

*Aldo Santos Pereira
Augusto J. A. Buschinelli¹, Carlos E. Niño²
Sérgio L. Henke*

Resumo. Esse trabalho reúne resultados de um estudo comparativo entre o aço inoxidável martensítico tradicional AISI 410 e o tipo 'macio' CA-6NM (13Cr/4Ni), visando estabelecer procedimentos de reparo pela técnica da "dupla-camada", que dispensem o uso de tratamento térmico posterior, recomendado para manter o nível de tenacidade.

Testes de Higuchi, que consistem na deposição de cordões de solda sobre chapa previamente temperada, indicaram comportamento bastante distinto dos dois materiais de base, com reação menos favorável do aço CA-6NM, o que é justificado pela mais baixa temperatura Ac1 e pela maior resistência ao revenido, respectivamente associadas à presença de níquel e molibdênio nesse aço martensítico macio.

O aço AISI 410 apresenta uma redução de dureza na ZTA maior e sobre uma extensão maior, de cerca de 50% da ZTA, contra apenas 25% do aço CA-6NM. No reparo do aço AISI 410 foi aplicada a técnica da "dupla-camada" usando o processo MIG com eletrodo similar. No caso do aço CA-6NM, em função da estreita faixa revenida da ZTA, explorou-se uma variante de reparo com reaquecimento por TIG sobre camada de amantecimento depositada com eletrodo austenítico. Entretanto, quando esse aço possui um baixo teor de carbono são alcançadas dureza e tenacidade aceitáveis na ZTA como soldada, sendo dispensável o revenimento por TIG.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis martensíticos, soldagem de reparo, tenacidade, dureza, ZTA.

Introdução

Os aços inoxidáveis martensíticos mantêm-se nos dias atuais como importantes ligas de aplicação na engenharia, possuindo uma ampla faixa de utilização em diversos meio ambientes.

Os aços martensíticos convencionais são especificados para aplicações onde se requer boa resistência à tração, resistência à fluência e fadiga, em combinação com moderada resistência à corrosão e ao calor até aproximadamente 600°C.

Por exemplo, o tipo AISI 410 (com 12%Cr) é utilizado na fabricação de equipamentos para energia nuclear, turbinas a vapor e gás, motores a jato e na indústria de petróleo e petroquímica.

Rotores de turbinas hidráulicas, bombas, compressores e um número crescente de componentes na indústria química e de petróleo vem sendo fabricados em aços inoxidáveis martensíticos “macios” (AIMM) do tipo CA-6NM, que associam alta tensão de escoamento e melhor soldabilidade a boas resistência à corrosão, ao desgaste e à erosão por cavitação.

Revisão bibliográfica

Aços inoxidáveis martensíticos

O efeito da adição de 12%Cr é mostrado no diagrama pseudobinário Fe-C (figura 1-a).

A adição de cromo restringe o campo austenítico, diminui a solubilidade do carbono na austenita (máximo 0,7%C), diminui a composição do eutetóide (para 0,35%C) e aumenta a sua temperatura (Ortega, 1985).

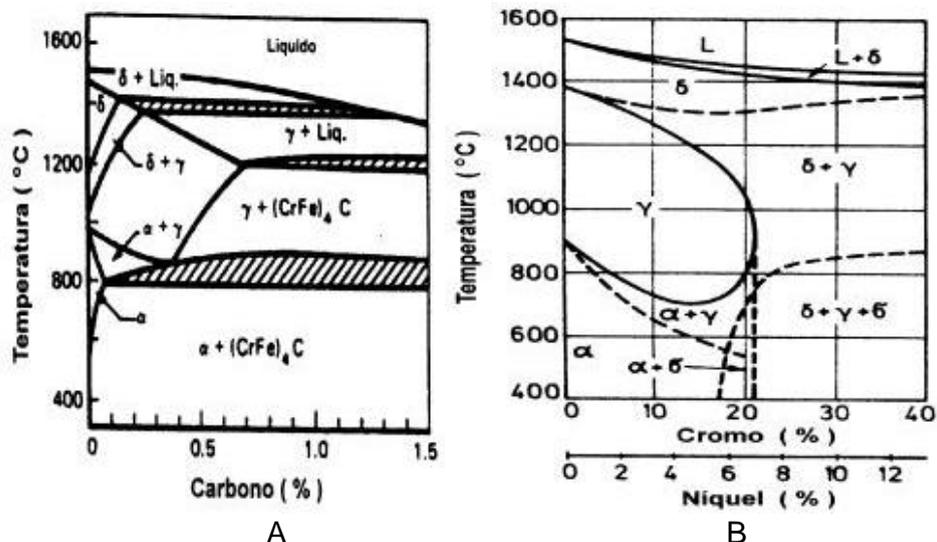


Figura 1- (a) Diagrama de fase pseudobinário Fe-C com 12%Cr; (Welding Handbook, v. 4, 1998); b) Diagrama de equilíbrio pseudo-binário Fe-Cr-Ni (Folkhard, 1988).

O diagrama pseudobinário da figura 1-b, aplicável aos AIMM, ilustra a solidificação e o comportamento de ligas Cr-Ni com a relação 3:1. Uma liga 13Cr/4Ni (CA-6NM) solidifica completamente ferrítica e a transformação gama ocorre na faixa de 1300 a 1200°C, em condições de equilíbrio. Nas taxas reais de resfriamento em uma operação de soldagem, pequenas quantidades de ferrita delta são subresfriadas na mudança delta-gama. No resfriamento subsequente, a austenita começa a se transformar em martensita numa temperatura M_s entre 250-200°C, independente da taxa de resfriamento; o ponto M_f é cerca de 150°C inferior. Após o completo resfriamento, a estrutura consiste de uma martensita “macia” e tenaz com pequenas frações de ferrita e austenita residual, na faixa de 1-10% dependendo do tipo de liga.

Técnicas de reparo sem tratamento térmico pós-soldagem (TTPS)

Com as técnicas de reparo sem TTPS pretende-se, através da utilização de procedimentos estritamente controlados, aproveitar o calor gerado em cada passe de soldagem para alcançar na microestrutura da ZTA do metal de base, requisitos mínimos de tenacidade e de dureza máxima, que garantam a integridade do componente reparado.

A técnica da “dupla-camada”, ilustrada na figura 2, foi inicialmente desenvolvida nos anos 60 junto a CEGB do Reino Unido (Verón 1988) para evitar as trincas de reaquecimento na ZTA que ocorriam quando da execução do TTPS em aços Cr-Mo-V. Ela utiliza um método controlado de deposição, onde a relação entre os aportes térmicos da segunda para a primeira camada de solda (E2/E1) deve ser criteriosamente definida para promover o refino e/ou a redução da dureza da ZTA-GG do metal base.

Em função do tipo de metal base, do processo de soldagem e do efeito prático almejado (essencialmente refino de grão ou revenido, respectivamente para evitar trincas de reaquecimento ou corrosão sob tensão), essa relação E2/E1 pode variar na faixa de 1 a 3 (Niño et al., 1992 e Buschinelli, 1992).

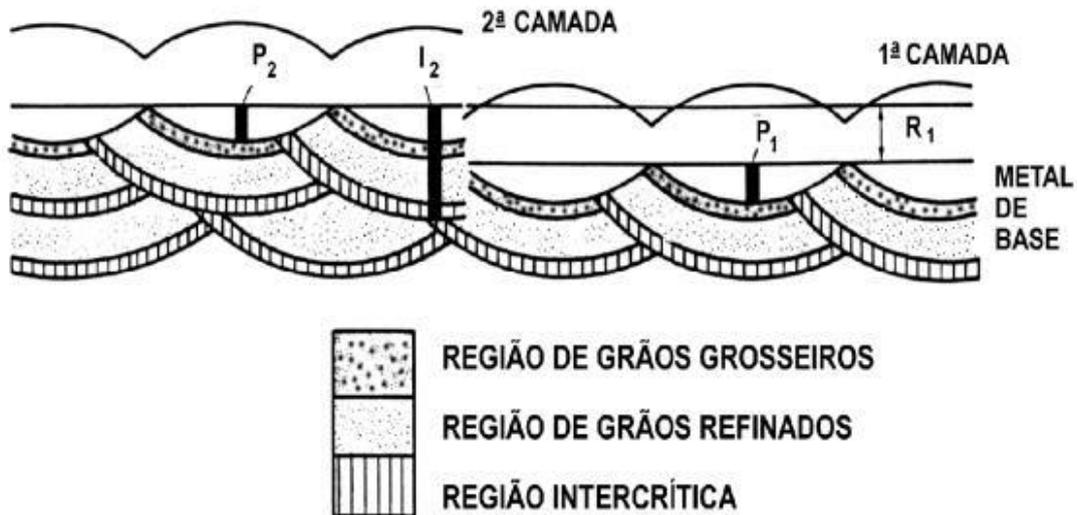


Figura 2 – Reparo sem TTPS pela técnica da “dupla-camada”

Uma maneira prática de chegar a essa relação de energia aportada é através do teste proposto por Higuchi et al. (1980), que consiste em depositar sobre chapa do metal de base previamente temperada (e sem revenir) cordões de solda com diferentes níveis de energia. Perfis de dureza em corte transversal ao cordão permitem avaliar a extensão das zonas revenidas e retemperadas pelo calor da soldagem.

Materiais e métodos

Para o aço CA-6NM foram usadas placas medindo 200x100x30 mm, cortadas a partir de tarugos (fundidos em conjunto com rotores adquiridos pela COPEL/Curitiba), já para o aço AISI 410 foi utilizado um tarugo forjado com diâmetro de 210 mm. A tabela 1 apresenta as composições químicas desses aços.

Tabela 1– Composições químicas dos aços inox martensíticos utilizados nos experimentos (% em peso).

		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
CA-6NM	amostra A	0,035	0,50	0,59	0,017	-----	11,80	4,22	0,62
	amostra B	0,021	0,55	0,54	0,004	0,012	12,47	3,52	0,50
	norma (1)	0,06	1,00	1,00	0,03	0,04	11,5 -14,0	3,5 -4,5	0,4 -1,0
AISI 410	amostra	0,15	0,35	0,45	0,02	0,02	11,54	0,23	0,10
	norma (2)	0,15	1,00	1,00	0,03	0,04	11,5-13,0	-----	-----

(1) Norma ASTM A743-93. Os números isolados representam valores máximos admissíveis.

(2) ASM Stainless Steels, 1996

Teste de Higuchi

No aço CA-6NM, este teste foi realizado com 6 níveis de energia, entre 5 e 25 kJ/cm, usando eletrodo revestido AWS E NiCrFe-2 (Henke, 1998). No aço AISI 410 este foi executado com 3 níveis de energia, entre 6,3 e 18,9 kJ/cm, usando o processo MIG pulsado com arame-eletrodo AWS ER 410 Ni Mo (Pereira, 2000). A tabela 2 apresenta as composições químicas dos consumíveis.

Tabela 2 – Composições químicas dos consumíveis usados (% em peso).

		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
ER 410NiMo	Amostra (1)	0,021	0,54	0,33	0,007	0,016	12,33	4,14	0,5
	Norma (2)	0,06	0,6	0,50	0,03	0,03	11,0– 12,5	4,0 – 5,0	0,4 – 0,7
E NiCrFe-2	Norma (3)	0,10	1,0 – 3,5	0,75	0,03	0,02	13 – 17	62min	0,5 – 2,5

(1) análise química que acompanhava os eletrodos, realizada pelo fabricante.

(2, 3) conforme as normas AWS A5.9 e A5.11, respectivamente. Os valores isolados representam valores máximos admissíveis (exceto o níquel para o E NiCrFe-2).

Aplicação de passes TIG para revenimento do aço CA6NM

Em vista das dificuldades encontradas para aplicar a técnica da “dupla-camada” no aço CA-6NM (pelos motivos que serão explicados no item 4.1), explorou-se realizar o reparo usando camada de amanteigamento reaquescida com três passes TIG (com energias decrescentes), a fim de promover o revenido da ZTA do metal de base. O efeito de revenido produzido sobre a ZTA do metal de base foi avaliado através de medidas de microdureza (Henke 1998).

Simulação de reparo para avaliação da tenacidade

Para avaliar a tenacidade na ZTA dos metais base foram soldadas juntas em meio-V com ângulo de 45º, permitindo desta forma a retirada de corpos de prova Charpy com entalhe totalmente localizado na ZTA junto à linha de fusão.

Resultados e discussão

Eficácia do revenido obtido pelo aporte térmico do segundo passe, para os aços AISI 410 e CA-6NM

As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente para os aços AISI 410 e CA-6NM, perfis de dureza resultantes da aplicação dos cordões de solda sobre o material previamente temperado (e não revenido). Para o aço martensítico AISI 410 é relevante o maior grau de revenimento da ZTA:

- A redução de dureza em relação ao estado original temperado é maior (da ordem de 150 HV contra cerca de 70 HV para o CA-6NM). Este comportamento explica-se por um lado pela mais alta temperatura AC1 do aço AISI 410 em relação àquela do CA-6NM (800 °C e 620 °C, respectivamente), bem como pelo reduzido teor de Mo desse inox martensítico tradicional.
- A largura da faixa revenida é maior, o que também é resultado da maior temperatura AC1

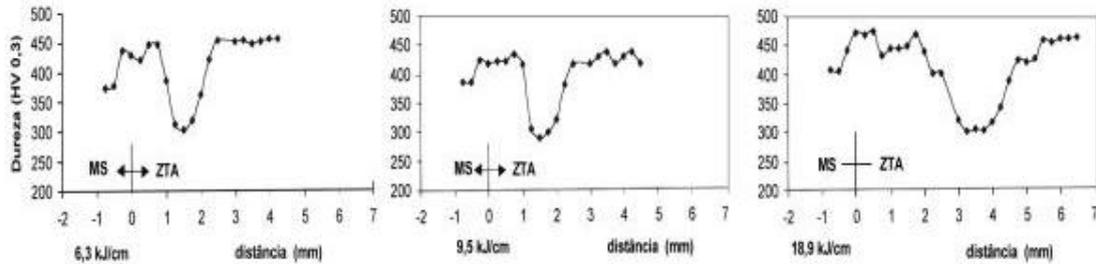


Figura 3- Perfis de dureza na seção transversal dos cordões depositados com diferentes níveis de energia sobre o aço AISI 410 temperado, usando o eletrodo similar AWS ER 410NiMo.

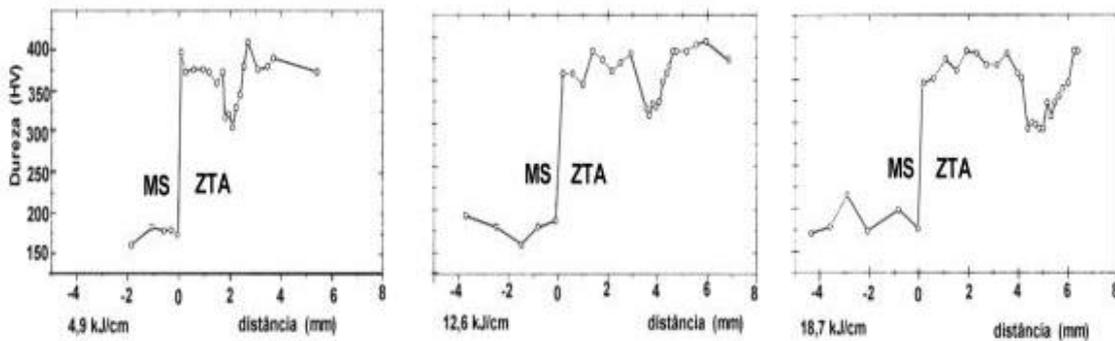


Figura 4- Perfis de dureza obtidos junto à seção transversal dos cordões depositados com diferentes níveis de energia sobre o aço CA-6NM temperado, utilizando eletrodo revestido AWS E NiCrFe-2.

As figuras 5 e 6 e a tabela 2 ilustram com maior clareza as diferenças no comportamento desses dois materiais de base:

a) No aço CA-6NM, a largura da ZTA endurecida é aproximadamente 2,5 vezes aquela do aço AISI 410, para valores similares de energia de soldagem. Isto é devido à sua menor temperatura A_{c1} (de 620 °C para o CA-6NM e 800 °C para o AISI 410).

b) No aço CA-6NM a largura da zona revenida pelo ciclo térmico de um cordão de solda é menos do que uma quarta parte da largura da ZTA endurecida, enquanto que para o AISI 410 essas duas larguras, endurecida e revenida, são praticamente iguais.

Essas duas características dificultam a obtenção do revenido do aço CA-6NM pelo calor dos passes subseqüentes. Por isto, para evitar que o reforço de cada passe

afastasse demais as isotermas que produzem revenido, foi proposto para esse aço o uso do aquecimento com tocha TIG (isto é, sem adição de material) de uma primeira camada de “amanteigamento”.

O amanteigamento foi feito com eletrodo austenítico E309L-15 usando energia de 5 kJ/cm, pois o metal de solda obtido com eletrodo revestido similar E410NiMo apresentou dureza ainda maior que a da ZTA no metal de base (cerca de 450 HV no MS e 400 HV na ZTA), devido ao alto teor de carbono do metal depositado com esse eletrodo (0,05 %C).

Tabela 3- Larguras das zonas endurecida e revenida para diferentes condições de soldagem.

AISI 410	Energia (kJ/cm)	18,9	9,5	6,3
	Largura ZTA endurecida (mm)	2,7	1,6	1,0
	Largura revenida (mm)	2,8	1,6	1,0
	Relação Lrev/Lend	0,97	1,00	1,00
CA-6NM	Energia (kJ/cm)	18,7	12,6	4,9
	Largura ZTA endurecida (mm)	4,4	3,6	1,8
	Largura revenida (mm)	1,5	0,6	0,5
	Relação Lrev/Lend	0,34	0,17	0,28

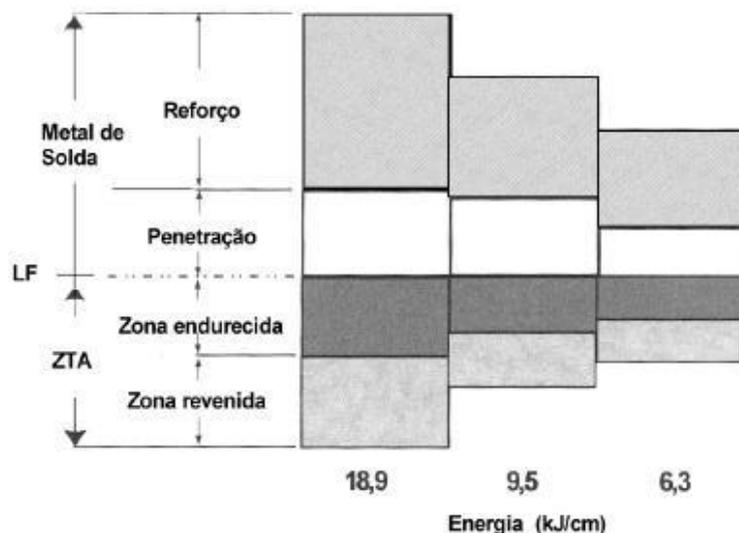


Figura 5 – Sub-regiões do metal de solda e ZTA, para depósitos com eletrodo 410NiMo pelo processo MIG sobre aço AISI 410 temperado.

ER

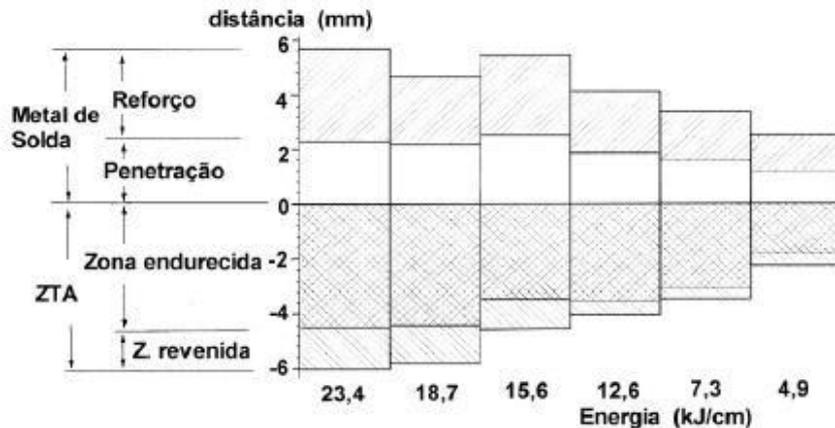


Figura 6 – Dimensões das sub-regiões do metal de solda e ZTA, para depósitos com eletrodo ENiCrFe-2 sobre aço CA-6NM temperado.

Tenacidade após reparo simulado

Os valores de resistência ao impacto (Charpy a 20 °C) da ZTA obtida nos aços AISI 410 e CA-6NM foram:

a) para o aço CA-6NM:

- Na amostra com 0,035 %C foram de 55 J no estado como soldado e de 60 J com a aplicação dos três passes TIG. A tenacidade não melhorou significativamente com o uso do TIG, embora tenha sido obtida com ele uma redução de dureza da ZTA de aproximadamente 30 HV.

- Na amostra com 0,021 %C foi de 79 J no estado como soldado.

b) Para o aço AISI 410 usando a técnica da “dupla-camada”, foi de 49 J. Esse valor de tenacidade é próximo ao de 52 J publicado na literatura para esse aço temperado e revenido (ASM, 1996).

No reparo, a primeira camada foi depositada com energia de 6,3 kJ/cm e a segunda com 9,6 kJ/cm.

Conclusões

a) Para o aço AISI 410

- O teste de Higuchi mostrou que este material responde bem ao revenido pelos passes subsequentes de soldagem. A redução de dureza da ZTA é elevada (até 150 HV) e se estende sobre uma faixa bastante larga, que equivale à largura endurecida da ZTA.

- Estas características permitem aplicar a técnica da “dupla-camada”, obtendo com ela valores de tenacidade próximos dos previstos para o metal de base temperado e revenido.

b) Para o aço CA-6NM

- A baixa temperatura AC1 e sua resistência ao revenido impedem a aplicação eficaz da técnica da dupla camada.

- A alternativa de reparo com reaquecimento por TIG neste aço permite reduzir a dureza máxima na ZTA. Entretanto, o aumento de tenacidade obtido com esse procedimento é pouco significativo.

- Para este material, a resistência ao impacto depende significativamente do teor de carbono. Por causa disto, para conseguir tenacidade adequada num reparo sem TTPS é necessário controlar o teor de C do metal de base e do consumível.

- A tenacidade foi maior do que no aço AISI 410.

Referências

ASM Specialty Handbook, Stainless Steels, U.S.a: ASM, 1996

Buschinelli, A. J. A., 1992, Técnicas de reparo por soldagem sem tratamento térmico de alívio de tensões e sua aplicação a aços Cr-Mo. Monografia para concurso público, UFSC, Florianópolis.

Folkard, E., 1988, Welding metallurgy of stainless steels, New York, Wiem: Springer verlf.

Henke, Sérgio L., 1998, Desenvolvimento de procedimento de soldagem de aço inoxidável martensítico macio tipo CA-6NM sem tratameto térmico posterior. Dissertação de Mesrado em Engenharia Mecânica, Florianópolis, UFSC.

Higuchi, M. et al., 1980, A study on weld repair through half bead method. IHI Engineering Review, vol. 13, n.2, pp. 15-19.

Niño, C. E. at al., 1992, Estudo da aplicação da tocha TIG para produzir revenido. Relatório Labsolda/RLAM projeto 226/91.

Ortega, J. M. Amo, 1985, Soldadura de los aceros inoxidables, Consideraciones metalurgicas, Revista soldadura, pp. 31-34.

Pereira, Aldo Santos, 2000, Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem em aços inoxidáveis martensíticos com metal de adição similar sem TTP. Dissertação de Mesrado em Engenharia Mecânica, Florianópolis, UFSC.

Verón, P., 1988, Reparaciones soldadas fuera de código. Revista Soldadura, pp.218-221.

Welding Handbook, 1998, vol. 4, 8. Ed., AWS.

Comparative study of the repair by welding of the martensitic stainless steels aisi 410 and ca-6nm.

Abstract. A comparative study in martensitic stainless steels, traditional AISI 410 and “soft” CA-6NM, was done, in order to establish repair procedures by the “double-layer” technique, avoiding the need of postweld heat treatment frequently recommended to meet original base metal toughness. Through Higuchi tests, consisting in weld bead deposition on quenched base metal plate, it was possible to realize the different behavior of those base materials, with a less favorable response of CA-6NM steel, as a result of its lower Ac1 temperature and higher tempering resistance, associated with the presence of nickel and molybdenum in that soft martensitic material. AISI 410 steel shows a higher hardness reduction of its HAZ over a longer extension, comparable to the previously hardened HAZ, while for the CA-6NM steels that effect occurs only in 25% percent of the HAZ. To repair the AISI 410 steel it was applied with good results the double-layer technique by the GMAW process with a similar consumable. For CA-6NM steel, taking in account its tempering resistance, an alternative was explored, consisting in the deposition of a butter layer of austenitic material, reheated by three successive TIG beads. When that steel type has a low carbon content it is possible to achieve low hardness and high toughness in the as welded condition, without using TIG reheat treatment.

Keywords: martensitic stainless steels; repair welding; toughness; hardness; HAZ.