



Gabriela Castro

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PERFIS TUBULARES EM AÇO SAE 4130 SOLDADOS PELO PROCESSO
MAG**

Horizontina - RS

2024

Gabriela Castro

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PERFIS TUBULARES EM AÇO SAE 4130 SOLDADOS PELO PROCESSO
MAG**

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

2024

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

**“Análise da microestrutura e propriedades mecânicas de perfis tubulares em
aço SAE 4130 soldados pelo processo MAG”**

Elaborada por:
Gabriela Castro

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

Aprovado em: 03/12/2024
Pela Comissão Examinadora

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

Prof. Me. Eduardo Moos
Faculdade Horizontina (FAHOR)

Prof. Dr. William Lemos Bevilaqua
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Horizontina - RS
2024

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

RESUMO

O uso de aços de alta resistência mecânica tem se expandido, especialmente em aplicações que exigem elevado limite de resistência e boa soldabilidade para atender as demandas de aplicações, como por exemplo no chassi de veículos off-road. Neste contexto, o aço SAE 4130 apresenta potencial para substituir aços carbono convencionais e consequentemente tornar possível a redução de peso devido às suas propriedades mecânicas superiores. O objetivo deste trabalho foi investigar a influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas de tubos de aço SAE 4130 soldados pelo processo de soldagem MAG (Metal Active Gas), visando otimizar o desempenho do veículo off-road Baja Sinuelo. As amostras foram soldadas pelo processo MAG sem pré-aquecimento, com pré-aquecimento a 250 °C e com pré-aquecimento a 500 °C. Após o processo de soldagem, as amostras foram analisadas por meio de análise química, macrografia, micrografia, dureza e ensaio de flexão. A análise química revelou um teor de carbono de 0,25%, abaixo do intervalo especificado pela norma SAE 4130 (0,28% a 0,30%), o que foi confirmado pela micrografia, que indicou a formação de uma camada ferrítica na superfície com espessura de 415,5 µm e dureza de 159 HV_{0,3} a 0,05 mm. Além disso, a presença de martensita, ferrita e perlita nas zonas de transição entre a zona afetada pelo calor (ZTA) e o material depositado indicou que temperaturas mais altas favorecem a homogeneidade microestrutural e a ductilidade. Os resultados mostraram que a amostra pré-aquecida a 250 °C apresentou uma dureza média de 334 HV_{0,3}, com uma força máxima de 14,5 kN, tensão de flexão de 177,5 MPa e energia absorvida de 229,5 J na força máxima. Quando comparado as condições investigadas, verifica-se que o uso da temperatura de pré-aquecimento de 250 °C é a temperatura ideal para garantir a qualidade das juntas soldadas do aço SAE 4130, e viabilizar seu uso para aplicações no chassi de veículos off-road do tipo Baja SAE.

Palavras-chave: Aço SAE 4130. Pré-Aquecimento. Soldagem MAG. Microestrutura. Zona Termicamente Afetada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeto 4x4 Sinuelo VIII da Equipe Baja Sinuelo FAHOR	12
Figura 2 – Veículo exposto a cargas dinâmicas durante um teste de impacto.....	18
Figura 3 – Diagrama de fases Fe-C	21
Figura 4 – Influência do gás de proteção na geometria do cordão de solda	26
Figura 5 – Modos de transferência metálica em função dos parâmetros de soldagem	27
Figura 6 – Diagrama de Graville para estimativa da soldabilidade dos aços em função do teor de carbono e da porcentagem de carbono equivalente	29
Figura 7 – Ilustração esquemática de perfis de solda inadequados.....	32
Figura 8 – Desenho esquemático do ensaio de flexão simples.....	33
Figura 9 – Fluxograma detalhando as etapas de fabricação e caracterização das amostras.....	35
Figura 10 – Ilustração esquemática dos corpos de prova utilizados para ensaios mecânicos e metalográficos	38
Figura 11 – Procedimento utilizado para monitorar o controle de temperatura de pré-aquecimento das amostras	39
Figura 12 – Macrografias das amostras soldadas: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C. (Ampliação de 6,7X)	42
Figura 13 – (a) Interface entre a solda e a ZTA; (b) Ponto de referência para o início do perfil	44
Figura 14 – Ilustração do sentido do perfil de microdureza na Solda.....	45
Figura 15 – Sentido da força aplicada no ensaio de flexão	45
Figura 16 – Ilustração do procedimento utilizado para o ensaio de flexão.....	45
Figura 17 – Macrografias das amostras soldadas: (a, b) sem pré-aquecimento; (c, d) com pré-aquecimento à 250 °C; (e, f) com pré-aquecimento à 500 °C. (Ampliação de 6,7X, e ataque com Nital 2,5%).....	47
Figura 18 – Resultados da determinação dos parâmetros geométricos do cordão de solda.....	48
Figura 19 – (a) Micrografia da superfície do metal base ampliada em 50x (b) micrografia ampliada em 200x	49

Figura 20 – Metal de base (a) Micrografia do núcleo ampliada em 50X, (b) micrografia do núcleo ampliada em 200X.....	51
Figura 21 – Micrografias das Amostras de Aço SAE 4130 soldadas: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C (Ampliação de 50X).....	52
Figura 22 – Micrografias das Amostras de Aço SAE 4130 na ZTA: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C (Ampliação de 200X).....	54
Figura 23 – Micrografias do metal solda depositado no Aço SAE 4130 soldadas: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C (Ampliação de 200X)	56
Figura 24 – Resultados de dureza na ZTA.....	59
Figura 25 – Resultados de dureza do metal de solda	60
Figura 26 – Resultados obtidos no ensaio de flexão das amostras sem pré-aquecimento.....	61
Figura 27 – Amostras sem pré-aquecimento após o ensaio: (a) Vista superior da amostra; (b) Vista frontal da amostra	61
Figura 28 – Resultados obtidos no ensaio de flexão das amostras com pré-aquecimento de 250 °C.....	62
Figura 29 – Amostras com pré-aquecimento de 250 °C após o ensaio: (a) Vista superior da amostra; (b) Vista frontal da amostra	62
Figura 30 – Resultados obtidos no ensaio de flexão das amostras com pré-aquecimento de 500 °C.....	63
Figura 31 – Amostras com pré-aquecimento de 500 °C após o ensaio: (a) Vista superior da amostra; (b) Vista frontal da amostra	63
Figura 32 – Força máxima suportada pelas amostras no ensaio de flexão	64
Figura 33 – Tensão máxima obtida pelas amostras no ensaio de flexão	65
Figura 34 – Energia obtida pelas amostras no ensaio de flexão	66
Figura 35 – Microdureza e identificação dos pontos de medição no material base. .	73
Figura 36 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da ZTA das amostras sem pré-aquecimento: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2.....	74
Figura 37 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da solda das amostras sem pré-aquecimento: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2	75

Figura 38 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da ZTA das amostras com pré-aquecimento de 250 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2	76
Figura 39 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da solda das amostras com pré-aquecimento à 250 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2	77
Figura 40 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da ZTA das amostras com pré-aquecimento à 500 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2	78
Figura 41 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da solda das amostras com pré-aquecimento à 500 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Carbono equivalente versus temperatura de pré-aquecimento	31
Tabela 2 – Composição química do aço SAE 4130	37
Tabela 3 – Parâmetros do processo utilizados nos corpos de prova	40
Tabela 4 – Composição química do arame AWS ER70S-6	41
Tabela 5 – Dureza na Zona Termicamente Afetada (ZTA)	58
Tabela 6 – Dureza do metal de solda.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA	13
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	OBJETIVOS	15
1.5.1	Objetivo geral	15
1.5.2	Objetivos específicos.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA.....	17
2.1.1	Processos de fabricação e rotas de processamento	18
2.1.2	Microestrutura e propriedades mecânicas	20
2.1.3	Soldabilidade dos aços SAE 4130	21
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM MAG.....	22
2.2.1	Parâmetros operacionais.....	23
2.2.2	Consumíveis para soldagem.....	24
2.2.3	Modos de transferência metálica.....	26
2.3	CARBONO EQUIVALENTE VERSUS TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO	27
2.4	CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM MAG	31
2.5	ENSAIOS DE FLEXÃO EM PERFIS TUBULARES.....	32
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1	MATERIAL	35
3.2	PROCEDIMENTOS USADOS NA FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS	36
3.3	PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	38
3.3.1	Pré-aquecimento	39
3.3.2	Parâmetros de soldagem e consumíveis	39
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	40
3.4.1	Análise metalográfica	41
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.5.1	Medição de Dureza	41
3.5.2	Ensaio de Flexão	44
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4.1	ENSAIOS METALOGRAFICOS	46
4.1.1	Macrografia	46
4.1.2	Micrografia	48
4.2	ENSAIOS MECÂNICOS.....	55
4.2.1	Dureza	55
4.2.2	Ensaio de Flexão	60
	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICE – GRÁFICOS E TABELAS COM RESULTADOS DE MICRODUREZA.....	73

1 INTRODUÇÃO

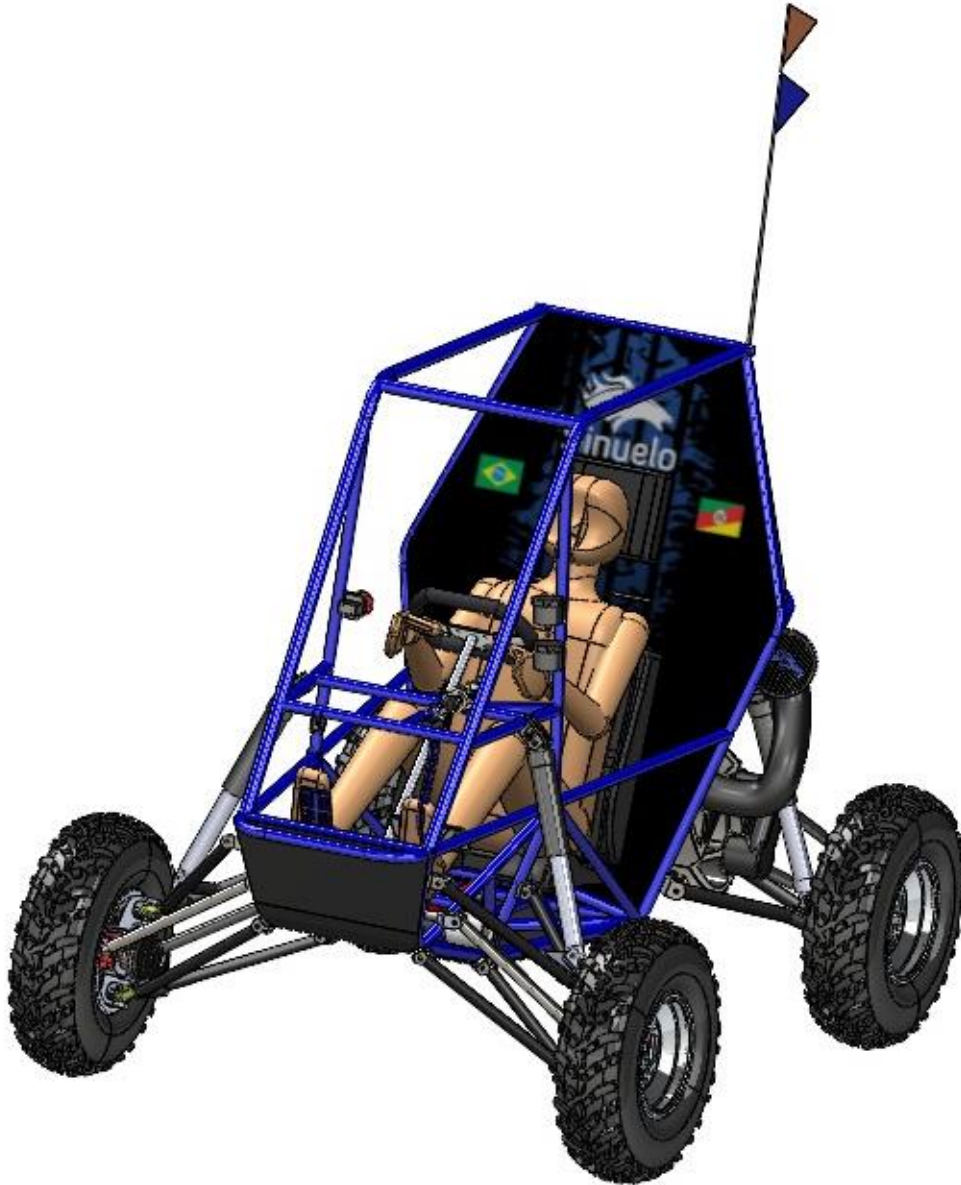
No contexto do projeto e fabricação de veículos de competição, o programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho (SAE Brasil, 2024). O projeto da Equipe Baja Sinuelo FAHOR simula de maneira realista os processos utilizados por empresas na criação ou melhoria de produtos. Ele abrange etapas como a concepção do veículo, análise de viabilidade para fabricação em massa, aspectos construtivos, regulamentações, segurança, desempenho, além de processos de compras e controle de custos (Equipe Baja Sinuelo, 2024).

A soldagem de componentes de aço é uma prática comum e fundamental na fabricação de estruturas metálicas, principalmente quando se deseja um processo de união relativamente rápido e de baixo custo comparado a rebitagem ou parafusagem. Neste contexto, a integridade da solda é fundamental para garantir a integridade e o desempenho das estruturas. No projeto Sinuelo VII da Equipe Baja Sinuelo FAHOR, o chassi era fabricado em aço SAE 1020. O aço SAE 1020 não atendia à resistência exigida para a aplicação, e, em virtude de deformações, tornou-se necessário o uso de diversos contravamentos para garantir a robustez da estrutura. Durante este processo, diversas melhorias foram implementadas tanto nos materiais utilizados quanto nas técnicas adotadas, com o objetivo de aprimorar o desempenho do veículo. Para o projeto Sinuelo VIII da Equipe Baja Sinulo FAHOR (ver Figura 1) foi optado pelo aço SAE 4130, que atende às necessidades de resistência e desempenho exigidas para o modelo 4x4 e ainda impactou na redução de onze quilogramas no peso total do veículo.

O aço SAE 4130, conhecido por sua alta resistência e versatilidade, é amplamente utilizado na fabricação de componentes que necessitam de robustez e resistência mecânica. No entanto, a soldagem deste material apresenta desafios únicos, principalmente devido à sua suscetibilidade a trincas e formação de microestruturas frágeis na zona termicamente afetada (ZTA). O pré-aquecimento é uma prática que visa aumentar a temperatura da base metálica antes da aplicação do calor de soldagem, com o objetivo de controlar a taxa de resfriamento e assim influenciar a microestrutura e as propriedades mecânicas do metal depositado. Diversos fatores devem ser avaliados como temperatura e elementos de liga pois

estão diretamente relacionados aos resultados de fusão e penetração do metal adicionado, dureza, microestrutura e propriedades mecânicas.

Figura 1 – Projeto 4x4 Sinuelo VIII da Equipe Baja Sinuelo FAHOR



Fonte: Equipe Baja Sinuelo, 2024

O pré-aquecimento é uma prática recomendada para a soldagem de aços de alta liga, como o SAE 4130, especialmente quando se trata de tubos trefilados a frio. Segundo Silva (2020), "o pré-aquecimento ajuda a reduzir a tensão residual e a prevenir a formação de trincas durante o resfriamento, o que é crucial em materiais com alta dureza". De acordo com Oliveira e Santos (2019), "a aplicação de calor prévio à soldagem é essencial para garantir a integridade da junta, pois o aço SAE 4130, devido à sua composição química, pode ser suscetível a problemas como a

fragilização e a formação de microfissuras se não for adequadamente aquecido antes do processo de soldagem".

A importância do pré-aquecimento também é destacada por Almeida (2023), que afirma que "o controle da temperatura durante a soldagem de aços como o SAE 4130 é fundamental para evitar a formação de zonas afetadas pelo calor que possam comprometer as propriedades mecânicas da junta soldada". Além disso, a literatura técnica sugere que "o pré-aquecimento não apenas melhora a qualidade da solda, mas também facilita a fusão do material base, resultando em uma junta mais homogênea e resistente" (Pereira, 2022).

Portanto, considerando a importância do controle da microestrutura e a integridade do metal depositado, o objetivo deste trabalho é estudar a influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço SAE 4130 por soldagem MAG (*Metal Active Gas*). O estudo é motivado pela necessidade de garantir alta resistência e homogeneidade das soldas, requisitos essenciais para o desempenho da Baja SAE. Ao realizar ensaios comparativos em amostras soldadas com diferentes temperaturas de pré-aquecimento, incluindo condições sem pré-aquecimento, para compreender de que forma as variações de temperatura influenciam na formação de fases microestruturais como a martensita e estas se refletem nas propriedades mecânicas das juntas soldadas.

1.1 TEMA

O tema deste estudo se refere à avaliação da influência da temperatura de pré-aquecimento sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4130 soldado pelo processo MAG.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se na análise e caracterização da microestrutura e propriedades mecânicas de amostras de juntas de aço SAE 4130 soldadas pelo processo MAG, com diferentes temperaturas de pré-aquecimento, sendo: amostras sem pré-aquecimento, com pré-aquecimento à 250 °C e com pré-aquecimento à 500 °C.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A soldagem de materiais metálicos, especialmente em estruturas com alto grau de responsabilidade, é um processo que demanda um controle rigoroso das condições de operação, incluindo a temperatura de pré-aquecimento. O pré-aquecimento adequado é fundamental para minimizar tensões térmicas, evitar fissuras e garantir a integridade da união soldada. No contexto da soldagem de aços de alta resistência, como o aço SAE 4130, a definição da temperatura de pré-aquecimento adequada pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas do material, incluindo resistência, dureza e homogeneidade microestrutural. Diante disso, surge a seguinte questão: É possível determinar a temperatura de pré-aquecimento que proporcionará a maior resistência e homogeneidade microestrutural na soldagem do aço SAE 4130?

Para abordar essa questão, é necessário considerar diversos fatores que afetam a soldagem, como a composição química do material, os métodos de soldagem utilizados, as características do processo de resfriamento e a interação entre a temperatura de pré-aquecimento e a microestrutura resultante. O estudo envolverá a realização de experimentos controlados em que diferentes temperaturas de pré-aquecimento serão aplicadas a amostras de aço SAE 4130, seguidas de análises micrográficas para observar a formação de fases, a distribuição de grãos e a presença de descontinuidades.

Além disso, ensaios mecânicos, como ensaio de flexão e dureza, serão realizados para quantificar a resistência dos materiais soldáveis. Esse conjunto de dados permitirá uma análise mais aprofundada sobre como a temperatura de pré-aquecimento influencia a microestrutura e, consequentemente, as propriedades mecânicas do material. Portanto, o objetivo deste trabalho é não apenas identificar a temperatura de pré-aquecimento ideal, mas também compreender os mecanismos que levam à melhora da resistência e da homogeneidade microestrutural em soldagens de aço SAE 4130. As conclusões poderão fornecer informações valiosas para a indústria, contribuindo para o desenvolvimento de práticas de soldagem que otimizem a formação da microestrutura e integridade estrutural da solda.

1.4 JUSTIFICATIVA

O aço SAE 4130 é amplamente utilizado em aplicações industriais e na fabricação de componentes mecânicos devido à sua excelente combinação de

resistência mecânica e tenacidade. A soldagem destes materiais, especialmente perfis de tubos, é uma prática comum, mas exigente, pois as flutuações na temperatura de pré-aquecimento podem afetar significativamente as propriedades finais do produto soldado.

O pré-aquecimento é uma técnica comumente utilizada para minimizar a ocorrência de tensões residuais e a formação de microestruturas indesejáveis como a martensita, que podem comprometer a integridade mecânica das juntas soldadas. Compreender as interações entre a temperatura de pré-aquecimento e as propriedades mecânicas e a microestrutura resultante é crucial para otimizar os processos de soldagem e garantir a qualidade e segurança das estruturas.

Além disso, a soldagem a arco de metal a gás (MAG) é uma das técnicas mais utilizadas na indústria devido à sua versatilidade e eficiência. Investigar como a temperatura de pré-aquecimento afeta as propriedades das juntas soldadas neste processo contribuirá para o desenvolvimento de melhores práticas de soldagem e poderá levar ao desenvolvimento de diretrizes para auxiliar engenheiros e técnicos na seleção dos parâmetros de processo mais apropriados.

Por fim, esse estudo não só contribuirá para o avanço do conhecimento científico, mas também terá implicações significativas para aplicações práticas da engenharia mecânica, contribuindo para que o projeto Baja Sinuelo VIII tenha validações de materiais utilizados na estrutura do chassi, assegurando a segurança e eficiência.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo investigar a influência da temperatura de pré-aquecimento sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de perfis tubulares em aço SAE 4130 soldados pelo processo MAG.

1.5.2 Objetivos específicos

- **Analisar a microestrutura das juntas soldadas:** Estudar as alterações microestruturais nos perfis tubulares em função das diferentes temperaturas de pré-aquecimento.

- **Avaliar as propriedades mecânicas:** Determinar as propriedades mecânicas, como flexão, dureza, das soldas em relação às variações de temperatura de pré-aquecimento.
- **Correlacionar resultados microestruturais e mecânicos:** Estabelecer uma correlação entre as características microestruturais observadas e as propriedades mecânicas dos materiais soldáveis.
- **Propor recomendações para práticas de soldagem:** Desenvolver diretrizes para a aplicação da temperatura de pré-aquecimento, visando otimizar a qualidade das soldas em aço SAE 4130.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O referencial teórico deste estudo abordará a influência da temperatura de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas e na microestrutura do aço SAE 4130. Inicialmente, foi discutido as características químicas e mecânicas do aço SAE 4130, e destacado a importância do cromo e do molibdênio em sua composição, que conferem propriedades desejáveis como resistência e temperabilidade. Em seguida, foi explorado os efeitos do pré-aquecimento, que é uma prática comum para minimizar tensões residuais e evitar a formação de trincas durante a soldagem, especialmente em aços de média liga como o SAE 4130. Por fim, o referencial teórico incluirá uma análise das normas e diretrizes técnicas que orientam a prática do pré-aquecimento na soldagem, enfatizando a necessidade de seguir procedimentos padronizados para garantir a qualidade e a segurança das estruturas metálicas soldadas.

2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Os aços avançados de alta resistência e baixa liga (AHSS) são fundamentais na indústria automotiva, pois oferecem uma combinação ideal de resistência e leveza. Segundo Callister e Rethwisch (2018), esses materiais são projetados para melhorar a segurança dos veículos, permitindo a construção de estruturas mais leves que mantêm a integridade em situações de impacto. Além disso, a obra de Totten (2007) destaca que a adição de elementos de liga, como nióbio e vanádio, é crucial para o desenvolvimento de propriedades mecânicas superiores nos AHSS, o que os torna adequados para aplicações que exigem alta performance e durabilidade. Ainda, a pesquisa de Bhadeshia e Honeycombe (2006) enfatiza a importância dos processos de fabricação e tratamento térmico na otimização das características dos aços de alta resistência, garantindo que eles atendam aos rigorosos padrões da indústria.

Entre as aplicações para os aços de alta resistência, destacam-se aquelas em que o critério relevante é o baixo peso, permitindo assim a construção de estruturas mais leves. Isso resulta na diminuição do consumo de combustíveis, facilitando seu uso de forma mais racional e promovendo a redução das emissões de poluentes por veículos, além de melhorar os dispositivos de segurança. Para atender a esses requisitos, foram desenvolvidos aços com alta e ultra-alta resistência, que também apresentam uma ductilidade relativamente alta, especialmente para a indústria de transporte, com ênfase no setor aeronáutico (Delagnes *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012;

Cooman, 2004). O uso desses materiais, em conjunto com microestruturas adequadas, possibilitou a minimização da perda de ductilidade, mantendo níveis elevados de resistência (Gorni, 2008).

De acordo com Annibal, Gonçalves e Silva (2005), a segurança é um dos principais critérios considerados na fabricação da estrutura dos carros modernos, especialmente na Europa. Nessa região, a utilização de aços de alta resistência é comum, uma vez que esses materiais são particularmente eficazes na absorção de energia durante impactos e colisões. A escolha desses aços é crucial para garantir que os veículos possam suportar as cargas dinâmicas que ocorrem em situações de acidente, proporcionando maior proteção aos ocupantes do veículo. Essa relação pode ser visualizada na Figura 2 (ANNIBAL et al., 2005).

Figura 2 – Veículo exposto a cargas dinâmicas durante um teste de impacto



Fonte: Insurance Institute for Highway Safety (2002).

2.1.1 Processos de fabricação e rotas de processamento

Segundo Callister e Rethwisch (2018), o aço SAE 4130, que é um aço de baixa liga, apresenta características que o tornam adequado para aplicações que exigem alta resistência e tenacidade, especialmente quando processado por rotas de fabricação como a trefilação a frio. "O processo de trefilação a frio é fundamental para melhorar as propriedades mecânicas do aço, fornecendo formas e dimensões precisas." (TOTTEN, 2006, p. 175).

A trefilação a frio é um processo fundamental na indústria metalúrgica, especialmente para a otimização das propriedades do aço 4130. Segundo Callister (2011), esse processo não apenas melhora a resistência e dureza do material, mas

também é crucial para aplicações que exigem alta performance estrutural. A escolha do aço 4130 deve-se à sua combinação favorável de resistência e tenacidade, características que podem ser ainda mais aprimoradas por meio da trefilação a frio, como destacado por Totten (2007). Além disso, conforme indicado por Davis (1996), essa técnica permite a redução do diâmetro dos tubos, promovendo um refinamento da microestrutura, o que resulta em propriedades mecânicas superiores. Dessa forma, a trefilação a frio se revela uma estratégia eficaz para atender às demandas rigorosas da indústria que utiliza o aço 4130.

Na obra de Costa (2023), é mencionado que os aços baixa-liga, como o SAE 4130, são amplamente utilizados em diversas indústrias devido às suas propriedades mecânicas favoráveis. O autor ressalta que a trefilação é uma das técnicas de conformação que contribui para melhorar ainda mais as características desse tipo de aço, tornando-o adequado para aplicações que exigem alta performance e resistência a esforços mecânicos intensos. Dessa forma, a trefilação a frio não apenas modifica as dimensões do material, mas também potencializa suas propriedades intrínsecas.

Pereira (2021) discute a importância da trefilação a frio no contexto da metalurgia dos aços, afirmando que este processo é essencial para a fabricação de tubos de alta qualidade, como os feitos de SAE 4130. O autor explica que a trefilação a frio, ao promover deformações significativas no material, resulta em um aumento da resistência à tração e dureza, características que são fundamentais para a aplicação desses tubos em setores críticos como o automotivo e o aeroespacial. Assim, a compreensão das interações entre a microestrutura do aço e os processos de conformação, como a trefilação, é vital para a produção de materiais de alto desempenho.

A trefilação a frio é um processo amplamente utilizado na indústria metalúrgica, mas pode apresentar desafios, como a descarbonetação do material. Essa diminuição do carbono é uma preocupação significativa, pois, conforme destacado por Davis (1996), pode afetar negativamente as propriedades mecânicas do aço, incluindo dureza e resistência à tração. Além disso, Callister (2011) observa que a descarbonetação pode ser minimizada por meio do controle rigoroso das condições de trefilação, como temperatura e velocidade do processo, assegurando que as características desejadas do material sejam mantidas. Portanto, compreender e gerenciar a descarbonetação é crucial para otimizar a qualidade dos produtos resultantes da trefilação a frio.

2.1.2 Microestrutura e propriedades mecânicas

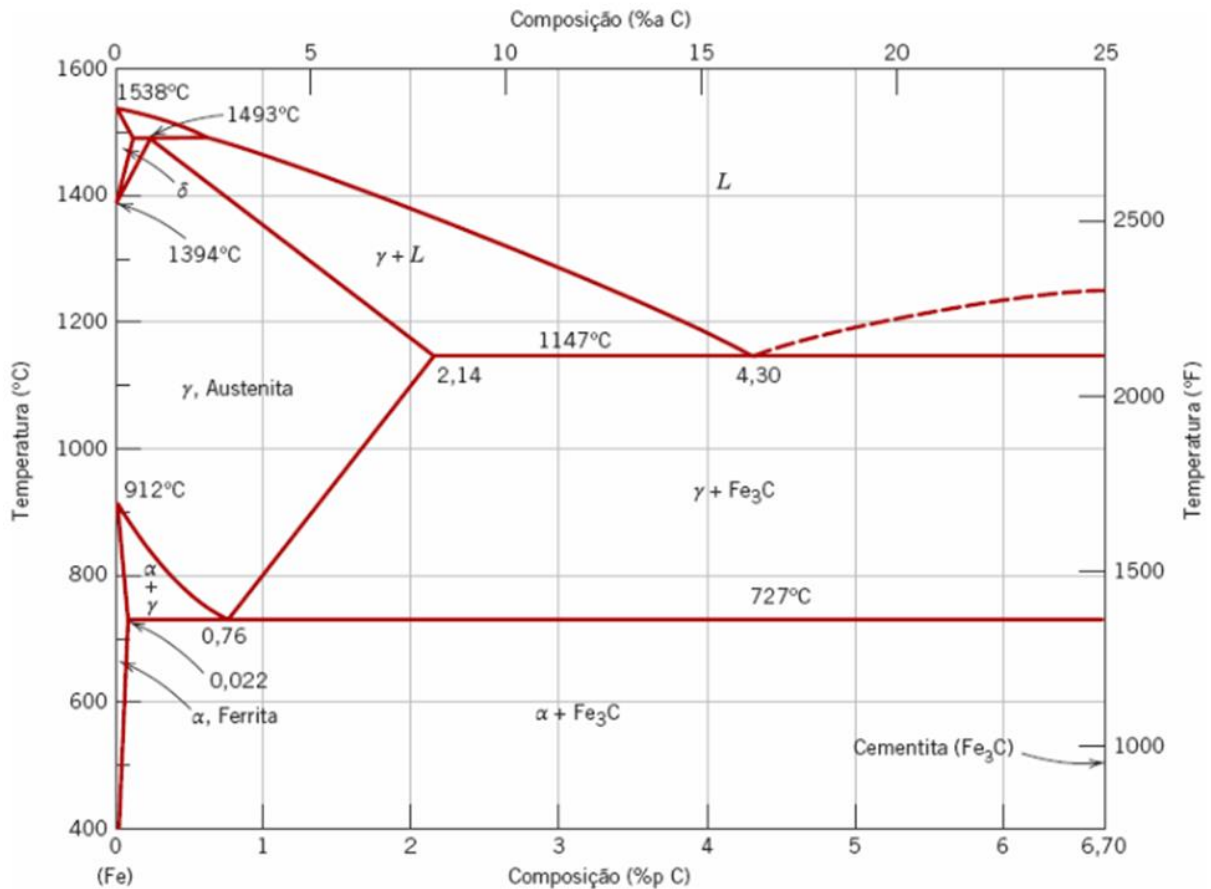
O aço SAE 4130, que contém cromo e molibdênio em sua composição, é conhecido por suas propriedades mecânicas favoráveis, como resistência e tenacidade, especialmente após processos de trefilação a frio, que podem alterar significativamente sua microestrutura (Sacchelli, 2022). Segundo Callister e Rethwisch (2018), a microestrutura do aço SAE 4130, especialmente após processos de conformação a frio, exibe um refinamento significativo dos grãos, o que resulta em uma melhoria das propriedades mecânicas, como resistência à tração e dureza.

Callister e Rethwisch (2018) afirmam que a microestrutura dos aços, como o 4130, é geralmente composta por perlita, que é formada por camadas de ferrita e cementita. Essa estrutura lamelar é crucial para o equilíbrio entre a resistência e a ductilidade do material. De acordo com Krauss (2005), a formação de perlita em aços ocorre durante o resfriamento da austenita, e a proporção de ferrita presente pode ser ajustada através de processos térmicos, impactando diretamente as propriedades mecânicas, como dureza e tenacidade.

Davis (1996) menciona que a ferrita é a fase mais macia e dúctil do aço, enquanto a perlita, que contém cementita, confere resistência. A interação entre essas fases é essencial para determinar o desempenho do aço em diversas aplicações industriais. Entretanto, Krauss (2005) explica que a martensita é uma estrutura cristalina muito dura que se forma em aços durante o resfriamento rápido, conhecido como têmpera. Essa transformação ocorre de maneira difusional, resultando em uma microestrutura que confere alta dureza ao material.

Segundo Lancaster (1999), o diagrama ferro-carbono é fundamental para entender as transformações de fase que ocorrem em aços e ferros fundidos, onde a presença de carbono influencia diretamente as propriedades mecânicas dos materiais. As fases presentes no diagrama, como a ferrita, perlita e cementita, são cruciais para determinar a microestrutura final dos aços, afetando características como dureza e tenacidade. Além disso, o autor menciona que a martensita, uma fase resultante do resfriamento rápido da austenita, é essencial para aplicações que exigem alta resistência, sendo uma das principais microestruturas obtidas a partir do diagrama ferro-carbono, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de fases Fe-C



Fonte: Callister, 2008, p. 243

2.1.3 Soldabilidade dos aços SAE 4130

A soldabilidade do aço SAE 4130 é frequentemente discutida em termos de sua composição química e microestrutura, que influenciam diretamente a formação de trincas durante o processo de soldagem. Estudos indicam que a presença de elementos de liga, como cromo e molibdênio, pode afetar a resistência à soldagem e a necessidade de tratamentos térmicos pós-soldagem (Davis, 1996).

A soldabilidade do aço SAE 4130 é um aspecto crítico em aplicações que exigem alta resistência e durabilidade. Segundo o "*Welding Handbook*" da *American Welding Society* (AWS, 2010), a presença de elementos de liga, como cromo e molibdênio, pode impactar negativamente a soldagem, exigindo cuidados especiais durante o processo para evitar a fragilização da zona afetada pelo calor. A escolha do processo de soldagem e do material de adição é crucial para garantir a qualidade da solda em aços de baixa liga como o SAE 4130, sendo recomendável o uso de eletrodos que sejam compatíveis com a composição química do aço para assegurar uma união eficaz e durável (AWS, 2011).

Além disso, o "*Welding Handbook*" enfatiza a importância de tratamentos térmicos adequados antes e após a soldagem do aço SAE 4130, que podem ajudar a minimizar tensões residuais e prevenir a formação de trincas, garantindo a integridade da solda (AWS, 2010). Esses cuidados são fundamentais para garantir que as propriedades mecânicas do material sejam mantidas, permitindo que o aço atenda aos requisitos de desempenho em suas diversas aplicações industriais.

A soldabilidade dos aços SAE 4130 é um aspecto importante na engenharia de materiais, especialmente em aplicações que exigem alta resistência. De acordo com o manual "Aços: Propriedades e Aplicações" da Gerdau, a soldagem desse aço pode ser desafiadora devido à presença de elementos de liga como cromo e molibdênio, que podem aumentar a dureza na zona afetada pelo calor, tornando essencial o uso de técnicas adequadas para evitar a fragilização (Gerdau, 2020). Além disso, a escolha do processo de soldagem e do material de adição é crucial, e a realização de tratamentos térmicos antes e após a soldagem é recomendada para minimizar tensões residuais e prevenir trincas, assegurando que as propriedades mecânicas do aço sejam mantidas (Gerdau, 2020).

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

O processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) é amplamente utilizado na indústria devido à sua eficiência e qualidade. Segundo Miller (1994), a soldagem MAG envolve a utilização de um arco elétrico entre a peça de trabalho e um eletrodo consumível, que é alimentado continuamente, permitindo uma soldagem rápida e eficaz em diversos metais. A escolha do gás de proteção é um fator crucial, pois ele afeta diretamente a qualidade da solda e a penetração do arco; gases ativos, como o dióxido de carbono, são frequentemente utilizados para melhorar a fusão e a resistência da solda. Além disso, Miller (1994) enfatiza que a configuração adequada dos parâmetros de soldagem, como corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame, é essencial para evitar problemas como a formação de porosidade e a falta de fusão. O controle rigoroso desses parâmetros garante a integridade e a durabilidade das juntas soldadas, tornando o processo MAG uma escolha popular em aplicações industriais que exigem alta produtividade e qualidade nas soldas.

O processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) é amplamente discutido no "*Welding Handbook*" da *American Welding Society* (AWS). Segundo a AWS (2010), a soldagem MAG utiliza um arco elétrico entre um eletrodo consumível e a peça de

trabalho, permitindo a fusão do metal base e do eletrodo, resultando em uma solda de alta qualidade e eficiência. Além disso, a organização enfatiza a importância da escolha do gás de proteção, que pode influenciar significativamente a qualidade da solda. A mistura de argônio e dióxido de carbono, por exemplo, é frequentemente recomendada para melhorar a penetração e a resistência da solda.

Complementando essa perspectiva, o "*Welding Handbook*" também ressalta que o controle dos parâmetros de soldagem, como corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame, é crucial para evitar defeitos como porosidade e falta de fusão. Ademais, a AWS (2010) menciona que a soldagem MAG é versátil e pode ser aplicada em uma variedade de materiais, tornando-se uma escolha popular em diversas indústrias, especialmente na fabricação de estruturas metálicas e na indústria automotiva.

2.2.1 Parâmetros operacionais

Os parâmetros operacionais de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) são essenciais para garantir a qualidade das juntas soldadas. Segundo Lancaster (1999), a corrente de soldagem é um dos principais fatores que afetam a penetração e a largura da solda. Ele explica que uma corrente muito baixa pode resultar em uma solda fraca, enquanto uma corrente excessiva pode causar queima do metal base e deformações indesejadas. Além disso, Lancaster (1999) destaca a importância da tensão de soldagem, que deve ser ajustada de acordo com a espessura do material e a posição de soldagem. Uma tensão inadequada pode levar a problemas como a formação de respingos e a falta de fusão. A velocidade de alimentação do arame também é um parâmetro crítico, pois deve ser balanceada com a taxa de fusão do eletrodo para garantir uma deposição uniforme do metal de adição, evitando assim a formação de defeitos na solda.

Os parâmetros operacionais de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) são fundamentais para garantir a qualidade e a integridade das juntas soldadas. De acordo com Lippold e Kotecki (2005), a escolha adequada dos parâmetros, como corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame, é crucial para o controle do processo de soldagem. Esses autores destacam que a corrente de soldagem influencia diretamente a penetração do arco e a temperatura da solda, afetando a microestrutura e as propriedades mecânicas do metal soldado. Além disso, Lippold e Kotecki (2005) ressaltam que a tensão de soldagem também desempenha um papel importante, pois

uma tensão inadequada pode resultar em uma solda com defeitos, como porosidade e falta de fusão. A velocidade de alimentação do arame, por sua vez, deve ser ajustada para equilibrar a quantidade de metal de adição com a taxa de fusão, garantindo uma solda uniforme e de qualidade.

Por fim, os autores enfatizam que a compreensão desses parâmetros operacionais é essencial para otimizar o processo de soldagem MAG, permitindo que os soldadores ajustem as condições de trabalho de acordo com as especificidades do material e da aplicação, resultando em juntas soldadas mais resistentes e duráveis.

2.2.2 Consumíveis para soldagem

De acordo com a *American Welding Society* (AWS, 2010), o metal de adição desempenha um papel crucial nos processos de soldagem, pois é utilizado para preencher a junta entre as peças a serem unidas, garantindo a integridade estrutural da solda. O tipo de metal de adição escolhido pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas da solda, como resistência e ductilidade, sendo essencial que o metal de adição seja compatível com os materiais base para evitar problemas como a fragilização da solda (AWS, 2010). Além disso, a seleção adequada do metal de adição pode melhorar a resistência à corrosão e a durabilidade da junta soldada, tornando-se um fator determinante na performance do componente final (AWS, 2010).

O metal de adição desempenha um papel fundamental no processo de soldagem MAG, pois sua composição química pode influenciar diretamente as propriedades mecânicas da junta soldada. A escolha do metal de adição deve ser feita com base nas características do material base e nas exigências da aplicação final (Davis, 1996). A utilização de metais de adição adequados no processo de soldagem MAG não apenas melhora a resistência à tração das juntas, mas também pode aumentar a resistência à corrosão, o que é crucial em ambientes agressivos (Miller, 2010). A seleção do metal de adição deve considerar fatores como a temperatura de fusão e a taxa de resfriamento, pois esses elementos podem afetar a microestrutura da solda e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas (Kalpakjian; Schmid, 2006).

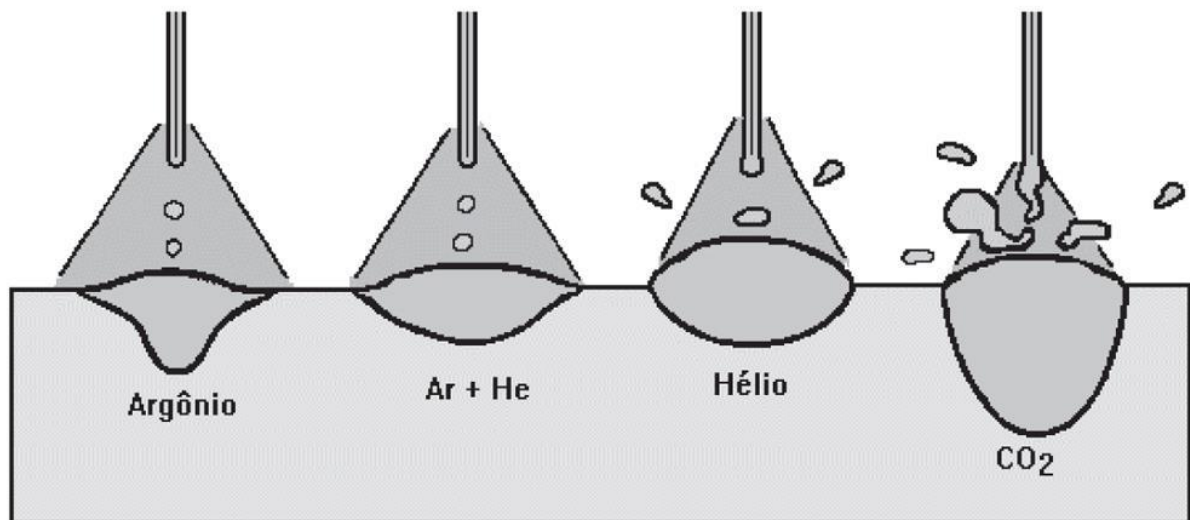
Os consumíveis utilizados na soldagem desempenham um papel crucial na determinação da qualidade da solda, especialmente em processos que utilizam o modo de transferência por curto-circuito. Lippold e Kotecki (2011) explicam que o conceito de *matching* refere-se à correspondência entre as propriedades do

consumível e do material base, o que é essencial para garantir a integridade da solda. Por outro lado, o *undermatching* ocorre quando o consumível tem uma resistência menor do que o material base, o que pode levar a falhas na solda sob tensões elevadas (Lippold; Kotecki, 2011). Em contraste, o *overmatching* é quando o consumível possui uma resistência maior, o que pode resultar em uma solda mais forte, mas também pode causar problemas de ductilidade e fragilidade (Lippold; Kotecki, 2011). A escolha adequada entre esses tipos de *matching* é fundamental para otimizar o desempenho da solda em aplicações específicas, especialmente em ambientes que exigem alta resistência e durabilidade (Lippold; Kotecki, 2011).

O gás de proteção é essencial em processos de soldagem, pois atua na proteção da poça de fusão contra a contaminação atmosférica, garantindo a qualidade da solda. A escolha do gás de proteção adequado pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas da junta soldada (Miller, 2010). O gás de proteção, como argônio e dióxido de carbono, desempenha papéis distintos na soldagem, e a combinação de diferentes gases pode otimizar o processo e melhorar a qualidade da solda (Hobbacher, 2008), conforme ilustrado na Figura 4. A utilização de um gás de proteção apropriado não apenas previne a oxidação, mas também pode afetar a estabilidade do arco elétrico, o que é crucial para a eficiência do processo de soldagem (Davis, 1996).

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008), o gás de proteção é um elemento essencial no processo de soldagem MIG/MAG, pois desempenha um papel crucial na proteção da poça de fusão contra a contaminação atmosférica. Os autores ressaltam que a escolha do gás de proteção, como argônio ou uma mistura de argônio e dióxido de carbono, pode influenciar significativamente a qualidade da solda, afetando características como a penetração e a aparência da junta soldada (Scotti e Ponomarev, 2008). Além disso, a utilização adequada do gás de proteção não apenas melhora a eficiência do processo, mas também contribui para a redução de defeitos, como porosidade e inclusões, garantindo um desempenho superior na soldagem (Scotti e Ponomarev, 2008).

Figura 4 – Influência do gás de proteção na geometria do cordão de solda



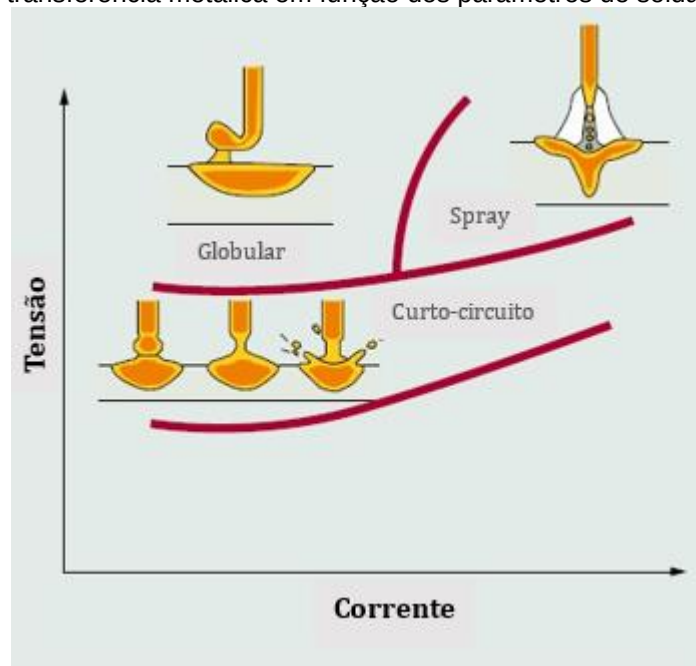
Fonte: Villani, 2005, p 243.

2.2.3 Modos de transferência metálica

Os modos de transferência metálica são aspectos cruciais no processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*), e são discutidos em detalhes por Lippold e Kotecki (2005). Os autores identificam três modos principais de transferência de metal: o globular, o *spray* e o curto-circuito (ver Figura 5). Cada um desses modos apresenta características distintas que influenciam a qualidade da solda e a eficiência do processo.

De acordo com Lancaster (1999), os modos de transferência metálica desempenham um papel fundamental no processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*). O autor identifica três principais modos de transferência: o modo globular, o modo *spray* e o modo de curto-circuito. No modo globular, Lancaster (1999) explica que a transferência de metal ocorre em gotas grandes que se desprendem do eletrodo, resultando em uma solda com maior quantidade de respingos e uma penetração moderada. Esse modo é mais comum em correntes mais altas e pode ser menos controlável.

Figura 5 – Modos de transferência metálica em função dos parâmetros de soldagem



Fonte: Adaptado de SSAB, 2016

Por outro lado, o modo spray é caracterizado pela transferência de pequenas gotas de metal que se movem rapidamente do eletrodo para a poça de fusão. Lancaster (1999) destaca que esse modo proporciona uma penetração mais profunda e uma solda mais limpa, sendo ideal para aplicações que exigem alta qualidade. Esse modo é geralmente utilizado em correntes mais altas e tensões adequadas, permitindo um controle mais preciso do processo. De acordo com a *American Welding Society* (2010?), a transferência por curto-circuito é amplamente utilizada em processos de soldagem, proporcionando uma boa eficiência e qualidade na união dos metais.

2.3 CARBONO EQUIVALENTE VERSUS TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO

O aço carbono é basicamente uma liga de ferro e carbono, alcançando seus níveis de resistência e de dureza principalmente através da adição de carbono. Os aços carbono são classificados quanto à composição química em três grupos (Chiaverini, 1996), dependendo de seus níveis de carbono: (i) aços de baixo carbono, com até 0,2% carbono; (ii) Aço de médio carbono, com C entre 0,2% até 0,5%; (iii) aço de alto carbono – com C acima de 0,5 % carbono até 2,0%.

A classificação dos aços em grupos é um processo que pode ser considerado difuso e, em algumas situações, permite certa sobreposição. Por exemplo, alguns

autores definem aços com teor de carbono inferior a 0,3% como aços de baixo carbono, enquanto outros restringem essa classificação apenas aos aços que possuem teor de carbono abaixo de 0,15%. Essa variação nas definições pode gerar confusão e diferentes interpretações sobre as características e aplicações dos aços. (Somers, 1993).

Para o cálculo do carbono equivalente, determina-se o teor aproximado de outros elementos de liga que conferem a mesma dureza que 1% de carbono, resultando no carbono equivalente (CE), que é uma indicação da temperabilidade, pode ser calculado pela Equação 1. De acordo com a Equação 1 e resultados encontrados o CE do material utilizado foi determinado em 0,60. Quando o carbono equivalente calculado por esta fórmula excede 0,4, é recomendável que o metal de base seja pré-aquecido na faixa de 93 a 204 °C. Se o CE excede 0,6, a faixa de pré-aquecimento precisa ser aumentada para 204 a 371°C. Existem muitas diferentes fórmulas para o cálculo de CE que devem ser cuidadosamente estudadas para cada aplicação (AWS, 2000).

$$CE = \%C + [(\%Mn + \%Si)/6] + [(\%Cr + \%Mo)/5] + [(\%Ni + \%Cu)/15] \quad (1)$$

O cálculo do carbono equivalente é fundamental para a avaliação da soldabilidade de aços. Segundo Almeida (2023), "o carbono equivalente é uma fórmula que considera não apenas o teor de carbono, mas também a influência de outros elementos de liga, como manganês e níquel, que podem afetar as propriedades mecânicas do material". De acordo com Silva (2022), "a fórmula do carbono equivalente permite que engenheiros determinem a necessidade de pré-aquecimento e outros parâmetros de soldagem, sendo essencial para evitar descontinuidades nas juntas soldadas". Essa relação é especialmente importante em aços de alta resistência, onde a suscetibilidade a trincas é maior.

O teor de carbono equivalente elevado geralmente requer temperaturas de pré-aquecimento mais altas, pois isso ajuda a minimizar tensões internas e a garantir a integridade da solda". Portanto, o cálculo preciso do carbono equivalente é uma prática indispensável na engenharia de soldagem (Costa, 2021). Conforme ilustra o diagrama de Graville na Figura 5, os aços TMCP (S700MC) estão localizados na Zona I, o que indica que possuem baixo teor de carbono e baixa temperabilidade. Dessa forma, esses aços não apresentam suscetibilidade à fissuração a frio, e não há

térmica". Essa prática é crucial para garantir uma solda de boa qualidade e integridade estrutural.

Ainda verifica-se que as propriedades do material são de extrema importância para a garantia da performance e vida útil do produto. De acordo com Pereira (2021), "As propriedades mecânicas do aço SAE 4130 incluem uma resistência à tração de cerca de 560 MPa e um limite de escoamento de aproximadamente 460 MPa, tornando-o ideal para aplicações exigentes." Além disso, segundo Silva (2020), o aço SAE 4130 é reconhecido por sua versatilidade e resistência, sendo frequentemente utilizado em aplicações que exigem materiais leves, mas robustos. Sendo adequado a aplicação no carro Baja Sinuelo, visto a necessidade de peso leve e alto desempenho.

A influência da temperatura de pré-aquecimento também se estende às propriedades mecânicas do material. A literatura sugere que temperaturas de pré-aquecimento adequadas podem melhorar a ductilidade e a tenacidade do aço, minimizando a ocorrência de trincas e falhas durante e após o processo de soldagem. Segundo Oliveira e Santos (2021), "a variação da temperatura de pré-aquecimento impacta diretamente a resistência à tração e a dureza do material soldado, sendo crucial para o desempenho em aplicações críticas."

De acordo com a ESAB (2004), quanto maior o teor de carbono no material utilizado, maior será a temperatura necessária para o pré-aquecimento. Esse princípio também se aplica ao teor de ligas, embora em um grau um pouco menor. O efeito combinado do teor de carbono e dos elementos de liga pode ser sintetizado no conceito de carbono equivalente. Portanto, quanto maior o carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento exigida. A Tabela 1 apresenta valores sugeridos de temperaturas de pré-aquecimento para diferentes níveis de carbono equivalente. Conforme apresentado na Tabela 1 e na aplicação da Equação 1, o teor de carbono equivalente obtido para a amostra foi de 0,60. Dessa forma, a temperatura de pré-aquecimento recomendada pela literatura é de 250 °C, valor este adotado no presente estudo.

Tabela 1 – Carbono equivalente versus temperatura de pré-aquecimento

Carbono equivalente Ceq (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	Opcional
0,31 – 0,45	100 °C – 200 °C
0,45 – 0,60	200 °C – 250 °C
> 0,60	250 °C – 300 °C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300 °C

Fonte: Adaptado de Esab, 2004

2.4 CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

A soldagem MAG (*Metal Active Gas*) exige a adoção de critérios de qualidade rigorosos para garantir a integridade das juntas soldadas. Segundo Liu e Zhang (2012), "os critérios de qualidade incluem a inspeção visual, a resistência mecânica das juntas e a avaliação da penetração do cordão de solda, que são fundamentais para assegurar a durabilidade das estruturas soldadas". A escolha do gás de proteção e a configuração do equipamento são fatores cruciais que influenciam a qualidade do processo de soldagem MAG. Callister (2007) destaca que é necessário seguir as recomendações do fabricante para obter os melhores resultados.

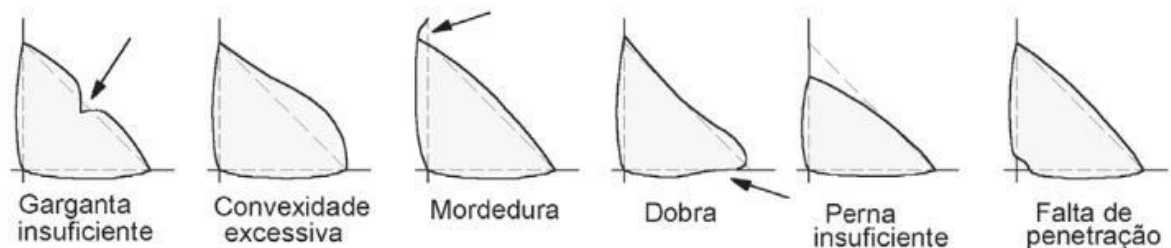
Um dos aspectos críticos na soldagem MAG é a preparação da superfície do material a ser soldado. Conforme destacado por Miller (2014), "superfícies limpas e bem preparadas são essenciais para evitar defeitos de soldagem, como inclusões e falta de fusão, que podem comprometer a qualidade da junta". As descontinuidades em soldas podem ser classificadas em vários tipos, e a compreensão delas é fundamental para a manutenção da qualidade da junta soldada. De acordo com AWS (2010), as falhas mais comuns incluem descontinuidades superficiais, como trincas e porosidade, que podem comprometer a resistência da junta.

De acordo com Modenesi (2001), as descontinuidades em juntas soldadas podem ser classificadas em diferentes tipos, como porosidade, trincas e descontinuidades de fusão, cada uma apresentando implicações distintas na integridade da solda. O autor enfatiza que a identificação e a análise dessas descontinuidades são essenciais para garantir a qualidade e a segurança das estruturas soldadas, uma vez que a presença de defeitos pode comprometer a

resistência mecânica e a durabilidade das juntas (Modenesi, 2001). Além disso, Modenesi (2001) destaca que a escolha adequada dos parâmetros de soldagem e a realização de inspeções regulares são fundamentais para minimizar a ocorrência de descontinuidades e assegurar um desempenho confiável das soldas.

A porosidade, uma das descontinuidades mais frequentes, pode ocorrer devido à umidade ou à presença de contaminantes. A preparação adequada da superfície e o controle dos parâmetros de soldagem, como velocidade e temperatura, são cruciais para evitar esse tipo de falha, conforme mencionado por Liu e Zhang (2012). Além disso, um pré-aquecimento inadequado pode resultar em descontinuidades, como trincas de solidificação, que surgem devido a tensões internas geradas durante o resfriamento rápido do material. Isso é particularmente problemático em materiais de alta dureza, onde a resistência a fraturas é crítica (Miller, 2014). Esses defeitos podem gerar inadequações nos perfis de solda, conforme exemplificado na Figura 7.

Figura 7 – Ilustração esquemática de perfis de solda inadequados



Fonte: Villani, 2005, p 68.

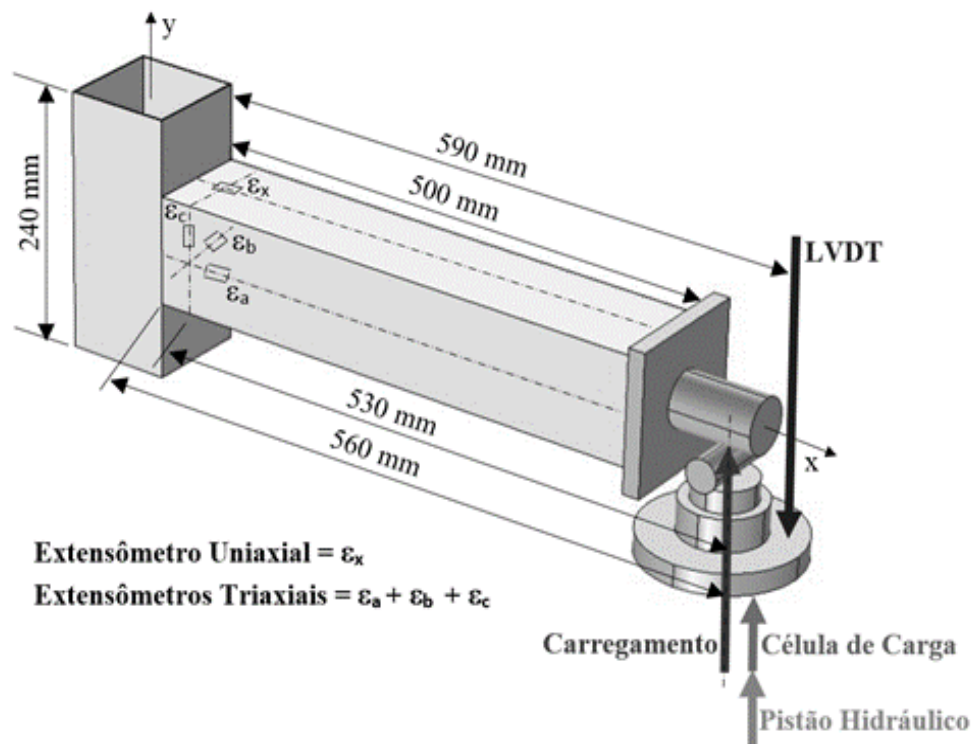
O controle da temperatura de pré-aquecimento é essencial para garantir a homogeneidade da microestrutura do material, evitando a formação de porosidade e outras falhas que podem comprometer a integridade da solda. Segundo Baker (2008), a aplicação correta do pré-aquecimento pode melhorar significativamente a qualidade da solda e reduzir as descontinuidades.

2.5 ENSAIOS DE FLEXÃO EM PERFIS TUBULARES

Os ensaios de flexão em perfis tubulares são essenciais para avaliar a resistência e a rigidez dos materiais utilizados em estruturas metálicas. De acordo com Miller (2012), esses ensaios são importantes pois permitem avaliar a capacidade de carga dos perfis e a deformação sob várias condições de carregamento, sendo assim fundamentais para o projeto de estruturas seguras.

Dalcin (2016) realizou um estudo que avaliou a eficiência mecânica de juntas soldadas por MAG em perfis tubulares quadrados de aço TMCP, com diferentes energias de soldagem e metais de adição (AWS ER80S-G e AWS ER120S-G). Foram testadas seis energias de soldagem em 24 estruturas, submetidas à flexão, dimensionados e ensaiados conforme ilustrado na Figura 8. Os resultados indicaram que a solda longitudinal e em todo o contorno apresentou maior resistência, enquanto as transversais tiveram desempenho inferior. A energia de 1,2 kJ/mm foi a mais eficaz, enquanto energias mais altas reduziram a resistência devido à diminuição da dureza na zona afetada pelo calor (ZTA).

Figura 8 – Desenho esquemático do ensaio de flexão simples



Fonte: Dalcin, 2016, p 34.

A realização de ensaios de flexão em perfis tubulares também fornece informações sobre a distribuição de tensões e a formação de possíveis falhas. De acordo com Hibbeler (2017), "a análise dos resultados obtidos nos ensaios de flexão é crucial para entender o comportamento dos perfis sob esforços, permitindo ajustes no projeto e na escolha dos materiais". Além disso, a norma ABNT NBR 8800 estabelece diretrizes para a execução de ensaios de flexão em perfis tubulares. Conforme destacado por Bittencourt e Silva (2019), é fundamental seguir as normas

técnicas para garantir a qualidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos nos ensaios.

Os ensaios de flexão são fundamentais para a avaliação do comportamento mecânico de perfis tubulares, permitindo a análise de sua resistência e rigidez sob cargas aplicadas. Segundo Beer e Johnston (2010, p. 245), "o ensaio de flexão em perfis tubulares envolve a aplicação de uma carga em pontos específicos, resultando em tensões que podem ser analisadas para determinar a capacidade de carga do material". Os autores destacam que a flexão pura é um dos modos mais comuns de carregamento, onde a distribuição de tensões é crucial para a integridade estrutural (Beer; Johnston, 2010, p. 250). Além disso, a análise de tensões de cisalhamento durante o ensaio é essencial para entender como os perfis tubulares se comportam sob diferentes condições de carga, o que é vital para projetos de engenharia que exigem alta performance e segurança (Beer; Johnston, 2010, p. 265).

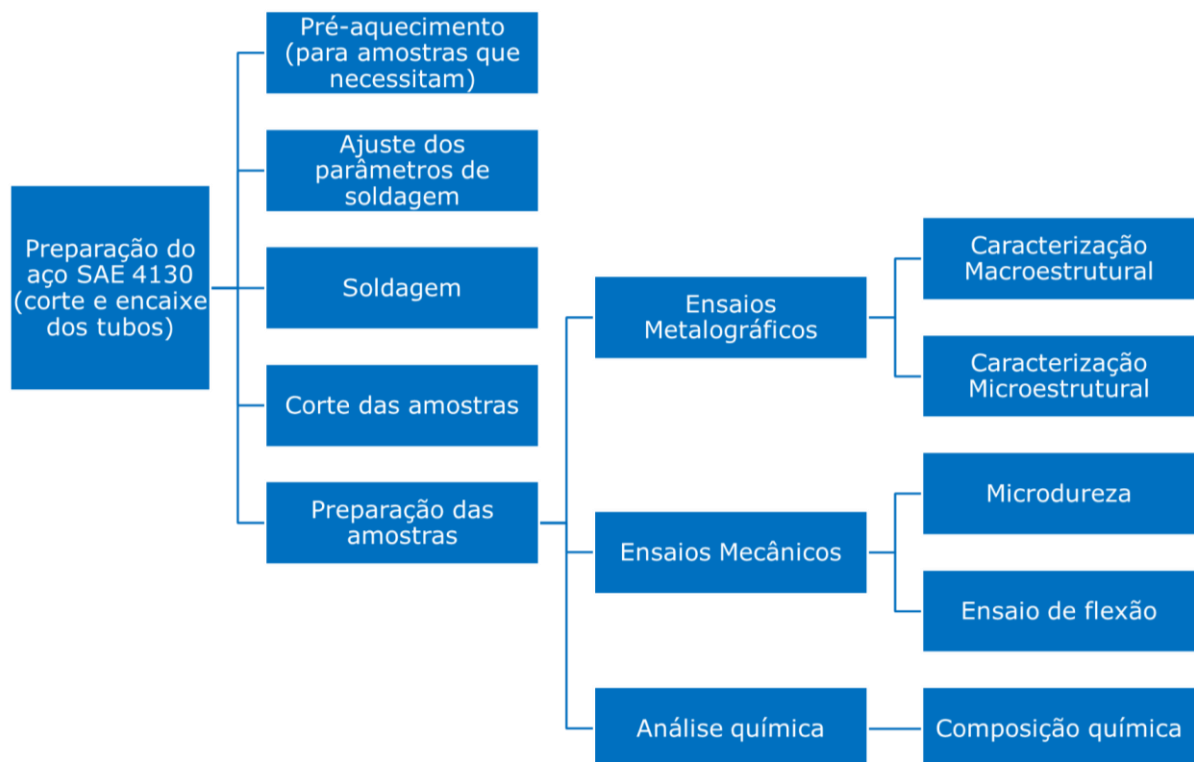
Reis (2011) realizou um estudo abrangente, incluindo abordagens teóricas, experimentais e numéricas, focando em estruturas soldadas que conectam colunas de perfil tubular circular a vigas com seção transversal em I. A análise teórica seguiu as recomendações de Wardenier *et al.* (2008) e do Eurocode 3 (2005). As análises por elementos finitos foram conduzidas utilizando o software ANSYS, cujos resultados mostraram-se consistentes com os dados experimentais. O modo de falha identificado nos modelos foi a plastificação da face da coluna, e tanto os protótipos experimentais quanto numéricos demonstraram um comportamento semirrígido. Além disso, constatou-se um aumento na resistência da conexão em decorrência do incremento da altura da seção transversal da viga e/ou da espessura da coluna tubular circular.

Nunes *et al.* (2012) apresentaram um estudo teórico fundamentado em normas e pesquisas anteriores, seguido de uma análise computacional de conexões soldadas entre colunas tubulares de seção quadrada e vigas de seção em I. A análise numérica incluiu modelos em T (uma viga acoplada a um pilar, com um único plano de flexão) e modelos cruciformes (duas vigas acopladas a um pilar, com dois planos de flexão). A partir dos resultados numéricos, foram determinados os momentos resistentes das estruturas soldadas. O modo de falha observado em todos os modelos numéricos e na verificação teórica foi a plastificação da face frontal do pilar, onde o deslocamento último foi o fator limitante da resistência da estrutura soldada.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com base no embasamento teórico, foi elaborado o projeto do experimento, no qual foram realizados ensaios mecânicos e metalográficos. Foram avaliados parâmetros geométricos como convexidade, garganta teórica e pernas. Também foram investigados critérios metalúrgicos como microdureza e análise microestrutural da zona termicamente afetada pelo calor. A Figura 9 apresenta resumidamente um fluxograma detalhando as etapas de fabricação e caracterização das amostras.

Figura 9 – Fluxograma detalhando as etapas de fabricação e caracterização das amostras.



Fonte: Autora, 2024

3.1 MATERIAL

O material escolhido para produção das amostras é do tipo aço de alta resistência SAE 4130, obtido através do processo de trefilação a frio com espessura de 1,6 mm. A composição química foi medida em um espectrômetro de emissão óptica, utilizou-se uma amostra com diâmetro maior de 12 mm, plana e lixada para remoção das impurezas.

O material selecionado para a produção das amostras é classificado como aço SAE 4130, uma liga que combina cromo e molibdênio, conferindo-lhe propriedades mecânicas excelentes. Este aço foi processado por meio de trefilação a frio, um método que envolve a deformação plástica do material à temperatura ambiente, resultando em uma espessura final de 1,6 mm. Os resultados da análise de composição química do metal base estão detalhados na Tabela 2, onde são apresentados os percentuais de cada elemento da liga, evidenciando a adequação do material para as aplicações propostas. A verificação rigorosa da composição química do aço é essencial para garantir suas propriedades mecânicas desejadas e a sua performance em condições de uso.

A composição química do aço SAE 4130, também conhecido como aço cromo-molibdênio, é caracterizada pela presença de elementos que conferem ao material suas propriedades mecânicas superiores. Na análise da composição química do tubo de ensaio, Tabela 2, foram observadas variações em relação à especificação do aço SAE 4130, conforme indicado no laudo fornecido pelo fornecedor e nos resultados do ensaio realizado. A análise realizada indica um teor de carbono na superfície de 0,25%, valor inferior ao intervalo especificado para o material, que exige uma faixa entre 0,28% e 0,30%. Este resultado pode sugerir a ocorrência de descarbonetação superficial.

Esses elementos são fundamentais para as propriedades do aço SAE 4130. O cromo e o molibdênio, em particular, são responsáveis por aumentar a resistência, a dureza e a tenacidade do material, além de melhorar sua temperabilidade. Essa combinação de elementos torna o aço SAE 4130 uma escolha popular em aplicações que exigem alta resistência e durabilidade, como na fabricação de componentes estruturais e em indústrias automotivas e aeronáuticas.

3.2 PROCEDIMENTOS USADOS NA FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a realização dos ensaios mecânicos, foram inicialmente produzidas seis amostras com dimensões de 150 x 300 mm. No entanto, após uma análise cuidadosa, tornou-se evidente que essas dimensões precisavam ser ajustadas para garantir a compatibilidade com o equipamento de ensaio utilizado. Como resultado, as amostras foram seccionadas, resultando em dimensões finais de 150 x 30 mm. Esse ajuste foi crucial para assegurar que as amostras se encaixassem corretamente no dispositivo de teste, permitindo uma avaliação precisa das propriedades mecânicas.

Tabela 2 – Composição química do aço SAE 4130

Elemento Químico	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ni
Recomendação da Norma	0,28-0,33	0,15-0,35	0,40-0,60	0,030	0,040	0,25
Fornecedor do Aço SAE 4130	0,30	0,25	0,53	0,009	0,003	0,02
Valor Medido	0,25	0,23	0,52	0,101	0,004	0,02
Elemento Químico	%Cr	%Mo	%Cu	%Co	%Al	%Pb
Recomendação da Norma	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	-	-	-	-
Fornecedor do Aço SAE 4130	0,93	0,22	-	-	-	-
Valor Medido	0,85	0,22	0,0005	-	0,022	0,00005
Elemento Químico	%W	%Ti	%V	%B	%Nb	%Fe
Recomendação da Norma	-	-	-	-	-	-
Fornecedor do Aço SAE 4130	-	-	-	-	-	-
Valor Medido	-	0,002	0,002	0,00002	-	97,8

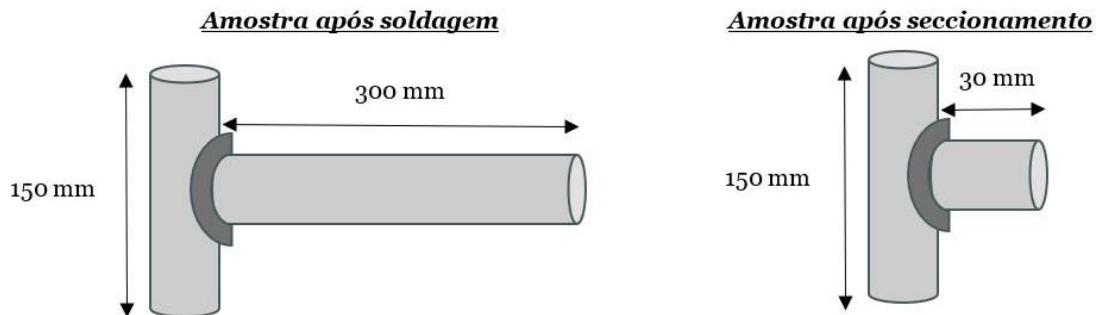
Fonte: Autora, 2024

Além disso, para os ensaios metalográficos, foram confeccionadas três amostras com dimensões de 100 x 150 mm. Essas dimensões foram escolhidas com o objetivo de facilitar o processo de corte e preparação das amostras, conforme identificado na Figura 10. A escolha de tamanhos menores para as amostras de ensaio metalográfico é importante, pois permite uma manipulação mais prática e eficiente, além de facilitar a análise da microestrutura do material.

O preparo adequado das amostras é um passo fundamental em qualquer ensaio, pois a qualidade das medições e a representatividade dos resultados dependem da precisão com que as amostras são cortadas e preparadas. Portanto, a adequação das dimensões das amostras não apenas otimiza a utilização do equipamento, mas também garante a qualidade dos dados obtidos durante os ensaios mecânicos e metalográficos. Essas etapas são essenciais para garantir que os

resultados sejam confiáveis e representativos das propriedades do material em questão.

Figura 10 – Ilustração esquemática dos corpos de prova utilizados para ensaios mecânicos e metalográficos



Fonte: Autora, 2024

3.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Para o processo de soldagem, foram inicialmente definidas as dimensões necessárias para os tubos a serem utilizados. Em seguida, os cortes foram realizados com precisão nos tubos, garantindo um encaixe adequado entre as peças. Após o corte, o material foi submetido a um pré-aquecimento controlado, que é uma prática recomendada para evitar tensões térmicas indesejadas durante o processo de soldagem. O pré-aquecimento ajuda a reduzir o risco de fissuração e melhora a fluidez do metal durante a soldagem. O controle da temperatura de pré-aquecimento é vital, especialmente em materiais metálicos, para garantir que as propriedades mecânicas do material sejam mantidas.

Uma vez que as amostras estavam devidamente preparadas e pré-aquecidas, os tubos foram posicionados em uma superfície plana, formando uma junta em “T”, onde um tubo foi soldado perpendicularmente ao outro. Essas etapas de preparação e montagem são fundamentais para o sucesso do processo de soldagem, pois influenciam diretamente a qualidade do produto final e suas propriedades mecânicas. A adequação do processo de soldagem, aliada a um controle rigoroso das condições de operação, é crucial para garantir que as juntas atendam aos padrões exigidos de desempenho e segurança.

3.3.1 Pré-aquecimento

Foi utilizado um maçarico para realizar o pré-aquecimento das amostras e um termômetro industrial marca KLX para controlar a temperatura (ver Figura 11). Foram soldadas três amostras para testes de flexão e mais seis para ensaios metalográficos e de microdureza, a fim de avaliar as variações geradas em decorrência das alterações nos parâmetros de pré-aquecimento. O primeiro lote foi soldado sem pré-aquecimento, já o segundo lote foi pré-aquecido à 250 °C, e o terceiro lote foi pré-aquecido à 500 °C. As temperaturas foram previamente definidas com base em cálculos relativos ao carbono equivalente.

Figura 11 – Procedimento utilizado para monitorar o controle de temperatura de pré-aquecimento das amostras



Fonte: Autora, 2024

3.3.2 Parâmetros de soldagem e consumíveis

A soldagem foi realizada manualmente pelo processo MAG, com a tocha posicionada a 45° entre os dois tubos e a distância de 20 mm do eletrodo até a peça. O modo de transferência do metal de solda utilizado foi do tipo arco elétrico pulsado. Houve aplicação do cordão de solda na extensão do tubo, cobrindo metade do diâmetro total. Os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 3.

O metal de adição utilizado foi arame maciço AWS ER70S-6, com diâmetro de 0,8 mm, tendo a composição química ilustrada na Tabela 6. Para a realização dos ensaios, os seis corpos de prova foram divididos em dois grupos de três corpos de prova, sendo que cada grupo foi soldado sob três condições diferentes de temperatura

inicial: temperatura ambiente, pré-aquecimento a 250 °C e de 500 °C. A operação de soldagem dos corpos de prova é mostrada na Tabela 4.

Tabela 3 – Parâmetros do processo utilizados nos corpos de prova

Nº	Fator	Unidade	Notação	Valor
1	Tensão	Volt	V	16,0
2	Corrente	Amperes	A	109
3	Velocidade de soldagem	Milímetro por segundo	mm/min	326
4	Velocidade do arame	Metros por minuto	m/min	6,5
5	Distância do eletrodo-peça	Milímetro	mm	20

Fonte: Autora, 2024

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A análise dos resultados foi realizada por meio de um procedimento laboratorial, visando assegurar a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos. Cada corpo de prova, incluindo aqueles destinados à validação do experimento, passou por uma preparação meticulosa, que envolveu várias etapas: seccionamento, embutimento, lixamento, polimento e tratamento químico com uma solução de nital a 2,5%. Este tratamento químico é fundamental para a revelação da microestrutura do material, uma vez que o Nital ataca seletivamente as diferentes fases presentes na amostra, permitindo a visualização de características microestruturais relevantes.

O seccionamento dos corpos de prova foi realizado de maneira cuidadosa, assegurando que as amostras fossem representativas do material analisado. O embutimento foi feito para garantir a estabilidade das amostras durante o lixamento e polimento, minimizando a introdução de tensões e deformações que poderiam afetar os resultados dos ensaios subsequentes. O lixamento e polimento foram executados para criar uma superfície lisa e homogênea, essencial para a análise micrográfica. A aplicação do nital (2,5%) permitiu a revelação da microestrutura, revelando detalhes

cruciais, como a distribuição de fases, tamanhos de grão e potenciais descontinuidades que podem influenciar as propriedades mecânicas do material. Essa etapa é vital para a compreensão do comportamento do material sob condições de carga e para a avaliação de sua integridade estrutural. Além disso, parte das amostras foi destinada especificamente à realização de ensaios de flexão, que são essenciais para medir a resistência mecânica do material sob tensões aplicadas. Esses ensaios ajudam a determinar se o material atende aos requisitos de desempenho para aplicações práticas.

Tabela 4 – Composição química do arame AWS ER70S-6

<i>Elemento Químico</i>	<i>%C</i>	<i>%Si</i>	<i>%Mn</i>	<i>%P</i>	<i>%S</i>	<i>%Ni</i>
<i>Valor Medido</i>	0,05630	0,64334	1,1987	0,01085	0,01031	0,02066
<i>Elemento Químico</i>	<i>%Cr</i>	<i>%Mo</i>	<i>%Cu</i>	<i>%Co</i>	<i>%Al</i>	<i>%Pb</i>
<i>Valor Medido</i>	0,02671	0,00000	0,22151	0,00000	0,00000	0,00000
<i>Elemento Químico</i>	<i>%W</i>	<i>%Ti</i>	<i>%V</i>	<i>%B</i>	<i>%Nb</i>	<i>%Fe</i>
<i>Valor Medido</i>	0,00000	0,00204	0,00347	0,00036	0,00000	97,806

Fonte: Autora, 2024

Cada corpo de prova foi seccionado em duas regiões distintas, uma abordagem que visa aumentar a confiabilidade das medições subsequentes. Ao investigar diferentes áreas do corpo de prova, é possível identificar variações nas propriedades mecânicas e microestruturais, proporcionando uma análise mais abrangente e representativa do material. Essa metodologia rigorosa garante que os resultados obtidos sejam precisos, confiáveis e significativos, permitindo conclusões robustas sobre o comportamento do material nas condições de uso esperadas.

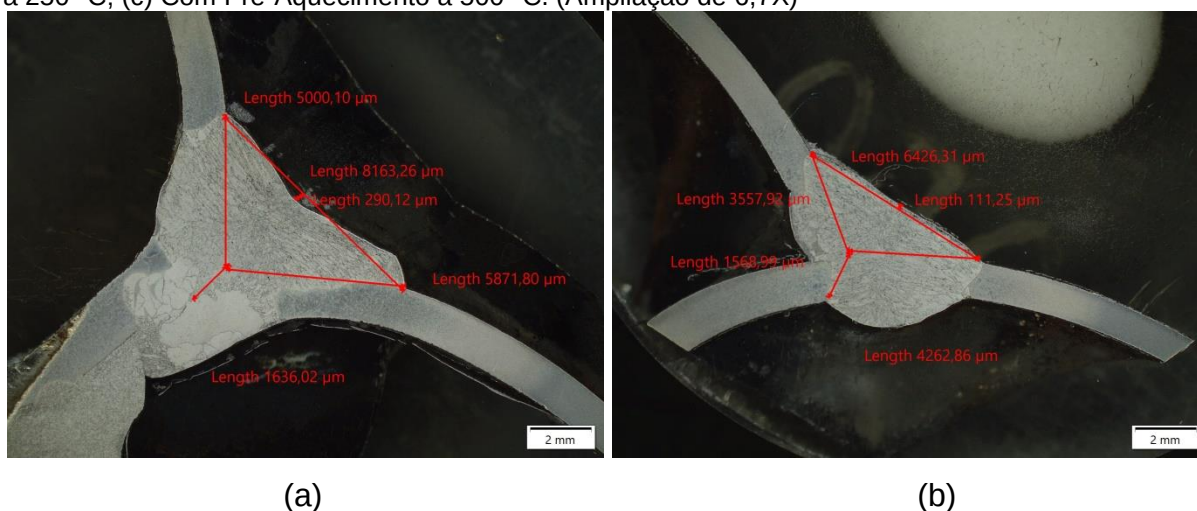
3.4.1 Análise metalográfica

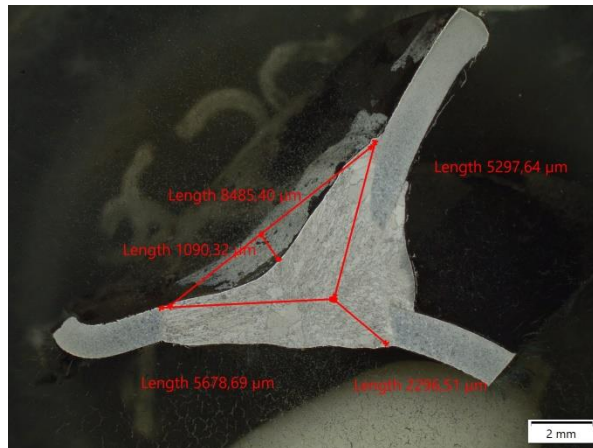
A análise da Zona Térmica Afetada (ZTA) e da geometria da solda é um procedimento crítico que envolve a captura de imagens ampliadas da região da junta soldada, utilizando um microscópio. Essa abordagem permite uma visualização detalhada da microestrutura na ZTA, onde a soldagem provoca alterações significativas nas propriedades do material devido ao aquecimento e resfriamento rápidos associados ao processo.

Durante a análise, as imagens das amostras foram adquiridas em diferentes aumentos para destacar características microestruturais específicas, como a formação de martensita, ferrita, perlita e outras fases relevantes que podem impactar as propriedades mecânicas do material soldado. A utilização de um microscópio proporciona uma resolução suficiente para identificar e quantificar essas características, permitindo uma avaliação precisa da integridade da solda. Para análises metalográficas utilizou-se os seguintes equipamentos para a preparação das amostras e análises: Máquina de corte Buehler modelo Abrasimatic-300; Máquina de embutimento Buehler modelo Simplimet-4000; Máquina de lixamento e polimento modelo Automet-250; Microscópio Olympus BX51M com amplificação de até 1000 vezes.

Para a análise macroestrutural, foram realizadas medições das pernas, da garganta e da concavidade utilizando o estereoscópio Olympus BX51M, capaz de amplificação de até 45 vezes. Contudo, foi utilizada uma ampliação de 6 vezes durante as medições, que foram conduzidas com o auxílio do software Digitimet Plus. As técnicas de medição empregadas incluíram a delimitação das pernas dos cordões, que foram medidas a partir da extremidade do cordão até a raiz da solda. Para a avaliação da concavidade, foi inicialmente traçada uma linha reta entre as extremidades das duas pernas de cada cordão, e, em seguida, foi mensurado o vazio ou a sobreposição do cordão em relação a essa reta. Quanto à garganta, a medição foi realizada da raiz do cordão até a extremidade dele. As medições e delimitações dos locais podem ser visualizados na Figura 12.

Figura 12 – Macrografias das amostras soldadas: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C. (Ampliação de 6,7X)





(c)

Fonte: Autora, 2024

3.4.2 Medição de Dureza

O método de verificação da microdureza foi realizado utilizando um microdurômetro Buehler Wilson VH1202, com carga de 0,3 kg e espaçamento de 0,10 mm entre as medições, criando um perfil de microdureza. Seguindo a norma DIN EN 1043-1 (1995), as medições foram feitas a no máximo 2 mm da borda em juntas do tipo “T”, sendo adotada a distância de 1 mm para a medição. As medições ocorreram em uma das regiões seccionadas de cada corpo de prova, em nove experimentos.

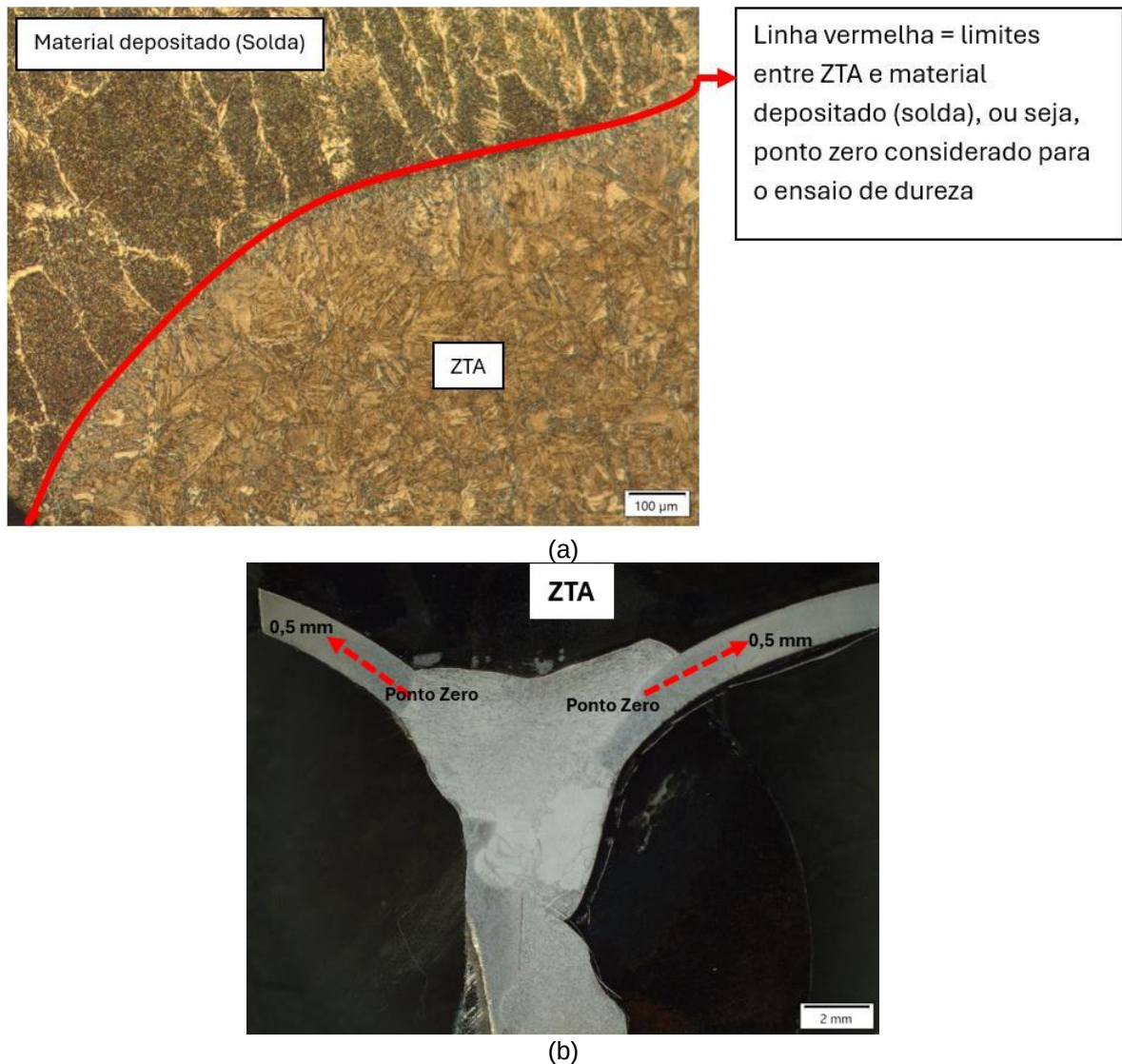
Para garantir representatividade, foram feitas medições em duas regiões distintas de cada corpo de prova, pois a ZTA pode apresentar variações microestruturais e de dureza. A média das durezas foi calculada em cada região, proporcionando uma visão geral da dureza da solda e ZTA, permitindo comparações com as especificações do material.

O ensaio de microdureza na ZTA teve como ponto de referência a faixa de transição entre o material depositado e o material base (ver Figura 13). Seis medições foram realizadas em intervalos sucessivos de 0,05 mm a 0,10 mm a partir desse ponto zero, abrangendo uma distância de 0,5 mm. A escolha dessa faixa de transição é fundamental, pois é onde ocorrem mudanças significativas na microestrutura devido ao aquecimento durante a soldagem. A análise da distribuição de dureza na ZTA, obtida com a ajuda de um programa de medição de dureza, fornece informações cruciais sobre a resistência mecânica e a integridade da solda.

Para o ensaio de microdureza realizado na solda, realizou-se um perfil na parte central do cordão de solda totalizando seis pontos, sendo o primeiro distanciado de 0,05 mm do ponto zero estabelecido na raiz da solda e os demais 0,1 mm de

distanciamento e os outros 0,1 mm de distância entre eles. Na Figura 14 representa o sentido dos pontos de dureza realizados, sendo o início da seta o ponto zero e o final da seta o sexto ponto de medição totalizando uma distância de 0,5 mm do ponto de referência.

Figura 13 – (a) Interface entre a solda e a ZTA; (b) Ponto de referência para o início do perfil

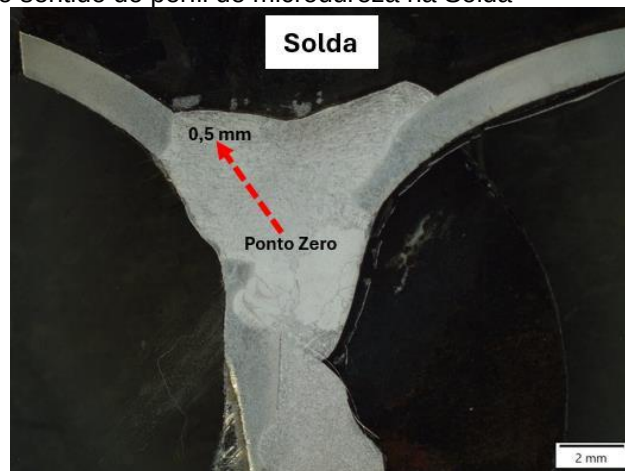


Fonte: Autora, 2024

3.4.3 Ensaios de Flexão

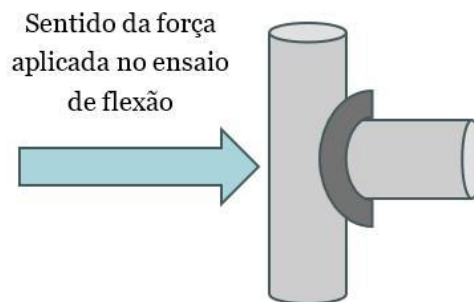
Já as características mecânicas do aço SAE 4130 foram obtidas através de ensaios de flexão realizados na máquina universal de ensaios e são apresentadas na Tabela 4 - indicar tabela que indicará resultados. Para execução do ensaio de flexão, utilizou-se três amostras com o tamanho de 150 x 30 mm e a força aplicada foi em direção a solda, conforme indicado na Figura 15.

Figura 14 – Ilustração do sentido do perfil de microdureza na Solda



Fonte: Autora, 2024

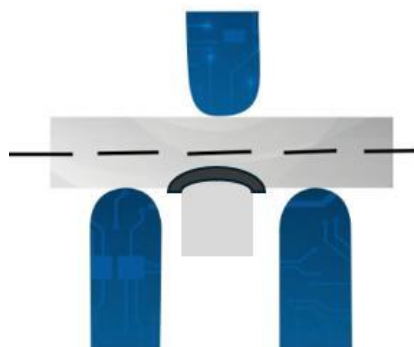
Figura 15 – Sentido da força aplicada no ensaio de flexão



Fonte: Autora, 2024

A execução do ensaio de maneira que a amostra permanecesse devidamente fixada. Isso garantiu que a força do punção fosse aplicada de forma controlada e uniforme, evitando movimentos indesejados da amostra durante o teste, o posicionamento da amostra pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 – Ilustração do procedimento utilizado para o ensaio de flexão.



Fonte: Autora, 2024

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios metalográficos e mecânicos, a fim de realizar um comparativo entre as variáveis utilizadas procurando encontrar o melhor conjunto de parâmetros.

4.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

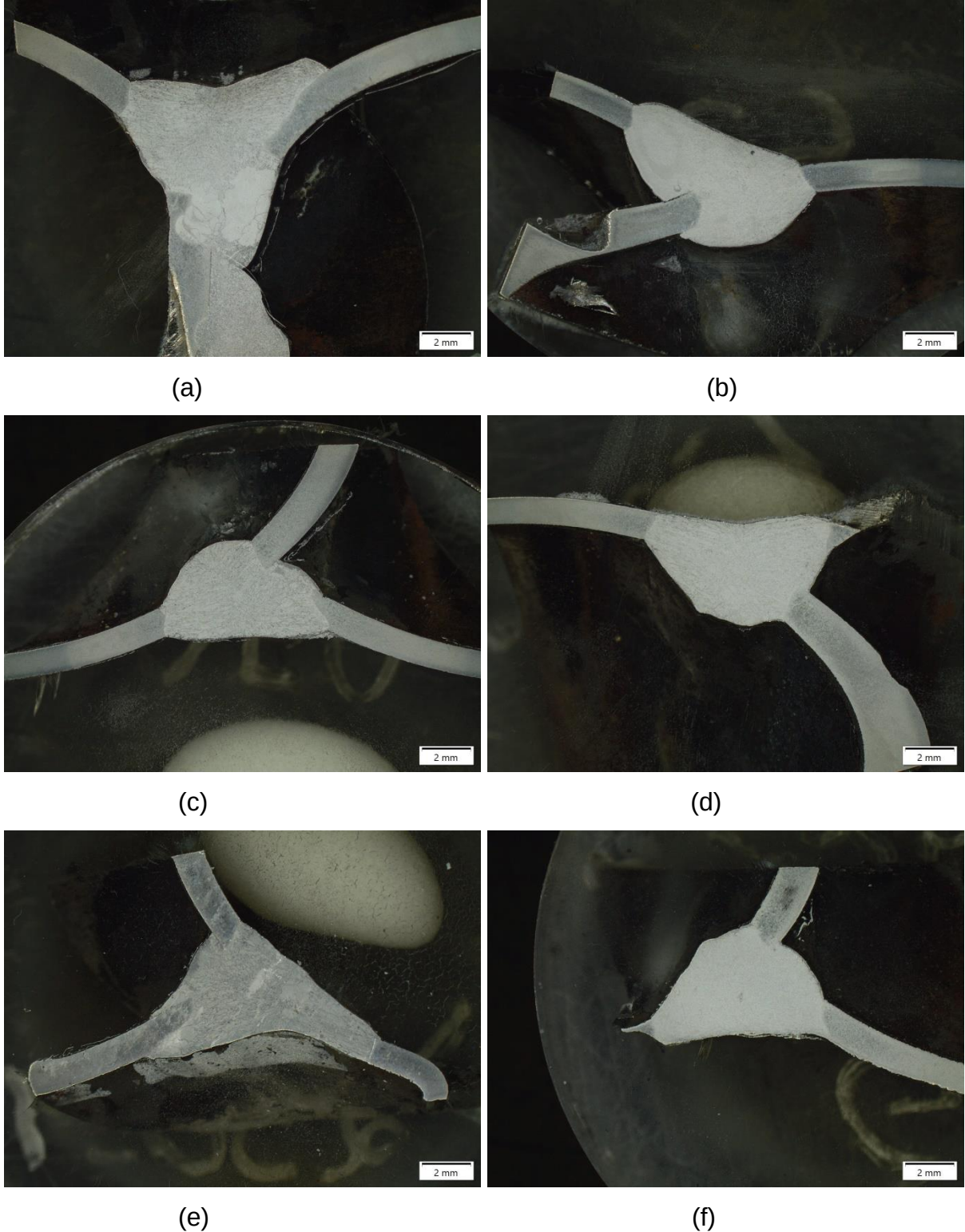
Os resultados apresentados a partir dos ensaios metalográficos incluem uma avaliação detalhada da estrutura interna dos materiais metálicos. Através de várias etapas, como a preparação e polimento da amostra, ataque químico, análise macrográfica e micrográfica, foi possível identificar características importantes do material, como a homogeneidade, a presença de defeitos, a forma e o tamanho dos grãos, e a distribuição de fases. Esses resultados foram interpretados para avaliar a qualidade do material, comparando-os com normas técnicas e especificações. O objetivo final é garantir que os materiais atendam aos requisitos de desempenho, integridade e segurança para suas aplicações.

4.1.1 Macrografia

É perceptível que ocorreu fusão e penetração completa do material depositado no metal base em todos os corpos de prova, independente do pré-aquecimento. De acordo com a AWS o principal aspecto a ser avaliado na junta soldada deve ser a penetração do material depositado na raiz da junta. Identifica-se que a fusão do metal de adição com o metal base ocorreu de forma heterogênea em alguns locais conforme identificado na Figura 16.

As medições das pernas, garganta e concavidade de uma amostra foram realizadas com o objetivo de identificar e analisar as variações em cada uma das variáveis. Neste processo, as dimensões foram cuidadosamente aferidas para garantir a precisão dos dados coletados (ver Figura 17). As "pernas" referem-se às extremidades laterais da amostra e são cruciais para determinar a resistência do material. A "garganta", que é a seção mais estreita entre as pernas, é um ponto crítico que pode afetar a distribuição de tensões na amostra. A "concavidade", por sua vez, refere-se à curvatura da amostra e pode influenciar a performance mecânica e as propriedades funcionais do material.

Figura 17 – Macrografias das amostras soldadas: (a, b) sem pré-aquecimento; (c, d) com pré-aquecimento à 250 °C; (e, f) com pré-aquecimento à 500 °C. (Ampliação de 6,7X, e ataque com Nital 2,5%)



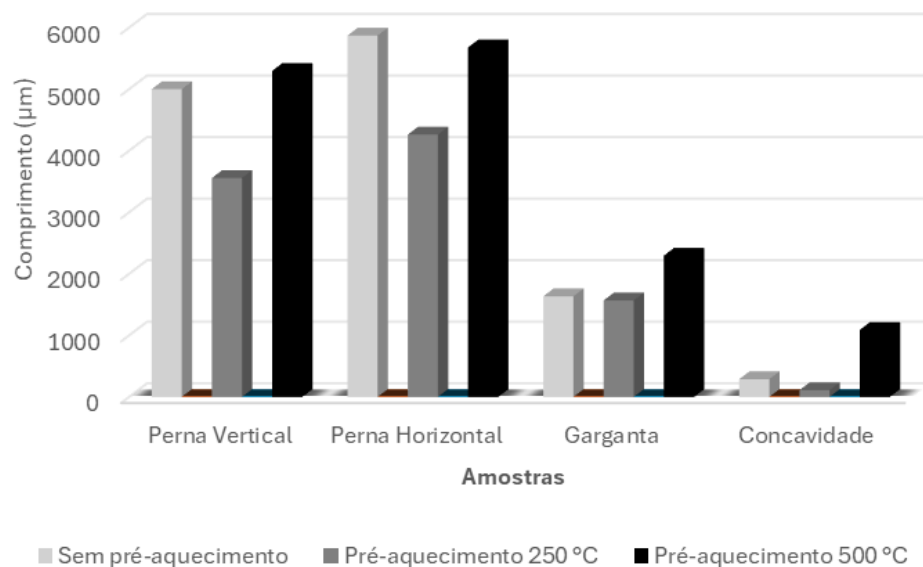
Fonte: Autora, 2024

Através da análise dos resultados obtidos na análise macrográfica, observa-se que a amostra submetida ao pré-aquecimento a 250 °C apresentou resultados intermediários em comparação com as outras amostras analisadas. Essa posição

intermediária sugere que o pré-aquecimento a essa temperatura sugere um equilíbrio nas propriedades mecânicas do material.

Além disso, a amostra pré-aquecida a 250 °C exibiu uma menor concavidade em relação às demais, o que é um indicador positivo, conforme ilustrado na Figura 18. A diminuição da concavidade sugere uma maior uniformidade na distribuição de tensões durante o processo de soldagem, o que pode contribuir para uma melhor integridade estrutural da solda. A redução da concavidade é desejável, pois pode prevenir a ocorrência de falhas e aumentar a resistência à deformação sob carga.

Figura 18 – Resultados da determinação dos parâmetros geométricos do cordão de solda



Fonte: Autora, 2024.

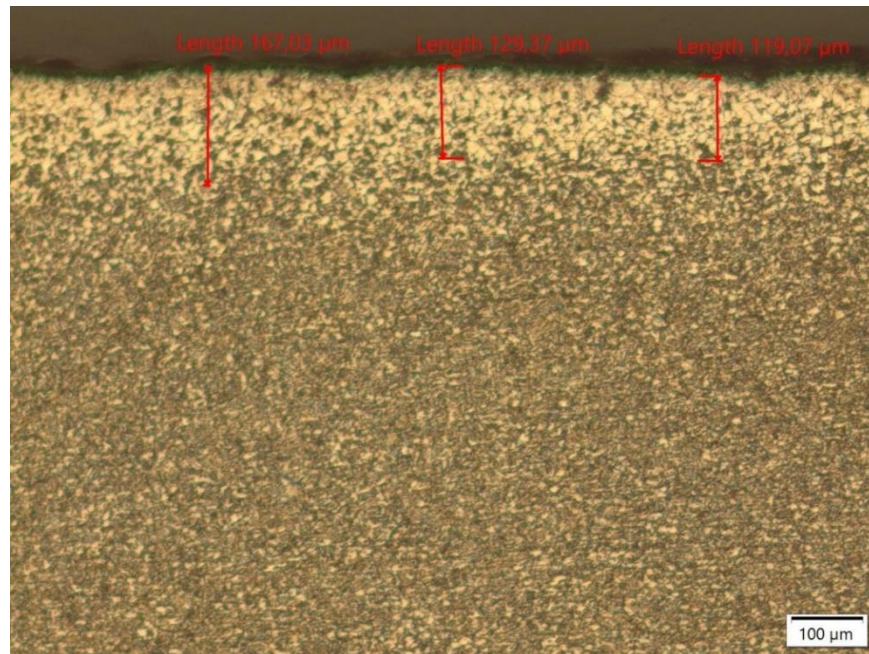
4.1.2 Micrografia

Na análise da superfície do metal base, foi identificada a formação de uma camada considerável descarbonetada, indicando uma significativa perda de carbono no material. Essa alteração microestrutural resulta na formação de ferrita, uma fase caracterizada por sua maciez e ductilidade em comparação ao carbono. A espessura média dessa camada descarbonetada foi mensurada em 415,47 µm.

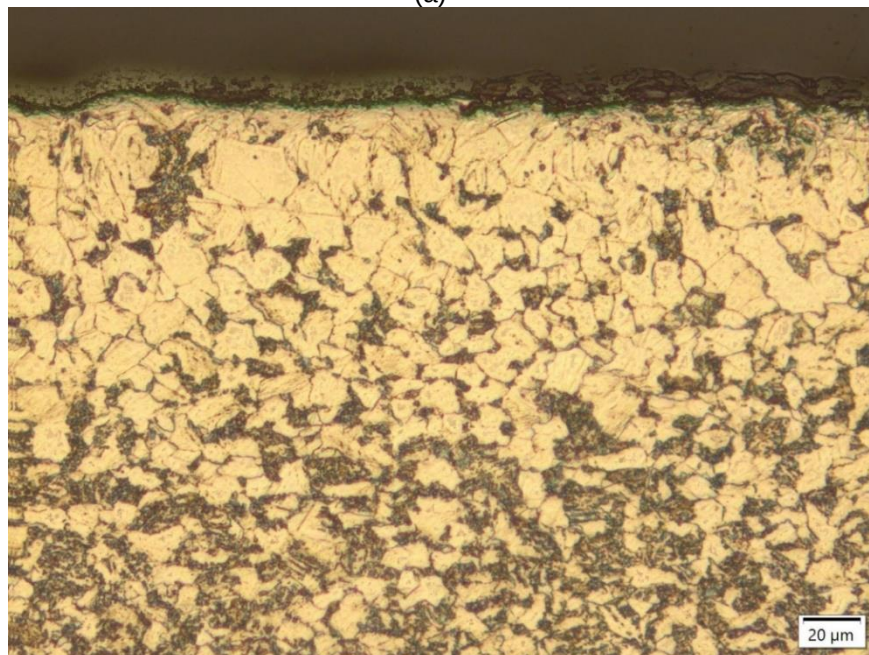
A Figura 19 ilustra de maneira clara essa microestrutura alterada, evidenciando a extensão da camada descarbonetada e a distribuição da ferrita na superfície do metal base. Essas observações são cruciais, uma vez que a presença de uma camada descarbonetada pode impactar negativamente as propriedades mecânicas do

material, como resistência e dureza, comprometendo a integridade estrutural das peças soldadas.

Figura 19 – (a) Micrografia da superfície do metal base ampliada em 50x (b) micrografia ampliada em 200x



(a)



(b)

Fonte: Autora, 2024

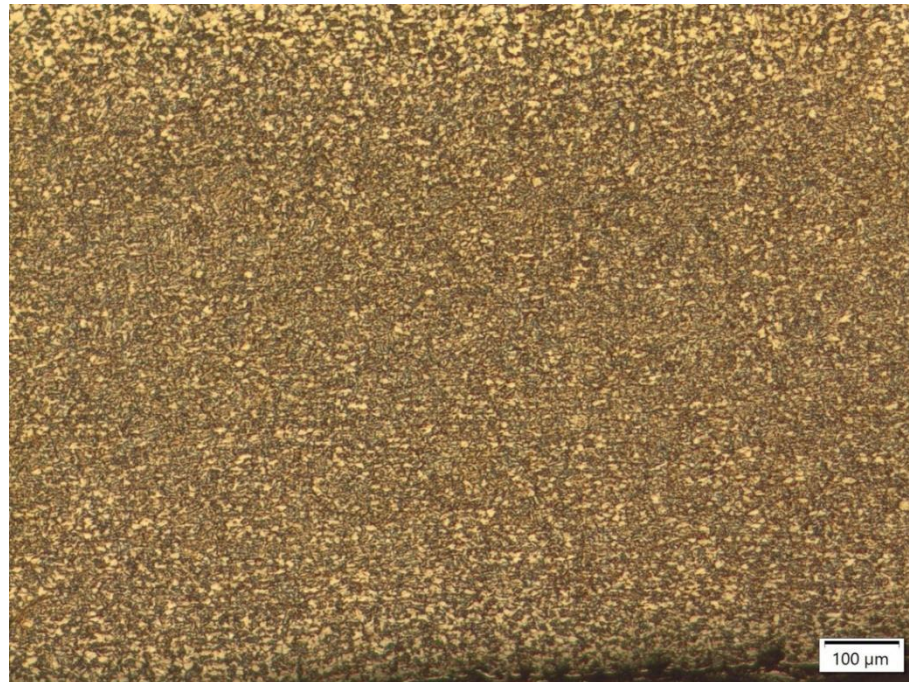
Compreender a profundidade e a natureza dessa camada é fundamental para a otimização dos processos de soldagem e tratamento térmico, assegurando que as propriedades desejadas do material sejam mantidas e que a durabilidade das estruturas metálicas seja garantida. A análise detalhada dessas microestruturas pode

fornecer insights valiosos para o desenvolvimento de melhores práticas na fabricação e manutenção de componentes metálicos. Os tubos utilizados foram laminados a frio para fabricação. Esse processo envolve a deformação plástica do material à temperatura ambiente ou a temperaturas inferiores à temperatura de recristalização. Este processo é realizado para reduzir a espessura do material, aumentar a resistência e melhorar o acabamento superficial. Durante o laminado a frio, o aço é passado através de rolos, onde é comprimido e moldado na forma desejada.

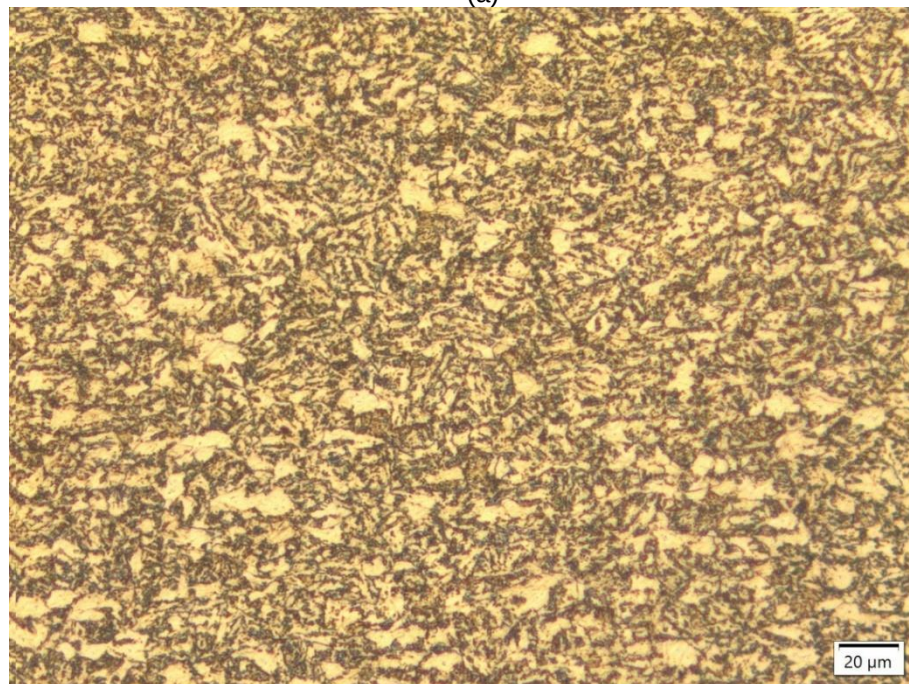
A descarbonetação do aço SAE 4130 resulta na formação de ferrita na superfície do material, que é uma fase mais macia e dúctil em comparação com a cementita ou a martensita. Essa transição de fases pode ser problemática, pois a ferrita pode reduzir a dureza e a resistência à tração do material. Entende-se que essa descarbonetação possui correlação com o processo de fabricação dos tubos. Na revisão bibliográfica ressaltou-se os desafios do processo. A trefilação a frio é um processo amplamente utilizado na indústria metalúrgica, mas pode apresentar desafios, como a descarbonetação do material. Essa diminuição do carbono é uma preocupação significativa, pois, conforme destacado por Davis (1996), pode afetar negativamente as propriedades mecânicas do aço, incluindo dureza e resistência à tração.. A descarbonetação refere-se à perda de carbono da superfície do material, resultando em uma camada superficial que pode ter propriedades mecânicas diferentes da parte interna do material.

A presença de uma camada descarbonetada e a formação de ferrita podem impactar negativamente as propriedades mecânicas do aço SAE 4130 laminado a frio. A resistência à tração e a dureza do material podem ser comprometidas, o que é uma consideração importante em aplicações estruturais e mecânicas. A análise da microestrutura, incluindo a avaliação da espessura da camada descarbonetada, é essencial para entender o comportamento do material sob carga. A descarbonetação em aços como o SAE 4130 laminado a frio é um fenômeno que pode afetar significativamente o desempenho do material. Compreender os mecanismos subjacentes e as condições que levam à descarbonetação é crucial para otimizar processos de fabricação e garantir que os produtos atendam aos requisitos de desempenho e segurança em aplicações industriais. No núcleo identificou-se uma microestrutura homogênea formada por perlita e ferrita, característica do aço SAE 4130 (ver Figura 20).

Figura 20 – Metal de base (a) Micrografia do núcleo ampliada em 50X, (b) micrografia do núcleo ampliada em 200X



(a)



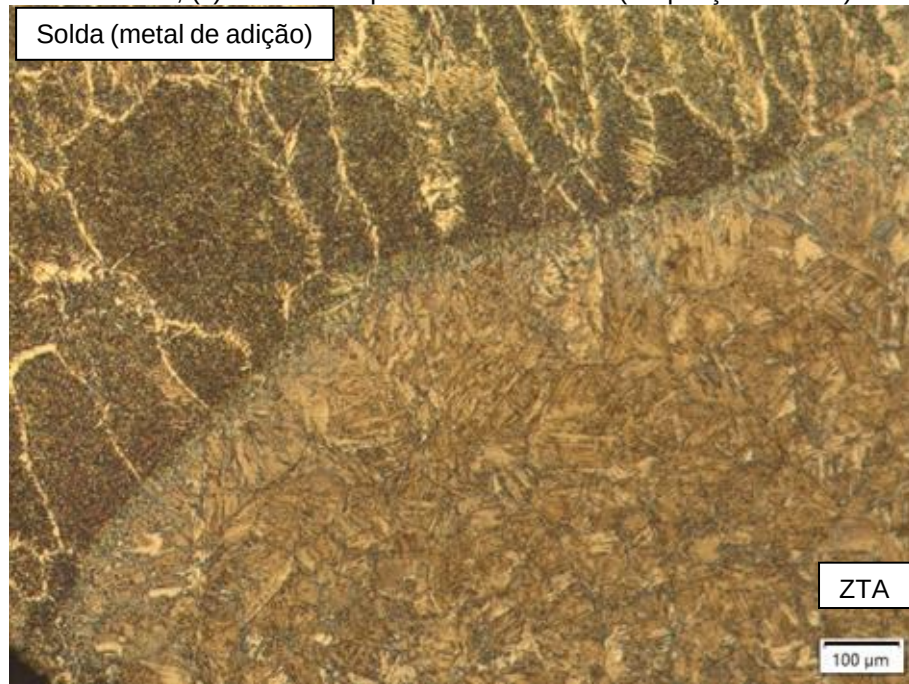
(b)

Fonte: Autora, 2024

Os resultados da análise indicam que a temperatura de pré-aquecimento exerce uma influência significativa na microestrutura. O pré-aquecimento a 250 °C promove uma transição de fase mais controlada, resultando em uma microestrutura mais homogênea e, conseqüentemente, em melhor desempenho mecânico. A formação de ferrita nas amostras sugere que a perda de carbono pode comprometer a dureza inicial, mas a homogeneidade obtida com o pré-aquecimento pode

compensar essa desvantagem. Portanto, o controle da temperatura de pré-aquecimento é crucial para otimizar a qualidade das soldas e garantir a integridade estrutural das aplicações, especialmente em componentes metálicos que exigem alta resistência e durabilidade.

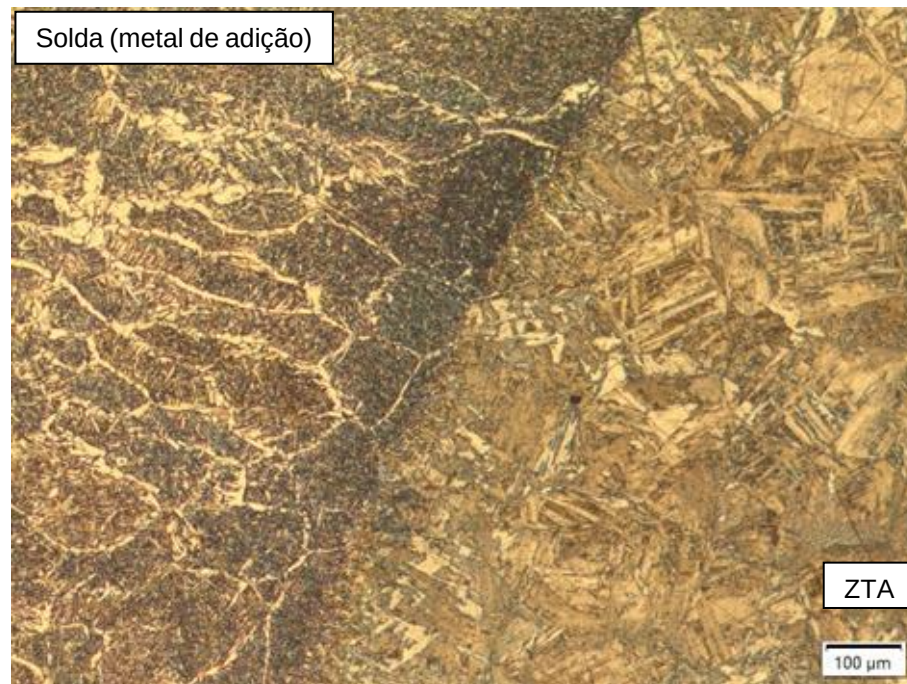
Figura 21 – Micrografias das Amostras de Aço SAE 4130 soldadas: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C (Ampliação de 50X)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora, 2024

A análise da Zona Térmica Afetada (ZTA) revelou diferenças significativas nas microestruturas das amostras soldadas, dependendo da aplicação de pré-aquecimento. Na amostra que não foi pré-aquecida, observou-se a formação de martensita não revenida, com veios aciculares que indicam fragilidade, resultado de uma mudança de fase abrupta devido ao resfriamento após a soldagem. Em contraste, a amostra pré-aquecida a 250 °C apresentou martensita que parece ter sido revenida, com predominância de fases perlíticas e ferríticas, sugerindo uma microestrutura mais homogênea. Por fim, a amostra pré-aquecida a 500°C mostrou martensita com veios aciculares e ilhas de ferrita, indicando a perda de carbono, que pode comprometer a dureza e a resistência do material.

Os resultados da análise microestrutural destacam a importância do pré-aquecimento no processo de soldagem de materiais metálicos, como o aço. A ausência de pré-aquecimento resultou em uma microestrutura frágil e menos resistente devido à formação de martensita não revenida. Por outro lado, o pré-aquecimento a 250 °C melhorou a homogeneidade da microestrutura e as propriedades mecânicas da solda.

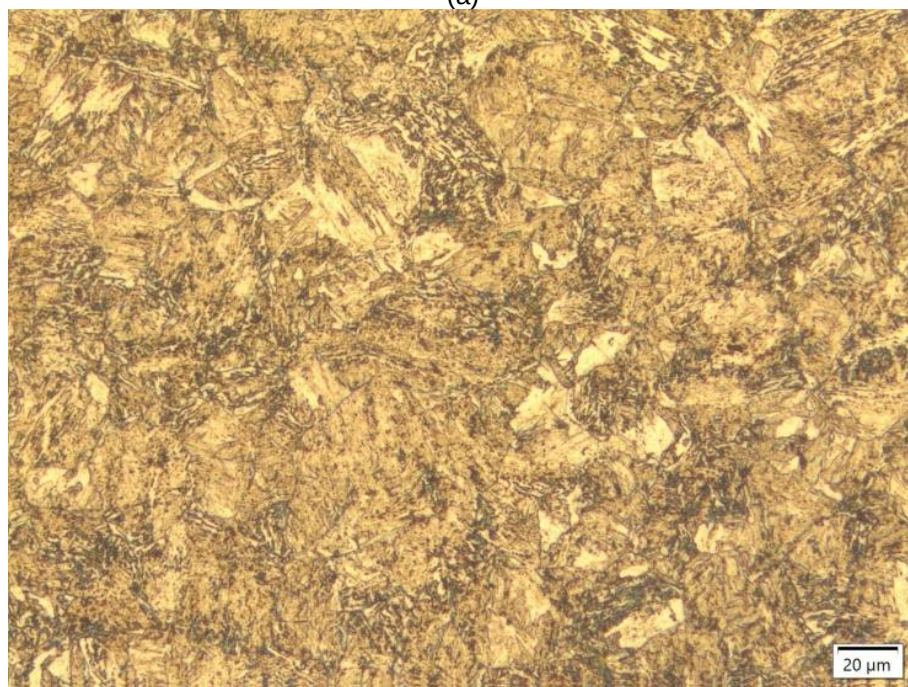
Na amostra sem pré-aquecimento observou-se a formação de martensita acicular (pontos destacados em preto na Figura 22a) com a dureza de 421 HV_{0,3}, já na amostra com pré-aquecimento de 250 °C foi identificada microestrutura mais homogênea com dureza média de 330 HV_{0,3}. Contudo, na amostra pré-aquecida a

500 °C observou-se microestrutura heterogênea com pontos dispersos de ferrita (destacados em vermelho na Figura 22c) com dureza de 282 HV_{0,3} e martensita acicular (destacados em preto na Figura 22c) com dureza de 380 HV_{0,3}.

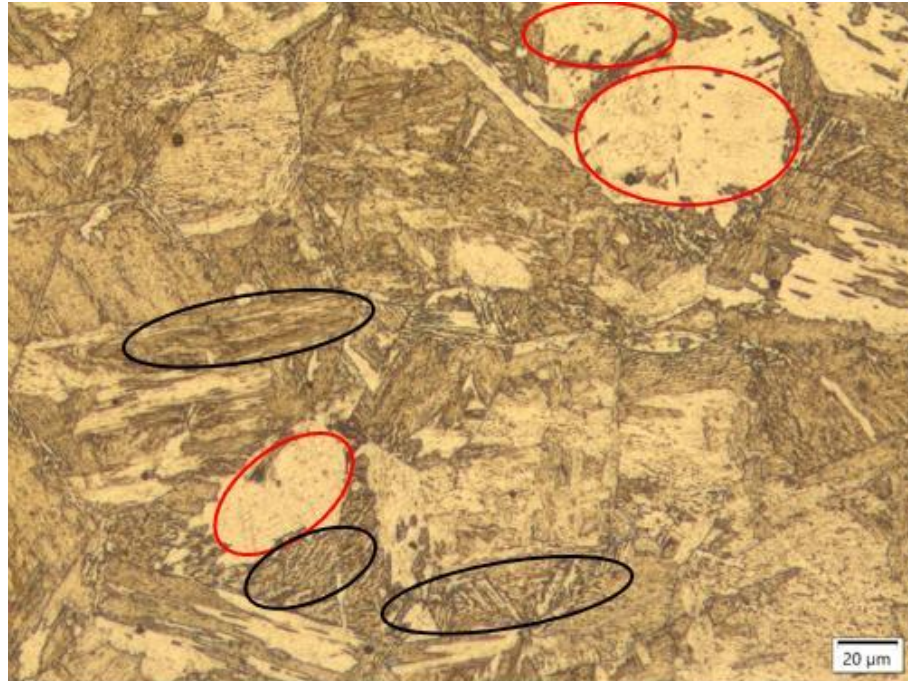
Figura 22 – Micrografias das Amostras de Aço SAE 4130 na ZTA: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C (Ampliação de 200X)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora, 2024

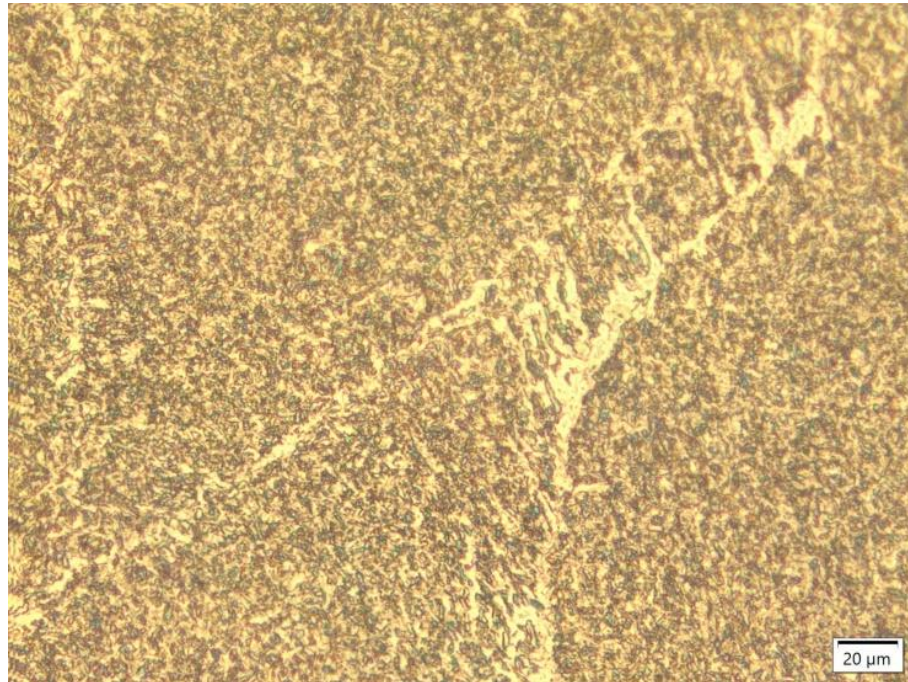
Observou-se a formação de perlita e ferrita no núcleo da solda em todas as amostras analisadas (ver Figura 23), independentemente da temperatura de pré-aquecimento aplicada. Essa constatação indica que a microestrutura do material soldado apresenta características consistentes, refletindo a influência do processo de soldagem e a composição do aço, independentemente das variações nas condições de pré-aquecimento.

4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

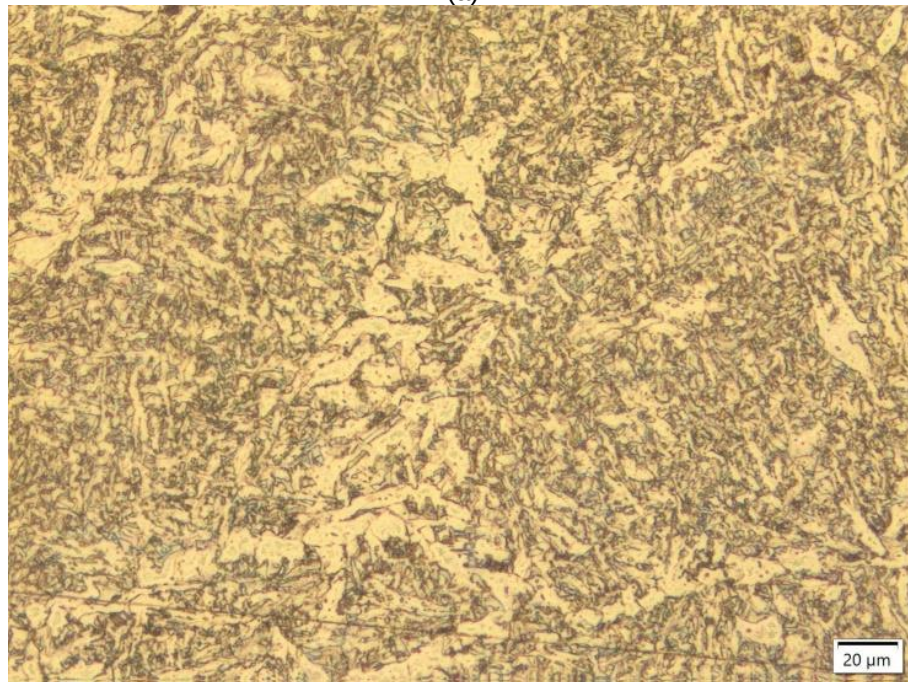
4.2.1 Dureza

No perfil de microdureza realizado no metal base, foi identificada uma dureza significativamente reduzida na superfície do tubo, medida em 158,9 HV_{0,3}. Essa região apresenta características de descarbonetação, conforme evidenciado pela análise microestrutural mostrada na Figura 19. À medida que o perfil de dureza se deslocava em direção ao núcleo da peça, observou-se um aumento na dureza, atingindo um valor de 332,0 HV_{0,3}, o que equivale a 34,5 HRC. Este comportamento indica que a descarbonetação na superfície compromete a dureza do material, enquanto a dureza no núcleo é consideravelmente mais alta, refletindo uma microestrutura mais estável e resistente.

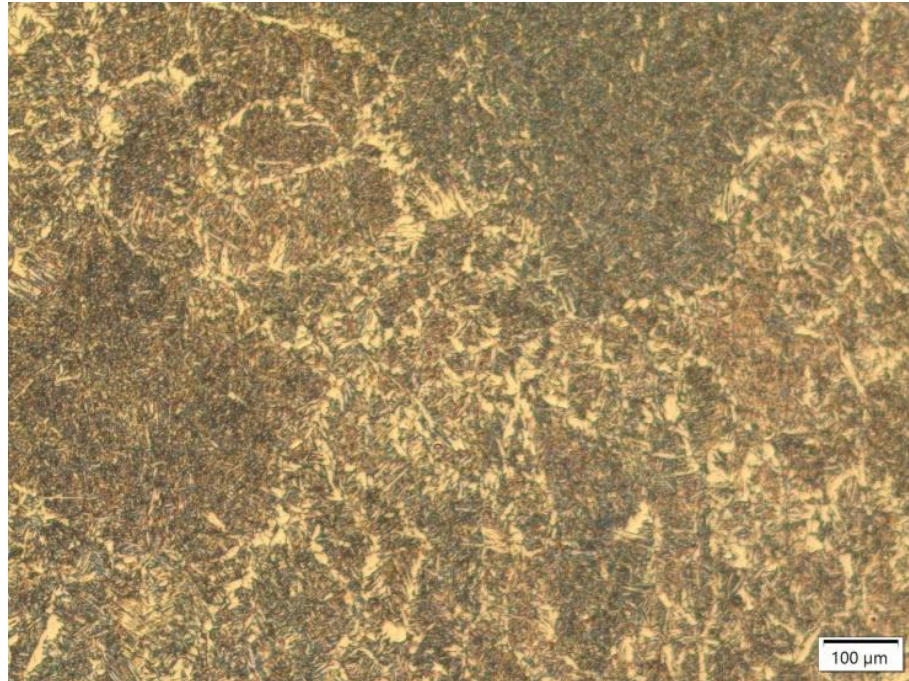
Figura 23 – Micrografias do metal solda depositado no Aço SAE 4130 soldadas: (a) Sem Pré-Aquecimento; (b) Com Pré-Aquecimento à 250 °C; (c) Com Pré-Aquecimento à 500 °C (Ampliação de 200X)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora, 2024

No ensaio de dureza realizado, foram analisados os efeitos da temperatura de pré-aquecimento na propriedade mecânica do material, com ênfase na Zona Térmica Afetada (ZTA). A ZTA é a região adjacente à solda que sofre alterações microestruturais significativas devido ao aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem. Observou-se que na amostra que não passou pelo pré-aquecimento, a dureza apresentou uma heterogeneidade acentuada, variando até 424,8 HV_{0,3}. Essa grande variação na dureza indica que a microestrutura da ZTA não foi uniformemente tratada, resultando em diferentes propriedades mecânicas que podem comprometer a integridade estrutural do material soldado.

Em contrapartida, a amostra que foi pré-aquecida a 250 °C demonstrou uma microestrutura mais homogênea. A uniformidade na distribuição dos grãos contribuiu para uma maior estabilidade nas propriedades mecânicas. Como resultado, a dureza na ZTA apresentou menores valores, atingindo um valor máximo de 371,0 HV_{0,3}. Este comportamento sugere que o pré-aquecimento a 250 °C favorece a redução da fragilidade e aprimora a resistência do material na região afetada pelo calor. Por outro lado, a amostra que recebeu pré-aquecimento a 500 °C apresentou uma variação nos valores de dureza observados, com resultados mais baixos, alcançando uma dureza máxima de 330,2 HV_{0,3}. Os resultados estão explícitos na Tabela 5 e Figura 24.

Tabela 5 – Dureza na Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Distância do “ponto zero” (mm)	Sem pré-aquecimento		Pré-aquecimento 250 °C		Pré-aquecimento acima de 250 °C	
0,05	304,8	367,1	315,8	307,0	298,7	309,5
0,10	406,6	339,0	318,6	298,0	323,0	315,9
0,20	350,6	361,2	321,9	334,4	330,2	324,1
0,30	336,8	365,8	342,0	318,3	282,5	318,6
0,40	421,4	371,0	343,3	346,0	329,1	330,0
0,50	424,8	361,6	371,0	348,1	350,2	330,0

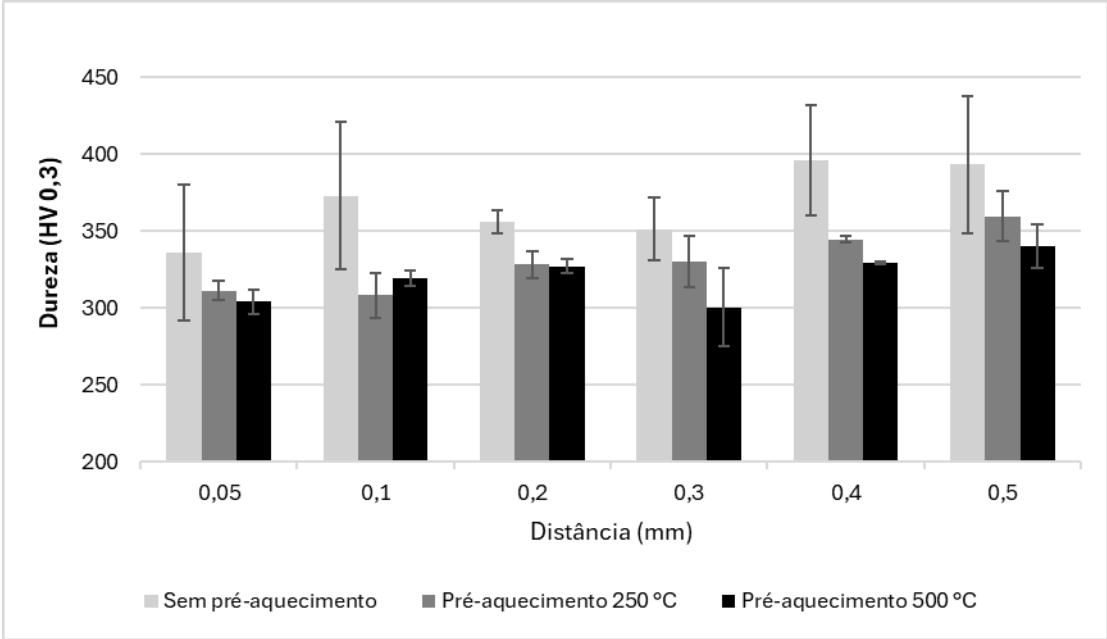
*Maiores detalhes podem ser observados no apêndice.

Fonte: Autora, 2024

Essas observações ressaltam a importância do controle da temperatura de pré-aquecimento no processo de soldagem, uma vez que ela influencia diretamente as propriedades mecânicas e a integridade da solda. A análise comparativa entre as amostras destaca que um pré-aquecimento adequado pode melhorar a homogeneidade da microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do material, enquanto temperaturas excessivas podem comprometer a dureza e a qualidade do produto. Ainda, o pré-aquecimento reduz a quantidade de martensita não revenida na ZTA.

No ensaio de dureza realizado, foram analisadas as variações de dureza na zona fundida da junta com o objetivo de compreender as conseqüências do pré-aquecimento nas propriedades mecânicas do material. A expectativa era que o pré-aquecimento influenciasse significativamente a dureza, promovendo uma microestrutura mais homogênea e reduzindo tensões residuais que poderiam afetar a resistência da solda. No entanto, os resultados obtidos mostraram uma similaridade notável em todas as amostras analisadas, independentemente da temperatura de pré-aquecimento aplicada. Essa constatação sugere que, apesar das variações de temperatura, as condições de soldagem e os parâmetros do processo podem ter resultado em uma microestrutura semelhante nas zonas termicamente afetadas (ZTA). Essa homogeneidade pode ser interpretada como um indicativo de que a temperatura de pré-aquecimento não teve um impacto significativo nas propriedades de dureza das amostras testadas (ver Tabela 6).

Figura 24 – Resultados de dureza na ZTA



Fonte: Autora, 2024

Tabela 6 – Dureza do metal de solda

Distância do “ponto zero” (mm)	Sem pré-aquecimento		Pré-aquecimento 250 °C		Pré-aquecimento 500 °C	
0,05	209,4	273,6	239,0	240,3	216,1	243,1
0,10	223,5	257,2	243,3	237,0	214,0	282,4
0,20	244,3	247,6	241,1	248,8	236,3	275,2
0,30	223,7	256,9	229,0	235,3	238,1	268,5
0,40	242,6	248,7	248,5	244,1	226,3	271,5
0,50	231,7	249,2	258,3	247,7	223,0	277,9

*Maiores detalhes podem ser observados no apêndice.

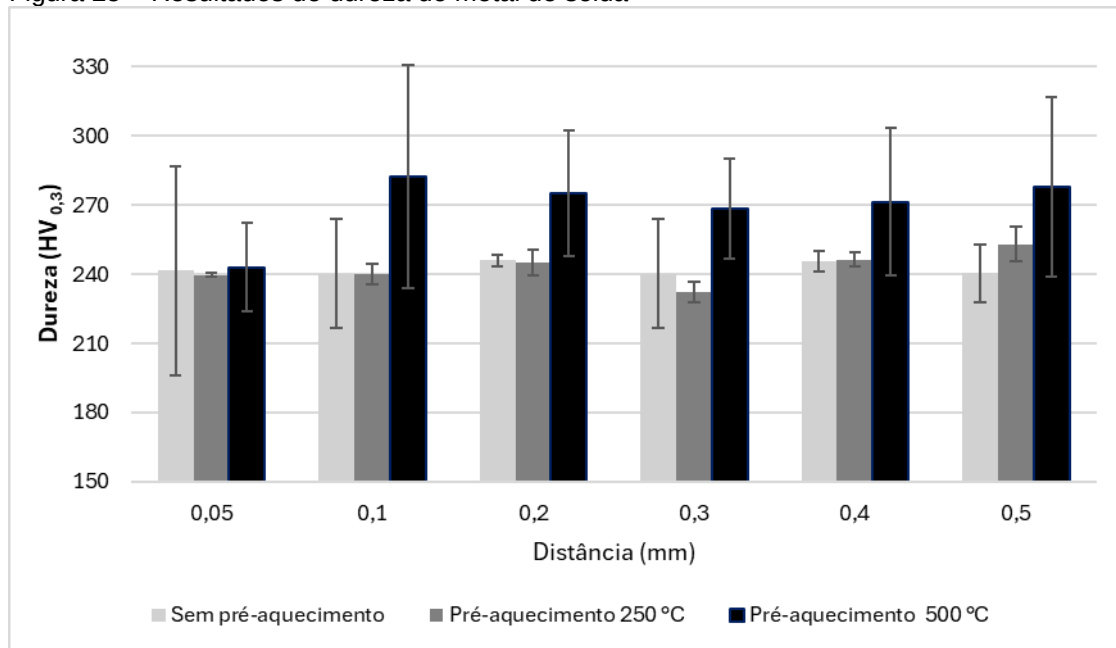
Fonte: Autora, 2024

Além disso, a similaridade nos resultados de dureza pode indicar que outros fatores, como a composição química do material, a velocidade de resfriamento, e as características do processo de soldagem, também desempenham um papel crucial na determinação da dureza da solda. Assim, as expectativas de que o pré-aquecimento geraria uma diferença significativa na dureza das amostras não foram confirmadas.

Essas observações ressaltam a complexidade do comportamento da solda e a necessidade de realizar investigações adicionais para entender melhor as interações

entre o pré-aquecimento, a soldagem e as propriedades mecânicas dos materiais. Os resultados sugerem que, embora o pré-aquecimento seja uma prática recomendada em muitos casos, sua eficácia em alterar a dureza da solda pode depender de outros fatores contextuais que merecem uma análise mais aprofundada, porém os resultados obtidos são apenas uma forma de validar que não houve influência do pré-aquecimento e podem ser observados na Figura 25.

Figura 25 – Resultados de dureza do metal de solda



Fonte: Autora, 2024

4.2.2 Ensaio de Flexão

A resistência média suportada pelas três amostras apresentou uma carga média de 14 kN. No entanto, as principais diferenças são evidentes na variação da carga após o alcance da carga máxima. No ensaio de flexão realizado na amostra sem pré-aquecimento, observou-se que a carga máxima até o ponto de ruptura foi de 13,6 kN, resultando em uma tensão de flexão de 166,21 MPa e uma energia no ponto máximo de força de 200,5 J. O gráfico também revela um ruído no ensaio após a carga máxima resistida. Esse ruído é evidenciado pelo fato de que a força continuou sendo aplicada na região superior do tubo. Contudo, o rompimento foi na Zona Térmica Afetada (ZTA), conforme indicado na Figura 26 e 27. No ensaio de flexão realizado na amostra com pré-aquecimento de 250 °C, observa-se que a carga máxima até o ponto de ruptura encontra-se em 14,5 kN, sendo a tensão à flexão evidenciada na força máxima com 177,5 MPa e a Energia no ponto máximo de força de 229,5 J.

Figura 26 – Resultados obtidos no ensaio de flexão das amostras sem pré-aquecimento



Fonte: Autora, 2024

Figura 27 – Amostras sem pré-aquecimento após o ensaio: (a) Vista superior da amostra; (b) Vista frontal da amostra



Fonte: Autora, 2024

No ensaio de flexão realizado na amostra com pré-aquecimento de 500 °C, observa-se que a carga máxima até o ponto de ruptura encontra-se em 14,7 kN, sendo a tensão à flexão evidenciada na força máxima com 179,4 MPa e a Energia no ponto máximo de força de 267,1 J (ver Figuras 30 e 31). Além do mais, foram analisados os efeitos do pré-aquecimento nas propriedades mecânicas das amostras. As variações nos resultados obtidos indicam uma relação significativa entre a temperatura de pré-aquecimento e a resistência mecânica das amostras testadas.

A amostra que não foi submetida a pré-aquecimento apresentou uma resistência máxima de 13,63 kN. Esse valor relativamente baixo sugere que a microestrutura da amostra, em estado não tratado, pode ter sido suscetível a tensões internas e a falhas sob carga, resultando em menor capacidade de suportar forças aplicadas. A ausência de pré-aquecimento pode ter contribuído para uma maior

fragilidade na zona afetada pelo calor (ZTA) durante a aplicação da força, devido a formação de martensita não revenida (ver Figura 22).

Figura 28 – Resultados obtidos no ensaio de flexão das amostras com pré-aquecimento de 250 °C



Fonte: Autora, 2024

Figura 29 – Amostras com pré-aquecimento de 250 °C após o ensaio: (a) Vista superior da amostra; (b) Vista frontal da amostra



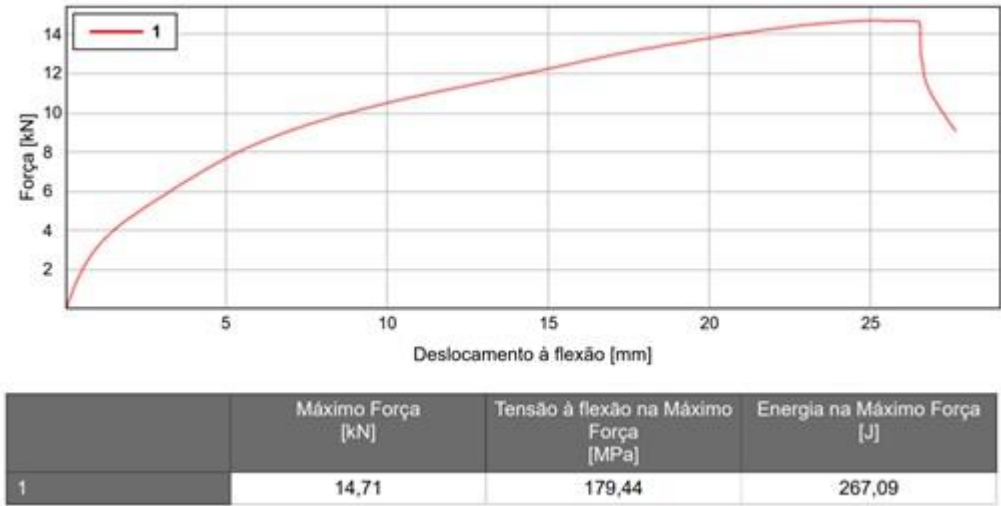
Fonte: Autora, 2024

Por outro lado, a amostra que foi pré-aquecida a 250 °C demonstrou uma resistência significativamente melhorada, atingindo uma força máxima de 14,55 kN. O pré-aquecimento a essa temperatura pode ter promovido a redução das tensões residuais na microestrutura, permitindo uma melhor distribuição de estresse durante o ensaio de flexão. Além disso, a temperatura de pré-aquecimento pode ter facilitado a formação de uma microestrutura mais homogênea, o que é crucial para melhorar a resistência mecânica.

A amostra que foi pré-aquecida a temperatura de 500 °C, apresentou a maior resistência, alcançando uma força máxima de 14,71 kN (ver Figura 32). Esse

resultado indica que o aumento da temperatura de pré-aquecimento não apenas manteve a homogeneidade da microestrutura, mas também potencialmente melhorou a ductilidade e a tenacidade do material. O aquecimento elevado pode ter permitido a recristalização de grãos e a redução de defeitos microestruturais, resultando em uma resistência ainda maior sob as condições de teste.

Figura 30 – Resultados obtidos no ensaio de flexão das amostras com pré-aquecimento de 500 °C



Fonte: Autora, 2024

Figura 31 – Amostras com pré-aquecimento de 500 °C após o ensaio: (a) Vista superior da amostra; (b) Vista frontal da amostra

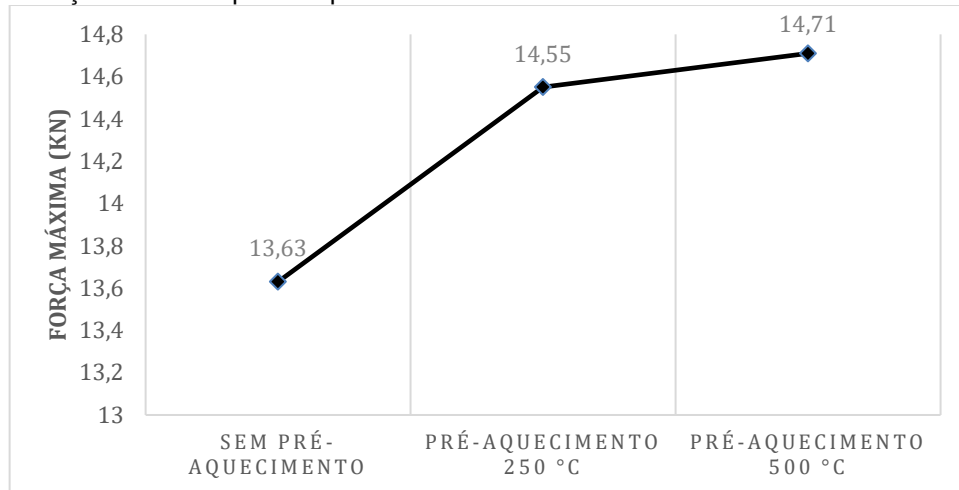


Fonte: Autora, 2024

Em resumo, os resultados do ensaio de flexão evidenciam que a temperatura de pré-aquecimento desempenha um papel crucial nas propriedades mecânicas das amostras testadas. A aplicação de pré-aquecimento contribui para a melhoria da resistência à flexão, enquanto a ausência deste tratamento resulta em menores capacidades de carga. Esses achados são significativos para a compreensão do comportamento mecânico do material sob diferentes condições de tratamento térmico

e têm implicações importantes para a prática de engenharia na soldagem e no tratamento de materiais.

Figura 32 – Força máxima suportada pelas amostras no ensaio de flexão



Fonte: Autora, 2024

A análise das tensões de flexão na força máxima revela informações significativas sobre o comportamento mecânico das amostras em função do tratamento de pré-aquecimento. As variações observadas nas tensões suportadas por cada amostra indicam a influência direta da temperatura de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas do material.

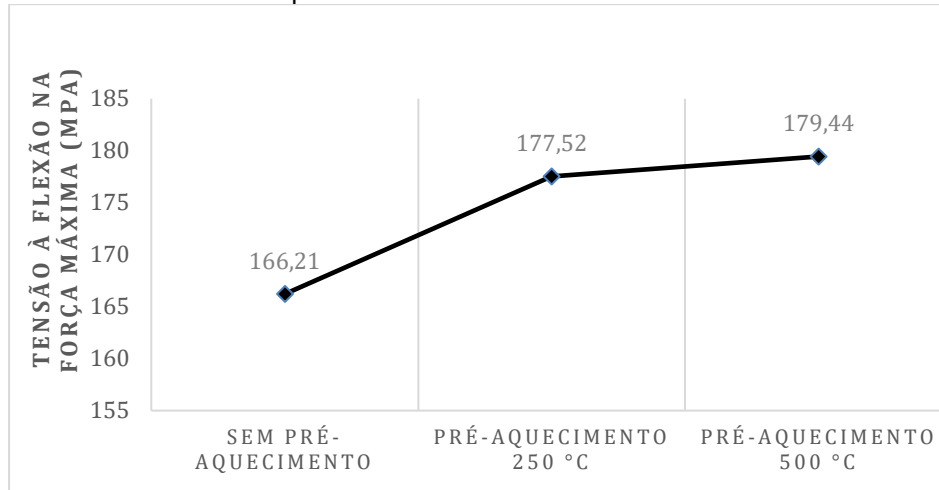
A amostra que não foi submetida a nenhum tratamento térmico apresentou uma tensão máxima de 166,2 MPa. Esse valor relativamente baixo sugere que a microestrutura da amostra estava mais suscetível a falhas sob carga. A falta de pré-aquecimento pode ter contribuído para uma maior fragilidade, resultando em uma menor capacidade de suportar tensões elevadas antes da deformação ou ruptura.

A amostra pré-aquecida a 250 °C demonstrou uma resistência significativamente melhorada, suportando uma tensão máxima de 177,5 MPa. O aumento da tensão suportada pode ser atribuído à redução das tensões internas e à homogeneização da microestrutura. Esse tratamento térmico pode ter facilitado a dissipação de tensões residuais e promovido uma melhor distribuição de estresse, permitindo que o material resista a cargas maiores.

A amostra que foi submetida a um pré-aquecimento de 500 °C atingiu a maior resistência à flexão, com uma tensão máxima de 179,4 MPa (ver Figura 33). Esse resultado indica que temperaturas mais elevadas de pré-aquecimento não apenas mantiveram a homogeneidade da microestrutura, mas também melhoraram a

ductilidade e a tenacidade do material. O aquecimento adicional pode ter promovido processos como a recristalização de grãos, que ajudam a reduzir defeitos microestruturais e a aumentar a resistência mecânica.

Figura 33 – Tensão máxima obtida pelas amostras no ensaio de flexão



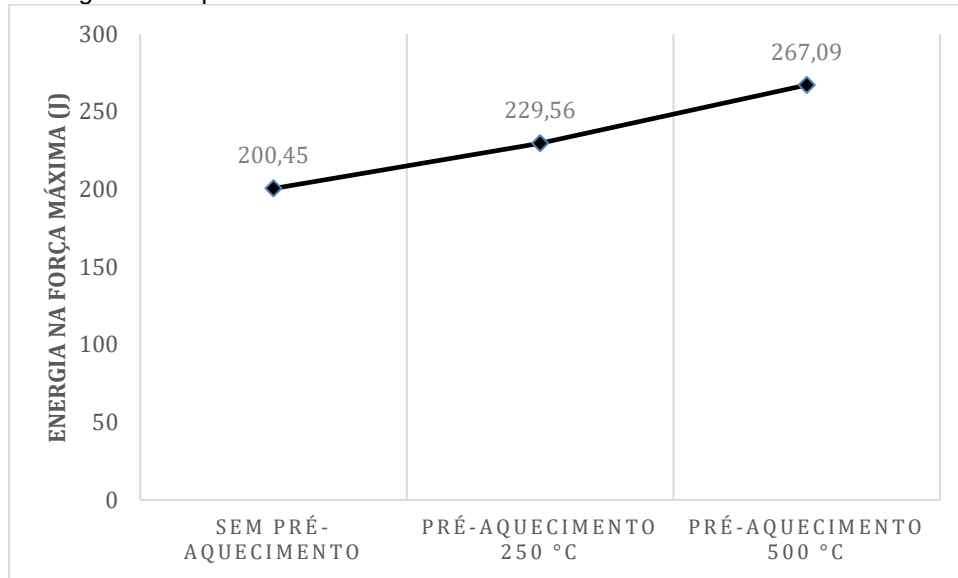
Fonte: Autora, 2024

A análise da energia suportada na força máxima revela diferenças significativas entre as amostras em função do tratamento de pré-aquecimento aplicado. Os resultados obtidos demonstram como a temperatura de pré-aquecimento influencia a capacidade de absorção de energia do material durante o ensaio, refletindo diretamente na sua resistência e tenacidade.

A amostra que não recebeu pré-aquecimento apresentou uma capacidade de absorção de energia de 200,5 J antes da ruptura. Este valor relativamente baixo sugere que a microestrutura do material estava mais suscetível a falhas, possivelmente devido ao aumento das tensões residuais e à presença de microdefeitos. A falta de pré-aquecimento pode ter contribuído para uma maior fragilidade e menor ductilidade, resultando em uma menor capacidade de absorver energia antes da falha.

A amostra pré-aquecida a 250 °C demonstrou uma capacidade de absorção de energia significativamente maior, alcançando 229,5 J (ver Figura 34). O aumento na energia suportada pode ser atribuído à redução das tensões internas e à melhora na homogeneidade da microestrutura. O pré-aquecimento a essa temperatura provavelmente facilitou a dissipação de tensões residuais, permitindo que o material absorvesse mais energia antes de atingir a ruptura. Essa melhoria na ductilidade e resistência é crucial para aplicações onde a absorção de impactos é necessária.

Figura 34 – Energia obtida pelas amostras no ensaio de flexão



Fonte: Autora, 2024

A amostra que foi submetida a um pré-aquecimento de 500°C, apresentou a maior capacidade de absorção de energia, atingindo 267,1 J. Esse resultado indica que temperaturas mais elevadas de pré-aquecimento não só melhoraram a homogeneidade da microestrutura, mas também aumentaram a tenacidade do material. A energia absorvida mais alta reflete a capacidade do material de resistir a deformações plásticas antes da falha, o que é fundamental em aplicações que envolvem cargas dinâmicas ou choques.

CONCLUSÃO

Este estudo investigou a influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas de perfis tubulares em aço SAE 4130, soldados pelo processo MAG. A análise revelou informações cruciais sobre como o pré-aquecimento afeta a resistência e a homogeneidade microestrutural do material, respondendo a questões fundamentais sobre a microestrutura do metal de solda e da zona afetada pelo calor.

Os resultados indicaram que o pré-aquecimento a 250 °C resultou em uma microestrutura mais uniforme, com redução da segregação de fases, contribuindo para um desempenho mecânico superior. A amostra não pré-aquecida apresentou uma dureza com alta heterogeneidade, enquanto a amostra com pré-aquecimento a 250 °C demonstrou uma dureza média de 371,0 HV0,3. Em contraste, a amostra submetida a pré-aquecimento superior a 250 °C apresentou uma redução na dureza, alcançando 330,2 HV0,3, o que sugere que temperaturas excessivas podem comprometer as propriedades mecânicas.

Adicionalmente, a análise da Zona Térmica Afetada (ZTA) revelou a formação de martensita na região de transição, indicando a importância de um controle rigoroso da temperatura de pré-aquecimento para evitar a fragilidade do material. A presença de ferrita acicular e a formação de uma camada descarbonetada foram observadas, o que pode comprometer a resistência mecânica.

Os ensaios de flexão destacaram que o pré-aquecimento é determinante para a resistência das amostras, com a amostra pré-aquecida a 250 °C sustentando uma tensão máxima maior. A análise da energia suportada na força máxima indicou que um maior pré-aquecimento aumenta a capacidade do material de absorver energia antes de falhar, o que é essencial para a integridade estrutural em aplicações de engenharia.

Em suma, os achados deste estudo ressaltam que o controle da temperatura de pré-aquecimento é fundamental para otimizar a qualidade das soldas no aço SAE 4130. Essa prática não apenas melhora a microestrutura e as propriedades mecânicas do material, mas também assegura a segurança e a durabilidade das estruturas metálicas. As informações obtidas através dos ensaios e análises realizadas podem ser utilizadas para aprimorar processos de soldagem e tratamento térmico, contribuindo para a qualidade e confiabilidade dos produtos fabricados. Recomenda-

se a continuidade de estudos nesta área para aprofundar a compreensão das interações entre o pré-aquecimento, a soldagem e as propriedades mecânicas dos materiais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, João. **Soldabilidade dos aços**: teoria e prática. São Paulo: Blucher, 2023.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding of low alloy steels**. Miami: AWS, 2011.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook**. 9. ed. Miami: American Welding Society, 2010.
- ANNIBAL, J. A.; GONÇALVES, A. F.; SILVA, R. M. **Aços de alta resistência na indústria automotiva**: uma análise das propriedades e aplicações. São Paulo: Blucher, 2005.
- BAKER, J. **Welding and metal fabrication**. New York: McGraw-Hill, 2008.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell. **Mechanics of materials**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: microstructure and properties**. 2. ed. London: Institute of Materials, 2006.
- BITTENCOURT, Ana; SILVA, Roberto. **Normas técnicas para ensaios de flexão em perfis tubulares**. São Paulo: Editora Técnica, 2019.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.
- COOMAN, B. C. **Advanced high strength steels: a review of the state of the art**. In: *Materials Science and Engineering: A*, 2004.
- COSTA, André. **Aços de baixa liga**: propriedades e aplicações. Belo Horizonte: UFMG, 2023.
- COSTA, André. **Engenharia de soldagem**: princípios e aplicações. Belo Horizonte: UFMG, 2021.
- DALCIN, R. L. **Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- DAVIS, J. R. **Alloying elements in steel**. Materials Park: ASM International, 1996.
- DAVIS, J. R. **Corrosion of weldments**. Materials Park: ASM International, 2006.
- DELAGNES, P.; et al. **Advanced high strength steels: a review of the state of the art**. In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS*, 2012.

EQUIPE BAJA SINUELO. **Relatório do Projeto Baja Sinuelo**. Horizontina: FAHOR – Faculdade Horizontina, 2024.

ESAB. **Manual de soldagem**. São Paulo: ESAB, 2004.

EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 3. EN 1993-1-8:2005. **Eurocode 3: design of steel structures - part 1-8: design of joints**. ECS, 2005.

GERDAU. **Aços: Propriedades e Aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: Gerdau, 2020.

GORNI, R. *Microstructure and mechanical properties of advanced high strength steels*. **Materials Science Forum**, 2008.

HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. 10. ed. Boston: Pearson, 2017.

HOBACHER, A. **Recommendations for fatigue design of welded joints and components**. IIW document XIII-1823-07. Paris: International Institute of Welding, 2008.

JACQUES, P. J.; *et al.* *Dynamic behavior of advanced high strength steels*. **International Journal of Impact Engineering**, 2001.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 7. ed. Boston: Pearson, 2006.

KRAUSS, G. **Steels: processing, structure, and performance**. 2. ed. Materials Park: ASM International, 2005.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding**. 6. ed. Oxford: Woodhead Publishing, 1999.

LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Dmitri K. **Welding metallurgy**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

LIPPOLD, John F.; KOTECKI, D. J. **Welding Alloys**. New York: Wiley, 2005.

LIU, W.; ZHANG, L. **Quality criteria in MAG welding**. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

MILLER, John. **Soldagem MAG**. São Paulo: Miller Electric Mfg. Co., 1994.

MILLER, W. **Welding principles and applications**. 7. ed. Clifton Park: Delmar Cengage Learning, 2010.

MILLER, W. **Welding principles and applications**. 8. ed. Clifton Park: Delmar Cengage Learning, 2014.

MODENESI, Paulo J. **Descontinuidades em juntas soldadas**. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

NUNES, T. C.; FREITAS, A. M. S.; PAULA, G. D.; FREITAS, M. S. R. Análise de ligações metálicas soldadas entre pilar de seção RHS e viga de seção I. **Revista da Estrutura de Aço**, v.1, n. 3, p. 167–180, dez 2012.

OLIVEIRA, L.; SANTOS, P. **Impacto da temperatura de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas dos aços**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2021.

PEREIRA, Carlos. **Metalurgia dos aços: trefilação e propriedades mecânicas**. Curitiba: UFPR, 2021.

PEREIRA, J. R. **Tecnologia de Soldagem: princípios e práticas**. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

PEREIRA, Carlos. **Propriedades mecânicas dos aços de baixa liga**. Curitiba: UFPR, 2021.

REIS, S. L. F. **Análise teórico-experimental de ligações metálicas soldadas entre coluna em perfil tubular circular e viga em perfil de seção transversal “I”**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SACCHELLI, Rafael. **Aço SAE 4130: propriedades e aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2022.

SAE BRASIL. **Regulamento Baja SAE Brasil 2024**. São Paulo: SAE BRASIL, 2024.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG – melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Blucher, 2008.

SILVA, J. **Processos de fabricação de aços: trefilação e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2018.

SILVA, João. **Processos de fabricação de aços: trefilação e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2022.

SILVA, M. **Aços de alta resistência: aplicações e desempenho**. Porto Alegre: Editora Sul, 2020.

SOMERS, P. **Steel classification and properties**. London: Chapman & Hall, 1993.

SSAB. **SSAB Welding Handbook**. 2024. Disponível em: <https://www.ssab.com/en/support/support-and-tools/steel-handbooks/welding-handbook>. Acesso em: 18/11/2024.

SSAB TUNNPLAT. **Sheet steel joining handbook: joining of high strength steels**. Sweden: SSAB Tunnplat AB, 2004.

TAMURA, I.; *et al.* **Thermomechanical processing of high-strength low-alloy steels**. Tokyo: Butterworth-Heinemann, 1988.

TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

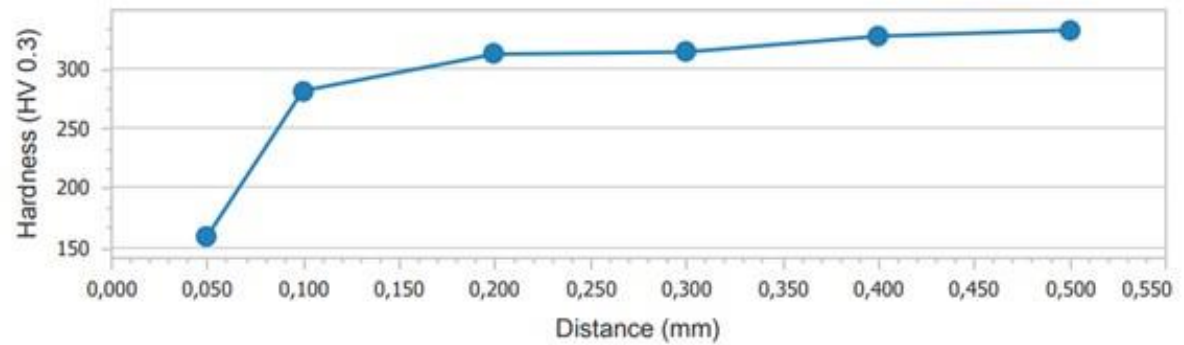
VILLANI, Paulo. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Editora Artliber, 2005.

WARDENIER, J.; KUROBANE, Y.; PACKER, J. A.; VAN DER VEGTE, G. J.; ZHAO, X.-L. **Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading (1)**. 2. ed. Construction with hollow steel sections series. CIDECT, 2008.

XU, J.; *et al.* Research on the mechanical properties of advanced high strength steels. ***Journal of Materials Science and Engineering***, 2012.

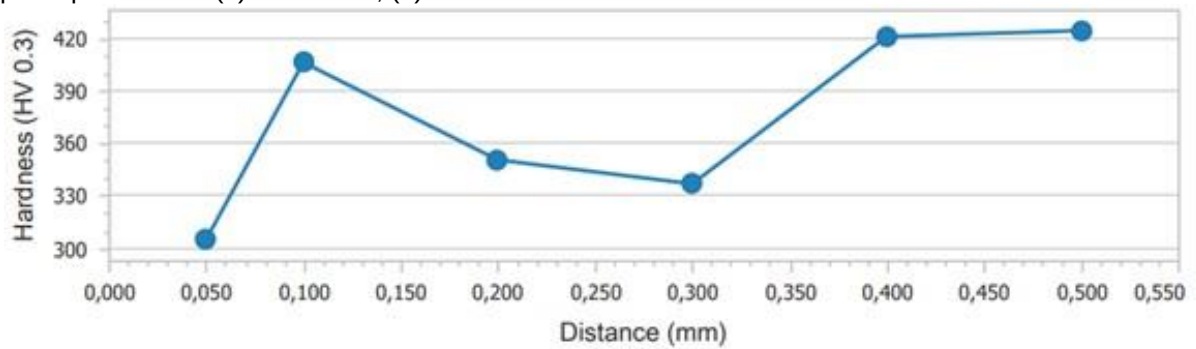
APÊNDICE – GRÁFICOS E TABELAS COM RESULTADOS DE MICRODUREZA

Figura 35 – Microdureza e identificação dos pontos de medição no material base.



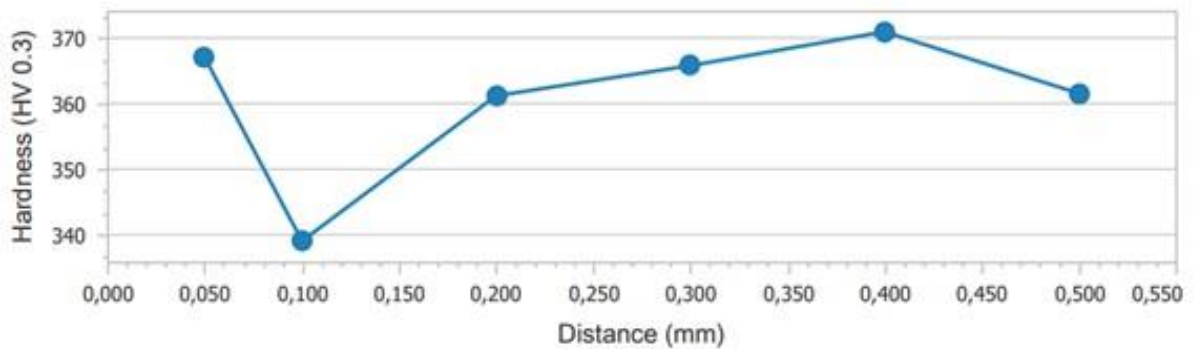
Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	158,9 HV 0.3	-	56,2 µm	62,2 µm	
2	0,100 mm	281,2 HV 0.3	27,9 HRC	45,0 µm	44,0 µm	
3	0,200 mm	311,8 HV 0.3	32,0 HRC	43,2 µm	41,2 µm	
4	0,300 mm	313,6 HV 0.3	32,3 HRC	42,7 µm	41,5 µm	
5	0,400 mm	326,9 HV 0.3	33,9 HRC	41,3 µm	41,2 µm	
6	0,500 mm	332,0 HV 0.3	34,5 HRC	39,3 µm	42,6 µm	

Figura 36 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da ZTA das amostras sem pré-aquecimento: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	304,8 HV 0.3	31,1 HRC	41,6 μm	43,8 μm	
2	0,100 mm	406,6 HV 0.3	42,1 HRC	36,8 μm	37,2 μm	
3	0,200 mm	350,6 HV 0.3	36,6 HRC	38,4 μm	41,2 μm	
4	0,300 mm	336,8 HV 0.3	35,1 HRC	42,6 μm	38,7 μm	
5	0,400 mm	421,4 HV 0.3	43,3 HRC	36,7 μm	36,0 μm	
6	0,500 mm	424,8 HV 0.3	43,6 HRC	35,5 μm	36,9 μm	

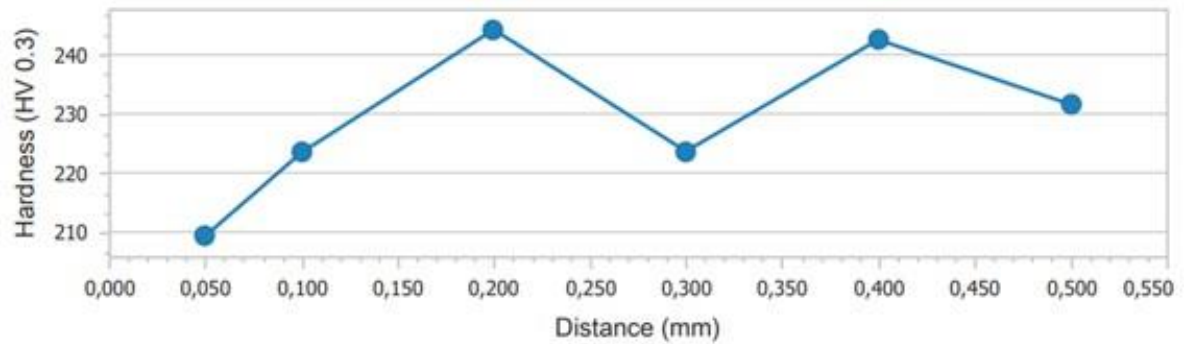
(a)



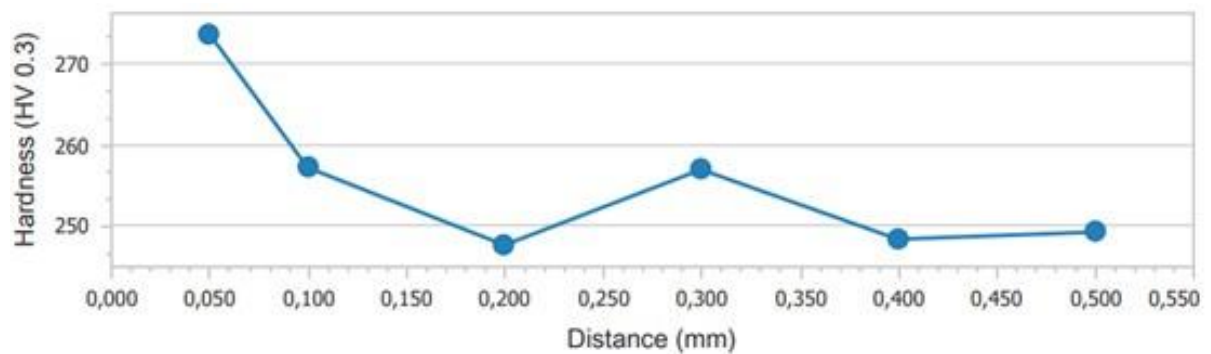
Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	367,1 HV 0.3	38,3 HRC	39,0 μm	38,9 μm	
2	0,100 mm	339,0 HV 0.3	35,3 HRC	39,8 μm	41,3 μm	
3	0,200 mm	361,2 HV 0.3	37,7 HRC	39,2 μm	39,3 μm	
4	0,300 mm	365,8 HV 0.3	38,2 HRC	39,2 μm	38,8 μm	
5	0,400 mm	371,0 HV 0.3	38,7 HRC	38,5 μm	38,9 μm	
6	0,500 mm	361,6 HV 0.3	37,8 HRC	38,9 μm	39,5 μm	

(b)

Figura 37 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da solda das amostras sem pré-aquecimento: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2

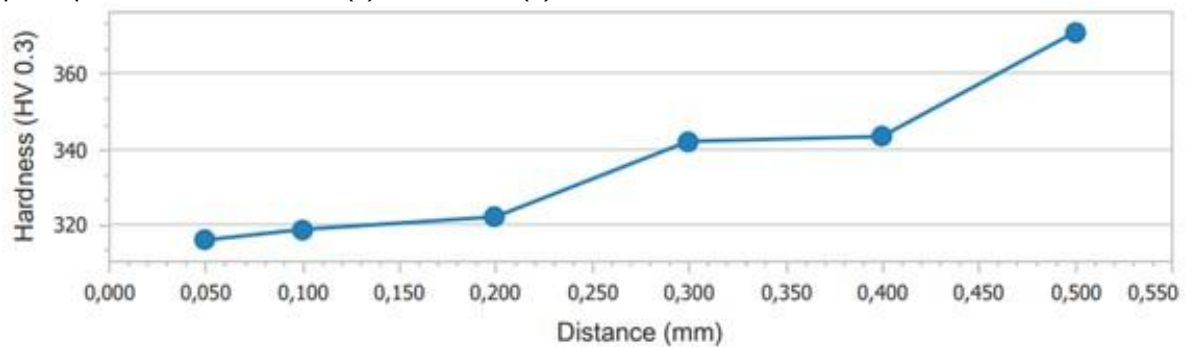


(a)

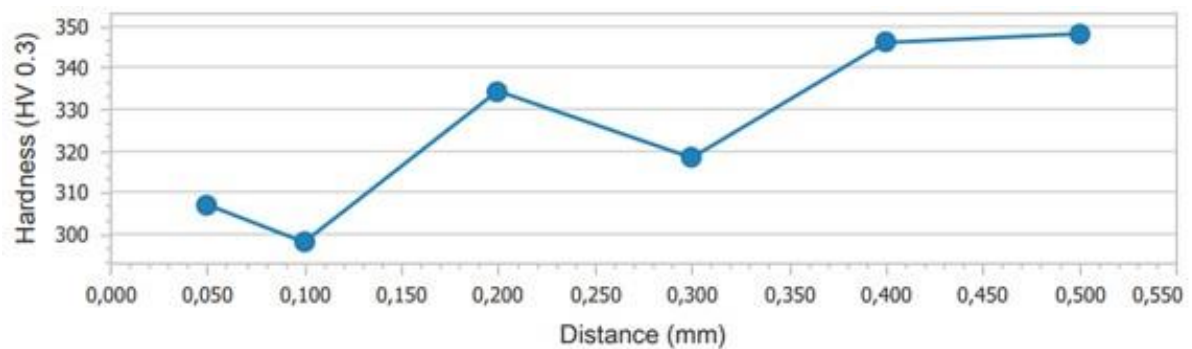


(b)

Figura 38 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da ZTA das amostras com pré-aquecimento de 250 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2

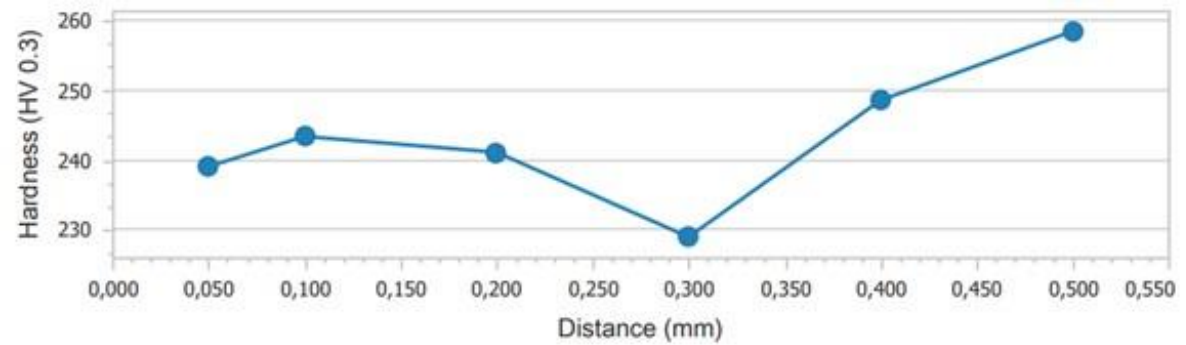


(a)



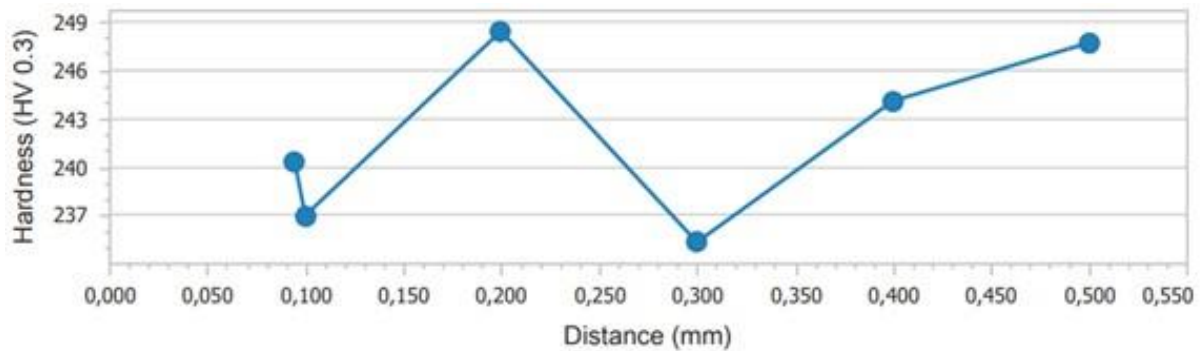
(b)

Figura 39 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da solda das amostras com pré-aquecimento à 250 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	239,0 HV 0.3	21,0 HRC	47,9 μm	48,5 μm	
2	0,100 mm	243,3 HV 0.3	21,8 HRC	46,2 μm	49,4 μm	
3	0,200 mm	241,1 HV 0.3	21,4 HRC	46,7 μm	49,4 μm	
4	0,300 mm	229,0 HV 0.3	19,1 HRC	51,4 μm	47,2 μm	
5	0,400 mm	248,5 HV 0.3	22,6 HRC	46,9 μm	47,7 μm	
6	0,500 mm	258,3 HV 0.3	24,3 HRC	46,7 μm	46,1 μm	

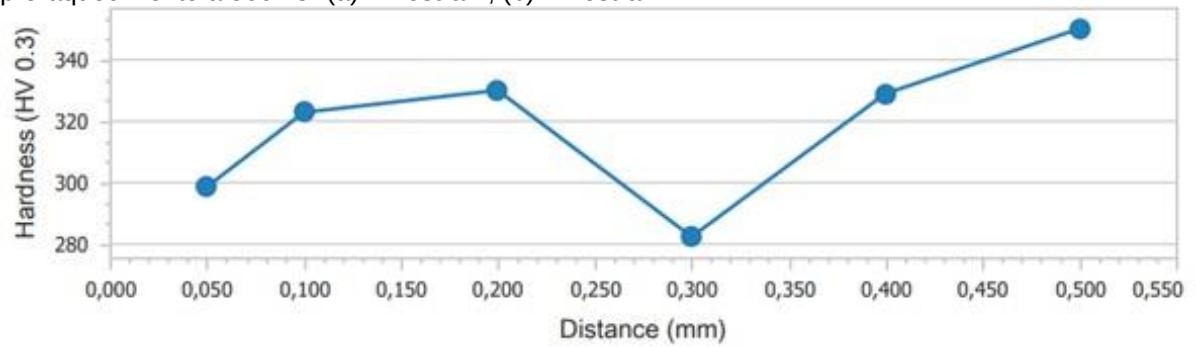
(a)



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,095 mm	240,3 HV 0.3	21,2 HRC	48,6 μm	47,6 μm	
2	0,100 mm	237,0 HV 0.3	20,6 HRC	48,0 μm	48,9 μm	
3	0,200 mm	248,4 HV 0.3	22,6 HRC	48,2 μm	46,4 μm	
4	0,300 mm	235,3 HV 0.3	20,3 HRC	47,2 μm	50,1 μm	
5	0,400 mm	244,1 HV 0.3	21,9 HRC	46,8 μm	48,7 μm	
6	0,500 mm	247,7 HV 0.3	22,5 HRC	47,0 μm	47,8 μm	

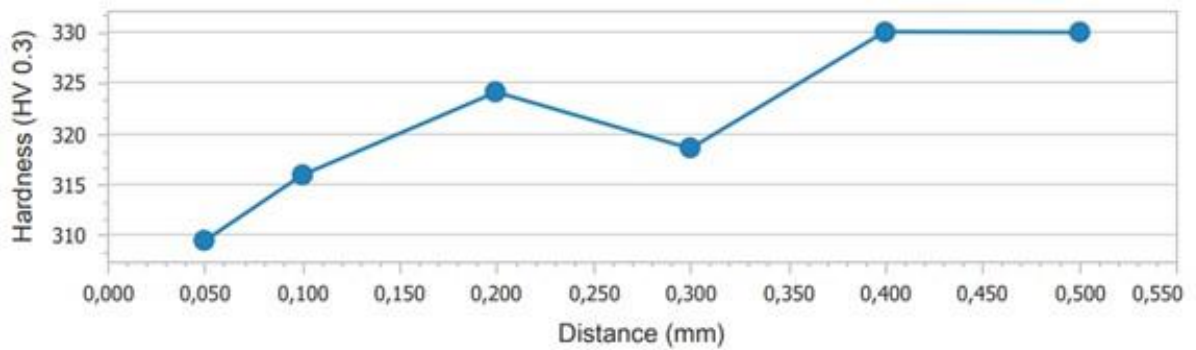
(b)

Figura 40 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da ZTA das amostras com pré-aquecimento à 500 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	298,7 HV 0.3	30,3 HRC	42,2 μm	44,1 μm	
2	0,100 mm	323,0 HV 0.3	33,5 HRC	41,7 μm	41,3 μm	
3	0,200 mm	330,2 HV 0.3	34,3 HRC	41,1 μm	41,0 μm	
4	0,300 mm	282,5 HV 0.3	28,0 HRC	43,5 μm	45,2 μm	
5	0,400 mm	329,1 HV 0.3	34,2 HRC	40,0 μm	42,3 μm	
6	0,500 mm	350,2 HV 0.3	36,5 HRC	39,1 μm	40,6 μm	

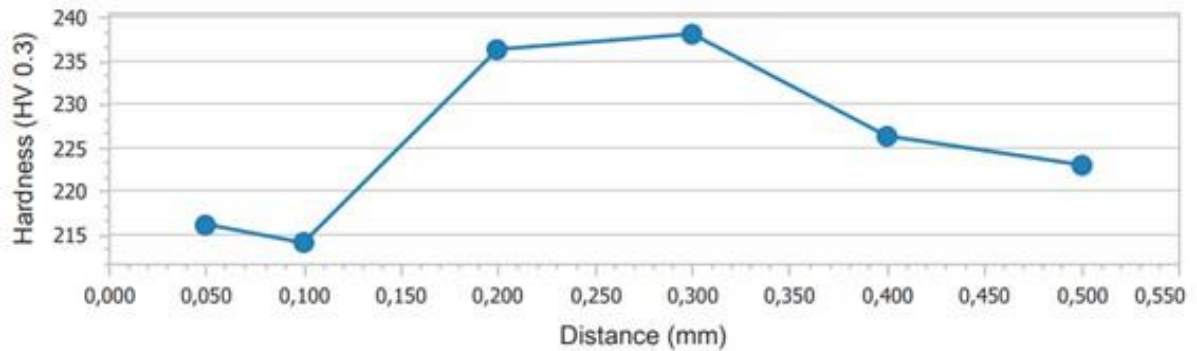
(a)



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	309,5 HV 0.3	31,7 HRC	42,4 μm	42,4 μm	
2	0,100 mm	315,9 HV 0.3	32,6 HRC	40,0 μm	43,9 μm	
3	0,200 mm	324,1 HV 0.3	33,6 HRC	42,5 μm	40,4 μm	
4	0,300 mm	318,6 HV 0.3	32,9 HRC	41,6 μm	42,0 μm	
5	0,400 mm	330,0 HV 0.3	34,3 HRC	41,0 μm	41,1 μm	
6	0,500 mm	330,0 HV 0.3	34,3 HRC	41,1 μm	41,1 μm	

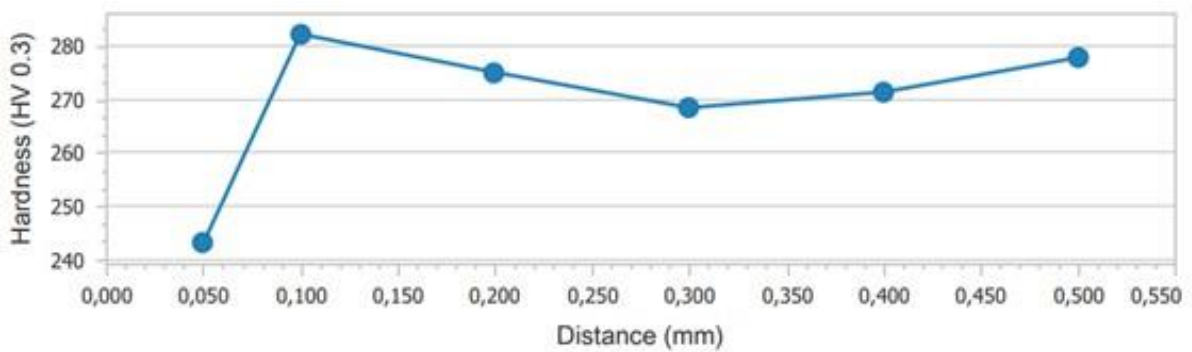
(b)

Figura 41 – Microdureza e identificação dos pontos de medição na região da solda das amostras com pré-aquecimento à 500 °C: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	216,1 HV 0.3	16,7 HRC	52,6 μm	48,8 μm	
2	0,100 mm	214,0 HV 0.3	16,3 HRC	51,6 μm	50,3 μm	
3	0,200 mm	236,3 HV 0.3	20,5 HRC	48,1 μm	48,9 μm	
4	0,300 mm	238,1 HV 0.3	20,8 HRC	48,3 μm	48,4 μm	
5	0,400 mm	226,3 HV 0.3	18,6 HRC	49,5 μm	49,7 μm	
6	0,500 mm	223,0 HV 0.3	18,0 HRC	50,3 μm	49,6 μm	

(a)



Point	Distance	Hardness	Converted	Diagonal X	Diagonal Y	Comments
1	0,050 mm	243,1 HV 0.3	21,7 HRC	48,1 μm	47,6 μm	
2	0,100 mm	282,4 HV 0.3	28,0 HRC	43,8 μm	45,0 μm	
3	0,200 mm	275,2 HV 0.3	27,0 HRC	44,1 μm	45,8 μm	
4	0,300 mm	268,5 HV 0.3	26,0 HRC	44,7 μm	46,4 μm	
5	0,400 mm	271,5 HV 0.3	26,4 HRC	45,0 μm	45,6 μm	
6	0,500 mm	277,9 HV 0.3	27,4 HRC	45,1 μm	44,4 μm	

(b)