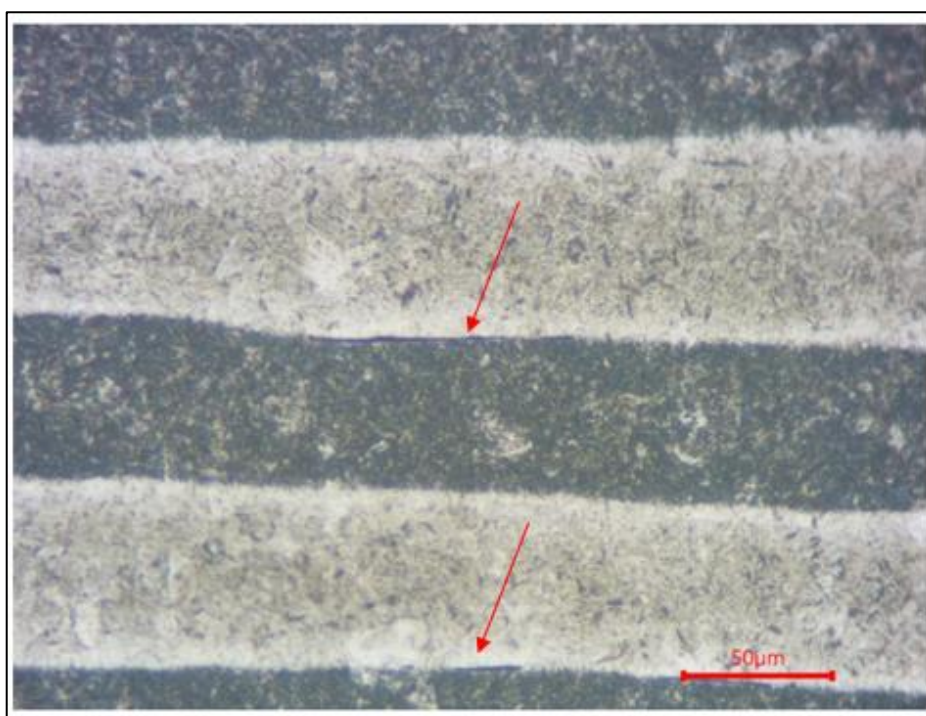
Figura 5 – Micrografia damasco SAE 5160 e UHB 15N20 ampliação 1000X



Fonte: Adaptado de Giopato e Gonçalves (2022).

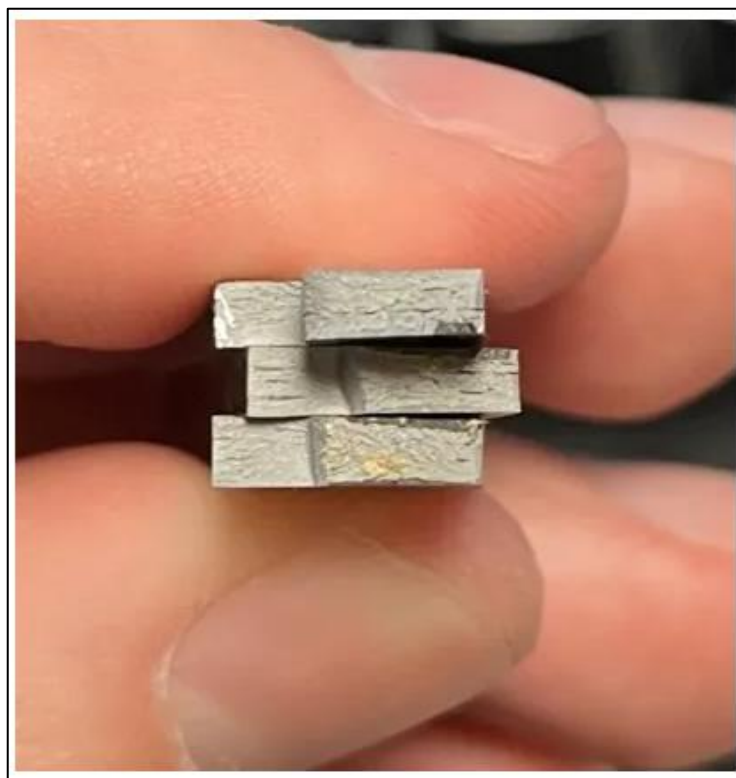
Thomas (2023) em seu artigo, fez um estudo sobre o aço damasco, testando diferentes combinações, entre elas o SAE 1084 e UHB 15N20. Segundo ele, o aço com maior tenacidade combinado foi o 1084/15N20, que é uma combinação de dois aços de alta tenacidade e em padrão aleatório. Este aço apresentou alta tenacidade, apesar de apresentar falhas de soldagem visíveis na micrografia, conforme mostra a Figura 6, onde pode se notar pequenas regiões de delaminação entre as duas camadas e na Figura 7 é possível ver as camadas separadas nos espécimes quebrados.

Figura 6 – Micrografia damasco SAE 1084 e UHB 15N20, com delaminação entre as camadas



Fonte: Adaptado de Thomas (2023).

Figura 7 – Defeitos de delaminação visíveis nos corpos de prova SAE 1084 e UHB 15N20

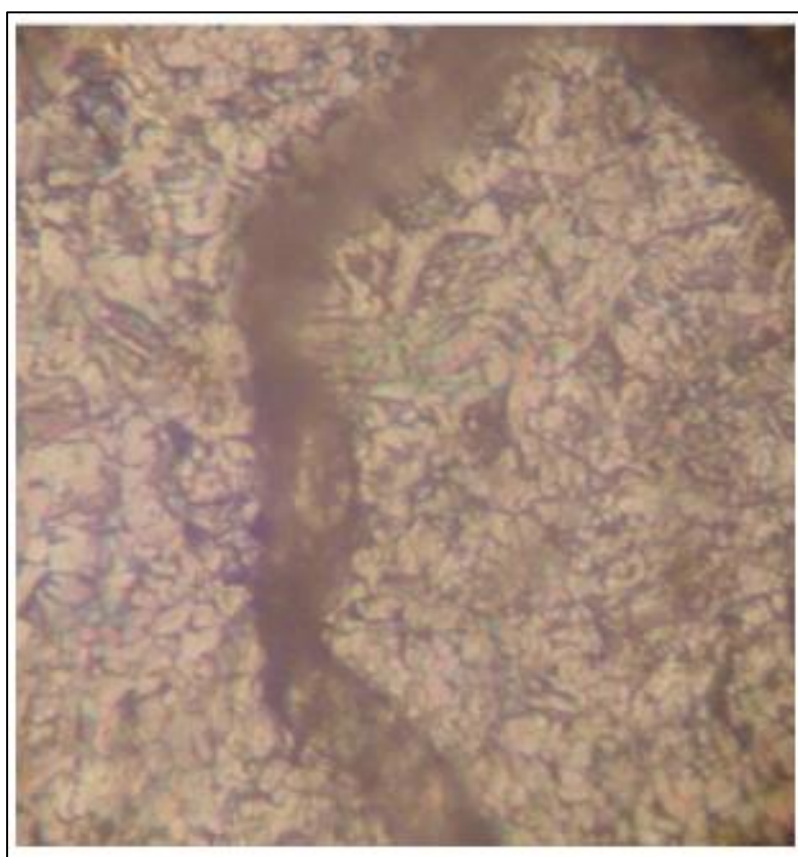


Fonte: Adaptado de Thomas (2023).

2.7 FALHAS NA MICROESTRUTURA DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO

No estudo realizado por Quitaiski *et al.* (2014), a análise microscópica da zona de união revelou uma falha de fusão central, conforme mostra a Figura 8, este defeito foi causado pela falta de pressão durante o processo de soldagem por fricção e comprometeu significativamente os resultados nos ensaios de tração. Ainda segundo Quitaiski, neste tipo de união, a zona termicamente afetada é quase imperceptível.

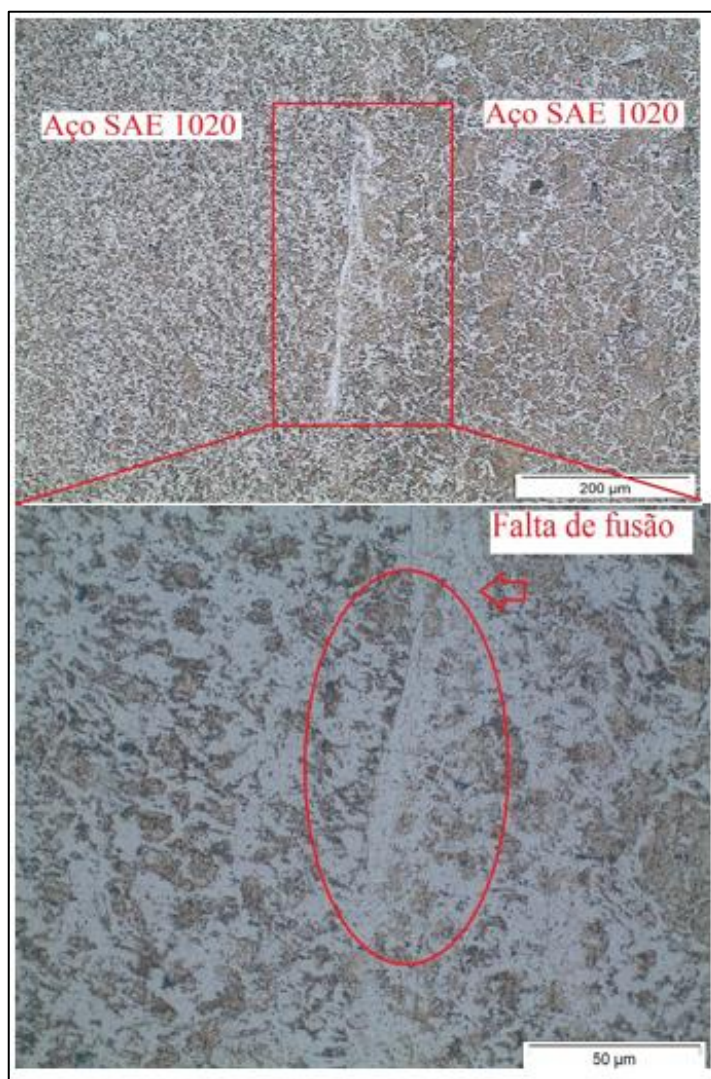
Figura 8 – Micrografia soldagem por fricção, evidenciando a presença de descontinuidade na região central da junta.



Fonte: Adaptado de Quitaiski et al. (2014).

Segundo Lima (2017, pg. 41) em seu estudo se observou uma granulação mais refinada na zona termicamente afetada, acompanhada por um crescimento de grão progressivo ao longo da região soldada. Além disso, foi identificada uma descontinuidade na interface de união, característica de falta de fusão, possivelmente resultante da insuficiência de força axial aplicada durante o processo de soldagem, como mostra a Figura 9.

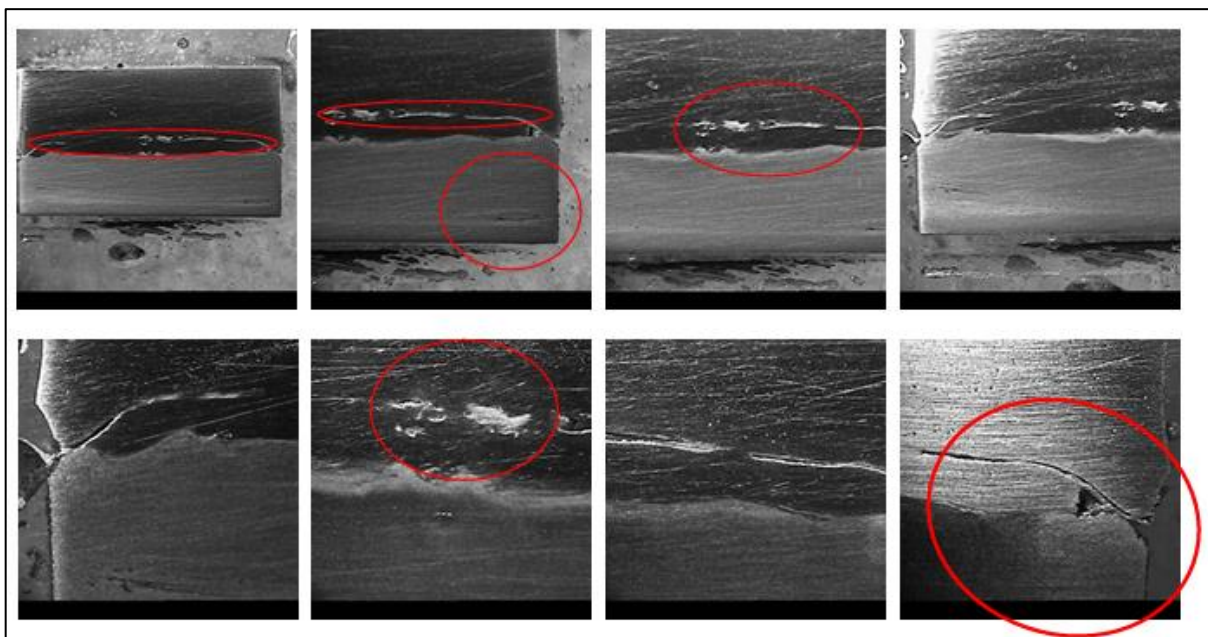
Figura 9 – Micrografia da junta soldada por fricção entre aços SAE 1020, evidenciando descontinuidade na interface caracterizada como falta de fusão.



Fonte: Adaptado de Lima. (2017).

O estudo de Motta *et al.* (2010), a análise metalográfica, Figura 10, revelou a presença de inclusões, caracterizando descontinuidades localizadas. Tal ocorrência pode ser explicada pela natureza da liga inoxidável, cuja composição química contém maior teor de elementos de liga e apresenta condutividade térmica inferior à do aço carbono, resultando em diferenças no tempo de resfriamento e solidificação entre os materiais. Essa discrepância térmica pode favorecer a formação dessas irregularidades na interface de união.

Figura 10 – Imagens metalográficas da junta soldada por fricção evidenciando a presença de inclusões, vazios e trincas ao longo da interface de união



Fonte: Adaptado de Motta et al. (2010).

2.8 TRATAMENTO TERMICO AÇO DAMASCO

Os tratamentos térmicos são etapas importantes na fabricação do aço damasco, pois permitem desenvolver as propriedades mecânicas desejadas após o processo de caldeamento. A aplicação adequada desses tratamentos contribui para controlar características como dureza, resistência mecânica e tenacidade. A seguir, são apresentados os principais tratamentos térmicos empregados no aço damasco.

2.8.1 Recozimento

Segundo Chiaverini (1986, pg. 244), o recozimento tem como principal objetivo aliviar as tensões internas geradas durante o processo de conformação mecânica, além de reduzir a dureza e aumentar a ductilidade do material. Esse tratamento térmico também busca ajustar o tamanho dos grãos, uniformizar a estrutura metalúrgica e eliminar os efeitos de deformações anteriores resultantes de processos mecânicos ou térmicos previamente aplicados.

Segundo a New Jersey Steel Baron (2024), o aço SAE 1084 é fornecido na condição recozida, apresentando baixa dureza e boa usinabilidade.

Segundo a Maxime Ferrum (2019), o recozimento do aço UHB 15N20 deve ser realizado a aproximadamente 950 °C, com tempo de permanência de 1 hora.

O cuteleiro e também professor de cutelaria Berardo (2018) em seu artigo voltado exclusivamente ao tratamento térmico dos aços mais utilizados na cutelaria artesanal, fala em que o recozimento é o tratamento térmico realizado para remover tensões resultantes do forjamento e diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço. Ainda segundo ele para o aço damasco, liga SAE 1084 com UHB 15N20 recomenda-se um recozimento a 790 °C, com resfriamento ao ar ambiente.

2.8.2 Normalização

Segundo Chiaverini (1986, pg. 245), a normalização é um tratamento térmico semelhante ao recozimento, tanto em seus objetivos quanto nos efeitos obtidos. A principal diferença entre ambos está na forma de resfriamento: enquanto no recozimento o resfriamento ocorre de maneira lenta dentro do forno, na normalização ele é realizado ao ar, de modo mais rápido. Esse resfriamento mais acelerado proporciona uma microestrutura mais fina e homogênea do que a obtida no recozimento, resultando em melhores propriedades mecânicas, como maior resistência e tenacidade. O processo é aplicado principalmente aos aços, visando restabelecer sua estrutura e melhorar o desempenho em usos subsequentes.

Para o aço damasco, Moreno (2019, pg.28) em seu estudo das propriedades mecânicas e estruturais resultante do caldeamento do aço SAE 1095 e UHB 15N20, fez a normalização levando em consideração a temperatura do aço carbono, pois representa a maior parte do aço damasco, utilizando 825 °C permanecendo por 30 minutos, em seguida resfriada ao ar livre.

Segundo a New Jersey Steel Baron (2024), a normalização do aço SAE 1084 é realizada em três ciclos sucessivos de aquecimento, nas temperaturas de 898 °C, 815 °C e 732 °C, com resfriamento ao ar entre cada ciclo.

Segundo a Maxime Ferrum (2019), o recozimento do aço UHB 15N20 deve ser realizado a aproximadamente 950 °C, com tempo de permanência de 1 hora.

Berardo (2018) em seu artigo, fala em uma normalização para o aço damasco, liga SAE 1084 com UHB 15N20 de 860°C, com resfriamento em temperatura ambiente. Ainda segundo Berardo, a normalização visa preparar a lâmina para a têmpera.

2.8.3 Têmpera

Segundo Chiaverini (1986, pg. 245), a têmpera é um dos tratamentos térmicos mais importantes aplicados aos aços, especialmente àqueles empregados em componentes de construção mecânica. As condições de aquecimento são semelhantes às utilizadas no recozimento e na normalização; entretanto, o resfriamento é muito mais rápido, sendo realizado por imersão em meios líquidos, após o aquecimento a temperaturas adequadas.

Ainda segundo o Chiaverini, esse resfriamento brusco provoca transformações estruturais intensas, resultando em um aumento significativo da dureza, da resistência ao desgaste e da resistência à tração. Contudo, ocorre simultaneamente uma redução da ductilidade e da tenacidade, em razão da formação de tensões internas elevadas durante o processo. Essas tensões internas podem ser de duas naturezas principais:

- tensões estruturais, decorrentes das transformações metalúrgicas que ocorrem na estrutura cristalina;
- tensões térmicas, originadas pela diferença de velocidade de resfriamento entre as diversas regiões da peça;

Moreno (2019, pg. 28) em seu estudo utilizou novamente o aço SAE 1095 como base para determinar a temperatura usual para a têmpera, mantendo no forno por 40 min a uma temperatura de 800 °C, após o término do tempo um resfriamento em água com movimento circulares e lentos, para uma têmpera média.

Segundo a New Jersey Steel Baron (2024), a têmpera do aço SAE 1084 deve ser realizada por meio do aquecimento uniforme da peça até aproximadamente 815 °C, seguido de resfriamento rápido em óleo aquecido a cerca de 50 °C. Esse tratamento promove a transformação da austenita em martensita, proporcionando elevada dureza e resistência mecânica ao material.

Segundo a Maxime Ferrum (2019), a têmpera do aço UHB 15N20 deve ser realizada por meio do aquecimento lento e progressivo da peça entre 820 °C e 850 °C, mantendo-se um tempo de permanência mínimo de 1 minuto por milímetro de espessura, seguido de resfriamento em óleo.

Berardo (2018) em seu artigo, fala para um liga de SAE 1084 com UHB 15N20, têmpera de 860 °C, com um resfriamento em óleo de baixa ou média densidade, e a velocidade de resfriamento dependendo conforme o formato e dimensões de cada peça.

2.8.4 Revenimento

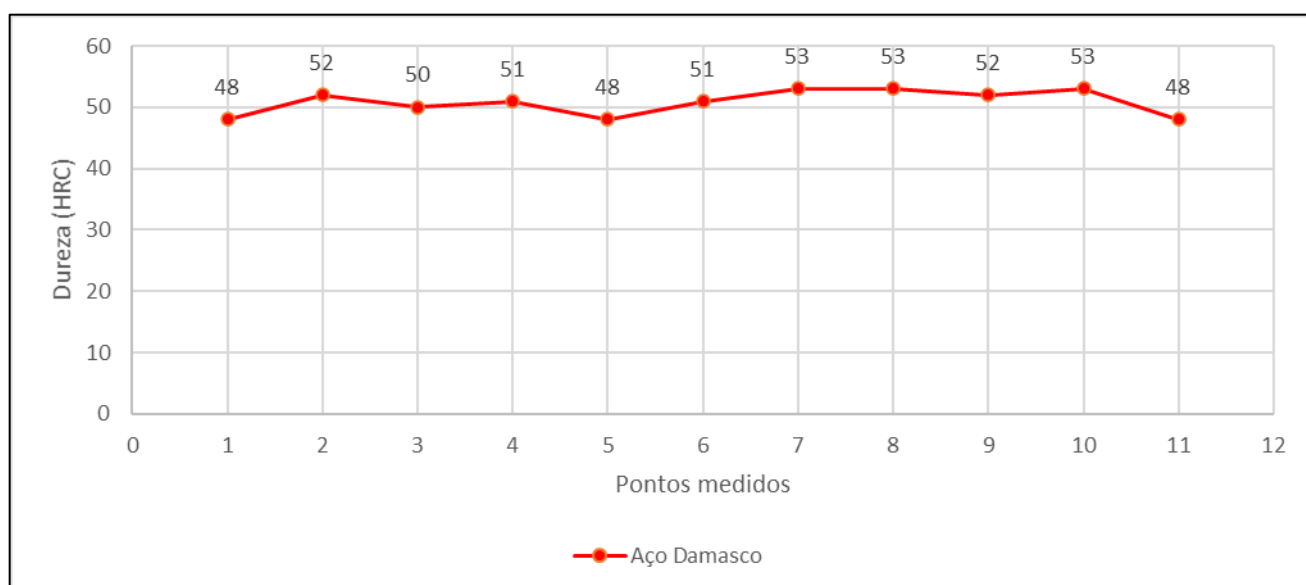
Segundo Chiaverini (1986, pg. 246), o revenido é um tratamento térmico complementar à têmpera, aplicado aos aços temperados com o objetivo de reduzir as tensões internas e restaurar parcialmente a ductilidade do material. O processo é realizado imediatamente após a têmpera, em temperaturas inferiores à zona crítica, o que promove alterações controladas na microestrutura martensítica formada durante o resfriamento brusco.

Chiaverini afirma ainda que a intensidade das transformações estruturais ocorridas durante o revenido depende diretamente da temperatura de tratamento. Em determinadas faixas de temperatura, essas modificações tornam-se tão pronunciadas que certos aços passam a apresentar excelentes condições de usinabilidade, devido à redução controlada da dureza e à homogeneização microestrutural.

Moreno (2019, pg. 28) em seu estudo realizou um revenimento com um ciclo de uma hora com uma temperatura de 200 °C, após o seguiu para resfriamento em temperatura ambiente.

Ainda no estudo de Moreno (2019 pg. 30 e 43) após o revenimento, no ensaio de dureza utilizando o método Rockwell, a leitura realizada no corpo de prova foi feita em 11 pontos com um espaçamento de 5 em 5 mm cada ponto. A dureza média encontrada foi de 50,82 HRC, sendo 53 HRC a maior coletada e 48 HRC a menor. A Figura 11 mostra o gráfico feito por Moreno, na linha em vermelho os dados referentes ao aço damasco.

Figura 11 – Gráfico da distribuição da dureza



Fonte: Adaptado de Moreno (2019).

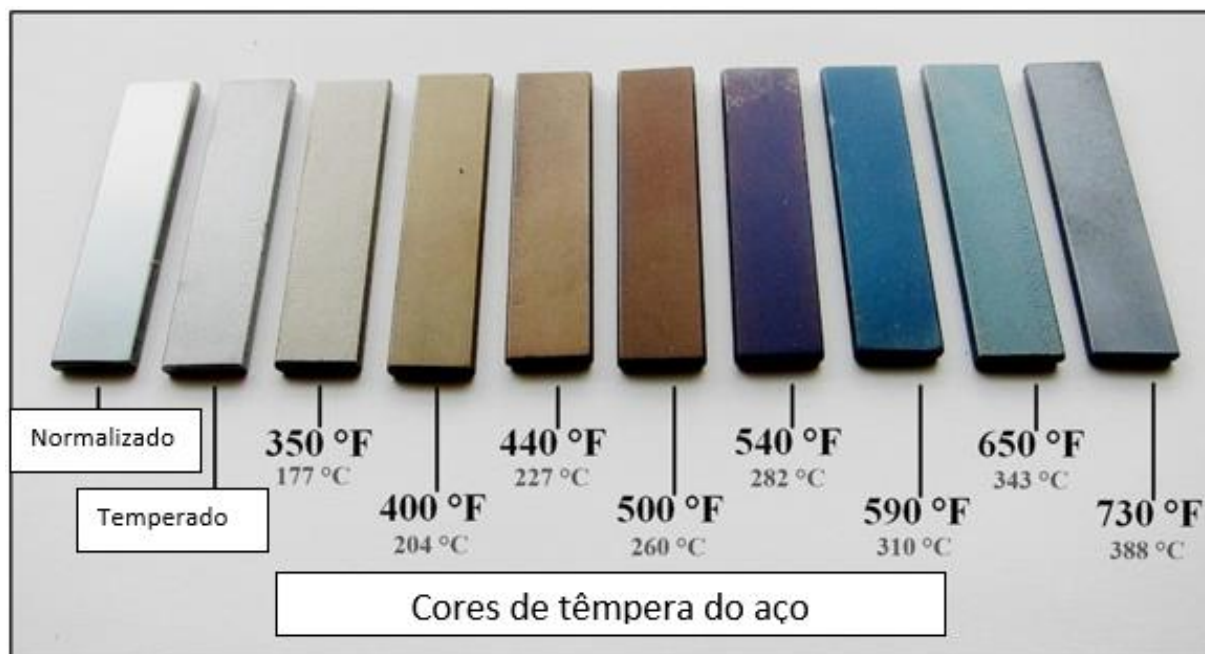
Segundo a New Jersey Steel Baron (2024), o revenimento do aço SAE 1084 deve ser realizado logo após a têmpera, por meio do reaquecimento da peça entre 190 °C e 220 °C durante 2 horas, com resfriamento ao ar. Esse tratamento térmico tem como objetivo reduzir as tensões internas e a fragilidade decorrentes da têmpera, mantendo elevados níveis de dureza e proporcionando melhor equilíbrio entre dureza, resistência mecânica e tenacidade.

Segundo a Maxime Ferrum (2019), o revenimento do aço UHB 15N20 deve ser realizado a aproximadamente 350 °C para peças com espessura de até 6 mm. Após esse tratamento, o material apresenta dureza entre 57 e 59 HRC, proporcionando um melhor equilíbrio entre dureza e tenacidade.

Berardo (2018) fala em seu artigo, para a homogeneização da liga de SAE 1084 e UHB 15N20, em um ciclo de revenimento de uma hora entre uma temperatura de 180 °C e 200 °C após resfriamento em temperatura ambiente. Obteve-se uma dureza Rockwell entre 58 e 60 HRC.

A Figura 12 mostra uma referência, a temperatura de revenimento a partir da coloração exibida pela peça durante o processo, uma vez que cada tonalidade indica uma faixa específica de temperatura.

Figura 12 – Referências de cor do aço nas faixas de temperatura de revenimento



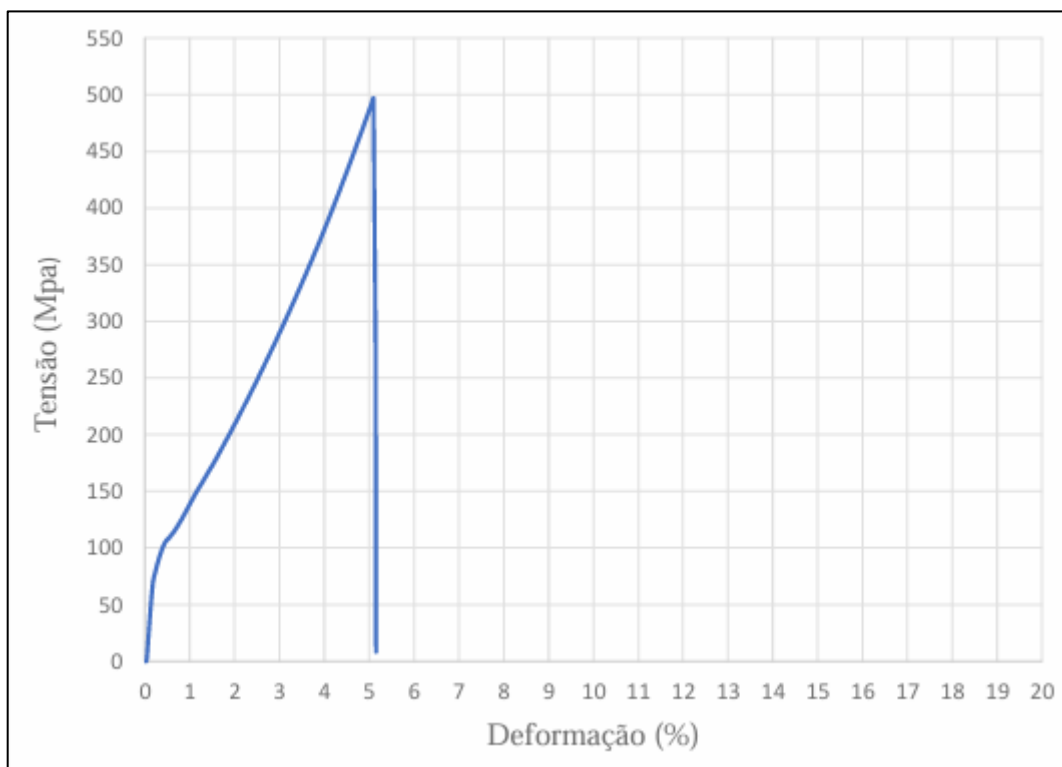
Fonte: Adaptado de Berardo (2018).

2.9 ANÁLISE DE TRAÇÃO

Segundo Souza (1982, pg. 06), considerado um dos métodos mais relevantes para a caracterização mecânica de materiais, o ensaio de tração destaca-se pela facilidade de execução e pela capacidade de gerar resultados reproduzíveis. Nesse procedimento, o corpo de prova é submetido a uma força axial crescente, que provoca seu estiramento até a ruptura. O teste é realizado em corpos de prova padronizados, com dimensões previamente definidas por normas técnicas, possibilitando a comparação dos resultados obtidos e garantindo sua repetibilidade.

Moreno (2019, pg. 45) em seu estudo, realizou ensaio de tração nos corpos de provas de aço damasco. A Figura 13 mostra o gráfico da tensão em função da deformação de um corpo de prova. Ainda segundo o autor, a curva representada é típica de matérias frágeis, pois apresenta uma curva em parte reta, com ruptura brusca e pouco escoamento.

Figura 13 – Gráfico da tensão em função da deformação para o aço damasco



Fonte: Adaptado de Moreno (2019).

No estudo realizado por Moreno (2019), o ensaio de tração do aço damasco apresentou os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 497,08 MPa;
- Limite de escoamento = 490 MPa;

2.10 ANÁLISE DE IMPACTO CHARPY

Segundo CALLISTER e RETHWISCH (2016, pg. 244), o ensaio Charpy com entalhe em “V” é o método mais amplamente empregado nos Estados Unidos. Tanto no ensaio Charpy quanto no Izod, utiliza-se um corpo de prova em forma de barra, com seção transversal quadrada, no qual é confeccionado um entalhe em “V”.

Souza (1982, pg. 83) afirma que o resultado do ensaio representa apenas a energia absorvida pelo material durante o impacto, e por isso, não permite concluir com precisão o comportamento do metal em situações reais de choque. Uma avaliação mais fiel somente seria possível caso a peça completa pudesse ser testada sob condições reais de serviço.

Giopato e Gonçalves (2022, pg. 53) realizaram em seu estudo, ensaios de impacto utilizando o modelo Charpy, para os aços SAE 5160 e UHB 15N20 separadamente e também na liga de damasco composta pelas duas ligas. Os corpos de prova não foram submetidos ao tratamento térmico, somente passaram por um ciclo de normalização. Os Valores dos ensaios podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do ensaio Charpy

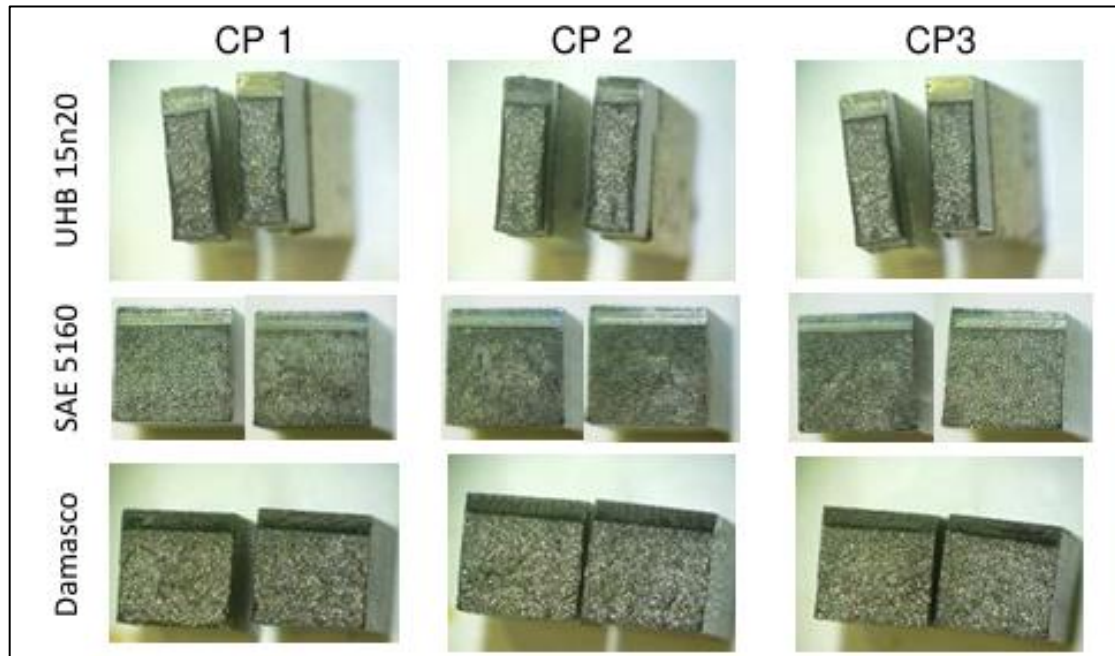
material	corpo de prova	Energia em Joules (J)			dimensão (mm)	expansão lateral (mm)	% deformação do CP	% deformação do material
		energia registrada	energia atrito	energia absorvida				
UHB 15N20	1	8,0	2,8	5,2	3,12	3,38	8,33%	7,37%
	2	7,4	2,8	4,6	3,10	3,28	5,81%	
	3	7,2	2,8	4,4	3,14	3,39	7,96%	
	Média	7,5		4,7				
SAE 5160	1	9,9	2,8	7,1	10,22	10,41	1,86%	1,88%
	2	10,7	2,8	7,9	10,00	10,21	2,10%	
	3	9,2	2,8	6,4	10,10	10,27	1,68%	
	Média	9,9		7,1				
Damasco	1	14,3	2,8	11,5	10,06	10,21	1,49%	1,16%
	2 *	12,0	2,8	9,2	10,10	10,10	0,00%	
	3	14,1	2,8	11,3	10,06	10,26	1,99%	
	Média	13,5		10,7				

Fonte: Adaptado de Giopato e Gonçalves (2022).

Ainda segundo Giopato e Gonçalves, a partir das macrografias apresentadas na Figura 14, observa-se que os corpos de prova de UHB 15N20 possuem a maior área de fratura com característica dúctil, evidenciada pela borda mais escurecida e bem definida. Nas demais

amostras, essa região é menos pronunciada e, no caso do aço damasco, praticamente inexistente, o que se correlaciona com a menor expansão lateral registrada para esses corpos de prova.

Figura 14 – Corpos de prova após ensaio de impacto

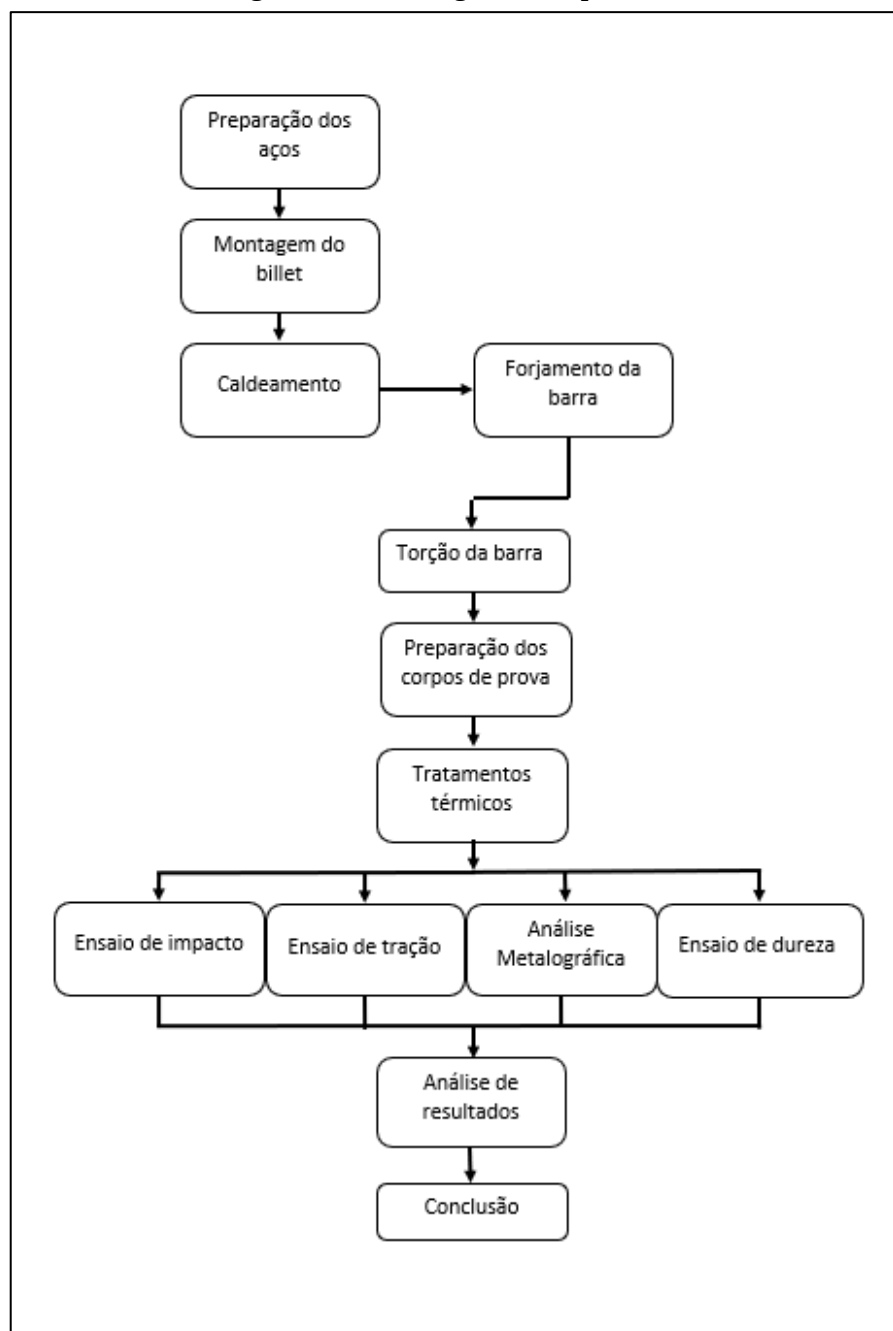


Fonte: Adaptado de Giapato e Gonçalves (2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as etapas experimentais e metodológicas adotadas para o desenvolvimento deste trabalho. O procedimento foi estruturado de forma sequencial, conforme o fluxograma mostrado na Figura 15, garantindo a organização todas as fases do estudo. Cada etapa foi planejada visando assegurar a repetibilidade dos processos e a obtenção de resultados confiáveis, desde a preparação dos materiais até as análises metalográficas e mecânicas.

Figura 15 – Fluxograma do processo



Fonte: Autor (2025).

As execuções práticas das etapas apresentadas no fluxograma foram realizadas sob supervisão do cuteleiro e professor de cutelaria Ismael Biegelmeier, profissional com reconhecida atuação nacional e internacional. Ismael possui certificação Journeyman Smith pela American Bladesmith Society (ABS), uma das instituições mais respeitadas do mundo da cutelaria. Além disso, é certificado Maestro CIC pela Corporazione Italiana Coltellinai, e Mestre Cuteleiro pela Associação Gaúcha de Cutelaria (AGC), títulos atribuídos exclusivamente a profissionais que demonstram elevado nível técnico e domínio nos processos de fabricação.

As atividades práticas foram realizadas na cidade de Feliz – RS, na oficina de Ismael, onde também está instalada a empresa TForce, responsável pela fabricação de máquinas e insumos voltados exclusivamente à cutelaria. O local dispõe da infraestrutura necessária para a execução das etapas do estudo, garantindo condições adequadas para o forjamento, caldeamento e tratamentos térmicos do material.

3.1 PREPARAÇÃO DOS AÇOS E MONTAGEM DO BILLET

Para a produção dos corpos de prova, foram adquiridos juntamente com a empresa TForce os aços já beneficiados para o caldeamento. O *billet* foi composto por lâminas do aço SAE 1084, com dimensões de 40 x 150 x 2,5 mm, e lâminas de aço UHB 15N20, com dimensões de 40 x 150 x 1,5 mm, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Lâminas de aço SAE 1084 e UHB 15N20



Fonte: Autor (2025).

Com o auxílio de uma lixadeira de cinta foi feita uma remoção de possíveis oxidações e impurezas existentes na superfície das lâminas, em ambos os lados. Após isso, os aços foram empilhados de forma intercalada conforme mostra a Figura 17. Foram utilizadas 25 lâminas de cada aço totalizando um *billet* de 40 x 150 x 100 mm.

Figura 17 – Lâminas de aço SAE 1084 e UHB 15N20 intercaladas para formar o *billet*



Fonte: Autor (2025).

Para facilitar durante o caldeamento o *billet* foi soldado, utilizando o processo MIG/MAG, nas extremidades juntamente com uma barra de aço para dar suporte e auxílio durante o aquecimento do *billet* junto à fornalha, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 – *Billet* soldado pronto para o caldeamento



Fonte: Autor (2025).

3.2 CALDEAMENTO

Com o auxílio de uma fornalha a gás, específica para produção de aço damasco, como mostra Figura 19, o equipamento consegue alcançar temperaturas próximas dos 1300 °C.

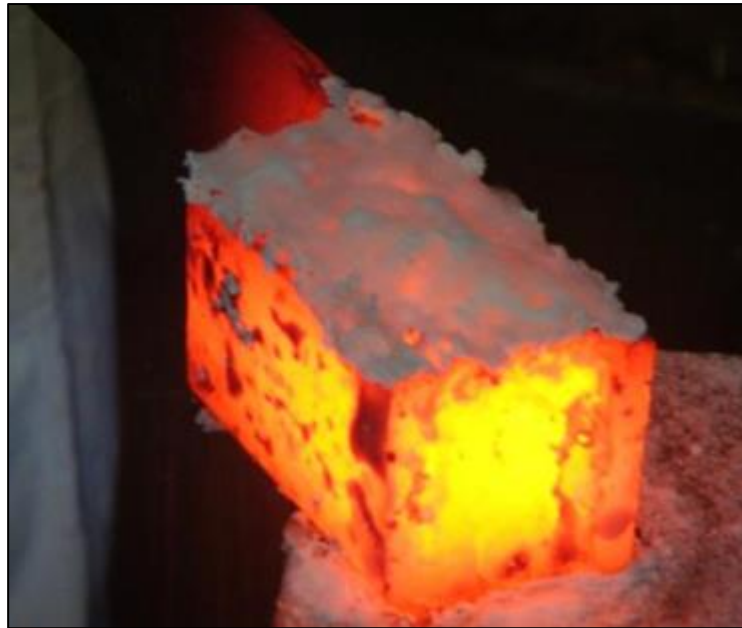
Figura 19 – Fornalha a gás para caldeamento de aço damasco



Fonte: Autor (2025).

Com a fornalha pré aquecida, o *billet* foi aquecido até atingir a temperatura de forjamento, aproximadamente 900 °C, após o *billet* foi retirado da fornalha para ser adicionado o fluxo de solda, como mostra a Figura 20, no caso foi utilizado o bórax, também conhecido como tetraborato de sódio ou borato de sódio. O bórax quando aquecido funde, criando uma camada protetora sobre a superfície do aço, evitando a formação de óxidos de ferro, carepas, que possam comprometer a união.

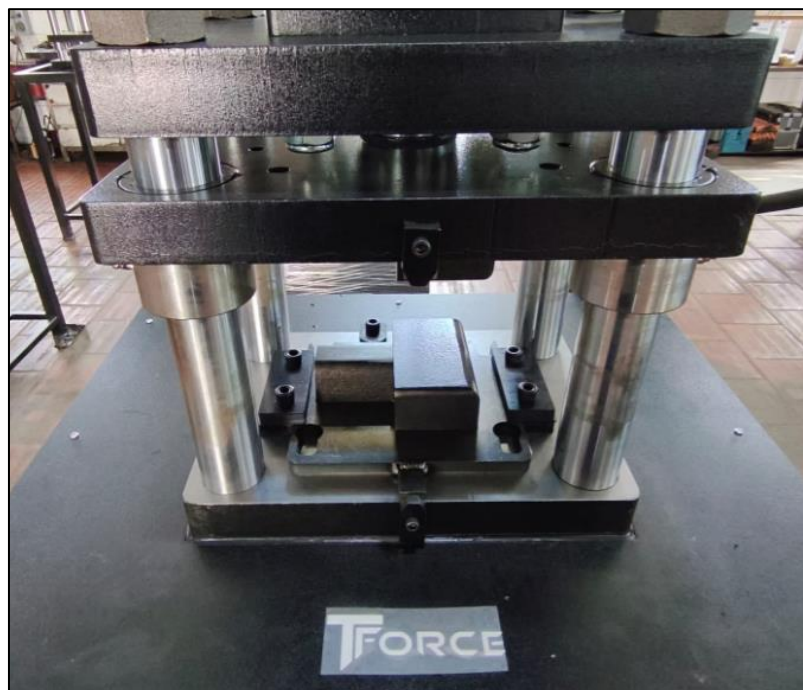
Figura 20 – *Billet* coberto de fluxo de solda



Fonte: Adaptado de PAZINI (2011).

Após ser adicionado o fundente, o *billet* retornou a fornalha, até atingir a temperatura de caldeamento que fica próxima de 1100 °C. Após atingir essa temperatura, com o auxílio de uma prensa hidráulica específica para cutelaria, como mostra a Figura 21, o *billet* foi caldeado utilizando pressão constante de 30 toneladas para unir as camadas, como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Prensa hidráulica para cutelaria



Fonte: Autor (2025).

Figura 22 – *Billet* em processo de caldeamento



Fonte: Autor (2025).

3.3 FORJAMENTO DA BARRA

Com o *billet* já caldeado, iniciou-se o forjamento da barra que, posteriormente, será torcida. Utilizando novamente a prensa hidráulica, o *billet* já consolidado, agora denominado barra, foi deformado até atingir as dimensões 14 x 14 mm, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Forjamento da barra



Fonte: Autor (2025).

Concluído o forjamento da barra, a mesma, foi cortada em 6 pedaços com comprimento de 250 mm, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Forjamento da barra



Fonte: Autor (2025).

3.4 TORÇÃO DA BARRA

Após o corte dos segmentos, as barras foram aquecidas novamente, até atingir a temperatura de forjamento de 900°C. Com o auxílio de um torcedor mecânico, equipamento específico para a finalidade, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Torcedor de barra



Fonte: Autor (2025).

Para avaliar a influência da intensidade de torção na formação do padrão e no comportamento mecânico do aço damasco, as barras foram divididas em dois grupos experimentais. No primeiro grupo, três barras foram torcidas 50 voltas ao longo do seu eixo longitudinal, enquanto no segundo grupo, as outras três barras receberam 40 voltas, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Barras torcidas



Fonte: Autor (2025).

3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a conclusão da torção, as barras foram encaminhadas ao Laboratório de Ensaio e Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul (LAMEC/UCS), local onde foram realizados os procedimentos de preparação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos e metalográficos.

Inicialmente, cada barra foi identificada conforme o grupo experimental definido na etapa anterior (40 ou 50 voltas), garantindo rastreabilidade durante todo o processo. A Figura 27 mostra os corpos de provas finalizados.

Figura 27 – Amostras após preparação



Fonte: Autor (2026).

3.5.1 Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração, foram confeccionados seis corpos de prova, sendo três provenientes do grupo submetido a 40 voltas e três do grupo com 50 voltas, permitindo a comparação entre as condições experimentais.

O segmento destinado segue os requisitos da norma ABNT NBR ISO 6892-1, que estabelece os procedimentos para a realização de ensaios de tração em materiais metálicos. Essa norma define parâmetros como geometria do corpo de prova, velocidade de aplicação da carga e condições de alinhamento, garantindo que o ensaio seja realizado de forma padronizada e reprodutível.

Os ensaios de tração foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios Emic DL20000, equipada com célula de carga TRD-12. Os ensaios foram conduzidos conforme

o método "Relatório – Tração Cilíndrico 20T", utilizando o software Tesc, versão 3.01, com velocidade de ensaio de 8,0 mm/min.

A deformação dos corpos de prova não foi medida por extensômetro durante o ensaio. O alongamento foi determinado posteriormente por meio da medição do comprimento final dos corpos de prova utilizando um paquímetro com certificado de calibração recente.

No contexto deste trabalho, o ensaio de tração teve como finalidade verificar como o processo de caldeamento e o grau de torção aplicado às barras influenciam o comportamento mecânico do aço damasco.

3.5.2 Ensaio de Impacto

Para o ensaio de impacto Charpy foram extraídos seis corpos de prova, distribuídos igualmente entre os grupos, sendo três correspondentes às amostras com 40 voltas e três às amostras com 50 voltas.

O segmento destinado a essa análise segue os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 148-1, que especifica o formato do corpo de prova, as dimensões do entalhe e o procedimento de ensaio.

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados, utilizando uma máquina de ensaio de impacto da marca Webstoffprüfmaschine, número de série 423/3, certificada sob o nº 199 576-101. O equipamento possuía energia máxima de impacto de 294 J, perda por atrito avaliada em 0,76 J, raio do cutelo de 8 mm. Os ensaios foram realizados em corpos de prova com entalhe do tipo V, sendo registrada a energia absorvida por cada corpo de prova no momento da fratura.

Buscou-se neste ensaio identificar se as variações no processo de caldeamento e conformação resultam em alterações significativas na tenacidade do aço damasco.

3.5.3 Análise Metalográfica

Para a análise metalográfica, foi extraído um segmento representativo de cada grupo experimental (40 e 50 voltas), com o objetivo de avaliar a integridade da soldagem entre as camadas de SAE 1084 e UHB 15N20. Esses segmentos foram preparados na seção transversal e na seção longitudinal. Os segmentos seguiram os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 17639, que define os requisitos para o exame macroscópico e microscópico de juntas soldadas. Essa análise permitiu identificar possíveis descontinuidades decorrentes do

processo de caldeamento, como delaminações, falta de fusão, inclusões e presença de óxidos entre as camadas. Além de verificar a interface metalúrgica entre os aços, a micrografia contribuiu para correlacionar a qualidade da soldagem com o desempenho mecânico obtido nos ensaios de tração e impacto.

3.5.4 Ensaio de Dureza

Para o ensaio de dureza, foi extraído um segmento representativo de cada grupo experimental (40 e 50 volts), o procedimento seguiu as diretrizes da norma NBR NM ISO 6508-1:2008, que estabelece os requisitos para medição de dureza.

Os ensaios de dureza Rockwell C foram realizados utilizando um durômetro Rockwell modelo RBS-MA, da marca Panambra, número de série 1305, certificado sob o nº 11015/25 – CAL 9202. As medições de dureza foram realizadas ao longo da seção longitudinal dos corpos de prova, com espaçamento aproximado de 4 mm entre os pontos de medição, sendo efetuadas cinco medições em cada amostra.

3.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para a realização dos tratamentos térmicos, foi utilizado um forno de temperatura controlada, específico para uso em cutelaria, o que garante precisão no controle de aquecimento e estabilidade térmica durante o processo, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Forno de temperatura controlada



Fonte: Autor (2025).

Os corpos de prova foram submetidos às etapas de normalização, têmpera e revenimento seguindo os parâmetros estabelecidos, assegurando repetibilidade e uniformidade das condições de tratamento.

3.6.1 Normalização

Para a etapa de normalização, os corpos de prova foram aquecidos até 835 °C, permanecendo nessa temperatura por 15 minutos para garantir a completa homogeneização da microestrutura. Após o tempo, as amostras foram resfriadas ao ar em temperatura ambiente, permitindo o refinamento dos grãos e a redução de tensões residuais provenientes do processo de forjamento.

3.6.2 Têmpera

Para o processo de têmpera, os corpos de prova foram aquecidos até 780 °C, mantendo-se nessa temperatura por 15 minutos para assegurar a completa austenitização do material. Em seguida, as amostras foram resfriadas em óleo Ktalo 20 RF, específico para cutelaria, promovendo o resfriamento rápido necessário para a formação da martensita, estrutura responsável pelo aumento da dureza do aço após o tratamento térmico.

3.6.3 Revenimento

Para o processo de revenimento, foi realizado um ciclo onde os corpos de prova foram aquecidos até 200 °C, permanecendo nessa condição por 1 hora. Essa etapa tem como finalidade aliviar as tensões internas geradas durante a têmpera, aumentando a tenacidade do material enquanto mantém níveis adequados de dureza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e na análise metalográfica realizados nas amostras. Os resultados são discutidos de forma integrada, buscando correlacionar a qualidade da união com o comportamento mecânico do material produzido.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Antes da realização do ensaio de tração, foi necessário repetir os tratamentos térmicos aplicados aos corpos de prova. Inicialmente, durante o processo de usinagem realizado pelo LAMEC, ocorreu um equívoco na fabricação dos corpos de prova, não sendo executadas as roscas nas extremidades necessárias para a fixação na máquina de ensaio. Em função disso, os corpos de prova foram submetidos novamente a um ciclo de recozimento, com o objetivo de reduzir a dureza do material e possibilitar a usinagem das roscas.

Após a correção do processo de usinagem, os corpos de prova passaram novamente pelos tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento, buscando restabelecer as condições metalúrgicas originalmente previstas para a realização do ensaio de tração.

Posteriormente à reaplicação dos tratamentos térmicos, os corpos de prova foram reencaminhados ao laboratório para a realização do ensaio de tração. Inicialmente, foi executado um primeiro ensaio utilizando um corpo de prova pertencente à amostra 1. Entretanto, os resultados obtidos apresentaram comportamento incompatível com as características esperadas para o material analisado.

Diante dessa situação, e seguindo as recomendações do responsável técnico do laboratório, verificou-se a necessidade de melhorar o acabamento superficial e a uniformidade dimensional dos corpos de prova. Para isso, as amostras foram encaminhadas a uma empresa terceirizada, onde foi realizado o processo de retífica das superfícies usinadas, buscando garantir melhores condições para a execução do ensaio.

Além disso, durante a etapa de usinagem corretiva, ocorreu uma segunda falha no processo interno do laboratório, resultando na quebra de um dos corpos de prova pertencentes à amostra submetida a 50 voltas. Dessa forma, permaneceram válidos para a execução do ensaio de tração um total de quatro corpos de prova, sendo dois pertencentes à amostra com 40 voltas e dois à amostra com 50 voltas.

O ensaio de tração foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência mecânica do aço damasco após o processo de fabricação e tratamentos térmicos aplicados. Os ensaios foram conduzidos conforme a norma NBR ISO 6892-1, utilizando velocidade de ensaio de 8 mm/min. Os resultados obtidos para tensão de escoamento e tensão máxima estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados Ensaio de Tração

Corpo de Prova	Área (mm²)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
1.1 (50 voltas)	49,3	547	581
1.2 (50 voltas)	45,2	512	547
2.1 40 (voltas)	43,8	161	190
2.2 (40 voltas)	42,7	655	691

Fonte: Autor (2026).

Os resultados obtidos apresentaram significativa variação entre os corpos de prova analisados. Parte das amostras apresentou elevados valores de resistência mecânica, com tensões máximas entre aproximadamente 547 MPa e 691 MPa, indicando comportamento compatível com estruturas endurecidas após tratamento térmico, similares as informações citadas na literatura, New Jersey Steel Baron (2024), apontando para o aço SAE 1084 e Maxime Ferrum (2019), para o UHB 15N20.

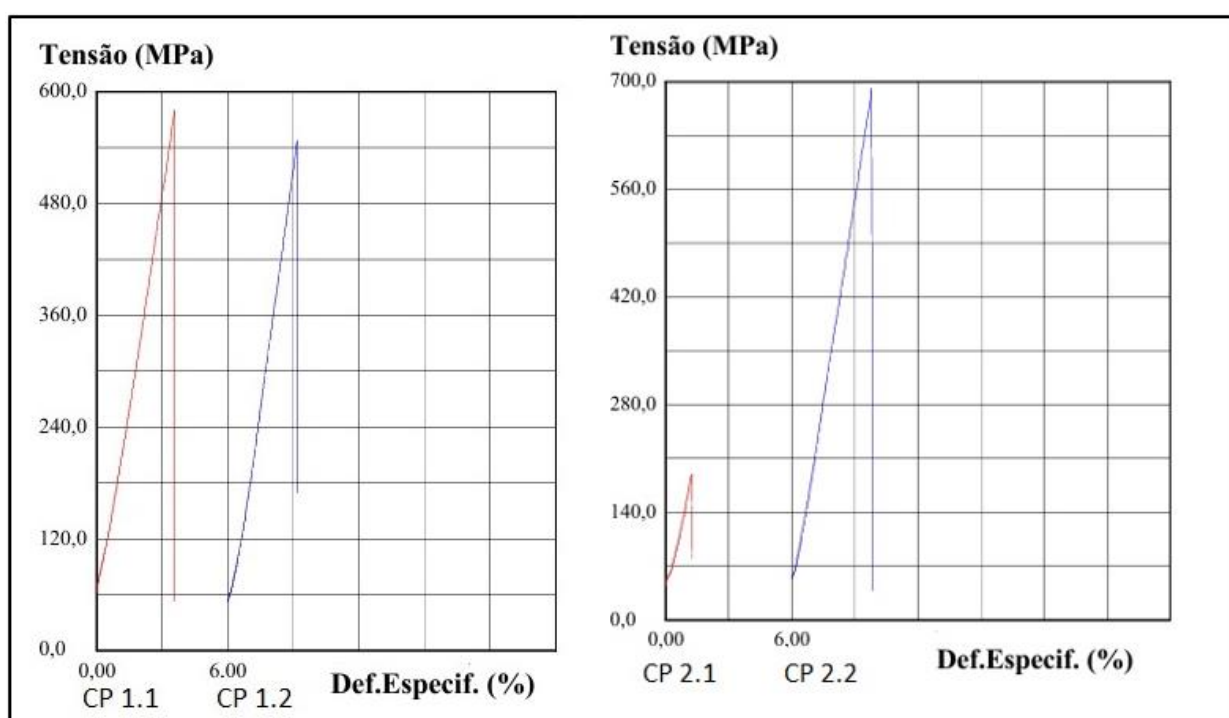
Entretanto, um corpo de prova das amostras com 40 voltas, apresentou valores significativamente inferiores, como observado no corpo de prova 2.1, que apresentou tensão máxima de 190 MPa. Essa diferença indica que o material não apresentou comportamento uniforme ao longo da amostra analisada.

Essa variação nos resultados pode estar associada às descontinuidades observadas na análise metalográfica, localizadas na interface entre as camadas do aço damasco. Na literatura, descontinuidades desse tipo são descritas como concentradores de tensão, favorecendo a iniciação e a propagação de trincas durante o carregamento mecânico (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Esse comportamento é compatível com a ruptura prematura observada em um dos corpos de prova durante o ensaio de tração.

As Figuras 29 apresenta as curvas tensão em função da deformação obtidas durante os ensaios de tração realizados nos corpos de prova das amostras submetidas a 40 e 50 voltas.

Nas amostras com 50 voltas, os corpos de prova 1.1 e 1.2 apresentaram comportamento semelhante, com crescimento contínuo da tensão até a ruptura, atingindo valores máximos próximos entre si. Já nas amostras com 40 voltas, observa-se maior diferença entre as curvas obtidas. O corpo de prova 2.2 apresentou maior capacidade de suportar carregamento, enquanto o corpo de prova 2.1 apresentou ruptura prematura, com tensão significativamente inferior.

Figura 29 – Gráfico ensaio de tração (CP 1.1 e 1.2 amostras 50 voltas) (CP 2.1 e 2.2 amostras 40 voltas)



Fonte: Adaptado de relatório LAMEC 00329/26 (2026).

De modo geral, as curvas obtidas indicam comportamento típico de materiais submetidos a tratamentos térmicos de endurecimento, apresentando elevada resistência mecânica e reduzida capacidade de deformação antes da ruptura. (CHIAVERINI,1986).

Na superfície de ruptura do corpo de prova 2.1 do ensaio de tração, apresentada na Figura 30, observa-se a presença de uma trinca superficial e pequenas separações localizadas entre camadas, indicando possível delaminação pontual na interface do material. Esse comportamento apresenta relação direta com as discontinuidades identificadas posteriormente na análise metalográfica, reforçando a influência da integridade da união soldada sobre o desempenho mecânico do aço damasco produzido.

Figura 30 – Superfície de fratura do corpo de prova submetido ao ensaio de tração



Fonte: Autor (2026).

Esse corpo de prova apresentou ruptura próxima à região do raio de concordância, diferentemente das demais amostras, que romperam predominantemente na região útil. Esse comportamento pode estar relacionado à concentração de tensões nessa região durante o ensaio de tração, favorecendo o início da fratura.

4.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

O ensaio de impacto Charpy foi realizado com o objetivo de avaliar a tenacidade do material após o processo de fabricação e tratamento térmico. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Observa-se que, para as amostras 1 submetidas a 50 voltas, os três corpos de prova apresentaram valores idênticos de energia absorvida, iguais a 2,9 J, resultando em resistência ao impacto de aproximadamente 4 J/cm². Esse comportamento indica uma boa repetibilidade dos resultados para essa condição.

Para as amostras 2 com 40 voltas, dois corpos de prova também apresentaram energia absorvida de 2,9 J, enquanto um dos corpos de prova apresentou valor inferior, de 2,0 J, resultando em resistência ao impacto de 2 J/cm². Essa diferença sugere uma variação no material ou possíveis descontinuidades localizadas.

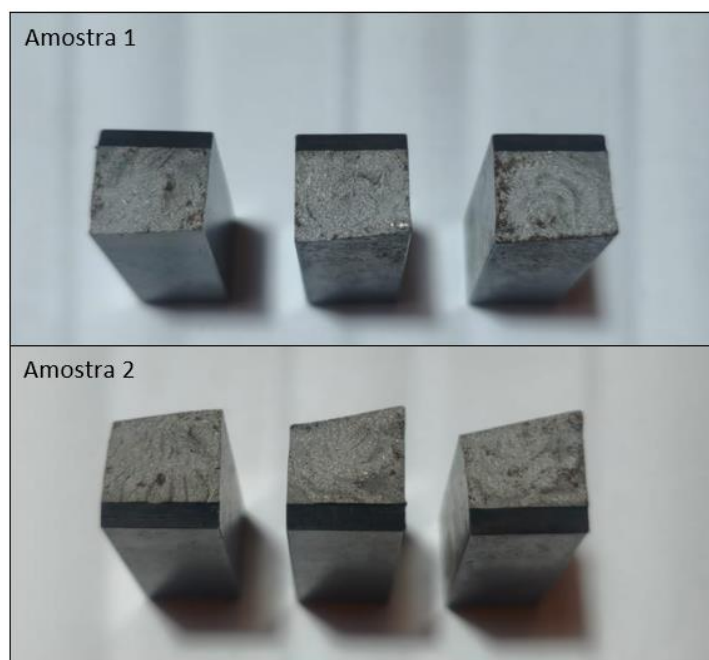
Tabela 5 – Resultados Ensaio de Impacto Charpy

Amostra	Área (cm ²)	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto (J/cm ²)
1.1	0,806	2,9	3,60
1.2	0,808	2,9	3,59
1.3	0,804	2,9	3,61
2.1	0,807	2,9	3,59
2.2	0,805	2,9	3,60
2.3	0,804	2	2,49

Fonte: Autor (2026).

A Figura 31 apresenta as superfícies de fratura dos corpos de prova após o ensaio de impacto Charpy. Observa-se que as superfícies de fratura apresentaram reduzida deformação plástica, reforçando o comportamento predominantemente frágil do material. Não foram observadas evidências significativas de deformação lateral, resultado compatível com os baixos valores de energia absorvida registrados durante o ensaio.

Figura 31 – Superfície de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de impacto Charpy



Fonte: Autor (2026).

Os resultados indicam baixa capacidade de absorção de energia durante o impacto, evidenciada pelas energias absorvidas entre 2,0 e 2,9 J. Além disso, as superfícies de fratura apresentaram pouca deformação plástica, indicando comportamento predominantemente frágil do material. Esse comportamento pode estar associado à elevada dureza obtida após os tratamentos térmicos, bem como à presença de descontinuidades observadas na análise metalográfica, como inclusões e falhas localizadas na interface entre as camadas.

4.3 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado com o objetivo de avaliar a dureza das amostras após os tratamentos térmicos. As medições de dureza foram realizadas ao longo da seção longitudinal dos corpos de prova, com espaçamento aproximado de 4 mm entre os pontos de medição, seguindo séries de cinco medições para cada amostra. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados Ensaio de Dureza

Amostra	Medidas (HRC)					Média (HRC)
	1	2	3	4	5	
1	63	60	60	59	60	60,4
1	60	60	60	60	60	60
1	59	60	59	59	59	59,2
2	61	65	60	60	61	61,4
2	61	61	61	61	60	60,8
2	61	61	62	61	60	61

Fonte: Autor (2026).

Os valores de dureza obtidos apresentaram médias próximas de 60 HRC para a condição com 50 voltas e 61 HRC para a condição com 40 voltas, indicando elevada dureza em ambas as condições analisadas. Esses valores estão associados a uma maior resistência ao desgaste, característica desejável para aplicações em cutelaria artesanal, principalmente devido à maior capacidade de manutenção do fio de corte.

Com o objetivo de verificar se as diferenças observadas entre as duas condições eram estatisticamente significativas, os resultados foram submetidos à análise estatística. Inicialmente, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk indicou que os dados não apresentavam distribuição normal ($p < 0,001$). Dessa forma, foi empregado o teste não paramétrico de Mann-

Whitney para comparação entre as amostras. A análise indicou diferença estatisticamente significativa entre as condições avaliadas ($U = 32,0$; $p < 0,001$).

Embora a análise estatística tenha indicado diferença significativa, observa-se que a diferença entre as médias foi de aproximadamente 1 HRC. Assim, do ponto de vista prático, ambas as condições apresentaram comportamento semelhante quanto à dureza, indicando que o aumento da intensidade de torção exerceu influência limitada nessa propriedade.

Com o objetivo de complementar a avaliação da dureza global obtida pelo ensaio Rockwell C, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers. Para cada condição analisada (40 e 50 voltas), foram realizadas cinco medições nas camadas correspondentes ao aço SAE 1084 e cinco medições nas camadas de UHB 15N20, totalizando dez medições por amostra. Embora o ensaio tenha sido realizado em microdureza Vickers, os resultados foram convertidos para a escala Rockwell C (HRC), visando facilitar a comparação com os resultados do ensaio de dureza Rockwell apresentados anteriormente no trabalho. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers convertidos para dureza Rockwell C (HRC)

Medidas (HRC) Amostra 50 voltas						
Aço	1	2	3	4	5	Média
SAE 1084	60	58,8	59,6	59,6	59,4	59,48
UHB 15N20	63,7	64,6	65,5	64,7	64,6	64,62
Medidas (HRC) Amostra 40 voltas						
Aço	1	2	3	4	5	Média
SAE 1084	60,9	60,2	60,4	60,9	60,9	60,66
UHB 15N20	63,1	63,7	64,3	64,5	63,9	63,9

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que, em ambas as condições analisadas, as camadas correspondentes ao aço UHB 15N20 apresentaram valores médios de dureza superiores aos obtidos para o aço SAE 1084. Na amostra submetida a 50 voltas, as médias foram de 59,48 HRC para o SAE 1084 e 64,62 HRC para o UHB 15N20. Já na amostra com 40 voltas, foram obtidas médias de 60,66 HRC para o SAE 1084 e 63,90 HRC para o UHB 15N20. Esses resultados demonstram que o ensaio de microdureza permitiu diferenciar individualmente a dureza das camadas que compõem o aço damasco, informação que não pode ser obtida pelo ensaio Rockwell C convencional.

Nota-se que os valores obtidos no ensaio de microdureza diferem daqueles obtidos pelo ensaio Rockwell C. Essa diferença é esperada, uma vez que o ensaio Rockwell fornece uma medida da dureza global do aço damasco, cuja impressão pode abranger simultaneamente camadas de SAE 1084 e UHB 15N20. Por outro lado, o ensaio de microdureza Vickers possibilita a realização de impressões de pequenas dimensões, permitindo avaliar individualmente cada material. Dessa forma, foi possível identificar que o aço UHB 15N20 apresentou dureza superior à do SAE 1084 em ambas as condições analisadas, informação que não pode ser obtida pelo ensaio Rockwell C convencional.

Entretanto, os valores obtidos ficaram acima da faixa normalmente utilizada para facas artesanais de aço damasco, geralmente entre 56 e 58 HRC. Essa condição indica que os tratamentos térmicos aplicados resultaram em um material com elevada dureza, porém com redução da tenacidade.

Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos nos ensaios de impacto Charpy e de tração, nos quais foi observado comportamento predominantemente frágil. A elevada dureza obtida sugere a formação de uma microestrutura predominantemente martensítica após a têmpera, característica normalmente associada ao aumento da resistência mecânica e da fragilidade do material (NEW JERSEY STEEL BARON, 2024).

De maneira geral, os resultados demonstram que o processo de fabricação e os tratamentos térmicos empregados foram eficientes para obtenção de elevada dureza. Entretanto, os valores obtidos indicam que ajustes nos parâmetros de tratamento térmico podem ser realizados visando obter melhor equilíbrio entre dureza, resistência mecânica e tenacidade.

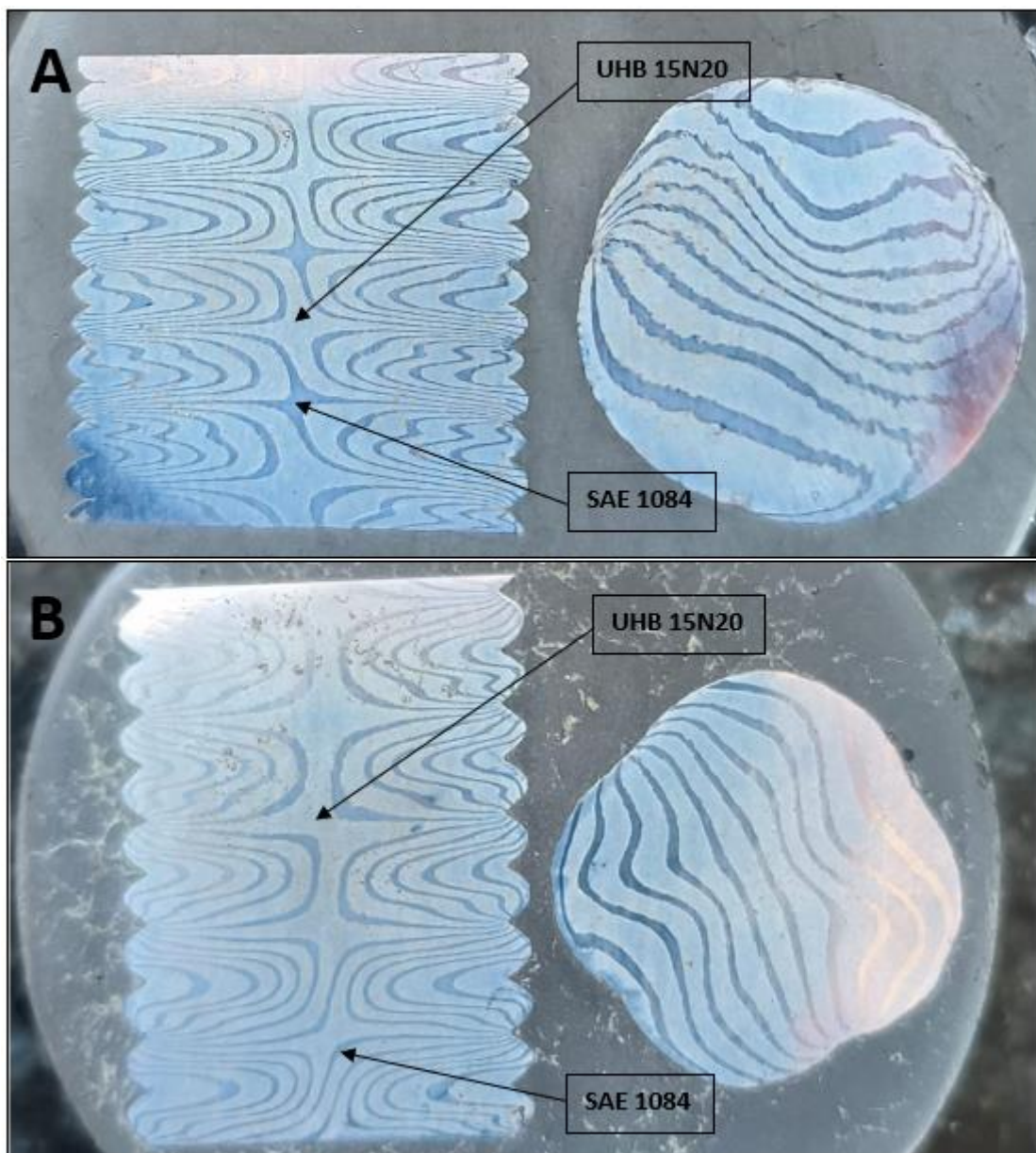
4.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

A análise metalográfica foi realizada com o objetivo de avaliar a integridade da união entre as camadas e a microestrutura resultante do processo de fabricação do aço damasco. Foram analisadas amostras representativas dos grupos experimentais, em seções transversal e longitudinal, permitindo observar tanto a distribuição das camadas quanto os efeitos da deformação plástica imposta durante o forjamento e a torção.

Antes da análise metalográfica, foi realizada uma avaliação macroscópica das amostras após o preparo metalográfico e o ataque químico. A Figura 32 apresenta o aspecto macroscópico das amostras 1 (50 voltas) e 2 (40 voltas), nas seções longitudinal e transversal, evidenciando a distribuição das camadas formada durante o processo de fabricação do aço

damasco. Essa avaliação fornece uma visão geral da disposição das camadas e serve como referência para a interpretação das micrografias apresentadas na sequência. As setas indicam a identificação das camadas correspondentes aos aços SAE 1084 e UHB 15N20.

Figura 32 – Aspecto macroscópico das amostras após o preparo metalográfico e ataque químico. (A) Amostra 1 (50 voltas) e (B) Amostra 2 (40 voltas)

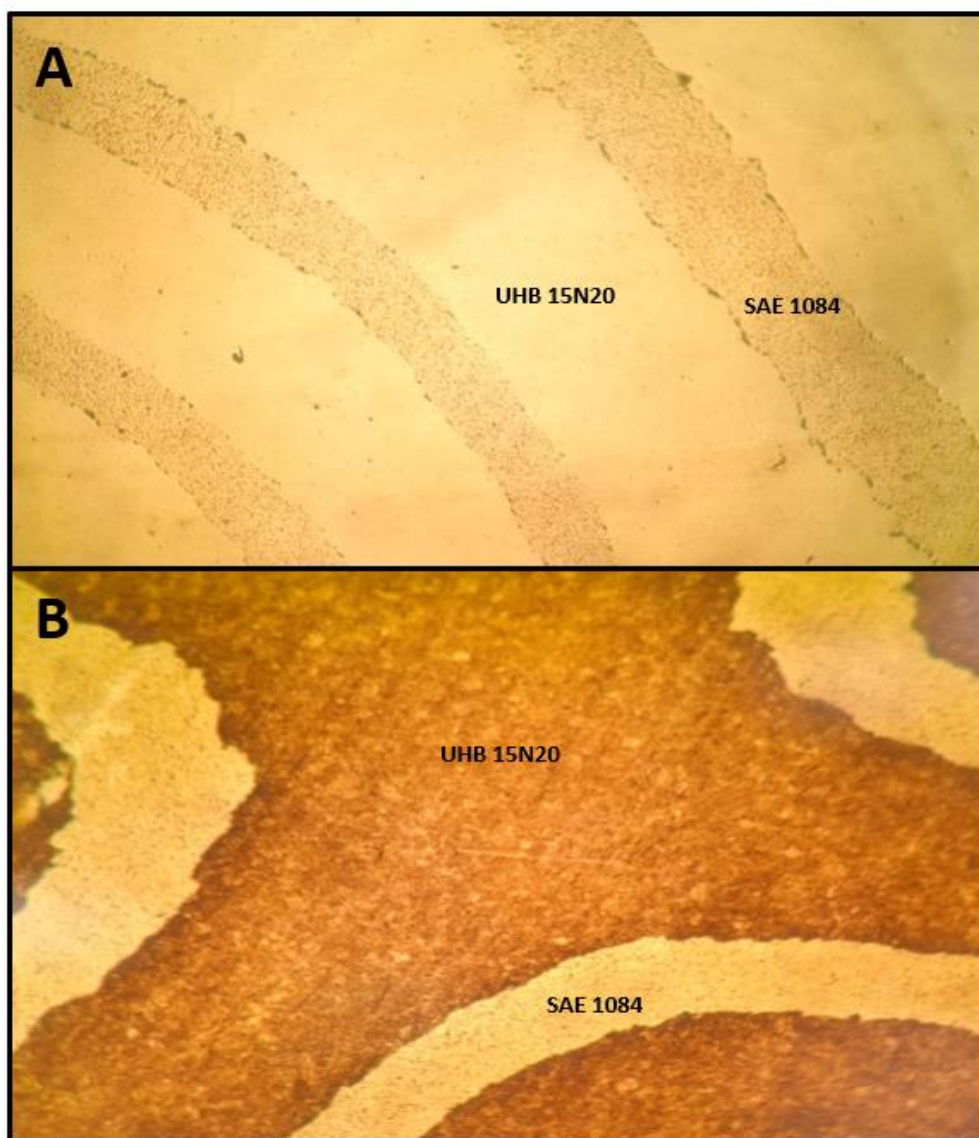


Fonte: Autor (2026).

Também antes da realização da análise metalográfica, foram realizados ensaios de identificação das camadas utilizando diferentes reagentes metalográficos. Inicialmente, foi aplicado ataque químico com Nital durante aproximadamente 2 segundos, observando-se que o reagente atacou preferencialmente o aço SAE 1084, permitindo sua identificação na estrutura do aço damasco. Em seguida, foi realizado um segundo ataque utilizando o reagente Vilella,

que apresentou ataque preferencial ao aço UHB 15N20, possibilitando confirmar a identificação das camadas presentes no material. A utilização dos dois reagentes permitiu identificar com maior confiabilidade a distribuição dos aços SAE 1084 e UHB 15N20 antes da análise microscópica. A Figura 33 apresenta o comportamento do material após os ataques.

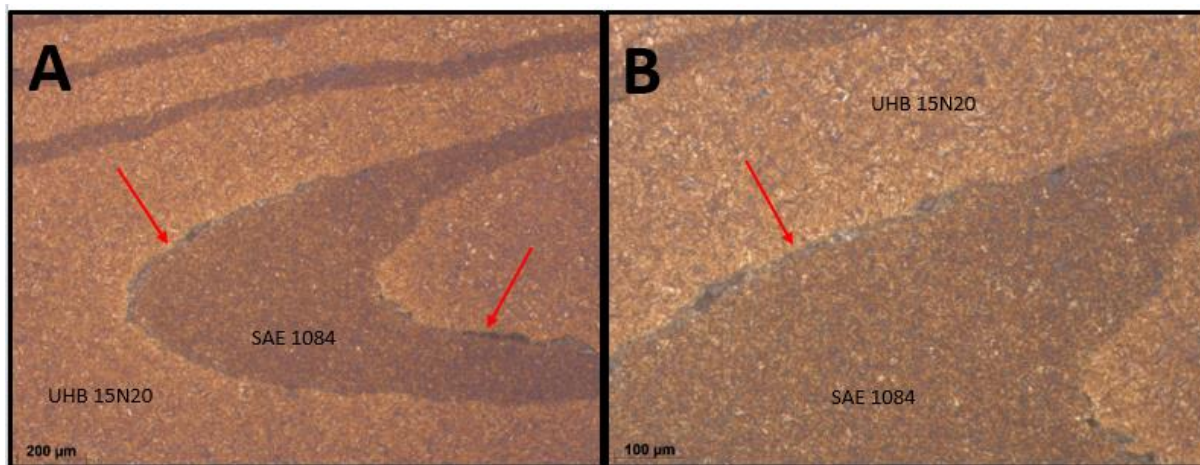
Figura 33 – Identificação dos aços por meio de ataques químicos. (A) Ataque com Nital (B) Ataque com Vilella, ampliação de 50x



Fonte: Autor (2026).

A Figura 34 apresenta as micrografias da seção longitudinal da amostra submetida a 50 voltas, evidenciando a interface entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20. Observa-se o alongamento das camadas ao longo da direção de deformação, comportamento característico do processo de torção aplicado durante a fabricação do aço damasco.

Figura 34 – Micrografias da seção longitudinal da amostra com 50 voltas em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x



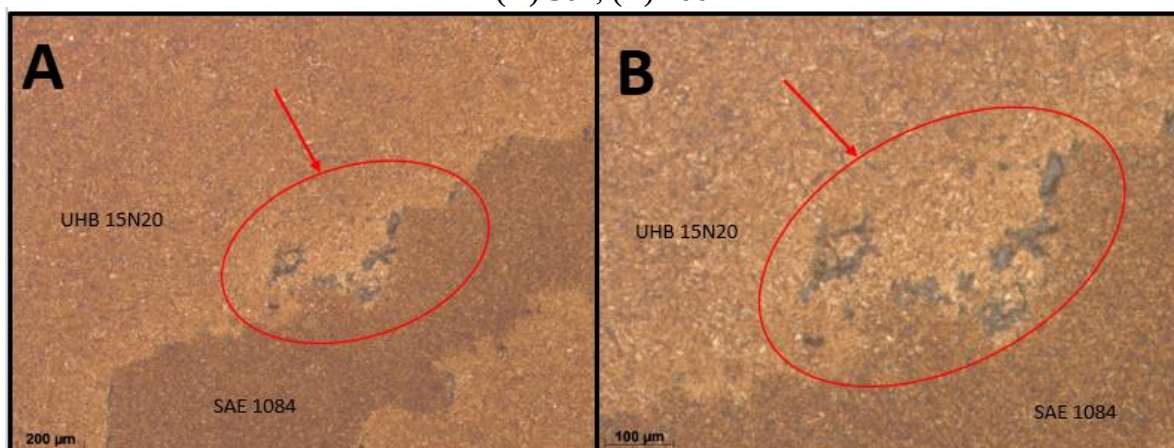
Fonte: Autor (2026).

As regiões indicadas pelas setas evidenciam descontinuidades localizadas na interface entre os materiais, sugerindo possíveis falhas de união durante o processo de caldeamento. Quando comparadas às observadas na amostra submetida a 40 voltas, essas descontinuidades apresentam aspecto mais linear e concentrado em regiões específicas da interface.

Essas descontinuidades podem estar associadas ao aprisionamento de óxidos ou inclusões formadas durante o aquecimento e forjamento do material. Além disso, observa-se maior deformação das camadas e maior propagação de defeitos ao longo da interface quando comparado à amostra submetida a 40 voltas.

A Figura 35 apresenta as micrografias da seção transversal da amostra submetida a 50 voltas. Observa-se a distribuição das camadas do aço damasco e a presença de regiões com descontinuidades concentradas próximas à interface entre os materiais.

Figura 35 – Micrografias da seção transversal da amostra com 50 voltas em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x



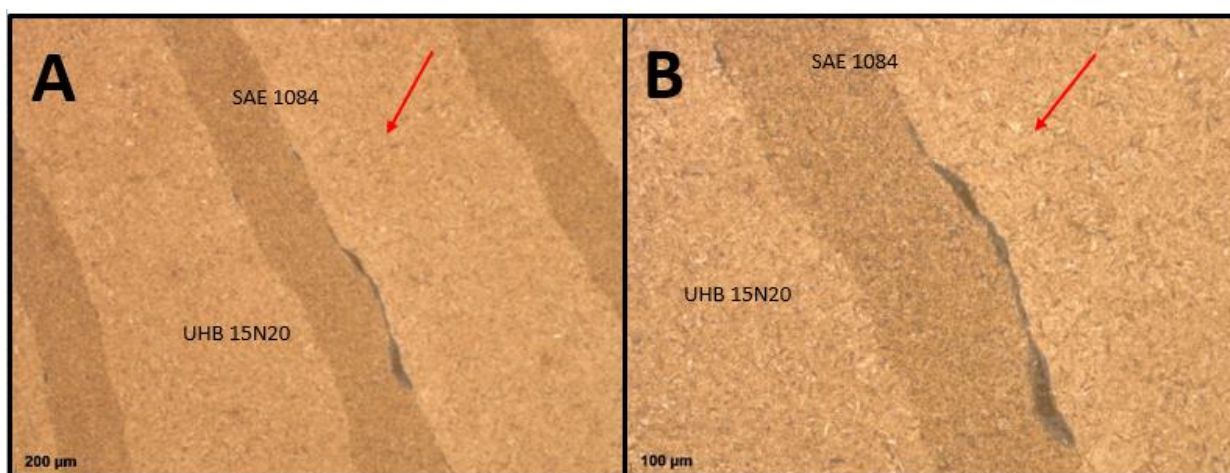
Fonte: Autor (2026).

As áreas destacadas evidenciam possíveis inclusões e regiões de união incompleta entre as camadas, indicando que o processo de caldeamento não ocorreu de maneira totalmente homogênea em determinados pontos do material. Essas descontinuidades podem atuar como concentradores de tensão e favorecer o início da fratura. Entretanto, o comportamento predominantemente frágil observado nos ensaios mecânicos também está relacionado à elevada dureza obtida após os tratamentos térmicos, indicando que ambos os fatores contribuíram para o desempenho do material. Especialmente nos ensaios de tração e impacto, nos quais foram observadas rupturas prematuras e baixa capacidade de absorção de energia.

A Figura 36 apresenta as micrografias da seção longitudinal da amostra submetida a 40 volts, evidenciando a interface entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20. Observa-se o alinhamento das camadas ao longo da direção de deformação, com menor intensidade de deformação quando comparada à amostra submetida a 50 volts.

Da mesma forma, as regiões indicadas pelas setas evidenciam descontinuidades localizadas na interface entre os materiais, sugerindo possíveis falhas pontuais de união durante o processo de caldeamento. Entretanto, essas descontinuidades apresentam aspecto mais linear e localizado, indicando menor propagação de defeitos ao longo das camadas.

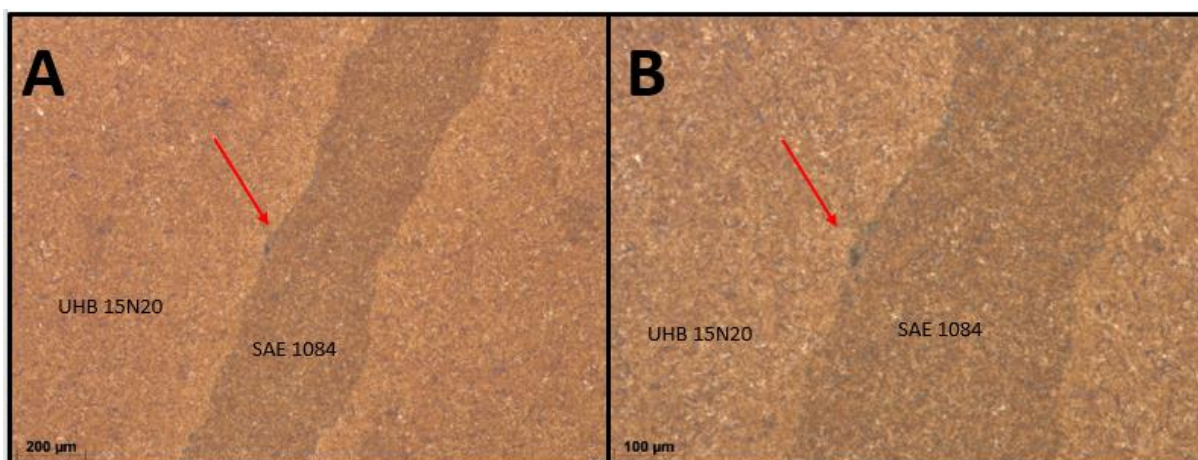
Figura 36 – Micrografias da seção longitudinal da amostra com 40 volts em duas ampliações: (A) 50x, (B) 100x



Fonte: Autor (2026).

A Figura 37 apresenta as micrografias da seção transversal da amostra submetida a 40 volts. Observa-se a distribuição das camadas do aço damasco e a presença de pequenas descontinuidades concentradas próximas à interface entre os materiais.

Figura 37 – Micrografias da seção transversal da amostra com 40 voltas em duas ampliações:
(A) 50x, (B) 100x



Fonte: Autor (2026).

A micrografia revela a presença de irregularidades localizadas na região de interface entre as camadas. Entretanto, não foram realizadas medições quantitativas das descontinuidades, de modo que a comparação entre as amostras se baseia apenas na avaliação visual das micrografias obtidas.

De maneira geral, a análise metalográfica confirmou a formação das camadas características do aço damasco e evidenciou a presença de descontinuidades localizadas nas interfaces em ambas as condições analisadas. Embora a amostra com 50 voltas tenha apresentado, visualmente, maior propagação dessas descontinuidades, os ensaios mecânicos não indicaram diferenças significativas entre as duas condições. Assim, os resultados sugerem que a presença de descontinuidades e a elevada dureza obtida após os tratamentos térmicos contribuíram, em conjunto, para o comportamento predominantemente frágil observado no material.

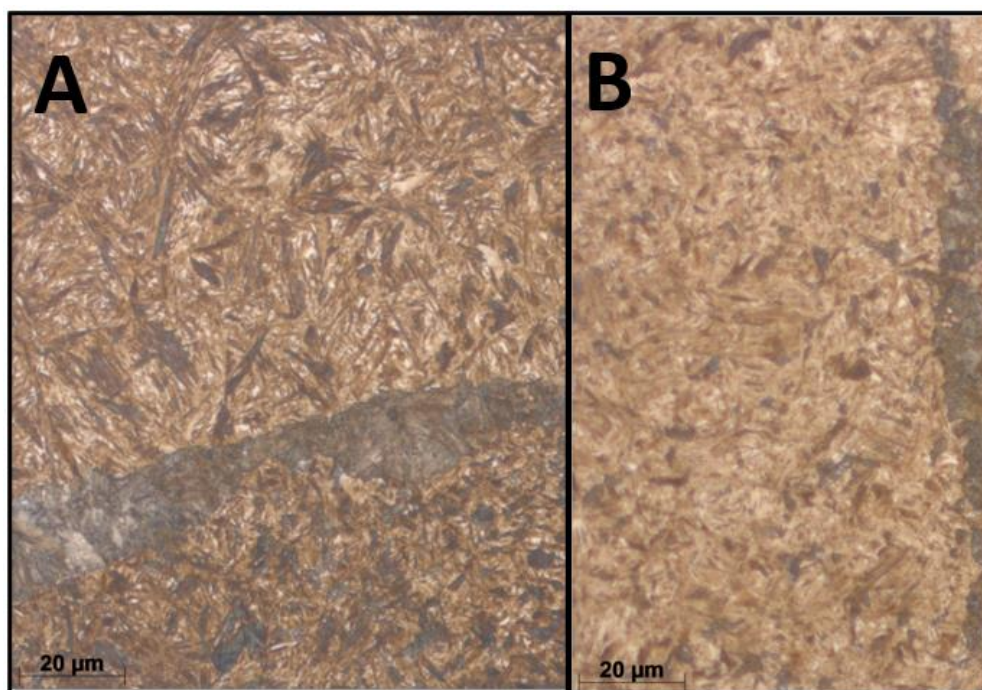
Analisando o efeito do número de voltas sobre a deformação das camadas, observa-se que as duas condições apresentam diferenças visuais na geometria das camadas e na interface entre os aços. Na amostra submetida a 50 voltas, as camadas apresentam aspecto visual compatível com uma maior deformação decorrente do processo de torção. Entretanto, essa avaliação é qualitativa, uma vez que não foram realizadas medições da espessura das camadas ou da deformação durante a análise metalográfica.

A Figura 38 apresenta a comparação das microestruturas observadas nas amostras submetidas a 50 voltas (A) e 40 voltas (B), obtidas na seção longitudinal com aumento de 500x. Em ambas as condições experimentais observa-se uma microestrutura predominantemente

acicular, compatível com martensita revenida e perlita, além de austenita retida, formada após os tratamentos térmicos aplicados. A presença dessas microestruturas está diretamente relacionada aos elevados valores de dureza obtidos nos ensaios Rockwell C, próximos de 60 HRC.

Figura 38 – Comparação da microestrutura das amostras, (A) 50 voltas e (B) 40 voltas.

Ampliação de 500x



Fonte: Autor (2026).

Visualmente, observa-se uma pequena diferença no aspecto da microestrutura entre as amostras analisadas. Entretanto, não foram realizadas medições de tamanho de grão ou análises quantitativas que permitam confirmar diferenças microestruturais significativas entre as condições estudadas. Dessa forma, a avaliação realizada limita-se à análise qualitativa das micrografias obtidas.

Considerando os resultados dos ensaios realizados, as diferenças observadas no comportamento mecânico não parecem estar associadas à formação de microestruturas distintas, mas principalmente à presença de descontinuidades localizadas na interface entre os materiais, identificadas durante a análise metalográfica. Esses resultados reforçam que a integridade da união obtida por caldeamento exerce influência significativa sobre o desempenho mecânico do aço damasco produzido.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da intensidade de torção na integridade da interface soldada por caldeamento entre os aços SAE 1084 e UHB 15N20 na produção de aço damasco em padrão torcido, correlacionando a integridade das interfaces com o comportamento mecânico do material produzido. Com base nos ensaios mecânicos e na análise metalográfica, foi possível atingir esse objetivo, verificando que o processo de caldeamento promoveu a união entre os materiais e a formação das camadas características do aço damasco, embora tenham sido identificadas descontinuidades localizadas na interface de união.

A análise metalográfica evidenciou que as interfaces entre as camadas apresentaram, em sua maior parte, boa continuidade, porém com a presença de inclusões e regiões de união incompleta em pontos específicos. A utilização dos reagentes Nital e Vilella permitiu identificar individualmente as camadas correspondentes aos aços SAE 1084 e UHB 15N20, proporcionando maior confiabilidade na interpretação das micrografias. Além disso, a avaliação macroscópica complementou a caracterização do material, permitindo visualizar a distribuição das camadas nas seções longitudinal e transversal antes da análise microscópica.

Os ensaios mecânicos demonstraram que o material apresentou elevada dureza e comportamento predominantemente frágil. No ensaio de impacto Charpy foram obtidos baixos valores de energia absorvida quando comparados aos resultados encontrados na literatura para aços damasco produzidos com combinação semelhante, indicando reduzida tenacidade após os tratamentos térmicos aplicados. Os ensaios de tração apresentaram comportamento compatível com materiais endurecidos, com baixa deformação plástica antes da ruptura.

O ensaio de dureza Rockwell C indicou dureza global próxima de 60 HRC em ambas as condições avaliadas. A análise estatística mostrou diferença significativa entre as médias das amostras, embora essa diferença tenha sido pequena do ponto de vista prático. Complementando essa avaliação, o ensaio de microdureza Vickers permitiu determinar individualmente a dureza das camadas de SAE 1084 e UHB 15N20, evidenciando valores superiores para o aço UHB 15N20 em ambas as condições analisadas. Os resultados da microdureza demonstraram a limitação do ensaio Rockwell C para materiais multicamadas, uma vez que este fornece uma medida global da dureza do conjunto, enquanto a microdureza possibilita avaliar separadamente cada material constituinte do aço damasco.

A comparação entre as amostras submetidas a 40 e 50 voltas mostrou que ambas apresentaram comportamento mecânico semelhante. Embora tenham sido observadas diferenças qualitativas na deformação das camadas durante a análise metalográfica, não foram realizadas medições quantitativas das descontinuidades, impossibilitando afirmar que o aumento da intensidade de torção promoveu maior ocorrência de defeitos ou alteração significativa nas propriedades mecânicas do material.

Dessa forma, conclui-se que o processo de fabricação empregado foi eficiente para produzir aço damasco utilizando os aços SAE 1084 e UHB 15N20, obtendo boa união metalúrgica na maior parte das interfaces e elevada dureza após os tratamentos térmicos. Entretanto, a presença de descontinuidades localizadas e a elevada dureza contribuíram para o comportamento predominantemente frágil observado nos ensaios mecânicos. Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre o comportamento dessa combinação de aços e fornecem subsídios para a otimização dos parâmetros de fabricação e dos tratamentos térmicos aplicados à produção de aço damasco.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas durante o desenvolvimento deste trabalho, são propostas as seguintes sugestões para estudos futuros:

- Influência dos parâmetros de tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço damasco SAE 1084/UHB 15N20.
- Influência de diferentes padrões de deformação na integridade da união por caldeamento.
- Estudo comparativo entre diferentes combinações de aços aplicadas à produção de aço damasco.

REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL BRASIL. **Catálogo guia do aço. Brasil**: ArcelorMittal, [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-guia-aco.pdf>. Acesso em: 18 set. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – referências – elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.
- BERARDO, Eduardo Ceneviva. **Tratamento térmico – tabelas de composição química e tratamento térmico dos aços mais utilizados na cutelaria custom**. Berardo Facas Custom, 2018. Disponível em: <https://berardofacascustom.blogspot.com/p/tabelas.html>
- CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill / Pearson Education do Brasil, 1986.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill / Pearson Education do Brasil, 1986.
- DIAS, F. A. **Propriedades mecânicas da liga de aço damasco SAE 1075 + UHB 15n20**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS). Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/578>. Acesso em: 19 set. 2025.
- DUSTRE, Messias. **Aço damasco: como é feito e suas características**. Dustre, 2024. Disponível em: <https://dustre.com.br/aco-damasco>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- GIOPATO, Hubert Richard Voss; GONÇALVES, Edivaldo Ananias. **Aço damasco de aços SAE 5160 e UHB 15N20: uma avaliação comparativa das propriedades mecânicas entre o aço damasco e seus componentes**. 2022. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC Itaquera “Prof. Miguel Reale”, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.maximeferrum.com.br/images/artigos/TCC-Aco-Damasco.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2025.
- KREUTZ, Gabriel Alan; IZQUIERDO, Rafael Crespo. **Análise comparativa entre as propriedades mecânicas obtidas no aço damasco e nos aços bases SAE 1095 + UHB 15N20**. Destaques Acadêmicos, Lajeado, v. 14, n. 4, p. 7-18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v14i4a2022.3203>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- LIMA, Yago Leite. **Estudo comparativo da união de metais através da soldagem por fricção, utilizando o torno mecânico**. 2017. 50 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/b443c326-3d6b-40d2-b554-c31e08c6f0f7/content>. Acesso: 05 out. 2025.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. 1. ed. Porto Alegre, 1996.

MAXIME FERRUM. **AÇO 15n20**. (2019). Disponível em: <https://maximeferrum.com.br/aplicacoes/MF-15N20.pdf> Acesso: 20 set. 2025.

MORENO, Anderson Marinho. **Estudo das propriedades mecânicas e estruturais do aço damasco resultante do caldeamento do aço SAE 1095 e UHB 15N20**. 2019. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/1125> Acesso: 22 ago. 2025.

MOTTA, Daniel da Silva; FERREIRA, Antônio José Mendonça; REZENDE, Raphael Felix. **Caracterização de juntas dissimilares soldadas por fricção utilizando uma fresadora ferramenteira**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 10 a 12 de maio de 2010, Salvador – BA. Disponível em: http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1559/1/Artigo%20Técnico_DANIEL%20DA%20SILVA%20MOTTA%3BANTÔNIO%20JOSÉ%20MENDONÇA%20FERREIRA%3B RAPHAEL%20FELIX%20REZENDE_PRETENDENTE.pdf Acesso: 05 out. 2025.

NEMTSEV, Alex. **Kas ir Wootz tērauds? Izcelsme, īpašības un mūsdienu pielietojums**, [O que é o aço Wootz? Origem, propriedades e usos modernos]. Noblie Custom Knives, 2025. Disponível em: <https://nobliescustomknives.com/lv/what-is-wootz-steel/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

NEW JERSEY STEEL BARON. **1084 Heat Treating**. Hawthorne, NJ, 2024.

NOBLIE. **Damascus steel patterns**. Disponível em: <https://www.noblies.eu> Acesso em: 31 ago. 2025.

PAHL, Hendrik. **Material science of historical blades such as rapiers, sabres and swords: Damascus and Toledo steel**. Battle Merchant, 2024. Disponível em: <https://www.battlemerchant.com/en/blog/material-science-of-historical-blades-such-as-rapiers-sabres-and-swords-damascus-and-toledo-steel>. Acesso em: 23 ago. 2025.

PAZINI, Henrico. **Propriedades mecânicas da liga de aço damasco SAE 5160 + UHB 15N20**. 2012. 47 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), Panambi, 2012. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/4da49af4-de71-4425-accb-14b40342b264>. Acesso em: 20 ago. 2025.

QUITARSKI, Ariel José; SANTOS, Bruna; SINCAK, Carlos Henrique; ALVES, Valtair de Jesus. **Análise da aplicação do método de soldagem por fricção em um torno mecânico convencional**. 4ª Semana Internacional de Engenharia FAHOR, 5 a 7 de novembro de 2014, Horizontina – RS. Disponível em: https://fahor.com.br/publicacoes/sief/2014/Analise_da_aplicacao_do_metodo_de.pdf

SOUZA, Sergio. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5º Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

THOMAS, Larrin. **Is 1084-15N20 the Best Pattern Welded Damascus?** KnifeSteelNerds, 2025. Disponível em: <https://knifesteelnerds.com/2025/02/12/is-1084-15n20-the-best-pattern-welded-damascus/>. Acesso em 19 set. 2025.

THOMAS, Larrin. **Does Damascus Outperform Super Steels? Testing Different Combinations**, 2023. Disponível em: <https://knifestealnerds.com/2023/07/13/does-damascus-outperform-super-steels-testing-different-combinations/> . Acesso em 08 out. 2025.