

DETERMINAÇÃO DA RESISTENCIA A DEFORMAÇÃO DOS AÇOS PROCESSADOS
NO LAMINADOR ESBOÇADOR R2 DA COSIPA (1)

Antonio Augusto Gorni (2)

Alvaro José Simões (3)

RESUMO

Foram determinados os valores de resistência média à deformação dos aços processados na Cadeira Esboçadora R2 do Laminador de Tiras a Quente da Cosipa a partir da carga de laminação obtida sob condições industriais. A comparação de tais parâmetros com tres equações teóricas revelou diferenças apreciáveis, atribuídas aparentemente ao gradiente de temperatura existente ao longo da espessura do esboço. As equações de Hajduk e Samanta, determinadas para aços específicos, revelaram melhor ajuste aos dados experimentais do que a de Misaka, a qual, em termos de composição química, só considera o teor de carbono do material.

-
- (1) Contribuição Técnica a ser apresentada ao Seminário de Laminação; São Paulo SP; Setembro de 1987.
 - (2) Membro da ABM. Engenheiro de Pesquisa do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas da Cosipa, Cubatão SP.
 - (3) Membro da ABM. Técnico de Metalurgia e Qualidade do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas da Cosipa, Cubatão SP.

1. INTRODUÇÃO

A Resistência Média à Deformação é um parâmetro muito importante no cálculo da Carga de Laminação a quente a qual, por sua vez, é uma grandeza importante na determinação dos esquemas de passe e controle do perfil do laminado.

Apesar das dificuldades experimentais a resistência à deformação a quente dos aços foi extensivamente pesquisada nas últimas décadas (1,2), sendo obtida grande quantidade de dados. A partir dessas informações foram determinadas diversas equações matemáticas para o cálculo desse parâmetro em função da temperatura, deformação e velocidade de deformação aplicada ao material. Tais fórmulas foram desenvolvidas para aços específicos, e por isso nem sempre são plenamente aplicáveis. Variações de composição química e do processamento anterior do material exercem grande influência sobre esse parâmetro, e assim, para um mesmo aço, seu valor exato pode variar de Usina para Usina.

Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar os valores de Resistência Média à Deformação a partir das Cargas relativas ao processo de laminação na Cadeira Esboçadora R2 do Laminador de Tiras a Quente da Cosipa, e compará-los com os valores obtidos através das equações teóricas de Misaka, Hajduk e Samanta.

2. EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DA RESISTÊNCIA MÉDIA A DEFORMAÇÃO

Os dados necessários para se obter uma equação para cálculo da resistência à deformação a quente podem ser obtidos através de ensaios de tração (2), torção (3,5), compressão sob estado plano (4,13), plastômetro de Camo (5) e laminação laboratorial (3, 9,13). Tais ensaios permitem maior controle das condições experimentais e ampliar a faixa de condições de deformação possíveis, facilitando a obtenção de um maior número de dados e permitindo a determinação de equações confiáveis.

Serão listadas a seguir as equações de Misaka, Hajduk e Samanta, as quais serão utilizadas neste trabalho.

- MISAKA (6,12)

$$\sigma = 1.15 \exp \left(\frac{.126 - 1.75C + .594C^2 + 2851 + 2968C - 1120C^2}{T} \right) \dot{\epsilon}^{-.21} \bar{\epsilon}^{.13}$$

onde: C = Teor de Carbono (%);

T = Temperatura (K);

$\dot{\epsilon}$ = Deformação Real;

$\bar{\epsilon}$ = Velocidade Média de Deformação (1/s).

Tal fórmula pode ser aplicada para diversos tipos de aço, empregando-se o teor de C correspondente.

1 - HAJDUK (1,2,7)

$$\sigma = \sigma_0 K_T K_\epsilon K_{\dot{\epsilon}}$$

onde σ_0 = Resistência Básica à Deformação (kgf/mm^2);

K_T = Fator Termomecânico de Temperatura;

K_ϵ = Fator Termomecânico de Deformação;

$K_{\dot{\epsilon}}$ = Fator Termomecânico de Velocidade de Deformação.

Definindo agora os Fatores Termomecânicos:

$$K_T = A_1 e^{-mT}$$

$$K_\epsilon = A_2 \epsilon^{-m}$$

$$K_{\dot{\epsilon}} = A_3 \dot{\epsilon}^{-m}$$

onde T = Temperatura (.C), ϵ é a deformação real, $\dot{\epsilon}$ é a velocidade de deformação e $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$ são constantes específicas para cada tipo de aço.

A equação de Hajduk é uma das mais adequadas para o cálculo da resistência à deformação, devido a sua boa concordância com os dados experimentais e sua simplicidade de cálculo (1). A tabela I mostra os valores das constantes relativas a tres aços semelhantes aos produzidos na COSIPA. A tabela II mostra as respectivas composições químicas.

- SAMANTA (5)

$$\sigma = A + B \ln \epsilon + C T + D T \ln \epsilon + E T \ln \dot{\epsilon} + F T \ln \dot{\epsilon} \ln \epsilon$$

onde T = Temperatura (K), ϵ é a deformação, $\dot{\epsilon}$ é a velocidade de deformação e A, B, C, D, E, F são as constantes específicas para cada tipo de aço.

A tabela III lista os valores obtidos por Whitakker e outros (5) para as constantes da equação de Samanta relativos a tres tipos de aço também semelhantes aos processados pela Cosipa. Os dados necessários para a determinação das constantes foram obtidos através de ensaios num plastômetro de Camo.

Deve-se notar que tais fórmulas exprimem a resistência a deformação a quente como uma função monótonamente crescente em relação a deformação aplicada. Entretanto, diversos trabalhos revelaram que para maior que 50% ocorre uma queda no valor deste parâmetro, o que invalida tal relação matemática (7).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A princípio não há nenhuma objeção à determinação da resistência média à deformação diretamente de um laminador industrial (3). Entretanto, tal abordagem é limitada devido ao elevado custo inerente a tais ensaios e à consequente perda de produção.

Neste trabalho a determinação deste parâmetro foi restrita aos esquemas de passe normais da Cadeira Esboçadora R2. Isto foi adequado para que se conhecesse a condição atual com que opera o equipamento, mas é insuficiente para se gerar relações matemáticas necessárias a um eventual trabalho de otimização dos esque-

mas de passe.

Inicialmente determinou-se a carga de laminação através do registro de suas variáveis elétricas (8). Tal procedimento foi necessário devido à ausência de células de carga neste equipamento. A partir dos dados de carga assim determinados a resistência média à deformação foi calculada a partir da fórmula

$$\sigma = \frac{C}{\sqrt{R \Delta h} \left[\frac{\bar{n}}{2} + \frac{\sqrt{R \Delta h}}{(h_1 + h_2)} \right] L}$$

onde: σ = Resistência Média à Deformação (kgf/mm^2);

C = Carga Média de Laminação (kgf);

R = Raio dos Cilindros (mm);

Δh = Abertura dos Cilindros (mm);

h_1 = Espessura Inicial (mm);

h_2 = Espessura Final (mm);

L = Largura (mm).

Essa fórmula se baseia no modelo de cálculo de carga na laminação a quente desenvolvido por Alexander-Ford, o qual foi empregado com sucesso num trabalho semelhante (9).

Tal procedimento foi realizado para placas com diversas dimensões e materiais, bem como vários esquemas de passe. Entre-

tanto, por razões de espaço, serão analisadas neste trabalho apenas as placas com 140 mm de espessura por 1020 mm de largura e laminadas em 5 passes até a espessura de 25 mm. As placas foram divididas em tres categorias, conforme sua composição química e resistência mecânica final: Baixa Resistência, Média Resistência e Alta Resistência.

A temperatura de laminação infelizmente não pôde ser registrada devido a problemas na operação do pirômetro ótico da Cadeira Esboçadora R2. O único dado disponível foi a temperatura do esboço na Mesa de Espera, após a fase de desbaste. Desenvolveu-se então um modelo matemático para o cálculo da evolução da temperatura durante a laminação, baseando-se no fato de que um extensivo levantamento de dados realizado anteriormente (10) revelou que para o tipo de placa aqui estudado a diferença de temperatura entre a Mesa de Espera e o último passe na Cadeira Esboçadora R2 era de 50 a 60.C, enquanto que a tal diferença entre o primeiro e o último passe era de 60 a 70.C. Tais temperaturas se referem a superfície da placa, e estão de acordo com o trabalho de Hansen e outros (9).

Assim, a partir da temperatura inicial estimada a evolução desse parâmetro ao longo da laminação foi calculada a partir da fórmula

$$T = \frac{T_0}{\sqrt[3]{1 + \frac{6 S E T_0^3 t}{\rho \zeta h}}}$$

- onde: T_0 = Temperatura Inicial do Esboço (.C);
- t = Intervalo de Tempo (s);
- T = Temperatura do Esboço após o Intervalo de Tempo t (.C);
- S = Constante de Stefan-Boltzman ($J/m^2 \cdot s \cdot K^4$)
- E = Emissividade
- ρ = Peso Específico (kg/m^3)
- ζ = Condutividade ($J/m \cdot K \cdot s$)
- h = Espessura (m)

As constantes físicas necessárias foram obtidas em (12). Considerou-se que neste caso a perda de calor devido à condução aos cilindros é neutralizada pelo aumento de temperatura proporcionado pelo trabalho de conformação (11).

A fórmula utilizada par o cálculo da velocidade de deformação média foi (9):

$$\bar{\epsilon} = \frac{V_n}{\sqrt{\frac{R h_1}{1}}} r^{0,5} \left[\frac{4 - 3r}{(2-r)^2} \right]$$

- onde: V_n = Velocidade Periférica dos Cilindros (m/s);
- h_1 = Espessura Inicial do Esboço (m);
- R = Raio do Cilindro (m);
- r = Redução.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

As tabelas IV, V e VI mostram os dados do processo de laminação e as resistências médias à deformação a quente medidas e calculadas pelas fórmulas teóricas para cada tipo de aço. A tabela VII mostra o erro percentual entre os valores medidos e calculados.

Pode-se observar que tal erro percentual foi bastante elevado, notadamente nos primeiros passes. Entretanto, isso já era esperado (3,9), pois nos ensaios de laboratório a temperatura dos corpos de prova é relativamente homogênea, e na laminação industrial de placas a diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície de um esboço com 5,0 mm pode atingir 80 a 90.C (3). Além disso, deve-se considerar também os erros inerentes na determinação da carga de laminação, sua conversão para a resistência média à deformação e o cálculo de temperatura. A tabela VIII mostra os dados obtidos por Hansen e outros (9) em escala laboratorial e industrial; pode-se observar que os erros obtidos foram de magnitude semelhante.

Digno de nota foi o fato de a resistência à deformação medida nem sempre ter sido diretamente proporcional à resistência mecânica do material prevista por sua composição química. Os valores calculados pelas equações teóricas também apresentaram tendência nêsse sentido. Isto pode ser explicado pelo fato de a temperatura de laminação ter sido mais elevada para os materiais com maior teor de elementos de liga, o que pode ter neutralizado ou minimizado a influência da composição química. No caso específico dos aços microligados deve-se levar em conta que efeito do Nb

na resistência a deformação a quente só se torna efetivo abaixo de 950.C, quando ocorre precipitação intensiva de Nb(C,N) e retardamento da recristalização do material. Além disso, verificou-se que a laminação dos aços de alta resistência ocorreu com velocidades de cilindro mais baixas, o que reduziu a velocidade média de deformação e, conseqüentemente, a resistência à deformação.

A equação de Hajduk apresentou o melhor ajuste com os dados experimentais nos tres casos estudados; a de Samanta mostrou-se relativamente adequada no caso de aços de alta resistência, equiparando-se à de Hajduk. A equação de Misaka apresentou desempenho inferior nos tres casos. Tal resultado pode ser explicado pelo fato de que a equação de Misaka é muito generalizada e, em termos de composição química, considera apenas o efeito do Carbono. Já as equações de Hajduk e Samanta aqui empregadas são específicas para composições particulares, e assim o seu grau de ajuste é função da similariedade da composição do aço para o qual ela foi desenvolvida como o material em estudo. Outros fatores, como condição do material (fundido ou deformado), tamanho de grão e tipo de ensaio efetuado também tem influência, notadamente sobre o fator $\sqrt{t_0}$ da equação de Hajduk (1).

Outro aspecto a ser considerado é que as equações de Misaka e Samanta aqui utilizadas são mais adequadas no caso da laminação de acabamento (5,6), tanto que seu erro em relação aos valores medidos diminuem a medida que se abaixa a temperatura e se aumenta a velocidade média de deformação.

5. CONCLUSÕES

- A comparação entre valores de resistência à deformação quente determinados industrialmente e pelas fórmulas teóricas revelou grandes diferenças, as quais podem ter sido causadas pelo gradiente de temperatura existente no esboço;

- A resistência à deformação a quente nem sempre foi proporcional à resistência mecânica do material prevista por sua composição química. Isto pode ser explicado pela maior temperatura de laminação empregada na laminação dos aços com maior teor de elementos de liga, o que anula ou minimiza a influência da composição química;

- As equações de Hajduk e Samanta revelaram-se as mais adequadas em determinados casos, possivelmente por terem sido desenvolvidas especificamente para composições de aço semelhantes aos processados pela Cosipa. Já a equação de Misaka, mais geral, leva em conta apenas o teor de carbono, e apresentou menor ajuste com os dados experimentais.

- A partir dos resultados aqui obtidos é recomendada a determinação dos valores de resistência média à deformação em escala de laboratório para os aços processados pela Cosipa em seu Laminador de Tiras a Quente, utilizando-se ensaios de Torção a Quente ou Laminação Laboratorial Instrumentada. Isto permitirá a obtenção de maior quantidade de dados de alta confiabilidade, permitindo uma caracterização completa do comportamento mecânico a quente dos aços Cosipa;

- A fim de se aumentar a precisão do cálculo das cargas de laminação na Cadeira Esboçadora R2 torna-se necessário determinar as condições reais de encharque das placas para se calcular com precisão o gradiente de temperatura ao longo de sua espessura.

6. BIBLIOGRAFIA

1. HENSEL, S. Berechnung der Uniformfestigkeit bei der Warmformung. In: Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren, VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, Leipzig, 1985, 85-176.
2. POLOUKHINE, P. e outros. Resistance des Métaux et des Alliaços à la Deformation Plastique. Editions Mir, Moscou, 1980, 7-83.
3. GITTINS, A. e outros. The Strength of Steels under Hot Working Conditions. BHP Technical Bulletin, May 1974, 2-8
4. KASPAR, R. e outros. Fließspannung im Bereich der Gamma->Alpha Umwandlungen kohlenstoffarmen Staehlen. Archive fuer das Eisenhuetenwesen, Mai 1983, 195-198.
5. WHITTAKER, H.J. e outros. The Use of Cam Plastometry and Torsion Testing for Simulating Continuous Hot Strip Mill Rolling. In: Proceedings of the ICSTIS, Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1971, 662-666.
6. CHIJIWA, K. e outros. Characteristics of Plasticine used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting. Transactions of the ISIJ, 1981, 178-86.
7. TSELIKOV, A.I. e outros. The Theory of Lengthwise Rolling. Mir Publishers, Moscou, 1981, 187-226.
8. GORNI, A.A. & OLIVEIRA, C.A. Determinação dos Parâmetros Operacionais e Torques R.M.S. dos Laminador Esboçador R2 da Copisa. Submetido para publicação no 42. Congresso Anual da A.B.M.

9. HANSEN, S.S. e outros. Effect of Temperature and Composition on the Power Requirements of Hot Strip Mill Roughing Stands. XVII Mechanical Working and Steel Processing, AIME, 1979, 237-259.
10. ASSIS JR., F.A. & GORNI, A.A. Laminação Esboçadora - Conclusões e Resumos dos Dados Levantados. Relatório Interno da Cosipa, 1985.
11. SIMS, R.B. e outros. A Method for Predicting Temperatures in Continuous Hot Strip Mills. Journal of the Iron and Steel Institute, March 1963, 270-280.
12. PLAUT, R.L. Laminação dos Aços - Tópicos Avançados. Associação Brasileira dos Metais, São Paulo, 1984, 117.
13. DUTTA, B. & SELLARS, C.M. Strengthening of Austenite by Niobium during Hot Rolling of Microalloyed Steel. Materials Science and Technology, February 1986, 146-153.

7. TABELAS

AÇO DIN	σ_0	A		m		A		m	
		1	1	2	2	3	3		
	kgf/ 2 mm								
C10	10,0	12.231	0,0025	1,494	0,174	0,726	0,139		
C15	11,1	12.231	0,0025	1,494	0,174	0,726	0,139		
18Mn Ti6	11,9	18,170	0,0028	1,516	0,181	0,750	0,124		

Tab. I: Coeficientes Termomecânicos para Tres Tipos de Aço (1).

AÇO	C	Mn	Si	Ti	P/S máx.
DIN	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
C10	0,07-0,13	0,30-0,60	0,15-0,35	---	0,045
C15	0,12-0,18	0,30-0,60	0,15-0,35	---	0,045
18Mn Ti6	0,17-0,23	0,80-1,10	0,06-0,12	0,06-0,12	0,020

Tab. II: Composição Química dos Aços da Tabela I.

Compos. Quím.	A	B	C	D	E	F
1 0,05% C 0,35% Mn	76,1	27,3	-0,048	-0,0197	0,00135	0,00075
2 0,195% C 0,63% Mn	68,6	16,0	-0,042	-0,0112	0,00118	0,00044
3 0,07% C 0,32% Mn 0,03% Nb	74,8	17,0	-0,045	-0,0098	0,00105	0,00017

Tab. III: Coeficientes para a Equação de Samanta (5).

PASSE	h mm	V rpm	T .C	ϵ	$\bar{\epsilon}$ 1/s	CARGA (t)	∇ EXPER.	∇	∇	∇
								MISAKA C=0,08t	HAJDUK C10	SAMANTA (1)
1	110	49	1174	0,24	4,5	903	4,8	8,7	6,8	9,2
2	85	60	1165	0,26	6,4	914	5,3	9,3	7,4	9,6
3	60	56	1153	0,35	7,9	1272	9,4	10,4	8,2	10,4
4	40	65	1136	0,50	11,7	1252	9,4	12,1	9,7	11,9
5	25	67	1110	0,47	15,7	1305	11,7	13,0	10,7	12,9

Tab. IV: Dados de Laminação e Resistência Média à Deformação (em kgf/mm) medidas e calculadas teoricamente para aço de Baixa Resistência. Temperatura Medida na Mesa de Espera: 1051.C.

PASSE	h mm	V rpm	T .C	ϵ	$\bar{\epsilon}$ 1/s	CARGA (t)	∇ EXPER.	∇	∇	∇
								MISAKA C=0,14t	HAJDUK C15	SAMANTA (2)
1	110	47	1194	0,24	4,3	757	3,4	8,5	7,5	8,6
2	85	60	1184	0,26	6,4	899	4,8	9,2	7,9	9,2
3	60	60	1171	0,35	8,4	788	4,6	10,4	8,8	10,2
4	40	65	1154	0,50	11,7	1099	6,6	12,0	10,3	11,5
5	25	68	1126	0,47	16,0	1181	10,9	12,9	11,4	12,7

Tab. V: Dados de Laminação e Resistência Média à Deformação (em kgf/mm) medidas e calculadas teoricamente para aço de Média Resistência. Temperatura Medida na Mesa de Espera: 1072.C.

PASSE	h mm	V rpm	T .C	ϵ	$\bar{\epsilon}$ 1/s	CARGA (t)	∇ EXPER.	∇	∇	∇
								MISAKA C=0,18t	HAJDUK 18Mn Ti6	SAMANTA (3)
1	110	41	1223	0,24	3,8	699	2,6	8,1	6,2	5,8
2	85	55	1214	0,26	5,9	874	5,1	8,8	6,8	6,9
3	60	58	1200	0,35	8,1	1141	8,6	10,0	7,8	8,6
4	40	61	1182	0,50	10,9	1082	8,2	11,5	9,1	10,7
5	25	61	1153	0,47	14,3	1460	13,5	12,3	10,0	11,9

Tab. VI: Dados de Laminação e Resistência Média à Deformação (em kgf/mm) medidas e calculadas teoricamente para aço de Alta Resistência. Temperatura Medida na Mesa de Espera: 1102.C.

PAS.	BAIXA RESISTENCIA			MEDIA RESISTENCIA			ALTA RESISTENCIA		
	ERRO MISAKA	ERRO HAJDUK	ERRO SAMANTA	ERRO MISAKA	ERRO HAJDUK	ERRO SAMANTA	ERRO MISAKA	ERRO HAJDUK	ERRO SAMANTA
1	81	42	92	150	121	153	212	138	123
2	75	40	81	92	65	92	73	33	35
3	11	-13	11	126	91	122	16	-9	0
4	29	3	27	82	56	74	40	11	30
5	11	-9	10	18	5	17	-9	-26	-12

Tab. VII: Erro Percentual entre a Resistência à Deformação Calculada pelas fórmulas e a Medida Experimentalmente para os Tres Tipos de Aço.

TIPO DE AÇO	1140.C			1220.C		
	LABOR.	R5 (*)	ERRO (%)	LABOR.	R5 (*)	ERRO (%)
EFERVESCENTE 0,08% C; 0,35% Mn	7,0	3,2	119	4,3	2,5	72
REFOSFORADO 0,09% C; 0,4% Mn; 0,1% P	7,8	3,6	117	5,0	2,5	100
MICROLIGADO 0,13% C; 0,7% Mn; 0,035% Nb	8,9	4,0	123	5,7	3,2	78

2
Tab. VIII: Valores de Resistência Mecânica à Deformação em kgf/mm², medidos em um Laminador Piloto e na Cadeira Esboçadora R5 e os respectivos erros, conforme Hansen e outros (9).

(*) -> temperatura estimada