

TÉCNICA DA DUPLA CAMADA APLICADA NO REPARO DO AÇO AISI 4340 SEM TTPS – EFEITO DA SOBREPOSIÇÃO DE CICLOS TÉRMICOS SOBRE O REVENIMENTO DA ZAC¹

Cleiton Carvalho Silva²
Willys Machado Aguiar³
Jesuado Pereira Farias⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação da técnica da dupla camada sobre o revenimento da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço AISI 4340 soldado com eletrodo revestido AWS E 8018-B2. As energias de soldagem foram selecionadas através do teste de Higuchi. A avaliação do revenimento da ZAC da primeira camada foi realizada usando análise de microdureza. Os resultados mostraram que a escolha adequada das relações de energias entre a primeira e a segunda camada foram suficientes para reaver a zona dura da primeira camada. Este amolecimento foi alcançado quanto utilizado as relações de energia de soldagem 5/5, 15/5 e 20/10 kJ/cm. A técnica da dupla camada foi eficiente, do ponto de vista de dureza, visto que os valores de dureza alcançados foram inferiores ao metal de base para três das quatro relações de energia empregadas.

Palavras-chave: Soldagem; Dupla-camada; Revenimento; Aço AISI 4340.

DOUBLE LAYER DEPOSITION TECHNIQUE APPLIED IN THE REPAIR OF THE AISI 4340 STEEL WITHOUT PWHT – EFFECT WELDING HEAT INPUT ON HAZ TEMPERING

Abstract

The present work aims to evaluate the application of the double layer technique on the heat affected zone (HAZ) tempering of AISI 4340 steel, welded with different heat input levels between the first and second layer. The weld heat input levels were selected by the Higuchi test. The evaluation of the tempering of the CGHAZ of the first layer was carried out using microhardness measurements. The results indicated that the appropriate choice of the heat input levels between the first and second layer were enough to temper of the hard zone of the first layer. This softening was achieved when the weld heat input relation was 5/5, 15/5 and 20/10 kJ/cm. The two-layer technique was efficient, from the point of view of hardness, since the hardness values reached were smaller than the base metal for three out of the four weld heat input relations applied.

Key word: Welding; Two-layer technique; Tempering; AISI 4340 steel.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Engº, M.Sc., Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.*

³ *Engº, M.Sc., Professor de Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará – CEFET-CE. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.*

⁴ *Dr., Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.*

1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) é indicado na soldagem de aços baixa liga para promover o alívio das tensões residuais de soldagem e o revenimento da zona afetada pelo calor (ZAC). Isso porque na soldagem é provável a geração de tensões residuais de tração, as quais são conhecidas por terem efeito maléfico sobre a resistência à fratura e vida em fadiga,⁽¹⁾ bem como a formação de microconstituintes duros como a martensita, sendo, portanto fundamental eliminar tais alterações metalúrgicas para aumentar a resistência à trincas devido ao aumento da tenacidade.⁽²⁾

Contudo, nem sempre tal procedimento pode ser realizado devido ao seu elevado custo ou mesmo à impossibilidade de sua realização em determinadas condições (estruturas de grande porte, montagem ou reparo no campo etc.). Aloraier e colaboradores⁽³⁾ citam que o TTPS pode ser realizado facilmente durante as etapas iniciais de fabricação, porém, o mesmo pode ser impossível quando a estrutura está submetida à esforços mecânicos, podendo causar a sua deformação. Também concordam que tal tratamento é caro e consome muito tempo.

A crescente substituição na indústria, de aços carbono por aços baixa liga, tem motivado a pesquisa de procedimentos de soldagem que eliminem o tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) o qual faz parte do procedimento convencional de soldagem destes aços.⁽⁴⁾ Uma alternativa à realização do TTPS é a técnica da dupla camada. Esta técnica tem como objetivo causar mudanças microestruturais na ZAC de forma a promover o revenimento da martensita formada durante o ciclo térmico de soldagem, bem como o refino dos grãos. Assim, é possível reduzir a dureza e aumentar a tenacidade destas zonas, evitando a formação de trincas.⁽⁵⁾ Para que sejam conseguidos tais efeitos é importante estabelecer uma relação de energia de soldagem entre a primeira e a segunda camada a serem depositadas. Este controle das energias entre as camadas tem um papel muito importante no refino e no revenimento da zona afetada pelo calor (ZAC) da primeira camada.⁽⁶⁾

Vários trabalhos^(7,8) mostram que a soldagem sem TTPS constitui, portanto, um recurso efetivamente atrativo para os aços baixa liga. Mas como escolher corretamente as energias a serem aplicadas em cada camada? Um procedimento que tem sido aplicado com sucesso no estabelecimento de relações de energias de soldagem entre as camadas é o teste de Higuchi.⁽⁹⁻¹¹⁾ Este teste consiste na soldagem de um único cordão com um dado nível de energia sobre o material na condição temperado e não revenido. Após a soldagem, deve-se determinar a altura do reforço, a profundidade de penetração e a extensão das zonas duras e macias da ZAC. Com base nestas informações, é possível avaliar qual relação de energia é capaz de promover o revenimento da ZAC sem que esta seja retemperada. Para isso, a sobreposição deve satisfazer as condições estabelecidas na da Figura 1.

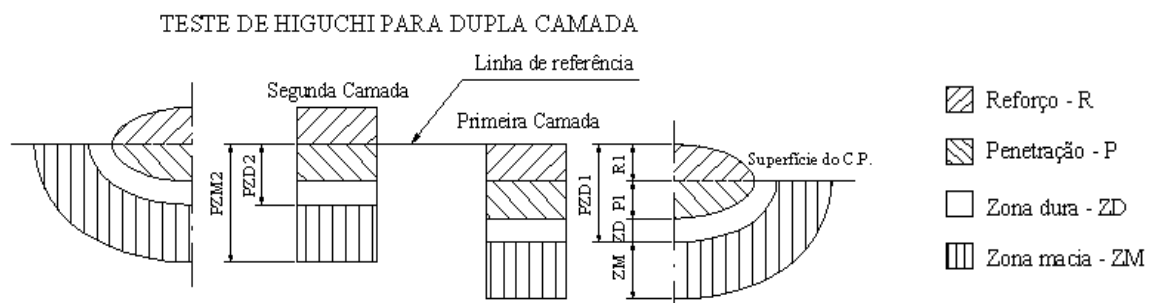


Figura 1. Superposições das camadas.

1ª Condição: $PZM_2 > PZD_1$

PZM_2 = profundidade da zona macia da segunda camada;

PZD_1 = profundidade da zona dura da primeira camada.

2ª Condição: $PZD_2 < R_1 + P_1$

PZD_2 = profundidade da zona dura da segunda camada;

R_1 = reforço da primeira camada;

P_1 = penetração da primeira camada.

A primeira condição garante que o calor contido na ZAC da segunda camada provoque o refino e o revenimento da zona dura da primeira camada, e a segunda condição garante que a zona dura da primeira camada não vai ser retemperada. A zona fundida da primeira camada é austenitizada, proporcionando uma recristalização e formação de alguma martensita com baixa dureza.

O presente trabalho apresenta os resultados referentes ao efeito da sobreposição de ciclos térmicos de soldagem sobre a dureza da ZAC, avaliando assim o grau de revenimento proporcionado pela técnica da dupla camada no aço AISI 4340, objetivando garantir boas propriedades mecânicas à junta soldada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em discos de aço AISI 4340 com (\varnothing 150 mm e espessura de 25 mm), cuja composição química encontra-se na Tabela 1. Como material de adição foi utilizado o eletrodo revestido AWS E8018 B2 cuja composição química encontra-se na Tabela 2. A utilização deste eletrodo é sugerida por técnicos da Petrobrás, por ser o mesmo eletrodo utilizado em reparo por solda, no aço AISI 4340.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4340(% em peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
0,42	0,67	0,18	0,03	0,23	0,87	0,27	1,68

Tabela 2. Composição Química do metal depositado (% em peso)

C	Mn	Si	Cr	Mo
0,08	0,90	0,60	1,00	0,50

2.1 Ensaio de Simples Depósito (Cordão Isolado)

Esta primeira etapa consistiu na deposição de um cordão de solda sobre corpos de prova temperados (austenitizados a 860°C em banho de sais por 20 minutos e resfriados em óleo), e não revenidos para a avaliação da microestrutura, medição do reforço e da penetração, e extensão da ZAC através de ensaio de microdureza com carga de 100 g para a realização do teste de Higuchi.⁽⁹⁾ Foram testados quatro valores de energias de soldagem, cujos parâmetros encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para o aço AISI 4340.

Corpo de prova	Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Ø do eletrodo (mm)	Energia de soldagem (kJ/cm)
3HC5	103	27	30	2,5	5,4
3HC10	103	26	15	2,5	10,7
3HC15	102	26	10	2,5	15,7
3HC20	129	26	10	3,25	20,3

2.2 Ensaio com Junta Semi-V

Esta etapa foi realizada no intuito de avaliar a viabilidade do procedimento de soldagem com dupla camada, simulando uma situação real de recuperação por soldagem. Os corpos de prova para esta etapa foram juntas semi-V. Estes foram temperados (austenitizados a 860°C em banho de sais por 20 minutos e resfriados em óleo) e revenidos a 200°C por 1 hora. O amanteigamento, em dupla camada, foi realizado empregando-se quatro relações de energia de soldagem, 5/5, 10/20, 20/10, 15/5 kJ/cm, escolhidas a partir dos resultados do teste de Higuchi. A nomenclatura apresentada refere-se ao valor de energia de soldagem aplicada em cada camada (energia da 1ª camada/energia da 2ª camada). Durante a soldagem, a temperatura de preaquecimento e interpasse foi mantida entre 250°C e 300°C, valores estes, recomendados pela literatura.⁽⁷⁾ Os parâmetros de soldagem utilizados no amanteigamento e no preenchimento da junta são indicados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem do amanteigamento

Corpo de Prova		Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	φ eletrodo (mm)	Energia de soldagem (kJ/cm)
CV3 5/5	1ª camada	103	24,7	30	2,5	5,4
	2ª camada	103	24,7	30	2,5	5,4
CV315/5	1ª camada	102	24,7	10	2,5	15,7
	2ª camada	103	25,6	30	2,5	5,4
CV3 20/10	1ª camada	129	25,7	10	3,25	20,3
	2ª camada	103	25,0	15	2,5	10,7
CV310/20	1ª camada	103	25,0	15	2,5	10,7
	2ª camada	129	25,7	10	3,25	20,3

Tabela 5. Parâmetros de soldagem do enchimento da junta.

Parâmetros	Passe de Raiz	Passes de Preenchimento
Corrente eficaz (A)	72	109
Tensão eficaz (V)	22,0	23,0
Veloc. de soldagem (cm/min)	20	A critério do soldador
Temp. de preaquecimento (°C)	250 a 300	250 a 300
Temp. de interpasse (°C)	250 a 300	250 a 300
Diâmetro do eletrodo (mm)	2,5	3,25

Visando comparar os resultados na soldagem em dupla camada com e sem tratamento térmico posterior, os corpos de prova para cada combinação de energia foram seccionados ao meio, sendo uma das metades submetida a um TTPS a 600°C por quatro horas, tratamento este semelhante ao usado por Bueno.⁽¹²⁾ Em cada metade (com TTPS e sem TTPS) foram extraídas amostras metalográficas para levantamento do perfil de microdureza da ZAC da primeira camada do amanteigamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Simples Depósito (Cordão Isolado)

Inicialmente foi avaliada a geometria do cordão de solda para cada condição de soldagem em único passe aplicada. Ressalta-se que nesta etapa as soldagens foram realizadas em corpos de prova temperados e não revenidos. A Figura 2 apresenta a macrografia dos cordões de solda, na qual é possível observar claramente o metal de solda, a zona afetada pelo calor (ZAC), com destaque para a ZAC de grãos grosseiros (ZAC-GG). Observam-se ainda faixas claras e escuras ao longo da ZAC, as quais são características de bandeamento. Estas faixas foram observadas anteriormente em aços baixa liga do tipo 4140,⁽⁴⁾ contudo a quantidade de bandeamento bem como a diferença de dureza entre faixa clara e escura foi bem mais significativa do que no caso do aço 4340 avaliado neste trabalho. Verificou-se ainda a ocorrência de trinca à frio no corpo de prova soldado com a maior energia (20 kJ/cm), a qual foi atribuída ao estado do metal de base (condição sem revenimento).

Com base na análise macrográfica foram determinados os valores de reforço e penetração (medidos em microscópio metalográfico com uma incerteza de medição em torno de 0,02 mm) para cada energia de soldagem. Estes resultados são fundamentais para a construção dos gráficos de Higichi. Os valores medidos são apresentados na Tabela 6, na qual se observa que o reforço aumentou com o aumento da energia de soldagem e que a penetração praticamente não variou.

Foram levantados os perfis de microdureza da seção transversal dos corpos de prova para cada energia, a partir da zona de ligação e estendendo-se pela ZAC e metal base, conforme indicado na Figura 2. Os resultados da varredura de microdureza ao longo da ZAC são apresentados na Figura 3, bem como uma linha de referência correspondente à dureza média medida no metal de base. Este valor de dureza (620 HV) foi considerado como parâmetro para determinação da zona dura (zona que sofreu retêmpera) e da zona macia (região temperada do metal de base que foi revenida pelo ciclo térmico de soldagem).

A Figura 3a apresenta o perfil de dureza para o corpo de prova soldado com 5 kJ/cm. Verifica-se que o comprimento da zona dura estende-se por pouco mais de 1,5mm, enquanto a extensão da zona macia é de pouco mais de 6 mm, conforme apresentado na Tabela 6. Na Figura 3b é mostrado o perfil de dureza do corpo de prova soldado com 10 kJ/cm. Verificou-se um aumento de extensão da zona dura de 33% em relação à extensão da zona dura para a soldagem com energia de 5 kJ/cm. A zona macia também apresentou um aumento de extensão em relação à zona macia do corpo de prova soldado com 5 kJ/cm, porém em menor percentual, cerca de 20%.

A extensão das zonas duras e macias da amostra soldada com 15 kJ/cm foi ainda maior. Contudo, em relação à extensão do corpo de prova soldado com 10 kJ/cm o aumento foi menor (14% zona dura; 11% zona macia). Para a amostra soldada com 20 kJ/cm o aumento da extensão da zona dura e da zona macia foi mais significativo (17% para ambas as zonas). Os valores das extensões das zonas duras e macias são apresentados na Tabela 6.

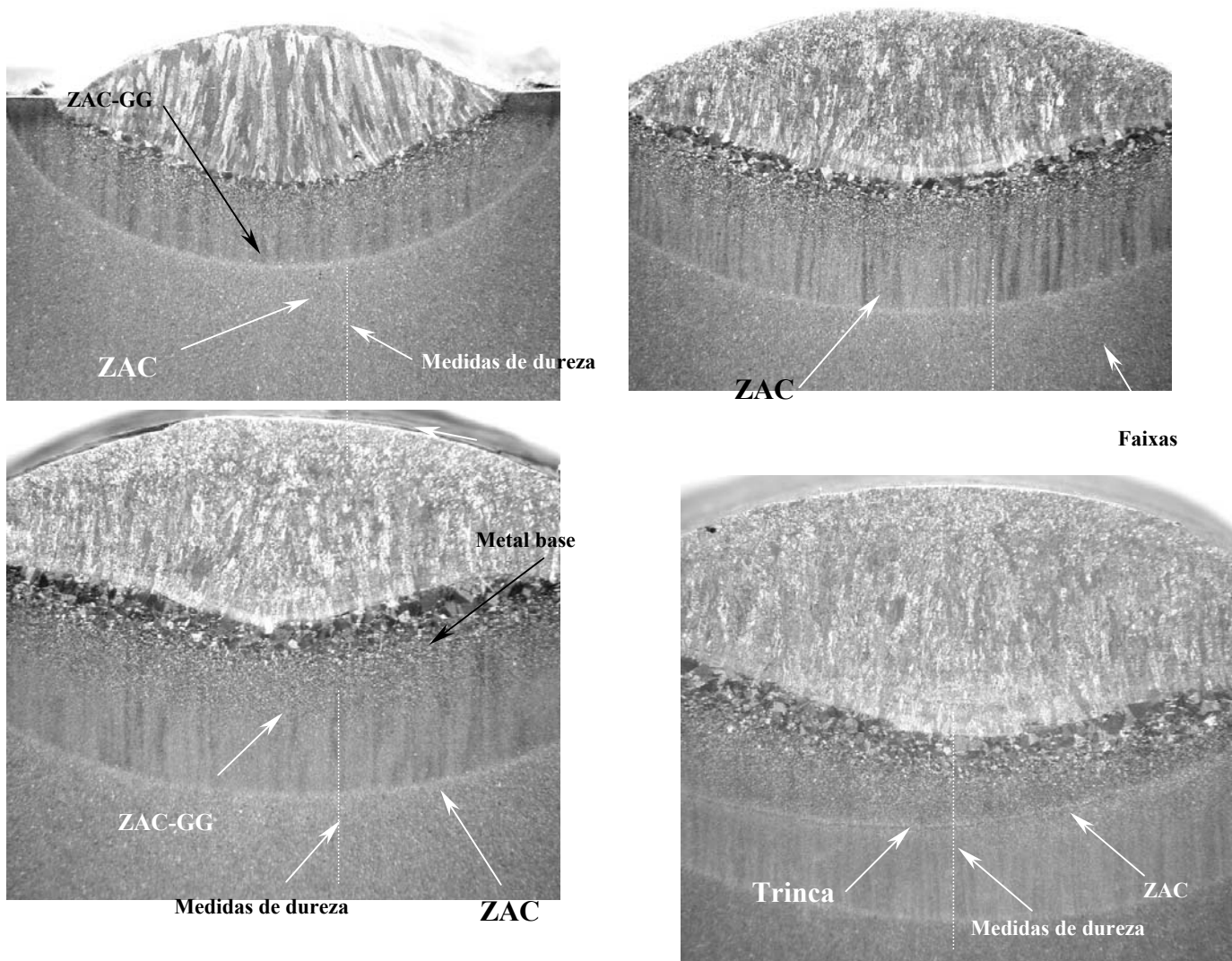


Figura 2. Corpos de prova simples depósito cordão isolado para o teste de Higuchi. (a) 5 kJ/cm. (b) 10 kJ/cm. (c) 15 kJ/cm. (d) 20 kJ/cm. Aumento: 10X. Ataque: nital 2%.

A partir dos valores de reforço, penetração, extensão de zonas duras e macias foi construído o gráfico de Higuchi (Figura 4). Com base neste gráfico foram avaliados os critérios 1 e 2 estabelecidos por Higuchi. Sobrepondo uma coluna sobre a outra, tomando como referencial o reforço da primeira camada no mesmo nível da zona de ligação da segunda camada, é possível verificar se a zona dura da segunda camada encontra-se compreendida nos limites da zona fundida da primeira camada, garantindo que não haverá retempera da ZAC da primeira camada, e a zona macia da segunda camada sobrepõe a zona dura da primeira camada, indicando que a zona dura da primeira camada será revenida pelo passe subsequente.

Os resultados dos dois critérios para o teste de Higuchi foram denominados $\Delta 1$ ($PZM2 - PZD1 > 0$) e $\Delta 2$ [$(R1+P1) - PZD2 > 0$], os quais são apresentados na Tabela 7. É possível verificar que todos os valores de $\Delta 1$ são maiores que zero, assim, temos que todas as relações de energia aplicadas atenderam o primeiro critério de Higuchi, o qual garante que a profundidade da zona macia da segunda camada (PZM2) é extensa o suficiente para revenir toda a zona dura da primeira camada (PZD1).

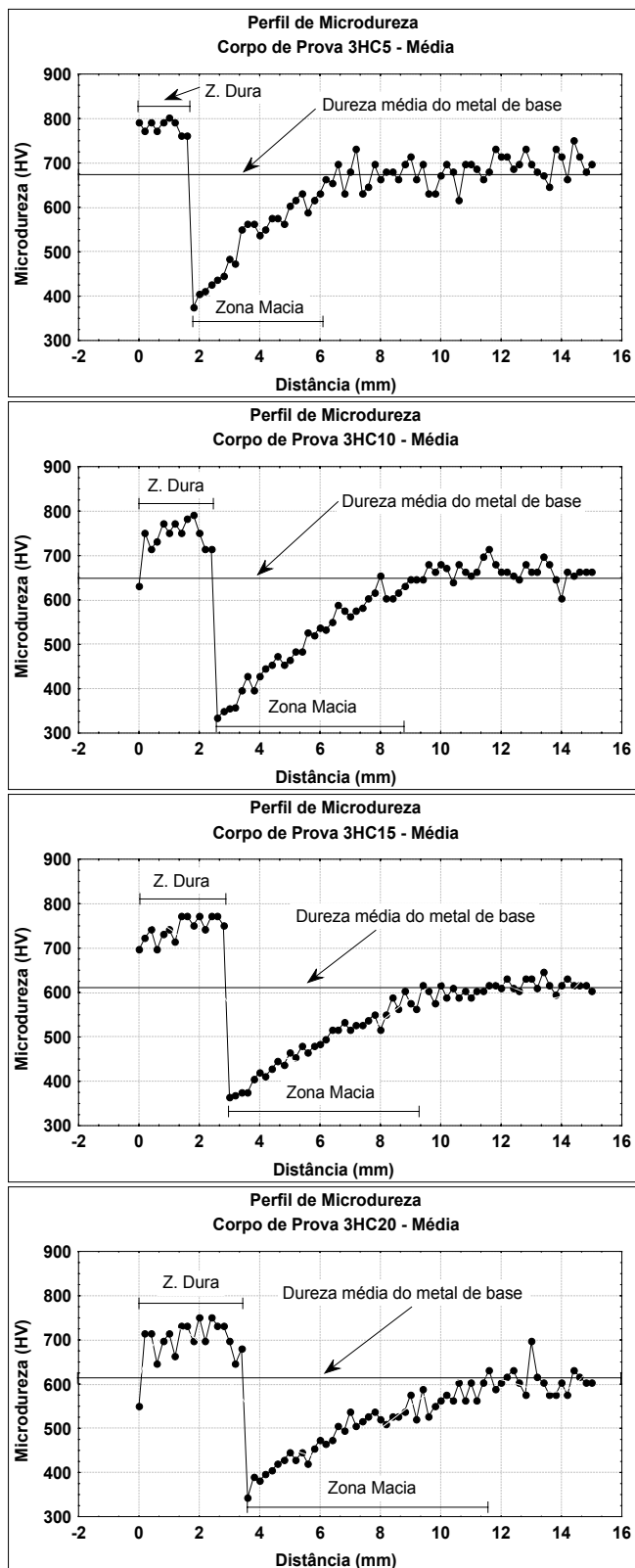


Figura 3. Perfil de microdureza dos corpos de prova do aço ABNT 4340.

Tabela 6. Valores das extensões (mm) das diversas regiões da solda para o teste de Higuchi.

Corpo de Prova	Energia de Soldagem (kJ/cm)	R	P	ZD	ZM	PZD1	PZD2	PZM2	R+P
3HC5	5	1,4	1,5	1,6	6,2	4,5	3,1	9,3	2,9
3HC10	10	1,8	1,6	2,4	7,8	5,8	4,0	11,8	3,4
3HC15	15	2,6	1,3	2,8	8,8	6,7	4,1	12,9	3,9
3HC20	20	2,8	1,7	3,4	10,6	7,9	5,1	15,7	4,5

Onde: **R**- reforço; **P**- penetração; **ZD** -zona dura; **ZM** - zona macia; **PZD1** – profundidade da zona dura da 1ª camada (**R1+P1+ZD1**); **PZD2** – profundidade da zona dura da 2ª camada (**P2+ZD2**); **PZM2** – profundidade da zona macia da 2ª camada (**P2+ZD2+ZM2**).

O atendimento do segundo critério de Higuchi não foi completamente atendido, conforme mostrado na Tabela 7. Somente as relações de energia 10/5, 15/5, 20/5, 20/10 e 20/15 alcançaram valores positivos e, portanto, atendem ao segundo critério de Higuchi. Foram escolhidas quatro relações de energia (5/5, 15/5, 20/10 e 10/20) para verificar a eficiência do teste de Higuchi sobre o revenimento da ZAC pela aplicação da técnica da dupla camada. A relação 5/5 foi escolhida por atender o primeiro critério e ficar muito próximo do atendimento do segundo critério. As relações 15/5 e 20/10 foram escolhidas por atenderem completamente os critérios estabelecidos. A quarta relação escolhida foi a relação 10/20 justamente por ser uma das relações de energia que não atendem ao segundo critério de Higuchi, sendo possível então verificar o comportamento da retempera na aplicação inadequada de relações de energia na técnica da dupla camada.

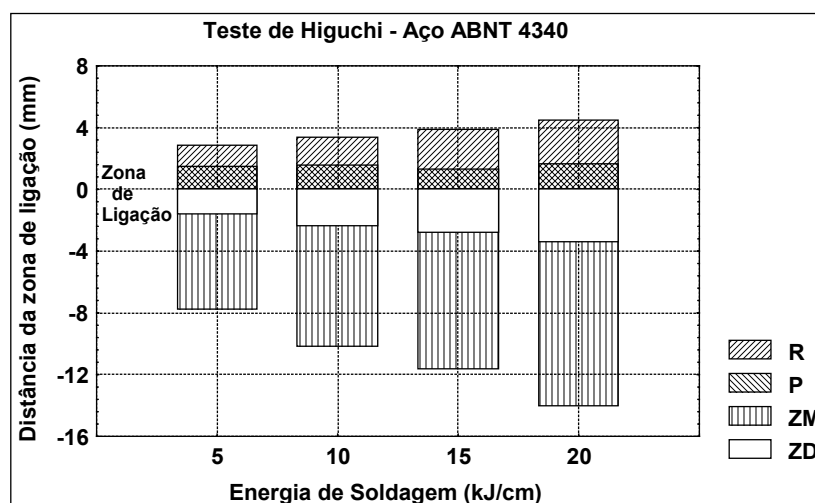


Figura 4. Gráfico de Higuchi para o aço AISI 4340.

Tabela 7. Valores de $\Delta 1$ e $\Delta 2$ para as diversas energias para o aço AISI 4340.

Relação de energia entre 1ª e 2ª camada	$\Delta 1$	$\Delta 2$	Relação de energia entre 1ª e 2ª camada	$\Delta 1$	$\Delta 2$
5/5	4,8	-0,2	15/5	8,4	0,8
5/10	3,5	-1,1	15/10	7,1	-0,1
5/15	2,6	-1,2	15/15	6,2	-0,2
5/20	1,4	-2,2	15/20	5,0	-1,2
10/5	7,3	0,3	20/5	11,2	1,4
10/10	6,0	-0,6	20/10	9,9	0,5
10/15	5,1	-0,7	20/15	9,0	0,4
10/20	3,9	-1,7	20/20	7,8	-0,6

$\Delta 1 = PZM2 - PZD1$; $\Delta 2 = (R1+P1) - PZD2$; (+) Atende. (-) Não atende

3.2 Ensaio com Junta Semi-V

Os perfis de microdureza levantados a partir da zona de ligação do metal de solda e metal de base, revelaram o amolecimento da região da ZAC endurecida, para as relações de energia 5/5, 15/5 e 20/10 kJ/cm. Também foram avaliados os corpos de prova submetidos ao TTPS, conforme destacado na metodologia deste trabalho (Item 2.2). Os resultados da varredura para os corpos de prova soldados com relação 15/5 sem e com TTPS são apresentado nas Figuras 5a e 5b, respectivamente. De uma forma geral, a dureza média do metal de base dos corpos submetido ao TTPS apresentou valores de dureza inferiores aos corpos de prova sem TTPS (Figuras 5a e 5b).

Avaliando a Figura 5a é possível observar uma significativa redução de dureza da região adjacente à zona de ligação, resultante do revenimento proporcionado pelo ciclo térmico da segunda camada. Na Figura 5b observou-se também uma redução de dureza da mesma região, porém como esta metade do corpo de prova foi tratada termicamente, houve uma redução de dureza geral. Este resultado mostra a eficiência da técnica da dupla camada na redução de dureza da ZAC do aço AISI 4340. É importante ressaltar que os resultados positivos obtidos para as condições aplicadas neste trabalho são específicos para o aço AISI 4340, haja vista que mudando o material as alterações microestruturais são alteradas e com isso as condições aplicadas podem não mais serem suficientes para garantir o sucesso da aplicação da técnica.

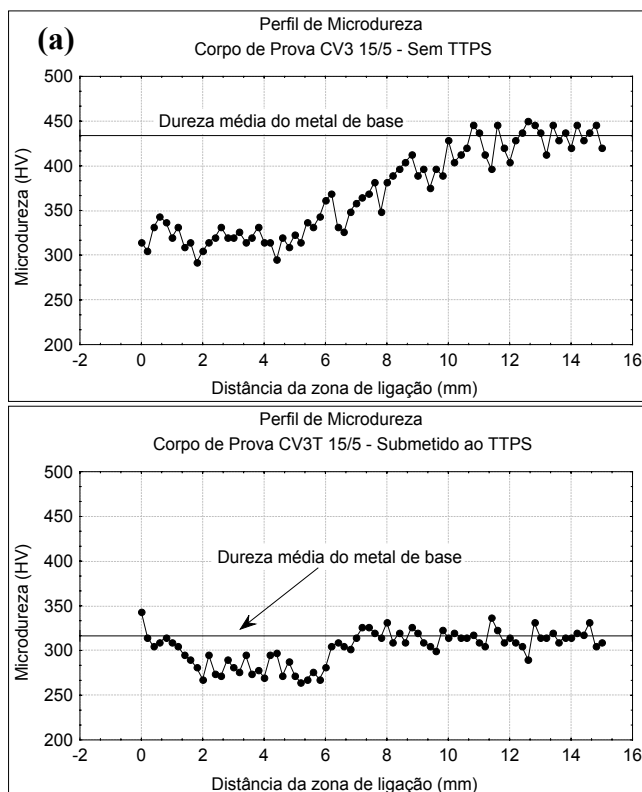
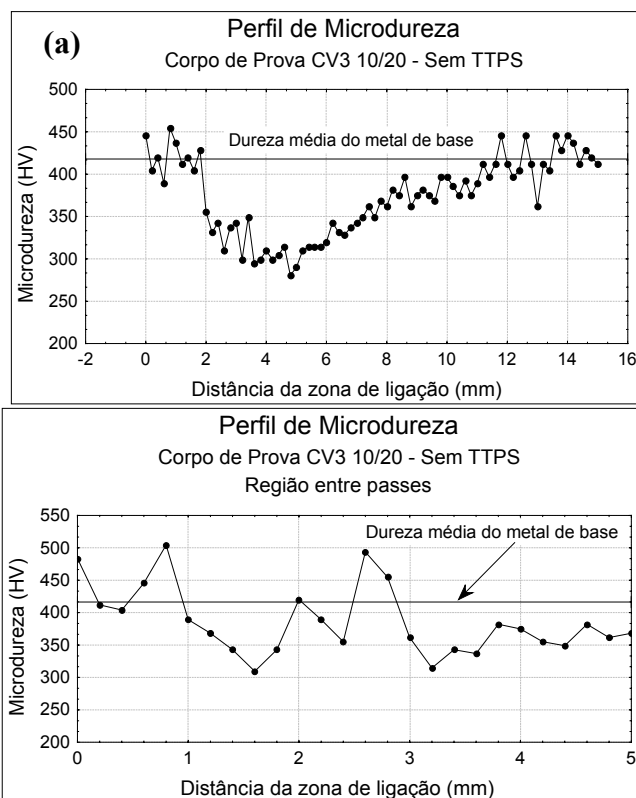


Figura 5. Perfis de microdureza para os corpos de prova soldados com relação de energia de 15/5 kJ/cm. (a) Sem TTPS. (b) Submetido ao TTPS.

O corpo de prova com relação de energia de 10/20 kJ/cm sem TTPS, conforme esperado, não foi capaz de proporcionar um amolecimento mais efetivo da região próxima a zona de ligação, quando comparado aos corpos de prova que

atendem aos critérios de Higuchi. Contudo, os valores de dureza observados nesta região são similares aos encontrados no metal de base, conforme Figura 6a. Medidas de dureza realizadas na região entre passes (na região da ZAC localizada abaixo da interseção entre dois passes consecutivos da primeira camada) apresentaram maiores valores de dureza, conforme mostrado na Figura 6b. O corpo de prova 10/20 submetido ao TTPS apresentou o mesmo comportamento dos demais corpos de prova tratados termicamente, semelhante ao apresentado na Figura 5b para o corpo de prova soldado com relação de energia de soldagem 15/5. Apesar de proporcionar uma boa previsão com relação à dureza, o teste de Higuchi deve ser aplicado com cautela por não apresentar nenhuma observação quanto à alterações microestruturais como crescimento de grão, que pode implicar em queda na tenacidade, principalmente quando são usados altos níveis de energia na primeira camada.



(b)

Figura 6. Perfil de microdureza do corpo de prova soldado com relação de energia de 10/20 kJ/cm. (a) sem TTPS. (b) Região entre passes.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste trabalho obtiveram-se as conclusões relacionadas abaixo.

As relações de energias entre a primeira e a segunda camada, escolhidas através do teste de Higuchi foram suficientes para proporcionar uma expectativa de amolecimento da ZAC da primeira camada.

O grau de revenimento da ZAC proporcionado pela técnica da dupla camada para o aço AISI 4340 mostrou ser satisfatório, pois para três das quatro relações de energia empregadas, a dureza da ZAC em ambos os corpos de provas (tratados e não tratados) foram semelhantes, e inferior a do metal de base.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-CE, à Petrobras/LUBNOR, ao LACAM/UFC pelo apoio a este trabalho, e aos órgãos de fomento: ANP, FUNCAP e CNPq, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Don, P., Brust, FW. Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessels and piping components: a millennium review and beyond, ASME Journal of Pressure Vessel Technology. v. 122, pp. 329–338, 2000.
- 2 Sperko, WJ. Exploring Temper Bead Welding. Welding Journal, v. 84, n. 7, pp. 37-40, 2005.
- 3 Aloraier, AS., Ibrahim, R.N., Ghojel, J. Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes. Journal Materials Processing Technology, v. 153–154, pp. 392–400, 2004.
- 4 Aguiar, W. M. Soldagem do Aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico Posterior. Dissertação. Universidade Federal do Ceará. 2001.
- 5 Jones RL. Development of two-layer deposition techniques for the manual metal arc repair welding of thick C–Mn steel plate without post weld heat treatment. In: WRC Bulletins, v. 335; pp. 3–31, 1997.
- 6 Aloraier, AS., Ibrahim, R., Thomson, P. FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment. International Journal of Pressure Vessel and Piping. v. 83, pp. 394–398, 2006.
- 7 Still, J. R. Welding of AISI 4130 and Steel for Drilling Systems. Welding Journal. v. 76, n. 6, pp. 37-42, 1997.
- 8 Still, J. R., Blackwood, V. How to Ensure Fif-For-Purpose Welds in “Muddy” Situations. Welding Journal. v. 77, n. 12, pp. 53-56, 1998.
- 9 Higuchi, M., Sakamoto, H., Tanioka, S. A Study on Weld Repair Through Half Bead Method. IHI Engineering Review. v.13, april/1980.
- 10 Azevedo, A.G.L., Farias, J.P., Silva, C.C. Double and triple layer deposition techniques for the C-Mn steel repair without post-welding heat treatment. International Journal of Pressure Vessel and Piping (submetido para publicação).
- 11 Silva, C.C., Albuquerque, V.H.C., Moura, C.R.O., Aguiar, W.M., Farias, J.P. Evaluation of AISI 4140 steel repair without post-weld heat treatment. Journal of Materials Engineering and Performance (submetido para publicação).
- 12 Bueno ER. Desenvolvimento do Procedimento de Soldagem do Aço AISI 4140 sem Tratamento Térmico Posterior. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.