CÁLCULO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS, COM BASE NO SEU COMPORTAMENTO PLÁSTICO (*)

Werner Grudig (**)

R E S U M O

A maior eficiência e a grande simplicidade da formulação empírica proposta pelo autor em relação a outras duas - também apresentadas sob a forma de função potencial - serão comprovadas através do cálculo da resistência à tração de chapas finas laminadas a frio de metais não-ferrosos e de aços.

As hipóteses em que se fundamentam as três formulações empíricas em estudo, bem como ensinamentos teóricos decorrentes, serão igualmente apresentados.

1. CONSIDERAÇÕES FUNDAMENTAIS

No ensaio de tração normalizado também é requerida a determinação da resistência à tração: $\sigma_t = P_{max}/S_o$. Esta grandeza representa uma tensão de tração nominal, pois a fôrça de tração máxima P_{max} é referida à seção resistente inicial S_o do corpo-de-prova. Quando a fôrça de tração atingir seu valor máximo, os materiais metálicos de comportamento plástico neste ensaio já experimentaram deformações plásticas que, conforme o material em ensaio, podem ser muito apreciáveis. Neste caso, o valor da seção resistente S_p é sensivelmente menor do que S_o e, consequentemente, a resistência à tração não tem significado físico claro.

(*) Contribuição Técnica apresentada ao "1º Simpósio sôbre metais não-ferrosos"; São José dos Campos - SP - dezembro de 1967

(**) Professor catedrático na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Diretor de sua Faculdade de Arquitetura

A tensão verdadeira σ, ou seja, aquela que realmente atua na seção resistente s já plàsticamente deformada sob o efeito da respectiva fôrça de tração P vale $\sigma = P/s = k_f$. Qualquer material metálico, ao ser deformado plàsticamente a frio opõe certa resistência às deformações que lhe são impostas. Os critérios de plasticidade relacionam o estado de tensão a que está sujeito o material e a sua resistência à deformação k_f. No ensaio de tração, a tensão de tração verdadeira é igual à resistência à deformação, ùnicamente até a fôrça de tração atingir o seu máximo. A medida que ela decresce, inicia-se a estricção do corpo-de-prova e o estado de tensão, na região estrita, passa a ser múltiplo. Ademais, a estricção é um fenômeno de instabilidade, pois a uma diminuição da intensidade da fôrça de tração, corresponde um rápido crescimento da velocidade de deformação, na região de estricção. Assim, as trajetórias de tensão deixam de ser retas e paralelas à direção do eixo do corpo-de-prova, passando a ser curvilíneas, na referida região. Isto decorre do fato, de nesta região, atuarem tensões transversais, que passam a ser máximas no centro dos provetes onde, consequentemente, inicia-se a ruptura (1) (2).

Importante para o presente estudo é a conclusão: a intensidade da resistência à deformação longitudinal k_f é muito maior, em valor absoluto, do que a das tensões transversais e isto para qualquer forma geométrica dos corpos-de-prova de tração, mesmo por ocasião da ruptura.

Quanto ao conceito de deformação, também cabem algumas considerações sucintas. O alongamento longitudinal $\varepsilon = (l - l_0)/l_0$ expressa o aumento de comprimento da base de medida em relação ao comprimento inicial l_0 sendo l o antes referido comprimento quando atua a fôrça de tração P. No estágio plástico, o alongamento ε também carece de especial significação, bem como o conceito de tensão nominal, como já exposto. De relevante significação, porém é o conceito da deformação logarítmica.

$$\varphi = \int_0^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad , \quad \text{ou} \quad \frac{l}{l_0} = e^{\varphi} \qquad \text{(1a)}$$

Tendo presente a lei empírica fundamental de manter-se invariável o volume de um material metálico ao ser plàsticamente deformado, pode-se também escrever (1):

$$\varphi = \ln \frac{S}{S_o} , \qquad \text{ou} \qquad \frac{S_o}{S} = e^{\varphi} \tag{1b}$$

Outra conclusão notável do estudo matemático da curva de escoamento é: a deformação logarítmica longitudinal distribui-se uniformemente ao longo da base-de-medida do corpo-de-prova de tração até a fôrça atingir o máximo. Neste momento, a deformação logarítmica uniforme φ_u, também passa a ser máximo; êste valor é representado por u

Assim: $$(\varphi_u)_{máx} = u \tag{2a}$$

Também é fàcilmente demonstrado, que, para P_{max}, o alongamento uniforme ε_u, alcança seu valor máximo, representado por u'.

$$(\varepsilon_u)_{max} = u' \tag{2b}$$

Outra relação notável é a seguinte:

$$u' = e^{u} - 1 \tag{3}$$

Na chamada curva de escoamento é representada a interdependência entre a resistência à deformação k_f e a deformação logarítmica φ que lhe corresponde. A grande importância prática que há no conhecimento desta curva, reside no fato de ela permitir a estimativa prévia da fôrça e do trabalho necessário para dar forma a frio a metais, bem como prever a resistência mecânica das peças assim fabricadas. O conhecimento da curva de escoamento também é uma condição indispensável para qualquer tratamento matemático dos processos de dar forma a frio.

Decorre do exposto a necessidade cada vez maior da determinação da curva de escoamento com a devida precisão para as necessidades da prática e sua formulação empírica, a qual precisa ser a mais simples e eficiente possível. A sua determinação experimental exige a realização de uma série de um não pequeno número de medidas a serem feitas durante a execução de um entre os mais variados ensaios mecânicos (3) (4), o ensaio de tração é largamente aplicado.

2. OBJETIVO

Pelo autor foi desenvolvido um nôvo método indireto de determinação da curva de escoamento, aplicável tanto a metais não-ferrosos e suas ligas, como a aços comuns e especiais (5). A simplicidade, eficiência e generalidade desta formulação empírica já foram comprovadas, plenamente, através da comparação das curvas de escoamento obtidas experimentalmente por vários pesquisadores (5) (6) com as decorrentes da formulação empírica proposta.

O objetivo principal da presente contribuição é o de comprovar a superioridade dessa nova formulação empírica sob outro ponto-de-vista ou seja, pelo cálculo da resistência à tração.

Serão comparados êsses valôres calculados com os medidos por três diferentes formas da formulação empírica da curva de escoamento. A devida documentação experimental - referente a chapas finas laminadas a frio de metais não-ferrosos e de aços - foi obtida no Instituto - Max Plank, em Stuttgart, República Federal da Alemanha, em 1961 (7).

3. REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA CURVA DE ESCOAMENTO

Várias formulações empíricas foram propostas para a curva de escoamento, baseadas em medidas feitas em ensaios os mais variados possíveis (3)(4)(5)(7)(8)(9)(10)(11).

A função de emprêgo mais generalizado é a seguinte equação potencial:

$$k_f = k\,\varphi^{\mu} \qquad (4)$$

Ela é perfeitamente definida pelas duas constantes k e μ que caracterizam o comportamento plástico de cada material metálico: O parâmetro k representa a resistência à deformação para a deformação logarítmica $\varphi = 1$, enquanto φ significa o valor de para a fôrça de tração máxima (eq. 2a).

A determinação experimental do valor de φ é feita figurando os pontos experimentais (k_f, φ) em papel dilogarítmico e traçando a reta de melhor ajuste até $\varphi = 1$. Evidentemente, isto só é possível, se o material em ensaio suportar esta deformação. A grande maioria dos materiais metálicos rompem-se, porém, para deformações $\varphi < 1$. Nestes casos, òbviamente, a determinação "direta" de é mais ou menos segura.

O parâmetro μ também é determinado experimentalmente, digamos, no ensaio de tração axial, pela medida da seção resistente inicial S_o e daquela S_p quando atua a fôrça de tração máxima.

Partindo da equação expontânea (1b) e da equação (2a), decorre para μ a seguinte expressão:

$$\mu = \ln \frac{S_p}{S_o} \quad , \quad \text{ou} \quad e^{\mu} = \frac{S_o}{S_p} \tag{5}$$

A formulação empírica da curva de escoamento preconizada pelo autor decorre da interpretação matemática da já clássica documentação experimental publicada por F. Koerber e colaboradores (13) e (14). Êles examinaram, exaustivamente, no ensaio de tração axial, o comportamento plástico de 25 materiais metálicos bem distintos, em diferentes estados de tratamento térmico: metais puros, ligas não-ferrosas e aços; alguns em níveis de temperatura até 300 °C.

Mediante tratamento matemático desta riquíssima documentação experimental, foram comprovadas pelo autor as seguintes conclusões gerais:

- A curva de escoamento de melhor ajuste aos resultados experimentais é traduzida por uma função exponencial;
- Esta função superpõe-se, pràticamente, à seguinte função potencial, de fácil aplicação prática e do tipo da equação (4):

$$k_f = k_1 \varphi^{\mu} \tag{6}$$

- Como a acima referida função exponencial não passa pela origem do sistema de coordenadas (k_f , φ), recomenda-se não aplicar a equação (6) a muito pequenas deformações, pois então não é desprezível a influência das deformações elásticas.

(*) Êste cálculo é feito, prontamente, com auxílio de tabelas (12).

Na proposta formulação empírica da curva de escoamento também intervêm dois parâmetros: k_1 , e μ , que têm a mesmíssima significação das constantes K e μ da equação (4).

O valor de μ_1 , no entanto, é fàcilmente calculado pela seguinte expressão (5):

$$k_1 = \sigma_p \frac{163{,}2 - 2q_p}{100 - q_p} \qquad (7)$$

Significam:

$\sigma_p = P_{max}/s_p$: A resistência à tração verdadeira ou seja, a resistência à deformação kf para P_{max} .

$q_p = \dfrac{(s_o - s_p)}{s_o} 100$: A contração da seção resistente para P_{max} , referida a s_o , expressa em percentagem.

Assim, a determinação "indireta" da curva de escoamento expressa pela equação (6) exige, apenas e ùnicamente, três medidas simples:

s_o : A área da seção resistente inicial do corpo-de-prova de tração;

P_{max} : O valor máximo da fôrça de tração;

s_p : A área da seção resistente quando atua .

Outra formulação empírica da curva de escoamento, também em forma de uma função potencial, é a de Walter Panknin e Galal S.A. Shawki (7):

$$kf = k' \cdot \varepsilon_g^{\mu'} \qquad (8)$$

Ela seria válida para certas ligas de cobre e aço inoxidável do tipo 18.8, enquanto outros materiais não-ferrosos e chapas de aços para estampagem obedecessem melhor à equação (4). (*)

(*) Na tabela 1 estão figurados os dois grupos de materiais por êles experimentados e os valôres experimentais obtidos.

Na equação (8) significam: K' e μ' os dois parâmetros que caracterizam esta parábola.

A constante K' representa o valor da resistência à deformação k_f para $\varepsilon_j = 1$, sendo

$$\varepsilon_j = (l - l_o)/l \tag{9}$$

o alongamento nominal referido ao comprimento da base-se-medida do corpo-de-prova quando atua a fôrça de tração P.

Conhecida é igualmente a seguinte relação entre diferentes grandezas de deformação (7):

$$\varepsilon_j = q = 1 - e^{-\varphi} \tag{10}$$

sendo $q = (s_o - s_o)/s_o$ a contração nominal da seção transversal.

A determinação "direta" da constante é feita de maneira análoga à do parâmetro k da equação (4), como já referido.

A outra constante μ' é o alongamento nominal:

$$\mu' = (l_p - l_o)/l_o$$

sendo μ' o alongamento da base-de-medida do corpo-de-prova quando atua a fôrça de tração máxima.

Em uma monografia anterior, o autor já apresentou as provas de ser desnecessário o emprêgo dessas duas formulações empíricas, pois a caracterizada pela equação (6) interpreta melhor o comportamento plástico dêsses dois grupos de materiais metálicos, além de ser muito mais simples (5).

4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A relação entre a curva de escoamento e a resistência à tração é expressa como segue:

$$\sigma_t = \frac{P_{max}}{S_o} = \frac{P_{max}}{S} \cdot \frac{S}{S_o} = \left(k_f \cdot \frac{S}{S_o}\right) P_{max} \tag{11}$$

Ultrapassado o limite de escoamento (natural ou convencional), passa a ser relevante a influência da diminuição da seção resistente S . Decresce, portanto, sensìvelmente, a relação S/S_o .

A resistência à deformação k_f , por sua vez, vai crescendo à medida que progride a deformação. A sua velocidade de decrescimento, no entanto, vai diminuindo cada vez mais, o que é claramente evidenciado pela imagem geométrica da curva de escoamento (parábola). Em certo momento, a expressão entre parêntesis atinge o valor máximo. A êste valor corresponde a resistência à tração. Para deformações ainda maiores, ou seja, no período de estricção, o decréscimo da seção resistente passa a ser decisivo e, conseqüentemente, a expressão entre parêntesis vai decrescendo.

A tensão nominal pode ser assim apresentada, observada a já citada relação $S_o/S = e^{\varphi}$, ou $S/S_o = e^{-\varphi}$:

$$\sigma = \frac{P}{S} = k_f \cdot e^{-\varphi} \tag{12}$$

Assim, para a resistência à tração obtém-se a seguinte operação genérica:

$$\sigma_t = (k_f \cdot e^{-\varphi}) . P_{max} \tag{13}$$

Obedecendo ao objetivo da presente monografia, será feito o cálculo da resistência à tração com base nas três formulações empíricas em estudo da curva de escoamento, caracterizadas pelas seguintes potenciais (eq. 6) (eq. 4) e (eq. 8).

4.1. CÁLCULO DE σ_t COM BASE NA EQUAÇÃO (6) : $k_f = k_1 . \varphi^u$

Da equação genérica (13) resulta, prontamente - visto a resistência à deformação para P_{max} ser igual à resistência à tração verdadeira: $k_f = \sigma_p = P_{max}/S_p$ - a seguinte expressão:

$$\sigma_t = \sigma_p . e^{-n} \tag{14}$$

Assim, o cálculo de resistência à tração pela formulação empírica da curva de escoamento proposta pelo autor é extremamente simples. Exige apenas a medida de três grandezas (S_o, S_p, P_{max}), o uso de tabela apropriada (12), além de uma divisão e uma multiplicação.

Observe-se, também, que com a mesmíssima facilidade pode ser calculada a resistência à tração verdadeira, tensão verdadeira, determinada experimentalmente a resistência à tração (tensão nominal) e uma das seguintes grandezas de deformação: $\mu = (\varphi_\mu)_{max}$ (eq. 2a) ou $\mu = (\varepsilon_\mu)_{max}$ (eq. 2b) ou, ùnicamente, uma delas, em atenção à (eq. 3).

Com efeito:

$$\sigma_p = \sigma_{t_{med}} \cdot e^{\mu} \quad , \quad \text{ou} \quad \sigma_p = \sigma_{t_{med}} (1 + \mu') \qquad (14a)\ (14b)$$

A simplicidade, precisão e elegância dêsse processo de cálculo reside no seguinte fato: na dedução da expressão de (eq.5) e na relação entre μ e μ' (eq. 3) é admitida, exclusivamente, a validade da lei da constância do volume dos materiais ao serem plàsticamente deformados - A eq. (14) não se fundamenta na hipótese de que os materiais em estudo precisam comportar-se, rigorosamente, como prescreve a eq. (6) até $\varphi = 1$, pois na eq. (14) não intervém a constante .

4.2. CÁLCULO DE σ_t COM BASE NA EQUAÇÃO (4): $k_f = k\,\varphi^{\mu}$

Em virtude da já citada relação: $(\varphi_\mu)_{max}$, a equação genérica (13) passa a ser:

$$\sigma_t = (k\,\varphi^{\mu} \cdot e^{-\varphi})_{P_{max}} = k\left(\frac{\mu}{e}\right)^{\mu} \qquad (15)$$

Êste cálculo é moroso e pressupõe que os materiais metálicos obedeçam, exatamente, à eq. (4) até $\varphi = 1$. É igualmente admitida a hipótese fundamental da constância de volume durante as deformações plásticas.

4.3. CÁLCULO DE σ_t COM BASE NA EQUAÇÃO (8): $k_f = k' \cdot \varepsilon_j^{\mu'}$

Com base na formulação empírica da curva de escoamento preconizada por W. Panknin e Galal S.A Shawki ou seja, conforme a equação (8), o cálculo da resistência à tração torna-se ainda mais complicado.

Com efeito: a equação (8), recorrendo-se à eq. (10, pode ser assim apresentada:

$$k_f = k'(1-e^{-\varphi})^{\mu'} \tag{16a}$$

Quando a fôrça de fração alcançar a sua maior intensidade, a expressão da resistência à deformação (eq. 16a) passa a ser, observada a equação (2b):

$$(k_f)_{P_{max}} = k'(1-e^{-\mu})^{\mu'} \tag{16b}$$

Partindo da equação genérica (13), e respeitada a equação (3) obtém-se, então, a seguinte expressão para a resistência à tração:

$$\sigma_t = k'\frac{(1-e^{-\mu})^{\mu}}{e^{\mu}} = k'(1-\mu')\,\mu'^{\mu'} \tag{16}$$

Esta equação fundamenta-se nas seguintes hipóteses:

- Lei da constância do volume nas deformações plásticas;
- Rigorosa obediência dos materiais em estudo à formulação empírica traduzida pela equação (8) até $j = 1$.

5. COMPARAÇÃO DOS VALÔRES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO CALCULADOS COM OS MEDIDOS

Como já referido no item 3 e documentado em (5), a formulação empírica da curva de escoamento apresentada pelo autor (eq. 6) é capaz de melhor interpretação do comportamento plástico (curva de escoamento) de grande variedade de materiais metálicos (metais puros, ligas não-ferrosas, aços comuns e especiais, em diferentes estados de tratamento térmico; o cobre eletrolítico, o ferro puro, alguns aços carbono e um aço Cr-Ni foram ensaiados em níveis de temperatura até 300°C. Neste estudo também foram analisados os resultados obtidos por W. Panknin e Galal S.A. Shawki (7) com chapas finas laminadas a frio não-ferrosas e de aços.

Na tabela 1 encontram-se as características de todos êsses materiais. Segundo os acima citados pesquisadores, alguns materiais obedecem melhor à formulação empírica de mais generalizado emprêgo, ainda hoje (eq. 4) - 1º grupo da tabela 1 - , enquanto a curva de escoamento do 2º grupo satisfaz melhor à equação por êles preconizada (eq. 8). Publicaram êles, também, as curvas de escoamento dos dois referidos grupos de materiais, porém em escalas diferentes: (k_f, φ) - 1º grupo - e (k_f, ε_j) - 2º grupo.

Para justificar a validade de suas proposições, recorreram ao cálculo da resistência à tração. Esta característica do 1º grupo de materiais foi calculada pela eq. (15) e a do 2º grupo, pela eq. (16). Êstes resultados de cálculo encontram-se na tabela 2, assim como foram apresentados pelos autores acima citados (7).

Nesta ordem de idéias, o autor calculou a resistência à tração dos dois grupos de materiais pela eq. (14); para o segundo grupo de materiais recorreu, ainda, à eq. (3).

Os resultados assim obtidos, também constam da tabela 2. Nela figuram, igualmente, as diferenças percentuais - d - entre os valôres de resistência calculados - conforme as três formulações empíricas da curva de escoamento em confronto - com os respectivos valôres medidos.

Tabela 1 - CHAPAS FINAS LAMINADAS A FRIO: CARACTERÍSTICAS E GRANDEZAS MEDIDAS

Tabela 2 - COMPARAÇÕES DOS VALÔRES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO CALCULADAS COM OS MEDIDOS

Os resultados registrados na tab. 2 justificam as seguintes assertivas:

- O cálculo dos valôres da resistência à tração pela eq. (14) - decorrente da formulação empírica da curva de escoamento preconizada pelo autor e traduzida pela eq. (6) - reproduz, fielmente, os determinados no ensaio de tração normalizado para os dois grupos de materiais metálicos, com uma única exceção.

  Trata-se do corpo-de-prova de Al 99,5 (B), de baixa resistência à tração (igual a 7,6 kg/mm^2) e extraído de uma chapa de pequena espessura (igual a 0,491 mm). A diferença de - 0,1 kg/mm^2 (d = - 1,3%) decorre, provàvelmente, de imperfeições materiais ou do próprio corpo-de-prova ou, talvez, de arredondamentos dos cálculos.

- A comparação dos valôres de resistência à tração calculados pela eq. (15) - fundamentada na formulação empírica da curva de escoamento, de mais generalizada aplicação, atualmente, traduzida pela eq. (4), e aplicada ao 1º grupo de materiais - evidencia que todos êles são maiores do que os medidos

  A diferença percentual média é de + 5,7% (valôres extremos: + 11,2 e + 1%).

- Quanto ao 2º grupo de materiais, a aplicação da eq. (16) oriunda da formulação empírica da curva de escoamento apresentada por W. Panknin e G.S.A. Shanoki (eq. 8) - confirma a conclusão acima com uma única exceção, porém de grandeza insignificante (d = - 0,15%). A diferença percentual média é de + 2,5% (valôres extremos: +7,4% e - 0,15%).

CONCLUSÕES

- É muito simples o cálculo da resistência à tração de corpos-de-prova extraídos de chapas finas laminadas a frio de metais não-ferroso e de aços pela expressão que decorre da formulação empírica da curva de escoamento preconizada pelo autor.

Os valôres da resistência à tração assim calculados reproduzem, fielmente, os determinados no ensaio de tração normalizado .

- Para os materiais em estudo, os valôres calculados para a resistência à tração - conforme as outras duas formulações empíricas da curva de escoamento, (também potenciais como a do autor) - são maiores do que os determinados experimentalmente.

- Pela comparação de curvas de escoamento obtidas experimentalmente com as calculadas segundo o método indireto elaborado pelo autor, a sua maior eficiência e simplicidade já ficaram comprovadas em comparação com as outras duas, cujas bases foram agora analisadas.

Êste fato vem confirmar a superioridade da formulação empírica da curva de escoamento proposta pelo autor sob outro ponto-de-vista.

Tabela 1 - CHAPAS FINAS LAMINADAS A FRIO: CARACTERÍSTICAS E GRANDEZAS MEDIDAS

MATERIAL		ESPESSURA	VALÔRES EXPERIMENTAIS	
Nº	1º GRUPO, seg. (7)	mm	σ_t (kg/mm²)	μ
1	Chapa de aço para estampagem revestida de um lado com plástico(*) (C = 0,06 ... 0,07 %)	0,947	43,3	0,195
2	Chapa de aço para estampagem (C = 0,06 ... 0,07%)	0,595	38,8	0,191
3	Chapa de aço p/ estampagem profunda, qualidade especial. (C< 0,10%)	0,489	36,6	0,228
4	Chapa de aço p/ estampagem profunda (C < 0,10%)	0,995	35,5	0,27
5	Liga Al Mn (Mn = 1%) (DONAL-DIN)	0,529	11,1	0,187
6	Al 99,5 (A)	1,01	7,8	0,296
	(B)	0,491	7,6	0,254
	2º GRUPO, seg. (7)	ESPESSURA	σ_t	μ'
7	Aço inoxidável (Cr-Ni; (18.8)	0,505	69,5	0,482
8	Alpaca (Cu = 62%; Ni = 18%)	0,508	41,5	0,4
9	Latão 63 (Cu 62...65%) (A)Tamanho do grão 51μ	0,511	33,5	0,45
	(B)Tamanho do grão 28μ	0,508	35,0	0,393

(*) A determinação da curva de escoamento foi feita após a remoção da película de plástico. Nestas condições, foi medida a espessura.

Tabela 2 - COMPARAÇÃO DOS VALÔRES DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO CALCULADOS COM OS MEDIDOS

MATERIAL	medido kg/mm^2	(x) kg/mm^2	d %	(xxx) kg/mm^2	d %	EQUAÇÕES PARA σ_t RELAÇÃO ENTRE: μ, μ'
1º GRUPO						
1	43,3	43,3	0	48,2	11,2	(x) $\sigma_t = \sigma_p \cdot e^{\mu}$ (eq.14)
2	38,8	38,8	0	41,4	6,6	
3	36,6	36,6	0	39,7	8,3	(xx) $\mu^{\circ} = e^{\mu-1}$ (eq. 3)
4	35,5	35,5	0	38	7	
5	11,1	11,1	0	11,2	1	(xxx) $\sigma_t = \mu\left(\frac{\mu}{e}\right)^{\mu}$ (eq.15)
6 (A)	7,8	7,8	0	7,9	1,3	(xxxx) $\sigma_t = \mu'(1-\mu')\mu'^{\mu'}$ (eq.16)
6 (B)	7,6	7,5	-1,3	7,94	4,5	
2º GRUPO		(xx)		(xxxx)		
7	69,5	69,5	0	74,67	7,4	
8	41,5	41,5	0	41,57	0,2	
9 (A)	33,5	33,5	0	33,46	0,15	
9 (B)	35,0	35,0	0	35,75	2,2	

B I B L I O G R A F I A

(1) NADAI, A. - "Theorie of flow and fracture of solids". 2nd. ed. New York, Toronto e London, Mc Graw Hill, 1950, v. 1.

(2) SIEBEL, E. e SCHWAIGER, S. - "Zur Mechanik des Zugversuches",Arch. Eisenhüttenw., v. 19, p. 145/152, 1948

(3) PANKNIN, W. e SHAWKI, G.A.- "Zusammenhang zwischen Fliesskurve und Werkstoffkennwerten bildsamer metallischer Werkstoffe". Z. Metallkde. v. 52, p. 455/461, 1961.

(4) TRUSZKOWSKI, W. - "Etude de l'heteregénité des metaux soumis à l'éssai de traction". Rev. Métal., v. 55, nº 8, p.716/724, 1958.

(5) GRUNDIG, W. - "Determinação indireta da curva de escoamento de metais por meio do ensaio de tração normalizado. Um nôvo método. Contribuição técnica nº 485, apresentada ao XVII Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, julho de 1962.

(6) GRUNDIG, W. - "Significação e importância da curva de escoamento de metais para trabalho de dar forma a frio". Contribuição Técnica apresentada ao XVII Congresso Anual de ABM; Rio de Janeiro, julho de 1962.

(7) PANKNIN, W. e SHAWKI, G.A. - "Zusammenhang zwischen Fliesskurve und Werkstoffwerten bildsamer metallischer Werkstoffe". Z. Metallkde., v. 52, p. 455/461, 1961.

(8) SIEBEL, E. e POMP, A. - "Die Ermittlung der Form" anderungsfestigkeit von Metallen durch den Stauchversuch". Mitt. K.W.- Inst. - Eisenforschung, v. i, Abh. 80, p. 157/171, 1927.

(9) SIEBEL, E. - "Die Bedeutung der Fliesskurve bei der Kaltformgebung". Z. VDI, v. 98, p. 133/134, 1956.

(10) REIHLE, M. - "Ein einfaches Verfahren zur Aufnahme des Fliesskurven von Stahl bei Raumtemperatur". Arch. Eisenhüttenw., v. 32,p.332/336, 1961.

(11) PALEWSKI, O. - "Uber das Stauchen von Hohlzylindern und seine Eignung zur Bestimmung der Formanderungsfestigkeit dünner Bleche". Arch. Eisenhüttenw., v. 38, p. 437/442, 1967.

(12) HAYASHI, K.- "Funfstellige Tafeln der Kreis - und Hyperbelfunktionen". Berlin, Walter de Gruyter e Co., 1960.

(13) KÖRBER, F. e Rohland, W. -"Über den Einfluss von Legierungszusätzen und Temperaturänderungen auf die Verfestigung von Metallen". Mitt. K.-W.- Inst. Eisenforschung, v.5, p. 55/68, 1924

(14) KÖRBER, F. e MULLER, H. - "Die Verfestugung metallischer Werkstoffe beim Zug - und Cruckersuch". Mitt. K.-W.- Inst. Eisenforschung, v. 8, Abh. 71, p. 181/199, 1926.

DISCUSSÃO

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS, COM BASE NO SEU COMPORTAMENTO PLÁSTICO

Werner Grundig (1)

DEBATE:

Batista (2) - Observo na tabela 2, que os valôres da resistência à tração medidos coincidem, com uma única exceção, com os calculados conforme a equação 14, que decorre da formulação empírica preconizada pelo senhor.

Desejaria saber, qual o desvio-padrão dos valôres medidos da resistência à tração para cada material ensaiado?

Grundig - Esclareço, que os resultados experimentais tabelados no quadro 2 referem-se a um só corpo- de prova de cada um dos materiais identificados e contidos na tabela 1.

Desconheço o desvio-padrão dos valôres da resistência à tração medidos dos materiais ensaiados pelos autores já citados. Êles publicaram êstes resultados assim como estão consignados nas tabelas 1 e 2, referentes todos êles a um só corpo-de-prova de tração. Repito: o objetivo dêste trabalho foi o de calcular a resistência à tração conforme as três formulações empíricas da curva de escoamento em confronto e mostrar, também sob êste ponto-de-vista a superioridade da nova formulação empírica por mim preconizada , tanto para chapas finas de metais não-metálicos quanto para de aços carbono e especiais.

Ettore [3] - Êste seu trabalho tem um valor muito particular para mim, porque estou desenvolvendo um trabalho de doutoramento, em fase de redação. Nêle não é abordado o problema do comportamento de metais no ensaio de tração, porém, o da estampabilidade de chapas finas encruadas e recozidas de latão 70/30. Necessito, no entanto, conhecer o coeficiente de encruamento n, que é determinado no ensaio de tração.

Peço, pois, sua opinião acêrca dos seguintes problemas:
Qual a significação do chamado coeficiente de encruamento?
Qual o mais seguro procedimento experimental para determiná-lo?

Há, de fato, uma correlação estreita entre êste coeficiente e os diferentes índices de estampabilidade?

Grundig - Quanto à significação do coeficiente de encruamento n, devo aclarar, que êle expressa o incremento da resistência à deformação para o correspondente aumento da deformação logarítmica. A inclinação da curva de escoamento em qualquer ponto ou seja, a sua derivada primeira, é uma medida racional do encruamento do metal. Como referido no trabalho em discussão, usa-se, comumente, uma equação potencial como imagem matemática da curva de escoamento, embora seja mais precisa, principalmente para pequenas deformações, a sua representação conforme uma equação exponencial. O que têm de comum essas diferentes formulações empíricas da curva de escoamento é o seguinte: para deformações plásticas da ordem de grandezas das que intervém em qualquer etapa de qualquer processo de dar forma a frio a metais passa a ser quase-linear o andamento das curvas representativas daquelas funções e, também, o da curva experimental. Então, o coeficiente de encruamento é traduzido por uma constante. Seu valor numérico varia de metal para metal, em qualquer nível de temperatura; o tratamento térmico e o mecânico também influem, pois êste coeficiente é uma grandeza sensível à estrutura.

Analisamos a segunda pergunta. Sabido é, que o coeficiente n representa o alongamento logarítmico longitudinal pertinente à fôrça de tração máxima. A técnica experimental mais segura para determinação de n é a seguinte: marcam-se traços equidistantes no corpo-de-prova antes de ensaiá-lo; após a ruptura, são medidos a largura e a espessura em cada um dêsses traços para calcular respectivas áreas das seções transversais S, o que permite a determinação do alongamento logarítmico longitudinal , ao longo do corpo-de-prova como segue:

$S_o/S=e$, sendo S_o a seção resistente inicial do corpo-de-prova.

O valor de n é fàcilmente obtido se forem representados gràficamente os valôres de , que correspondem a cada um dos traços marcados ao longo do corpo-de-prova. O valor de n corresponde ao trecho dêsse gráfico em que não são obstadas as deformações (pelo efeito das cabeças e da compressão das garras da máquina de ensaio) e, nem tampouco, se manifesta a estricção do corpo-de-prova.

Esta técnica usei, com sucesso, no ensaio de uma grande série de corpos-de-prova extraídos de chapas finas de aço carbono para estampagem.

Para elucidar a terceira pergunta, animo-me a dizer o seguinte: não deve ser estreita a correlação entre qualquer índice usado para caracterizar o comportamento na estampagem e o coeficiente de encruamento n e isso porque aquêles índices decorrem de ensaios tecnológicos , de muito restrita significação física. Mais estreita é a correlação entre o real comportamento na estampagem e o chamado coeficiente de anisotropia de Lankford, que expressa a relação entre a deformação no plano da chapa e na direção perpendicular a êle.

Canuto (4) - Na formulação empírica da curva de escoamento preconizada pelo senhor (eq. 6) intervém o parâmetro

$$k_1 = P \frac{163,2 - 2q_P}{100 - q_P} ,$$

sendo P a resistência à tração verdadeira e q_P a contração nominal da seção resistente para a fôrça de tração máxima, expressa em percentagem. Evidentemente, estas duas grandezas de medida só podem ser determinadas com certo êrro inevitável.

Perguntaria então, porque no numerador figura 163,2 e, não simplesmente, 163?

Grundig - Esclareço, que na documentação experimental que serviu de base para deduzir a equação 6, os valôres da contração transversal foram determinados com aproximação de 0,1%, para cada corpo-de-prova ensaiado. Foi por esta razão, que mantive o número 163,2 e, não, 163. O valor numérico de k_1, por sua vez, foi calculado com aproximação de 1 kg/mm^2, fazendo-se o devido arredondamento no resultado final.

(1) Werner Grundig
Professor Catedrático na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Diretor de sua Faculdade de Arquitetura

(2) Prof. Batista Gargioni Filho
Professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Mestre em Ciências (Física)

(3) Ettore Bresciani Filho
Docente da EPUSP e Consultor do CEBRACO

(4) Talmir Canuto Costa
Diretor Geral do Minas Instituto de Tecnologia - MIT