

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO NA SOLDAGEM DOS AÇOS DISSIMILARES SAE 1020 E SAE 8640 ATRAVÉS DO PROCESSO GMAW

Letícia Nórdio Salvaro¹

Adelor Felipe da Costa²

Resumo: A soldagem entre aços dissimilares é amplamente utilizada no âmbito industrial com a finalidade de expandir o custo-benefício do processo. Nessa aplicação, pode-se destacar a união pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) dos aços dissimilares SAE 1020 e SAE 8640, sendo utilizados na fabricação do equipamento moinho de bolas, destinado ao beneficiamento das matérias-primas cerâmicas. Contudo, devido às diferentes composições químicas desses dois aços há necessidade de obter um ciclo térmico controlado, de modo a minimizar a tendência de formação de microestrutura de elevada dureza e baixa tenacidade na região próxima à solda. Buscou-se com esse estudo, analisar a influência que o pré-aquecimento gera nas propriedades mecânicas e microestruturais dos aços dissimilares SAE 1020 e SAE 8640 unidos através do processo de soldagem GMAW. Além disso, definiu-se os melhores parâmetros para efetuar essa união, visando obter uma junta soldada mais resistente. Foram realizadas a soldagem com os aços dissimilares em duas condições: com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento, ambas as condições foram realizadas com os mesmos parâmetros de soldagem. Após a soldagem, foram extraídos os corpos de prova e realizados ensaios experimentais. Ressalta-se que a soldagem e os ensaios conduziram-se com base na norma AWS D1.1/D1.1M:2020. Os resultados obtidos nos ensaios de tração, dobramento de face, microdureza Vickers e análise metalográfica foram avaliados de modo comparativo entre as duas condições de soldagem. As análises dos resultados mostraram que o pré-aquecimento antes de realizar o processo de soldagem influenciou positivamente, convergindo em melhores resultados quando comparados à soldagem sem pré-aquecimento, em que esse último apresentou sua maior dureza em 548,47 HV, em contrapartida, a condição soldagem com pré-aquecimento teve seu maior valor compreendido em 440,70 HV.

Palavras-chave: GMAW. Aços dissimilares. Pré-aquecimento. SAE 1020. SAE 8640.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem a arco elétrico com gás de proteção (GMAW) é amplamente utilizado na indústria metal mecânica em processos de fabricação, com a finalidade de junção de peças e equipamentos. Com o expressivo avanço do mercado atual e, conseqüentemente, a alta demanda por produtos de qualidade e

¹ Graduanda em Engenharia Mecânica, 2022. E-mail: leticia.salvaro@gmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: adelor.costa@satc.edu.br



elevada resistência, faz-se necessário a soldagem entre aços dissimilares, com o intuito de elevar o custo-benefício do processo. Nesse contexto, destaca-se a aplicação do processo GMAW nos moinhos de bolas, um dos equipamentos mais utilizados no beneficiamento das matérias-primas cerâmicas, tendo em seu dimensionamento, a necessidade da escolha de materiais que resistam aos esforços provenientes ao seu funcionamento. Desse modo, sua forma construtiva dispõe de um eixo fabricado em aço SAE 8640 – uma liga composta por Cromo, Níquel e Molibdênio – de elevada resistência mecânica, soldado à tampa que compõe o tambor, fabricada em aço SAE 1020, com baixo teor de carbono.

Devido às diferentes composições químicas, a soldagem entre esses aços dissimilares necessita de um ciclo térmico controlado, pois há facilidade de formação de microestrutura de elevada dureza e baixa tenacidade na região próxima à solda, tornando a união frágil e quebradiça. As transformações microestruturais e as propriedades almejadas para uma junta soldada são determinadas através dos ciclos térmicos sofridos a cada ponto dos materiais durante o processo de soldagem (ZEEMANN e EMYGDIO, 2001). Com isso, o controle dos parâmetros de pré-aquecimento dos materiais de base antes de realizar o processo de soldagem e de um resfriamento térmico posterior ao procedimento, são essenciais para aumentar a resistência e a vida útil do conjunto.

Nesse aspecto, é fundamental obter os parâmetros adequados com objetivo de garantir um ciclo térmico eficiente na junção entre os aços dissimilares SAE 1020 e SAE 8640 para realizar a soldagem pelo processo GMAW, de modo a impactar positivamente o balanço econômico da indústria metal mecânica e, por conseguinte, o da cerâmica. Simultaneamente, é de extrema importância assegurar que a união dos materiais de composições químicas e características mecânicas distintas proporcione um funcionamento contínuo do equipamento. Dessa forma, eleva-se o ciclo de operação e reduz os intervalos de manutenção ou troca de componentes, concebendo maior segurança para a indústria.

Baseado nesse contexto, o estudo consiste em analisar a influência do pré-aquecimento nas propriedades mecânicas e microestruturais dos aços dissimilares SAE 1020 e SAE 8640, unidos através do processo de soldagem GMAW. A análise se dará através de ensaios de tração; dobramento de face; metalografia e microdureza, e serão realizados nos requisitos exigidos em norma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDABILIDADE DOS AÇOS

Conforme a *American Welding Society (AWS)*, soldabilidade pode ser definida como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço” (MODENESI, 2011).

Para Moreira (2008), a soldabilidade dos aços ao carbono depende da composição química. Para os aços que possuem percentual de carbono abaixo de 0,15% a soldabilidade é ótima. Para o percentual compreendido entre 0,15% e 0,3%, soldabilidade é considerada boa, no entanto, existe a possibilidade de endurecimento e alguns parâmetros devem ser controlados.

Meireles (2009) afirma que uma boa soldabilidade está associada a poucas transformações na estrutura cristalina durante o processo de soldagem, e correlacionam-se em diversos fatores, como a composição química dos materiais e os ciclos térmicos envolvidos.

2.1.1 Aço SAE 8640

O aço SAE 8640 é um aço Níquel-Cromo-Molibdênio, sendo considerado um aço de elevada resistência mecânica e de baixa liga, associado a um médio teor de carbono. Além de possuir uma boa combinação de propriedades com pouca adição de elementos de liga, apresenta elevada temperabilidade (LIMA, 2007). A Tab. 1 apresenta a composição química do aço SAE 8640.

Tabela 1: Composição química do aço SAE 8640 em porcentagem de massa.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)
0,38-0,43	0,75-1,00	0,20-0,35	0,40-0,60	0,40-0,70	0,15-0,25	0,03	0,04

Fonte: ASM Handbook (1991)

Conforme Silveira, et al (2018), a tensão máxima do aço SAE 8640 está compreendida em 607,9 MPa. Suas principais aplicações estão relacionadas à fabricação de eixos, engrenagens, pinos, virabrequins, entre outros elementos de máquinas. (CARVALHO; LEAL; ISMAIL, 2004).

2.1.2 Aço SAE 1020

Dentre os aços com baixo teor de carbono, o SAE 1020 possui aproximadamente 0,2% de carbono em peso, sendo considerado uma liga hipoeutetóide com microestrutura predominante de ferrita e perlita, essa composição de fases atribui ao aço baixa resistência mecânica e alta ductibilidade (JUNIOR, 2017). A Tab. 2 apresenta a composição química do aço SAE 1020.

Tabela 2: Composição química do aço SAE 1020 em porcentagem de massa.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,04	0,05

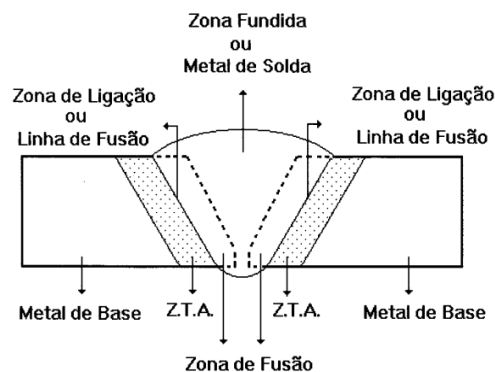
Fonte: ASM Handbook (1991)

Conforme Giordani (2012), esse material é de baixa temperabilidade, por sua vez, apresenta ótima soldabilidade. A resistência a tração máxima desse aço corresponde a 450 MPa (ASM Handbook, 1991).

2.2 SOLDAGEM

A soldagem é o processo de junção de peças metálicas mais utilizado industrialmente, sendo definida como um método de união de dois materiais, podendo ser de composição química iguais ou distintas. Está presente em diversos segmentos da indústria na fabricação de máquinas e equipamentos, de modo simultâneo, atua na manutenção e recuperação dos mesmos (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). A Fig. 1 representa as regiões presentes na junta soldada.

Figura 1: Regiões da junta soldada.



Fonte: Barbedo (2011)



As principais regiões analisadas na junta soldada são: o metal de base, a zona termicamente afetada (ZTA), a zona de ligação e o metal de adição (BARBEDO, 2011).

2.2.1 Soldagem GMAW

Conforme Scotti e Ponomarev (2014), a soldagem pelo processo GMAW é caracterizada pela transferência de metal de um arame consumível sólido, para a poça de fusão, através do arco elétrico. Essa transferência transcorre por intermédio de gotículas de metal fundido geradas na ponta do arame consumível, sendo influenciada, dentre outros fatores, pelo diâmetro e pelo material do arame, bem como pela corrente de soldagem e pelo gás de proteção.

O gás de proteção possui como propósito proteger a poça de fusão contra os efeitos desfavoráveis do gás oxigênio incluso no ar atmosférico. Quando o gás de proteção é inerte com a poça de fusão, usualmente, usa-se o Argônio (Ar), e o processo é designado de MIG (*Metal Inert Gas*). Contudo, quando o gás utilizado é ativo com a poça de fusão, como o Dióxido de Carbono (CO₂), denomina-se o processo como MAG (*Metal Active Gas*) (TATAGIBA; GOLÇAVES; PARANHOS, 2012).

2.2.2 Soldagem de aços dissimilares

Soldagem entre metais distintos é denominado de soldas de metais dissimilares (DMW – *Dissimilar Metal Weld*). Nessa configuração de soldagem, na região próxima à linha de fusão, acontece a diluição do metal de base com o metal de adição, ocasionando uma região de composição intermediária, acarretando em propriedades diferentes dos metais envolvidos no processo (CAMPOS et al, 2009).

De acordo com Kejelin (2012), na soldagem que envolve metais dissimilares, a composição química da solda será intermediária entre as composições químicas dos metais de base e do metal de adição. Todavia, ao alterar os parâmetros de soldagem, como a potência de arco utilizada, podem ocorrer alterações na composição química da solda depositada, visto que a capacidade de fusão dos metais de base e de adição que participam da formação da solda, são dependentes dos parâmetros adotados.

2.2.3 Zona termicamente afetada

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região da solda que não se fundiu durante o processo de soldagem, contudo, teve suas propriedades e microestruturas alteradas devido ao calor induzido pela soldagem. O calor gerado no procedimento de soldagem e o posterior resfriamento, induz a alteração da área circundante à solda. Essa região, que comumente seria resistente, pode-se transformar um elo fraco na junta soldada. A estrutura molecular da ZTA, que não é muito refinada, torna-se mais frágil que o metal de base ou o metal da solda (EEEP, 2020).

Conforme Teixeira (2017), a formação da zona termicamente afetada depende da composição química do metal de base, das condições de aquecimento e do resfriamento que o substrato é exposto durante o processo de soldagem. Contudo, essas condições variam conforme o aporte térmico e com as particularidades da peça soldada, como espessura e geometria.

2.2.4 Carbono equivalente

De acordo com Kuchler (2009), a suscetibilidade de um aço elevar a dureza na zona termicamente afetada (ZTA) em razão ao ciclo térmico sujeitado durante a soldagem, é regularmente descrita pela equação do carbono equivalente (Ceq).

Conforme Souza (2017), o carbono equivalente é utilizado de modo a relacionar a temperabilidade do aço com a sua soldabilidade. Portanto, quanto maior o valor do Ceq, mais temperável será o aço e pior será a sua soldabilidade. A Eq. (1), definida pelo IIW (*International Institute of Welding*), pode ser utilizada para determinar o carbono equivalente.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (1)$$

Onde:

Ceq = Carbono equivalente (%)

C = Carbono (%)

Mn = Manganês (%)

Cr = Cromo (%)



Mo = Molibdênio (%)

V = Vanádio (%)

Ni = Níquel (%)

Cu = Cobre (%)

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é o conjunto de procedimentos de aquecimento e resfriamento que os aços são submetidos, perante condições moderadas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o propósito de conferir atributos específicos e modificar suas propriedades (CHIAVERINI, 2008).

De acordo com Silva (2014), os tratamentos térmicos são fundamentais para garantir uma apropriada integridade da solda, de maneira a eliminar ou prevenir características indesejáveis no processo de soldagem efetuado.

2.3.1 Pré-aquecimento

A maioria dos metais são bons condutores de calor, por conseguinte, o calor na região de soldagem é ligeiramente escoado por toda a área de junção envolvida no processo, ocasionando um resfriamento rápido, que contribui para a formação de microestruturas indesejáveis na região da solda. O pré-aquecimento dos metais de base é um modo de reduzir a taxa de resfriamento (FORTES, 2005).

Conforme Barbosa (2007), o pré-aquecimento equivale em aquecer os metais de base acima da temperatura ambiente antes do procedimento de soldagem. Essa técnica objetiva em reduzir a tendência à formação de estrutura de elevada dureza, devido a redução da velocidade de resfriamento, e por consequência, atingir a redução da dureza na zona afetada pelo calor e a diminuição das tensões e distorções residuais. A temperatura de pré-aquecimento é determinada em função do teor de carbono, do carbono equivalente ou da espessura da liga a ser soldada.

O carbono equivalente (Ceq) é uma maneira simples para estabelecer a necessidade de pré-aquecimento nos metais de base em um processo de soldagem. Quanto maior for o resultado do carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento exigida (GODOY, 2008).

A Tab. 3 recomenda as temperaturas de pré-aquecimento para diferentes valores de carbono equivalente, calculado mediante a Eq. (1).

Tabela 3: Temperatura de pré-aquecimento recomendada em função do C_{eq} .

Carbono equivalente C_{eq} (%)	Temperatura de pré-aquecimento
< 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

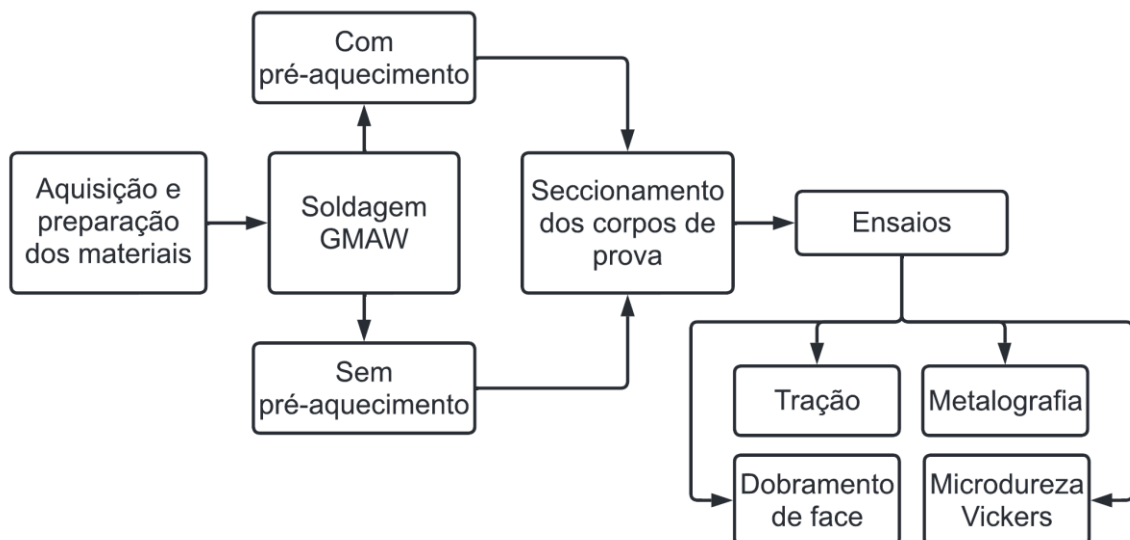
Fonte: Fortes (2005)

A temperatura de pré-aquecimento não deve ser excessiva, de forma a ser inferior à temperatura de transformação de fase do material (BARBOSA, 2007).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção estão apresentados os materiais, procedimentos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento experimental desse trabalho. A Fig. 2 apresenta as etapas da realização do trabalho.

Figura 2: Etapas do procedimento experimental.



Fonte: Do autor (2022)

3.1 AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

O material de estudo está concentrado em duas chapas de aço SAE 1020 e em duas de aço SAE 8640. A Tab. 4 ilustra as informações dos materiais adquiridos.

Tabela 4: Informações dos materiais adquiridos.

Material	Forma de aquisição	Quantidade
SAE 1020	Chapa 3/16" x 95mm x 185mm	02
SAE 8640	Barra redonda Ø210mm x 8mm	02

Fonte: Do autor (2022)

Para o aço SAE 8640 foi necessário realizar processos de usinagem através do torneamento para obter a espessura de 3/16" e do fresamento para obter as dimensões de 95mm x 185mm.

3.2 SOLDAGEM GMAW

Antes de realizar o processo de soldagem, as chapas foram submetidas a processos de limpeza na região de formação do cordão de solda, utilizou-se esmerilhadeira e escova de aço, a fim de reduzir as impurezas.

Na sequência, as chapas de SAE 1020 foram ponteadas com as de SAE 8640 para que durante o processo da soldagem não ocorresse deslocamento entre elas. As chapas utilizadas para a soldagem foram separadas conforme a Tab. 5.

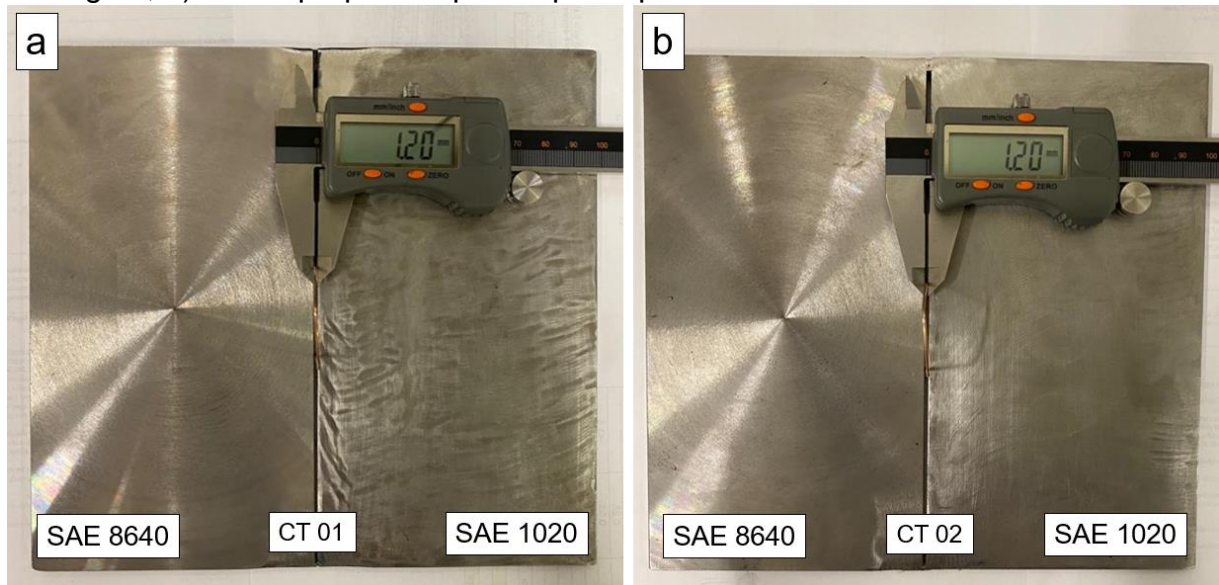
Tabela 5: Definição das chapas para soldagem.

Chapa teste	Condição
CT 01	Sem pré-aquecimento
CT 02	Com pré-aquecimento

Fonte: Do autor (2022)

A chapa teste CT 01 preparada para a soldagem pode ser vista na Fig. 3a. E a chapa teste CT 02 preparada para ser direcionada ao forno pode ser observada na Fig. 3b.

Figura 3: Chapas testes preparadas para soldagem: a) CT 01 preparada para a soldagem; b) CT 02 preparada para o pré-aquecimento.



Fonte: Do autor (2022)

O tratamento térmico de pré-aquecimento da CT 02 foi realizado no Laboratório de Conformação Mecânica e Processamento de Polímeros (LACOMP) da UNISATC. Os valores obtidos através do cálculo do carbono equivalente, de acordo com a Eq. (1), para definir a temperatura de pré-aquecimento podem ser observados na Tab. 6.

Tabela 6: Valores obtidos do Ceq conforme IIW.

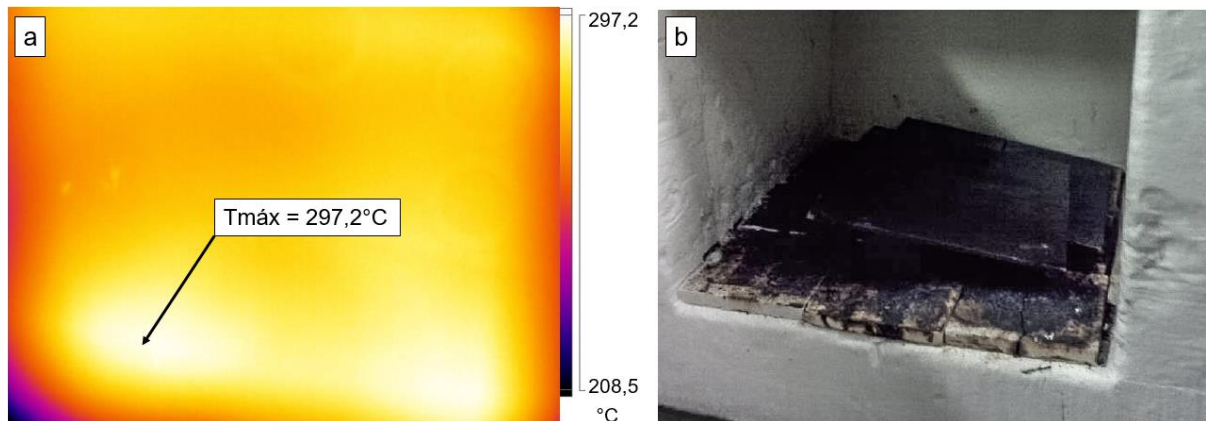
Material	Carbono Equivalente [%]
SAE 1020	0,28
SAE 8640	0,73

Fonte: Do autor (2022)

Para conservar a temperatura dentro da faixa estabelecida pelo cálculo do carbono equivalente, da retirada do forno até o momento da soldagem, a CT 02 foi direcionada em um forno de indução do fabricante Jung, programado a uma temperatura de 300°C, de acordo com a Tab. 3, durante um período de duas horas.

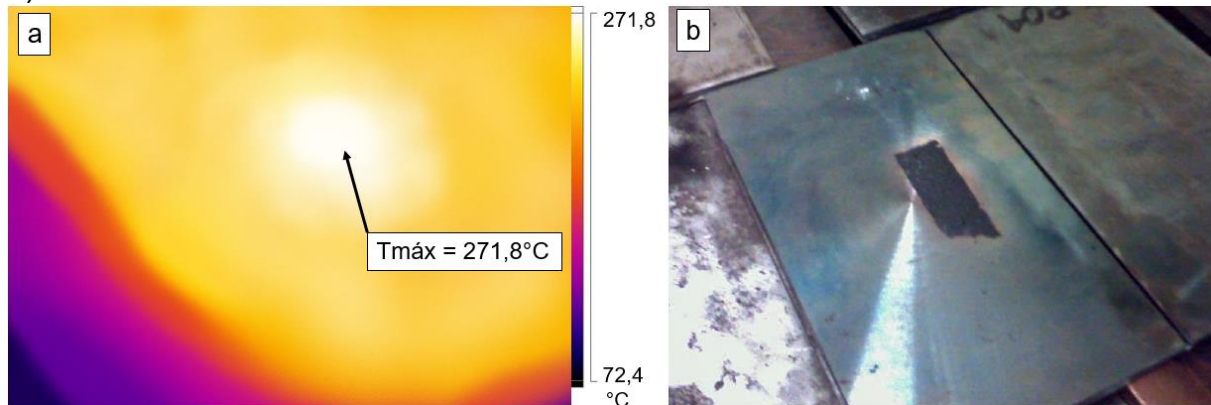
O controle do ciclo térmico foi realizado por intermédio de uma câmera termográfica Fluke Ti32. As Fig. 4 e Fig. 5 ilustram as temperaturas máximas pontuais registradas pela câmera, com as chapas testes dentro do forno e antes de realizar o processo de soldagem. Salienta-se que as imagens da esquerda foram registradas com ampliação decorrente da resolução da câmera, e da direita, representam o local da aferição da temperatura na chapa teste.

Figura 4: Chapa teste CT 02 pré-aquecida dentro do forno: a) com efeito térmico; b) sem efeito térmico.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 5: Chapa teste CT 02 pré-aquecida antes da soldagem: a) com efeito térmico; b) sem efeito térmico.



Fonte: Do autor (2022)

O processo de soldagem foi realizado no Laboratório de Aspersão Térmica e Engenharia de Soldagem (LAENS) da UNISATC, seguindo os princípios da norma AWS D1.1/D1.1M:2020, por meio de uma junta de solda em chanfro reto, com as preparações conduzidas pelo processo GMAW. As chapas testes foram soldadas na posição 1G (plana), de forma semiautomática, no sentido de soldagem “puxando”.

Nesse seguimento, foram unidas as chapas de SAE 1020 com as de SAE 8640 através do consumível sólido AWS A5.28 ER110S-G, indicado para soldagem de aço carbono de alta resistência e baixa liga, com arame de Ø1,2mm e com limite de resistência a tração de 760 MPa. A composição química do consumível pode ser vista na Tab. 7. O gás de proteção utilizado está de acordo com a AWS A5.32 (ISO 14175) – M20 – ArC – 15, composto por 85% de Ar e 15% de CO₂.

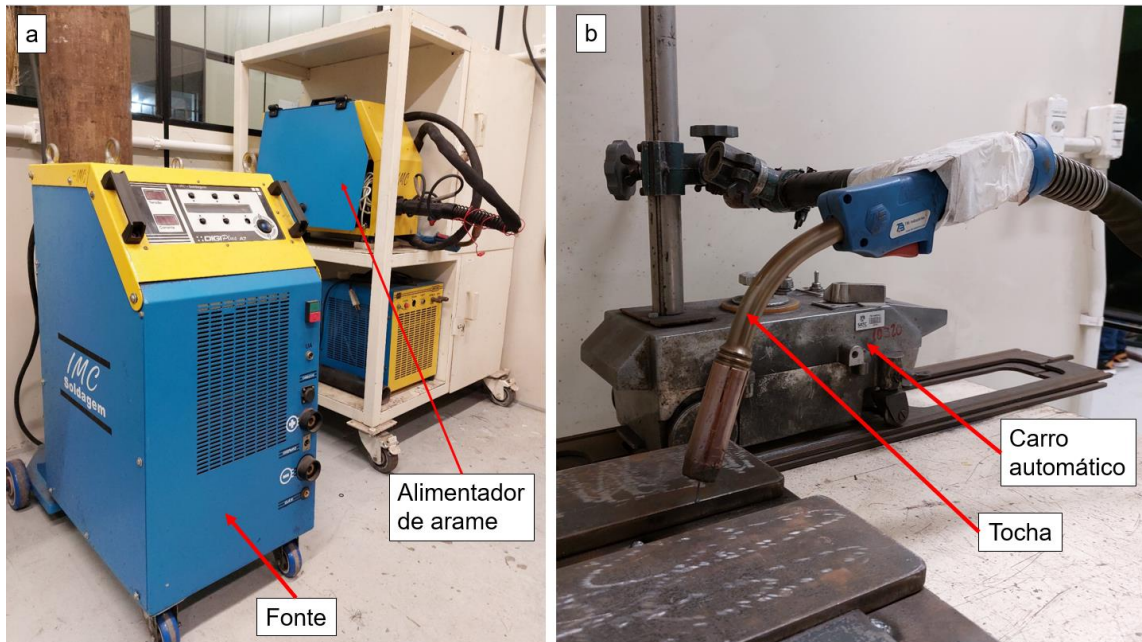
Tabela 7: Composição química do consumível AWS A5.28 ER110S-G.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
0,09	1,40-1,80	0,20-0,55	1,90-2,60	0,5	0,25-0,55

Fonte: Adaptado de AWS A5.28/A5.28M:2005

Para realização da soldagem utilizou-se a fonte DIGIPlus A7, acoplada com o Sistema de Aquisição de Dados para Soldagem SAP – V 4.01, ambos do fabricante IMC Soldagem®. Para manter a velocidade constante do processo, usou-se o equipamento MC-46, sendo esse, um carro automático adaptado para fixação da tocha de soldagem, conforme a Fig. 6b.

Figura 6: Equipamentos utilizados na soldagem: a) Fonte DIGIPlus A7; b) Carro automático.



Fonte: Do autor (2022)

O procedimento de soldagem seguiu os mesmos parâmetros para a CT 01 e CT 02, sendo realizado um passe de face e um passe de raiz, de modo a garantir completa penetração do cordão. Para assegurar uniformidade e um cordão contínuo nas chapas testes, utilizou-se de chapas de sacrifício ao início e ao final do processo de soldagem.

Os parâmetros de soldagem foram adotados com base em testes experimentais realizados anterior à soldagem das chapas testes CT 01 e CT 02, e podem ser observados na Tab. 8.

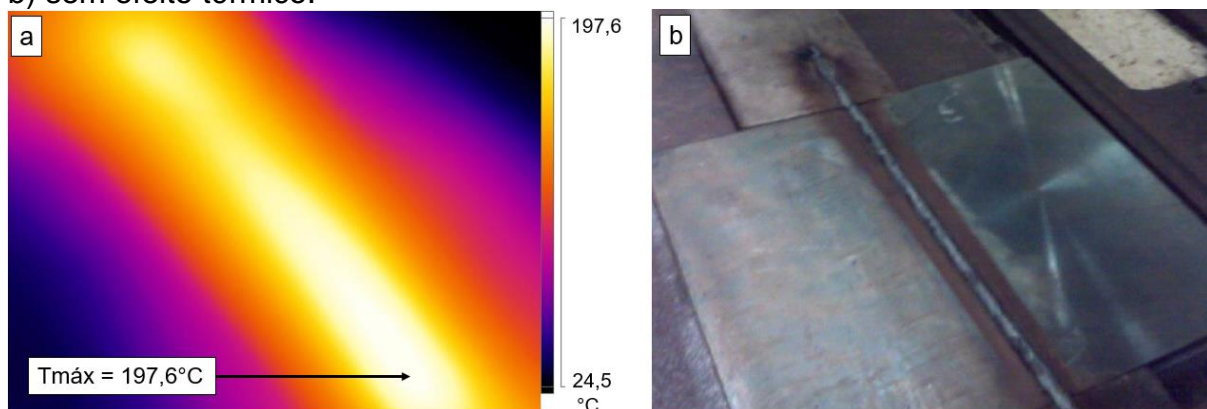
Tabela 8: Parâmetros utilizados na soldagem.

Parâmetros	Valores nominais
Abertura de raiz [mm]	1,2
Stick Out [mm]	10,0
Tensão [V]	23,0
Corrente [A]	195,0
Vazão de gás [L/min]	12,5
Velocidade do arame [m/min]	6,3
Velocidade de soldagem [m/min]	0,4

Fonte: Do autor (2022)

A temperatura máxima atingida após a soldagem na chapa teste com pré-aquecimento, assim como o cordão de solda formado, podem ser observados na Fig. 7. Ressalta-se que após a soldagem, o resfriamento da CT 01 e CT 02 ocorreu em temperatura ambiente.

Figura 7: Chapa teste CT 02 soldada com pré-aquecimento: a) com efeito térmico; b) sem efeito térmico.



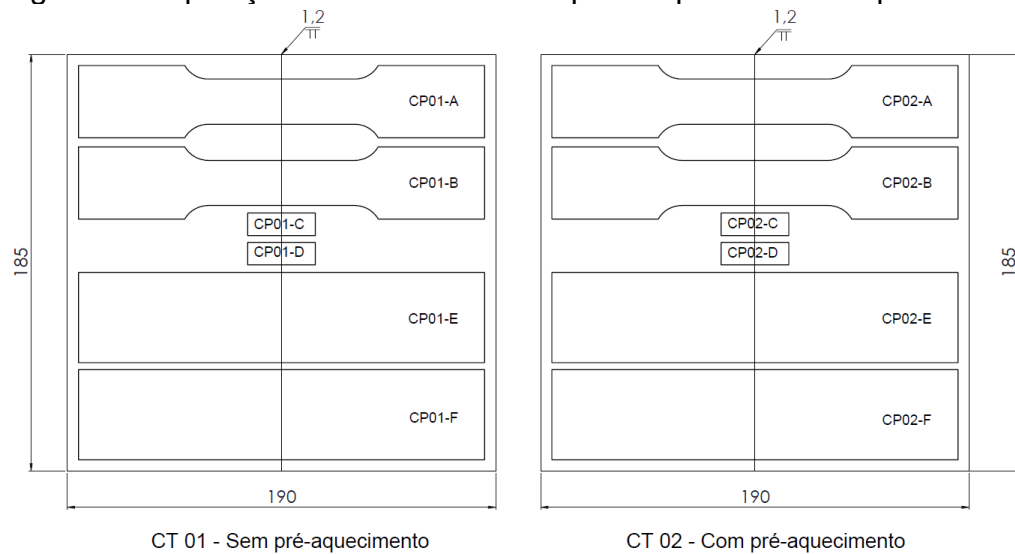
Fonte: Do autor (2022)

Dessa maneira, foram formadas duas chapas testes de materiais dissimilares, sendo uma unidade sem o tratamento de pré-aquecimento (CT 01) e uma com o tratamento térmico de pré-aquecimento (CT 02).

3.3 ENSAIOS

Após realizado o procedimento de soldagem, foi necessário efetuar o seccionamento das chapas testes para gerar os corpos de prova para desenvolver os ensaios experimentais. Na Fig. 8 é possível verificar a disposição da retirada dos corpos de prova.

Figura 8: Disposição da retirada dos corpos de prova das chapas testes.



Fonte: Do autor (2022)

A Tab. 9 compreende a quantidade e a descrição dos corpos de prova retirados de cada chapa teste.

Tabela 9: Descrição dos corpos de prova para cada ensaio.

Tipo de ensaio	CT 01 - Sem pré-aquecimento	CT 02 - Com pré-aquecimento
Tração	CP01-A	CP02-A
	CP01-B	CP02-B
Metalografia e Microdureza	CP01-C	CP02-C
	CP01-D	CP02-D
Dobramento de face	CP01-E	CP02-E
	CP01-F	CP02-F

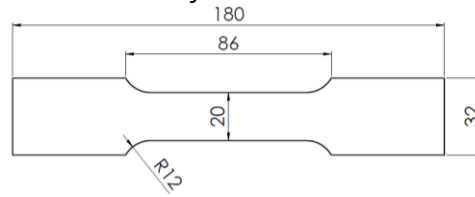
Fonte: Do autor (2022)

Os corpos de prova foram seccionados transversalmente à solda, através de corte a laser nas chapas testes CT 01 e CT 02, de modo a atender os requisitos estabelecidos na norma.

3.3.1 Ensaio de tração

Para atender os critérios definidos em norma, foram realizados ensaios de tração em dois corpos de prova para a condição de soldagem sem pré-aquecimento (CP01-A e CP01-B) e em dois corpos de prova que foram soldados com o pré-aquecimento (CP02-A e CP02-B) com o intuito de avaliar a resistência mecânica da união. O dimensionamento dos corpos de prova seguiu a norma AWS D1.1/D1.1M:2020, conforme ilustra a Fig. 9.

Figura 9: Corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2022)

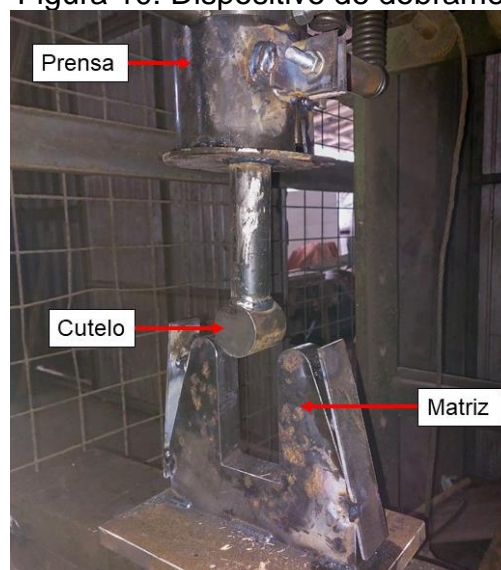
O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) da UNISATC, por meio de uma Máquina Universal de Ensaio do fabricante EMIC, modelo DL10000. A velocidade de carregamento foi de 5 mm/min, e o ensaio ocorreu à temperatura ambiente.

3.3.2 Ensaio de dobramento

Foram realizados ensaios de dobramento de face em dois corpos de prova para a condição de soldagem sem pré-aquecimento (CP01-E e CP01-F) e em dois corpos de prova que foram soldados com o pré-aquecimento (CP02-E e CP02-F) com o intuito de avaliar qualitativamente a ductilidade do material na junta soldada. Os corpos de prova foram dimensionados com 40mm de largura e 180mm de comprimento, conforme a norma AWS D1.1/D1.1M:2020.

O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica manual do fabricante Eva, com capacidade de carga de 100 toneladas, de acordo com a Fig. 10.

Figura 10: Dispositivo de dobramento.



Fonte: Do autor (2022)



Em concordância com a Fig. 10, os corpos de prova foram submetidos a uma deformação plástica por flexão até atingir um ângulo de 180°, seguindo os critérios definidos em norma, através de um cutelo de diâmetro de 50,8 mm que flexionou a parte central do corpo de prova, executando o dobramento de face. A deformação ocorreu de forma semi-guiada em uma matriz com cantos arredondados, espaçados em 73 mm.

3.3.3 Análise metalográfica

A análise metalográfica foi realizada de modo comparativo para cada condição de soldagem, conforme a Tab. 9, com o objetivo de verificar as microestruturas formadas decorrentes do processo de soldagem.

A preparação metalográfica foi dividida em: corte da seção; embutimento; lixamento; polimento; ataque e análise microestrutural. A granulometria das lixas usadas na preparação das amostras foram: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*. A cada troca de lixa, as amostras foram rotacionadas a 90° para eliminar os riscos da lixa anterior. Na sequência, as amostras foram polidas em uma politriz utilizando-se do abrasivo alumina N°4.

Após o polimento, foram analisadas as inclusões não metálicas presentes nos aços das amostras em um microscópio óptico Union no laboratório de microscopia da UNISATC, com aumento de 100x, conforme recomenda a norma ASTM E45-18.

Em seguida, efetuou-se o ataque nas amostras com Nital 2% e a caracterização microestrutural, utilizando-se do mesmo microscópio.

3.3.4 Ensaio de microdureza

As análises de microdureza foram realizadas com o intuito de comparar cada condição de soldagem. Foram executadas em dois corpos de prova para a condição de soldagem sem pré-aquecimento (CP01-C e CP01-D) e em dois corpos de prova que foram soldados com o pré-aquecimento (CP02-C e CP02-D) de modo a traçar um perfil de microdureza nas amostras.

Foram realizadas 15 endentações espaçadas em 1mm no perfil transversal à solda, conforme a Fig. 11, com carga de 1,961N (HV 0.2) e tempo de 10 segundos.

Figura 11: Perfil de microdureza utilizado.



Fonte: Do autor (2022)

Os ensaios de microdureza ocorreram no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) da UNISATC, utilizou-se um microdurômetro de modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZU® que possui escala de medição em Vickers (HV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

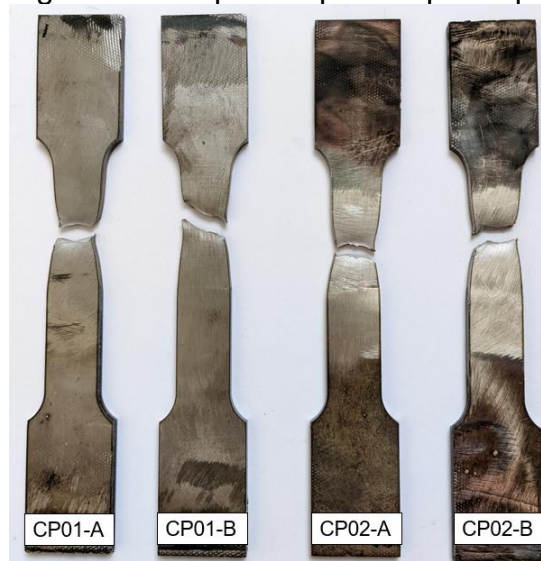
Os resultados obtidos através do ensaio destrutivo de tração nos corpos de prova soldados nas duas condições de soldagem podem ser observados na Tab. 10, e os corpos de prova após a ruptura podem ser vistos na Fig. 12.

Tabela 10: Dados coletados no ensaio de tração.

Corpo de prova	Condição	Tensão máxima [MPa]	Tensão média [MPa]	Deformação específica [%]
CP01-A	Sem pré-aquecimento	401,5	399,9	22,5
CP01-B		398,3	±2,26	21,3
CP02-A	Com pré-aquecimento	415,3	415,3	19,6
CP02-B		415,3	±0	20,5

Fonte: Do autor (2022)

Figura 12: Corpos de prova após ruptura.



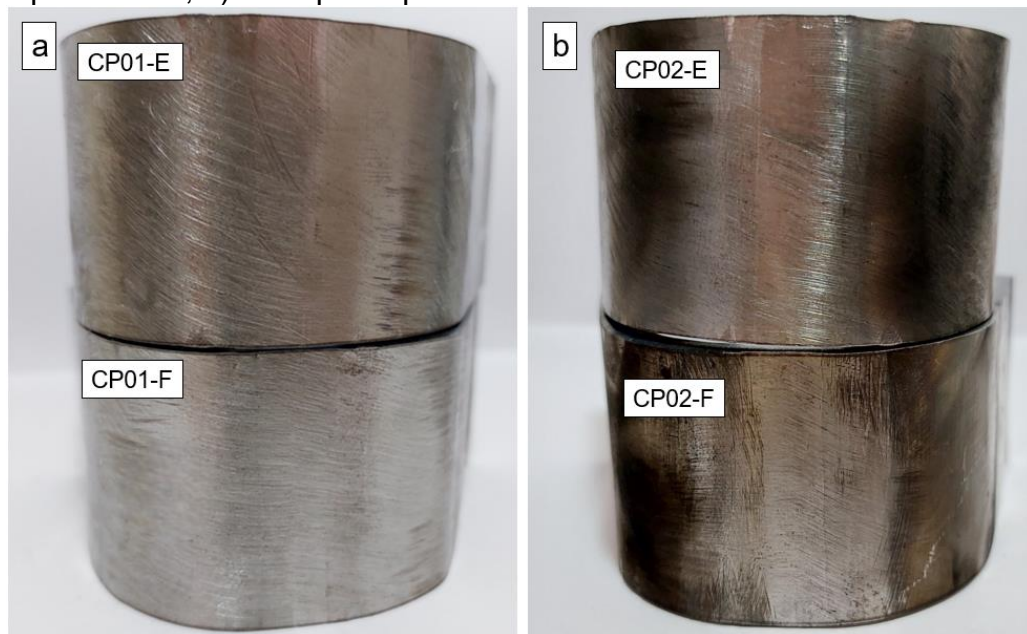
Fonte: Do autor (2022)

Pode-se notar, através da Fig. 12, que em todos os corpos de prova a ruptura aconteceu fora da região da solda. A ocorrência de tal fato deve-se à condição de *overmatching*, definida quando o arame consumível possui a combinação dos limites de resistência a tração e de escoamento maior que do metal de base (MACHADO, 2012). Desse modo, é possível comprovar a eficiência da junta soldada.

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Os resultados alcançados através do ensaio de dobramento nos corpos de prova realizados nas duas condições de soldagem podem ser observados na Fig. 13.

Figura 13: Corpos de prova após dobramento: a) Sem pré-aquecimento; b) Com pré-aquecimento.



Fonte: Do autor (2022)

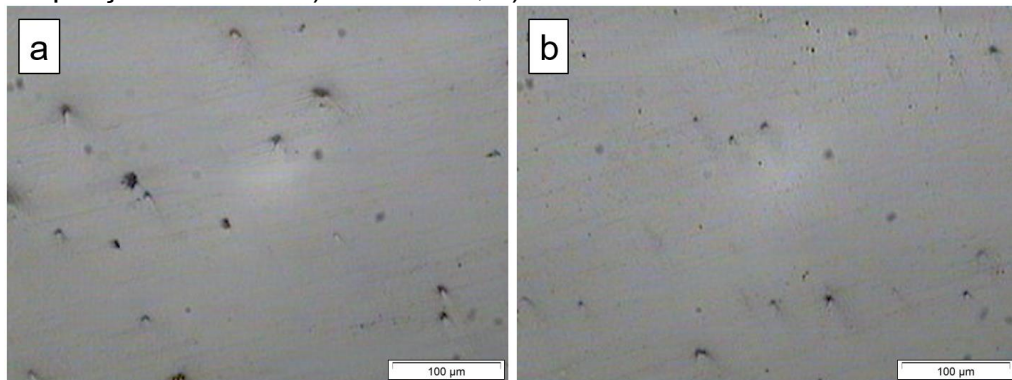
Todos os corpos de prova foram dobrados até atingir o ângulo final de 180° e apresentaram uma superfície livre de discontinuidades para ambas as condições de soldagem. Não foram constatados defeitos nos metais de base e nem o aparecimento de trincas na região da solda, dessa forma, pode-se considerar que os corpos de prova foram aprovados de acordo com os critérios de aceitação contidos em norma.

4.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

4.3.1 Quantificação das inclusões

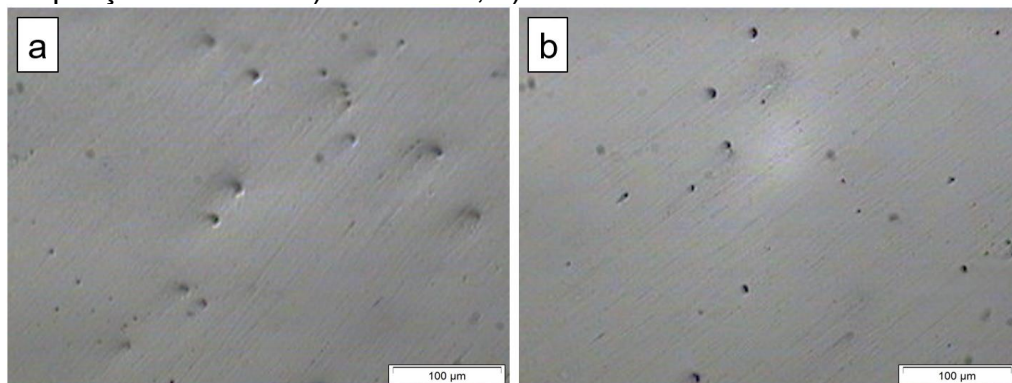
A análise metalográfica antes do ataque revelou a presença de inclusões não metálicas nos materiais. A Fig. 14 ilustra as inclusões presentes nos metais de base que não foram pré-aquecidos. Já a Fig. 15 exhibe as inclusões contidas nos metais de base que foram soldados com o pré-aquecimento.

Figura 14: Inclusões nos metais de base soldados sem pré-aquecimento. Ampliação de 100x: a) SAE 1020; b) SAE 8640.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 15: Inclusões nos metais de base soldados com pré-aquecimento. Ampliação de 100x: a) SAE 1020; b) SAE 8640.



Fonte: Do autor (2022)

Para a análise das inclusões, a norma ASTM E45-18 adota o modelo da Associação dos Siderurgistas Suecos (*Jernkontoret*) que indica por meio de figuras padronizadas, a morfologia, o tamanho, a quantidade e a distribuição dos diferentes tipos de inclusões. Portanto, por comparação à classificação de *Jernkontoret*, as impurezas presentes nos metais de base de ambas as condições de soldagem são

óxidos globulares. Para o metal de base SAE 1020 as inclusões são da série grossa e nível 2. E para o SAE 8640 as inclusões são da série fina e nível 2.

4.3.2 Análise macrográfica

A macrografia do cordão de solda formado nas condições de soldagem sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento podem ser observados nas Fig. 16 e Fig. 17, com ampliação de 25x.

Figura 16: Macrografia do cordão de solda sem pré-aquecimento.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 17: Macrografia do cordão de solda com pré-aquecimento.



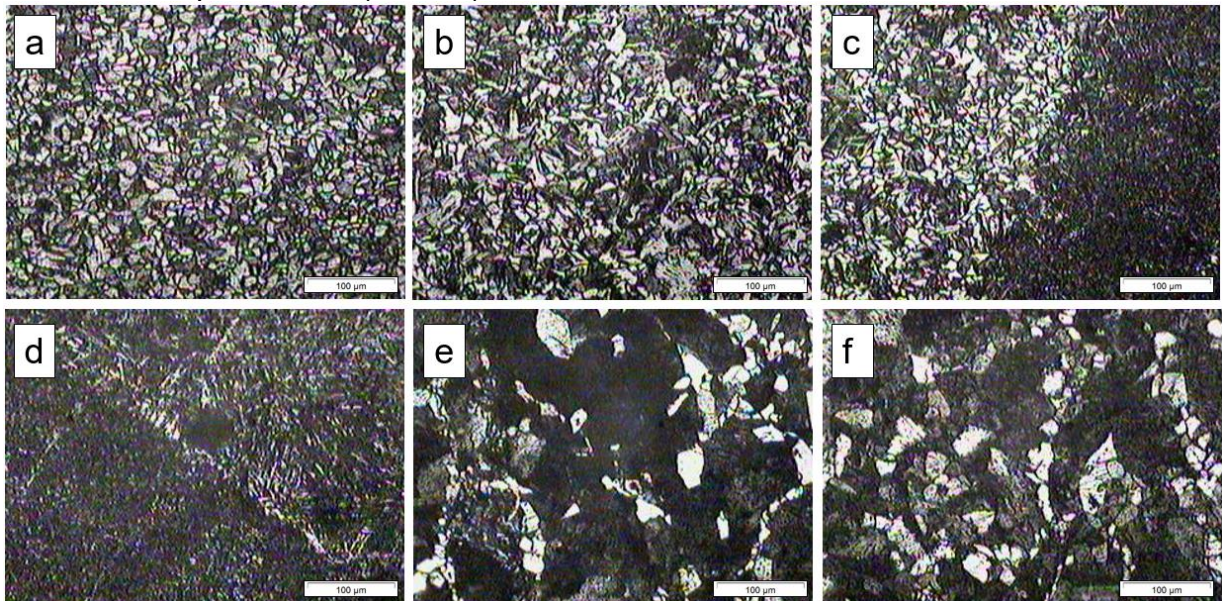
Fonte: Do autor (2022)

Pode-se observar o efeito térmico decorrente do processo de soldagem, evidenciando as formações da zona fundida com o metal de adição, da zona de ligação e da zona termicamente afetada pela solda.

4.3.3 Análise micrográfica

As imagens geradas na análise micrográfica nas amostras que foram soldadas sem o pré-aquecimento podem ser vistas na Fig. 18.

Figura 18: Micrografias ampliadas em 100x da amostra soldada sem pré-aquecimento. a) Metal de base SAE 1020; b) ZTA; c) Transição ZTA para zona fundida; d) Transição zona fundida para ZTA; e) ZTA; f) Metal de base SAE 8640.



Fonte: Do autor (2022)

Observando a Fig. 18a, nota-se que não houve alteração microestrutural no metal de base SAE 1020, mantendo assim a sua configuração original, sendo que os grãos escuros correspondem à perlita e os grãos claros à ferrita.

A Fig. 18b ilustra a ZTA no aço SAE 1020, com uma região de transformação com granulação grosseria devido à imposição do aquecimento, relacionado à mudança brusca de temperatura decorrente da operação de soldagem.

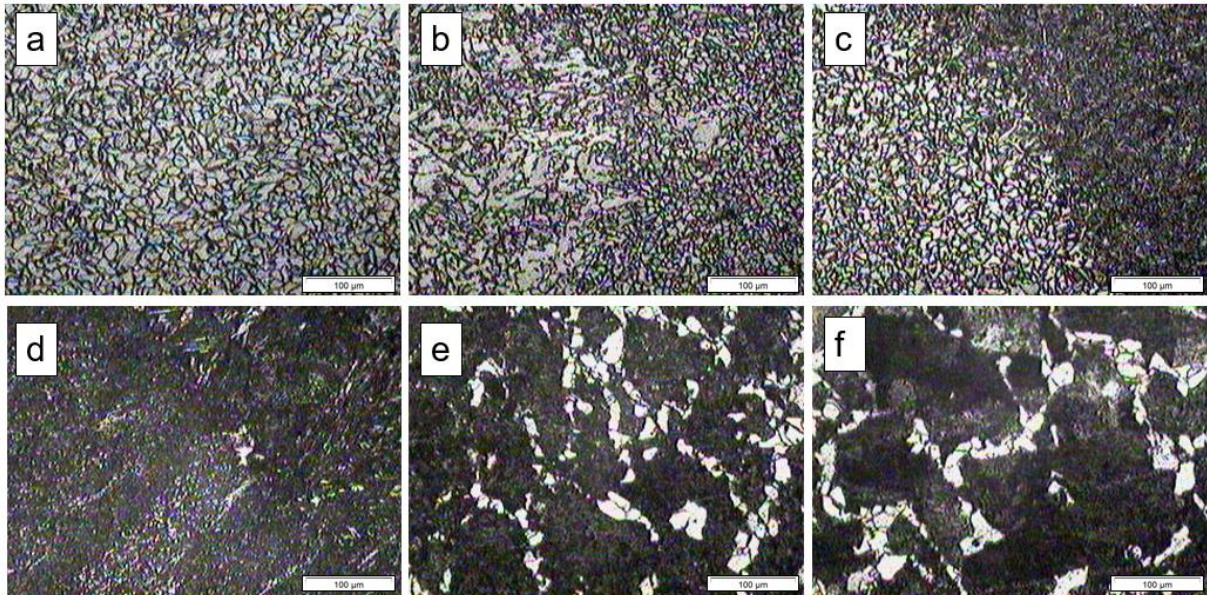
A Fig. 18c compreende a região de transição entre a ZTA no aço SAE 1020 e o metal de adição, evidenciando o aparecimento da zona de ligação. Nota-se que os grãos de ferrita e perlita encontram-se mais grosseiros quando comparados ao metal de base que não foi afetado pelo calor, pois o processo de soldagem atinge temperaturas elevadas para causar o crescimento dos grãos (COLPAERT, 2008).

A Fig. 18d corresponde a região de transição entre o metal de adição e a ZTA no metal de base SAE 8640, destacando o aparecimento da zona de ligação. Nessa região é possível identificar o aparecimento de martensita fina.

A Fig. 18e ilustra a região da ZTA no metal de base SAE 8640, constata-se um crescimento dos grãos. A Fig. 18f ilustra o metal de base SAE 8640 em sua composição original que não foi afetada pelo calor da soldagem, em que os grãos escuros correspondem à perlita e os grãos claros à ferrita.

As imagens geradas na análise micrográfica nas amostras que foram soldadas com o tratamento térmico de pré-aquecimento podem ser vistas na Fig. 19.

Figura 19: Micrografias em 100x da amostra soldada com pré-aquecimento. a) Metal de base SAE 1020; b) ZTA; c) Transição ZTA para zona fundida; d) Transição zona fundida para ZTA; e) ZTA; f) Metal de base SAE 8640.



Fonte: Do autor (2022)

Analisando a Fig. 19a, percebe-se que o metal de base SAE 1020 não sofreu alterações microestruturais, mantendo sua composição original de ferrita e perlita.

A Fig. 19b representa a ZTA no aço SAE 1020. Nota-se um aumento dos tamanhos de grãos de ferrita e perlita na região de transformação com granulação grosseria e, logo em seguida, um refinamento dos grãos.

A Fig. 19c compreende a região de transição entre a ZTA no SAE 1020 e o metal de adição, exibindo a zona de ligação. Nessa região é notável um refinamento dos grãos quando comparado à Fig. 18c da amostra que não foi pré-aquecida.

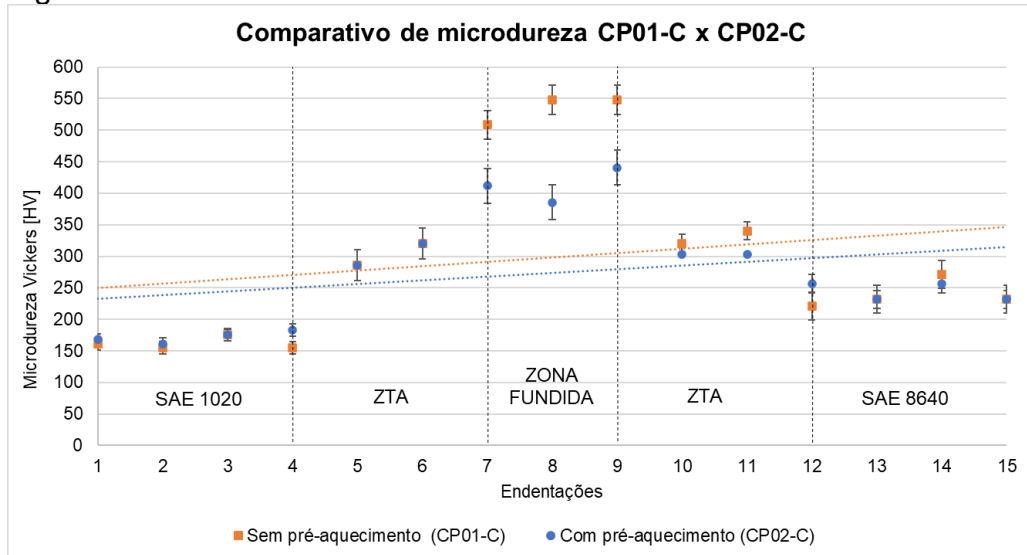
A Fig. 19d equivale a região de transição entre o metal de adição e a ZTA no metal de base SAE 8640, destacando a zona de ligação. Nessa região nota-se o aparecimento de martensita fina, contudo, mais refinada que da Fig. 18d.

Na Fig. 19e constata-se um refinamento dos grãos do metal de base quando comparado à condição de soldagem sem o pré-aquecimento. E a Fig. 19f representa o metal de base SAE 8640 em sua composição original, sem alterações microestruturais.

4.4 ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS

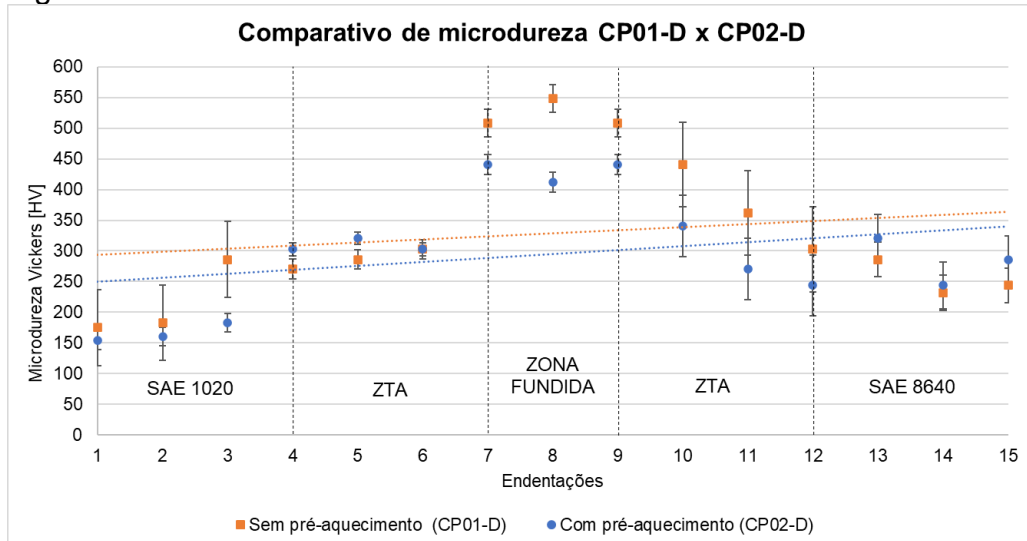
Os resultados de microdureza Vickers obtidos através da análise dos perfis extraídos de cada condição de soldagem podem ser observados nas Fig. 20 e Fig. 21.

Figura 20: Gráfico de microdureza Vickers CP01-C e CP02-C.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 21: Gráfico de microdureza Vickers CP01-D e CP02-D.



Fonte: Do autor (2022)

O maior valor de microdureza está compreendido na zona fundida. Nota-se que a condição de soldagem sem pré-aquecimento (CP01-C e CP01-D) apresenta o maior valor de microdureza de 548,27 HV. Já a condição de soldagem com pré-aquecimento (CP02-C e CP02-D) demonstra o seu maior valor de microdureza



compreendido em 440,70 HV. Portanto, há uma diferença de microdureza na ordem de 107,57 HV quando comparado as duas condições de soldagem.

A redução de dureza nos CP02-C e CP02-D deve-se à influência do pré-aquecimento, que eleva a temperatura do metal adjacente à solda, favorecendo a formação de um menor gradiente de temperatura entre o metal depositado e os metais de base, de modo que a zona de soldagem aquecida resfria mais lentamente (MIYAHARA, 2008).

5 CONCLUSÃO

Em virtude da progressiva busca das indústrias fabricantes de equipamentos em otimizar seus produtos, a fim de obterem maior qualidade e confiabilidade no produto final, os estudos relacionados à metodologia dos processos de fabricação se tornam essenciais. Nesse contexto, fica visível a importância da soldagem entre aços dissimilares para o cotidiano industrial, já que esse processo é propulsor da redução de custos e promove segurança para as empresas.

Para a soldagem entre os aços dissimilares SAE 1020 e SAE 8640 objetivando a aplicação industrial em um moinho de bolas, o controle dos parâmetros de soldagem foram fundamentais para obter um bom desempenho, visto que os corpos de prova que foram submetidos a um ciclo térmico controlado garantiram melhores comportamentos da junta soldada.

Verificando os resultados obtidos nos ensaios, é notável a influência do pré-aquecimento na soldagem entre os aços dissimilares. No ensaio de tração, os corpos de prova que foram pré-aquecidos suportaram maiores valores de tensão que os corpos de prova que não foram pré-aquecidos.

Para a análise de microdureza, pode-se observar que para os gráficos das Fig. 20 e Fig. 21, os corpos de prova soldados com pré-aquecimento apresentaram menores valores de dureza na ZTA e na zona fundida, quando comparados aos sem pré-aquecimento. A diferença de dureza entre a zona fundida e os metais de base estão relacionadas ao ciclo térmico ocorrido; à composição química dos materiais; e devido ao fato do arame consumível possuir maior parcela de elementos de liga em percentual de massa que os metais de base.



Na análise metalográfica foi possível identificar as inclusões presentes nos metais de base; verificar de forma macrográfica o cordão de solda formado; e observar as alterações microestruturais ocorridas decorrente do processo de soldagem. A amostra que foi soldada com o pré-aquecimento sobressaiu à que foi soldada em temperatura ambiente, pois houve um refinamento dos grãos próximo à linha de fusão. Essa diminuição dos tamanhos dos grãos está relacionada ao tratamento térmico de pré-aquecimento e à influência da taxa de resfriamento do material ser mais lenta.

Na análise qualitativa do dobramento de face, ambas condições de soldagem foram aprovadas, de modo que não apresentaram trincas e descontinuidades. À vista disso, é possível afirmar que os parâmetros e a metodologia de soldagem seguidos nesse estudo apresentaram-se satisfatórios.

Em síntese, comprova-se que o pré-aquecimento antes de realizar o processo de soldagem GMAW nos aços dissimilares SAE 1020 e SAE 8640 influenciou positivamente na obtenção dos resultados, sendo capaz de ser aplicado no âmbito industrial em equipamentos que necessitam realizar elevados esforços mecânicos, visando aumentar a vida útil, o desempenho e o custo-benefício. Os ensaios realizados em laboratórios mostraram-se confiáveis, contudo, na esfera industrial há a possibilidade dos materiais que constituem o equipamento apresentarem defeitos, o que pode influenciar na ocorrência de falhas mecânicas. Portanto, o procedimento de soldagem aliado a um ciclo térmico controlado converge em resultados positivos.

Como sugestão para trabalhos futuros, é relevante realizar um estudo sobre a análise de falha por fadiga na junta soldada, com direcionamento para cargas intermitentes e que sofrem vibrações.

REFERÊNCIAS

ASM International. ASM Handbook, "Heat Treating", Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio, USA, 1991, 2173 p.

ASTM E45-18. "Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel". West Conshohocken, PA, 2018

AWS A5.28/A5.28M, "Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding". Miami, FL, 2005.



AWS A5.32M/A5.32, “Welding Consumables – Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes”. Miami, FL, 2011.

AWS D1.1/D1.1M, “Structural Welding Code – Steel”. Miami, FL, 2020.

Barbedo, N. D. D., 2011, “Avaliação Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW Utilizando Aço ASTM A-36 Para Verificar a Soldabilidade, Propriedades Metalúrgicas e Geométricas, e Resistência Mecânica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá/MG, Brasil, 82p.

Barbosa, R. P., 2007, “Tecnologia Mecânica: Metalurgia da Soldagem e Soldabilidade dos Materiais”, Apostila de Graduação, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTEMG, Departamento de Engenharia de Materiais, Coronel Fabriciano – MG, 109 p.

Campos, W. R. C.; Gomes, F. J. O.; Gonçalves, T. N.; Soares, B. A., 2009, “Caracterização Microestrutural de Solda Dissimilar - Aço Inoxidável Austenítico AISI 304 com Adição da Liga de Níquel Inconel 625”, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 6, pp 19-23.

Carvalho, A. R. T.; Leal, W. S.; Ismail, K. A. R., “Estudo da influência da agitação e da severidade de têmpera do meio de resfriamento na determinação de velocidades críticas de têmpera”. In: 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2004, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Chiaverini, V., “Aços e Ferros Fundidos”, 7. ed. atual, São Paulo, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, 2008, 599 p.

Colpaert, H., “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, 4. ed., rev. atual. São Paulo: Edgard Blücher, 2008, 652 p.

EEEP - Escola Estadual de Educação Profissional, 2020, “Processos de Soldagem” - Apostila do Curso Técnico em Mecânica, Governo do Estado do Ceará, Ensino Médio Integrado à Educação Profissional, Ceará-CE, 95 p.

Fortes, C., 2005, “Metalurgia da Soldagem”, ESAB MIG Welding Handbook – ESAB Welding & Cutting Products, Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR, 48 p.



Giordani, T., 2012, “Avaliação Metalúrgica e Mecânica de Aços Cementados e Temperados de Forma Convencional e Intensiva”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, 106 p.

Godoy, W. L., 2008, “Efeito Da Temperatura De Pré-Aquecimento E Características Do Pulso Na Microestrutura De Aço Estrutural De Alta Resistência e Baixa Liga Soldado Com Arco Elétrico e Proteção Gasosa”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru/SP, Brasil, 178 p.

I.I.W., Doc. IX – 555-67, "Notes on the carbon equivalent", International Institute of Welding, AWS, Miami, FL, 1967.

Junior, G. S., 2017, “Estudo da influência do processo ECAP (Equal Channel Angular Pressing) nas propriedades mecânicas e características microestruturais do aço SAE 1020”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá/SP, Brasil, 146 p.

Kejelin, N. Z., 2012, “Soldagem De Revestimento De Aços Comuns C-Mn Com Superliga a Base De Níquel Inconel 625”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Santa Catarina/SC, Brasil, 219 p.

Kuchler, M. M., 2009, “Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem de Dutos em Operação”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, 95 p.

Lima, D. R. S., 2007, “Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço AISI 8640 destinado à produção de brocas de perfuração”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre/RS, Brasil, 79 p.

Machado, I. G., 2012, “Novos Paradigmas para Especificação de Juntas Soldadas”, Soldagem & Inspeção, Vol.17, Nº. 3, p.278-288.

Meireles, A. M., 2009, “Avaliação dos Parâmetros de Curvamento por Indução em Tubos da Classe API 5L X80”. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 118 p.

Miyahara, V. T. P., 2008, “Avaliação Das Propriedades Mecânicas E Da Microestrutura De Aços Dissimilares ABNT 8620 E ABNT 6655 LN 28 Soldados Com Arco Pulsado Com Diferentes Temperaturas De Pré-Aquecimento E Tipos De Tecimento”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru/SP, Brasil, 116 p.



Modenesi, P. J., 2011, “Soldabilidade de algumas ligas metálicas” - Apostila de Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Minas Gerais/MG, 27 p.

Modenesi, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. B., 2012, “Introdução à Metalurgia da Soldagem” – Apostila de Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte-MG, 209 p.

Moreira, A. F., 2008, “Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – Unesp, São Paulo/SP, Brasil, 147 p.

Scotti, A.; Ponomarev, V., “Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho”, 2.ed., São Paulo: Artliber, 2014. 288p.

Silva, J. A., 2014, “Referencial de Qualidade para a Indústria do Petróleo e do Gás, baseado na ISSO/TS 29001:2010 e a aplicabilidade desses requisitos nos Tratamentos Térmicos de Soldaduras em conformidade com a EM ISO 17663:2009”. In: 1st International Conference on Quality Engineering and Management, Proceedings Book. p. 147-175.

Silveira, F., Zuchetto, A., Ruppenthal, J. E., Machado, F. M., 2018, “Tratamento Térmico De Têmpera Em Aço ABNT 8640: Análise Das Propriedades Mecânicas”, HOLOS, Ano 34, Vol. 02, pp. 49-59.

Souza, D. J., 2017 “Estudo da União de Materiais Similares e Dissimilares Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção (FW)”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá/MG, Brasil, 88 p.

Tatagiba, L. C. S.; Golçaves, R. B.; Paranhos, R., 2012, “Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG”, Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol 17, n. 3, pp 218–228.

Teixeira, F. R., 2017, “Soldagem Dissimilar Entre Uma Liga Níquel e Um Aço ARBL Empregando o Processo GMAW e a Técnica Switchback”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém/PA, Brasil, 102 p.

Zeemann, A.; Emygdio, P.R.O. Básico de Soldagem. Apostila Tecmetal, abril 2001.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus. A minha família e meu namorado, por todo apoio. Ao meu orientador Adelor Felipe da Costa, por todo auxílio no desenvolvimento desta pesquisa. A UNISATC, por disponibilizar os laboratórios para realização dos ensaios práticos. Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste artigo.