

SIGNIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA DA CURVA DE ESCOAMENTO DE METAIS PARA OS TRABALHOS DE DAR FORMA A FRIO ⁽¹⁾

WERNER GRUNDIG ⁽²⁾

RESUMO

Discutida a formulação empírica da curva de escoamento de metais — em forma de uma equação potencial ou exponencial — será mostrado como esta curva e a do trabalho de deformação específico são calculadas por uma ou outra dessas funções. Estes cálculos, bem como a determinação analítica do “índice de encruabilidade”, necessitam apenas do conhecimento da tensão verdadeira e da contração transversal, ambas para a carga de tração máxima.

Igualmente será determinada a concordância entre as duas funções, através do cálculo do trabalho de deformação específico.

Será mostrada a utilidade prática das referidas curvas e a maneira de calculá-las, mediante um exemplo numérico.

Serão apresentadas sugestões para qualificação de materiais metálicos quanto à estampabilidade.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Para os trabalhos de conformação a frio de metais por laminação, trefilação, extrusão, etc., a força e o trabalho necessários para deformá-los, bem como a resistência mecânica das peças assim fabricadas, podem ser estimados, se fôr conhecida a curva de escoamento do metal a ser deformado. Ela traduz a lei da variação da resistência à deformação plástica com a correspondente deformação logarítmica. Acima da temperatura de recristalização, mantém-se praticamente invariável à solicitação a que está sujeito um metal durante a deformação, em virtude da formação de novos cristais. Este fenômeno ocorre paralelamente com a deformação. Na conformação a frio, bem ao contrário, cresce a resistência ao escorregamento nos planos cristalográficos dos grãos ao serem deformados, o que determina

(1) Contribuição Técnica n.º 459; apresentada ao XVII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Rio de Janeiro, julho de 1962.

(2) Membro da ABM; Professor Catedrático da Universidade do Rio Grande do Sul; Engenheiro Chefe do Serviço de Metais do ITERS; Porto Alegre, RS.

aumento contínuo da resistência que o metal opõe às progressivas deformações plásticas: o metal é encruado. A solicitação necessária para fazer progredir a deformação, também é ilustrada pela curva de escoamento.

O trabalho ideal de deformação plástica do volume V vem a ser:

$$A_i = V \int_0^{\varphi_s} \sigma d\varphi = Va = V\sigma_m\varphi_s \quad (1)$$

O valor de A_i , bem como o trabalho de deformação específica $a = A_i/V$ e a resistência média à deformação $\sigma_m = a/\varphi_s$, são igualmente caracterizados pela curva de escoamento, conforme mostra a figura 1.

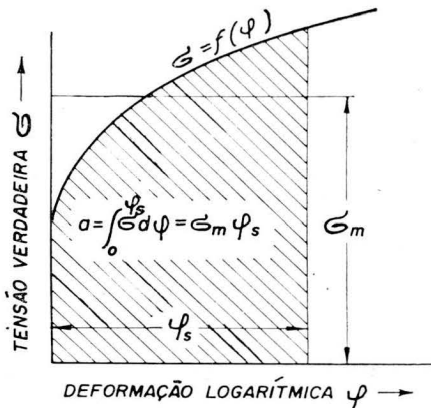


Fig. 1 — Determinação do trabalho de deformação específico "a" partindo da curva de escoamento.

Nos processos industriais de dar forma, no entanto, há perdas de trabalho inevitáveis, em consequência do atrito com as peças usadas para deformar os metais, de alterações em sua micro-estrutura e de outros fatores mais^{1, 2, 3, 4}. Assim, o trabalho real de deformação passa a ser

$$A = \frac{A_i}{\eta} = V \frac{\sigma_m}{\eta} \varphi_s = V\sigma_{m1} \varphi_s, \quad (2)$$

sendo η o coeficiente de rendimento do processo e $\sigma_{m1} = \sigma_m/\eta$, a resistência média à deformação, realmente oposta ou seja, a solicitação a que está efetivamente submetido o metal ao ser deformado.

O citado coeficiente η situa-se entre 0,4 e 0,8¹ para os diferentes processos de dar forma a frio. Assim, a solicitação a que está sujeito um metal para suportar determinada deformação nos processos industriais de conformação vem a ser de 125% a 250% da prevista com base na curva de escoamento.

O exposto evidencia a importância das curvas de escoamento. Elas vêm a ser, comumente, o ponto de partida para o tratamento matemático dos processos de dar forma a frio. As curvas de escoamento costumam ser determinadas experimentalmente, por meio de diferentes ensaios mecânicos.^{5, 6, 7, 8, 9.}

Pretende-se mostrar a seguir que, com base em apenas poucas medidas feitas no ensaio de tração normalizado, podem ser determinadas analiticamente:

- As curvas de escoamento;
- As curvas de trabalho específico de deformação plástica e
- O “índice de encruabilidade” de metais plásticamente deformáveis.

2. A FUNÇÃO POTENCIAL COMO FORMULAÇÃO EMPÍRICA DA CURVA DE ESCOAMENTO

Para interpretar analiticamente o comportamento plástico dos metais é comumente usada a função potencial^{10, 11, 12, 13, 14.}

$$\sigma = k\varphi^n \quad \varphi = \text{deformação} \quad (3)$$

Assim, a curva de escoamento de qualquer metal é caracterizado por duas constantes que lhe são próprias: o chamado coeficiente de resistência k — tensão verdadeira para $\varphi = 1$ — e o coeficiente de encruamento n — êste igual à deformação logarítmica para a força de tração máxima^{13.}

O COEFICIENTE DA RESISTÊNCIA k , como foi demonstrado pelo autor¹³, pode ser calculado pela fórmula

$$k = \sigma_p \frac{163,2 - 2 q_p}{100 - q_p} \quad (4)$$

sendo: $\sigma_p = P_{\max}/S_p$ — tensão verdadeira para a força de tração máxima, pois S_p representa a área da seção transversal do corpo-de-prova de tração quando atua essa carga-limite — e $q_p = 100 (S_o - S_p)/S_o$ — a contração da seção transversal, em relação à inicial S_o , também para P_{\max} .

O chamado COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO n , ou seja o expoente da função potencial (3) é calculado como segue:

$$n = \ln \frac{S_o}{S_p} \quad \text{ou} \quad e^{-n} = 1 - q_p \quad (5)$$

e exige a medida da área da seção resistente inicial S_o e daquela que corresponde a $P_{\max.}$ (*)

Determinadas essas duas grandezas, o valor de n pode ser tirado de uma tabela e^x , pois

$$e^n = \frac{S_o}{S_p} \quad (6)$$

Uma vez conhecidos os parâmetros k e n , a curva de escoamento é facilmente determinada, como na referência¹³.

Resumindo, a curva de escoamento de qualquer metal plásticamente deformável, pode ser calculado em termos da tensão verdadeira e da contração transversal, ambas referentes à carga máxima, o que exige unicamente a medida da área da seção transversal antes do ensaio e da área transversal uniforme, após o ensaio, e a leitura do valor da força de tração máxima.

É sabido igualmente que as tensões e deformações são uniformemente distribuídas na base de medida até a força atingir o valor máximo, e que, entre n e o maior alongamento uniforme nominal $n' = (l_p - l_o)/l_o$, existe a relação^{12, 15}:

$$n = \ln (1 + n') \quad \text{ou} \quad e^n - 1 = n' \quad (7)$$

A figura 2 ilustra a interdependência dessas duas grandezas e a diferença percentual entre elas.

Pode ser demonstrado igualmente¹², que o maior alongamento uniforme nominal n' vem a ser o expoente da seguinte equação potencial:

$$\sigma = k_1 q_a^{n'} \quad (8)$$

também usada, por alguns autores^{10, 11, 12, 14}, como formulação empírica da curva de escoamento.

(*) É indicado medir S_p no corpo-de-prova rompido, pois fora do cone de estricção e não perto das cabeças, a seção transversal é praticamente constante se fôr usado um corpo-de-prova longo.

Procedendo-se, assim, obtém-se um valor mais seguro para n do que medindo S_p no corpo-de-prova, enquanto sobre ele atuar a carga máxima, visto ser muito achatado o diagrama de tração em torno desta carga e ainda, por ser necessário mantê-la invariável durante 10 a 15 minutos para que se possam completar as deformações plásticas. Igualmente não é indicado medir-se o comprimento inicial da base de medida l_o e aquele pertinente a P_{\max} ou seja l_p , durante ou após o ensaio, para a determinação de n , embora este valor também possa ser calculado assim: $n = \ln \frac{l_p}{l_o}$ ou $e^n = \frac{l_p}{l_o}$

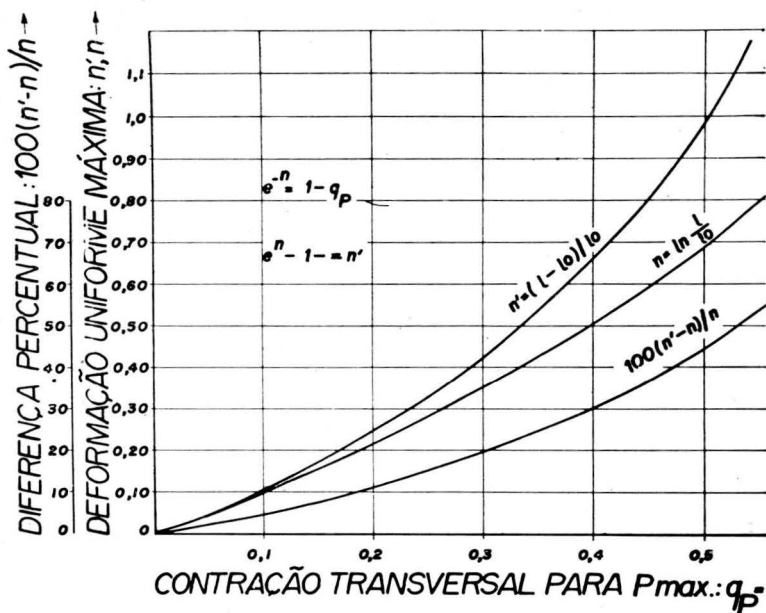


Fig. 2 — Interdependência das grandezas n e n' e a diferença percentual $100 (n' - n)/n$.

Nesta equação, a medida de deformação é a contração q_a ou o alongamento ε_a , porém referidos à seção ou ao comprimento pertinente ao valor atual da força de tração:

$$q_a = (S_o - S)/S \quad \text{ou} \quad \varepsilon_a = (l - l_o)/l = q_a \quad (9)$$

E, ainda k_1 é diferente de k . O valor de k_1 é determinado experimentalmente, por extrapolação da reta $\log \sigma = \log k_1 + n' \log q_a$ e representa aquela tensão a que corresponderia $q_a = 1$.

A função potencial (equação 3 ou 7) não interpreta, evidentemente, o comportamento plástico de metais para deformações próximas de zero, pois estas são predominantemente de natureza elástica.

Assim, a lei parabólica traduzida pela função (3) às vezes, é substituída pela seguinte equação:

$$\sigma = \bar{\sigma}_o + k\varphi^n, \quad (10)$$

a qual não se anula para $\varphi = 0$, pois ela intercepta o eixo das tensões no ponto $(0, \bar{\sigma}_o)$.

Por outro lado, foram apresentadas as provas¹³ da formulação empírica da curva de escoamento, que decorre das minuciosas experiências de F. Körber e W. Rohland¹⁶ e que vem a ser a função exponencial:

$$\sigma = \sigma_o + 100 \alpha (1 - e^{-\varphi}), \quad (11)$$

sendo σ_o e α parâmetros característicos para cada metal. Eles foram determinados experimentalmente pelos citados autores para uma série de metais ferrosos e não-ferrosos.

No entanto, os valores de σ_o e α também podem ser calculados seguramente como segue: (*)

$$\sigma_o = \sigma_p \frac{100 - 2 q_p}{100 - q_p} \quad (12); \quad \alpha = \frac{\sigma_p}{100 - q_p} \quad (13)$$

Verifica-se prontamente, que a função exponencial (11) não se anula para $\varphi = 0$, pois assume o valor σ_o .

Tendo presente o exposto e a muito boa concordância da função exponencial (11) com a função potencial (3), propõe-se manter esta função como formulação empírica da curva de escoamento de metais, porém não a aplicando nas deformações próximas de zero. (**)

3. O TRABALHO ESPECÍFICO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

O valor do trabalho específico de deformação “ a ” intervem em muitas fórmulas que se destinam ao cálculo da força e do trabalho necessários para deformar metais em processos de conformação a frio. (***) Por outro lado, através do cálculo de “ a ” também pode ser revelado o grau de concordância entre a função potencial (3) e a função exponencial (11).

(*) A decisão desta fórmula encontra-se na referência (13).

(**) A este respeito convém mencionar que a Associação dos Engenheiros Alemães — VDI — Fachgruppe, Betriebstechnik — publicou as curvas de escoamento e as correspondentes curvas para o trabalho de deformação específico para uma série de aços e metais não-ferrosos. Não têm elas valor normativo. Elas significam para os trabalhos de conformação a frio o que representam os diagramas de equilíbrio e de transformação para os tratamentos térmicos.

Estas curvas de escoamento foram determinadas no ensaio de compressão, como exposto nas referências (6) (7) (17); elas não interceptam o eixo das tensões.

(***) Veja-se, por exemplo, a tabela 1, p. 758/759 em: “Mechanik plastischer Körper”, por E. Siebel. Manual Hütte, 1.º vol., ed. alemã de 1955.

Partindo da função potencial (3), a lei de variação de a com φ é:

$$a = \int_0^{\varphi_s} k \varphi^n d\varphi = \frac{\sigma_s \varphi_s}{1 + n} \quad (14)$$

E, para $\varphi = n$ ou $\varphi = 1$, tem-se:

$$a_n = \frac{\sigma_p n}{1 + n} \quad (15); \quad a_1 = \frac{k}{1 + n} \quad (16)$$

Por outro lado, à luz da função potencial (11), a curva $a = f(\varphi)$ é expressa pela seguinte função:

$$\bar{a} = \sigma_o \varphi_s + 100 \alpha (\varphi_s + e^{-\varphi_s} - 1) \quad (17)$$

Para $\varphi = n$ ou $\varphi = 1$, resulta:

$$\bar{a}_n = \sigma_o n + 100 \alpha (n + e^{-n} - 1) \quad (18)$$

$$\bar{a}_1 = \sigma_o + 36,8 \alpha \quad (19)$$

Êsses diferentes valores de "a" foram calculados para todos os metais ensaiados por F. Körber e W. Rohland¹⁶, cujas curvas de escoamento encontram-se nas figuras 2 a 7 da referência¹³, concluindo-se que:

— Os valores dos trabalhos específicos de deformação plástica são praticamente iguais, partindo-se da função potencial (3) ou da função exponencial (11).

Com efeito: para $\varphi = n$, a diferença percentual entre êles varia de +11,0% a -4,1%, e o valor médio dessas diferenças, em valor absoluto, é de |6,5%|.

E, para $\varphi = 1$, essas diferenças extremas são de +10-3% e -3,6%, sendo o valor médio, em valor absoluto, de apenas |3,1%|.

— Assim, o trabalho específico de deformação plástica pode ser calculado, simplesmente, com base na função potencial (3), para qualquer deformação-limite, ou seja, à luz da equação (14).

Êstes cálculos confirmam o fato já apontado na referência bibliográfica¹³ — através das figuras 2 a 7 — de ser muito boa a concordância entre a função potencial (3) e a exponencial (11), formulações empíricas da curva de escoamento de metais.

4. EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO INDIRETA DA CURVA DE ESCOAMENTO

Para mostrar a eficiência do método de determinação indireta da curva de escoamento apresentado pelo autor¹³, será ele aplicado à interpretação das experiências de M. Reihle⁹, feitas em chapas de aço para estampagem profunda, de 2 mm de espessura. Foram por ele ensaiados 5 corpos-de-prova longos, cortados da chapa em estudo e ensaiados à tração no estado em que ela foi fornecida. Os valores médios obtidos foram os seguintes:

$$\sigma_t = 33,2 \text{ kg/mm}^2 \text{ (resistência à tração)}$$

$$\sigma_p = 42,3 \text{ kg/mm}^2 \text{ (resistência à tração verdadeira)}$$

$$q_p = 21,4\% \text{ (contração nominal da seção transversal, para } P_{\max})$$

$$n = 0,24 \text{ (*) (deformação logarítmica para } P_{\max})$$

O cálculo de k pela fórmula (14), dá o seguinte valor médio: $k = 64,8 \text{ kg/mm}^2$.

Representando-se em acôrdo com o referido método, os dois pontos (n, σ_p) e $(1, k)$ em papel di-logarítmico (êstes assinalados com x), é obtida a reta representada na figura 3, ou seja, a curva de escoamento em escala di-logarítmica.

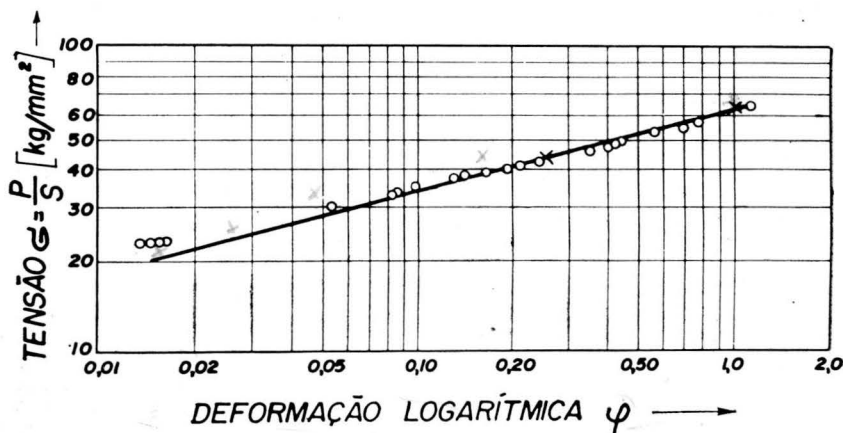


Fig. 3 — Curva de escoamento de uma classe de chapa de aço-carbono para estampagem profunda. Comparação do método proposto na referência (13) com os resultados obtidos no ensaio de tração.

(*) Se não estivesse sido determinado o valor de q_p , poderia ser êle calculado em termos de n , pois $\bar{q}_p = 1 - e^{-n}$.

Este cálculo dá: $\bar{q}_p = 1 - e^{-0,24} = 0,213 = 21,3\%$.

Nesta mesma figura estão também representados os pontos experimentais obtidos por M. Reihle em corpos-de-prova previamente encruados por laminação a frio; verifica-se ser boa a concordância entre os pontos experimentais e a reta obtida pelo método em estudo, fazendo-se abstração dos pontos que correspondem a pequenas deformações.

Na figura 4, enfim, a reta antes referida é representada em escala natural, bem como a curva do trabalho de deformação específico, calculada pela equação (14).

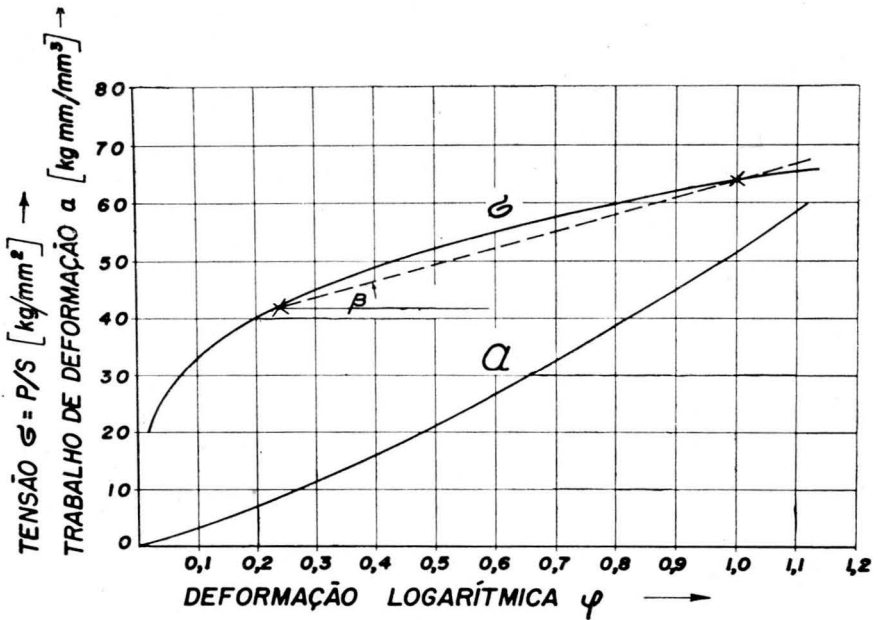


Fig. 4 — Curva de escoamento e a do trabalho de deformação específico para a chapa de aço para a estampagem profunda em estudo.

Verifica-se que a inclinação da curva de escoamento entre os pontos (n, σ_p) e $(1, k)$ é caracterizada pela respectiva secante. Esta inclinação pode ser calculada, uma vez conhecido o índice de encruabilidade α , que, no presente caso, em atenção à fórmula (13) é:

$$\alpha = \frac{\sigma_p}{100 - q_p} = \frac{42,3}{78,6} = 0,54 \text{ kg/mm}^2$$

Este índice, como já referido¹³, expressa o necessário incremento de tensão para aumentar a contração de 1% e, na curva de encruamento $\sigma - q$, define a inclinação do seu trecho reto ou seja

$$\alpha = \frac{k - \sigma_p}{63,2 - q_p} = \frac{64,8 - 42,3}{63,2 - 21,4} = 0,54 \text{ kg/mm}^2$$

Expressando a variação da contração ($62,2 - q_p$) em termos de φ ou seja 100 (1 - n) (fig. 4), obtém-se para o mesmo incremento de tensão:

$$\log \beta = \frac{k - \sigma_p}{100 (1 - n)} = 0,296 \text{ kg/mm}^2 \text{ e } \beta = 16^\circ 30'$$

Esta inclinação é, pois, equivalente à definida por α . Na figura 4, o ângulo da reta em relação ao eixo horizontal, traçada a partir do ponto (n , σ_p), é de $16^\circ 30'$.

5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO E DO TRABALHO DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

Na laminação a frio, a força de compressão exercida pelos cilindros e a resistência à tração do produto laminado podem ser estimadas, se for conhecida a curva de escoamento do metal a laminar. Nesta operação, a força de compressão dos cilindros é calculada como sendo igual ao produto da área da superfície comprimida S_c pela resistência média efetivamente oposta pelo metal $\sigma_{m1} = a/n\varphi_s$. O valor da área da superfície comprimida na laminação vem a ser igual a bl_c , sendo b a largura do material a laminar e $l_c = \sqrt{R (h_0 - h_1)}$ o comprimento do material sujeito à laminação (fig. 5).

$h_0, h_1 =$ ESPESSURA DO MATERIAL ANTES E APÓS A LAMINAÇÃO

$l_c =$ COMPRIMENTO DO MATERIAL SUJEITO À LAMINAÇÃO

$P =$ FÔRÇA DE COMPRESSÃO NA LAMINAÇÃO

$R =$ RAI DO CILINDRO DO LAMINADOR

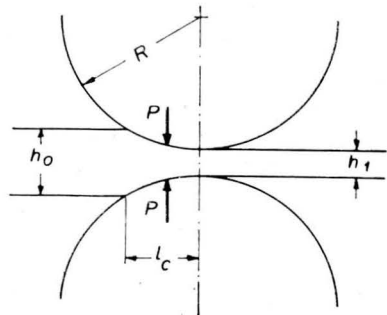


Fig. 5 — Laminação a frio de chapa fina de aço.

Na laminação a frio de chapas finas de aço — de qualidade igual à da chapa para estampagem profunda em estudo — da seção inicial $S_o = 90 \text{ mm}^2$ ($1,5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$) para a seção final $S_f = 60 \text{ mm}^2$ ($1,0 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$) com cilindro de $2R = 180 \text{ mm}$, o referido comprimento vem a ser:

$$l_c = \sqrt{90 (1,5 - 1,0)} = 6,7 \text{ mm}$$

e a área comprimida passa a ser

$$S_c = 60 \cdot 6,7 = 402 \text{ mm}^2$$

Sendo a deformação logarítmica:

$$\varphi = \ln (S_o/S_f) = \ln (90/60) = e^{1,5} = 0,40.$$

O respectivo trabalho de deformação específico, tendo presente a figura 4 ou a equação (14), é de $a_{0,40} = 16 \text{ kg/mm}^3$ e para a resistência à deformação média, obtém-se:

$$\sigma_{m1} = \frac{a}{\varphi_s} = \frac{16}{0,40} = 40 \text{ kg/mm}^2.$$

Assim, para um coeficiente estimado de rendimento $n = 0,70$ resulta para a compressão de laminação:

$$P = S_c \frac{\sigma_{m1}}{n} = 402 \frac{40}{0,7} = 23.000 \text{ kg}$$

As curvas de escoamento também permitem estimar a resistência à deformação do produto conformado. É sabido que, para deformações moderadas, desaparece o limite de escoamento natural. E, para deformações $\varphi > 25\%$ ¹ de aços de baixo carbono coincidem praticamente o limite $\sigma_{0,2}$ com a resistência à tração. Assim a curva de escoamento (figura 4), dá o valor de $\sigma_{0,2}$ para uma deformação logarítmica inferior a 25% e, para maiores deformações, indica a resistência à tração verdadeira.

Para o exemplo estudado, a resistência à tração verdadeira da chapa fina de aço laminado a frio passa a ser 49 kg/mm^2 tendo sofrido, pois um aumento de $49 - 42,3 = 6,7 \text{ kg/mm}^2$ ou seja de 16%, devido à diminuição da espessura de 2,0 mm para 1,6 mm ($\varphi = 0,40$), por laminação a frio.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS VISANDO À PROPOSIÇÃO DE UM ÍNDICE DE ESTAMPABILIDADE

A previsão segura de comportamento de chapas na estampagem profunda continua sendo um problema aberto.

Embora as condições de solicitação possam ser bem diferentes na fabricação dos diversos produtos, por estes processos, ao menos uma das tensões principais é de tração.

Seria desejável que fosse dada maior ênfase aos ensinamentos que decorrem da análise das curvas de escoamento e das condições que levam à fissuração ou à formação de outras falhas mais visando a qualificação dos materiais metálicos a serem deformados a frio.

Para caracterizar o comportamento de metais na estampagem profunda, duas grandezas parecem ser de especial importância:

- a que expressa a “anisotropia estrutural” e
- aquela que defina a “encruabilidade”.

O “COEFICIENTE DE ANISOTROPIA” r é definido pela relação entre a deformação logarítmica da largura do corpo-de-prova e a deformação logarítmica da sua espessura, isto é:

$$r = \frac{\ln (b/b_0)}{\ln (h/h_0)} = \frac{e^{b/b_0}}{e^{h/h_0}},$$

onde b_0 e h_0 são a largura e a espessura antes do ensaio.

W. T. Lankford, S. C. Snyder e J. A. Bauscher¹⁸, verificaram que o valor de r mantém-se invariável até a carga de tração máxima, e que este índice varia com o ângulo em relação à direção de laminação. Altos valores de r (da ordem de $r_e \geq 1,50$) caracterizam chapas de bom comportamento na deformação assimétrica durante a estampagem profunda. E, na direção longitudinal, são maiores as diferenças entre os valores de r pertinentes a chapas de bom e mau comportamento do que em outras direções.

Destarte, para medir o índice r recomenda-se assim proceder; extrair corpos-de-prova na direção longitudinal de laminação, e medir a largura e a espessura antes e após o ensaio de tração, na região em que essas medidas são praticamente constantes, ou seja, fora da zona de estricção e não perto das cabeças.

Evidentemente, os corpos-de-prova devem ser suficientemente longos e largos.

A “ENCRAABILIDADE” de metais, por sua vez, é definida pela inclinação da curva de escoamento; ela decresce à medida

que aumenta a deformação; para deformações muito grandes, a inclinação é praticamente constante. No período de estrição, o índice de encruabilidade α permite o cálculo da inclinação média da curva de escoamento (fig. 4).

Na opinião da maioria dos autores, o chamado “*coeficiente de encruamento*”, ou seja, o expoente n da função parabólica $\sigma = k \varphi^n$, expressa a característica em estudo e isso porque a inclinação da referida função ($\sigma' = \frac{\sigma}{\varphi} n$) é proporcional a n .

Segundo outros pesquisadores, o coeficiente k da citada função, também vem a ser uma medida do encruamento.

Em acôrdo com a referência bibliográfica¹⁸:

- A consideração isolada de k ou n de chapas de aço-carbono não evidencia o seu real comportamento na estampagem profunda; o mesmo se verifica associando-se essas grandezas (k/n ou kn).
- A consiração isolada de r_1 , na direção longitudinal, é mais segura.
- É bastante satisfatório o índice $r_1 n$, embora êste envolva apenas grandezas de deformação.

Com base no exposto, anima-se o autor a sugerir que, no ensaio de tração, também seja determinado o coeficiente α e que êle seja relacionado com o índice r_1 , tendo em vista a caracterização da estampabilidade de materiais metálicos.

Note-se que o valor do coeficiente de encruamento específico α não depende apenas de uma grandeza de deformação, mas também da resistência à tração verdadeira (fórmula 13) do material a estampar. Resulta daí, que, associando-se r_1 e α seriam consideradas simultâneamente grandezas de deformação e de tensão verdadeiras.

É evidente que a confirmação ou não da sugestão apresentada dependerá da observação criteriosa do comportamento de chapas na estampagem profunda, em condições industriais, e da sua comparação com medidas feitas em laboratório. Assim e só assim, poderá ser encontrada uma solução para o contrôle e a qualificação segura de chapas finas para estampagem profunda.

O mesmo critério deverá ser seguido, evidentemente, para qualificar os materiais metálicos a serem submetidos a outros processos de dar forma a frio. Na busca de índices realmente expressivos, propõe-se a determinação das duas grandezas α e r_1 .

É mais a título informativo do que para comprovar a validade da proposição, que analisamos os resultados e observações publicadas na referência bibliográfica¹⁸, que se referem a chapas

finas de aço-carbono usadas em difícil operação industrial de estampagem profunda assimétrica (estado de tensão biaxial de tração).

Os dados experimentais (r_1 , n e σ_t) permitem estimar os valores de:

$$\sigma_p = \sigma_t (1 + n); q_p = 100 (1 - e^{-n}); \alpha = \sigma_p/100 - q_p).$$

Para chapas de bom comportamento na referida estampagem, o índice de qualidade proposto e assim estimado é $r_1 \alpha = 0,81$ e, para outros dois lotes de chapas comprovadamente ruins, este índice é de apenas 0,56 a 0,31, respectivamente.

No debate deste trabalho¹⁸, R. H. Heyer e R. L. Solter, do Laboratório de Pesquisas da Armco Steel Corp., comunicaram a sua experiência na estampagem de complicada peça simétrica, também de chapas de aço-carbono, de 0,0425" e 0,0415". Mediram êles as grandezas r , n e σ_t , o que permitiu a determinação aproximada do coeficiente de encruamento específico α e, portanto, do índice de qualidade proposto $r\alpha$, concluindo-se, que este é de 0,69 para chapas boas e de 0,59, para chapas de mau comportamento na estampagem.

Em termos práticos, o autor propõe o seguinte procedimento, como contribuição para esclarecer o complexo problema da caracterização da estampabilidade de chapas de aço e de metais não-ferrosos:

- Descartar, para ensaio, chapas de comprovado bom e mau comportamento em diferentes processos industriais de estampagem profunda, executados em determinadas e controladas condições. Identificar, se possível, fatores metalúrgicos de elaboração, de transformação e outros mais dessas chapas.
- Determinar, no ensaio de tração, o proposto índice de qualidade $r_1 \alpha$, e em diagramas $r_1 - \alpha$, marcar as regiões às quais correspondem chapas comprovadamente boas e ruins, em diferentes operações de estampagem.
Êsses diagramas deverão ser determinados para cada classe de materiais metálicos, por exemplo, para chapas de aço-carbono, de aços especiais, de latões α , de alumínio, etc.
- Os corpos-de-prova devem ser maiores do que os normalizados e muito cuidado precisa ser dispensado em sua confecção. (*)

(*) M. Reihle⁹, para chapas de 2 mm de espessura ensaiou corpos-de-prova com 15 mm \times 150 mm na base de medida, frezados em pacote, e verificou que a uma imprecisão de $\pm 1\%$ na medida dessas dimensões, antes e após o ensaio, corresponde uma incerteza da ordem de $\pm 8\%$ na medida da deformação logarítmica para a carga máxima e de uns $\pm 2\%$ na da resistência à tração verdadeira. Estes dados têm apenas valor informativo e não permitem apresentar proposição concreta para as dimensões dos corpos-de-prova destinados à obtenção da curva de escoamento.

No caso de serem muito largos e fixados às garras da máquina de ensaio de forma tal — por meio de pinos com porcas¹⁹ — que nelas não possam escorregar e, junto a elas, ser também obstada a deformação perpendicular ao eixo do corpo-de-prova, o ensaio de tração deixa de ser uni-axial. Nestas condições, este ensaio prático complexo afasta-se do ensaio de tração simples e aproxima-se do caso freqüente, onde a estampagem implica numa distensão em uma direção e onde a contração lateral é obstada. Este ensaio é de especial interesse porque permite observar o início e a propagação da ruptura, o que sempre ocorre na parte central dos corpos-de-prova.

Este ensaio foi proposto por J. Pomey, A. Royez e P. Dhez¹⁹ no: "Colloque sur la Mise en Forme des Tôles minces et les Essais de Tôles"; Paris, maio de 1960.

- Recomenda-se pois também determinar o diagrama de tração por meio de defletômetro montado no eixo médio de corpos-de-prova largos (largura da ordem de 200 mm) e comparar os resultados com os obtidos no ensaio de tração uniaxial.
- Verificar se os resultados obtidos no ensaio de tração uniaxial e os colhidos em corpos-de-prova largos permitem substituir aquêles que costumam ser feitos para caracterizar a estampabilidade; uma apreciação crítica desses ensaios e dos respectivos índices encontra-se por exemplo, nas referências bibliográficas^{19 e 20}.

7. RESUMO E CONCLUSÕES

Para determinado tipo de chapas de aço-carbono para estampagem profunda, cuja curva de escoamento fôra determinada experimentalmente, foram calculadas esta curva e a do trabalho de deformação específico, bem como o índice de encruabilidade específico α , com base na carga máxima no ensaio de tração, e nas seções inicial e naquela que corresponde àquela carga, em acôrdo com as deduzidas neste trabalho.

A concordância entre a função potencial (3) e a função exponencial (11) — formulações empíricas da curva de escoamento — foi comprovada através do cálculo do trabalho de deformação específico, pois a função exponencial também pode ser calculada em termos dos mesmos dados experimentais acima referidos.

Foi apresentado um exemplo numérico para mostrar a utilidade prática da curva de escoamento e a do trabalho de deformação específico e para indicar a determinação analítica das referidas curvas.

Foram apresentadas sugestões para a qualificação dos materiais metálicos para serem submetidos à estampagem profunda ou a outros processos de dar forma a frio, com base em índices obtidos da curva de escoamento.

BIBLIOGRAFIA

1. SIEBEL, E. — “Die Bedeutung der Fließkurve bei der Kaltformgebung”. Z. VDI, v. 98, p. 133/134, 1956.
2. SACHS, G. — “Spanlose Formung der Metalle”. In: Handbuch des Metallphysik, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1935 — 41, v. 3.
3. POMP, A. e MARKE, E. — “Kaltformbarkeit”. In: Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, 5. Aufl., Düsseldorf, Verlag Stahleisen, 1953.
4. SIEBEL, E. — “Mechanik plastischer Körper”. In: Hütte, des Ing. Taschenbuch, 28. Aufl., Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn, 1955, v. 1, p. 752/763.
5. ROS, M. e EICHINGER, A. — “Die Bruchgefahr fester Körper bei ruhender, statischer Beanspruchung”. Bericht n.º 172. Zürich, EMPA, 1949.
6. SIEBEL, E. e POMP, A. — “Die Ermittlung der Formänderungsfestigkeit von Metallen durch den Stauchversuch”. Mitt. K.-W.-Inst. Eisenforschung, v. 9, Abh. 80, p. 157/171, 1927.
7. SIEBEL, E. e POMP, A. — “Zur Weiterentwicklung des Druckversuches”. Mitt. K.-W.-Inst. Eisenforschung, v. 10, Abh. 99, p. 56/62, 1928.
8. GENSAMER, M. — “The tension test”. In: Metals Handbook. Cleveland, ASM, 1948, p. 105/109.
9. REIHLE, M. — “Ein einfaches Verfahren zur Aufnahme der Fließkurven von Stahl bei Raumtemperatur”. Arch. Eisenhüttenw., v. 32, p. 331-336, 1961.
10. KOSTRON, H. — “Zur Mathematik des Zugversuches”. Arch. Eisenhüttenw., v. 22, p. 317/326, 1951.
11. KRISCH, A. — “Eine mathematische Gleichung der Spannungs-Dehnungskurve des Zugversuches”. Arch. Eisenhüttenw., v. 24, p. 401/405, 1953.
12. PANKNIN, W. e SHAWKI, G. A. — “Zusammenhang zwischen Fließkurve und Werkstoffkennwerten bildsamer metallischer Werkstoffe”. Z. Metallkde., v. 52, p. 455-461, 1961.
13. GRUNDIG, W. — “Determinação indireta da curva de escoamento de metais, por meio do ensaio de tração normalizado. Um novo método”. Contribuição Técnica apresentada ao XVII Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro, julho de 1962.
14. MAC GREGOR, C. W. — “The tension test”. In: Proc. ASTM. Philadelphia, 1940. v. 40, p. 508/534.
15. NADAI, A. — “Theorie of flow and fracture of solids”. 2nd ed., v. 1. New York, Toronto e London. Mc Graw-Hill, 1950.
16. KORBER, F. e ROHLAND, W. — “Über den Einfluss von Legierungszusätzen und Temperaturänderungen auf die Verfestigung von Metallen”. Mitt. K.-W.-Inst. Eisenforschung, v. 10, Abh. 100, p. 63/69, 1928.
18. LANKFORD, W. I.; SNYDER, S. C. e BAUSCHER, J. A. — “New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets”. In: Trans. ASM, Cleveland, 1950, v. 42, p. 1197/1232.
19. POMEY, I.; ROYEZ, A. e DHEZ, P. — “Essai de définition de l'embou-tissabilité”. Rev. Métal. Mém. Sci., v. 57, p. 741/754, 1960.
20. SVAHN, O. — “Deep-drawing properties of sheet steel”. J. Iron and Steel Inst., v. 177, p. 129/142, 1954.