

# EQUACIONAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BARRAS DE AÇO EM CONFORMIDADE COM NORMAS SAE

*Túlio Braz Comitre*<sup>(1)</sup>

*Rodrigo Donadio Bueno*<sup>(2)</sup>

*Rafael Fernandes Bley*<sup>(3)</sup>

*Eduardo Sorrilha Spagnuolo*<sup>(3)</sup>

*Willy Ank de Moraes*<sup>(4)</sup>

## **RESUMO:**

A norma SAE J1397 é intencionada a prover um guia das características mecânicas de resistência de barras de aços abrangidas pelas normas de aço mais conhecidas e empregadas no mundo: as SAE J403 e SAE J404. As características estimadas na SAE J1397 não podem ser utilizadas como requisitos para especificações, porém estas estimativas são úteis para auxiliar na aplicação e seleção dos aços. Neste trabalho, alunos de graduação em Engenharia Mecânica da UNISANTA empregaram conhecimentos adquiridos nas disciplinas pertencentes à linha de concentração em Engenharia de Materiais do curso para criar um equacionamento e montar uma planilha eletrônica que converte a composição química de aços-carbono nas propriedades mecânicas previstas pela norma SAE J1397.

## **Palavras-Chave:**

Aços; resistência mecânica; seleção de materiais; construção mecânica.

---

<sup>1</sup> Perito de Engenharia, Gerência de Serviços e Oficinas. Usiminas-Cubatão. Aluno de graduação em Engenharia Mecânica – UNISANTA. E-mail: [tuliocomitre@hotmail.com](mailto:tuliocomitre@hotmail.com)

<sup>2</sup> Estágio da Usiminas-Cubatão. Aluno de graduação em Engenharia Mecânica – UNISANTA. E-mail: [rodrigo.bueno@usiminas.com](mailto:rodrigo.bueno@usiminas.com)

<sup>3</sup> Técnico em Manutenção da EMAC. Aluno de graduação em Engenharia Mecânica – UNISANTA. E-mail: [eduardo.spagnuolo7@gmail.com](mailto:eduardo.spagnuolo7@gmail.com)

<sup>4</sup> Doutorando, MSc., Eng. Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas-Cubatão, Prof. Faculdade de Engenharia da UNISANTA e Diretor da divisão técnica “Aplicações de Materiais” da ABM. E-mail: [willyank@unisanta.br](mailto:willyank@unisanta.br) ou [willy.morais@usiminas.com](mailto:willy.morais@usiminas.com).

## 1. INTRODUÇÃO

A previsão das propriedades mecânicas dos aços é uma possibilidade muito atraente, tanto para produtores quanto para os usuários deste material<sup>(1 e 2)</sup>. Neste sentido diversos modelos de previsão das propriedades mecânicas dos aços têm sido apresentados ao longo do tempo<sup>(3 a 6)</sup>: alguns mais gerais e outros mais específicos. Em sua revisão, Pickering<sup>(7)</sup> resume estes modelos na equação geral:

$$S_{LE} = \sigma_i + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_d + \sigma_{ss} + \sigma_t + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

Esta equação ilustra que o limite de escoamento ( $S_{LE}$ ) é formado por uma combinação da participação das seguintes parcelas:  $\sigma_i$  tensão de oposição à movimentação de discordâncias;  $\sigma_s$  endurecimento por solução sólida;  $\sigma_p$  endurecimento por precipitação;  $\sigma_d$  endurecimento pela geração de discordâncias;  $\sigma_{ss}$  é a interação entre as discordâncias,  $\sigma_t$  é a textura cristalográfica,  $\sigma_d$  o tamanho de grão e  $k_y$  uma constante associada ao efeito do tamanho de grão. Cada efeito pode ser considerado de uma forma diferente e por um modelo em particular.

Adicionalmente, cada família de aços apresentará um determinado tipo de microestrutura, podendo ser, por exemplo: ferrítica, austenítica, ferrita-perlita, bainítica, martensítica, ferrita-martensita, etc. A forma e a precisão do modelo dependem da correta interpretação do tipo e da morfologia da microestrutura presente e das demais variáveis do aço a ser modelado. Portanto, na criação e aplicação de um modelo deve-se estabelecer o tipo de material a ser analisado através de suas características microestruturais e dos parâmetros disponíveis, informações estas que serão utilizadas na alimentação do modelo<sup>(7)</sup>.

Existem modelos existentes e aplicáveis para os aços, traduzidos na forma de equações que descrevem as propriedades destes metais em função de sua estrutura cristalina, composição química e tamanho dos grãos. Como exemplos, têm-se as equações (2) e (3), que são devidas a Grozier e Bucher conforme apresentadas por Bodnar et. Al.<sup>(6)</sup>, a equação (4) conforme Irvine e Pickering<sup>(7)</sup> e a equação (5) devido a Bofors, apresentada por Theling<sup>(5)</sup>. Nestas equações o aço é considerado na condição normalizado.

$$S_{LE} = 91,7 + 40,7(\%Mn)+70,4(\%Si)+1,5(\%Perlita)+522(1/\sqrt{d}) \quad (2)$$

$$S_{LR} = 223,2 + 56,7(\%Mn)+102(\%Si)+4,3(\%Perlita)+373(1/\sqrt{d}) \quad (3)$$

$$S_{LE} = 91,7 + 32,4(\%Mn)+84,1(\%Si)+84,1(\%Cu)+13,7(\%Mo) \\ -31(\%Cr)+4,345(\%N_{free})1,5(\%Perlita)+521,776(1/\sqrt{d}) \quad (4)$$

$$S_{LR} = 265+549(Cp) \quad / \quad Cp = f(\%C, \%Mn, \%P, \%Si, \%Cr, \%Ni) \quad (5)$$

Onde d é o tamanho de grão em microns ( $\mu m$ ) e %Perlita é a fração volumétrica percentual deste agregado cristalino, considerado mecanicamente como se fosse uma 2ª fase.  $S_{LE}$  e  $S_{LR}$  são o limite de Escoamento e Resistência de engenharia, respectivamente, os demais valores representam a composição química dos aços.

Os tratamentos térmicos bem como o trabalho mecânico empregado na produção do aço modificam em maior ou menor intensidade suas características estruturais (por exemplo: arranjo, dimensões e formato dos grãos). A composição química interfere diretamente nestas operações, pois além do efeito sobre a resistência do aço, os diversos elementos de liga que podem estar presentes no aço influenciam suas temperaturas de transformação. Bodnar et. al.<sup>(6)</sup> apresentam, por exemplo, o efeito da composição química nas temperaturas de transformação em resfriamento,  $A_{c1}$  e  $A_{c3}$ , através das seguintes equações (6) e (7):

$$A_{c3}(^{\circ}C) = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15,2\%Ni + 44,7\%Si + 104\%V + 31,5\%Mo + 13,1\%W \quad (6)$$

$$A_{c1}(^{\circ}C) = 723 - 10,7\%Mn - 16,9\%Ni + 29,1\%Si + 16,9\%Cr + 290\%As + 6,4\%W \quad (7)$$

O correto processamento e beneficiamento do material leva a obter as combinações de composição química e estruturais mais favoráveis para uma determinada aplicação. Porém, nem sempre será possível relacionar todas as características mecânicas em um só aço, pois uma adição em excesso de certo elemento químico poderá afetar diretamente não só em uma propriedade, mas sim outras características ligadas ao desempenho e ao custo. A Tabela 1 ilustra, comparativamente, o custo na adição de alguns elementos de liga<sup>(9)</sup> com base na efetividade de sua ação dentro dos aços, considerando-se como referência o custo da adição de 0,01%C no aço<sup>(9)</sup>.

**Tabela 1.** Custo relativo na adição mínima eficaz de determinados elementos de liga a um aço (base 0,01%C = custo unitário).

Elemento	Custo relativo	Elemento	Custo relativo	Elemento	Custo relativo
C	1	Cu	95	P	4
Al	19	Mn	8	Si	19
B	6	Mo	842	Ti	30
Ca	52	Nb	39	V	254
Cr	58	Ni	1125		

Fonte: MORAIS, W.A. Desenvolvimento de Produtos (Metalúrgicos). Curso ABM. 7<sup>o</sup> ENEMET. Guarapará, Junho 2007<sup>(9)</sup>.

Assim sendo, a relação entre o custo e o benefício faz como que os principais e mais empregados elementos de liga do aço, sejam os três descritos a seguir:

**Carbono (C)** – é o elemento essencial que compõe a liga do aço. Conforme o seu teor aumenta consideravelmente, o limite de resistência e a dureza do aço se elevam enquanto a tenacidade e a soldabilidade diminuem.

**Manganês (Mn)** – O Manganês aumenta a temperabilidade, a soldabilidade e o limite de resistência à tração, com diminuição insignificante da tenacidade. Em grandes quantidades e em presença de Carbono, aumenta muito a resistência à abrasão. O Manganês provoca um aumento de aproximadamente 100MPa no limite de resistência à tração para cada adição de 1%

**Silício (Si)** – O Silício aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento dos aços, com pequena diminuição da tenacidade, Diminui também a condutividade térmica e a usinabilidade. Especialmente nos aços fundidos, o Silício aumenta a densidade. Haverá um aumento de 150MPa no limite de resistência à tração para cada 1% de Silício adicionado.

Desta forma, os aços mais produzidos e empregados no mundo hoje, são aços carbono nos quais os principais elementos de liga são o Carbono, Manganês e Silício<sup>(1)</sup>. Assim sendo, dados que permitam uma análise para seleção destes tipos mais comuns de aços ou mesmo uma metodologia para prever o seu desempenho serão de grande utilidade prática no trabalho de engenharia do dia-a-dia.

## 2. OBJETIVOS FINAIS

Dentro do que foi apresentado, o objetivo deste trabalho é empregar normas conhecidas e bastante empregadas para criar uma planilha eletrônica que ofereça as principais propriedades mecânicas dos aços, com base na sua composição química. Para tal serão empregados conhecimentos básicos da relação estrutura-propriedades, disponíveis na literatura e apresentados em sala de aula, para analisar e interpretar as informações disponibilizadas nas normas citadas. Como resultado desta análise será criado um equacionamento que associe as composições químicas de aços-carbono comuns, somente com adições de C, Si e Mn com suas principais propriedades mecânicas.

## 3. METODOLOGIA

Empregaram-se como referência para as análises e cálculos efetuados as informações contidas em três normas técnicas internacionais, de conhecimento e uso bastante difundido, descritas a seguir:

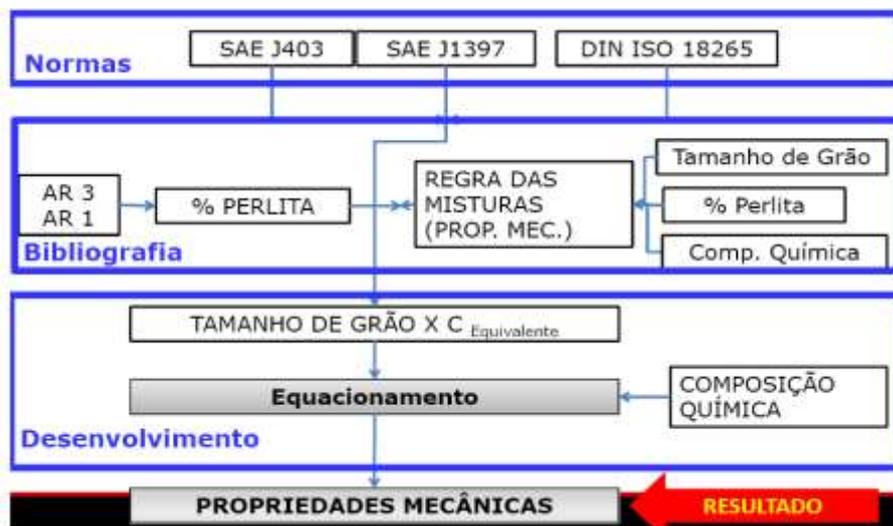
- SAE J1397 - "*Estimated mechanical properties and machinability of steel bars*"<sup>(10)</sup>  
Norma que apresenta um guia das características mecânicas de alguns graus de aço em barras em algumas condições, inclusive laminado a quente.
- SAE J403 - "*Chemical compositions of SAE carbon steel*"<sup>(11)</sup>  
Norma com as composições químicas dos aços é a norma mais conhecida do mundo.
- DIN 50150 - "*Conversion of hardness values*"<sup>(12)</sup>  
Utilizada para converter valores de dureza em escalas diferentes, também relaciona Limite de Resistência com dureza. Substituiu a DIN 50150.

Os dados destas normas foram analisados empregando-se um conjunto de equações para:

- estimativa do Limite de Escoamento ( $S_{LE}$ ) e Limite de Resistência ( $S_{LR}$ ) de engenharia representadas por equações conhecidas da literatura, válidas para aços na situação normalizado.
- cálculo das temperaturas de transformação do aço,  $A_{c1}$  e  $A_{c3}$ , com base na composição química média dos aços estudados, desconsiderando-se elementos não tipicamente adicionáveis (isto é: V, Mo, W, Cr e As  $\approx 0\%$ ).

As atividades para a elaboração da análise, criação do procedimento de cálculo e da planilha seguiram a seqüência ilustrada no fluxograma da Figura 1. Conforme mostrado neste fluxograma, o trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- 1 - Digitalização dos dados das normas SAEJ403<sup>(11)</sup>, SAEJ1397<sup>(10)</sup> e DIN 50150<sup>(12)</sup>.
- 2 - Cálculo das temperaturas  $A_{c1}$  e  $A_{c3}$ , aplicando as equações (6) e (7), com o intuito de obter a porcentagem de perlita no aço pela correção das respectivas curvas do diagrama de equilíbrio Fe-C e pela aplicação da regra da avalanche<sup>(8)</sup>.
- 3 - Cálculo do tamanho de grão, aplicando-se as equações (2) e (3), utilizando a composição química (oriunda da norma SAE J403) e as propriedades mecânicas (conforme descritas pela SAE J1397) como variáveis conhecidas. Neste caso, empregaram-se as propriedades dos aços na condição 'laminado a quente', que é uma condição de tratamento térmico similar à normalização<sup>(1)</sup>.
- 4 - Relacionamento do tamanho de grão obtido pelas equações (2) e (3) com o carbono equivalente de forma a obter um tamanho de grão modelado:  $d_{LE}$  (equação 2) e  $d_{LR}$  (equação 3).
- 5 - Através da relação entre o carbono equivalente e o tamanho de grão é possível obter o limite de escoamento ( $S_{LE}$ ) e de resistência ( $S_{LR}$ ).
- 6 - A partir do limite de resistência ( $S_{LR}$ ) é calculada a dureza do aço, com base em correlações obtidas dos dados da norma DIN 50150<sup>(12)</sup>. Da mesma forma é possível estimar a dureza nas escalas contínuas (HB e HV) e descontínuas (Rockwell).
- 7 - O desenvolvimento e união das informações obtidas (equacionamento e resultados finais), criando uma planilha na qual pode ser inserida a composição química do aço e oferecida as propriedades mecânicas ( $S_{LE}$ ,  $S_{LR}$  e durezas).



**Figura 1.** Fluxograma com a seqüência das atividades executadas neste trabalho.

#### 4. DESENVOLVIMENTO

Utilizaram-se os valores das composições químicas disponíveis na Norma SAE J403<sup>(11)</sup> para estimar as quantidades relativas de Perlita. Para isso emprega-se a regra da alavanca aplicada na respectiva região do diagrama ferro-carbono<sup>(8)</sup>. O posicionamento das curvas do diagrama Fe-C foi corrigido pelas temperaturas obtidas pelas equações<sup>(6)</sup> (6) e (7).

Para viabilizar o uso das equações de determinação do limite de escoamento ( $S_{LE}$ ) e de resistência ( $S_{LR}$ ) é necessário conhecer o tamanho de grão do aço. Os valores do tamanho de grão dos aços tabelados na norma SAE J1397<sup>(10)</sup> podem ser determinados pela aplicação reversiva das equações (2) e (3) empregando-se os valores de composição química da norma SAE J403<sup>(11)</sup>, o percentual de perlita calculado e as propriedades mecânicas listadas na SAE J1397<sup>(10)</sup> para os aços na situação 'laminado a quente'. A Tabela 2 apresenta alguns resultados deste cálculo. Os dois valores de tamanho de grão mostrados nesta tabela ( $d_{LE}$  e  $d_{LR}$ ), foram obtidos das equações (2) e (3), respectivamente empregadas para o  $S_{LE}$  e  $S_{LR}$ .

**Tabela 2.** Exemplos de determinação do tamanho de grão (d, em mm).

AÇO	%C <sub>Méd.</sub>	%Mn <sub>Méd.</sub>	%Si <sub>Méd.</sub>	Ceq	C <sub>Perlita</sub>	%Perlita	S <sub>LE</sub> (MPa)	S <sub>LR</sub> (MPa)	d <sub>LE</sub> (mm)	d <sub>LR</sub> (mm)
1010	0,105	0,45	0,25	0,243	0,712	11,7%	180	320	<b>0,0476</b>	<b>0,0282</b>
1020	0,21	0,45	0,25	0,343	0,769	23,8%	210	380	<b>0,0244</b>	<b>0,0103</b>
1045	0,47	0,75	0,25	0,653	0,864	51,3%	310	570	<b>0,0070</b>	<b>0,0016</b>
1060	0,60	0,75	0,25	0,788	0,900	64,2%	370	680	<b>0,0049</b>	<b>0,0009</b>

Para equacionar o tamanho de grão obtido regressivamente das equações (2) e (3) adotou-se correlacionar os valores de  $d_{LE}$  e  $d_{LR}$  com o carbono equivalente (%Ceq), conforme uma forma alterada da equação de carbono equivalente originalmente oferecida pelo *International Institute of Welding* (IIW)<sup>(6)</sup>:

$$\%Ceq = \%C + \%Si/4 + \%Mn/6 + (\%Mo + \%Cr + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad (8)$$

A razão para adotar esta relação foi a experiência bem sucedida com este tipo de correlação em trabalhos anteriores<sup>(1)</sup>. Esta escolha também foi validada pelos elevados valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtidos após a análise dos dados (d x Ceq) por meio de uma equação exponencial do seguinte tipo:

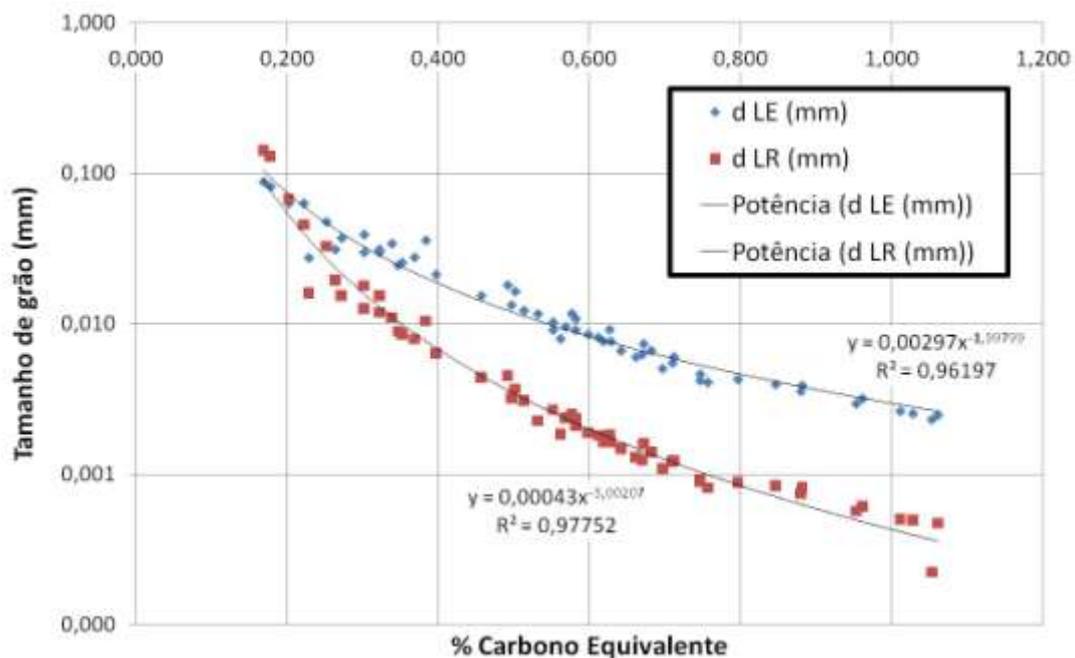
$$d_{LX} = A \cdot (\%Ceq)^B \quad (9)$$

Onde:  $d_{LX}$  é o tamanho de grão obtido pela análise dos dados feito pela equação (2)  $LX=LE$ ) ou equação (3) ( $LX=LR$ ),  $\%Ceq$  calculado conforme a equação (8),  $A$  e  $B$  são os parâmetros da correlação.

Uma vez equacionados os valores da quantidade de Perlita e do tamanho de grão em função da composição química, torna-se possível fazer a previsão das propriedades dos aços para qualquer combinação de composição química.

## 5. RESULTADOS

O gráfico da Figura 2 ilustra a correlação entre os tamanhos de grão  $d_{LE}$  e  $d_{LR}$  em função do carbono equivalente calculado pela Equação (8). Neste caso, os valores dos coeficientes de determinação obtidos foram  $R^2=0,96$  para a relação entre  $d_{LE}$  x  $S_{LE}$  e  $R^2=0,98$  para a relação entre  $d_{LR}$  x  $S_{LR}$ .



**Figura 2.** Correlação entre o tamanho de grão e o carbono equivalente dos aços SAE, conforme descritos nas normas SAE J403<sup>(11)</sup> e SAE J1397<sup>(10)</sup>.

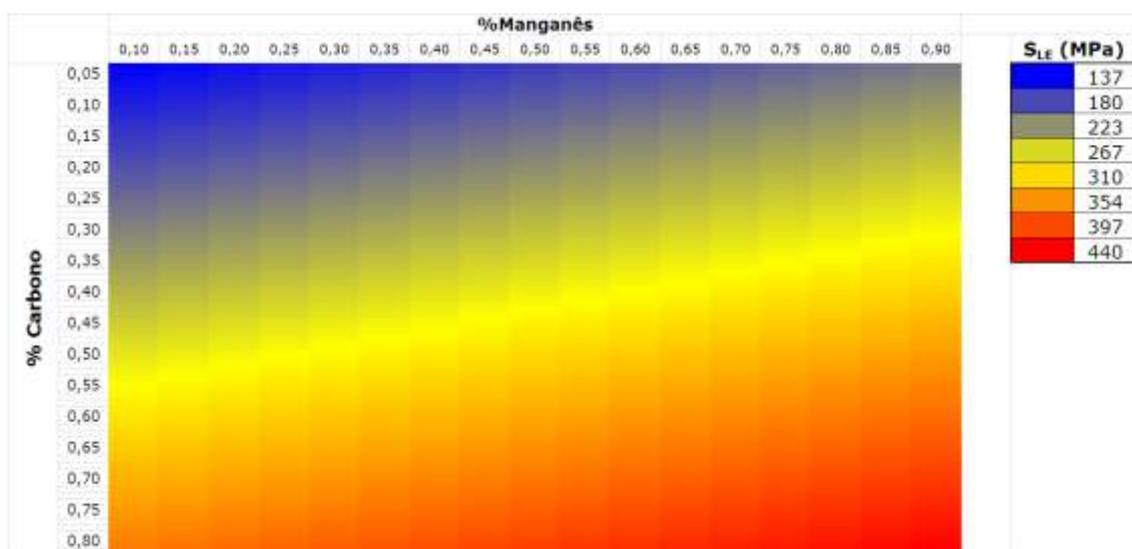
A Figura 3 mostra os aspectos do cálculo, já na forma de uma planilha eletrônica. Nesta planilha, podem ser digitados os valores de carbono, silício e

manganês do aço e, após o cálculo do carbono equivalente, ponto eutetóide (C Perlita), %Perlita e tamanho de grão, são apresentados as propriedades de resistência do aço considerado. As faixas de validade do modelamento estão descritas nesta figura.

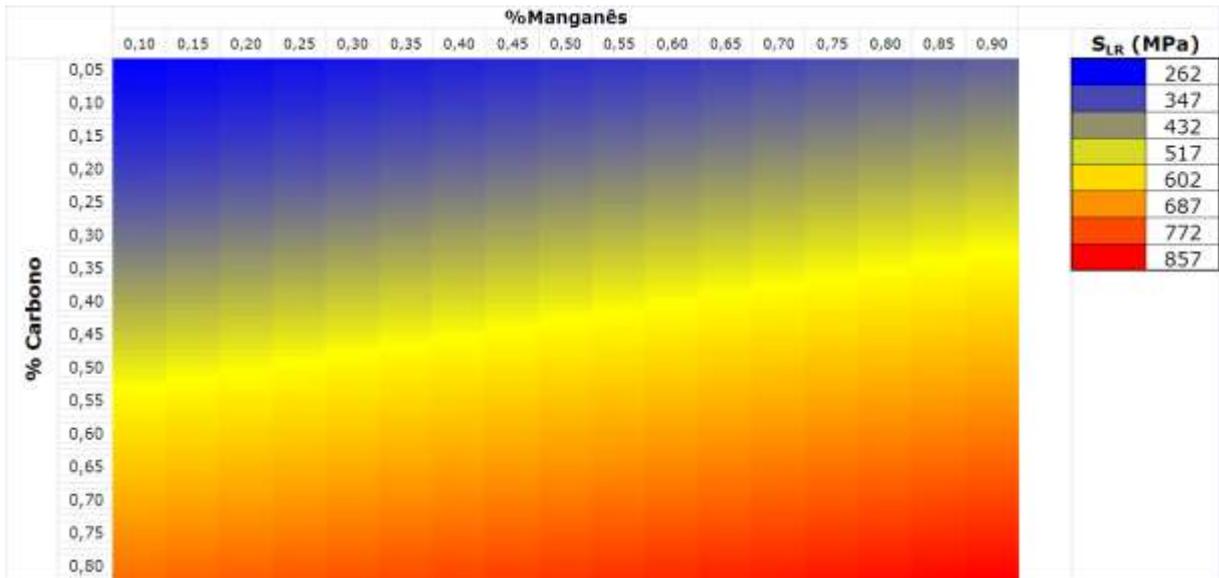
		Faixas de validade		Cálculos Intermediários				
		Mín.	Máx.					
<b>%C:</b>	<b>0,04</b>	0,04	1,03	Ceq = 0,119	d <sub>LE</sub> = 0,1881 mm	d <sub>LR</sub> = 0,2247 mm	<b>S<sub>LE</sub> =</b>	<b>151 MPa</b>
<b>%Si:</b>	<b>0,15</b>	0,15	0,35				C Perlita = 0,660	<b>S<sub>LR</sub> =</b>
<b>%Mn:</b>	<b>0,25</b>	0,25	1,65	%Perlita = 2,8%				

**Figura 3.** Exemplo de estimativa das propriedades mecânicas de um aço a partir da sua composição química. Digita-se a composição química (%C, %Si e %Mn) e são calculados os valores do Limite de Escoamento (S<sub>LE</sub>) e Limite de Resistência (S<sub>LR</sub>).

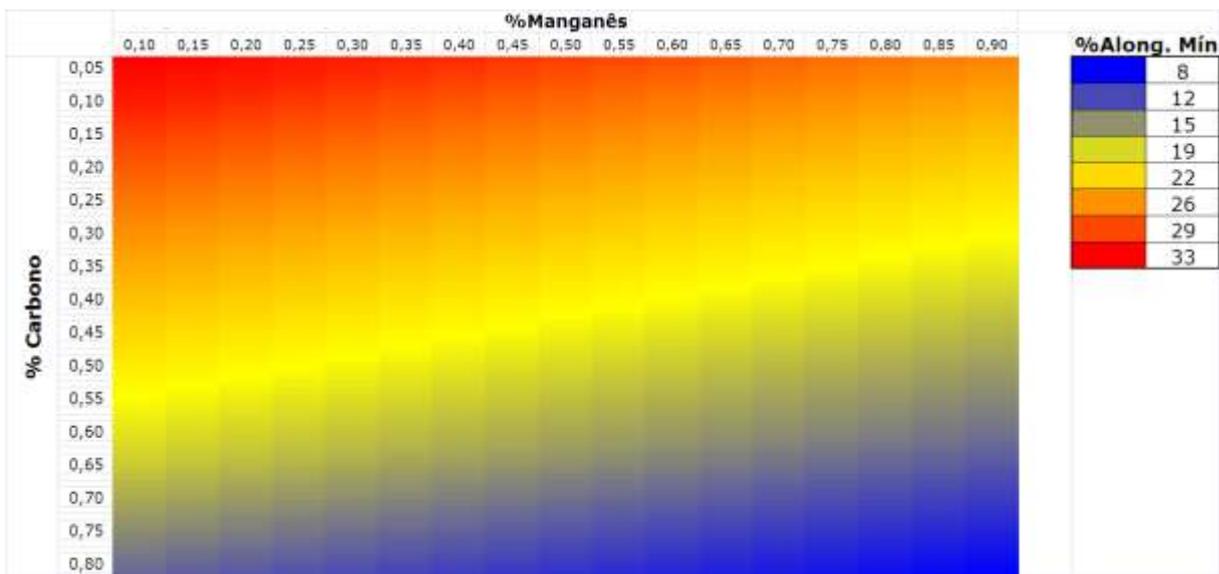
Uma das formas de se empregar este cálculo é através da criação de ábacos para consulta prática. Nestes ábacos pode-se facilmente consultar os valores esperados das propriedades mecânicas dos aços. A Figura 4 ilustra resultados obtidos para o Limite de Escoamento mínimo (S<sub>LE</sub>), a Figura 5 ilustra os valores para o Limite de Resistência médio (S<sub>LR</sub>) e a Figura 6 ilustra os resultados para o %Alongamento mínimo para CP's com L0=50mm e diâmetro de ½". Em todos os casos, considerou-se um teor de silício de 0,15%.



**Figura 4.** Exemplo de ábaco para determinação dos valores do limite de escoamento em aços abrangidos pelas normas SAE J403<sup>(11)</sup> e J1397<sup>(10)</sup>.



**Figura 5.** Exemplo de ábaco para determinação dos valores do limite de resistência em aços abrangidos pelas normas SAE J403<sup>(11)</sup> e J1397<sup>(10)</sup>.



**Figura 6.** Exemplo de ábaco para determinação dos valores do alongamento mínimo em aços abrangidos pelas normas SAE J403<sup>(11)</sup> e J1397<sup>(10)</sup>.

## 6. CONSIDERAÇÕES

Com base nas análises feitas e nas regressões obtidas, é possível concluir que:

1. Composição química e o tipo de estrutura, representada pelo tamanho de grão e fração volumétrica de perlita, podem ser utilizados para analisar o seu desempenho mecânico.

2. É possível, a partir de uma análise rápida, criar uma planilha compatível com a norma SAE J1397<sup>(10)</sup> para aços carbono-manganês.
3. O procedimento pode ser difundido como forma de substituir a tabela da norma SAE J1397<sup>(10)</sup>.
4. Atividades desenvolvidas em sala de aula podem auxiliar o trabalho prático.

Importante salientar que os dados se restringem a barras de aço (formas não planas), já que a norma abrange este tipo de geometria.

Além disso, o modelamento foi constituído, considerando-se a condição 'laminado a quente' como sendo próxima à normalização, que é relativamente válida, se o material não tiver sofrido um processo de resfriamento brusco.

Os gráficos apresentados em anexo ilustram que o modelo desenvolvido realmente é válido para representar os dados da norma SAE J1397.

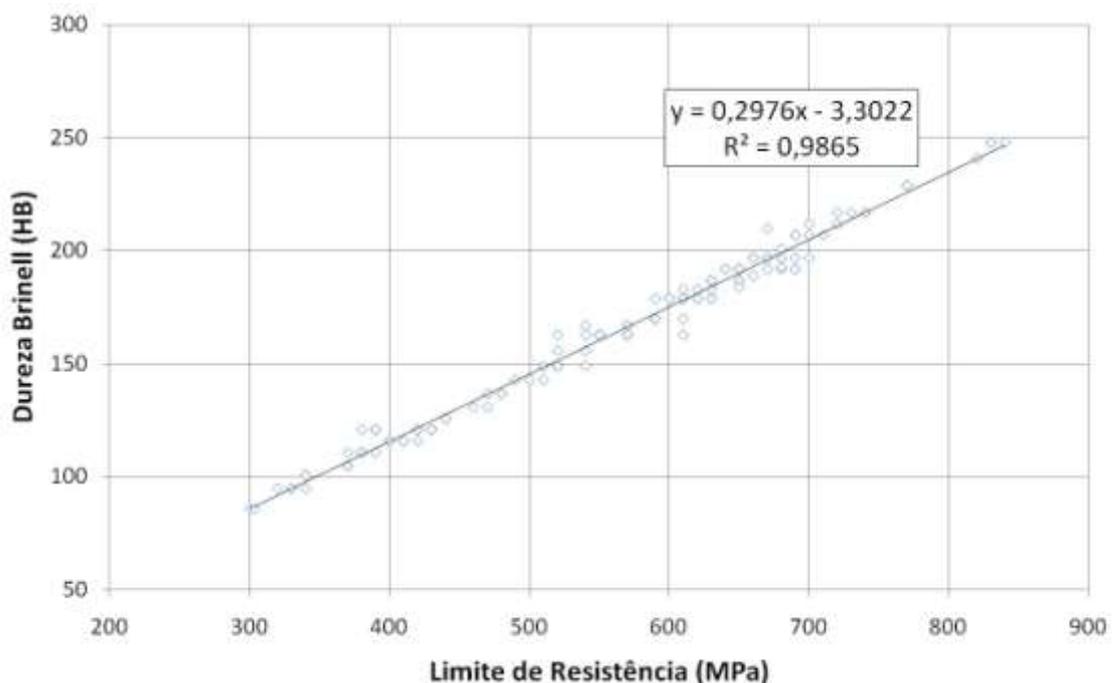
## 7. FONTES CONSULTADAS

- (1) MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; PEREZ, F.A. Modelamento e quantificação da relação propriedades X microestrutura nos aços estruturais laminados a quente da Cosipa. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 2007. p. 3285-3296, 1 CD-ROM.
- (2) BORGES, H.C.; Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas. 2008. 91 f Monografia (MBA em Siderurgia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- (3) Irvine, K. J., and Pickering, F. B., Low-Carbon Steels With Ferrite-Pearlite Structures, *Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol. 201, Nov., 1963, pp 944-960. In: BAIN, E. and PAXTON, H.W.; *Alloying elements in steel*. American Society for Metals: Metals Park, 3th printing, 1966.
- (4) F. B. PICKERING. Towards Improved Toughness and Ductility. Climax Molybdenum Co. Symp., Kyoto, p.9, 1973. In: PICKERING, F.B.; Chapter 3 - Low-carbon mild steels. *Physical metallurgy and the design of steels*. Applied Science Publishers: London, reprinted 1983.
- (5) THELNIG, K.E. Chapter 5 - Heat treatment - General. *Steel and Its Heat Treatment - Second Edition*; Butterworths: London, pp. 207-318, 1984. In: TOTTEN, G.E.; FUNATANI, K.; XIE, L., *Handbook of Metallurgical Process Design*, Marcel Dekker, Inc. New York, 2004.
- (6) BODNAR, R. L.; FLETCHER, F. B.; MANOHAR, M.; *The Physical Metallurgy of Normalized Plate Steels*. MS&T Conference Proceedings, New Orleans, pp. 89-109, 2004.

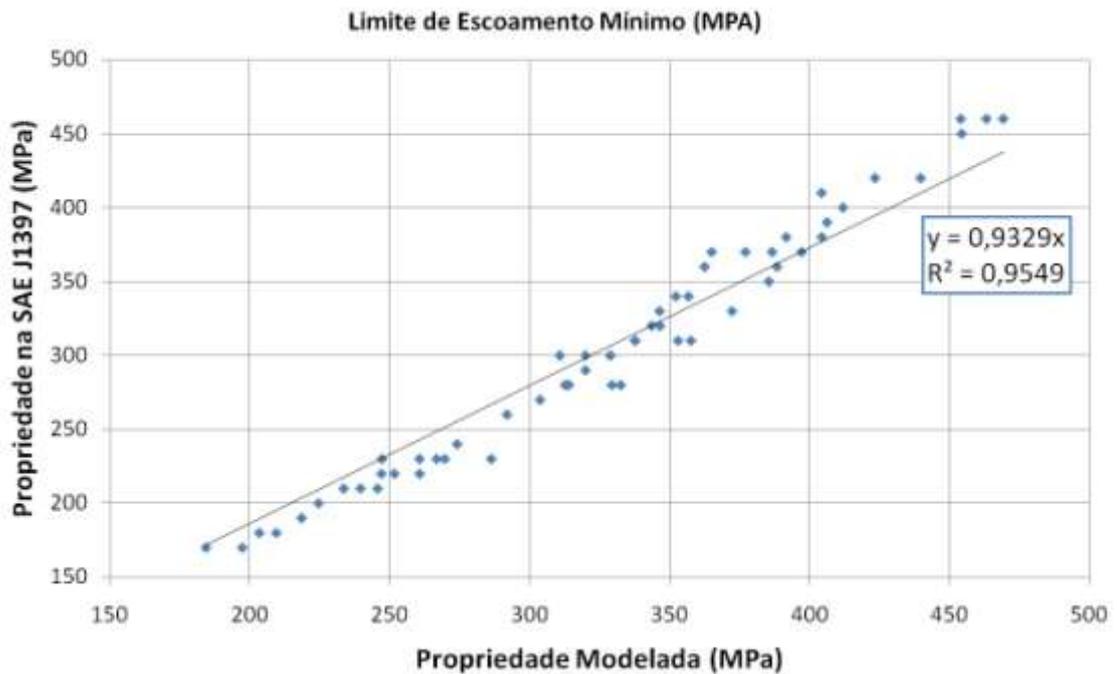
- (7) PICKERING, F.B.; Chapter 2 - Structure-property relationships in steels, pp.50-94. In: CAHN, R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E.J. *Materials Science and Technology-Vol.7 Constitution and Properties of Steels*, Wiley-VCH, Weinheim Germany, 2005.
- (8) MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; *Metalurgia física e mecânica aplicada*. 2ª Edição. São Paulo: ABM, 2009.
- (9) MORAIS, W.A.; *Desenvolvimento de Produtos (Metalúrgicos)*. Curso ABM. 7º ENEMET. Guarapará, Junho 2007.
- (10) SAE. J 1397. Estimated mechanical properties and machinability of steel bars. Edição 1992.
- (11) SAE. J 403. Chemical compositions of SAE carbon steel. Edição 2009.
- (12) DIN. 50150. Testing metallic materials - Conversion of hardness values. Edição 2000.

## 8. ANEXOS: Validação do Modelamento

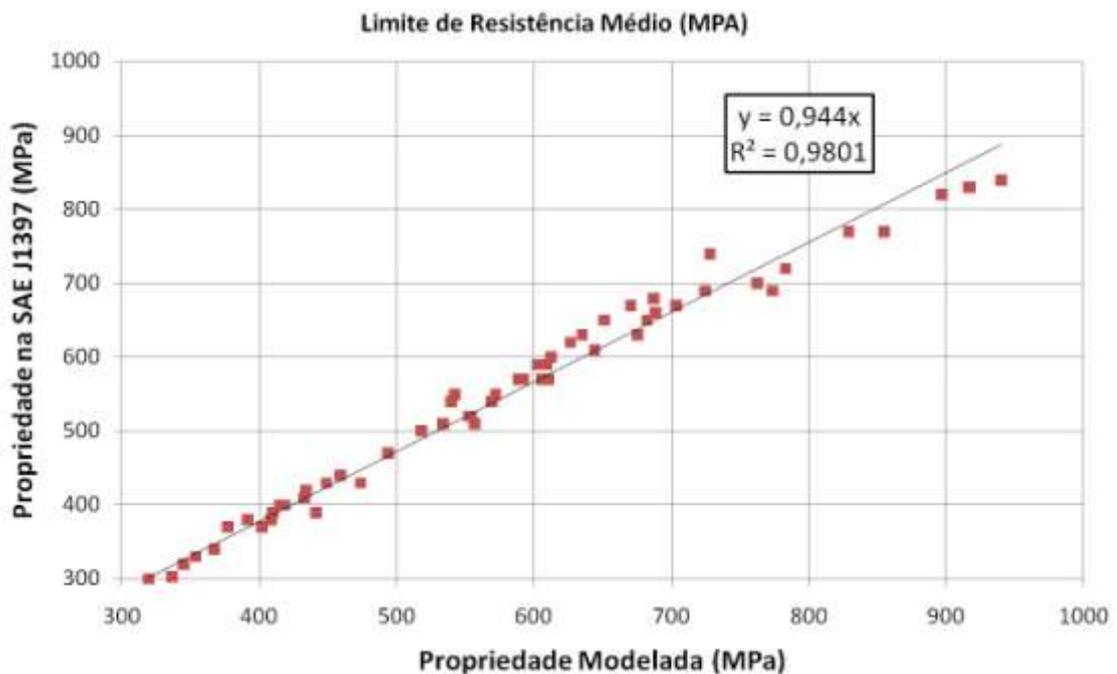
A validação do trabalho aqui apresentado está verificada pelos gráficos das Figuras 7, 8, 9 e 10. Os maiores valores do coeficiente de determinação ( $R^2 > 0,90$ ) indicam uma boa correlação entre os dados obtidos pelo modelamento gerado neste trabalho com os valores tabelados na norma SAE J1397.



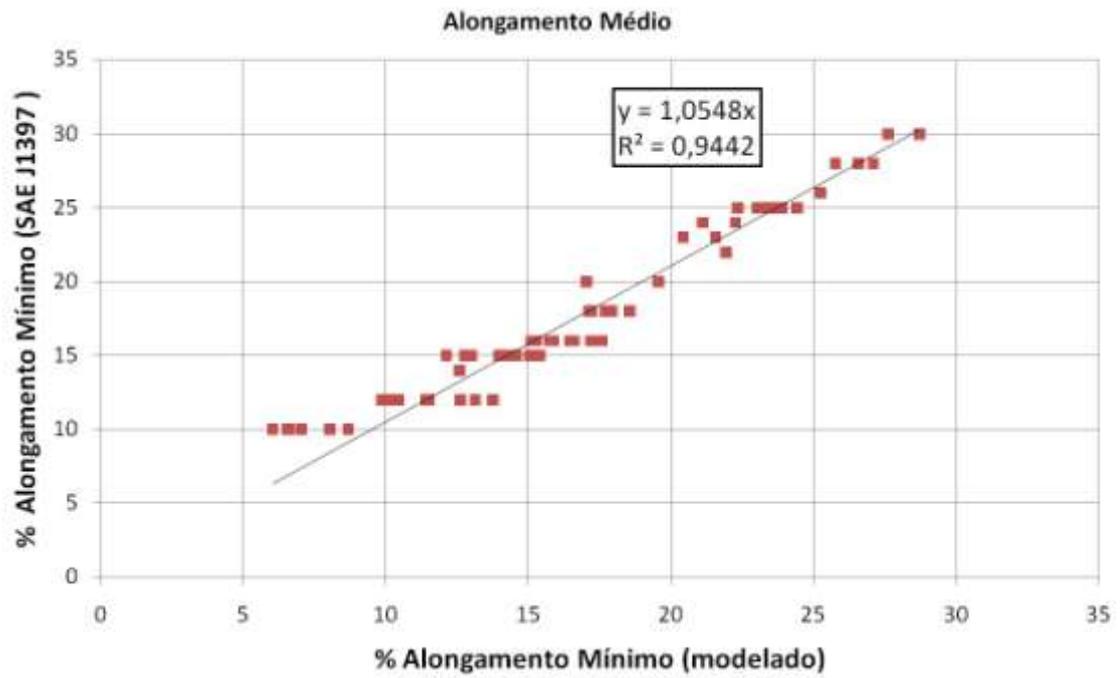
**Figura 7.** Validação da relação entre o Limite de Resistência ( $S_{LR}$ ) e a Dureza Brinell (HB) dos aços avaliados.



**Figura 8.** Validação dos valores previstos para o Limite de Escoamento Mínimo modelado neste trabalho com os listados pela norma SAE J1397<sup>(10)</sup>.



**Figura 9.** Validação dos valores previstos para o Limite de Resistência Médio modelado neste trabalho com os listados pela norma SAE J1397<sup>(10)</sup>.



**Figura 10.** Validação dos valores previstos para o Alongamento mínimo modelado neste trabalho com os listados pela norma SAE J1397<sup>(10)</sup>.