

PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS LAMINADOS A FRIO ATRAVÉS DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA ¹

*Kleiner Marques Marra*²

Resumo

Foram obtidas, via regressão estatística, relações que permitem estimar as propriedades mecânicas de tração e de dureza a partir da permeabilidade magnética de aços laminados a frio. Isto se baseou no fato de que tanto as propriedades mecânicas como as propriedades magnéticas são sensíveis aos mesmos fatores microestruturais, como tamanho de grão, densidade de deslocamentos, partículas de segunda fase e elementos em solução sólida na matriz metálica dos aços. Houve uma boa correlação entre a permeabilidade magnética (a 60 Hz e 500 A/m) e a dureza dos aços (escala *Vickers*). O limite de resistência e o limite de escoamento também se mostraram previsíveis a partir da permeabilidade. Por outro lado, não houve correlação entre a permeabilidade e o alongamento.

Palavras-chave: Aços laminados a frio; Propriedades mecânicas de tração; Permeabilidade magnética.

¹ *Contribuição ao 42º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM, Santos, SP, 25 a 28 de outubro de 2005.*

² *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Dr., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Dos elementos ferromagnéticos naturais, o ferro, além de mais abundante na natureza, apresenta a maior capacidade de magnetização, conhecida como indução de saturação, Tabela 1. Cabe dizer que o ferro puro exibe esta característica somente na estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e abaixo da temperatura de 770°C (ponto Curie). O aço, sendo uma liga a base de Fe, também apresenta forte capacidade de magnetização. A título de ilustração, a figura 1a apresenta esquematicamente uma curva de magnetização para um aço baixo carbono. Nesta curva, na abscissa é tomada a grandeza campo magnético (H), que está excitando o aço. Na ordenada está colocada a grandeza indução magnética (B) que representa a magnitude do reforço do fluxo magnético devido à magnetização do aço. A indução B é descrita pela seguinte relação:

$$B = \mu \cdot H \quad (1)$$

onde μ é a permeabilidade magnética. Esta propriedade representa a facilidade com que o aço, sob um determinado valor de campo, é capaz de se magnetizar. A figura 1b mostra que a permeabilidade cresce com o campo magnético, a partir de um valor inicial (μ_0), atinge um valor máximo (μ_m), para depois decair continuamente⁽¹⁾.

Tabela 1. Indução de saturação de alguns elementos químicos ferromagnéticos^(1,2).

ELEMENTO	INDUÇÃO MAGNÉTICA DE SATURAÇÃO (T)
Fe	2,15
Co	1,82
Ni	0,64
Gd	1,37

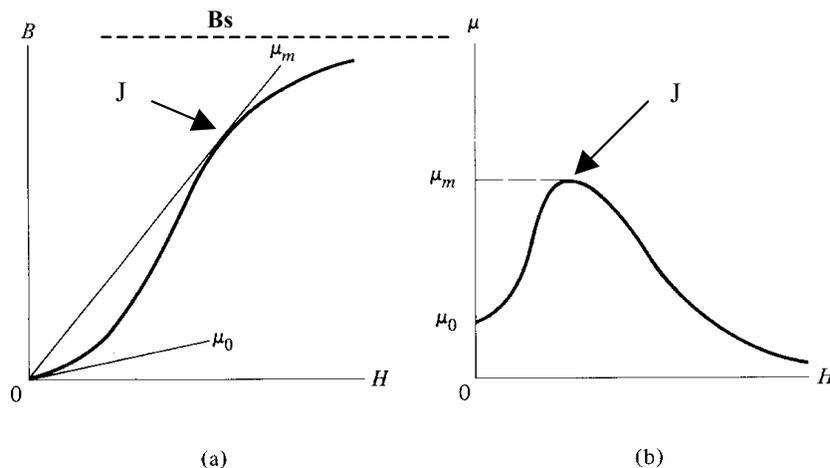


Figura 1. (a) Curva de magnetização genérica de um aço. (b) Variação da permeabilidade com o campo H⁽²⁾.

As substâncias ferromagnéticas, como o ferro, apresentam diferenças na capacidade de magnetização conforme a direção cristalográfica. No aço, a magnetização segundo a direção $\langle 100 \rangle$ é mais fácil que na direção $\langle 110 \rangle$, que por sua vez suplanta a direção $\langle 111 \rangle$ ⁽²⁾.

A Figura 1a mostra que, com a elevação de H, B cresce. Existe, no entanto, o ponto de inflexão J na curva B versus H, no qual a taxa de crescimento da indução

é repentinamente alterada. Esse ponto J corresponde ao valor máximo atingido pela permeabilidade magnética, ou seja, é o ponto μ_m indicado na Figura 1b. O “joelho” J determina a mudança do mecanismo dominante de magnetização. Assim, para campos inferiores àquele em J, a magnetização se dá pela expansão dos domínios magnéticos com orientação igual ou próxima ao vetor H e, concomitantemente, pela aniquilação dos domínios muito desorientados em relação ao campo externo. Isto portanto ocorre para baixos/médios valores de H.

Por outro lado, para altos valores de campo, à direita do ponto J, a magnetização é realizada pela rotação dos domínios, já bem orientados, que tendem a se alinhar com H. Neste caso, B cresce assintoticamente para B_s , que corresponde à indução de saturação e que vale 2,15 T para o ferro puro (ver Tabela 1).

Pode-se dizer, então, que, sob baixos e médios campos, todos aqueles fatores que influenciam a movimentação das paredes dos domínios magnéticos, durante a sua expansão ou contração, são fundamentais para determinar a facilidade com que o aço é magnetizado. É sabido^(1,2) que estes fatores são basicamente de natureza metalúrgica, como densidade de deslocamentos na matriz metálica, elementos químicos em solução sólida, tamanho e distribuição de partículas de segunda fase, nível de tensões residuais e tamanho de grão. Esses fatores, por sua vez, devem influenciar também fortemente algumas propriedades mecânicas, como dureza, limite de escoamento, limite de resistência e alongamento do aço. Portanto, é de se esperar que existam relações de dependência entre a permeabilidade magnética, sob baixos ou médios campos, e as propriedades mecânicas citadas.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram avaliadas 22 amostras de aços laminados a frio e recozidos em caixa de diferentes qualidades e espessuras, usualmente aplicados na indústria automobilística. A Tabela 2 relaciona os materiais, classificando-os em três categorias:

1. Tipo EEP - Aços baixo carbono, sem microligantes, com características de boa a excelente estampabilidade, atendendo as normas NBR5915EEP (EEP), NBR5915EEP PC (PC), ou, então, com boas características de dobramento, como estabelecido na especificação ASTM366.
2. Tipo IF - Aços ultrabaixo carbono estabilizados com titânio, do tipo livre de intersticiais.
3. Tipo AR - Aços de média e alta resistência, com adições de elementos endurecedores por solução sólida ou precipitação.

Como pode ser visto na Tabela 2, a maioria dos aços apresentam espessura na faixa de 0,65 mm a 0,87 mm, na qual estão inseridos normalmente os materiais aplicados na confecção dos painéis da carroceria de automóveis. O único material fora desta faixa é o EEP11, com espessura de 1,12 mm.

Tabela 2. Espessura e características dos aços avaliados.

Aço	Espessura (mm)	Características dos Aços
EEP1	0,75	Aços baixo carbono, acalmados ao alumínio, com características de boa estampabilidade
EEP2	0,75	
EEP3	0,76	
EEP4	0,76	
EEP5	0,77	
EEP6	0,77	
EEP7	0,81	
EEP8	0,86	
EEP9	0,72	
EEP10	0,81	
EEP11	1,12	
EEP12	0,87	
IF1	0,65	Aços do tipo livre de intersticiais (IF), ultrabaixo carbono (<50 ppm) e com adições de Ti (500 ppm a 700 ppm).
IF2	0,74	
IF3	0,74	
IF4	0,80	
IF5	0,80	
IF6	0,80	
IF7	0,81	
IF8	0,81	
AR1	0,74	Aço baixo carbono microligado ao P
AR2	0,71	Aço baixo carbono, com adição de Mn e microligado ao Nb

A permeabilidade magnética foi medida com a utilização de um equipamento de marca Brockhauss, modelo MPG100, sob a excitação de corrente elétrica alternada com frequência de 60 Hz. As amostras dos aços foram avaliadas em lamelas nas seguintes dimensões 280 mm x 30 mm x espessura. As propriedades mecânicas avaliadas foram a dureza e as propriedades de tração: (i) alongamento, (ii) limite de escoamento e (iii) limite de resistência. A dureza foi tomada como a média de 5 valores individuais, medidos em seção tomada paralelamente à direção de laminação (ao longo da espessura das amostras), em escala *Vickers*, com a utilização de uma carga de 2 kgf. As propriedades de tração foram avaliadas segundo ensaio descrito na norma ASTM A 370 (*sheet type*, base de medida de 25 mm), nas direções longitudinal, a 45° e transversal à direção de laminação. Neste caso, tomaram-se os valores das propriedades mecânicas como a média de três valores individuais.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Os aços do tipo IF apresentaram microestrutura essencialmente ferrítica, com tamanho de grão variando de 11 μm a 14 μm . Já os outros aços exibiram microestrutura a base de ferrita associada com alguma cementita, com tamanho de grão na faixa de 18 μm a 28 μm , com exceção do aço AR2 que mostrou grão bem fino, com tamanho médio da ordem de 6 μm , provavelmente por ser microligado ao Nb.

A Tabela 3 mostra que quase todos os aços tiveram dureza abaixo de 110 HV. No entanto, em razão de sua fina granulação e de sua composição química,

o aço AR2 apresentou o maior valor de dureza, ou seja, 162 HV. Os aços do tipo IF, em função dos baixos teores de C, apresentaram os menores valores de dureza, no máximo igual à 86 HV.

Na Tabela 3 são dados também os valores de propriedades mecânicas de tração. Percebe-se que, como tendência, o limite de escoamento e o limite de resistência são maiores para os aços do tipo AR, e menores para os aços do tipo IF. Já os valores de alongamento seguem tendência inversa, ou seja, são menores nos materiais AR e maiores nos aços IF. Isto pode ser justificado pelos mesmos argumentos dados para a dureza.

Pela Tabela 3 pode ser visto ainda que os aços do tipo IF, de maneira geral, apresentam menores variações das propriedades de tração nas três direções, ou seja, mostram-se mais isotrópicos. Todos os aços, com exceção do AR2, exibiram maiores valores de LE e LR e menores valores de alongamento a 45° da direção de laminação. Estes dois efeitos, ou seja, o comportamento diferenciado do aço AR2 e a maior isotropia do aço IF, devem estar inerentemente relacionados às texturas cristalográficas dos materiais estudados.

Tabela 3. Resultados de dureza e do ensaio de tração (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento).

Aço	Dureza (HV)	Limite de Escoamento (MPa)			Limite de Resistência (MPa)			Alongamento (%)		
		0°(DL)	45°	90°(DN)	0°(DL)	45°	90°(DN)	0°(DL)	45°	90°(DN)
EEP1	90	178	184	178	309	316	299	49,4	44,3	48,5
EEP2	86	179	196	182	308	317	298	50,8	37,5	46,1
EEP3	92	192	203	195	310	320	306	44,4	39,5	44,8
EEP4	92	203	216	204	317	322	309	47,4	41,9	45,6
EEP5	90	183	195	185	310	321	306	43,4	39,6	43,1
EEP6	93	188	200	190	313	322	307	49,0	44,4	47,4
EEP7	95	208	218	211	300	307	291	46,5	42,4	44,2
EEP8	100	217	228	222	309	322	304	43,9	39,3	44,7
EEP9	100	190	200	194	310	318	309	44,5	44,0	44,0
EEP10	95	177	192	188	304	313	302	47,3	45,3	46,4
EEP11	99	172	182	177	297	307	294	48,3	46,4	48,6
EEP12	97	184	188	185	323	326	317	45,1	43,3	46,4
IF1	81	161	173	172	314	316	315	48,0	45,6	46,4
IF2	79	161	167	168	292	295	290	51,3	50,0	51,5
IF3	85	143	144	144	303	307	300	51,3	50,7	51,3
IF4	84	182	184	183	305	306	299	49,9	49,0	50,0
IF5	86	158	164	166	310	311	310	50,6	49,3	51,1
IF6	83	155	159	154	303	303	295	49,6	49,2	51,7
IF7	82	151	158	156	300	301	296	50,6	50,2	50,1
IF8	86	160	167	166	310	311	307	50,6	48,4	49,1
AR1	110	211	226	221	332	343	331	41,2	39,3	41,2
AR2	162	367	379	393	489	479	489	29,3	31,4	30,0

Com relação à capacidade de magnetização, a Figura 2 mostra, para alguns representantes das categorias dos aços estudados, a indução magnética na direção longitudinal em função do campo magnético aplicado. Nessa figura pode ser visualizado o crescimento de B com H. Pode ser observado também que, para baixas magnitudes de H, os valores de B, para as três categorias de aço, são mais facilmente distinguidos que para maiores campos, onde os valores B são muito próximos. Chama-se a atenção para o aço AR2, que apresenta uma curva de magnetização bem deslocada em relação aos outros materiais. O deslocamento para a direita em relação à outras curvas significa uma maior dificuldade de magnetização para este material. Isto deve estar ligado a sua granulação bastante fina. É conhecido^(1,2,3) que os contornos de grãos representam um forte obstáculo à movimentação dos domínios magnéticos.

Pela Figura 2 pode ser percebido que o joelho das curvas (ponto de inflexão) está situado nas imediações do campo de 500 A/m. Assim para valores de H inferiores a este marco, o mecanismo de magnetização preponderante é a expansão/contração dos domínios, através da movimentação de suas paredes. Do contrário, para valores superiores a 500 A/m, mecanismo dominante de magnetização é a rotação dos domínios magnéticos.

A Figura 3 mostra a variação da permeabilidade com o campo magnético, para seis aços representantes das três categorias. Pode ser visto que, para elevados valores de campo, como a 2500 A/m, os aços apresentam valores similares de μ . No entanto, para menores valores desta propriedade, como a 500 A/m, a permeabilidade dos materiais é mais diferenciada. Portanto, neste trabalho foi buscada a correlação entre as propriedades mecânicas e a permeabilidade magnética para o valor de campo de 500 A/m.

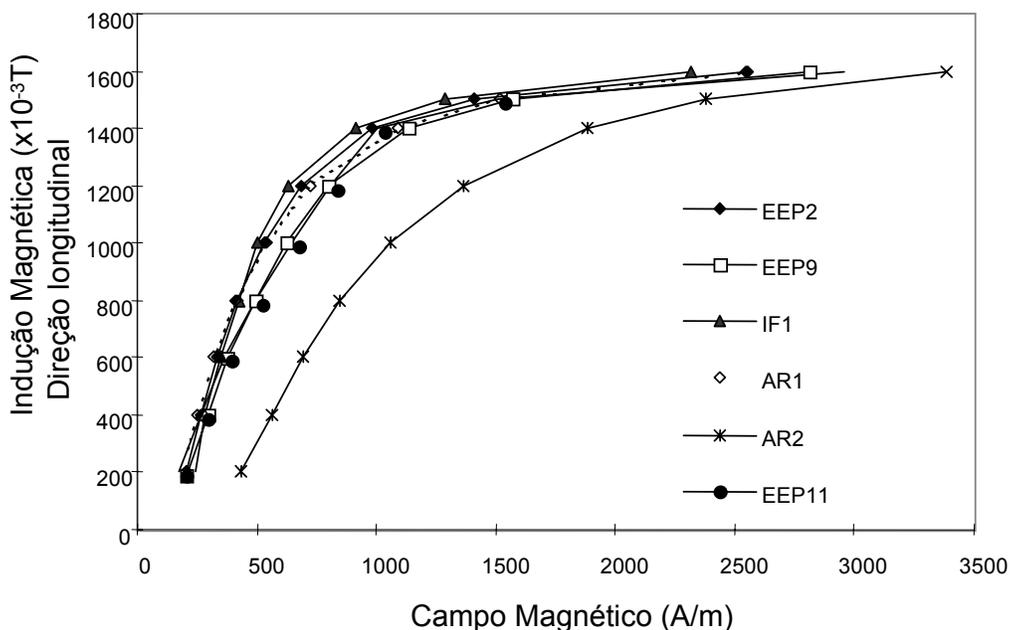


Figura 2. Curva de magnetização para seis tipos de aços estudados.

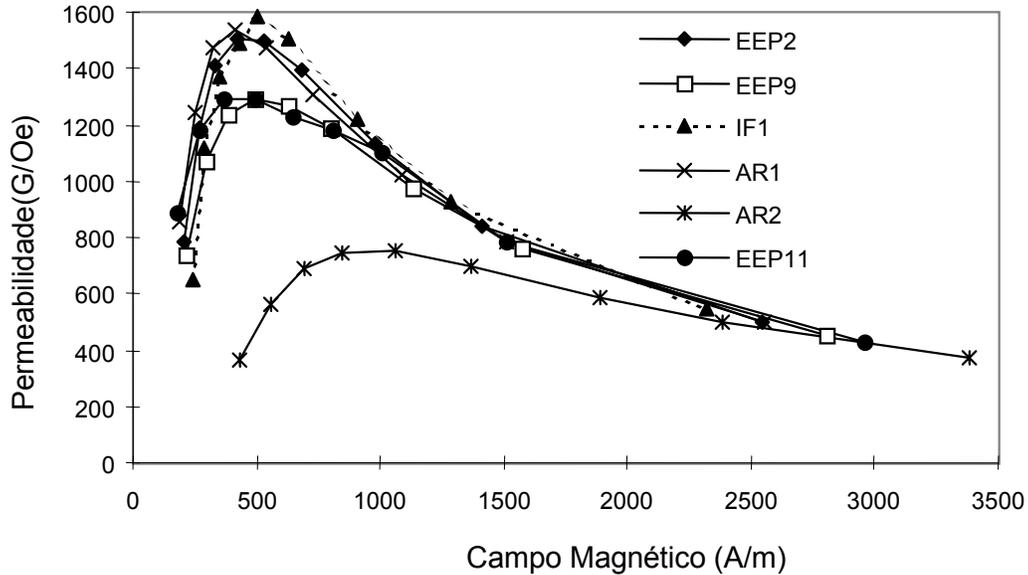


Figura 3. Variação da permeabilidade com o campo magnético para seis tipos de aços estudados.

Conforme foi dito anteriormente, deve haver uma interdependência entre a propriedades mecânicas e magnéticas. Assim, a Figura 4 correlaciona a dureza e a permeabilidade sob baixo campo (500 A/m e 60 Hz), $\mu_{0,5}$, esta última tomada na direção longitudinal. Por esta figura pode ser visto que as duas propriedades se relacionam bem, com o coeficiente de correlação (r) igual a 0,92, para uma análise de regressão simples de ordem cúbica. A expressão encontrada foi a seguinte:

$$HV = -6,0 \times 10^{-8} \mu_{0,5}^3 + 3,0 \times 10^{-4} \mu_{0,5}^2 - 423,7 \times 10^{-3} \mu_{0,5} + 304,2 \quad (2)$$

A variação média entre os valores medidos de dureza e aqueles previstos pela Equação 2 foi de 4,9%, que pode ser considerada pequena. Segundo critério de verificação da validade de r, citado por Neto⁽⁴⁾, para o número de dados utilizados e para o valor obtido para r, o coeficiente de correlação real, para um intervalo de confiança de 95%, deve variar entre 0,82 e 0,98. Isto significa que mesmo aumentando-se bastante o número de dados, r sempre assumirá um valor alto. Por este critério, a boa correlação entre a permeabilidade.

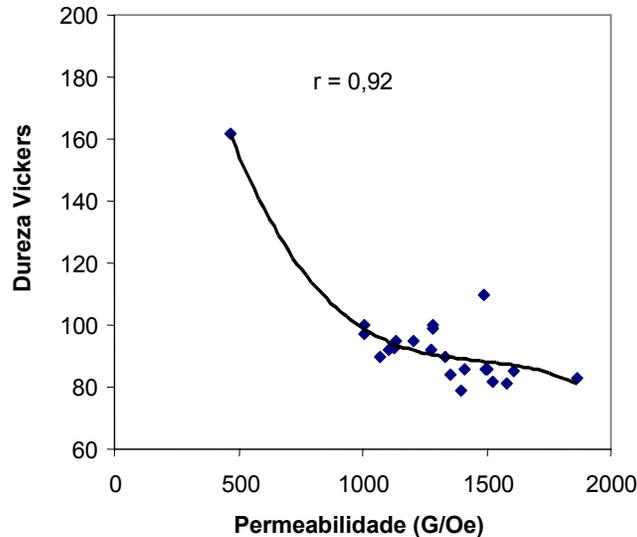


Figura 4. Correlação entre permeabilidade magnética longitudinal ($\mu_{0,5}$) e dureza mecânica (HV). (Número de dados = 22).

A correlação entre $\mu_{0,5}$ e as propriedades mecânicas de tração, levando-se em conta os valores destas propriedades nas três direções (longitudinal, à 45° e transversal ao sentido de laminação), como mostrado nas Figuras 5 e 6, não foi tão boa quanto a exibida com a dureza. Das propriedades de tração, a melhor correlação ficou com o limite de resistência (LR = $-1,0 \times 10^{-7} \mu_{0,5}^3 + 6,0 \times 10^{-4} \mu_{0,5}^2 - 1001,1 \times 10^{-3} \mu_{0,5} + 875,4$), com um coeficiente r de 0,83. Isto ocorreu em função de haver também, conforme indica a literatura⁽⁵⁾, uma boa correlação entre a dureza e LR. O limite de escoamento (LE = $-7,0 \times 10^{-8} \mu_{0,5}^3 + 4,0 \times 10^{-4} \mu_{0,5}^2 - 866,1 \times 10^{-3} \mu_{0,5} + 723,2$) mostrou uma correlação inferior ao limite de resistência, com r de 0,77. Já o alongamento mostrou o pior resultado, com o coeficiente de correlação de 0,63.

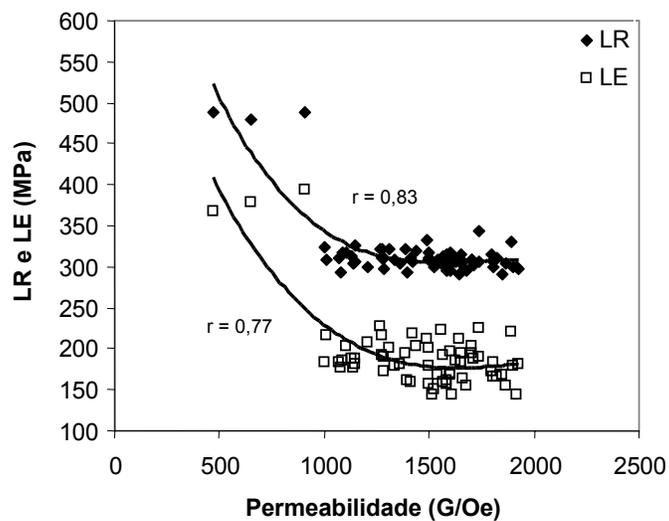


Figura 5. Correlação entre permeabilidade magnética ($\mu_{0,5}$) e limite de resistência (LR) e limite de escoamento (LE) (Número de dados = 66).

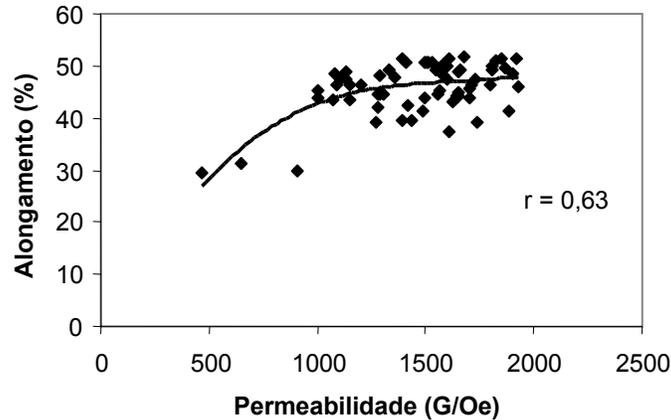


Figura 6. Correlação entre os valores permeabilidade magnética ($\mu_{0,5}$) e alongamento (Al). (Número de dados = 66).

4 CONCLUSÕES

Foi verificada uma boa correlação entre a permeabilidade magnética (a 60 Hz e 500 A/m) e a dureza (escala *Vickers*) de aços laminados a frio e recozidos em caixa. O coeficiente de correlação “r” foi de 0,92, com a equação de previsão da dureza a partir da permeabilidade sendo do tipo polinomial do 3° grau. O limite de resistência (LR) e o limite de escoamento (LE) também se mostraram previsíveis a partir da permeabilidade, porém a correlação foi um pouco inferior (r por volta de 0,8). No tocante ao alongamento, a correlação foi ruim ($r=0,6$).

Estes resultados possibilitam que se possa prever a dureza e os limites de resistência e de escoamento de aços laminados a frio, obtidos necessariamente via ensaios destrutivos, a partir da sua permeabilidade magnética, que é uma propriedade física que pode ser mensurada por ensaio não destrutivo.

REFERÊNCIAS

- 1 MORISH, A.H. - Ferromagnetism - In: The Physical Principles of Magnetism, Robert E. Krieger Publishing Company , Ch. 6, New York, 1980, p.: 259-321.
- 2 CULLITY, B.D.- Introduction to Magnetic Materials - Addison-Wesley, 1972.
- 3 LANDGRAF, F.& RODRIGUES, D. - Materiais Magnéticos/Aços Elétricos- Apostila de curso fechado realizado na USIMINAS, Nov. 1995.
- 4 NETO, P.L.O. - CORRELAÇÃO e REGRESSÃO - In: Estatística, Editora Edgard Blucher, 1977, p.: 178-222.
- 5 DIETER, G.E. - Testes de Tração - In: Metalurgia Mecânica, Editora Guanabara dois , 2ª ed., Cap. 9, Rio de Janeiro, 1981, p.: 282-321.

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF COLD ROLLED STEELS BY MAGNETIC PERMEABILITY¹

Kleiner Marques Marra²

Abstract

Tensile properties and hardness of cold rolled steels were estimated from their magnetic permeability by the use of equations obtained by statistical regression. This method was based on the fact that the mechanical properties and magnetic permeability are sensitive to the same metallurgical factors, such as grain size, dislocation density, elements in solid solution and second phase particles in metallic matrix. The correlation between hardness and permeability was good. Also, magnetic permeability can yield reasonable estimates of yield and tensile strengths. However the correlation index for the elongation was not so high.

Key-words: Cold rolled steels; Mechanical properties; Magnetic permeability.

¹ *Technical Contribution to the 42nd ABM Rolling Seminar- Processes, Rolled and Coated Products, Santos, SP, Brazil, October 25-28, 2005.*

² *ABM Member; Metallurgical Engineer, D.Sc.; Research and Development Center of Usiminas; Ipatinga, MG, Brazil.*