Proc. 39th Ann. Congress of Brazilian Soc. for Metals Vol. 3, p. 121, 1984.

UM ENSAIO DE PENETRAÇÃO CONTÍNUA PARA METAIS

Marc A. Meyers*, David Jaramillo V.** e Shinhou Kuriyama+

Descreve-se um ensaio de penetração contínua em que o penetrador tem forma de aresta de faca com angulo de 30°. A taxa de carregamento é constante, o estado de deformações é plano, e registra-se a carga em função da profundidade de penetração. Ensaiaram-se Ni-200 e latão 70/30 sob diferentes condições de encruamento e recozimento. Aplicou-se o metodo de elementos finitos para modelar o processo de deformação. Obtiveram-se relações lineares entre a carga e a penetração experimentalmente e mediante a simulação por computador. Esta linearidade não é encontrada nos penetradores convencionais de geometria axisimétrica.

---

*Membro da ABM, engenheiro, M.Sc., Ph.D., Professor Adjunto, Department of Materials Science and Engineering, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, EUA

**Engenheiro, M.Sc., Estudante de Pós-Graduação na mesma instituição.

+Engenheiro, Ph.D., Pesquisador Associado na mesma instituição.

1. INTRODUÇÃO

O ensaio de dureza é o ensaio mecanico mais comum. Produz um número arbitrario que é relacionado `a resistencia mecanica do material. O ensaio de tração, por outro lado, produz parametros de natureza mais fundamental. Numerosas tentativas visando correlacionar a dureza com parametros do ensaio de tração tem sido feitas [1-5]. A complexidade do estado de deformações sob o penetrador torna esta tarefa extremamente dificil. Por esta razão os modelos existentes admitem que o material não encrua, tanto usando a teoria de campo de linhas de deslizamento [6,7], quanto na análise de Shaw et alii [8,2].

Este trabalho descreve uma tentativa de obter melhor correlação; para tal usou-se uma geometria de penetrador especial e desenvolveu-se um programa de computador usando o metodo de elementos finitos e incorporando o encruamento do metal.

2. TECNICAS EXPERIMENTAIS

2.1 Materiais

Usaram-se duas ligas neste trabalho: Nickel 200 (9.9,5 pcto. Ni) e latão (70pcto. Cu e 30 pcto. Zn). Este material sofreu recozimento e laminação subsequente, com reduções de 20, 40, 60, 80, e 90 por cento. O material reduzido 80 por cento foi recozido a temperaturas entre 200 e 700 ^{o}C por uma hora. Obteve-se deste modo toda uma gama de limites de escoamento e taxas de encruamento. Todas as condições foram ensaiadas em uma maquina MTS-810 sob tração usando-se extensometro; usaram-se corpos de prova `de tração paralelos e perpendiculares `a direção de laminação.

2.2 Sistema de Penetração

A Figura 1 mostra o sistema de penetração contínua. O penetrador com angulo de 30° e' pressionado contra o corpo de prova a uma taxa de deslocamento constante do piston. A carga e' registrada por uma célula de carga e a penetração e' registrada em um extensômetro. Estas duas variáveis são plotadas automaticamente em um gráfico carga x penetração. O penetrador alongado tipo aresta-de-faca produz um estado de deformações aproximadamente plano; este penetrador permite determinar a anisotropia de reposta mecanica produzida pela textura de deformação mediante ensaios a diferentes orientações em relação à direção de laminação. A velocidade de carregamento usada foi de 0,0125 mms^{-1}. Os penetradores foram fabricados com aço W1 temperado de 700°C e revenido a 200°C. Usou-se sulfeto de molibdenio e graxa de vácuo para diminuir of atrito entre penetrador e corpo de prova.

2.3 Programa de Elementos Finitos

Desenvolveu-se um programa de computador baseado no programa de Swedlow [10]. As características principais do programa são os elementos triangulares, a incorporação da deformação plástica mediante uma equação do tipo Hollomon para o material (exprimindo tensão efetiva em função da deformação efetiva), e a representação da função de deslocamento por um polinomio linear. Usou-se tambem a documentação dada por Nyo e Sinclair [11] para o uso do programa. A Figura 2 mostra a malha, consistindo de 70 elementos e 46 pontos nodais. Admitiu-se uma deformação girando o contorno AB. Os calculos são repetidos para incrementos de deformacao dL ate' que se tenha o deslocamento L. Os pontos ao longo de CD e DE são fixos;

os pontos ao longo de BC movem-se somente ao longo da direção x. Esta sequencia de deformação e' diferente daquela que ocorre no processo de deformação. No entanto, a teoria de plasticidade de Prandtl-Reuss, usada no modelo de elementos finitos elasto-plastico, admite que a deformação é independente do caminho percorrido. Portanto, justifica-se esta hipótese.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de tração

Executaram-se ensaios de tração em corpos de prova longitudinais e transversais para todas as condições obtidas, no Ni-200 e no latão. Não houve diferenças significativas entre as propriedades mecanicas longitudinais e transversais. Assim, este parametro não será discutido. Enquanto que a redução por laminação produziu o esperado aumento no limite de escoamento, a dutilidade (alongamento uniforme) viu-se muito reduzida. Recozimentos permitiram alcançar-se valores relativamente elevados de dutilidade sem perda significativa no limite de escoamento.

A Figura 3 mostra uma curva mestre (tensão efetiva versus deformacão efetiva) para niquel apos diferentes reduções por laminação. As diferentes curvas tensão-deformação são traçadas tendo como origem a deformação efetiva imposta pela laminação (20, 40, 60, 80, e 90 por cento de redução). As equações que permitem calcular a tensão e deformação efetivas são dadas por Dieter [12]. As curvas de tensão real efetiva - deformação real efetiva para os ensaios uniaxiais são dadas pelas linhas mais finas. A curva-mestre superior corresponde aos limites de ruptura. Nota-se que a taxa de encruamento

para os ensaios uniaxiais é superior `a taxa de encruamento em laminacão. Se as duas taxas de encruamento fossem iguais as duas curvas - mestre coincidiriam.

3.2 Ensaios de Penetração

A Figura 4(a) mostra as curvas tensão nominal-deformação nominal para o niquel após 80 por cento de redução por laminação seguido por diferentes recozimentos. Pode-se claramente ver o decréscimo no limite de escoamento com o aumento na temperatura de recozimento. A Figura 4(b) mostra as curvas de penetração contínua correspondentes. A caracteristica mais importante destes ensaios é que as curvas podem ser consideradas, `a primeira aproximação, como retas. As diferenças em coeficiente angular sao consistentes com as diferencas em limite de escoamento.

Com o objetivo de determinar-se a reprodutibilidade destes ensaios, oito ensaios de penetração contínua foram feitos no latão recozido. Converteram-se os coeficientes angulares das retas em razões carga/área projetada. Obteve-se um valor medio de 1,8 MN/m^2 com um desvio padrao de 0,07 MN/m^2. Isto corresponde a um erro padrão de aproximadamente 4 por cento. Portanto, a reprodutibilidade deste ensaio é boa.

As razões carga/área projetada para todas as condições (tanto em Ni-200 quanto em latão) foram computadas e estão plotadas na Figura 5 em função das tensões de escoamento. Pode-se ver que os dados experimentais caem na faixa hachurada. Somente dois pontos (para Ni-200) estão fora da faixa. Isto pode ser explicado pela penetração que foi feita na superfície do material, enquanto que o corpo de prova de tração representa toda

a espessura. Para pequenas reduções (20 pcto.) o encruamento não é uniforme; a superficie sofre maior deformação. A seguinte equação quadrática descreve satisfatoriamente o gráfico.

$$\sigma_e = 20e^{P/A} - 0,12(e^{P/A}) + 4,41 \qquad (1)$$

Os resultados da Figura 5 contrastam com as teorias propostas anteriormente para a dureza. Todas as teorias mais antigas predizem a proporcionalidade entre P/A e σ_e:

$$\frac{P}{A} = C\sigma_e \qquad (2)$$

Prandtl [13] calculou um valor de C igual a 2,57. Shield [14] calculou C igual a 2,82. Para a geometria usada no presente trabalho, Hill et alii [7] determinaram um valor de C igual a 1,4. Este valor está plotado na Figura 5. Nota-se claramente que a teoria de Hill et alii [7] nao é satisfatória.

A Figura 6 apresenta a deformação do material produzida pela penetração. Nota-se que para Ni-200 recozido observa-se um afundamento, enquanto que para Ni-200 laminado observa-se um empilhamento. Esta diferença é devida a diferenças entre o modo de propagação da deformação plastica para diferentes taxas de encruamento.

3.3 Simulação por elementos finitos

Conduziram-se cálculos usando o programa de elementos finitos para penetrações de 0,25, 0,50, e 1,0 mm. Para a relação tensão-deformação usou-se a curva que bissecta as curvas mestre

da Figura 3.

$$\sigma_{ef} = C[\ \varepsilon_p \quad + \delta\ ]^n \qquad (3)$$

σ_{ef} e ε_p são a tensão e deformação plástica efetiva, respectivamente. Para Ni - 200, tem-se n = 0,225 e C = 780 MPa.

O processo de deformação para uma penetração de 0,5 mm está indicado nas Figuras 7 e 8 para Ni-200 recozido e laminado (80 por cento de redução), respectivamente. As linhas de iso- deformação estão mais concentradas para o material laminado. Esta maior concentração de deformação é devida à menor capacidade de encruamento do material laminado. Resulta em um maior empilhamento do material em torno da região de penetracao.

Foram tambem calculadas as forças de penetração. Isto foi feito aplicando-se o criterio de conservação de energia para os pontos nodais ao longo região de deformacao. Aplicou-se a equação

$$P\Delta h = \sum_i^n F_{xi}\Delta x + \sum_i^n F_{yi}\Delta y + \sum_i^n F_{fc}\Delta \ell + \Delta E_{ef} - \Delta Ee \qquad (4)$$

em que P é a força de penetração; F_{xi} e F_{yi} são as forcas nodais ao longo de x e y, respectivamente; F_{fc} são as forças de atrito; E_{ef} é o incremento de energia correspondente à formação de trinca; ΔE_e é o incremento de deformacao devido à energia elastica do penetrador; $\Delta \ell$, Δx, e Δy são os deslocamentos ao longo destas forças. A equação 4 iguala o trabalho feito pelo penetrador (força vezes deslocamento) à soma do trabalho feito pelas trações de superficie, do trabalho feito contra a fricção e do trabalho requerido para criar as novas superficies.

O termo E_e é em realidade uma correção elástica.

Determinou-se a força de penetração para penetrações de 0,25, 0,50, e 1 mm e encontrou-se a proporcionalidade entre a força e a penetração. Dai, conclue-se que o programa de elementos finitos prediz um comportamento carga versus penetração linear, confirmando os resultados experimentais.

As forças obtidas pela penetração de 0,5 mm estão mostradas na Figura 9 para a condição recozida e laminada. O número de forças equivale ao número de elementos ao longo da superfície de penetração. As forças são decompostas em componentes ao longo de x e y. Pode-se claramente ver o maior empilhamento de material para a condicão laminada. Pode-se tambem observar na Figura 9 a separação (região negra) formada na parte inferior do penetrador. Estes vazios são formados pelos deslocamentos ao longo de x quando ocorre a penetracão. Estes deslocamentos são maiores que os requeridos pelo penetrador.

Admitindo-se um coeficiente de atrito de 0,1 computou-se a força total de penetração. A correção elástica foi introduzida calculando-se a compressão elástica do penetrador. Os resultados encontrados estão dados na Figura 10, junto com os resultados experimentais. Pode-se claramente ver que a concordancia dos calculos com observações experimentais é muito melhor que aquela obtida por Hill, Lee e Tupper [7]. Assim, o metodo de elementos finitos, incorporando deformação elasto-plastica, simula realisticamente o processo de deformação.

4. CONCLUSÕES

a. Descreve-se um ensaio de penetração contínua usando um penetrador tipo "aresta de faca" que produz um estado de deformação plana.

b. As curvas carga versus penetração para Nickel 200 e latão 70/30 sob diversas condições de encruamento e recozimento são obtidas; para todos os casos, podem ser aproximadas como retas passando pela origem.

c. Modelou-se o ensaio de penetração continua usando o metodo de elementos finitos incorporando comportamento elasto-plástico do material. Os resultados deste modelamento matemático são bem superiores a resultados anteriores usando métodos mais simples e admitindo comportamento idealizado sem encruamento do material.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se a ajuda prestada por Dr. R.J. Salzbrenner (Sandia National Laboratories), por Dr. P. Follansbee (Los Alamos National Laboratories) e por Dr. J.L. Swedlow (Carnegie-Mellon U.). Esta pesquisa foi financiada pelo CONACYT, pela ISIEQIE-IPN, e pela National Science Foundation.

BIBLIOGRAFIA

1. TABOR, D. - Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford, 1951.

2. WESTBROOK, J.H., e CONRAD, H., eds., - The Science of Hardness Testing and its Research Applications, ASM, Ohio, 1971.

3. MOTEFF, J., BHARGAVA, T.K., e MCCOULLOUGH, W.L., - Met. Trans. A, vol. 6A, p. 1101, 1975.

4. MOTEFFF, J. e FORUYA, K. - Met. Trans. A, vol. 12A, p. 1303, 1981.

5. DEMIRKOL, M. e KISAKUREK, S.E. - Mat. Sci. and Eng., vol. 59, p. 197, 1983.

6. HILL, R. - The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford, 1950.

7. HILL, R., LEE, E.H., e TUPPER, S.J. - Proc. Roy. Soc., vol. 188A, p. 273, 1947.

8. SHAW, M.C. e DE SALVO, G.J. - Trans. AIME, vol. 92, p. 469, 1970.

9. SHAW, M.C., e DE SALVO, G.J. - Met. Eng. Quart., vol. 12, p. 1, 1972.

10. SWEDLOW, J.L. - Computers and Structures, vol. 3, p. 879, 1983.

11. NYO, C. e SINCLAIR, G.B. - Documentation of PLANDJ: "A Constant Strain Triangle Finite Element Code for Elastic Problems", Carnegie - Mellon U., Pittsburgh, Pa, 1978.

12. DIETER, G.H. - Mechanical Metallurgy, 2ª ed., McGraw Hill, NY, 1976, p. 90.

13. PRANDTL, L. - Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, Math. Phys., p. 74, 1929.

14. SHIELD, R.T. - Proc. Roy. Soc., vol. A233, p. 267, 1955.

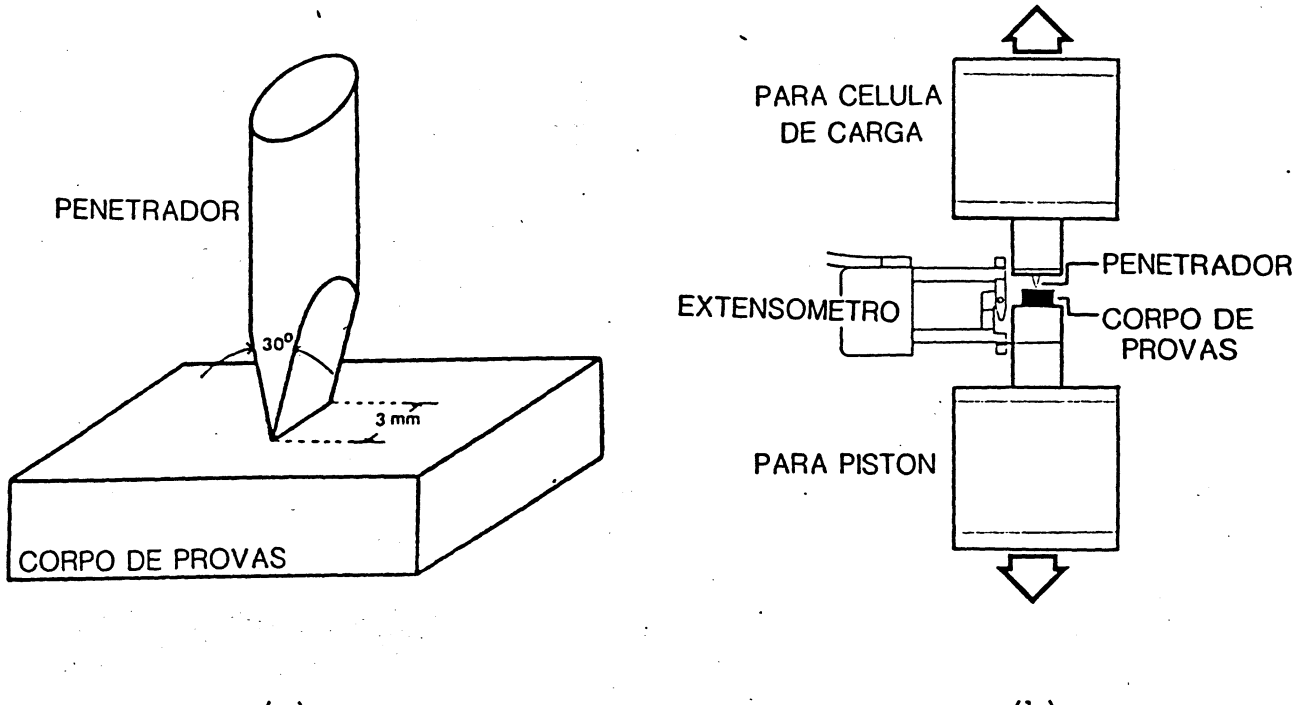


Figura 1. (a) Sistema de penetração adotado.
(b) Geometria do penetrador.

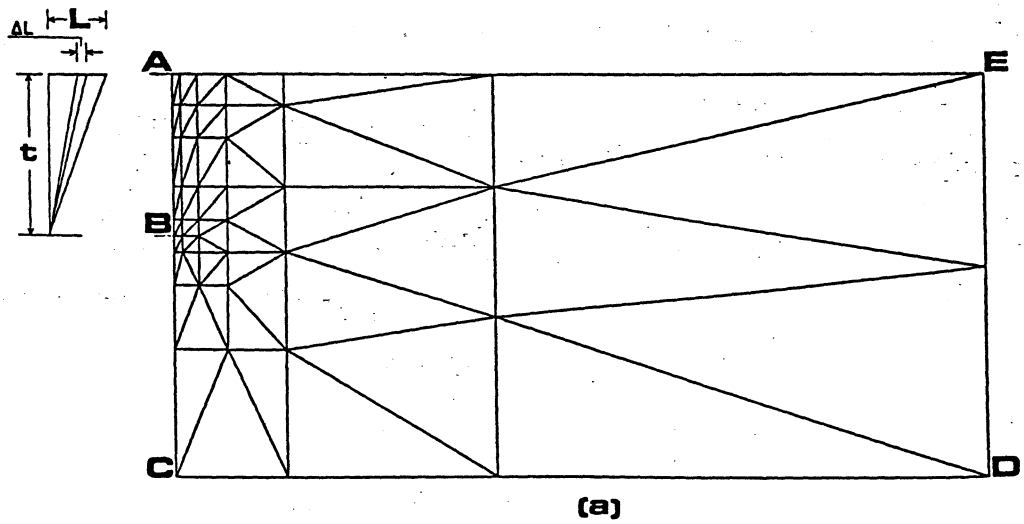


Figura 2. Malha usada no programa de elementos finitos e deformacao da malha indicada por ΔL.

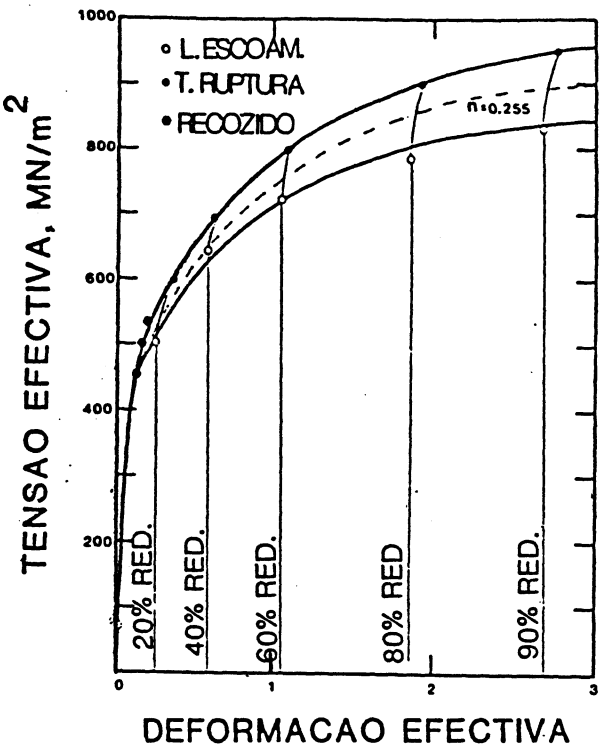


Figura 3. Curva tensão efetiva - deformação efetiva para Ni-200, incorporando as pre-deformações por laminação.

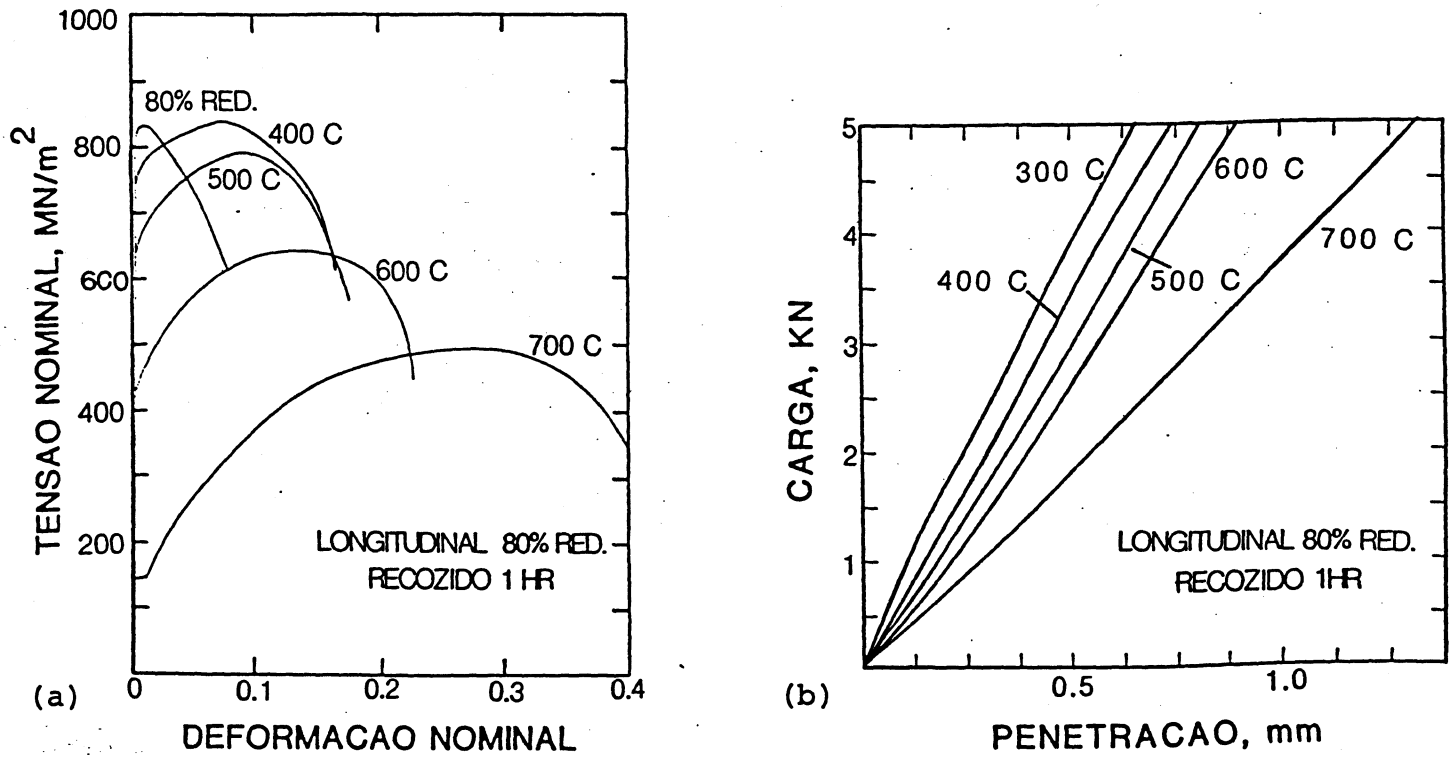


Figura 4 (a) Curvas de tensão nominal-deformação nominal para Ni-200 laminado 80 por cento após diferentes recozimentos
(b) Curvas carga-penetração para as mesmas condições.

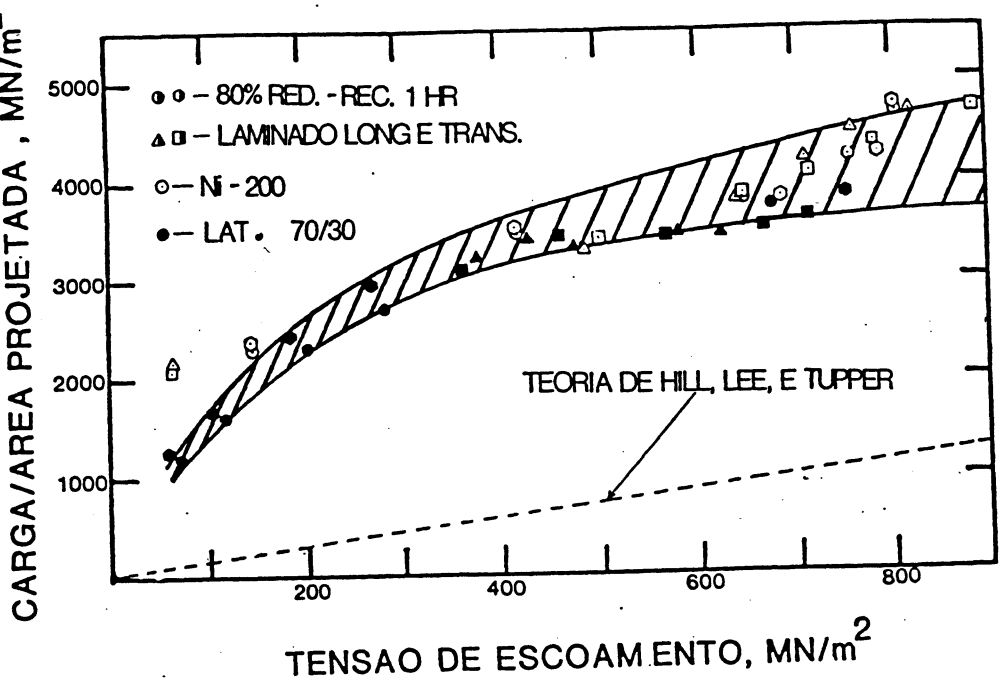


Figura 5. Razão carga-área projetada versus limite de escoamento para Ni-200 e latão sob diferentes condições de encruamento e recozimento e predição da teoria de Hill, Lee, e Tupper.

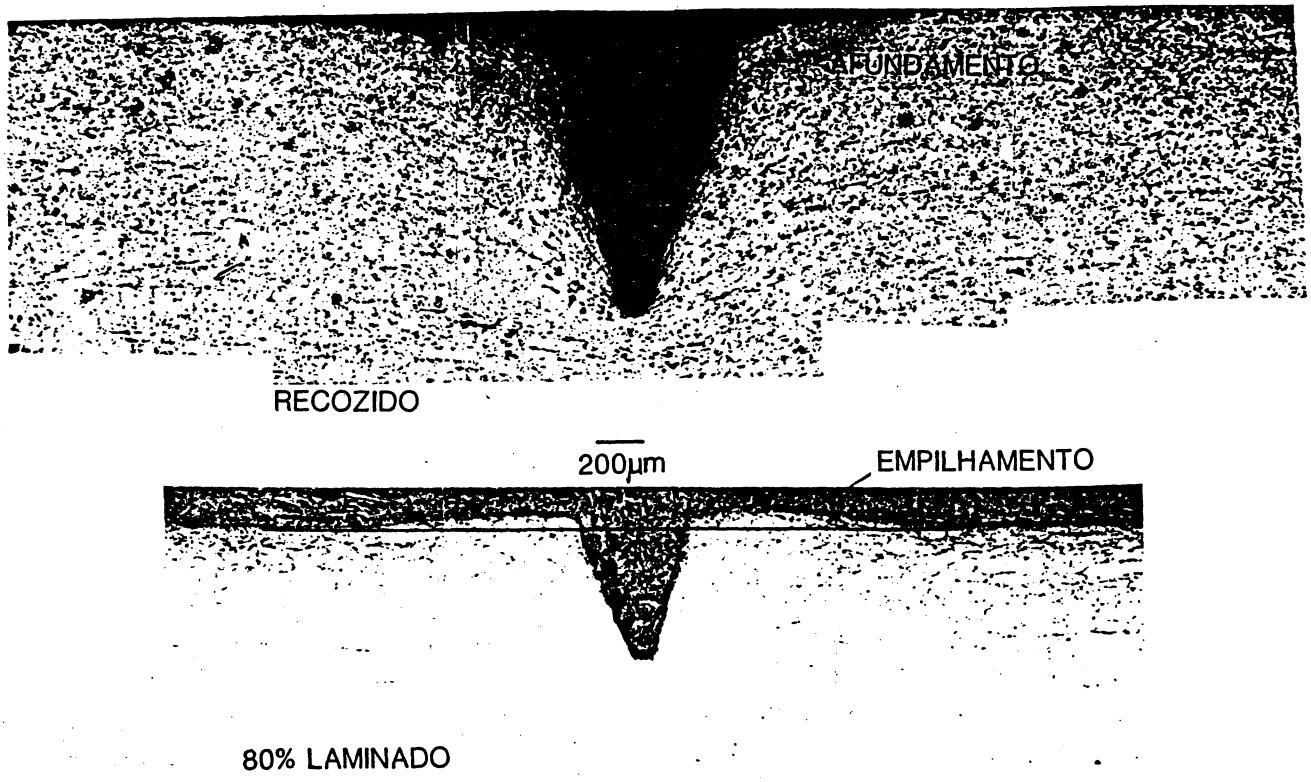


Figura 6. Afundamento em Ni-200 recozido e empilhamento em Ni-200 laminado.

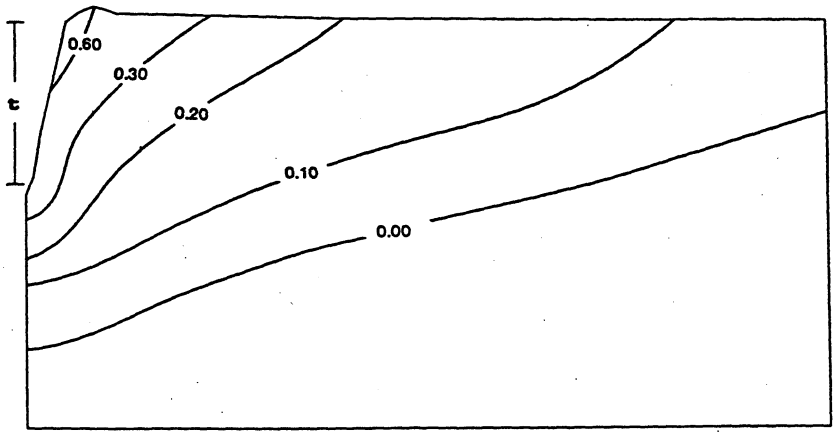


Figura 7. Contornos de iso-deformação para Ni-200 recozido preditos pelo método de elementos finitos.

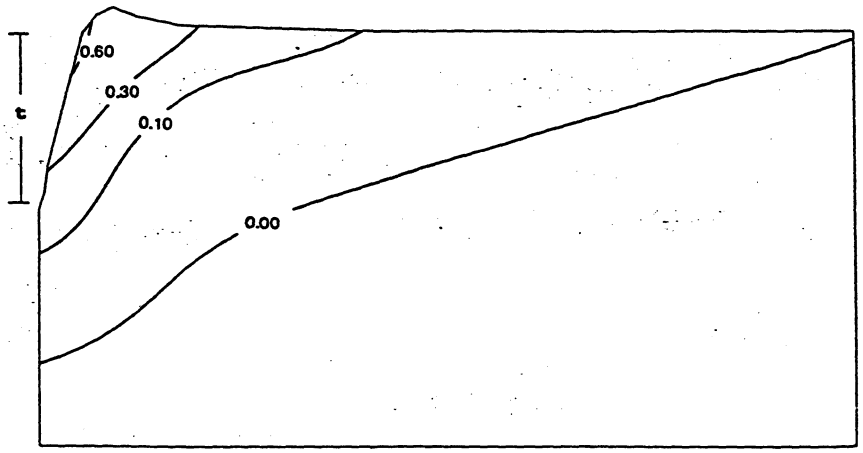
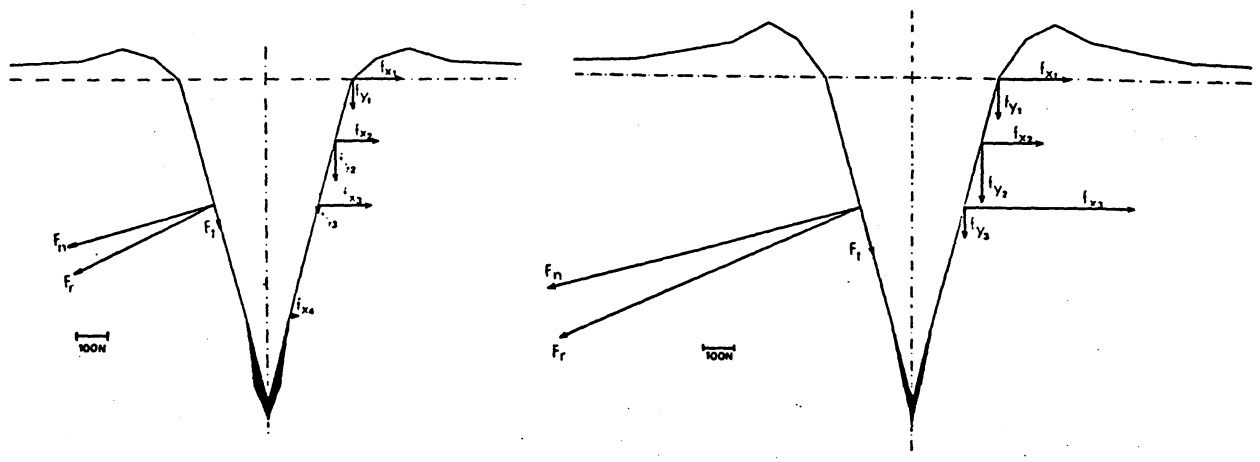


Figura 8. Contornos de iso-deformação para Ni-200 laminado (80 por cento) preditos pelo método de elementos finitos.



(a) (b)

Figura 9. Forças ao longo da interface de deformação para Ni-200 na condição recozida (a) e laminada (b) e penetração de 0,5 mm.

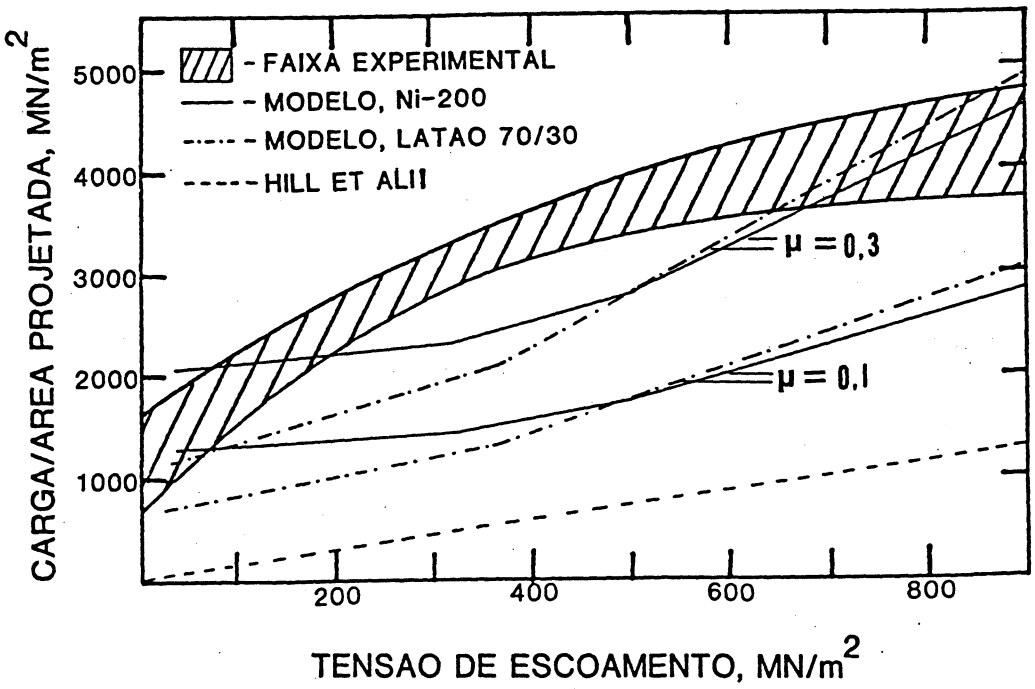


Figura 10. Razão carga-área projetada versus limite de escoamento experimentalmente determinada e predita pelo método de elementos finitos.

A CONTINUOUS INDENTATION TEST FOR METALS

A penetration test using a continuously increasing load applied on a knife-edge indenter (30^{o} angle) is described. The specific advantage of this method is that the applied load is continuously recorded as a function of the penetration depth. Ni-200 and 70/30 brass with varying plastic deformation responses produced by different cold rolling and annealing schedules were studied. The finite element method was applied to model the plastic deformation process under the indenter and to predict the load versus depth-of-penetration curves. A linear relationship between the applied load and the penetration depth was found experimentally and by computer simulation for all conditions. This is due to the plane strain and geometrically similar (at different stages of penetration) state established in the penetration, in contrast to stress states established in most conventional tests.