

ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AÇOS ARBL MICROLIGADOS AO Nb-Ti LAMINADOS A QUENTE EM ESCALA PILOTO¹

*Priscila Rodrigues²
Léosson Luiz de Souza,³
Andersan dos Santos Paul⁴
Carlos Roberto Guinâncio Carvalho⁵
Marcos Flávio de Campos⁶*

Resumo

Este trabalho visa estudar e correlacionar como se comportam mecanicamente aços ARBL microligados ao Nb-Ti de composições químicas distintas durante o processo de laminação a quente em escala piloto e correlacionar com a evolução microestrutural desses materiais após processamento. A caracterização dos aços em estudo foi feita com o intuito de se verificar as temperaturas de transformações (A_1 , A_3 , Ar_1 e Ar_3 , através de dilatométrica de tempera), a evolução microestrutural antes e após o processamento (através de microscopia ótica e/ou eletrônica de varredura) e as propriedades mecânicas (ensaio de dureza).

Palavras-chave: Laminação a quente; Aço ARBL microligado ao Nb-Ti; Comportamento mecânico a quente; Evolução microestrutural.

COMPARATIVE STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF Nb-Ti MICROALLOYED HSLA STEEL HOT ROLLING IN PILOT SCALE¹

Abstract

This work seeks to study and to correlate as they behave of Nb-Ti microalloyed HSLA steel of different chemical compositions during the hot rolling in pilot scale process and to correlate with the microstructural evolution of those materials during the processing. The characterization of the steels in study was made with the intention of verifying the temperatures of transformations (A_1 , A_3 , Ar_1 and Ar_3 , through dilatometry of it seasons), the microstructural evolution before and after the processing (through microscopic optic electronic e/ou of sweeping) and mechanical property (rehearsal of hardness).

Key words: Hot rolling; Nb-Ti microalloyed HSLA steel; Hot mechanical behavior; microstructural evolution.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluno do Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense*

³ *Aluno do Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense; Engenheiro do Centro de Pesquisas da CSN - GGDP/GPD*

⁴ *Professor Responsável do Curso de Engenharia de Produção e Administração – UNIFoa; Engenheiro do Centro de Pesquisas da CSN - GGDP/GPD*

⁵ *Engenheiro do Centro de Pesquisas da CSN - GGDP/GPD*

⁶ *Professor Adjunto do Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense*

1 INTRODUÇÃO

A metalurgia física de materiais ferrosos é um campo extenso, no qual o aço é uma liga amplamente usada e objeto de estudo e desenvolvimento de intensas pesquisas, uma vez que uma compreensão completa da física que controla processos e propriedades desse material ainda não foi obtida.⁽¹⁻³⁾ As diferentes formas alotrópicas e os mecanismos de transformação de fase conferem ao aço uma versatilidade tanto nos microconstituintes quanto nas propriedades a serem exploradas industrialmente.⁽⁴⁾

A ciência moderna levou a busca de alternativas que aumentassem a resistência mecânica do aço sem alterar significativamente outras propriedades. Com isso foram desenvolvidos os aços ARBL microligados ao nióbio e titânio que exibem uma boa combinação de propriedades mecânicas. Em contrapartida, é importante a utilização das melhores práticas de processamento com base no conhecimento do comportamento mecânico a quente destes materiais ao longo do processo de laminação a quente. Segundo Bordignon *et al.*,⁽⁵⁾ a maioria dos aços ARBL enquadra-se na categoria de baixo teor de carbono, com menos de 0,1%, e o aumento da sua resistência é devido à adição de nióbio, mais eficiente do que o vanádio ou o titânio⁵. O Ti atua principalmente através do controle do crescimento do tamanho de grão austenítico durante o reaquecimento da placa antes de sua laminação a quente. Enquanto o Nb atua principalmente através do refino do tamanho de grão austenítico durante a laminação controlada, devido ao processo de recristalização da austenita deformada.^(6,7) A adição de nióbio e titânio nesses aços, ao lado de um rígido controle de sua composição química e do processamento de laminação a quente, lhes confere boa tenacidade, resistência mecânica, conformabilidade e soldabilidade.⁽⁸⁾

No presente trabalho, foi estudada a correlação entre a composição química e o comportamento mecânico a quente de três aços ARBL microligados ao Nb-Ti, por meio do monitoramento do processo de laminação a quente em escala piloto. O levantamento das temperaturas de transformação (A_1 , A_3 , Ar_1 e Ar_3) foi feita por dilatométrica de tempera. A avaliação da evolução microestrutural e mecânico destes aços após o processamento, com base na morfologia antes da laminação a quente, foram observadas por meio de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e medidas de dureza.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAL

As amostras de esboço de aços ARBL microligados ao Nb-Ti que foram utilizadas para o presente estudo foram fornecidas pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Estas amostras serão denominadas neste trabalho como recebida. A Tabela 1 mostra as composições químicas dos aços laminados.

Tabela 1 – Composições químicas dos aços laminados a quente pelo laminador piloto da CSN

	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Nb	Ti	Al	N
ARBL 1	0,080	1,247	0,019	0,003	0,017	0,014	0,019	0,042	0,043	0,039	0,0029
ARBL 2	0,097	0,867	0,017	0,003	0,048	0,018	0,012	0,041	0,024	0,038	0,0046
ARBL 3	0,118	1,488	0,018	0,0013	0,298	0,011	0,016	0,016	0,062	0,038	0,0077

Fonte: Centro de Pesquisas da CSN.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova, com dimensões de 32 x 50 x 60 (mm), foram processados por laminação a quente em escala piloto através de vários passes de laminação – com base nas máximas reduções avaliadas para este tipo de aço, como mostra a Tabela 2.

Por meio de um orifício de aproximadamente 3,5 mm de diâmetro em uma das faces laterais do corpo de prova, aberto com furadeira, foi introduzido por encaixe um termopar (tipo K) com o intuito de monitorar a temperatura durante o processo de laminação a quente em escala piloto.⁽³⁾

Os corpos de prova foram pré-aquecidos em um forno com temperatura de aproximadamente 750°C, permanecendo nessa temperatura por uma hora e meia para encharque. Em seguida, foram transferidos para um segundo forno, com a temperatura de 1.230°C (ARBL 1, ARBL 2, ARBL 3), onde permaneceram por uma hora no máximo para encharque.

Tabela 2 – Parâmetros usados para o processo de laminação piloto

Passes	Temperaturas em °C (Encharque a 1230 °C) Máximo - Mínimo	Reduções (mm)	% Reduções
R1	1230	35 – 28	20,0
R2	1200	28 – 23	17,9
R3	1150	23 – 18	21,7
F1	1060 – 1050	18 – 13	27,8
F2	1010 – 1000	13 – 9,4	27,7
F3	970 – 950	9,4 – 7,0	25,5
F4	950 – 920	7,0 – 5,6	20,0
F5	920 - 850	5,6 – 4,6	17,9

Fonte: Centro de Pesquisas da CSN.

A caracterização microestrutural dos corpos de prova dos aços microligados ao Nb-Ti laminados a quente em escala piloto foi realizada através do microscópio óptico – MO (Zeiss – Axioplan 2), microscópio eletrônico de varredura – MEV (Zeiss – DSM 962) e ensaio de dureza (Buehler LTD – Micromet 3).

Os ensaios dilatométricos foram realizados em um dilatômetro de têmpera (modelo DT1000 da Adamel Lhomargy), com o propósito de observar a cinética global das transformações de fases bem como determinar as temperaturas em que as transformações ocorrem (A_1 , A_3 , A_{r1} e A_{r3}).

3 RESULTADOS

Com base no objetivo proposto para este trabalho, as análises apresentadas se concentram nas evidências que ilustram a resposta mecânica de três aços ARBL microligados ao Nb-Ti durante a laminação a quente em escala piloto submetido a um mesmo programa de processamento, como mostra a Tabela 2.

As temperaturas de transformação durante o aquecimento (A_1 e A_3) e resfriamento (Ar_3 e Ar_1) dos aços ARBL foram obtidos por dilatométrica de temperatura como mostra os resultados da Tabela 3.

Tabela 3 – Dilatométrica de temperatura dos aços ARBL ao Nb-Ti, taxa de aquecimento e resfriamento de 1°C/s

	A_1	A_3	Ar_3	Ar_1
ARBL 1	732	889	734	547
ARBL 2	736	884	768	537
ARBL 3	665	881	723	562

Fonte: Centro de Pesquisas da CSN.

Nas Figuras 1, 2 e 3 é possível observar como se comportam os aços ARBL ao Nb-Ti em cada passe de laminação. Os passes R1, R2 e R3 (representativos da etapa de desbaste na laminação a quente) não foram analisados por não apresentarem influência significativa nas alterações microestruturais que poderiam afetar as transformações de fase ocorridas durante o processamento dos aços e suas respectivas propriedades finais, devido à elevada faixa de temperatura (muito acima da temperatura de não recristalização – T_{NR}) em que ocorreram estes passes de laminação. Na Tabela 4 são apresentadas as temperaturas e as reduções (em percentual) praticadas em cada passe de laminação (F1, F2, F3, F4 e F5) para os aços em estudo, em comparação com os valores programados Tabela 2.

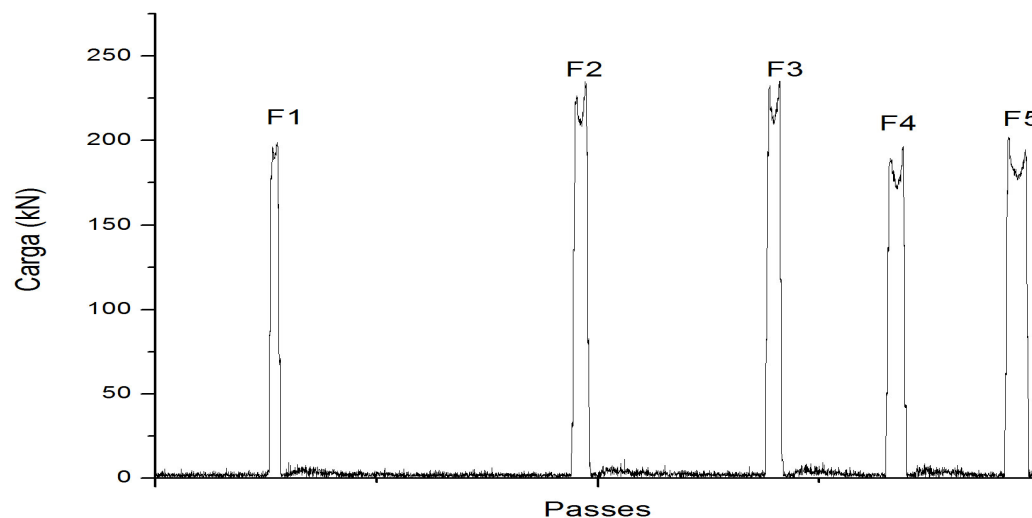


Figura 1 – Gráfico Força x Passe para o aço ARBL 1.

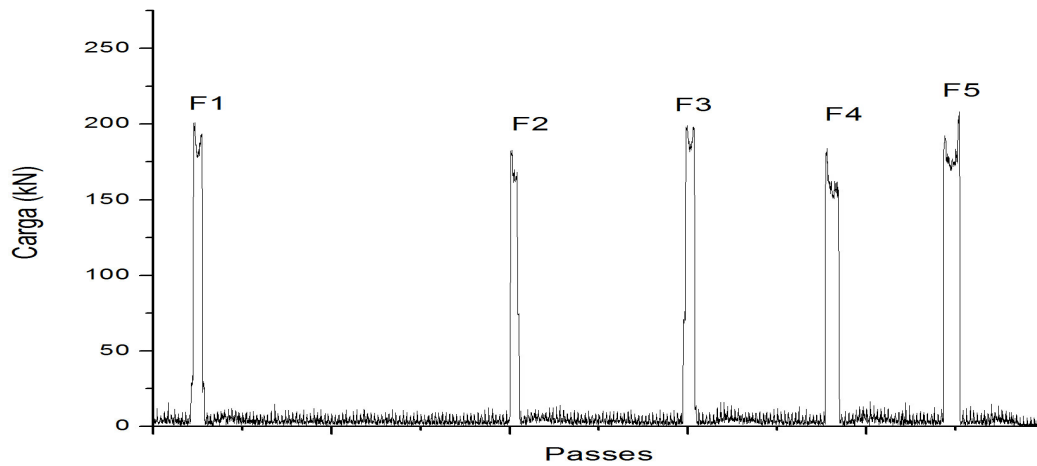


Figura 2 – Gráfico Força x Passe para o aço ARBL 2.

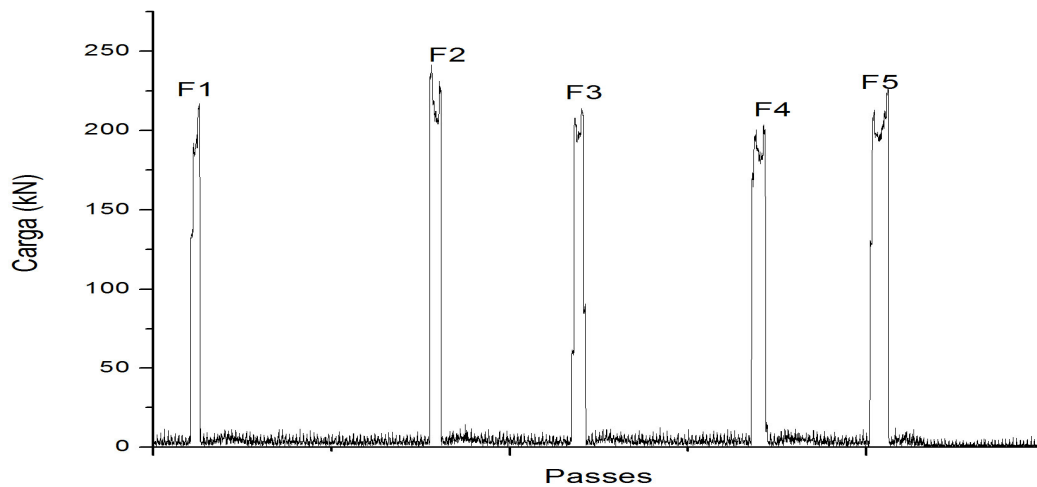


Figura 3 – Gráfico Força x Passe para o aço ARBL 3.

Tabela 4 – Temperatura e percentual de redução dos aços ARBL ao Nb-Ti extraídos do processo de laminação a quente em escala piloto

	F1		F2		F3		F4		F5	
	T°C	Redução %	T°C	Redução %	T°C	Redução %	T°C	Redução %	T°C	Redução %
ARBL 1	1.049	27,8	1.008	27,7	962	25,5	938	21,4	913	18,2
ARBL 2	1.057	35	1.001	25,4	968	27,8	925	21,4	913	18,2
ARBL 3	1.053	27,8	1.003	28,5	963	24,7	942	22,9	925	18,5

Fonte: Centro de Pesquisas da CSN.

Nas Figuras 4a, 4b e 4c, podemos observar o aspecto microestrutural das amostras na condição como recebida. As Figuras 5a, 5b e 5c apresentam um detalhamento microestrutural dos aços ARBL após a laminação a quente em escala piloto e resfriamento em água com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura. Nas fotomicrografias 4a, 4b e 4c mostram a microestrutura constituída de ilhas de perlita dispersas sobre a matriz ferrítica (grãos grosseiros). Pelo aspecto das Figuras 5a, 5b e 5c é possível observar a crescente redução dos grãos ferríticos e o aumento das regiões (grãos de origem austenítica) que apresentam deformação (marrom). Na Figura 5c observamos a deformação

praticamente completa dos grãos. Dessa forma, as observações feitas com auxílio do MEV (Figura 5) confirmam o aumento gradativo da deformação da austenita acumulada entre os passes dos aços ARBL 1, ARBL 2 e ARBL 3 (nesta ordem), onde as micrografias mostram redes de ferrita (região escura) circundando a martensita (formada a partir da austenita encruada devido a alta taxa de resfriamento após o último passe de laminação, F5). Os resultados obtidos para as medidas de dureza média dos aços ARBL ao Nb-Ti são mostrados na Figura 6.

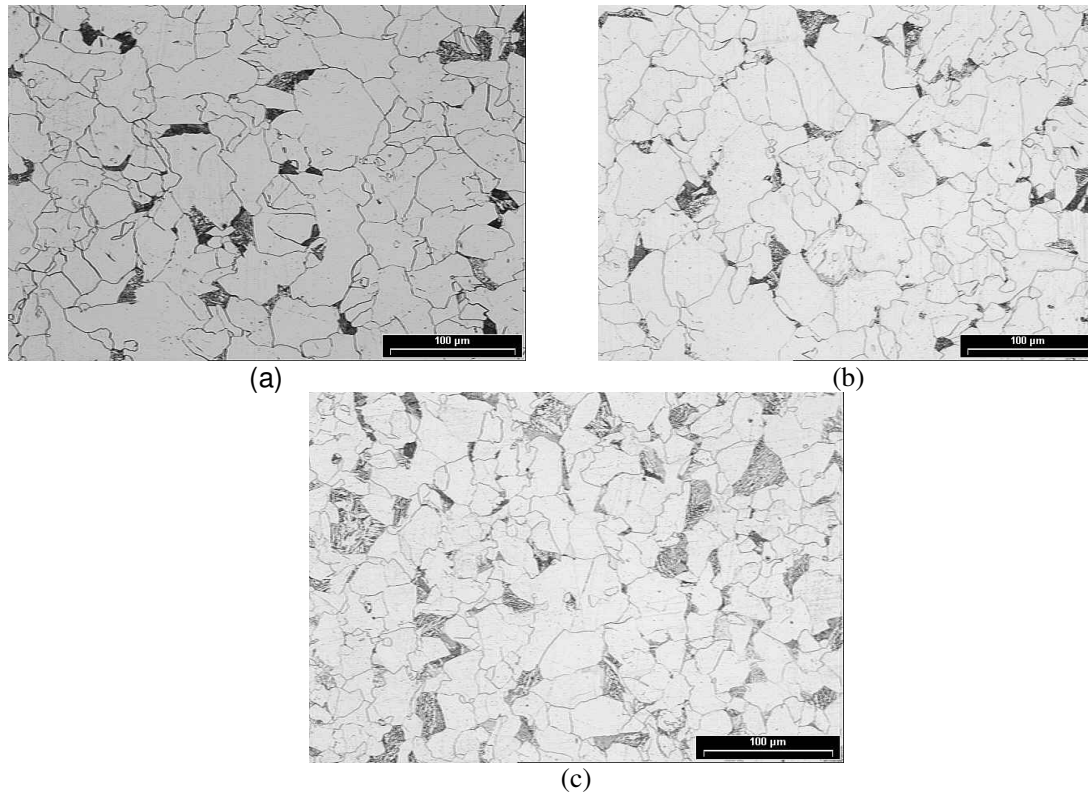


Figura 4 - Microestruturas dos aços ARBL microligados ao Nb-Ti na condição como recebida obtidas por Microscopia Ótica: (a) ARBL 1. (b) ARBL 2. (c) ARBL 3. Aumento 200x. Nital 3%.

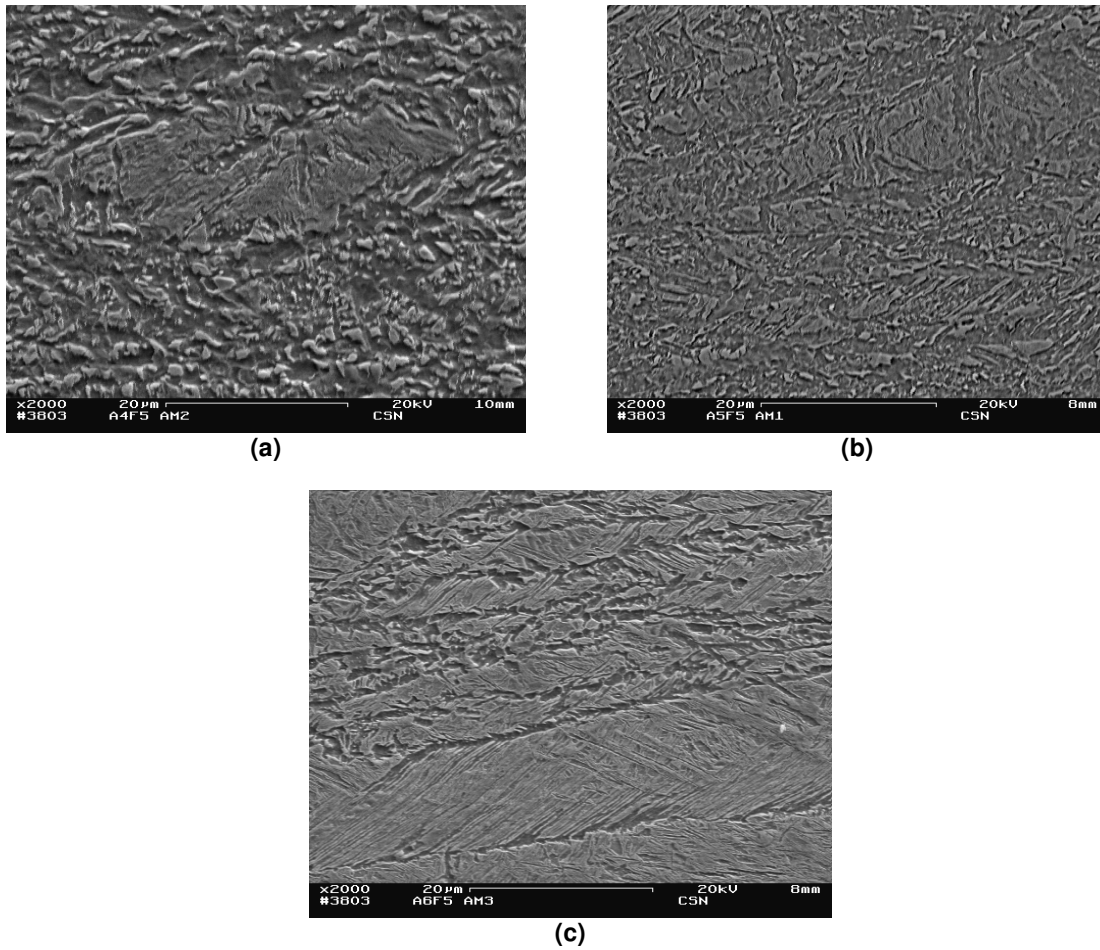


Figura 5. Detalhamento das microestruturas dos aços ARBL microligados ao Nb-Ti após laminação a quente e resfriamento em água, obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura: (a) ARBL 1. (b) ARBL 2. (c) ARBL 3. Aumento 2000x. Nital 3%.

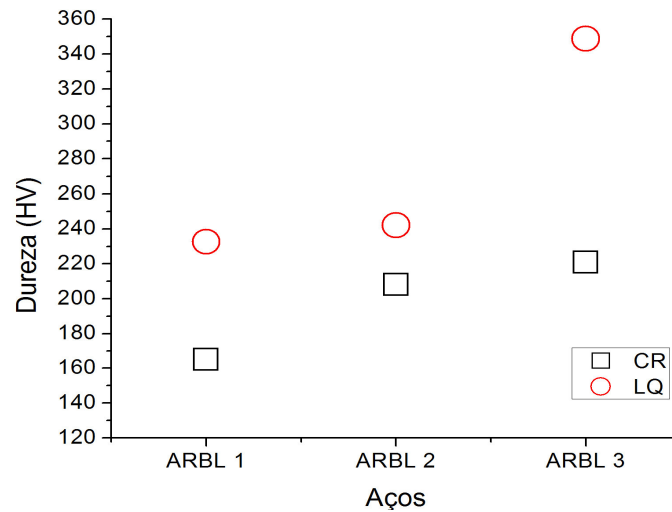


Figura 6. Dureza média dos aços ARBL ao Nb-Ti no estado como recebido (CR) e após a laminação a quente e resfriamento em água (LQ).

4 DISCUSSÃO

Com base nos resultados de dilatométrica (Tabela 3) associados às temperaturas de transformação A_1 , A_3 , Ar_3 e Ar_1 , em comparação com as evidências relativas às respostas mecânicas referentes às cargas impostas aos aços em estudo (Figuras 1, 2 e 3) e suas respectivas temperaturas e reduções em cada passe (Tabela 4), podemos afirmar que todo o processo de laminação ocorreu no campo austenítico e que o aumento da resistência a deformação entre os aços só é claramente definido no último passe de laminação (F5), como mostram as Figuras 1, 2, 3, pelo aumento da carga necessária para uma mesma redução e faixa de temperatura (Tabela 4). Com base nos resultados de Ferreira⁽⁹⁾, o aumento na resistência a deformação a quente nos aços microligados está associado a: (i) a laminação da austenita não recristalizada entre passes, isto é, abaixo da temperatura de não recristalização (T_{NR}); e (ii) a precipitação, induzida por deformação, como carbonetos e nitretos.

Ao observar-se as mudanças microestruturais nos aços em estudo antes (Figura 4) e após o processo de laminação a quente em escala piloto (Figura 5), e a evolução da dureza média (Figura 6), confirmam-se as evidências destes aços terem sido laminados nos últimos passes em temperaturas abaixo da T_{NR} . Estas características apresentadas pelos aços em estudo são evidências claras que o aumento na fração de precipitados, devido aos teores de elementos microligantes (Nb e Ti) associados aos percentuais de C e N, fazem do aço ARBL 3 o mais sensível ao aumento da resistência a deformação a quente durante o programa de laminação imposto. Tendo em consideração também que o tamanho de grão austenítico do aço ARBL 3 antes do processo é inferior aos outros dois aços, como é evidenciado pela microestrutura ferrítica apresentada na Figura 4c.

Segundo Gorni *et al.*⁽⁷⁾, o elemento Ti tanto na forma solubilizada como precipitada, possui a capacidade de restringir a recristalização da austenita entre os passes de laminação abaixo de uma determinada temperatura (designada como T_{NR} , ou temperatura de não-recristalização), que geralmente varia entre 900°C e 1000°C. Dessa forma, durante a fase de acabamento da chamada laminação controlada, ocorre uma virtual “laminação a frio” da austenita, cujos grãos ficam completamente achatados e encruados imediatamente antes de sua transformação, proporcionando inúmeros pontos propícios para a nucleação de ferrita durante o resfriamento posterior. Dessa forma ela dá origem a uma microestrutura ferrítica intensamente refinada, a qual proporciona ao produto as características tecnológicas favoráveis citadas anteriormente. Comportamento similar ao demonstrado por Ferry *et al.*⁽¹⁰⁾ em seus estudos, onde modificam temperatura final de acabamento (FDT) e verificam as mudanças na microestrutura do material ao ponto de aparecer bandas de deformação a quente e até laminação no campo ferrítico, embora no seguinte trabalho não houve modificações neste último aspecto pelo fato de toda a laminação ter sido conduzida dentro do campo austenítico.

5 CONCLUSÃO

Com relação aos resultados obtidos no presente estudo podemos concluir que:

- A resistência à deformação a quente durante o processo de laminação a quente em aços ARBL aumenta em função da quantidade presente de elementos microligantes formadores de carbonetos e nitretos que controlaram o crescimento de

grão austenítico e restringirão a recristalização da austenita pelo decréscimo da sua T_{NR} .

- O aço ARBL 3 apresentou maior resistência à deformação a quente provavelmente associado ao ser tamanho de grão ferrítico antes do processamento (evidência de menor grão austenítico) e os maiores percentuais de C e N, elemento de liga Ti, sofreu elevado índice de deformação de acumulada, sendo evidenciado pelos resultados apresentados nas fotomicrografias e dureza.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pelo fornecimento de materiais e recursos técnico-laboratoriais disponibilizados para a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 LAASRAOU, A.; JONAS, J.J. *Prediction of Temperature Distribution, Flow Stress and Microstructure during the Multipass Hot Rolling of Steel Plate and Strip*, ISIJ International, Vol. 31 (1991), No. 1, pp. 95-105.
- 2 KWO, O. Review - *A Technology for the Prediction and Control of Microstructural Changes and Mechanical Properties in Steel*, ISIJ International, Vol. 32 (1992), No. 3, pp. 350-358.
- 3 FERRER, M. H. *Estudo das transformações de fases de aços TRIP ao Si e Mn microligados com Nb*. (Tese de Doutorado) – USP, 2003.
- 4 PADILHA, A.F.; SICILIANO, F. *Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura* – 3.ed.-São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 5 BORDIGNON, P.P.; CARNEIRO, T.; TAGUSAGAWA, S.; HULKA, K. *Usos e usuários finais de nióbio*. (Artigo) - Defesa@net, 2005.
- 6 GERMANO, R.L.S; *Aplicação de Tratamentos Termomecânicos Simulativos de Laminação de Tiras a Quente a Aços ARBL Si-Mn e Si-Mn-Nb*. (Dissertação de Mestrado) – UFRJ, 1991.
- 7 GORNI, A.A; SILVEIRA, J.H.D.; REIS, J.S.S. *Um Panorama do Desenvolvimento Recente de Chapas Grossas e suas Aplicações*. Corte e Conformações de Metais, 2006.
- 8 MARTINS, C.A. *Efeitos de microadições de Nb e Ti na estrutura e propriedades mecânicas de um aço conformável submetidos a tratamentos termomecânicos*. (Dissertação de Mestrado) – UFRJ, 1995.
- 9 FERREIRA, M.C.C. *Levantamento das curvas de resistência à deformação a quente, de aços de variadas composições químicas, laminados a quente pela CSN*. Volta Redonda, 2004. (Projeto de Graduação em Engenharia Metalúrgica) – EEIMVR, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda. 2004.
- 10 FERRY, M.; YU, D.; CHANDRA, T. *Influence of Hot Deformation Conditions on the Annealing Behaviour of Cold Rolled Ultra Low Carbon Steel*, ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 8, pp. 876–882.