

SOLDAGEM GTAW DO AÇO SAE 4130: INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO*

Nathália Mello M. Paixão¹
Matheus Soares Siman²
Denise Lemos Cardoso³
Ivan José de Santana⁴

Resumo

A soldagem GTAW tem importância fundamental para a indústria não só pelo excelente controle do aporte térmico, como também ao fato de proporcionar, repetitividade e reprodutibilidade. No entanto, este apresenta uma série de desafios, principalmente em relação à determinação de algumas variáveis e como essas podem afetar a resistência das juntas soldadas. Neste trabalho, investigou-se a influência de diferentes procedimentos de soldagem em tubos de aço SAE 4130 sem costura com e sem a deposição e com a aplicação ou não de pré-aquecimento. Após procedimentos de soldagem, as propriedades mecânicas e a microestrutura da junta soldada, zona fundida, zona termicamente afetada e metal base, foram avaliadas por meio de ensaios de microdureza, de dobramento e análise metalográfica. Foi possível avaliar a influência da aplicação do pré-aquecimento e analisar as propriedades mecânicas e microestrutura das juntas soldadas. Os perfis de microdureza revelaram a importância do pré-aquecimento. O ensaio de dobramento possibilitou a avaliação das juntas de maneira qualitativa. Porém, um ensaio quantitativo, como o de tração, possibilitaria mais informações.

Palavras-chave: Soldagem GTAW, Soldagem TIG, soldagem do aço SAE4130

GÁS METAL ARC WELDING OF THE STEEL SAE 4130: INFLUENCE OF THE PRE-HEATING

Abstract

GTAW process has a fundamental importance in the industry, not only because its excellent thermal input control, but also because it proceeds the welding providing repeatability and reproducibility. However, this still presents many challenges. Mainly in the determination of the welding parameters and how these can influence the welded joints resistance. In this work, we investigated the different welding procedures influence on SAE 4130 steel pipes with or without deposited material and with or without preheating. In this context, after welding procedures the mechanical properties and the microstructure of the welded joint, fusion zone, Heat-Affected Zone and base metal, were evaluated by microhardness tests, folding and metallographic analysis. The preheating influence on the joint was evaluated as well as the mechanical and microstructural properties. The results indicate that this procedure significantly influenced the final properties of the welded joint. The folding test allowed the evaluation of joints in a qualitative way. However, a quantitative test, such as traction, would provide more information.

Keywords: Gas Metal Arc Welding, Welding of the Steel 4130, Welding TIG.

¹ Engenheira de Materiais, ex-aluna, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenharia de Materiais, Estudante, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenharia de Materiais, Estudante, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) utiliza o arco elétrico como fonte de energia, eletrodos não consumíveis de tungstênio e gases inertes de proteção, possibilitando a soldagem com ou sem material de deposição [1-5]. O gás de proteção, inerte, tem como função proteger a poça de fusão, o eletrodo de tungstênio e o metal de deposição, quando usado, contra o ambiente circunvizinho e possibilitar e estabilizar o arco elétrico [1-5]. A soldagem TIG pode ser realizada manualmente, semiautomática ou automaticamente, podendo ser realizado em todas as posições de soldagem e em diversas aplicações [1-5]. A soldagem TIG permite um alto controle de energia transferida, e o nível de contaminação é muito baixo, o que possibilita a confecção de cordões de solda praticamente sem respingos e sem necessidade de muita limpeza após sua execução, podendo gerar uma junta soldada de alta qualidade [1-5]. Os fatores limitantes do processo de soldagem TIG são: alto custo dos equipamentos utilizados e maior tempo de execução se comparado ao processo de soldagem de eletrodo revestido [1-5]. Este processo de soldagem é indicado para metais de baixa soldabilidade, soldagem de chapas finas, metais não ferrosos e aços inoxidáveis e passe de raiz na soldagem de tubulações [1-5].

Após a soldagem, o calor que a região soldada recebeu rapidamente se dissipa por toda a massa metálica resultando em um resfriamento rápido. Para evitar esse resfriamento rápido e a formação de fases metaestáveis indesejáveis na zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) costuma-se pré-aquecer e/ou pós aquecer a peça [6]. Em suma, o pré-aquecimento e/ou o pós aquecimento pode reduzir a dureza da zona termicamente afetada, minimizar o risco de trincas por hidrogênio e evitar ou atenuar o aparecimento de tensões residuais [6]. A necessidade de pré-aquecimento e sua temperatura dependem do teor de carbono da liga metálica e do teor dos outros elementos de liga, do tamanho e espessura da peça, velocidade de soldagem e diâmetro do consumível [6]. Quanto maior for o teor de carbono existente no aço, maior será a temperatura de pré-aquecimento, isto também ocorre para os teores de elementos de liga, porém em uma menor proporção [6]. Um método para se calcular a temperatura de pré-aquecimento é o do carbono equivalente (C_{eq}). Quanto maior for o carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento. A equação 01, definida pela IIW (*International Institute of Welding*), pode ser aplicada para se determinar o carbono equivalente.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (01)$$

Há muitas maneiras de se calcular a temperatura de pré-aquecimento, as equações 02 e 03 exibem uma possibilidade.

$$C_{eq\ total} = 0,005 \times C_{eq} \times \text{espessura (mm)} \quad (02)$$

$$T \text{ (}^\circ\text{C)} = 350 \times \sqrt{C_{eq\ total} - 0,25} \quad (03)$$

Além do pré-aquecimento, após a solda, pode ser que seja necessário a realização do processo de pós-aquecimento. Além do pós-aquecimento, a região soldada pode ser submetida a tratamentos térmicos como recozimento para alívio de tensões, recozimento pleno, normalização, têmpera e revenimento [6-9].

Os aços da família 41XX são muito utilizados na construção de carros, aviões, na indústria de petróleo como perfuradores de poços e possui muitas outras aplicações. São muito aplicados em construções que requerem limite de escoamento e tensão de escoamento entre 410 MPa e 965 Mpa [9, 10].

Ghosh (2003) verificou a influência do pré e do pós-aquecimento na soldagem de aço Cr-Mo aplicando os processos SMAW (*Shielded Metal arcWelding*) e GTAW, realizando testes em várias temperaturas. O pós-aquecimento melhorou as propriedades, ao que indica até certa temperatura, o teste realizado a 800º diminuiu a resistência mecânica causando trincas/fraturas durante o ensaio de tração [12].

Marcelino P. Nascimento (2011) verificou a influência da resistência à fadiga do aço AISI 4130 submetido a repetidos processos de reparação pelo método GTAW, observando que estes ciclos influenciam significativamente as propriedades mecânicas da junta [13].

Z.B. Jiao (2016) observou os efeitos do pré e do pós-aquecimento na precipitação de nano partículas e na resistência mecânica de aços de elevada dureza, comprovando a importância do tratamento térmico após a solda para recuperação destas propriedades e as diferenças microestruturas obtidas em diferentes temperaturas [14].

Ghosh (2014) estudou a influência do pré e pós-aquecimento na soldagem de aço 9Cr-1Mo (V-Nb) a partir do processo de SMAW e GTAW. Nesse estudo os autores obtiveram um aumento na resistência na região da junta soldada das amostras tratadas com a combinação dos dois procedimentos [15].

Kon Lee (2015) analisou o aspecto termomecânico de juntas espessas de aço AISI 4130 soldadas pelo processo GTAW e tratadas termicamente, observando que o revenimento a 550°C aumenta a resistência ao impacto na ZTA [16].

Neste trabalho, investigou-se a influência da aplicação ou não de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas e na microestrutura formada nas juntas soldadas de tubos de aço SAE 4130 sem costura aplicado o processo GTAW com ou sem a deposição de material.

Nesse contexto, após a realização de procedimentos de soldagem, as propriedades mecânicas e a microestrutura da junta soldada, zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB), foram avaliadas por meio de ensaios de microdureza, ensaios de dobramento e análise metalográfica. Foi possível avaliar a influência da aplicação ou não de pré-aquecimento, assim como a influência da aplicação ou não de material de deposição na extensão da Zona termicamente afetada, nas microestruturas geradas e nas propriedades mecânicas das juntas soldadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados tubos de aço AISI 4130, laminados, sem costura e com diâmetro externo de 29,20mm e espessura da parede de 1,9mm. A Tabela 1 exhibe a especificação química do material especificada pela norma NBR 87, 2000 [10].

Tabela 1. Especificação química do aço AISI 4130 de acordo com a norma NBR 87, 2000

Especificação química do aço AISI 4130 (%)						
Carbono	Manganês	Silício	Níquel	Cromo	Molibdênio	Vanádio
0,28 - 0,33	0,40 - 0,60	0,15 - 0,35	-	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	-

A Tabela 2 mostra a especificação química do material de deposição, varetas de aço com 1,6mm de espessura e 1m de comprimento.

Tabela 2. Especificação química do material depositado, referência ER70S-3[1]

Especificação química do material de posição (%)									
C	Mn	Si	P	S	Ní	Cr	Mo	V	Cu
0,06 - 0,15	0,90 – 1,40	0,45 – 0,75	0,025	0,035	0,15-	0,15	0,15	0,03	0,50

Para a caracterização do tubo a composição química foi determinada por espectroscopia de emissão ótica.

Para análise da microestrutura do tubo como recebido, seção longitudinal e transversal, este foi cortado e amostras foram preparadas. Após os cortes essas amostras, assim como todas as outras para análise microestrutural, foram lixadas e posteriormente polidas e atacadas quimicamente com o reativo Nital 3%. Para a realização das macrografias foi utilizado Nital 5%[17].

Amostras do tubo, após aquecimento a 200°C por 20 minutos, tiveram sua microestrutura, seção longitudinal e transversal, novamente analisada.

As amostras do tubo, seção longitudinal e transversal, do material como recebido e aquecido a 200°C foram submetidas a ensaios de microdureza Vickers aplicando carga de 300g durante 15s em diferentes regiões para a determinação do valor de dureza média.

Para os procedimentos de soldagem foram confeccionados corpos de prova de 150mm e de 300mm de comprimento, sem chanfro. A Figura 1 exibe o desenho esquemático dos corpos de prova e sua montagem para a soldagem com (a) e sem metal de adição (b).

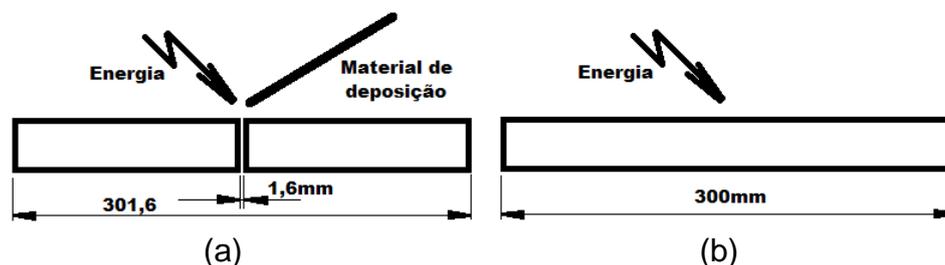


Figura 1. Desenho esquemático dos corpos de prova e sua montagem para a soldagem com (a) e sem metal de adição (b).

Na soldagem autógena, utilizou-se o seguinte procedimento: em um corpo de prova de 300mm, percorria-se circunferencialmente o tubo com a tocha (arco elétrico) com a manutenção da poça de fusão. Este procedimento foi realizado a fim de se minimizar a influência do soldador na montagem dos corpos de prova.

A Tabela 5.3 mostra as quantidades de corpos de prova utilizados e os procedimentos de soldagem pelo qual eles foram submetidos.

Tabela 3. Quantidade de corpos de prova e procedimentos realizados

Corpos de prova	Procedimentos executados	
12 de 150 mm	03 conjuntos soldados: Com material de deposição e pré-aquecimento.	03 conjuntos soldados: Com material de deposição e sem pré-aquecimento.
06 de 300 mm	03 corpos de prova soldados: sem metal de deposição e com pré-aquecimento.	03 corpos de prova soldados: sem metal de deposição e sem pré-aquecimento.

A fonte de energia utilizada é da marca IMC MTE DIGITEC modelo 460/600. Foi utilizada corrente contínua com polaridade direta (CC-) de 60 A, argônio como gás de proteção (vazão de 15 l/min) e eletrodo com 2% óxido de tório.

Para a realização do ensaio de dobramento, as amostras foram inseridas em uma máquina universal da marca VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig de acordo como mostra a Figura 2. Os corpos de prova eram sustentados por dois apoios, e um cutelo foi o responsável pela aplicação de uma força perpendicular ao eixo longitudinal dos tubos. A severidade do ensaio foi determinada pela distância em que o cutelo (raio de 31,5 mm) se movimentou, e que em todos os casos foi de 70 mm. Um corpo de prova de 300 mm do material como recebido sem solda, também foi testado.



Figura 2. Desenho esquemático do ensaio de dobramento (a) e fotografia da condição real de ensaio (b).

Após os ensaios de dobramento, os corpos de prova foram cortados, Figuras 3 (a) e (b), e as amostras revelando a seção transversal do cordão, figura 3 (c) foram embutidas e preparadas para a realização dos procedimentos de análise metalográfica, micrografia e macrografia e ensaios de microdureza.

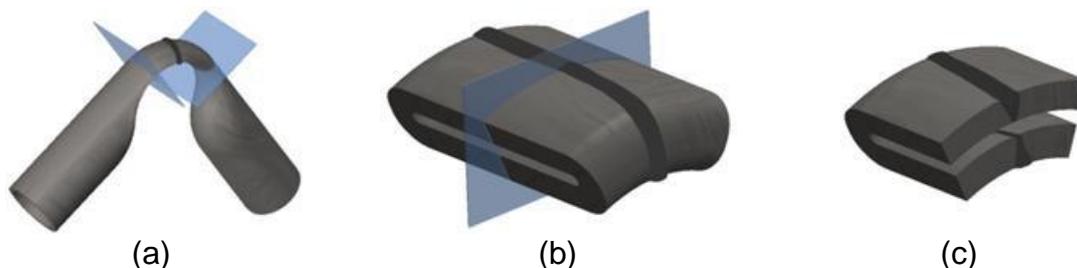


Figura 3. Desenho esquemático dos corpos de prova e os cortes feitos para a obtenção das amostras para análise metalográfica.

Para a construção do perfil de microdureza a partir do centro da zona fundida em direção ao metal base foram realizados ensaios com espaçamento de 0,3 mm, carga de 300 gf e tempo de aplicação de 15 s, figura 4.

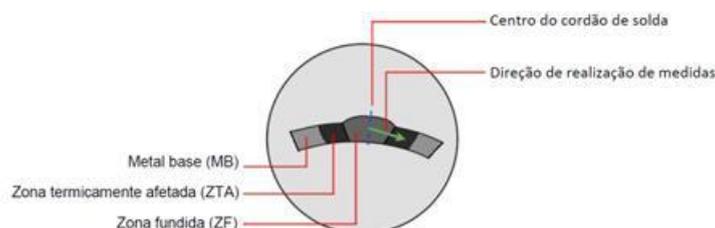


Figura 4. Desenho esquemático do procedimento para medição da microdureza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 exibe o resultado da análise química do material como recebido.

Tabela 4. Composição química do aço AISI 4130 obtida

Composição química do aço AISI 4130 (%)						
Carbono	Manganês	Silício	Níquel	Cromo	Molibdênio	Vanádio
0,24	0,83	0,17	-	1,14	0,21	-

Percebe-se que os valores de cromo e o molibdênio estão dentro do especificado para a composição química do material de acordo com a norma NBR 87, 2000 [10]. Os outros elementos se afastaram um do especificado, porém dentro dos padrões de incerteza de um processo de medição. Portanto, o material atende ao especificado pela norma e ao propósito do trabalho.

As micrografias das seções longitudinal e transversal do tubo como recebido podem ser observadas nas Figuras 5.

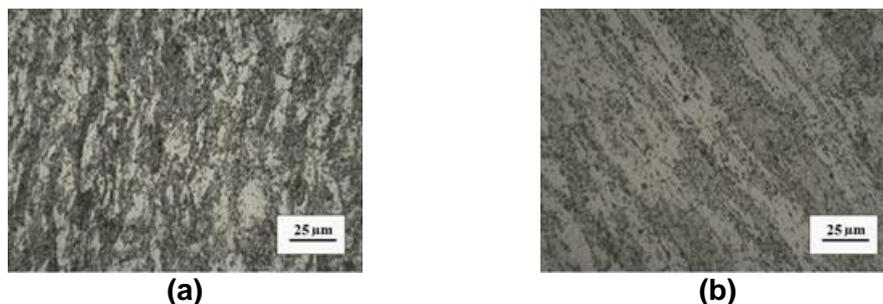


Figura 5. Fotomicrografia do material do tubo como recebido: seção transversal (a) e seção longitudinal (b).

Analisando-se as micrografias apresentadas e a composição química obtida, pode-se dizer que as amostras são formadas, basicamente, em função da composição química, por ferrita, cementita e alguns precipitados [6-8 e 17]. Percebe-se certa orientação dos grãos na micrografia da seção longitudinal, figura 5 (b), que apresentam formatos alongados. Fato correlacionado ao fato do tubo ter sido conformado mecanicamente [17].

A Tabela 5 exibe os valores de microdureza medidos nas amostras de tubo de seções transversais e longitudinais da maneira como foi recebido e após o aquecimento à 200°C durante 20 min e resfriado ao ar.

Tabela 5. Título da tabela sem ponto final

Condição	Seção/Dureza	Medida (HV)	Medida (HV)	Medida (HV)	Média (HV)	Desvio Padrão (HV)
Recebido	Transversal	251	248	235	245	9
	Longitudinal	214	216	219	216	3
Aquecido 200°C	Transversal	239	247	246	244	4
	Longitudinal	224	260	249	244	18

A dureza do tubo aquecido a 200°C não se mostrou diferente da apresentada pelo material como recebido. A microestrutura do material como recebido e aquecido a 200°C, também não exibiram diferenças significativas, o que confirma que essa

temperatura de pré-aquecimento, por si só, não é capaz de interferir na microestrutura e propriedades mecânicas do material, como prevê a literatura [6,7,8, e 17].

A Tabela 6 apresenta a identificação de cada corpo de prova (CP) soldado submetido ao ensaio de dobramento. Ela registra se houve ou não fratura durante o ensaio e apresenta o valor da carga máxima aplicada no ensaio,

Tabela 6. Comportamento dos corpos de prova durante ensaio de dobramento

Corpo de prova	Processo	Trincou	Carga aplicada (KN)
CP 01	com deposição com pré-aquecimento	Não	18,1
CP 02		Não	17,6
CP 03		Não	18,1
CP 04	com deposição sem pré-aquecimento	Não	17,6
CP 05		Sim	17,6
CP 06		Sim	18,6
CP 07	autógena sem pré-aquecimento	Não	18,1
CP 08		Não	17,8
CP 09		Sim	10,7
CP 10	autógena com pré-aquecimento	Não	18,1
CP 11		Não	17,6
CP 12		Não	17,6
CP 13	material como recebido	Não	17,2

Percebe-se que só se verificou a formação de trincas durante o ensaio de dobramento nos corpos de prova que foram soldados sem o pré-aquecimento. O que indica a eficácia do pré-aquecimento para evitar que a junta soldada falhe durante a aplicação de esforços e conseqüentemente a existência de deformações plásticas. Isto se deve ao fato do pré-aquecimento diminuir a formação de martensitana ZTA e com isso aumentar a ductilidade dificultando a propagação da trinca.

A Figura 6 apresenta as imagens de um corpo de prova, com pré-aquecimento, com material de deposição que foi submetido ao ensaio de dobramento e não trincou.



Figura 6. Imagem de um corpo de prova, sem pré-aquecimento, que trincou durante o ensaio de dobramento.

A Figura 7 apresenta as imagens de um corpo de prova, sem pré-aquecimento, que foi submetido ao ensaio de dobramento e que trincou na parte interna da curvatura. Percebe-se que a trinca se formou perpendicular ao cordão de solda, não

acompanhando a ZTA. O ensaio de dobramento embora utilizado em procedimentos de qualificação de processos de soldagem possui inconvenientes tais como não ser quantitativo e sim qualitativo. Além disso, neste caso não possibilitou levar todos os corpos de prova à fratura o que possibilitaria identificar a região que falharia e como se daria a ruptura.

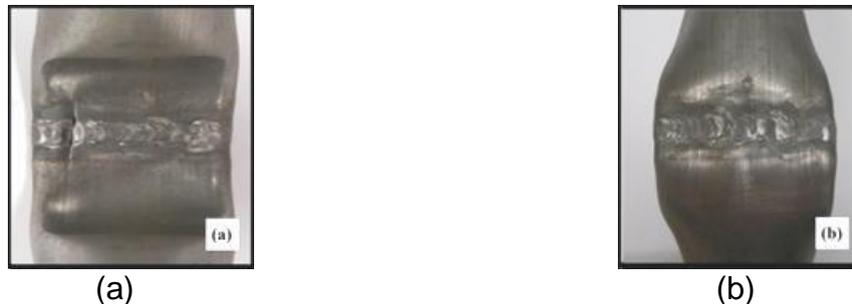


Figura 7. Imagem de um corpo de prova, sem pré-aquecimento, que trincou durante o ensaio de dobramento: (a) curvatura interna e (b) curvatura externa.

A Figura 8 apresenta um exemplo de fotomicrografias de corpos de prova que foram soldados sem material de deposição: (a) sem pré-aquecimento e (b) com pré-aquecimentos, respectivamente.

A Figura 9 apresenta um exemplo de fotomicrografias de corpos de prova soldados com material de deposição sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento, respectivamente.



Figura 8. Fotomicrografias de corpos de prova soldados sem material de deposição: sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento (b).



Figura 9. Fotomicrografias de corpos de prova soldados com material de deposição: sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento (b).

Percebe-se, nos dois casos, que a ZTA assim como a zona fundida dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento são maiores do que as apresentadas pelos sem pré-aquecimento. O que é resultado de uma menor troca de calor por condução para o metal base.

Embora a ZF e ZTA nos corpos de prova que foram soldados com pré-aquecimentos são maiores do que as apresentadas pelos sem pré-aquecimento, o segundo grupo apresenta maior probabilidade de apresentar fases metaestáveis, de

elevada dureza, favorecendo fraturas frágeis. Isto ocorre, pois à medida que a temperatura abaixa, e nesse caso de maneira brusca, os movimentos atômicos ficam cada vez mais restritos, de modo que a difusão atômica é praticamente nula. Em aços, a principal fase formada por uma transformação adifusional, ou também chamada de transformação displaciva, é a martensita (6-9).

A Figura 10 exibe o perfil de microdureza de corpos de prova que foram soldados sem material de deposição: sem pré-aquecimento e com pré-aquecimentos, respectivamente.

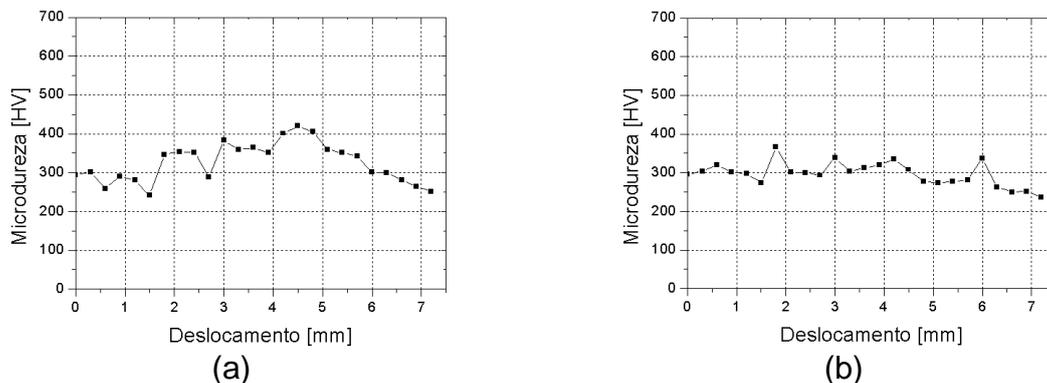


Figura 10. Perfil de microdureza de corpos de prova soldados sem material de deposição: sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento (b).

Os corpos de prova sem o pré-aquecimento apresentaram os maiores valores de dureza na ZTA, como esperado (6). Percebe-se, que com o pré-aquecimento os valores de dureza na ZF e ZTA ficaram próximos dos valores observados no metal base (Tabela 05).

A Figura 11 exibe os perfis de microdureza de corpos de prova que foram soldados com material de deposição: sem pré-aquecimento e com pré-aquecimentos, respectivamente.

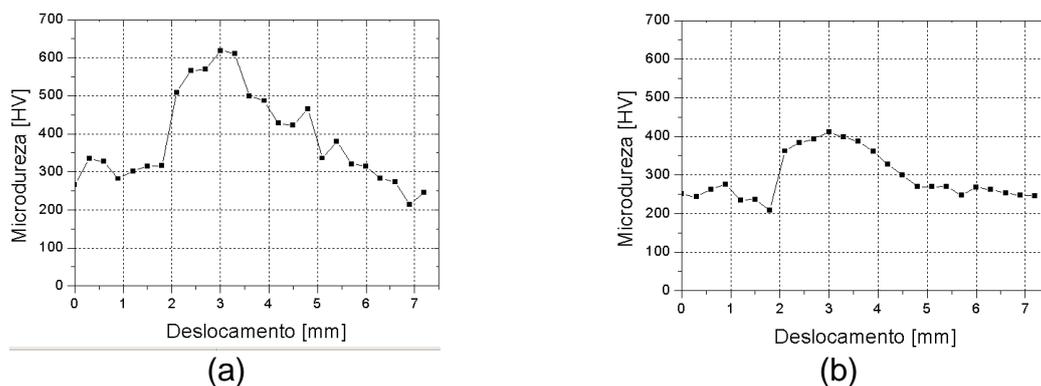


Figura 11. Perfil de microdureza de corpos de prova soldados com material de deposição: sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento (b).

Pode se verificar um aumento muito expressivo dos valores de dureza na ZTA do corpo de prova sem pré-aquecimento, valores típicos e correlatos à formação de martensita (6-9). Percebe-se, também que o pré-aquecimento se mostrou mais importante e eficiente na soldagem dos corpos de prova que foram soldados com material de deposição.

A Figura 12 e 13 apresentam exemplos de fotomicrografias de corpos de prova que foram soldados com material de deposição sem pré-aquecimento e com pré-aquecimentos, respectivamente.

Percebe-se, que nos dois casos, confirma-se o aparecimento de martensita na ZTA. Porém, no corpo de prova com pré-aquecimento há uma microestrutura semelhante à morfologia típica de martensita revenida (17), O que condiz com os dados da Figura 10 (b).

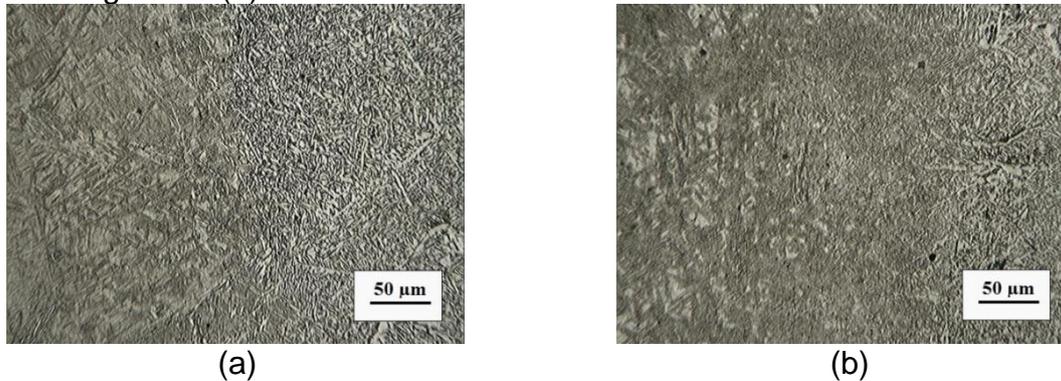


Figura 12. Fotomicrografias interface ZTA/ZF de corpos de prova soldados com material de deposição: sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento (b).

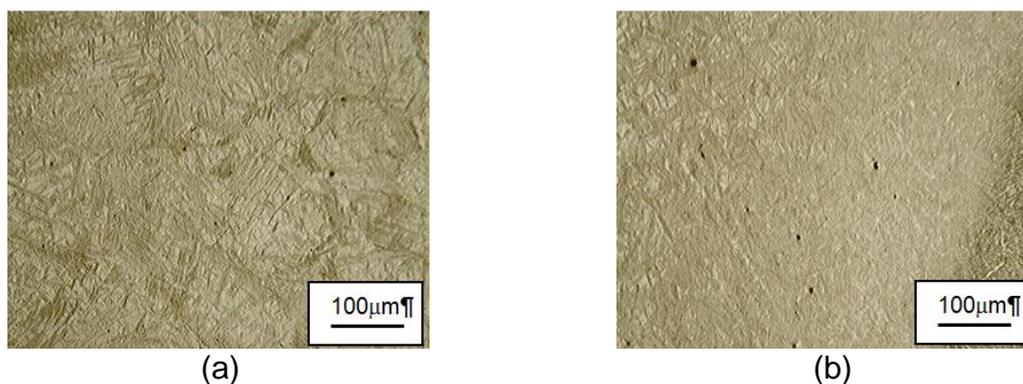


Figura 13. Fotomicrografias ZTA de corpos de prova soldados com material de deposição: sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento (b).

Embora tanto o material do tubo quanto o material de deposição apresentem baixo teor de carbono, ambos possuem, elementos de liga que aumentam a temperabilidade, possibilitando o aparecimento da martensita (6 e 9).

CONCLUSÃO

Considerando as condições avaliadas e os dados apresentados pode se chegar às seguintes conclusões:

(a) O ensaio de dobramento possibilitou, de maneira qualitativa, a avaliação da eficácia do procedimento de pré-aquecimento na formação da microestrutura da ZF e ZTA, conseqüentemente nas propriedades mecânicas. Porém, um ensaio quantitativo, como o de tração possibilitaria mais informações.

(b) Para os processos de soldagem sem material de deposição e com base no perfil de microdureza, não foi possível definir se o pré-aquecimento à 200°C trouxe grandes benefícios à junta soldada, porém, um corpo de prova falhou no ensaio de dobramento.

(c) Por outro lado, o pré-aquecimento à 200°C na soldagem com material de deposição mostrou-se muito adequado. Duas amostras soldadas com material de

deposição sem pré-aquecimento falharam durante o ensaio de dobramento, e, além disso, a ZTA exibiu valores de dureza próximos a 700HV, quase no limite do que se pode observar para a martensita.

(d) Nenhuma amostra soldada com pré-aquecimento falhou durante o ensaio de dobramento, portanto, o pré-aquecimento se mostra adequado e importante para a eficiência e confiabilidade do processo de soldagem. Justificando a sua indicação para uma possível especificação de procedimento de soldagem para o material estudado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os envolvidos direta ou indiretamente nos trabalhos realizados, em especial na Prof.^a Elaine Carballo Siqueira Corrêa. Registra a importância da utilização da infraestrutura laboratorial do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG).

REFERÊNCIAS

- 1 MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.. **Soldagem - fundamentos e tecnologia**. 3. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362p.
- 2 CARY, H. B..**Modern welding technology**. 4ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.780p.
- 3 WAINER, E.; BRANDI, S. D.; HELLO, F. D. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blücher, 2001. 494p.
- 4 GUICHARD, J. La soudure à l'arcélectrique: des principes aux applications. 3 ed. Paris:Eyrolles, 2012. 125 p.11.
- 5 LÉVESQUE, P. **Procédés de soudage à l'c arc**. 1 ed. Paris: De Boeck, 2008. 170 p.
- 6 KOU, S. **Welding metallurgy**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461 p.
- 7 ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED HILL, R. **Physical metallurgy principles**. 4 ed. Stamford: Cengage Learning, 2009. 750 p.
- 8 19. TISZA, M. **Physical metallurgy for engineers**. 3 ed. Londres: ASM International e FreundPublishing House, 2002. 404 p.
- 9 CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 87: **Aço carbono e ligados para construção mecânica – designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.
- 11 LIMA, F. B. **Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41XX: uma abordagem quantitativa**. 2006. 188 p. Dissertação (Doutorado) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 12 NASCIMENTO, Marcelino P.; VOORWALD, Herman J.c.; PAYÃO FILHO, João da C..Fatigue strength of tungsten inert gas-repaired weld joints in airplane critical structures. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 211, n. 6, p.1126-1135, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.016>.
- 13 GHOSH, P.k.; SINGH, U.. Influence of pre- and post-weld heating on weldability of modified 9Cr–1Mo(V–Nb) steel pipe under shielded metal arc and tungsten inert gas welding processes. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.229-236, jun. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/136217104225012265>.
- 14 JIAO, Z.b. et al. Effects of welding and post-weld heat treatments on nanoscale precipitation and mechanical properties of an ultra-high strength steel hardened by NiAl

- and Cu nanoparticles. **Acta Materialia**, [s.l.], v. 120, p.216-227, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.066>.
- 15 HOSH, P. K. et al. Influence of Pre and Post Weld Heating on Weldability of Modified 9Cr–1MoVNb Steel Plates under SMA and GTA Welding Processes. **IsijInternational**, Roorkee, v. 44, n. 7, p.1201-1210, abr. 2004.
- 16 LEE, I Kon; CHIEN, Yi Cheng. A Study of Microstructure and Mechanical Properties of Thick Welded Joints of a Cr – Mo Steel. **Metal Science And Heat Treatment**, [s.l.], v. 57, n. 3-4, p.175-180, jul. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11041-015-9858-6>.
- 17 COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.