

# COMPARAÇÃO ENTRE AS DIVERSAS ABORDAGENS DE MODELAMENTO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO A QUENTE DE AÇOS CARBONO E MICROLIGADOS<sup>(1)</sup>

Antonio Augusto Gorni <sup>(2)</sup>  
Celso Gomes Cavalcanti <sup>(3)</sup>

## - RESUMO

Neste trabalho foram levantados os dados de resistência à deformação a quente de diversos aços carbono e microligados processados no laminador de chapas grossas da COSIPA, utilizando-se ensaios isotérmicos de torção a quente. As curvas assim obtidas foram suavizadas e corrigidas para se neutralizar o efeito do aquecimento adiabático do corpo de prova. Tais dados foram modelados de acordo com várias equações empíricas em função da temperatura, grau e velocidade de deformação: Tarokh, Samanta, Hajduk, Tegart, Rossard e Jäckel, como também através da técnica de redes neurais. Foram ainda testados modelos em função apenas do grau de deformação, como Kadioglu e Bergström. Todos os modelos em função da temperatura, grau e velocidade de deformação apresentaram bom grau de concordância com os dados reais, exceto o de Rossard. O modelamento por redes neurais apresentou resultados inferiores à maioria das equações empíricas, ao contrário do havia sido observado em trabalhos anteriores. A explicação para esse fato está na suavização a que os dados brutos foram submetidos neste trabalho, eliminando flutuações aleatórias nas curvas tensão *versus* deformação. A precisão dos modelos relativos aos aços microligados foi ligeiramente inferior aos dos aços ao carbono. Além disso, equações mais complexas e redes neurais tenderam a modelar melhor os dados dos aços microligados. Já os modelos expressos apenas em função da deformação, Kadioglu e Bergström, não puderam ser generalizados de maneira matematicamente confiável ao longo da faixa de temperatura e velocidade de deformação estudada devido à insuficiência de dados experimentais.

Palavras-Chave: Ensaio de Torção a Quente, Resistência à Deformação a Quente de Aços, Modelo Matemático

---

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 51º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre RS, 6 a 9 de Agosto de 1996.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia, Gerência de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: agorni@iron.com.br

<sup>3</sup> Técnico em Siderurgia, Gerência de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP

## - INTRODUÇÃO

A resistência à deformação a quente pode ser definida como sendo a tensão que inicia e mantém o escoamento de um material no estado uniaxial de tensões [1]. Ela é uma das propriedades fundamentais de um material sob alta temperatura e, no caso de metais a serem laminados, seu conhecimento é imprescindível para o projeto dos componentes mecânicos e elétricos das cadeiras, bem como no desenvolvimento dos modelos matemáticos e algoritmos de automação [2].

A primeira abordagem de modelamento seria a criação de um banco de dados multidimensional utilizando recursos digitais. No caso aqui abordado, seria basicamente uma matriz quadridimensional com dados de temperatura, grau e velocidade de deformação, mais os correspondentes valores de resistência à deformação a quente. Desse modo, pode-se calcular esse parâmetro através de métodos numéricos de interpolação, quando os dados fornecidos para o cálculo não coincidirem com os armazenados originalmente na matriz. Os inconvenientes desta abordagem são a enorme quantidade de memória requerida para o armazenamento desses dados e o tempo requerido para os cálculos, o que a torna incompatível para aplicações "on-line", ao menos até o momento. É muito provável que, com o vertiginoso desenvolvimento nos equipamentos digitais, essa abordagem seja viabilizada num futuro bem próximo [3-5].

Pode-se ainda modelar a resistência à deformação a quente através do ajuste de equações empíricas aos dados experimentais disponíveis. O ideal é que as fórmulas desenvolvidas contenham termos em função da temperatura, grau e velocidade de deformação, e que sejam plenamente válidas dentro das faixas desses parâmetros correspondentes ao processo industrial de conformação que está sendo considerado. No caso específico da laminação a quente, a maioria das equações empíricas só é válida dentro da etapa de encruamento inicial. Ou seja, elas não consideram o amaciamento que ocorre no material sob altos graus de deformação, o que as torna inadequadas ao uso nessas condições [6].

Normalmente se considera que uma dada equação empírica é adequada para o cálculo da resistência à deformação a quente quando apresenta coeficiente de correlação  $r$  superior a 0,95, ou seja, que a diferença entre os valores calculados e medidos

não seja superior a 8%, o que permite assumir que os demais fatores que atuam sobre a resistência à deformação a quente estejam sob controle [1,7].

Entre as inúmeras equações empíricas desenvolvidas para o modelamento da resistência à deformação a quente  $\sigma$  se destacam as seguintes, onde  $T$  representa a temperatura,  $\varepsilon$  o grau de deformação verdadeiro e  $\dot{\varepsilon}$  a velocidade de deformação; letras minúsculas designam as constantes de ajuste aos dados experimentais. Note-se a variedade de funções utilizadas para se transformar as variáveis independentes em busca de um maior poder de previsão da fórmula.

. Tarokh [8]:

$$\sigma = a + \frac{b}{T^2} + c \sqrt{r} + d \frac{r}{T} + e \sqrt{r} \dot{\varepsilon}$$

onde:

$$r = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1}$$

Esta equação foi originalmente desenvolvida para ajustar valores de resistência à deformação a quente provenientes de ensaios de laminação a quente. Logo,  $h_1$  é a espessura inicial do laminado e  $h_2$  a final. A dedução dessa fórmula levou em conta que o efeito da temperatura é mais pronunciado do que o do grau de deformação e que a influência da velocidade de deformação é mínima. A presença de parcelas contendo mais de uma variável independente, gerando interações entre elas, é um recurso clássico em equações de regressão, que aumenta a precisão do valor calculado, mas compromete seu sentido físico.

. Samanta [9]:

$$\sigma = a + b \ln \varepsilon + c T + d T \ln \varepsilon + e T \ln \dot{\varepsilon} + f T \ln \varepsilon \ln \dot{\varepsilon}$$

Este polinômio foi originalmente utilizado para o cálculo da resistência à deformação a quente de aços ao C, microligados, ao Ni e ao Si.

. Hajduk [1,6,7]

$$\sigma = \sigma_0 e^{-aT} \varepsilon^b \dot{\varepsilon}^c$$

Nesta equação,  $\sigma_0$  é afetado de maneira mais nítida por flutuações na composição química do aço, seu processo específico de elaboração/processamento e condições peculiares do ensaio utilizado na determinação da resistência à deformação a quente [1,6]. Esta é uma equação relativamente simples; as constantes **a**, **b** e **c** estão direta e unicamente ligadas à temperatura, grau e velocidade de deformação, respectivamente. Não há interações entre as variáveis independentes. Isto permite determinar, com maior precisão, o efeito desses parâmetros sobre sua resistência à deformação a quente. Nas demais equações, mais complexas, boa parte das constantes empíricas são determinadas em função do efeito combinado de mais de um desses fatores, prejudicando a análise do efeito de cada parâmetro do processo de conformação mecânica. Contudo, a estrutura multiplicativa desta fórmula limita sua faixa de validade, sendo particularmente inevitáveis imprecisões quando se utilizam valores de grau de deformação extremos, ou seja, muito pequenos ou muito grandes [1,10].

. Tegart [11]

$$\sigma = a + r^{0,2} \left[ b + c \ln \dot{\varepsilon} + \frac{1000 d}{T} \right]$$

. Rossard [12]

$$\sigma = a \dot{\varepsilon}^{\frac{bT}{1000}} \varepsilon^c \exp\left(\frac{d}{T}\right)$$

. Jäckel [10]

$$\sigma = A (\varepsilon - e)^B = \left( a + \frac{b}{T} + c \ln \dot{\varepsilon} + \frac{d}{T} \ln \dot{\varepsilon} \right) (\varepsilon - p)^{\left(f + \frac{g}{T}\right)}$$

Esta equação foi especialmente desenvolvida para o cálculo da resistência à deformação a quente na região de baixos valores de deformação, onde as demais fórmulas tendem a apresentar erros apreciáveis. Seu núcleo básico é relativamente simples, baseando-se na equação de Hollomon: o termo **A** é um fator de encruamento, definido através de um polinômio em função da temperatura e velocidade de deformação, enquanto que o expoente de encruamento **B** é definido apenas em função da temperatura. Este modelo assume que a curva da resistência à deformação a quente cruza o eixo das ordenadas num valor diferente de zero, ou seja, a resistência à deformação é positiva e diferente de zero quando a deformação é nula. Na verdade, de acordo com esse modelo, se a curva ajustada for extrapolada para valores de deformação negativos, ela somente deverá apresentar valor de resistência à deformação igual a zero para uma deformação negativa igual a **-p**, que passa a ser considerado o ponto em que a curva tensão x deformação sofre transição do regime elástico para plástico. Com base nesses dados, a curva determinada pelo modelo de Jäckel é definida da seguinte maneira: para valores de deformação menores ou iguais a **p** a curva é, na verdade, uma reta, definida conforme a lei de Hook, que se estende desde o ponto (0,0) até (**p**,  $\sigma[\epsilon = p]$ ). Para valores de deformação acima de **p** os valores de resistência à deformação a quente passam a ser calculados pela fórmula (7).

Uma variante para o modelamento da resistência à deformação a quente através de equações empíricas está no uso de fórmulas expressas em função apenas da deformação. Neste caso, deverá ser ajustada isoladamente uma fórmula para cada condição de ensaio efetuado, em termos da temperatura e velocidade de deformação. Quando se fizer necessário o cálculo da resistência a deformação a quente para uma condição de deformação diferente das levantadas, pode-se calcular os valores das constantes da equação a serem empregados a partir de uma interpolação bidimensional, em termos de temperatura e velocidade de deformação, efetuada a partir da tabela de constantes disponível. A seguir estão listadas algumas equações deste tipo que já foram testadas para o modelamento da resistência à deformação a quente:

. Kadioglu [13]

$$\sigma = a (b + \varepsilon)^n - c \varepsilon^n$$

Este tipo de equação objetiva incluir três fenômenos na definição da resistência à deformação a quente: a história anterior do metal, definido pelo termo constante; a contribuição do encruamento (positiva) e do amaciamento por deformação (negativa), através de funções de potência.

. Bergström [14]

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 e^{-\Omega\varepsilon} + \frac{U_k}{\Omega} (1 - e^{-\Omega\varepsilon})}$$

Nesta equação  $\sigma_0$  corresponde ao valor da tensão ao se iniciar a deformação do material. Ele deve aumentar com o abaixamento da temperatura ou elevação da velocidade de deformação. Já  $U_k$  é uma constante empírica, que representa o produto de módulo de cisalhamento e do vetor de Burgers do material estudado. O valor de  $U_k$  tende a aumentar com o abaixamento da temperatura, refletindo o comportamento análogo que o módulo de cisalhamento do material apresenta a esse respeito. Por outro lado,  $U_k$  não é grandemente afetado pela velocidade de deformação. O parâmetro  $\Omega$  indica o grau de aniquilação ou rearranjo de discordâncias que ocorre em função da recuperação dinâmica. De maneira geral, seu valor cai com a diminuição da temperatura e aumento da velocidade de deformação. A dependência desse parâmetro com a temperatura pode ser explicada pelo fato dos mecanismos de recuperação dinâmica serem ativados termicamente. O inverso de  $\Omega$  determina a razão, em termos do grau de deformação, com que a resistência à deformação a quente atinge o estado estacionário. Dito de outra forma, esse parâmetro designa a probabilidade das discordâncias se tornarem novamente móveis.

Um ponto importante a ser notado são os valores discrepantes que as diversas equações constitutivas disponíveis produzem para um mesmo tipo de aço e condições idênticas de deformação. Em casos extremos foram verificadas diferenças de até 1500% [4]. As causas apontadas para essas flutuações são: variações na composição química e/ou microestrutura dos aços utilizados, erros experimentais, falhas na estimativa

para correção do aquecimento adiabático do corpo de prova, entre outras. De maneira geral, equações específicas para um certo tipo de aço são mais precisas que equações mais gerais, que tentam englobar também a influência da composição química [1,4,6,7].

Nos últimos anos tem sido notável o progresso verificado numa ferramenta revolucionária de modelamento matemático: **redes neurais**. Esta nova abordagem não requer que se defina uma relação matemática formal entre as variáveis envolvidas. O relacionamento entre elas é estabelecido a partir de ciclos de aprendizagem, de maneira análoga ao que ocorre no cérebro humano, através de apresentações sucessivas dos dados e resultados à rede neural. Tal característica, desde que bem aproveitada, leva ao desenvolvimento de modelos interpolativos muito precisos. Já foram publicados trabalhos pioneiros utilizando esta técnica no modelamento da resistência à deformação a quente de aços de baixa liga e alta resistência, cujos resultados foram mais precisos do que os observados para as equações empíricas [15].

## **- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Os ensaios de torção a quente foram executados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Foram estudados nove ligas de aço de baixo carbono, sendo três ao carbono e seis microligados, os quais respondem pela maior parte do *mix* produtivo do Laminador de Chapas Grossas da COSIPA. Suas composições químicas podem ser vistas na tabela I.

A seção útil dos corpos de prova cilíndricos para torção a quente apresentava 20 mm de comprimento por 6,25 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram aquecidos em forno tubular equipado com lâmpadas de infravermelho. O controle de temperatura foi efetuado com termopar de cromel-alumel em contato com o centro da parte útil do corpo de prova.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de ensaios isotérmicos. A amostra fria era introduzida no forno a temperatura ambiente e protegida contra descarbonetação através de fluxo de uma mistura de argônio mais hidrogênio. A seguir, o forno iniciava aquecimento até 1100°C a uma taxa de aproximadamente 1,7°C/s e,

após atingir essa temperatura, ocorria um período de encharque de dez minutos para garantir sua homogeneização térmica. Depois dessa etapa, os corpos de prova eram resfriados sob uma taxa de  $0,5^{\circ}\text{C/s}$  até que fosse atingida a temperatura de ensaio. Neste momento, a máquina era acionada e submetia o corpo de prova a um grau de deformação total equivalente a 2,0. A limitação no grau máximo de deformação aplicado foi uma precaução para se evitar danos ao tubo de quartzo que envolvia as garras e o corpo de prova por ocasião de sua fratura.

AÇO	C	Mn	Si	Al	Cr	Cu	Nb	V	Ti	N
C1	0,09	0,53	0,18	0,029	-	-	-	-	-	0,0047
C2	0,15	0,90	0,21	0,039	-	-	-	-	-	0,0053
CMn	0,16	1,48	0,36	0,039	-	-	-	-	-	0,0048
Nb	0,18	1,34	0,30	0,025	-	-	0,033	-	-	0,0074
NbTi1	0,14	1,11	0,30	0,044	-	-	0,020	-	0,015	0,0054
NbTi2	0,14	1,34	0,23	0,035	-	-	0,033	-	0,014	0,0048
NbTiV	0,12	1,50	0,31	0,038	-	-	0,047	0,051	0,020	0,0064
NbCrCu1	0,16	1,03	0,41	0,029	0,54	0,23	0,025	-	-	0,0107
NbCrCu2	0,13	0,99	0,38	0,042	0,50	0,22	0,014	-	-	0,0095

Tabela I: Composição química dos aços estudados.

Foram efetuados ensaios a 1100, 1000, 900 e  $800^{\circ}\text{C}$  - ou seja, dentro do campo austenítico - sob velocidades de deformação de 0,5, 1 e  $5\text{ s}^{-1}$ . A aquisição dos dados gerados pelo ensaio foi digital. As curvas deslocamento angular versus torque, obtidas através dos ensaios, foram convertidas em tabelas de deformação real versus resistência à deformação a quente pelo próprio computador que controla a máquina de torção.

Os dados provenientes dos ensaios de torção a quente foram inicialmente suavizados através de um método numérico baseado na transformada rápida de Fourier, que simulou um filtro passa-baixo para a eliminação de altas frequências [16,17]. Esse método consiste basicamente em determinar, a partir do conjunto de dados fornecidos,



seu espectro ponderado de frequências. Partindo-se do princípio que a porção do espectro relativa às altas frequências consiste apenas de ruído espúrio e que a informação útil se concentra na faixa de baixas frequências, aplicou-se a seguir uma função filtro digital a esse espectro, eliminando-se progressivamente as altas frequências presentes. O espectro assim modificado foi então submetido à Transformada Inversa de Fourier, obtendo-se desse modo o conjunto de dados suavizados. A principal vantagem deste método é a identificação e eliminação automática de ruído de alta frequência.

Os dados assim suavizados sofreram correção do aquecimento adiabático decorrente da deformação, conforme a metodologia descrita em [14]. Assumiu-se que todo o trabalho mecânico foi transformado em calor e que a deformação ocorreu sob condições adiabáticas, ou seja, sem troca de calor. A correção da resistência da deformação a quente em função do aumento de temperatura foi feito ponto a ponto, calculando-se em cada um deles o real efeito da temperatura sobre esse parâmetro.

A partir dos dados de resistência à deformação a quente assim obtidos, e dos correspondentes valores de temperatura, velocidade e grau de deformação, foram ajustadas as diversas equações constitutivas propostas na literatura, através de regressão múltipla linear e não-linear [18]. Foram considerados apenas os valores de resistência à deformação a quente correspondentes à região crescente da curva tensão versus deformação, ou seja, desde o início do ensaio até o ponto onde ocorria valor máximo de resistência à deformação a quente (**deformação de pico**). Os modelos escolhidos foram os já citados na Introdução.

Adotou-se neste trabalho uma arquitetura de rede neural com uma camada de entrada, duas ocultas e uma de saída, conforme mostra a figura 1. O número total de neurônios foi calculado de acordo com o teorema de *Hecht-Kolmogorov*, ou seja, o dobro do número de variáveis de entrada mais um. A principal diferença da rede neural utilizada neste trabalho em relação à empregada em [15] foi a distribuição desses sete neurônios em duas camadas, que aumentou a precisão dos valores calculados pela rede neural, em função da maior complexidade das interações entre os neurônios.

A avaliação do grau de ajuste dos modelos propostos aos dados experimentais foi feito através da determinação do coeficiente de correlação  $r$  de Pearson e do

erro padrão da estimativa, além do traçado de gráficos que permitiram a comparação gráfica entre os dados reais e as curvas calculadas pelos diversos modelos.

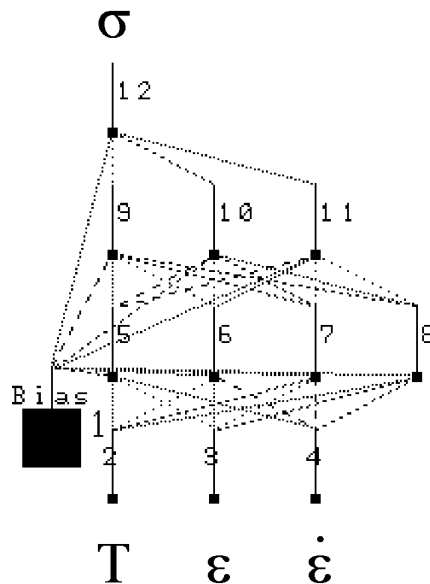


Figura 1: Arquitetura da rede neural utilizada neste trabalho para modelar a resistência à deformação a quente a partir da temperatura, grau e velocidade de deformação.

## - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os modelos aqui empregados apresentaram boa precisão, com valores do coeficiente  $r$  de Pearson na faixa de 0,92 a 0,99, e erro padrão da estimativa (E-PE) entre 0,39 e 1,33 kgf/mm<sup>2</sup>, conforme mostra a tabela II. Pode-se observar, contudo, que os modelos que expressam a resistência à deformação a quente apenas em termos da deformação - Kadioglu e Bergström - não foram citados. Na verdade, eles não apresentaram um conjunto consistente de equações que pudesse ser aplicado seguramente ao longo das faixas de temperatura e velocidade de deformação estudadas.

A tabela III mostra os valores do parâmetro  $\sigma_0^2$ , pertencente à equação de Bergström, ajustados para o aço C1, bem como os respectivos valores do coeficiente  $r$  de Pearson e do erro padrão da estimativa. Note-se que as equações apresentaram isoladamente precisão estatística superior a qualquer outro modelo utilizado. Isso é matematicamente previsível, uma vez que cada equação corresponde a apenas uma curva deforma-

ção *versus* resistência à deformação quente, enquanto que os demais modelos (exceto, naturalmente, Kadioglu) englobam as curvas correspondentes a **todos** os ensaios efetuados.

	TAROKH		SAMANTA		HAJDUK		TEGART		ROSSARD		JÄCKEL		R.N.A.	
	r	EPE	r	EPE	r	EPE	r	EPE	r	EPE	r	EPE	r	EPE
C1	0,93	1,02	0,96	0,79	0,96	0,80	0,96	0,76	0,92	1,08	0,96	0,75	0,95	0,87
C2	0,99	0,61	0,98	0,77	0,99	0,52	0,99	0,58	0,97	0,82	0,99	0,53	0,97	0,80
CMn	0,98	0,58	0,98	0,68	0,98	0,58	0,98	0,54	0,96	0,88	0,98	0,54	0,98	0,62
Nb	0,98	0,72	0,98	0,74	0,98	0,71	0,99	0,61	0,94	1,18	0,98	0,70	0,97	0,92
NbTi1	0,97	0,75	0,96	0,80	0,97	0,79	0,97	0,74	0,94	1,04	0,98	0,66	0,98	0,64
NbTi2	0,98	0,72	0,98	0,73	0,98	0,80	0,99	0,60	0,94	1,33	0,98	0,69	0,98	0,74
NbTiV	0,97	0,80	0,98	0,59	0,97	0,77	0,98	0,64	0,92	1,20	0,97	0,70	0,99	0,41
NbCrCu1	0,97	0,89	0,97	0,86	0,96	0,91	0,97	0,78	0,93	1,25	0,98	0,68	0,97	0,86
NbCrCu2	0,98	0,62	0,99	0,44	0,99	0,61	0,99	0,39	0,95	1,12	0,99	0,51	0,97	0,86

Tabela II: Avaliação do grau de ajuste dos modelos utilizados para modelamento da resistência à deformação a quente em função da temperatura, grau e velocidade de deformação, em função do coeficiente **r** de Pearson e do Erro Padrão da Estimativa. Estes últimos estão expressos em termos de  $\text{kgf/mm}^2$ . As células hachuradas indicam o modelo que melhor se ajustou para cada aço.

Como pode ser visto na revisão bibliográfica, o valor de  $\sigma_0^2$  deveria aumentar com o aumento da velocidade de deformação. Não é o que ocorre, por exemplo, para as curvas levantadas a  $1000^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$ . Apesar do bom grau de ajuste estatístico conseguido pelo modelo, essa evolução não é fisicamente coerente. Na realidade, essa inconsistência física deve ter sido corrigida por variações correspondentes nos outros parâmetros -  $\Omega$  e  $U_k$  - garantindo a precisão matemática da equação ajustada. Ocorreu ainda outro fato agravante: conforme o “chute” inicial empregado no programa de regressão não-linear, obteve-se, para cada curva, diferentes conjuntos de valores para as constantes ajustadas, gerando equações com precisão estatística similar. Ou seja, a solução desse

sistema é mal-condicionada; fica difícil se chegar a uma solução única para o ajuste da equação em cada condição de ensaio.

T [°C] →	1100			1000			900			800		
	$\sigma_0^2$	r	EPE	$\sigma_0^2$	r	EPE	$\sigma_0^2$	r	EPE	$\sigma_0^2$	r	EPE
0,5	4,34	0,99	0,02	4,41	0,99	0,05	5,53	0,99	0,04	34,2	0,99	0,04
		9	4		7	7		9	3	8	9	3
1	8,71	0,99	0,02	16,3	0,99	0,03	51,7	0,99	0,03	55,8	0,99	0,03
		8	7	9	9	2	1	9	6	5	7	6
5	13,6	0,99	0,05	15,7	0,99	0,11	39,4	0,99	0,01	73,2	0,99	0,02
	8	8	3	3	2	5	7	3	5	9	1	6

Tabela III: Valores da constante  $\sigma_0^2$  da equação de Bergström ajustados para o aço C1, incluindo os respectivos valores do coeficiente **r** de Pearson e do Erro Padrão de Estimativa, em kgf/mm<sup>2</sup>. As células sombreadas mostram onde ocorreu a inconsistência nos valores de  $\sigma_0^2$  ao longo da velocidade de deformação.

É possível afirmar que as equações isoladas de Bergström obtidas são efetivamente válidas para o ensaio em que foram ajustadas. Porém, os inconvenientes citados no último parágrafo questionam seriamente sua capacidade de interpolação ao longo da faixa estudada de temperatura e velocidade de deformação. Além da evolução fisicamente inconsistente de suas constantes ajustadas em alguns casos, há dúvidas sobre qual conjunto de parâmetros deveria ser escolhido para permitir interpolações seguras.

Na verdade, a literatura [14] mostra a determinação correta dessas constantes obriga à repetição dos ensaios de conformação a quente (em até cinco vezes), assumindo-se então um valor médio das constantes obtidas para as curvas. Além disso, na referência citada, a variação na magnitude da velocidade à deformação estudada foi bem maior (2, 10 e 50 s<sup>-1</sup>), o que sem dúvida tende a melhorar o condicionamento do sistema, definindo mais nitidamente os valores das constantes ajustadas. Sob tais condições é possível levantar conjuntos confiáveis de constantes ajustadas.

Voltando-se a analisar a Tabela II, verifica-se que o modelo que melhor atendeu maior número de aços com precisão máxima foi o de Tegart, com quatro aços (C-

Mn, Nb, NbTi2 e NbCrCu2). O de Jäckel vem em segundo lugar, com três aços (C1, CMn e NbCrCu1); as redes neurais atenderam a dois aços (NbTi1 e NbTiV) e, finalmente, o modelo de Hajduk, com um aço (C2).

Os valores dos erros padrão da estimativa constantes na tabela II foram plotados num gráfico radar, o qual pode ser visto na figura 2. A partir daí pode-se verificar que o modelo de Rossard foi o que nitidamente apresentou pior grau de ajuste aos dados reais, particularmente para os aços com maiores teores de elementos de liga. Os modelos de Tarokh e as redes neurais apresentaram desempenho intermediário entre o modelo de Rossard e os demais, alternando posições em termos de precisão. Já os demais modelos apresentaram desempenhos similares, não se conseguindo distinguir facilmente no gráfico qual o melhor. Todos os modelos, exceto o de Rossard em alguns aços, atenderam a exigência de apresentar valor do coeficiente de correlação  $r$  de Pearson igual ou maior a 0,95.

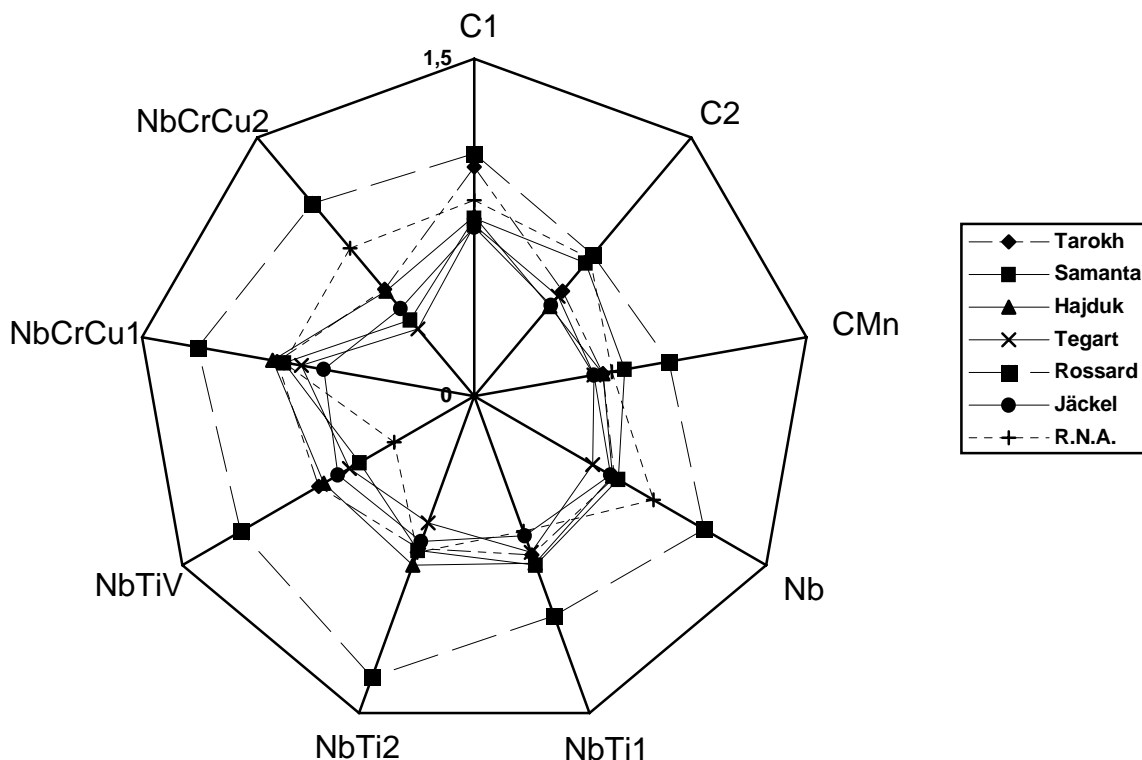


Figura 2: Gráfico Radar mostrando o nível de ajuste obtidos nos vários modelos, em termos do erro padrão da estimativa (em  $\text{kgf/mm}^2$ ), para os aços estudados neste trabalho.

A tabela IV mostra o grau de precisão obtido em cada modelo, considerando-se todos os aços estudados neste trabalho. A partir dessa informação pode-se classificar os modelos em três categorias, em função de seu desempenho: (a) Tegart e Jäckel; (b) Samanta, Hajduk, Rede Neural e Tarokh; (c) Rossard. Note-se que apenas o modelo de Rossard apresentou precisão bem inferior aos demais.

A figura 3 mostra outro gráfico tipo radar, analisando agora o desempenho obtidos nos vários modelos em função das classes de aços estudados neste trabalho. Em termos globais, verificou-se que os modelos tenderam a apresentar menor precisão para os aços microligados, particularmente as fórmulas de Rossard e Hajduk. Tal constatação pode ser confirmada ao se analisar os dados apresentados nas tabelas V e VI. Enquanto que, no caso dos aços ao carbono, os modelos de Jäckel, Tegart, Hajduk e Tarokh apresentaram melhor desempenho, para os microligados o modelo de Tegart passou a ser o melhor, trocando posição com o de Jäckel, e seguindo-se então os modelos de Samanta e Rede Neural.

	TEGART	JÄCKEL	SAMANTA	HAJDUK	R.N.A.	TAROKH	ROSSARD	GLOBAL
r	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,94	0,97
EPE	0,63	0,64	0,71	0,72	0,74	0,75	1,10	0,76

Tabela IV: Valores médios do coeficiente de correlação  $r$  de Pearson e do erro padrão da estimativa, em  $\text{kgf/mm}^2$ , relativos a cada modelo para cálculo da resistência à deformação a quente, considerando-se todos os aços estudados no presente trabalho.

A tabela VII mostra a classificação de modelos, em ordem decrescente de precisão, obtida em um trabalho anterior sobre aços microligados [15]. Neste caso ocorreu nítida superioridade da Rede Neural em termos de precisão no modelamento da resistência à deformação a quente. A diferença de desempenho entre os modelos empíricos é menor ainda do que a observada no presente trabalho, embora a precisão dos mesmos seja bem menor.

É intrigante o fato das redes neurais terem apresentado no presente trabalho desempenho inferior à maioria dos modelos empíricos, ainda que o grau de precisão obtido tenha sido muito bom e, em certos aços, insuperável. Contudo, neste trabalho, as

curvas tensão *versus* deformação foram suavizadas, evitando que o ruído aleatório nelas presente afetasse o grau de ajuste dos modelos aos dados reais. De fato, os níveis de ajuste para todos os modelos, obtidos neste trabalho, são significativamente maiores do que os obtidos em [15]. Esta melhor condição experimental eliminou uma das vantagens inerentes ao uso de redes neurais, que é sua melhor capacidade de previsão a partir de dados contendo erros e ruídos espúrios [19] e tornou mais evidente as relações efetivas entre a resistência à deformação a quente e temperatura, grau e velocidade de deformação. Esses dois fatores contribuíram para o melhor desempenho das fórmulas empíricas convencionais em detrimento das redes neurais.

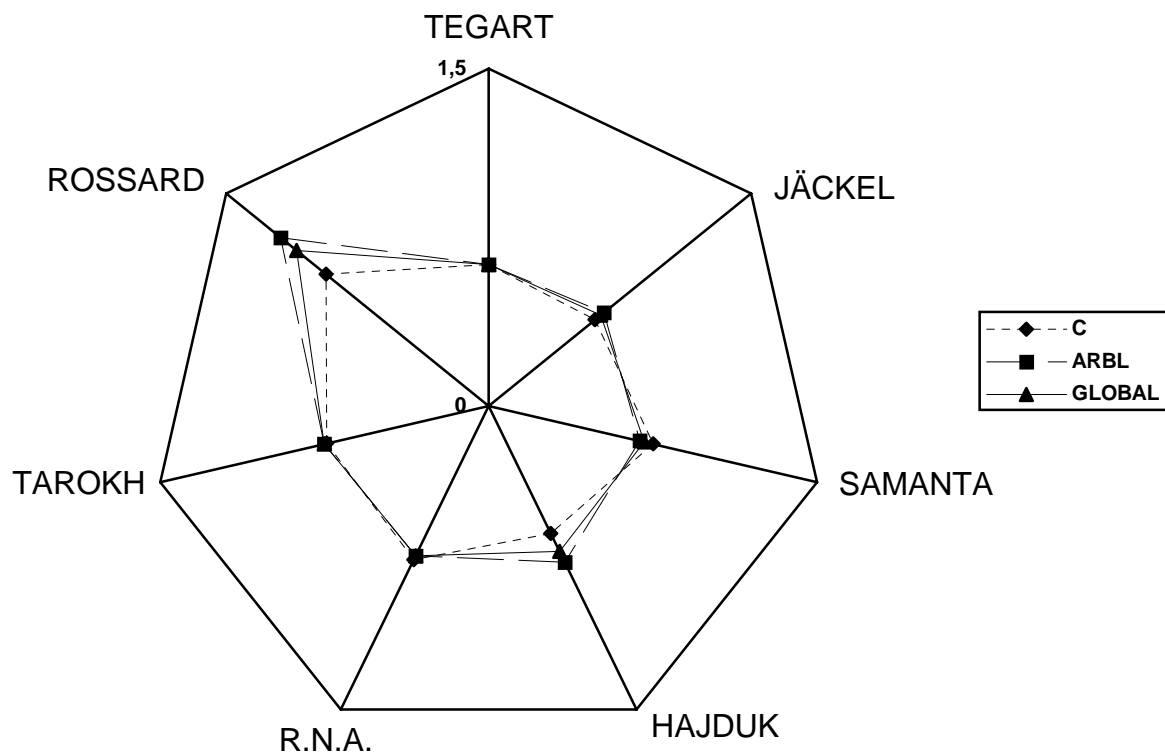


Figura 3: Gráfico Radar mostrando o nível de ajuste obtidos nos vários modelos, em termos do erro padrão da estimativa (em  $\text{kgf/mm}^2$ ), para as classes de aços estudados neste trabalho.

Já a classificação das fórmulas empíricas obtida no presente trabalho para os aços microligados não foi muito diferente da obtida em [15]. Nos dois casos verificou-se que a equação de Hajduk tendeu a apresentar pior desempenho que as outras fór-

mulas com estrutura mais complexa. Ainda assim, a classificação não foi exatamente igual, provavelmente devido a flutuações estatísticas.

	JÄCKEL	TEGART	HAJDUK	TAROKH	SAMANTA	R.N.A.	ROSSARD	GLOBAL
r	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,95	0,97
EPE	0,61	0,63	0,63	0,74	0,75	0,76	0,93	0,72

Tabela V: Valores médios do coeficiente de correlação  $r$  de Pearson e do erro padrão da estimativa, em  $\text{kgf/mm}^2$ , relativos a cada modelo para cálculo da resistência à deformação a quente, considerando-se os aços ao carbono estudados no presente trabalho.

	TEGART	JÄCKEL	SAMANTA	R.N.A.	TAROKH	HAJDUK	ROSSARD	GLOBAL
r	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,94	0,97
E.P.E.	0,63	0,66	0,69	0,74	0,75	0,77	1,19	0,77

Tabela VI: Valores médios do coeficiente de correlação  $r$  de Pearson e do erro padrão da estimativa, em  $\text{kgf/mm}^2$ , relativos a cada modelo para cálculo da resistência à deformação a quente, considerando-se os aços microligados estudados no presente trabalho.

	R.N.A.	SAMANTA	TEGART	JÄCKEL	TAROKH	ROSSARD	HAJDUK	GLOBAL
R	0,97	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,95
E.P.E.	1,2	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	1,6

Tabela VII: Valores médios do coeficiente de correlação  $r$  de Pearson e do erro padrão da estimativa, em  $\text{kgf/mm}^2$ , relativos a cada modelo para cálculo da resistência à deformação a quente, considerando-se os aços microligados estudados em [15].

## - CONCLUSÕES

Este trabalho sobre o modelamento matemático da resistência à deformação a quente de aços de baixo carbono e microligados em função da temperatura, grau de velocidade de deformação levou às seguintes conclusões:



- Equações de resistência à deformação a quente expressas em função apenas do grau de deformação aplicado, tais como as de Kadioglu e Bergström, apresentaram grau de ajuste muito bom para cada ensaio, mas sua generalização dentro de uma faixa de temperaturas e velocidades de deformação exige maior quantidade de dados que a disponível neste trabalho para que se consiga obter valores das constantes de ajuste das equações física e matematicamente consistentes ao longo dos intervalos considerados;
- Dos modelos em função da temperatura, grau e velocidade de deformação considerados - Tarokh, Samanta, Hajduk, Tegart, Rossard, Jäckel e Rede Neural - apenas o de Rossard não atendeu os requisitos mínimos necessários, sendo o que apresentou pior desempenho;
- Ao contrário do verificado na literatura, as redes neurais não apresentaram desempenho superior às equações empíricas. Isso pode ser atribuído à suavização previamente efetuada nas curvas tensão *versus* deformação, que removeu o ruído aleatório espúrio dos dados e realçou as relações da resistência à deformação com a temperatura, grau e velocidade de deformação;
- A precisão dos modelos desenvolvidos para aços microligados foi pior do que a obtida para os aços ao carbono;
- Equações mais complexas e redes neurais apresentaram melhor capacidade para modelar a resistência à deformação a quente dos aços microligados. Já equações mais simples podem apresentar resultados equivalentes à de modelos mais complicados com os dados dos aços ao carbono.

## - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento a **Marcos Antonio Stuart** e a **José Herbert Dolabella da Silveira**, da COSIPA, por seu apoio vital na concepção e atividades preliminares deste trabalho, e 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 e pelas valiosas sugestões feitas no decorrer deste trabalho.

## - BIBLIOGRAFIA

1. SPITTEL, T. & SPITTEL, M. Scandinavian Journal of Metallurgy, 19(6): 85-94, 1990.
2. TAMURA, I. e outros. Thermomechanical Processing of High Strength Low-Alloy Steels. Butterworths, London, 1988. 248 p.
3. TSELIKOV, A. Stress and Strain in Metal Rolling. Mir Publishers, Moscou, 1967. 475 p.
4. LENARD, J.G. e outros. Journal of Engineering Materials and Technology, 109(10):343-349, October 1987.
5. PAWELSKI, O. e outros. Archive für das Eisenhüttenwesen, 53(5):169-176, Mai 1982.
6. SPITTEL, T. & HENSEL, A. Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978. 476 p.
7. POLOUKHINE, P. e outros. Resistance des Métaux et des Alliages à la Deformation Plastique. Editions Mir, Moscou, 1980, 546 p.
8. TAROKH, M. & SEREDYNSKI, F. Journal of the Iron and Steel Institute, 208(7):695-697, July 1970.
9. WHITTAKER, H.J. e outros. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY OF IRON AND STEEL. Proceedings. The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1971, 662-666.
10. JÄCKEL, I. Neue Hütte, 34(8):287-290, August 1989.

11. GITTINS, A. e outros. BHP Technical Bulletin, 18(1):2-8, May 1974.
12. BERNARD, G. e outros. Revue de Metallurgie, 78(5):421-434, Mai 1981.
13. KAFTANOGLU, B. In: MODELLING HOT DEFORMATION OF STEELS. Springer-Verlag, Berlin, 1989, 71-100.
14. LAASRAOUI, A. & JONAS, J.J. Metallurgical Transactions A, July 1991, 1545-1558.
15. GORNI, A.A. In: FIRST METAL FORMING WEEK. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Joinville, 1993, 267-286.
16. GORNI, A.A. Micro Sistemas, (102):24-31, 1991.
17. GORNI, A.A. Micro Sistemas, Dez. 1994, 12-18.
18. GORNI, A.A. Micro Sistemas, Fev. 1995, 20-26.
19. NIELSEN, R.H. Neurocomputing. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1991. 433 p.

## **- ABSTRACT**

### **COMPARISON BETWEEN DIFFERENT APPROACHES TO HOT STRENGTH MODELLING OF CARBON AND MICROALLOYED STEELS**

**In this work it was determined the hot flow curves of several carbon and microalloyed steels usually processed at COSIPA's plate mill, by means of isothermal hot torsion tests. The curves obtained were smoothed and submitted to correction to compensate the adiabatic heating of the sample due to strain. These data were modelled using empirical equations in function of temperature, strain grade and strain rate, as Tarokh, Samanta, Hajduk, Tegart, Rossard and Jäckel, as well using the neural networks technique. It was tested models in function only of the strain grade, as Kadioglu and Bergström. All the models using temperature, strain grade and strain rate showed good agreement with experimental data, except the Rossard model. The modelling using neural networks showed poorer performance than the empirical equations. This fact can be explained by the data smoothing, that eliminated aleatory noise in the strain versus deformation curves. The precision of the models for microalloyed steels was slightly inferior than the models for carbon steels. Besides that, empirical equations more complex and neural networks tended to show better results in the modelling of data from microalloyed steels. The models expressed only in function of the strain grade, Kadioglu and Rossard, can not reliably extended to the studied range of temperature and strain rate due to lack of experimental data.**

**Keywords: Hot Torsion Tests; Hot Strength of Steels; Mathematical Models**