

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA SOBRE O EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO DE AÇOS¹

Antonio Augusto Gorni²
José Herbert Dolabela da Silveira³
Celso Antônio Barbosa⁴
Giovani Verdi Cappuccio⁵

Resumo

Foi estudada neste trabalho a influência dos elementos de liga presentes em aços com baixo e médio teor de carbono sobre o efeito da temperatura na resistência à deformação da austenita a partir dos resultados de ensaios de torção com múltiplos passes aplicados sob temperatura decrescente. Os resultados mostraram que, quanto maior o teor de elementos de liga presente no aço, maior será a elevação na resistência à deformação da austenita à medida que a temperatura decresce. Dito de outra forma, seu declínio à medida que a temperatura se eleva é mais acentuado, até porque sua temperatura de fusão é inversamente proporcional ao seu teor de elementos de liga. Também foi verificado que o grau de diferença entre os raios atômicos dos elementos de liga e o do ferro está diretamente associado a esse efeito da temperatura sobre a resistência à deformação da austenita e na temperatura prevista de fusão das ligas. Essas constatações indicam que, sob temperaturas suficientemente altas, é perfeitamente possível que a austenita de aços mais ligados venha a apresentar menor resistência à deformação do que ligas mais simples.

Palavras-Chave: Resistência à deformação a quente; Austenita; Elementos de liga; Solução sólida.

INFLUENCE OF ALLOY ELEMENTS ON TEMPERATURE EFFECT OVER HOT STRENGTH OF STEELS

Abstract

The influence of alloy content in low and medium carbon steels over the temperature effect in austenite hot strength was studied using data got from hot torsion schedules applied under decreasing temperatures. The results have shown that a higher alloy content in steel will lead to a more steeper increase in hot strength under decreasing temperatures. In other words, the softening effect under increasing temperatures was more intense. This effect is confirmed by the fact that the melting temperature of steels is inversely proportional to its alloy content. It was also verified that the difference between the atomic radius of alloy elements and iron is directly associated to the effect of temperature over hot strength and the theoretical value of steel melting temperature. These findings indicate that it is perfectly possible that higher alloy steels eventually could show lower hot strength than lean steels, since both are heated up to a temperature high enough.

Key words: Hot strength; Austenite; Alloy elements; Solid solution.

¹ Trabalho a ser apresentado ao 61º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, Rio de Janeiro (RJ), 24 a 27 de Julho de 2006.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng, Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.Eng., Gerente do Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: herbert@cosipa.com.br

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Gerente de Tecnologia, Villares Metals SA, Sumaré SP. E-Mail: celso.barbosa@villaresmetals.com.br

⁵ Engenheiro Metalurgista, Black Belt/Six Sigma, Assessor Técnico, Villares Metals SA, Sumaré SP. E-Mail: giovani.cappuccio@villaresmetals.com.br

INTRODUÇÃO

A incessante busca que as usinas vem promovendo por maior lucratividade leva ao processamento de novos tipos de aços muito diferentes dos usuais, cujas características de conformabilidade a quente geralmente são desconhecidas. Por esse motivo é muito interessante caracterizar os diversos efeitos que os elementos de liga exercem sobre a resistência à deformação a quente dos aços, de forma a se caracterizar, ainda que de forma semi-quantitativa, o comportamento desses novos produtos sob as típicas condições industriais de conformação a quente.⁽¹⁻³⁾

O efeito da temperatura sobre a resistência à deformação a quente de uma liga metálica é, de longe, o mais significativo dentre todas as variáveis de processo. Isso decorre do enorme efeito que esse parâmetro tem sobre a cinética dos processos de difusão e, por conseguinte, sobre a restauração do material, a qual afeta diretamente sua dureza. Foi verificado que há uma relação inversamente exponencial entre resistência à deformação e temperatura, a qual indica que esta propriedade é controlada pelo movimento termicamente ativado de *double kinks*, ou seja, as “dobras duplas” geradas nas discordâncias pelas interações que elas sofrem entre si durante a deformação do metal.⁽⁴⁾ Este fato foi comprovado do ponto de vista tecnológico pelos modelos de Hajduk, Misaka e Shida, entre outros,⁽⁵⁾ ainda que a teoria envolvida na interseção da floresta de discordâncias indique que a descrição dessa correlação exige modelos matemáticos mais complexos do que os propostos por esses autores.⁽⁴⁾

A resistência à deformação de um metal também é função de seu reticulado cristalino e da energia de falha de empilhamento a ele associada. Metais com estrutura CFC e baixa energia de falha de empilhamento geralmente apresentam altos coeficientes de encruamento. Neste caso a largura associada às discordâncias associadas será maior, impedindo de forma mais eficaz o deslocamento cruzado e a ascensão de discordâncias. Dessa forma a tensão necessária para que uma discordância cruze uma floresta de discordâncias aumenta. Já metais CCC tendem a apresentar menores coeficientes de encruamento, em função não só da maior energia de falha de empilhamento, que gera efeitos inversos aos que acabaram de ser citados, como também devido ao maior número de planos de escorregamento disponíveis.⁽⁴⁾

Logo, a energia de falha de empilhamento é o fator que controla os processos termicamente ativados de escorregamento cruzado – e, dessa forma, a resistência à deformação. A presença de elementos de liga pode alterar o valor dessa energia, o que explica seu efeito sobre a resistência à deformação. De fato, o efeito da temperatura sobre a resistência à deformação é maior para soluções sólidas substitucionais do que para metais puros. Isso está associado à formação de nuvens de átomos de impurezas ao redor de discordâncias estendidas – ou seja, as chamadas atmosferas de Suzuki. O efeito de endurecimento em ligas CFC surge devido a variações na concentração de átomos de soluto em falhas de empilhamento. Também as ligas onde as impurezas endurecem mais os contornos de grão do que os grãos propriamente ditos apresentam relação mais forte entre resistência à deformação e temperatura, uma vez que neste caso ocorre aumento da interação entre os grãos e impedimento do escorregamento de seus contornos.⁽⁴⁾ Também foi constatado que o efeito dos elementos de liga sobre a auto-difusão do ferro influencia a resistência à deformação a quente e que o efeito endurecedor por solução sólida depende do grau de diferença entre o raio atômico do elemento de liga e o do ferro.⁽⁶⁾

Por outro lado, sabe-se também que o aumento no teor de elementos de liga no aço reduz consideravelmente seu ponto de fusão, como demonstram diversas fórmulas empíricas para o cálculo dessa propriedade.⁽⁷⁾ Ou seja, à medida que a temperatura do material se aproxima do ponto de fusão, a presença de teores mais elevados de elementos de liga reduz proporcionalmente as forças de atração entre os átomos de ferro.

Dessa forma, ao se comparar os valores de resistência à deformação a quente correspondentes ao ferro puro e a um aço, ambos no estado austenítico, verifica-se que, à medida que se abaixa a temperatura, a resistência deste último material aumentará mais acentuadamente em relação ao ferro puro em função dos efeitos de solução sólida. Dito de outra forma, ao se elevar a temperatura, será a austenita do ferro puro que terá menor declínio em sua resistência à deformação a quente. Em determinados casos poderá até ocorrer que, acima de uma determinada temperatura, a austenita do ferro puro apresente maior resistência à deformação do que a correspondente ao aço, que contém elementos de liga.

O objetivo deste trabalho foi comprovar essas considerações teóricas acerca do efeito dos elementos de liga na influência da temperatura sobre a resistência à deformação a quente da austenita no caso específico das ligas processadas nos laminadores da COSIPA, a partir de dados conseguidos através de ensaios de torção a quente.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dados de resistência à deformação a quente necessários para este trabalho foram obtidos através de ensaios de torção onde foi simulado o processo de laminação de chapas grossas:⁽⁸⁾ austenitização do corpo de prova a 1150°C, encharque de dez minutos sob essa temperatura, resfriamento sob taxa de 1°C/s e aplicação de 20 passes de deformação a partir de 1050°C, cada um deles com grau de deformação real de 0,20 e taxa de deformação igual a 1,0 s⁻¹. A diferença objetivada de temperatura entre um passe e outro foi de 20°C, o que correspondeu a um intervalo de tempo de 20 s.

As composições químicas dos materiais estudados neste trabalho podem ser vistas na Tabela 1. Entre eles encontram-se aços ao carbono e microligados ao Nb, NbCrCu, NbTi e NbTiV normalmente processados no laminador de chapas grossas da COSIPA (8), além de um aço-ferramenta experimental para chapas de blindagem (VCB4W) desenvolvido pela Villares Metals. Também foram incluídos resultados de ensaios similares disponíveis na literatura para esses mesmos tipos de aço⁽⁹⁻¹¹⁾ e outros, tais como IF,⁽¹²⁾ microligados ao TiV⁽¹⁰⁾ e de médio carbono microligado ao V.⁽¹³⁾

As curvas deslocamento angular versus torque para cada passe, obtidas no ensaio de torção, foram convertidas em pares de valores deformação real versus tensão. A integração desta última variável ao longo da deformação levou ao cálculo da resistência à deformação média para cada passe. A partir dos resultados assim obtidos foram traçadas curvas da resistência à deformação média em função do inverso da temperatura absoluta para cada aço estudado. Os conjuntos de dados correspondentes à região onde ocorreu recristalização estática plena entre passes (ou seja, acima da temperatura de não-recristalização – T_{nr}) foram analisados através de correlação linear, sendo obtidas equações do tipo

$$\bar{\sigma} = a + b \frac{10000}{T_K} \quad (1)$$

para cada liga aqui estudada. Foram realizadas análises estatísticas para se estabelecer correlações entre os valores das constantes **a** e **b** assim determinados e a composição química das ligas estudadas, bem como suas respectivas temperaturas de fusão. Estas foram calculadas pelo modelo de Guthmann.⁽⁷⁾

Tabela 1. Composição química das ligas estudadas neste trabalho.

Aço	C	Mn	Si	Al	Cr	Cu	Nb	Ti	V	Mo	Ni	W	Ref.
IF	0,003	0,13	-	0,003	-	-	-	0,065	-	-	-	-	(12)
C1	0,130	0,33	0,10	0,030	0,11	-	-	-	-	-	-	-	(9)
C2	0,140	0,74	0,20	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	(8)
C3	0,090	1,44	0,28	0,020	-	-	-	-	-	-	-	-	(10)
Nb1	0,180	1,34	0,30	0,025	-	-	0,033	-	-	-	-	-	(8)
Nb2	0,140	1,02	0,27	0,035	-	-	0,020	-	-	-	-	-	(8)
Nb3	0,150	0,77	-	0,039	-	-	0,014	-	-	-	-	-	(8)
NbTi1	0,140	1,11	0,30	0,044	-	-	0,020	0,015	-	-	-	-	(8)
NbTi2	0,140	1,34	0,23	0,035	-	-	0,033	0,014	-	-	-	-	(8)
NbTi3	0,100	1,12	0,30	0,040	-	-	0,013	0,020	-	-	-	-	(8)
NbTi4	0,100	1,16	0,33	0,027	-	-	0,035	0,023	-	-	-	-	(8)
NbTi5	0,040	1,67	0,31	0,038	-	-	0,070	0,026	-	0,20	-	-	(11)
TiV	0,048	1,30	0,22	0,032	-	-	-	0,020	0,100	-	-	-	(10)
NbTiV	0,120	1,50	0,31	0,038	-	-	0,047	0,020	0,051	-	-	-	(8)
NbCrCu1	0,160	1,03	0,41	0,029	0,54	0,23	0,025	-	-	-	-	-	(8)
NbCrCu2	0,130	0,99	0,38	0,042	0,50	0,22	0,014	-	-	-	-	-	(8)
V	0,390	1,30	0,62	0,025	-	-	-	-	0,11	-	-	-	(13)
VCB4W	0,440	0,35	0,35	0,029	1,35	-	-	-	-	0,25	3,86	1,98	-

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A Figura 1a) mostra as curvas de resistência à deformação média da austenita em função do inverso da temperatura absoluta para as principais famílias de aço aqui estudadas. O formato dessas curvas já foi bastante discutido na literatura (8-13). O aço IF mostrou brusca queda na resistência à deformação em torno de 901°C, indicando a rápida formação de ferrita, fase com reticulado CCC que apresenta menor resistência à deformação do que a austenita CFC que lhe deu origem. Já os dados relativos ao aço VCB4W enquadraram-se em uma única reta, indicando a ocorrência de recristalização estática plena entre passes consecutivos de deformação e ausência de transformação ferrítica. Os aços microligados apresentaram aumento na taxa de encruamento abaixo da temperatura de não-recristalização (T_{nr}), como indica a presença de duas retas ao longo das faixa de temperaturas onde a austenita é estável; a reta correspondente à região de menores temperaturas apresenta maior declividade que a outra, denotando o maior grau de encruamento observado sob tais condições.

As diferentes evoluções observadas nas curvas da Figura 1a) fazem com que a comparação entre a resistência à deformação a quente do aço com máximo teor de elementos de liga (VCB4W) e os demais não seja simples, conforme mostra a Figura 1b). Ainda assim é possível observar que, de maneira geral, a diferença de resistência à deformação entre o aço VCB4W e os demais é mínima para altas temperaturas, elevando-se à medida que esta é abaixada. Uma análise mais detalhada revela a existência de diversos mecanismos metalúrgicos que influenciam a magnitude da resistência à deformação a quente nos aços com menor teor de elementos de liga. A transformação ferrítica explicou os aumentos acentuados nas diferenças observadas entre o aço VCB4W e as ligas IF e C nos respectivos pontos Ar_3 destas duas últimas ligas, ou seja, 901°C e 791°C. A diferença na resistência à

deformação a quente entre os aços VCB4W e NbTiV estabilizou-se entre 900 e 750°C, uma vez que a supressão de recristalização entre passes neste último aço levou a um maior grau de encruamento. A transformação ferrítica no aço NbTiV fez com que a diferença de resistência à deformação entre ele e a liga VCB4W aumentasse nitidamente a partir de 750°C. Já o aço de médio C microligado ao V apresentou valores de resistência à deformação muito próximos do VCB4W, chegando a ultrapassá-lo entre 1050 e 990°C e, de forma mais significativa, abaixo de 800°C. Neste último caso a diferença foi maior em função da supressão da recristalização da austenita entre os passes de deformação no aço ao V.

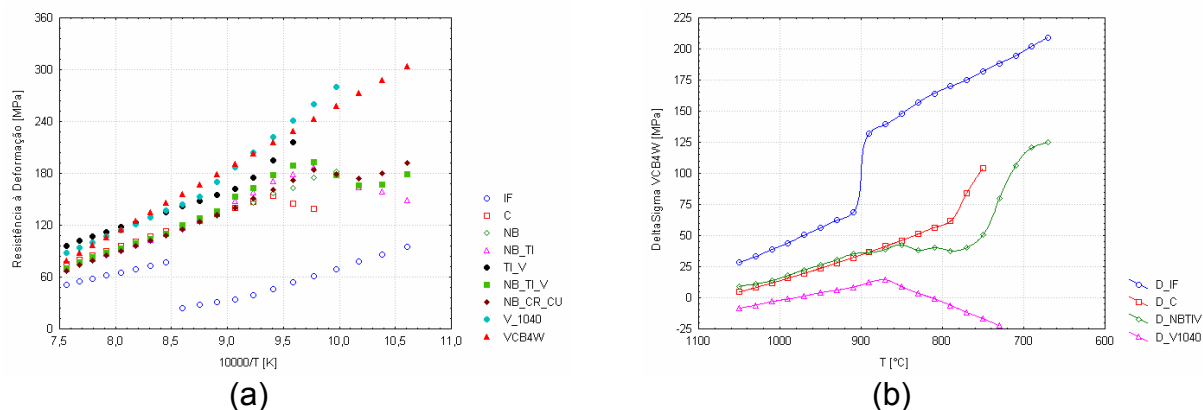


Figura 1. a) Curvas da resistência à deformação média versus o inverso da temperatura absoluta para as principais famílias de aço estudadas neste trabalho; b) Diferenças entre os valores de resistência à deformação média observadas entre diversas famílias de aço e o aço-ferramenta VCB4W.

O cálculo da matriz de Pearson correspondente ao conjunto formado pelos valores da constante **a** e declividade **b** da equação (1) e as composições químicas dos aços estudados revelou que os elementos de liga mais influentes na determinação dos valores de **a** e **b** foram C ($r = -0,83$ e $0,77$, respectivamente), Cr ($r = -0,76$ e $0,68$) e Si ($r = -0,61$ e $0,64$). Contudo, o parâmetro mais representativo foi o carbono equivalente, com $r = -0,97$ e $0,94$, respectivamente.

Embora diversos trabalhos da literatura e sistemas de automação de laminadores a quente tenham correlacionado com sucesso a resistência à deformação da austenita com seu teor de carbono equivalente,⁽¹⁴⁾ o fato é que este parâmetro foi originalmente determinado para se avaliar o grau de temperabilidade da austenita, e não sua resistência à deformação a quente. Decidiu-se então propor um parâmetro alternativo, com maior coerência metalúrgica, baseado na diferença entre o raio atômico de cada elemento de liga e o do ferro. Dessa forma definiu-se um parâmetro para descrição do endurecimento a quente por solução sólida, **SS_{eq}**, expresso em MPa:

$$SS_{eq} = 27,8 C + 7,1 Mn + 4,8 Si + 13,5 Al + 3,2 Cr + 1,6 Cu + 15,9 Nb + 15,1 Ti + 6,3 V + 10,3 Mo + 1,6 Ni + 11,9 W \quad (2)$$

onde o teor de cada elemento de liga é expresso pela sua percentagem em peso. O valor de cada constante da equação (2) é igual ao módulo da diferença percentual entre o raio atômico de Goldschmidt⁽¹⁵⁾ do elemento de liga em questão e o do ferro. A correlação entre os valores **a** e **b** e **SS_{eq}** foi muito boa, conforme indicam os valores de r iguais a $-0,97$ e $0,95$, respectivamente, e os gráficos da Figura 2.

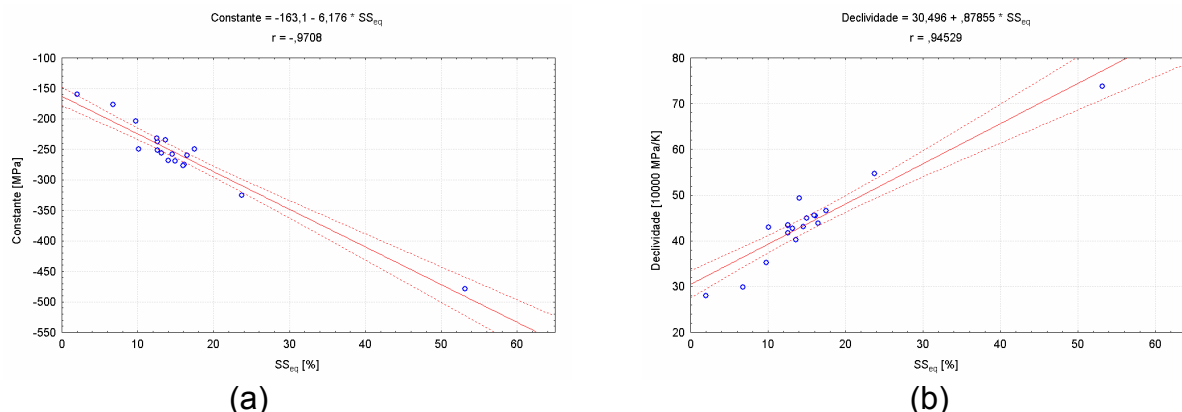


Figura 2. Correlação entre o grau de diferença entre os raios atômicos dos elementos de liga e o ferro e a) a constante **a** e b) a declividade **b** da equação (1).

Esse resultado possui uma importante implicação tecnológica: dentro da faixa de temperaturas onde ocorre recristalização plena da austenita entre passes, quanto maior for o teor de elementos de liga, mais acentuado será o crescimento da resistência à deformação à medida que se abaixa a temperatura, já que a relação entre a declividade **b** e o teor total de elementos de liga é positiva e crescente. Por outro lado, o maior teor de elementos de liga diminui a temperatura teórica onde se obterá resistência à deformação nula, já que a relação entre a constante da reta **a** e o teor total de elementos de liga é negativa e decrescente. Vale ressaltar que resistência à deformação nula é uma situação típica de uma liga sofrendo fusão.

Essa última conclusão é confirmada ao se analisar as correlações entre os valores das constantes **a**, **b** e T_{Liq} , a temperatura de fusão calculada para os aços estudados. Também neste caso foi verificado alto grau de ajuste, conforme indicam os elevados valores de r (0,93 e $-0,89$, respectivamente) e os gráficos da Figura 3. Baixos valores de **a** e altos valores de **b**, típicos de aços contendo teores relativamente altos de elementos de liga, correspondem a baixas temperaturas de fusão.

Este resultado possui uma interessante consequência tecnológica: aços com maiores teores de elementos de liga nem sempre produzem cargas mecânicas mais elevadas durante sua conformação mecânica a quente; sob temperaturas suficientemente elevadas é até possível que venham a apresentar menores valores de resistência à deformação do que ligas mais simples. Por exemplo, as relações aqui obtidas indicam que a resistência à deformação do aço VCB4W será inferior à do aço ao carbono C2 para temperaturas acima de 1076°C .

A Figura 4 mostra que tanto o carbono equivalente como a temperatura de fusão calculada por Guthmann apresentaram alto grau de ajuste com o parâmetro SS_{eq} aqui proposto para quantificar o endurecimento por solução sólida, com r igual a 0,98 e $-0,92$, respectivamente. Esse fato pode ser justificado do ponto de vista matemático, uma vez que esses três parâmetros são calculados a partir de fórmulas muito similares, ou seja, polinômios de primeiro grau em função dos teores de elementos de liga, os quais são multiplicados por fatores que apresentam o mesmo sinal.

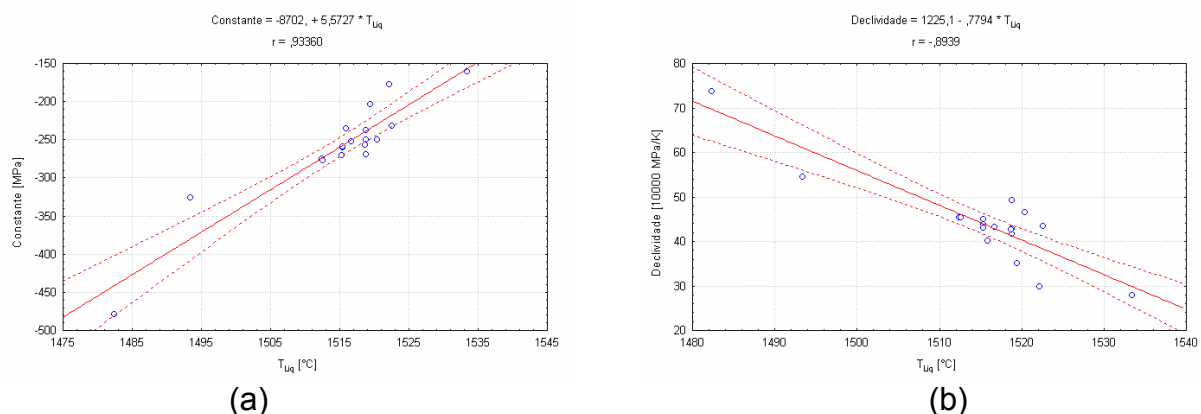


Figura 3. Correlação entre a temperatura calculada de fusão das ligas e a) a constante da reta **a** e b) a declividade **b**.

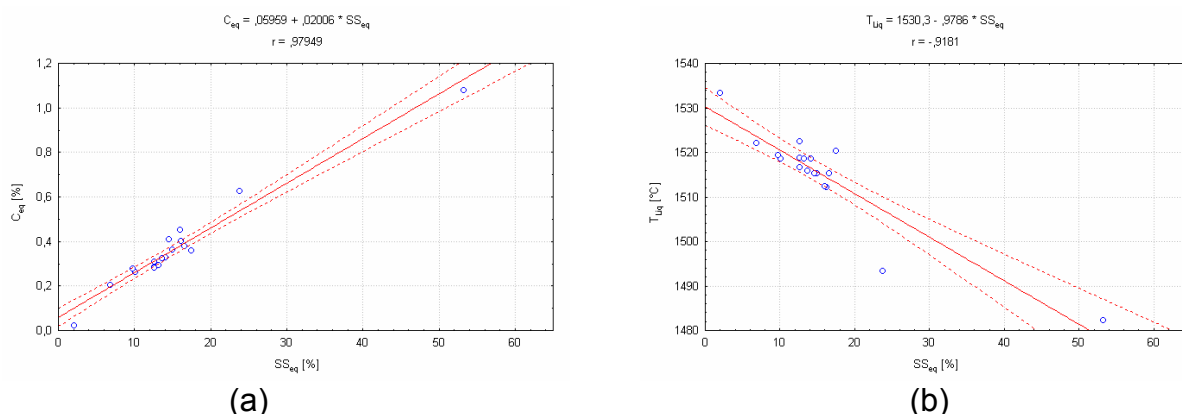


Figura 4. Correlações observadas entre o parâmetro **SS_{eq}** e a) carbono equivalente e b) temperatura de fusão calculada por Guthmann.

A mesma abordagem deste trabalho foi aplicada aos dados de resistência à deformação a quente obtidos em ensaios de torção em um único passe feitos em aços de médio e alto teor de liga (16,17). Considerou-se neste caso específico o máximo valor de tensão obtido no ensaio e não seu valor médio. Ainda assim, os graus de ajuste obtidos na correlação entre as constantes **a** e **b** da equação (1) e o parâmetro **SS_{eq}** foram similares aos aqui obtidos: $r = -0,88$ e $0,92$.

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostraram que maiores teores de elementos de liga nos aços fazem com ocorra aumento na taxa de elevação da resistência à deformação da austenita à medida que se abaixa a temperatura; por outro lado, verificou-se diminuição na temperatura teórica onde sua resistência à deformação deverá ser nula. Este fato é consistente com a redução na temperatura liquidus que é observada com o aumento nos teores de elementos de liga. Todos esses efeitos estão associados ao grau de diferença existente entre o raio atômico dos elementos de liga e o do ferro. Do ponto de vista prático foi constatado que, sob temperaturas suficientemente elevadas, a presença de maiores teores de elementos de liga nem sempre contribui para aumentar a resistência à deformação da austenita. Obviamente o aproveitamento dessa condição pode ser restringido por outros fatores, como o típico risco de queima dos aços rápidos aquecidos sob temperaturas extremas e eventuais problemas associados à falta de ductilidade.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao Prof. Dr. Oscar Balancin e sua equipe, do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, pela execução dos ensaios de torção a quente.

REFERÊNCIAS

- 1 GORNI, A.A. Modeling the Effect of Alloy Elements in the Hot Strength of Steel. In: Engineering Applications of Neural Networks – EANN '97. **Proceedings**. Royal Institute of Technology, Stockholm, June 1997, 143-150.
- 2 GORNI, A.A. e outros. Modelamento Matemático do Efeito dos Elementos de Liga dos Aços sobre sua Resistência à Deformação a Quente. In: 56º Congresso Anual da ABM. **Anais**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Julho 2001, 1092-1101.
- 3 GORNI, A.A. e outros. Efeito da Composição Química na Resistência à Deformação a Quente de Aços de Baixo Carbono. In: 59º Congresso Anual da ABM. **Anais**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Julho 2004, 145-154.
- 4 POLUKHIN, P. e outros. **Physical Principles of Plastic Deformation**, Mir Publishers, Moscow, 1983, 480 p.
- 5 GORNI, A.A. Cálculos de Laminação. In: Laminação de Produtos Planos. **Curso**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Agosto de 2005, 86 p.
- 6 TEGART, W.J.M.G. & GITTINS, A. The Hot Deformation of Austenite. In: The Hot Deformation of Austenite. **Proceedings**. AIME, Warrendale, 1977, p. 1-45.
- 7 GUTHMANN, K. Günstige Gießtemperatur im Vergleich zum Erstarrungspunkt von Eisen- und Stahlschmelzen. **Stahl und Eisen**, 71:8, 12 April 1951, 399-402.
- 8 GORNI, A.A. & CAVALCANTI, C.G. Modelling the Controlled Rolling Critical Temperatures Using Empirical Equations and Neural Networks. In 7th International Conference on Steel Rolling - Steel Rolling '98. **Proceedings**. International Iron and Steel Institute of Japan, Chiba, Japão, November 1998, 629-633.
- 9 GEITTENS, A.R. **Análise do Comportamento Mecânico de um Aço Processado na Região Intercrítica**. Dissertação de Mestrado, DEMa/UFSCar, 2001, 81 p.

- 10 BAI, D.Q. **Effect of Rolling Parameters on the No-Recrystallization Temperature (T_{nr}) in Nb-bearing Steels**. M. Eng. Thesis, McGill University, Jan. 1993, 139 p.
- 11 BAI, D.Q. e outros. Effect of Deformation Parameters on the No-Recrystallization Temperature in Nb-bearing Steels. **Metallurgical Transactions A**, 24A:10, Oct. 1993, 2151-2159.
- 12 REGONE, W. **Simulação da Laminação a Quente de um Aço Livre de Intersticiais (IF) Através de Ensaio de Torção**. Tese de Doutorado, DEMa/UFSCar, Junho 2001, 174 p.
- 13 LOURENÇO, N.J. **Estudo da Deformação de um Aço Microligado na Região de Transição de Fase**. Tese de Doutorado, DEMa/UFSCar, Julho 2000, 131 p.
- 14 LENARD, J.G. et al. **Mathematical and Physical Simulations of the Properties of Hot Rolled Products**. Elsevier, Amsterdam, 1999, 364 p.
- 15 DARKEN, L.S. & GURRY, R.W. **Physical Chemistry of Metals**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1953, 535 p.
- 16 GOLJA, M. Investigation of Steel Flow Stress and Plasticity at High Temperatures. **Kovine, Zlitine, Tehnologije**, 31:1-2, 1999, 5-8.
- 17 GOLJA, M. e outros. Flow Stress and Plasticity of Alloyed Steels. **Metalurgija**. 43:1, 2004, 55-58.