



DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE CUSTOS DE AÇOS EUTETÓIDES

Rodolfo Libardi

Universidade Metodista de Piracicaba. Faculdade de Engenharia Mecânica e Produção.
Santa Bárbara D'Oeste, SP, Brasil.

Paulo R. Mei

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica
Campinas, SP, Brasil.

Códigos do tema: S3.1, S3.3 e S3.4.

Resumo. *Realizou-se um estudo em aços eutetóides com adições isoladas e múltiplas de elementos microligantes, totalizando cinco composições. As amostras foram aquecidas a 1200 °C, mantidas por duas horas, e então laminadas na região de recristalização da austenita em 3 passes a 1100, 1050 e 1000 °C com 50% de redução total no esquema A de laminação, denominado de laminação de desbaste e depois resfriados ao ar. No esquema B, denominado de laminação de desbaste + acabamento (laminação controlada), as amostras foram processadas como no esquema A e, após um tempo de espera, foram laminadas na região de não recristalização da austenita em 3 passes a 900, 875 e 850 °C com 41% de redução total e depois resfriadas ao ar. Foram realizados ensaios de dureza, tração e de impacto, na temperatura ambiente, e os resultados obtidos foram comparados com os dados da literatura para aços eutetóides com elementos de liga, apenas laminados, e aços eutetóides laminados e beneficiados. Foi feita uma comparação de custo entre esses aços devido a introdução de elementos de liga e do tratamento de beneficiamento (têmpera + revenimento).*

Palavras-chave: *Aço eutetóide, aço microligado, laminação controlada*

1. INTRODUÇÃO.

Aços de alto carbono com composição eutetóide são utilizados, com estrutura completamente perlítica, para a fabricação de fio máquina (Jaiswal *et al.*, 1985), (Jaiswal *et alii*, 1985), (Mottishaw *et al.*, 1983), trilhos (Mottishaw *et al.*, 1983), (Cornell, 1983), (Cornell, 1985) e arame utilizado em concreto protendido (Korchynsky, 1988). Também são utilizados na condição de temperado e revenido para a fabricação de discos de arado (Crnkovic *et al.*, 1996).

Aços microligados são os que possuem pequenas adições (usualmente entre 0,001 e 0,1% em peso) de um ou mais dos seguintes elementos: nióbio, titânio e vanádio (Korchynsky, 1988), (Meyer, 1986).

As funções dos elementos microligantes são: refino no tamanho de grão austenítico, atraso na recristalização da austenita e aumento da resistência por precipitação na ferrita (Meyer, 1986).

O nióbio tem o mais forte efeito em aumentar a temperatura de não recristalização da austenita (T_{nr}), o vanádio é eficiente na precipitação de carbonitreto na ferrita da perlita e o titânio é altamente eficaz em prevenir o crescimento de grão anormais (Hartmann, 1988).

Os aços microligados apresentam excelentes propriedades devido ao sinergismo entre os elementos microligantes e o processo de laminação a quente (Deardo, 1988).

A laminação a quente geralmente envolve dois estágios distintos: laminação em alta temperatura, denominada de desbaste, e uma série de passes de laminação em temperaturas mais baixas, denominada de acabamento. Se as operações de desbaste e acabamento são contínuas, a operação é denominada de laminação a quente, mas se há um tempo de espera entre as duas etapas, o processo é denominado de laminação controlada (Metals Handbook, 1990).

As melhores propriedades mecânicas de aços perlíticos laminados a quente podem ser obtidas por adição de elementos de liga, resfriamento acelerado, processamento termomecânico controlado da austenita e, usualmente, uma combinação destes fatores (Pickering *et al.*, 1989).

As propriedades dos aços perlíticos dependem de vários parâmetros microestruturais tais como: tamanho das colônias de perlita, espaçamento interlamelar, espessura das placas de cementita, estrutura nodular multicolumnar ou colônias individuais (Portella, 1978).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

2.1 Composição química.

Foram preparados por fusão a vácuo, pela Eletrometal (atual Villares Metals), cinco lingotes experimentais, com aproximadamente 7 kg cada, de aços com composição eutetóide e com adição de microligantes. Na “Tabela 1” estão indicadas as composições dos aços identificados por 8Ti, 8Nb, 8NbV, 8NbTi e 8NbVTi. Os lingotes, após solubilização a 1200°C durante 8h para homogeneização, foram forjados em barras com aproximadamente 600mm de comprimento e secção quadrada, com aproximadamente 25mm.

2.2 Laminação.

Os corpos de prova para os ensaios de laminação foram obtidos a partir das barras forjadas, com 22mm x 22mm x 100mm. Foi feito um furo de 3,2mm de diâmetro no corpo de prova para a introdução de um pino. Os corpos de prova foram austenitizados a 1200°C por 2 horas.

Na laminação, o corpo de prova era colocado na mesa do laminador, onde se retirava o pino e se introduzia um termopar de 3,0mm para o controle da temperatura.

No esquema A, denominado de laminação de desbaste, ao se atingir a temperatura de 1100°C era dado o 1º passe de laminação, com redução de 22mm para 18mm. A 1050°C era dado o 2º passe, com redução de 18mm para 14 mm e a 1000°C o 3º passe de 14mm para 11mm.

No esquema B, denominado de laminação de desbaste e acabamento, a laminação de desbaste era a mesma que a do esquema A. Após o 3º passe, tinha-se um tempo de espera até o corpo de prova atingir a temperatura de 900°C. A partir daí, eram dados mais 3 passes com redução total na espessura de 41% (4º passe: 11mm → 9,5mm, 5º passe: 9,5 → 8mm e 6º passe : 8,0 → 6,5mm). As temperaturas do 5º e 6º passes foram em média, respectivamente, iguais a 875 e 850°C.

Após a laminação, tanto no esquema A como no esquema B, o resfriamento foi feito ao ar com uma taxa de resfriamento entre 600 e 850°C de, aproximadamente 20°C/s.

Tabela 1. Composição química dos aços utilizados (% em peso).

Elementos	8Ti	8Nb	8NbV	8NbTi	8NbVTi
Carbono	0,790	0,800	0,786	0,786	0,810
Silício	0,150	0,150	0,170	0,150	0,150
Manganês	1,120	1,070	1,060	1,050	1,090
Fósforo	0,004	0,004	0,005	0,004	0,004
Enxofre	0,002	0,005	0,003	0,005	0,003
Cobalto	<0,01	<0,01	<0,01	0,100	0,010
Cromo	0,030	0,030	0,040	0,030	0,040
Molibdênio	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Níquel	0,040	0,05	0,04	0,03	0,04
Cobre	0,030	0,04	0,03	0,03	0,03
Tungstênio	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Oxigênio (ppm)	12	12	20	28	15
Nitrogênio (ppm)	45	45	28	26	26
Nióbio	<0,010	0,020	0,010	0,010	0,010
Titânio	0,010	<0,005	<0,005	0,015	0,019
Vanádio	<0,010	<0,01	0,120	<0,01	0,120

2.1. Ensaio Mecânicos.

Foi realizado o ensaio de dureza Vickers, utilizando carga de 40kgf. Para todos os aços na condição de laminação de desbaste foram feitas 18 medidas de dureza (3 corpos de prova laminados) e, na condição de desbaste + acabamento, foram feitas 12 medidas (2 corpos de prova laminados).

Os corpos-de-prova para o ensaio de tração foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E8M (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 1997). Utilizou-se o corpo de prova de dimensões reduzidas (“sub-size”) com diâmetro de 4mm e alongamento total medido em 5D₀ (20mm). As amostras foram retiradas na secção longitudinal em relação a direção de laminação. Para cada aço e condição de laminação foram realizados dois ensaios na temperatura ambiente.

O ensaio Charpy foi realizado na temperatura ambiente com corpo de prova tipo A com entalhe em V, de dimensão reduzida (secção transversal de 5mmx10mm), de acordo com a norma ASTM E23 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of metallic materials, 1997). Para cada aço e condição de laminação foram retiradas três amostras na secção longitudinal em relação a direção de laminação.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO.

3.1 - Propriedades mecânicas.

A “Tabela 2” apresenta os valores da dureza Vickers e os valores das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração e Charpy, para os cinco aços, nas duas condições de laminação.

Os aços 8NbV e 8NbVTi apresentaram nas duas condições de laminação os mais altos valores de dureza e de resistência mecânica, em função provavelmente da precipitação de carbonitretos de vanádio, nas lamelas de ferrita da perlita, como já foi verificado por outros autores (Sage, 1989), (Ridley *et alii*, 1981).

A redução em área, que é uma medida da ductilidade do aço, assim como a tenacidade medida pela energia absorvida no ensaio de impacto mostraram que na condição de desbaste + acabamento (laminação controlada) todos os aços apresentaram melhores resultados devido ao refino no tamanho das colônias de perlita, observada através da microscopia ótica (Libardi, 1998).

O refino no tamanho das colônias de perlita foi maior na laminação controlada, pois além da nucleação nos contornos de grão da austenita, houve a nucleação da perlita nas bandas de deformação da austenita não recristalizada (Libardi, 1998).

A “Fig. 1” mostra uma “combinação” esquemática das propriedades de limite de escoamento, redução em área e energia absorvida no ensaio de impacto Charpy ‘sub-size’ onde observa-se que os aços 8Nb, 8NbV e 8NbVTi foram os que apresentaram um melhor desempenho da laminação de desbaste para a laminação de desbaste + acabamento (laminação controlada). O aço contendo somente titânio (8Ti) foi o que mostrou o menor “ganho” de um para outro tipo de laminação.

O titânio foi muito eficaz em impedir o crescimento de grãos anormais de austenita, mas em combinação com vanádio e nióbio (8NbVTi) foi menos efetivo. Os aços contendo somente nióbio (8Nb) e em combinação com vanádio (8NbV) apresentaram muitos grãos anormais de austenita.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas.

Identificação do aço.	Dureza Vickers	Limite de Escoamento, $\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	Limite de Resistência, $\sigma_{máx.}$ (MPa)	Alongamento Total em 5Do, e, %	Redução em Área, ϕ , %	Energia absorvida, Charpy, (Joule)
Laminação de Desbaste (D).						
8Ti(D)	301 ± 8	638 ± 2	1088 ± 3	15 ± 1	31 ± 1	4,5 ± 0,8
8Nb(D)	308 ± 7	699 ± 2	1150 ± 9	11 ± 0	26 ± 1	7,1 ± 0,9
8NbTi(D)	310 ± 7	667 ± 13	1119 ± 13	17 ± 1	34 ± 0	6,2 ± 0,3
8NbV(D)	368 ± 8	887 ± 2	1309 ± 18	9 ± 1	23 ± 1	4,6 ± 0,7
8NbVTi (D)	350 ± 6	870 ± 6	1321 ± 30	11 ± 1	27 ± 2	3,3 ± 0,2
Laminação de Desbaste + Acabamento (D+A).						
8Ti(D+A)	287 ± 8	647 ± 11	1113 ± 4	12 ± 0	33 ± 1	7,5 ± 0,6
8Nb(D+A)	307 ± 9	714 ± 2	1140 ± 16	13 ± 2	43 ± 3	10,0 ± 1,4
8NbTi(D+A)	304 ± 10	665 ± 32	1118 ± 28	14 ± 3	41 ± 4	8,0 ± 0,1
8NbV(D+A)	355 ± 6	853 ± 6	1289 ± 14	12 ± 2	40 ± 6	9,5 ± 1,2
8NbVTi(D+A)	352 ± 14	836 ± 5	1267 ± 0	13 ± 2	42 ± 2	8,6 ± 0,1

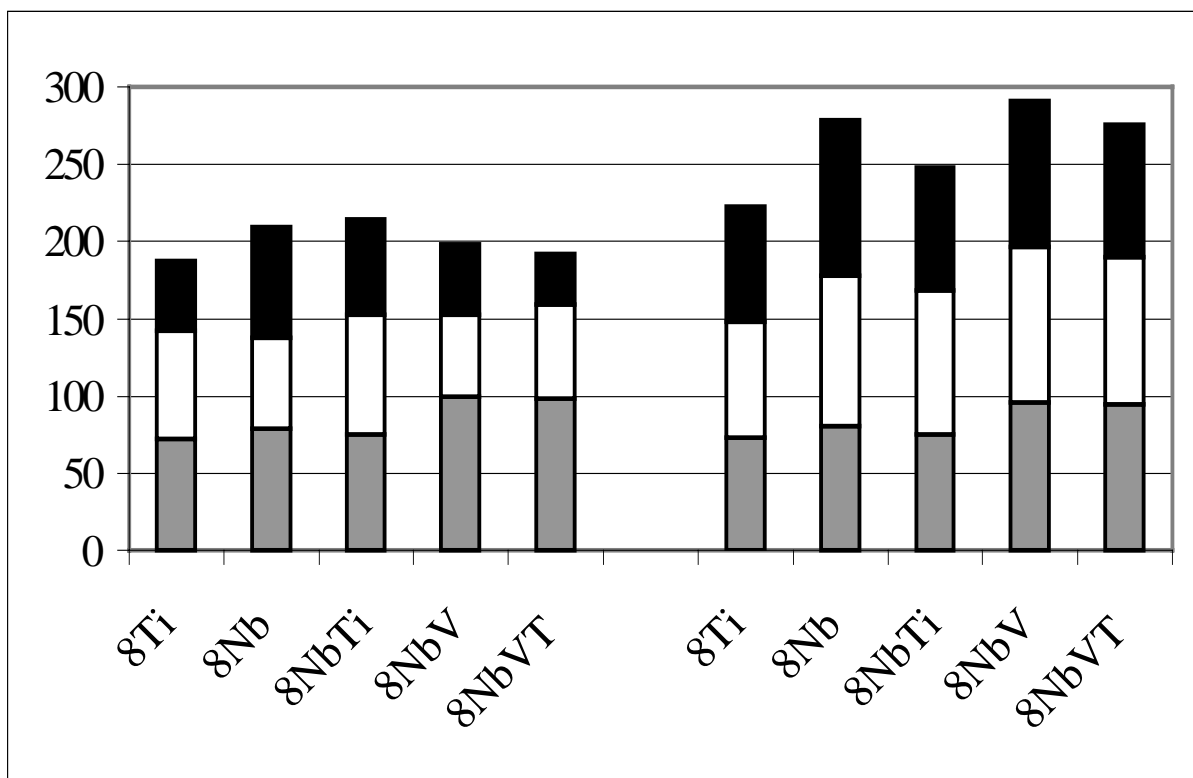


Figura 1 – Diagrama esquemático apresentando o limite de escoamento adicionado da redução em área e da energia absorvida no ensaio de impacto para os aços após a laminação de desbaste e desbaste + acabamento (Laminação Controlada). Foi atribuído 100 ao maior valor encontrado para cada propriedade, dentro de todos os grupos de aços analisados.

3.2 Análise de custos x propriedades.

Na “Tabela 3” é apresentada uma comparação das propriedades mecânicas do aço 8NbV em relação a alguns aços eutetóides apresentados na literatura

A “Tabela 4” mostra o custo em dólares (US\$) por quilo do ferro-liga contendo o elemento de liga. O vanádio é um microligante importado enquanto que o nióbio é produzido no país pela Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia (CBMM). O titânio é um microligante, também importado, cujo preço oscila muito no mercado internacional. O ferro-molibdênio é importado e o ferro-cromo é comercializado tanto importado como nacional.

A “Fig. 2” mostra o custo que seria acrescentado em relação a um aço-carbono devido à introdução dos elementos microligantes para todos os aços deste trabalho para uma produção de uma tonelada, independente dos custos de produção devido à laminação controlada. Também são colocados os custos para os aços Cr-Mo e Cr-Mo-V com composição e propriedades dadas na “Tabela 3”.

Embora esta comparação de custos não seja precisa pois não são custos industriais, nota-se que a adição de elementos microligantes custa 50% menos que a adição de elementos de liga convencionais em aços Cr-Mo-V com propriedades mecânicas semelhantes.

Na “Fig. 3” observa-se uma comparação do acréscimo no custo em dólares por tonelada devido a adição de elementos de liga convencionais (Cr-Mo), elementos microligantes (Nb, V e Ti) e beneficiamento. O custo do beneficiamento é muito variável, sendo que o valor mais baixo encontrado foi em torno de US\$1,20 por quilo (Fonte: Mercantil

Sadalla – São Paulo-SP), o que mostra que a substituição de um aço eutetóide laminado e beneficiado por um aço eutetóide microligado somente laminado seria extremamente vantajosa, pois o custo adicional passaria de “1.200” dólares/ton para 29,40 dólares/ton.

Tabela 4 - Comparação entre as propriedades dos aços 8NbV com propriedades dos aços eutetóides citados na literatura.

Identificação do aço	Limite de escoamento, MPa	Limite de resistência, MPa	Redução de área, %	Alongamento total, %	Referências.
8NbV(Desbaste + Acabamento)	853	1289	40	12	Este trabalho
AISI1080, Laminado	586	965	17	12	[Databook, 1980]
AISI1080 Temperado+Revenido	979	1310	35	12	[Databook, 1980]
Cr-Mo ⁽¹⁾	785	1210	25	11	[Cornell,H.H., 1988]
Cr-Mo-V ⁽²⁾	835	1260	13	9	[Cornell,H.H., 1988]
Aço Sydney ⁽³⁾	705	1040	16	10	[Cornell,H.H., 1988]
NIOBRÁS ⁽⁴⁾	645	1070	15	10	[Cornell,H.H., 1988]
Aço eutetóide microligado ⁽⁵⁾	696	1044	-	-	[Gomes, M.G.M.F,1997]
Aço liga temperado + revenido ⁽⁶⁾	1200	1352	-	14,7	[Crnkovic, O.R, 1996]

⁽¹⁾ 0,75 C - 0,81 Mn -0,26 Si - 0,89 Cr-0,18 Mo-0,007V – laminação a quente.

⁽²⁾ 0,78 C - 0,86 Mn -0,39 Si - 0,75 Cr-0,2 Mo-0,007V – laminação a quente.

⁽³⁾ 0,70 C - 1,10 Mn - 0,75 Si - 0,80 Cr- 0,06 Nb – laminação a quente.

⁽⁴⁾ 0,78 C - 1,33 Mn - 0,79 Si - 0,028 Nb – laminação a quente.

⁽⁵⁾ 0,76 C - 0,87 Mn - 0,15 Si - 0,045 Nb - Austenitizado à 1190°C – resfriamento isotérmico a 560°C.

⁽⁶⁾ 0,75 C - 0,93Mn - 0,31Si- 0,61Cr- 0,28Nb - Austenitizado à 830°C, resfriado em óleo a 60° e revenido à 500°C.

Tabela 5 – Custo dos elementos de liga. US\$1,00 = R\$1,70 .A/C = Alto carbono – B/C = Baixo carbono .Fontes: CBMM-São Paulo, Limetais-São Paulo, Albasteel-São Paulo.

Ferro - liga	% de elemento microligante	Custo US\$ / quilo do ferro-liga*
Fe-Ti	30-65%	2,35-3,52
Fe-Nb	66%	8,82
Fe-V	80%	17,06
Fe-Cr	60-65%	1,06(A/C)-2,06(B/C)**
Fe-Mo	65%	8,23

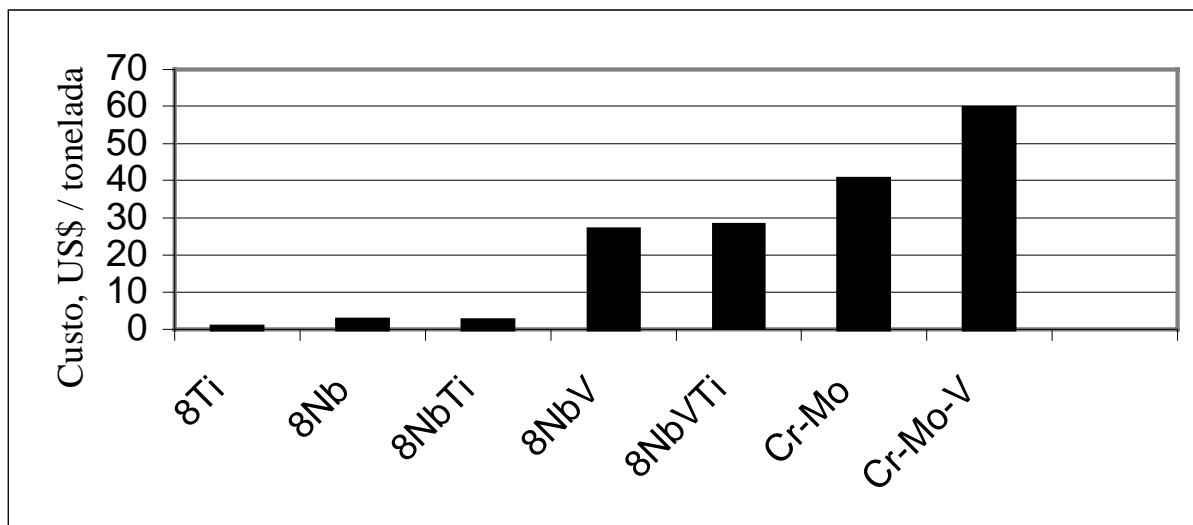


Figura 2- Acréscimo no custo (US\$ / tonelada) de aços eutetóides, pela introdução de elementos microligantes e elementos de liga convencionais.

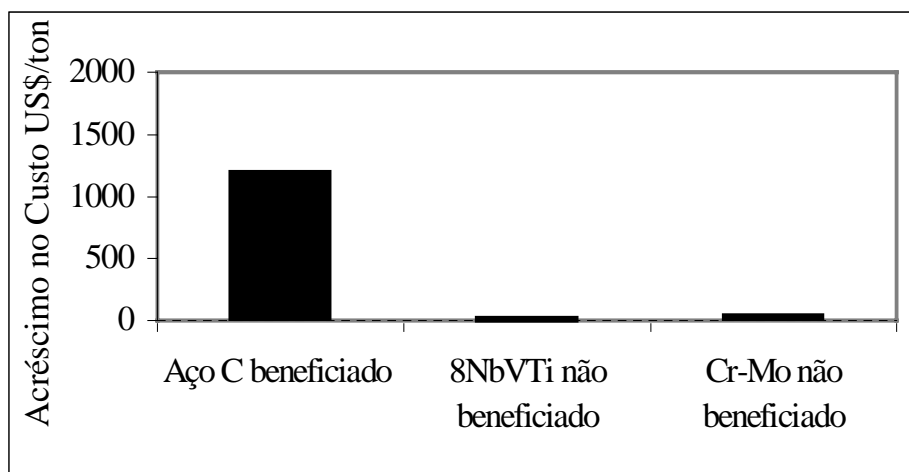


Figura 3 – Acréscimo em dólares por tonelada, devido ao beneficiamento do aço-carbono (Aço C), à introdução de microligantes (aço 8NbVTi sem beneficiamento) e à adição de elementos de liga convencionais (aço Cr-Mo) sem beneficiamento.

4. CONCLUSÕES.

Todos os aços desse trabalho apresentaram praticamente os mesmos valores de dureza e resistência mecânica na laminação de desbaste e laminação de desbaste + acabamento (laminação controlada). A grande diferença foi o aumento na ductilidade e na tenacidade ao se realizar a laminação controlada.

As propriedades mecânicas obtidas nos aços 8NbV e 8NbVTi, na laminação controlada, são muito próximas às de aços eutetóides ligados não beneficiados ou às de aços eutetóides beneficiados.

Em termos de custos, a substituição de aços eutetóides beneficiados (temperados e revenidos) e aços eutetóides com adições de elementos de liga convencionais não beneficiados por aços eutetóides microligados processados por laminação controlada parece ser extremamente vantajosa, principalmente em relação aos aços beneficiados. É necessário, entretanto, uma análise dos custos industriais, pois a laminação praticada neste trabalho, foi em escala de laboratório.

REFERÊNCIAS.

- Cornell, H. H. Microalloyed Carbon Rail Steels. In: Proc. of Microalloying 88 Congress, 24 – 3- Sep. 1988, Chicago, USA, ASM, p.433-440.
- Cornell, H.H. Improvement in Carbon Rail Steels by the Addition of Columbium (Niobium), Canadian Metallurgical Quarterly, v.22, n.3, 1983, p.347-351.
- Crnkovic, O.R. & BASTIAN, F.L. Development of Microalloyed High-Carbon Steels for Plough Disks. Journal of Materials and Performance, v.5 (6), December, 1996, p.767-774.
- Databook 1980. Metal Progress, mid-june, 1980, p26.
- Deardo, A J. An Overview of Microalloyed Steels. 8TH Process Technology Conference Proceedings, 1988, p.67-78.
- Gomes, M.G.M.F. et alli. Effects of Microstructural Parameters on the Mechanical Properties of Eutectoid Rail Steels. Materials Characterization, July, 1997, v.39, n.1, p.1-14.
- Hartmann, J. E. The Effect of Microalloys on the Hot Working Behavior of Ferrous Alloys. In: 8TH Process Technology Conference Proceedings, v.8, October, 1988, p. 23-26.
- Jaiswal, S. & MCIVOR, I.D. Metallurgy of Vanadium-Microalloyed, High-Carbon Steel Rod. Materials Science and Technology, April, 1985, v.1, n.4, p.276-284.
- Jaiswal, S. et alli. Microalloyed High Carbon Rod. Wire Industry, December, 1985, v.52, n.12, p.779-782.
- Korchynsky, M. Microalloyed High-Carbon Wire Rod. Wire Journal International, v.21, n.9, 1988, p.129-142.
- Libardi, R. Efeito da adição de nióbio, vanádio e titânio na microestrutura e propriedades mecânicas de aços eutetóides laminados a quente, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 1998. 146p. Tese de Doutorado.
- Metals Handbook, Tenth Edition, Properties and Selection: Iron and Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, v. 1, 1372p,1990.
- Meyer, L. et alli. Microalloying Elements Niobium, Vanadium, Titanium, Zirconium and Boron: Their Effects in Modern Automotive Steels, In: Automotive Steels Seminar, Mockba, 19-21 April, Moscow, p.63-83,1986.

Mottishaw, T.D. & Smith, G.D.W. Microalloyed Pearlitic Steels for the Wire Industry – Mechanisms of Alloy Element Redistribution and Strengthening Processes in Chromium-Vanadium Eutectoid Steels. In: Proc. International Conf. On Technology and Applications of HSLA Steels, 3-6 October, 1983, Pennsylvania, USA, ASM, p.163-175.

Pickering, F.B. & Garbarz, B. Strengthening in Pearlite Formed From Thermo-Mechanically Processed Austenite in Vanadium Steels and Implications for Toughness. Materials Science and Technology, March, 1989, v.5, n.3, p.227-237.

Portella, P.D. Efeito de Adições de Nióbio em Aços de Alto Carbono. 3º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, COPPE-UFRJ, Dezembro, 1978, p. I2.1-I2.9.

Ridley, N. et alli. Effect of Small Additions of Vanadium on the Strength of Pearlitic Steels. In: Proc. Int. Conf. Advances in the Physical Metallurgy and Application of Steel, University of Liverpool, England, 21-24 Sep. 1981, The Metals Society, p. 199-205.

Sage, A M. Microalloyed Steels for Structural Applications. Metals and Materials, October, 1989, p. 584-588.

Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. ASTM E23-96 In: Annual Book of ASTM Standards, 1997, v. 03.01, p.137-156.

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8M-97 In: Annual Book of ASTM Standards, 1997, v.03.01, p.77-97.

DETERMINATION OF EUTECTOIDS STEELS MECHANICAL PROPERTIES AND COSTS.

A study was conducted in eutectoid steels with single and multiple microalloying additions (five distinct compositions). The samples were heated at 1200° C for two hours, and then rolled in the region of austenite recrystallization through three passes at 1100, 1050 and 1000°C with 50% of total reduction in the scheme A, called Roughing Rolling and air cooled. In the scheme B, after rolling in the scheme A, the samples were rolled in the region of non recrystallization of austenite with three passes at 900, 875 and 850°C, with 41% of total reduction followed by air cooling (controlled rolling). Room temperature hardness, tensile and Charpy impact test were performed and the results were compared with eutectoid alloy steels only rolled, and with eutectoid steel quenched and tempering extracted from the literature. Cost comparasion between the alloy steels, and quenched and tempering was also performed.

Key-words: *Eutectoid steels, microalloy steels and controlled rolling.*