

DESENVOLVIMENTO DE AÇO RESISTENTE À ABRASÃO DA CLASSE DE 500 HB COM BOA TENACIDADE E CONFORMABILIDADE¹

Carlos Salaroli de Araújo²
José Antônio de Oliveira Torres³

Resumo

O objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento em escala piloto de um aço resistente à abrasão da classe de 500 HB de dureza, com boa conformabilidade a frio e boa tenacidade. Foi avaliado o efeito de diferentes teores de Ni (0,40 e 0,80%), Mn (0,90, 1,10 e 1,30%) e Cr (0,30 e 0,50%), com ou sem a adição de Mo (0,20%), sobre uma composição base com 0,27% de C. Os aços foram processados por laminação controlada e submetidos a têmpera em água. Não foi observada influência do Ni sobre a tenacidade, indicando que o efeito benéfico desse elemento só deve ocorrer para teores mais elevados que o máximo avaliado. Por outro lado, o Ni promoveu uma melhoria na capacidade de conformação do aço. O principal fator a promover aumento da energia absorvida em ensaio Charpy foi a redução do teor de Mn. A adição de Cr e Mo, embora possa causar redução da tenacidade, foi fundamental para a melhoria da resistência à abrasão e para a minimização do amaciamento da ZTA causado por ciclos térmicos de soldagem. A melhor combinação de propriedades, considerando-se as avaliações de tenacidade, conformabilidade, resistência à abrasão e soldabilidade, foi obtida para a composição 0,40%Ni-0,90%Mn-0,50%Cr-0,20%Mo.

Palavras-chave: Resistência à abrasão; Aços temperados; Dureza; Tenacidade.

DEVELOPMENT OF A ABRASION RESISTANT GRADE 500 HB STEEL WITH IMPROVED TOUGHNESS AND FORMABILITY

Abstract

The objective of this work was the development, in laboratory scale, of a grade 500 HB hardness abrasion resistant steel with improved toughness and cold formability. The effect of different Ni (0,40 and 0,80%), Mn (0,90, 1,10 and 1,30%), Cr (0,30 and 0,50%) and Mo (0,0 and 0,20%) additions on a base composition with 0,27%C was evaluated. The steels processing consisted of controlled rolling followed by water quenching. Toughness was not affected by Ni, indicating that the beneficial effect of this element only occurs for additions above the maximum evaluated. However, Ni improved the steel formability. Increases in the Charpy-V notch absorbed energy was mainly achieved through reductions in the Mn level. Despite the possibility of toughness deterioration caused by Cr and Mo additions, it was noted that these elements are essential to improve the abrasion resistance and to minimize HAZ softening due to welding thermal cycles. Base composition 0,40%Ni-0,90%Mn-0,50%Cr-0,20%Mo achieved better properties combination, taking into account the results of toughness, formability, abrasion resistance and weldability evaluations.

Key words: Abrasion resistance; Quenched steels; Hardness; Toughness.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

Praticamente todo o desenvolvimento na área de aços para desgaste tem se baseado no conceito metalúrgico de que a resistência à abrasão aumenta com a elevação da dureza. No entanto, valores muito elevados de dureza implicam em limitações em termos de trabalhabilidade. Algumas aplicações requerem dobramento a frio ou calandragem, situações em que a ductilidade é uma propriedade fundamental. Várias peças estão sujeitas simultaneamente à abrasão e a carregamentos dinâmicos e, nesses casos, aços de dureza muito elevada devem ser utilizados com cautela, em virtude de sua reduzida tenacidade.

A série USI-AR compreende os aços temperados resistentes à abrasão produzidos pela Usiminas, sendo que o aço de grau mais elevado dessa série é o USI-AR-500. Atualmente, o único requisito especificado para esse aço é um valor de dureza na faixa de 450 a 550 HB. O objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento, em escala piloto, de um aço da mesma classe de dureza do USI-AR-500, com melhores características de conformabilidade a frio e de tenacidade.

1.1 Fundamentação Metalúrgica

Tradicionalmente, o projeto de liga de aços temperados resistentes à abrasão visa a obtenção de um determinado nível de dureza, o qual deve ser mantido constante ao longo da espessura da chapa. Para tanto, é necessária uma combinação adequada entre as adições de C, para conferir o nível de dureza desejado, e de elementos de liga para assegurar uma elevada temperabilidade, garantindo a formação de uma microestrutura martensítica por toda a espessura.

A dureza da martensita é função do teor de C do aço, sendo necessário um teor de cerca de 0,27% para a obtenção de uma dureza em torno de 500 HB.⁽¹⁾

A obtenção de uma temperabilidade adequada se dá através da adição de determinados elementos, tais como Mo, Cr, V e Ni. Ressalta-se que Mo, Cr e V também são empregados para melhorar a resistência à abrasão, enquanto que o Ni é benéfico à tenacidade. Esses elementos, no entanto, são bastante deletérios à soldabilidade, motivo pelo qual uma das premissas do presente trabalho foi o emprego de uma composição química com os menores teores possíveis de elementos de liga. Nesse sentido, adotou-se como critério um valor de C equivalente (CE) inferior a 0,65, que corresponde ao máximo da faixa usual de variação de CE obtida para o aço USI-AR-500.

A concepção atual dos aços temperados resistentes à abrasão prevê o emprego de teores de Si e Al superiores aos valores tradicionais. Esses elementos aumentam a atividade do C e, conseqüentemente, retardam o crescimento da cementita, favorecendo a formação de outros tipos de carbonetos, em especial de Cr e de Mo. Tais carbonetos exibem uma morfologia mais favorável e uma maior dureza em relação à cementita, resultando em aumento da resistência à abrasão.⁽²⁾

As condições de processamento dos aços devem visar a obtenção de uma microestrutura refinada. Em aços martensíticos, o tamanho de grão efetivo é determinado pelo tamanho dos pacotes de martensita, os quais guardam correlação com o tamanho de grão austenítico.^(3,4) Embora existam vários tratamentos térmicos e termomecânicos para refinar o tamanho de grão efetivo em aços martensíticos, a forma mais simples de se obter esse efeito é através do refino de grão antes da têmpera⁽³⁾. Quanto mais refinada a microestrutura do aço como laminado, menor será o tamanho de grão austenítico resultante do aquecimento para têmpera,

resultando em menor tamanho dos pacotes de martensita. A laminação controlada é a técnica normalmente empregada para o refino de grão de aços. O efeito da laminação controlada advém da combinação entre o controle das condições de deformação a quente e a precipitação de carbonitretos de elementos de microliga (Nb, V e Ti) que retardam a recristalização e o crescimento de grãos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliadas 10 corridas produzidas em escala piloto, sendo uma delas de composição similar à do aço USI-AR-500, identificada como CR (corrida de referência). Nas demais corridas visou-se uma mesma composição base com 0,27% de C, a partir da qual foram avaliados dois teores de Ni (0,40 e 0,80%), em combinação com diferentes teores de Mn (0,90 e 1,10%) e de Cr (0,30 e 0,50%), com ou sem a adição de Mo (0,20%). Essas corridas foram identificadas pelo código N4 ou N8 para indicar o teor de Ni, seguido de um sub-código (A, B, C, D ou D1) para indicar a combinação de Mn, Cr e Mo, como mostrado na Tabela 1. A composição química e os valores de CE obtidos para cada corrida encontram-se mostrados na Tabela 2.

Os lingotes foram reaquecidos a 1250°C por 3 horas e submetidos a laminação controlada para chapas com espessura de 16 mm. Para o tratamento térmico de têmpera, as chapas foram austenitizadas a 900°C durante 60 minutos e a seguir resfriadas em tanque de água com agitação leve.

Tabela 1. Identificação das corridas em função dos teores de Mn, Cr e Mo (% em massa).

Composição	Mn	Cr	Mo
A	1,10	0,30	-
B	1,10	0,30	0,20
C	1,10	0,50	-
D	1,10	0,50	0,20
D1	0,90	0,50	0,20

Tabela 2. Composição química (% em massa) e valores de C equivalente dos aços avaliados.

Aço	C	Si	Al	Mn	Ni	Cr	Mo	Nb+Ti+V	CE ^a
CR	0,26 ~ 0,28	≤ 0,40	≤ 0,050	1,31	-	0,45	-	≤ 0,050	0,59
N4B		> 0,40	> 0,050	1,09	0,38	0,30	0,20	> 0,050	0,58
N4C				1,12	0,40	0,50	-		0,59
N4D				1,10	0,39	0,51	0,20		0,60
N4D1				0,92	0,40	0,51	0,20		0,59
N8A				1,11	0,83	0,30	-		0,57
N8B				1,10	0,78	0,30	0,20		0,62
N8C				1,10	0,78	0,49	-		0,60
N8D				1,10	0,79	0,49	0,20		0,65
N8D1				0,90	0,78	0,50	0,20		0,61

^a CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15

2.1 Ensaios de Verificação

- Dureza Brinell (HB) superficial.
- Medida do tamanho de grão austenítico de acordo com a norma ASTM E112, em seções atacadas com reagente especial à base de ácido pícrico e cloreto férrico.
- Ensaio de impacto Charpy em corpos-de-prova retirados do meio da espessura das chapas, com dimensões de 10 x 10 x 55 mm e entalhe em V, de acordo com a norma ASTM E23. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -60°C, -40°C, -20°C e 0°C.
- Ensaio de dobramento em corpos-de-prova com dimensões de 16 x 25 x 250 mm. Foram ensaiados 5 corpos-de-prova de cada aço, empregando-se um diâmetro de dobramento de 2,5E (E = espessura da chapa). O dobramento foi feito até o ângulo de 180° ou então até a ocorrência de trincas.

2.2 Ensaio de Abrasão

Realizado em vaso de desgaste, utilizando corpos-de-prova com dimensões de 16 x 25 x 130 mm e brita grau 1 como meio abrasivo. O ensaio teve duração de 144 horas, sendo a brita totalmente renovada a cada intervalo de 24 horas. O desgaste foi medido por perda de massa, empregando-se para as pesagens uma balança com resolução de 0,0001 g. Foram feitas medidas de dureza Vickers (HV2kgf) a uma distância de 0,5 mm da superfície de desgaste, em seções retiradas antes e após o ensaio de abrasão.

2.3 Ensaio Tekken

Realizado de acordo com a norma JIS Z3158, tem como objetivo a determinação da temperatura de preaquecimento para soldagem^(5,6). Após ensaio, os corpos-de-prova foram seccionados para levantamento da distribuição de dureza Vickers (HV2kgf) ao longo da zona termicamente afetada (ZTA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de Verificação

A Tabela 3 mostra os valores obtidos de dureza superficial, de energia absorvida em ensaio de impacto Charpy e de tamanho de grão austenítico.

Tabela 3. Valores de dureza, energia absorvida em ensaio Charpy e tamanho de grão austenítico dos aços.

Aço	Dureza Brinell superficial (HB)	Energia em ensaio Charpy (J)				Tamanho de grão austenítico (µm)
		-60°C	-40°C	-20°C	0°C	
CR	482	27	28	35	43	10,3
N4B	485	26	26	35	40	8,2
N4C	498	31	30	35	43	8,3
N4D	477	18	26	26	31	9,0
N4D1	492	26	33	38	42	7,6
N8A	468	27	31	34	37	9,2
N8B	502	27	32	37	37	7,3
N8C	489	29	33	35	40	7,5
N8D	500	26	28	32	38	6,5
N8D1	494	28	32	35	43	7,9

Em termos de dureza superficial, não foram observadas grandes diferenças entre os aços. Os valores medidos variaram entre 468 e 502 HB (Tabela 3), atendendo à faixa objetivada de 450 a 550 HB. Esse resultado já era esperado, uma vez que o teor de C foi mantido fixo.

O tamanho de grão austenítico de todos os aços foi considerado fino, com valores variando entre 6,5 e 10,3 μm (Tabela 3), o que foi atribuído ao emprego da laminação controlada. O aço CR exibiu o maior tamanho de grão austenítico, em função das menores adições de Nb, Ti e V (Tabela 2).

Os valores de energia absorvida não apresentaram grandes diferenças entre os aços (Tabela 3), o que poderia ser esperado, uma vez que todos exibem microestrutura martensítica de teor relativamente alto de C. Apesar disso, as melhorias apresentadas por alguns aços em relação ao CR são suficientes para emprego, com maior confiança, em aplicações que demandem requisito de tenacidade. A título de ilustração, o valor mais frequentemente especificado é de 27 J a -40°C . Nessa temperatura de ensaio, o aço CR obteve um resultado de 28 J, em comparação aos 33 J obtidos pelos aços N4D1 e N8C.

Verificou-se uma tendência de queda de tenacidade com o aumento do teor de Cr somente para os aços com adição de Mo (comparar composições B e D). Por sua vez, a adição de Mo resultou em redução da energia absorvida somente para os aços com maior teor de Cr (composições C e D). Esses resultados apontam para um efeito sinérgico de Cr e Mo sobre a tenacidade, possivelmente devido ao aumento da fração de carbonetos desses elementos. O aumento do teor de Ni só exerceu efeito benéfico em todas as temperaturas de ensaio para a composição D (aços N4D e N8D). Apesar do aumento da energia absorvida do aço N4D para o N8D, deve-se perceber que esses aços foram os que, de um modo geral, exibiram os piores resultados, o que foi atribuído ao maior teor de elementos de liga da composição D (1,10%Mn-0,50%Cr-0,20%Mo). Para as demais composições (B, C e D1) não foi observada influência do Ni, indicando que a melhoria de tenacidade associada à adição desse elemento só deve ocorrer para teores mais elevados que o máximo avaliado nesse estudo (0,80%). O único elemento que exerceu efeito sistemático sobre a tenacidade foi o Mn, sendo que a redução do teor desse elemento resultou em aumento da energia absorvida (composições D e D1).

De um modo geral, o Ni promoveu uma melhoria na capacidade de dobramento dos aços, como mostrado na Figura 1. O aço CR (sem adição de Ni) exibe desempenho inferior ao dos aços com 0,40% de Ni, os quais, por sua vez, tem desempenho inferior àqueles com 0,80% de Ni. A exceção para esse comportamento ocorreu para o aço N8D, que teve 3 corpos-de-prova reprovados, ou seja, rompidos antes de atingir 90° de dobramento. É provável que esse resultado esteja associado ao maior teor de elementos de liga da composição D, analogamente ao observado no ensaio Charpy. Por outro lado, o aço N8D1 exibiu o melhor desempenho, sendo que os 5 corpos-de-prova ensaiados foram dobrados até 180° , o que é um resultado excepcional para aços temperados.

Nenhum dos aços exibiu desempenho nitidamente superior aos demais em todos os ensaios realizados. Em uma primeira análise, foram descartados os aços N4D e N8D. Para esses dois aços, os mais altos teores de Mn (1,10%) e Cr (0,50%) e a adição de Mo (0,20%) foram deletérios à conformabilidade e à tenacidade. A partir de um balanço entre os resultados obtidos, foram selecionados os aços N4D1, N8A, N8B, N8C e N8D1. A avaliação da resistência à abrasão e da soldabilidade foi realizada somente para esses 5 aços, comparativamente ao aço CR.

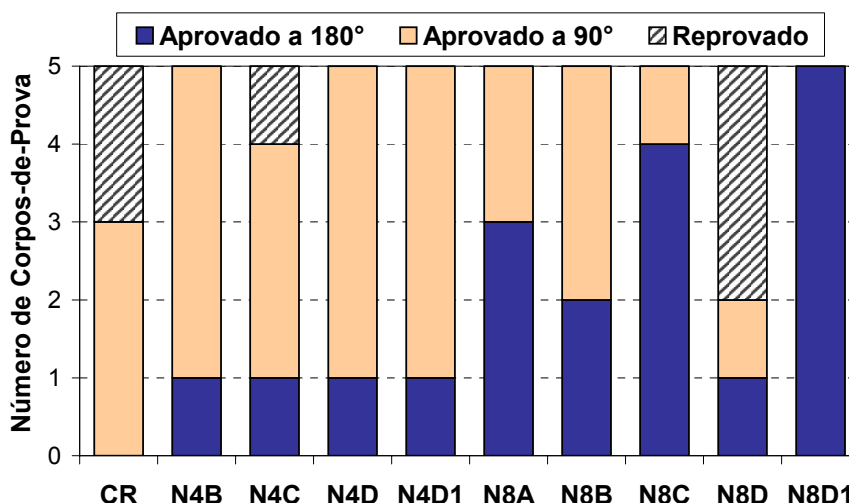


Figura 1. Resultados do ensaio de dobramento com diâmetro de punção igual a 2,5E (E = espessura da chapa).

3.2 Avaliação da Resistência à Abrasão

A Tabela 4 mostra os valores obtidos de perda de massa e de taxa de desgaste. Verifica-se que Cr e Mo são elementos que aumentam a resistência à abrasão dos aços. Os melhores desempenhos foram apresentados pelos aços N4D1 e N8D1, ambos de composição 0,50%Cr-0,20%Mo. A seguir aparecem os aços CR e N8B, este último com 0,30%Cr-0,20%Mo. Em seguida, vêm os aços sem adição de Mo, quais sejam, N8C (0,50%Cr) e N8A (0,30%Cr). Ressalta-se que o aço CR também não apresenta adição de Mo e, no entanto, o seu desempenho foi superior ao desses dois últimos.

Tabela 4. Resultados obtidos no ensaio de abrasão.

Aço	Perda de massa após 144 h (%)	Taxa de desgaste (g/h)	Dureza a 0,5 mm da superfície (HV2kgf)		
			Valor inicial	Valor final	Variação (%)
CR	2,80	0,077	535	573	7,1
N4D1	2,49	0,068	513	580	13,1
N8A	3,57	0,100	527	539	2,3
N8B	2,89	0,081	542	576	6,3
N8C	3,22	0,090	532	564	6,0
N8D1	2,76	0,074	537	572	6,5

A explicação para o comportamento do aço CR não está muito clara, no entanto pode estar ligada a uma combinação entre as características do ensaio e os teores de Mn e Ni. A adição de Ni e a redução do teor de Mn são fatores que aparentemente resultam em redução da resistência à abrasão para condições de baixa pressão de contato, como é o caso do ensaio em vaso de desgaste. Verificou-se um aumento da perda de massa com o aumento do teor de Ni de 0,40% para 0,80%, isto é, do aço N4D1 para o N8D1. O aço N8D1, por sua vez, apesar do maior teor de Ni e do menor teor de Mn em relação aos demais aços, ainda exibe um bom desempenho em função de sua combinação 0,50%Cr-0,20%Mo. Para os outros aços, a ausência de Mo e/ou a redução de Cr são fatores que promoveram a redução da resistência à abrasão, sendo que a queda de desempenho foi maior para

os aços N8A, N8B e N8C, com adição de 0,80% de Ni, do que para o aço CR, sem a adição desse elemento. É particularmente válida a comparação entre os aços CR (perda de massa 2,80%) e N8C (perda de massa 3,22%), uma vez que as principais diferenças entre eles são a adição de Ni (0,80%) e o menor teor de Mn (1,10% contra 1,30%) deste último.

Os resultados do aço CR indicam que o projeto de liga atual do USI-AR-500 é adequado em termos de resistência à abrasão, o que vem sendo atestado pelo longo tempo que esse produto se encontra no mercado. No entanto, para aplicações especiais, uma melhoria de desempenho pode ser obtida com pequenas alterações no projeto de liga, como evidenciado pelos resultados do aço N4D1.

Apesar da dureza ser a propriedade mais importante para o desempenho do aço em condições de baixa pressão de contato,⁽⁷⁾ a correlação obtida entre os resultados do ensaio em vaso de desgaste e a dureza superficial das chapas não foi boa, como mostrado na Figura 2a. Muito provavelmente, a dureza superficial inicial já estava suficientemente elevada e a variação entre os aços foi relativamente pequena (468 a 502 HB), justificando a fraca correlação obtida. Por outro lado, obteve-se uma correlação razoável entre a perda de massa e o endurecimento sofrido pela superfície de desgaste. Como pode ser visto na Figura 2b e na Tabela 4, quanto maior o nível de endurecimento, menor é a perda de massa. Portanto, ao menos para a condição de baixa pressão de contato, a capacidade da superfície encruar em serviço foi o fator mais importante para a resistência à abrasão.

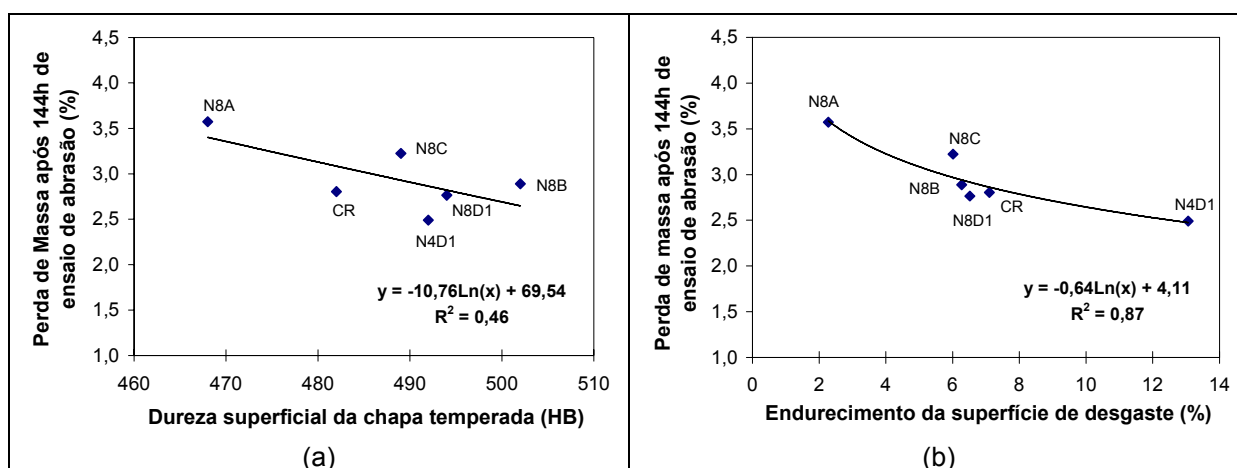


Figura 2. Correlação, obtida por regressão logarítmica, entre perda de massa e: (a) dureza superficial da chapa antes do ensaio; (b) endurecimento da superfície de desgaste durante o ensaio.

3.3 Avaliação da Soldabilidade

O ensaio Tekken é utilizado para a determinação da temperatura de preaquecimento para soldagem, visando evitar a ocorrência de trincas a frio na ZTA.⁽⁶⁾ Quanto maior a suscetibilidade de um aço a esse tipo de defeito, maior é a temperatura de preaquecimento, o que, em termos práticos, significa aumento dos custos de soldagem. As trincas a frio resultam da combinação de 3 fatores: (a) presença de hidrogênio; (b) microestrutura suscetível (martensita ou bainita); (c) estado triaxial de tensões. O emprego de preaquecimento tem como principal objetivo reduzir a velocidade de resfriamento após soldagem, facilitando o escape do hidrogênio para o meio ambiente. Os resultados do ensaio Tekken são mostrados na Tabela 5, onde verifica-se que todos os aços requerem o emprego de preaquecimento, em temperaturas variando entre 75°C e 125°C. Esse resultado está

associado aos altos valores de CE dos aços, o que implica em elevada propensão à formação de microestrutura martensítica na ZTA. Os aços N4D1 e N8A foram os que exibiram a menor suscetibilidade à ocorrência de trincas a frio.

Tabela 5. Resultados obtidos no ensaio Tekken.

Aço	CE	Preaquecimento para soldagem (°C) ^a	Dureza mínima na ZTA (HV2kgf)
CR	0,59	100	260
N4D1	0,59	75	300
N8A	0,57	75	261
N8B	0,62	125	302
N8C	0,60	100	286
N8D1	0,61	100	300

^a Valores obtidos para espessura de 16 mm, aporte de calor de 1,5 kJ/mm e consumíveis com teor de hidrogênio difusível na faixa de 5 a 10 ml/100 g de metal depositado.

Os valores de dureza medidos ao longo da ZTA são mostrados na Figura 3. Nas proximidades da linha de fusão, correspondente à região de grãos grosseiros, a dureza se mantém elevada. Essas regiões foram totalmente austenitizadas durante o aquecimento promovido pela operação de soldagem, voltando a formar martensita no resfriamento subsequente, em função da elevada temperabilidade dos aços. Nesses locais, os valores de dureza variaram entre 430 e 520 HV. A partir de uma distância em torno de 2 mm da linha de fusão observa-se uma queda acentuada da dureza, sendo que a região de máximo amaciamento ocorre na faixa de 3 a 6 mm da linha de fusão. Em seguida a dureza volta a subir, de forma gradual. A região amaciada corresponde aos locais da ZTA aquecidos na faixa inferior de temperaturas intercríticas e em temperaturas subcríticas, onde o efeito predominante do ciclo térmico de soldagem é de revenimento. A região amaciada é relativamente extensa, uma vez que temperaturas tão baixas quanto 100°C já são suficientes para promover algum grau de revenimento no aço temperado.

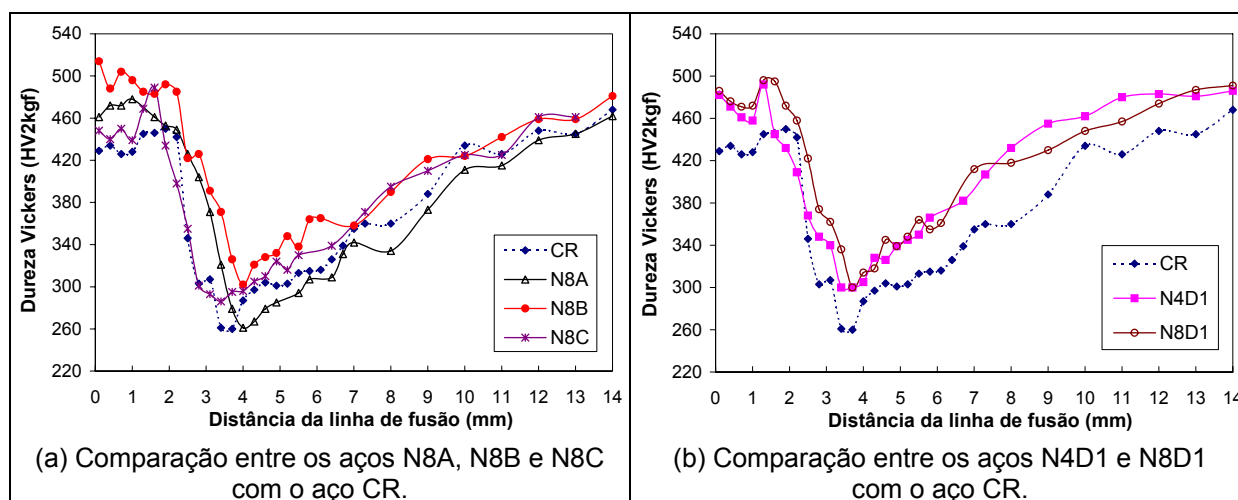


Figura 3. Distribuições de dureza da ZTA, em seção transversal ao cordão.

A adição de Mo aumentou a resistência do aço ao amaciamento na ZTA. Como pode ser visto na Tabela 5 e na Figura 3, nos aços com adição desse elemento (N8B, N4D1 e N8D1) a extensão da região amaciada foi menor e os valores mínimos de dureza situaram-se em torno de 300 HV. Os aços CR e N8A (sem Mo) exibiram o maior grau de amaciamento, com valores mínimos de dureza de 260 HV. O aumento do teor de Cr também auxilia na prevenção do amaciamento, embora em menor intensidade que a adição de Mo, como observado para o aço N8C (mínimo de 286 HV). Não foi observado efeito do Ni, como evidenciado pelas distribuições similares de dureza dos aços N4D1 e N8D1.

4 CONCLUSÕES

- a) Não foi observada influência sistemática do Ni sobre a tenacidade, indicando que o efeito benéfico desse elemento só deve ocorrer para teores mais elevados que o máximo avaliado (0,80%). Por outro lado, verificou-se que o Ni promove uma melhoria na capacidade de conformação a frio do aço.
- b) A redução do teor de Mn promoveu aumento da energia absorvida em ensaio de impacto Charpy.
- c) A adição de Cr e Mo, embora possa causar redução da tenacidade, é fundamental para a melhoria da resistência à abrasão e para minimizar a ocorrência de amaciamento da ZTA causado por ciclos térmicos de soldagem.
- d) A melhor combinação de propriedades, considerando-se os resultados das avaliações de tenacidade, conformabilidade, resistência à abrasão e soldabilidade, foi obtida para a composição com base 0,90%Mn-0,50%Cr-0,20%Mo mais a adição de 0,40% de Ni. O aumento do teor de Ni para 0,80% sobre essa base resultou em melhoria da conformabilidade, porém acompanhada por perdas de soldabilidade e de resistência à abrasão.
- e) É possível, para determinadas aplicações do segmento de mercado de aços resistentes à abrasão, o fornecimento de aço temperado da classe de 500 HB de dureza com características melhoradas de tenacidade e de conformabilidade em relação aos aços tradicionais, mantendo em nível similar ou superior a resistência à abrasão e a soldabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 KRAUSS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**, Materials Park, Ohio: ASM International, 2nd Ed., 1993.
- 2 MARATRAY, F. Improvement of and Research into New Abrasion-Resistant Materials. **International Cast Metals Journal**, Vol. 6, No. 4, p. 55-61, Dec. 1981.
- 3 MORRIS, J.W.; GUO, Z.; KRENN, C.R.; KIM, Y.H. The Limits of Strength and Toughness in Steel. **ISIJ International**, Vol. 41, No. 6, p. 599-611, 2001.
- 4 NAYLOR, J.P. The Influence of the Lath Morphology on the Yield Stress and Transition Temperature of Martensitic-Bainitic Steels, **Metallurgical Transactions A**, Vol. 10A, No. 7, p. 861-873, July 1979.
- 5 JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. JIS Z3158:1993 - Method of Y-Groove Weld Cracking Test. In: **1993 JIS Handbook - Welding**. Tokyo, p. 677-681, 1993.
- 6 YURIOKA, N. Hydrogen Assisted Cracking in C-Mn and Low Alloy Steel Weldments. **International Materials Reviews**, Vol. 35, No. 4, p. 217-249, 1990.
- 7 WATERMAN, N.A.; ASHBY, M. **Elsevier Materials Selector**. London: Elsevier Applied Science, 1991.