ICAIC
International Conference for Academia and Industry Co-operation
20/11/2023 – 24/11/2023
São Luis - Maranhão - Brasil
IMMSEM
International Meeting in Materials Science and Engineering of Maranhão

SIMULAÇÃO FÍSICA DO PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO DE LIGAS METÁLICAS: AS TRÊS GERAÇÕES DA MÁQUINA DE TORÇÃO A QUENTE

PHYSICAL SIMULATION IN THERMOMECHANICAL PROCESSING OF METALLIC ALLOYS: THE THREE GENERATIONS OF THE HOT TORSION MACHINE

João M. S. Nunes[1], Jéssica B. Serra[1], Marcelly C. N. Carvalho[2], Leandro F. Lima[1], Bruno L. S. Lopes[1], Samuel F. Rodrigues[1], Gedeon S. Reis[1], Eden S. Silva[1]

1 - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - PPGEM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), São Luís, MA, Brasil.
2 – Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), São Luís, MA, Brasil
nunesjoao@acad.ifma.edu.br

RESUMO

Durante a manufatura de ligas metálicas, diferentes métodos de processamento, como laminação e forjamento a quente, são utilizados para alcançar propriedades mecânicas desejadas. Os processos termomecânicos envolvem fenômenos de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica, influenciando diretamente as propriedades dos materiais. No entanto, replicar esses processos em escala laboratorial é desafiador devido às diferenças nas condições em relação à escala industrial e do alto custo envolvido. O presente trabalho faz uma revisão sobre a metodologia de ensaio de processamento termomecânico, destacando a evolução das máquinas de torção a quente como ferramenta eficaz na simulação física dos processamentos termomecânicos de ligas metálicas, permitindo o estudo da evolução microestrutural e medições de parâmetros de tensão e deformação. Máquinas de torção a quente computadorizadas desempenham um papel fundamental nesses estudos. O artigo fornece também uma visão das etapas da simulação física e das características das máquinas utilizadas, ressaltando a importância dessas abordagens na pesquisa em engenharia de materiais. Destacam-se a quantidade e a qualidade da produção científica desenvolvida ao longo de décadas com o uso desse simulador a quente.

Palavras-chave: *Processamento termomecânico; Simulação física; Máquina de torção a quente; Propriedades mecânicas.*

ABSTRACT

During the manufacturing of metallic alloys, various processing methods such as rolling and hot forging are employed to achieve desired mechanical properties. Thermomechanical processes involve phenomena of work hardening, dynamic recovery, and dynamic recrystallization, directly influencing material properties. However, replicating these processes on a laboratory scale is challenging due to differences in conditions compared to the industrial scale and the high associated costs. This paper reviews the methodology of thermomechanical processing testing, emphasizing the evolution of hot torsion machines as an

effective tool in the physical simulation of thermomechanical processing of metallic alloys. This enables the study of microstructural evolution and measurements of stress and strain parameters. Computerized hot torsion machines play a fundamental role in these studies. The article also provides an overview of the stages of physical simulation and the characteristics of the machines used, highlighting the significance of these approaches in materials engineering research. The quantity and quality of scientific production developed over decades using this hot simulator are noteworthy.

Keywords: *Thermomechanical processing; Physical simulation; Hot torsion machine; Mechanical properties.*

INTRODUÇÃO

Durante a manufatura de produtos metálicos, processos termomecânicos são utilizados para dar forma ao produto e obter as propriedades mecânicas desejadas. A produção desses materiais requer processamentos que aliem menor custo e alta qualidade. Para isso, pesquisas básicas e tecnológicas em engenharia de materiais buscam compreender os fenômenos metalúrgicos que regem a formação da microestrutura, como também a variação em suas propriedades mecânicas, focando em como os parâmetros de temperatura e taxa de deformação influenciam nas características finais.

No processamento termomecânico, três principais fenômenos controlam o comportamento termomecânico do metal: encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica. As caracterizações mecânico-microestruturais desses processos são de grande importância pois permitem: (i) estudar as curvas tensão-deformação por simulação física, desenvolvendo novas rotas; (ii) parametrizar os fenômenos atuantes com otimização dos processos; (iii) simular testes industriais por modelagem físico-matemática em escala laboratorial, visando aperfeiçoamento das propriedades [1].

As rotas de processamento influenciam diretamente nas propriedades dos componentes metálicos e, portanto, são necessários estudos que discutam os fundamentos da simulação física do processamento termomecânico baseado em conceitos científicos e na viabilidade experimental, pois esse processamento representa uma parcela significativa do trabalho realizado na fabricação de componentes semiacabados [2] .Um exemplo de rota tradicional de processamento termomecânico usado em aços inoxidáveis austeníticos é mostrado na figura 1.

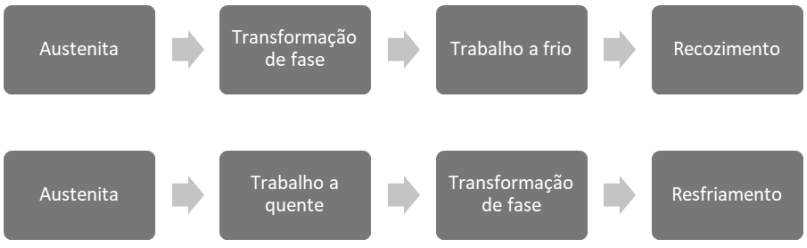


Figura 1 - Rotas usuais de processamento termomecânico dos aços inoxidáveis austeníticos.

O processo de laminação a quente é um processo metalúrgico em que os metais, na forma de lingotes ou barras, são aquecidos acima da sua temperatura de recristalização e são deformados sucessivamente e, devido ao processo de recristalização, haverá a redução do tamanho médio dos grãos. Já no forjamento a quente, há a conformação mecânica, que constitui um método na produção de componentes com geometria complexa de alta performance,

combinando alta resistência mecânica e elevada tenacidade. Neste processo, o material também é aquecido acima da temperatura de recristalização, permitindo grandes deformações, menos esforços, precisão dimensional e melhor resistência mecânica [3].

Embora as rotas de processamento tenham características próprias, todas têm parâmetros em comum. Inicialmente os metais são aquecidos a altas temperaturas, em seguida são submetidos a sequências de deformações e, posteriormente são resfriados até a temperatura ambiente. Ressalta-se que a evolução da microestrutura depende de como ela se configura inicialmente, das condições de deformação e da taxa de resfriamento, descritas pela: temperatura, sequência de passes, quantidade de deformação, taxa de deformação e tempo entre passes ou por seus valores em função do tempo. Nas deformações a quente, parte da energia gasta é armazenada na rede cristalina em forma de defeitos, que são eliminados devido à combinação encruamento-recuperação ou encruamento-recristalização, gerando um estado não deformado e, dependendo do fenômeno dominante, é gerado um produto com melhor desempenho mecânico e de melhor qualidade [4].

A análise dos eventos que ocorrem durante processos metalúrgicos é desafiadora devido ao fato de que a utilização de equipamentos padrões não é economicamente viável devido ao grande tamanho da planta industrial. Além disso, mesmo em escala laboratorial, as condições de atrito/lubrificação e transferência de calor são diferentes das daquelas em escala real. A impossibilidade de se replicar esses processos em menor escala em menor escala levou ao estabelecimento da simulação física, que consistem em reproduzir virtualmente o processo industrial com o auxílio de modelos constitutivos computacionais. Na simulação laboratorial, utiliza-se um corpo de prova de dimensões reduzidas, sobre o qual são impostos ciclos termomecânicos usando um equipamento capaz de variar os parâmetros em uma larga escala, com registro simultâneo da resposta do material aos parâmetros impostos. A figura 2 mostra as etapas da simulação física [5].

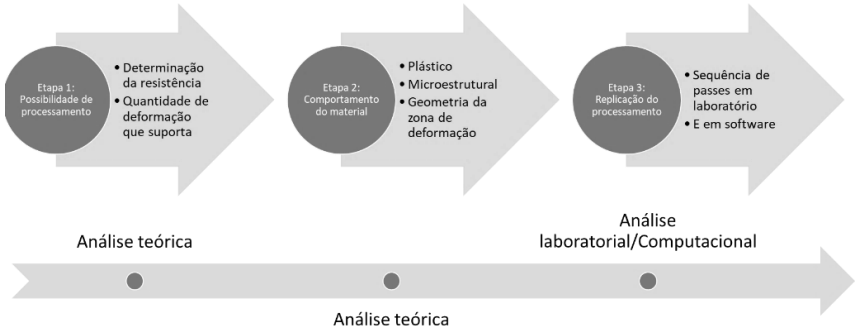


Figura 2 - Etapas da simulação física

Dentre os vários métodos de laboratório que vê sendo utilizados para a simulação física do processamento industrial, pode-se destacar o ensaio de torção a quente. O corpo de prova desenvolvido para o ensaio é mostrado na figura 3. Nesse ensaio, uma das extremidades do corpo de prova cilíndrico é mantida fixa, enquanto a outra é submetida a um esforço de rotação.

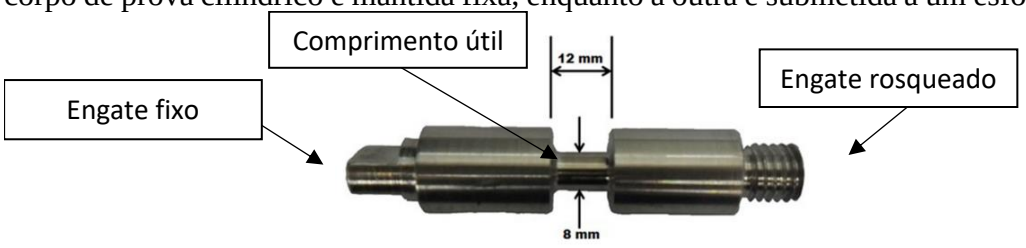


Figura 3 - Representação do corpo de prova de um ensaio de torção a quente

Os eventos que ocorrem durante a simulação física são investigados utilizando-se curvas de tensão deformação e fazendo o acompanhamento da evolução microestrutural. As curvas tensão-deformação para a superfície de amostras cilíndricas torcionadas são calculadas a partir do torque e ângulo de rotação, pelas relações [6]:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}M}{2\pi R^3}(3 + m + n) \qquad (1)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{R\theta}{\sqrt{3}L} \qquad (2)$$

onde M é o torque aplicado, o θ é o ângulo de rotação, R e L são o raio e o comprimento útil do corpo de prova. Os coeficientes m e n representam a sensibilidade do material às mudanças na taxa de deformação e na deformação, respectivamente.

Com ensaios de múltiplas deformações é possível replicar o processamento industrial e investigar os mecanismos que atual no tempo entre passes. Assim, é possível medir avaliar o papel dos mecanismos de encruamento e de amaciamento, além de projetar e investigar a sequência de passes que aperfeiçoam as propriedades do metal implementadas industrialmente. A figura 4 mostra os quesitos básicos para a simulação de um processo industrial em laboratório. É a parcela correspondente às mudanças microestruturais advindas da produção de entropia que leva às variações no esforço aplicado pela máquina.

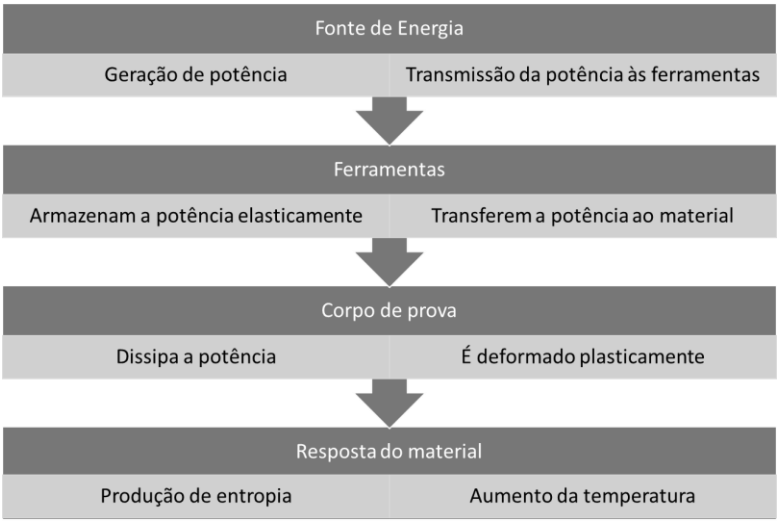


Figura 4 - Funções básicas de um processamento industrial em laboratório

Funcionamento da máquina de torção a quente

A máquina de torção a quente é composta de motor, freio e embreagem, que determinam a velocidade de deformação em cada passe e o início e o fim de cada deformação. O ciclo térmico é realizado por um forno de radiação infravermelha acoplado à máquina, que deve ser programado para replicar os tratamentos termomecânicos industriais. O servomotor elétrico possui velocidade variável e os esforços mecânicos aplicados ao corpo de prova são medidos por uma célula de carga variável e convertidos em tensão equivalente. O controle de temperatura no forno é dado por termopares. A deformação e a taxa de deformação são calculadas a partir de medidas do ângulo de rotação por um transdutor de rotação óptico digital. A aquisição de dados é realizada por um computador interfaceado à máquina, onde um software controla os ensaios. Para evitar a oxidação da superfície dos corpos de prova e impor diferentes taxas de resfriamento durante a simulação física, podem-se injetar gases inertes ou refrigerantes

através de um tubo de quartzo. Também pode-se injetar água através do tubo caso deseje-se realizar uma têmpera para análise da evolução microestrutural.

A figura 5 mostra esquematicamente três gerações da máquina de torção a quente horizontal computadorizada desenvolvida pelo grupo de pesquisa em processamento termomecânico do Brasil no PPGEM/UFSCar sob coordenação do professor Doutor Oscar Balancim. A máquina de torção a quente começou a ser produzida como protótipo a partir de 1984 como produção técnica com título Desenvolvimento de um Protótipo para Ensaios de Torção a Quente - CNPq Proc. no. 40.6783/84. 1984.



Figura 5 - Três gerações de máquinas de torção a quente

A figura 6 mostra a catalogação da produção científica através de revistas e periódicos obtidas através das três gerações das máquinas. A busca dos dados deu-se através da pesquisa em bancos de dados de artigos dos programas de pós-graduação em Engenharia de Materiais do IFMA e de Ciência e Engenharia de Materiais da UFSCAR. O currículo lattes de pesquisadores que trabalharam diretamente com as máquinas também foi analisado. Foi verificado o período de 1988 a 2023. Observou-se que a maior produção científica é decorrente do processo de início da operação da primeira máquina de torção a quente, seguida pela sua sucessora, de segunda geração. A máquina de terceira geração, pertencente ao IFMA e localizada no LabEnsaios (Laboratório de Ensaios do IFMA), tem trazido bons resultados, visto que já se amplia a gama de metais analisados pelo grupo de pesquisa em Processamento Termomecânico de Metais, permitindo a expansão para orientações de dissertações, teses e iniciação científica. Além das publicações em revistas e periódicos, os trabalhos resultantes têm sido apresentados em eventos nacionais e internacionais.

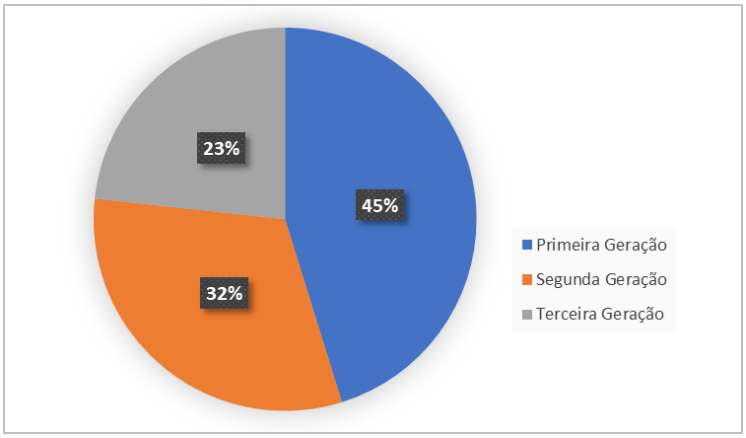


Figura 6 - Produção de bibliográfica obtida através de gerações da máquina de torção a quente

A figura 7 mostra a interface utilizada para inserção de dados e programação do ensaio de torção a quente. Parâmetros importantes são definidos, como a taxa de aquecimento, a temperatura e o tempo no patamar, o percentual de deformação no ensaio e a taxa de deformação. Além disso, é possível definir se o ensaio será de único passe ou múltiplos passes.



Figura 7 - Interface de usuário da máquina de ensaio de torção a quente

A figura 7 mostra a programação de ensaio determinada pelos parâmetros inseridos na interface e os resultados com as curvas tensão-deformação. Os ensaios podem ser realizados em apenas um passe ou em múltiplos passes.

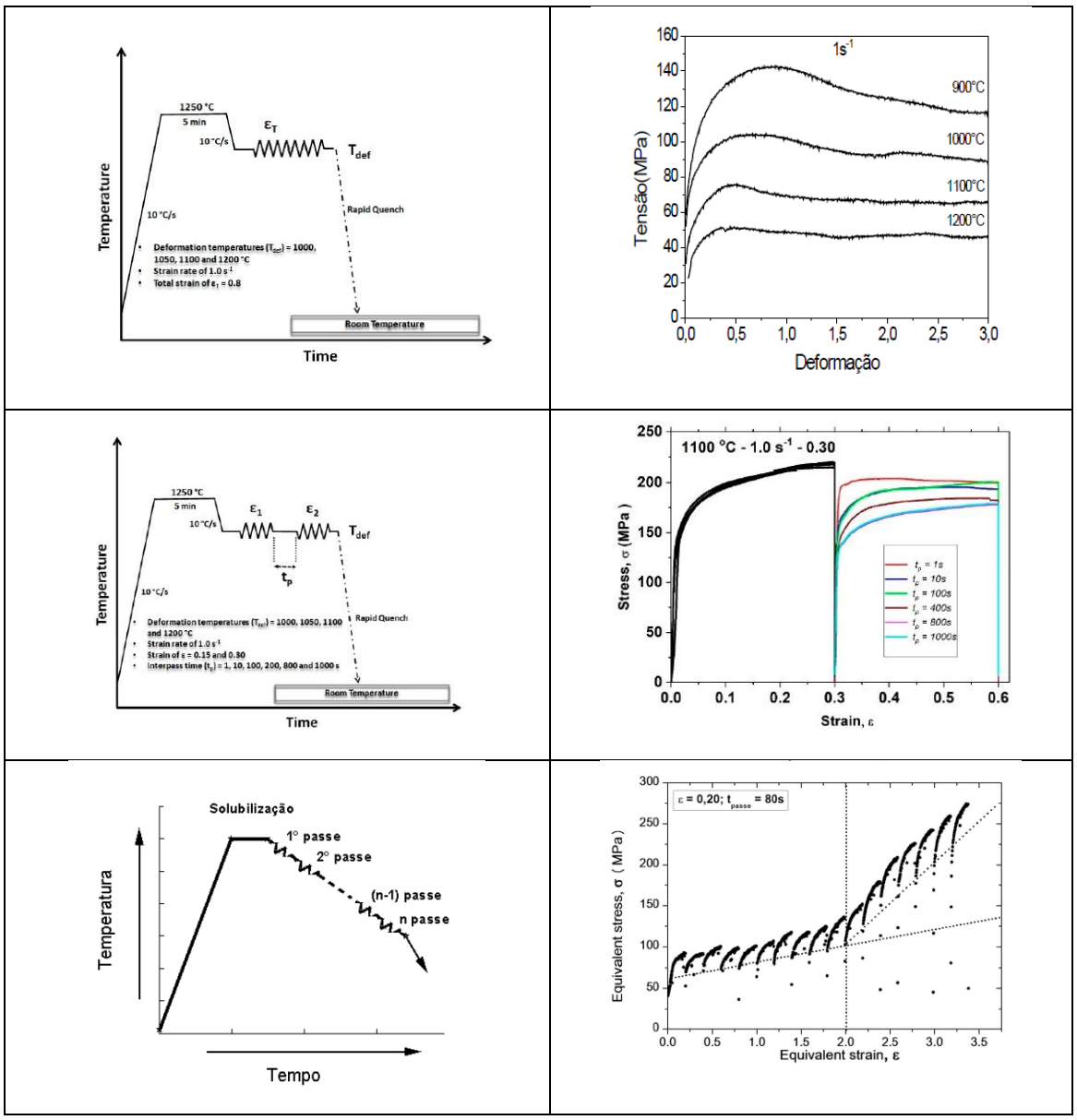


Figura 7 - Programação de ensaio mostrando processamento de único passe e curvas de tensão obtidas utilizando a programação para diferentes temperaturas de ensaio e programação de ensaio de múltiplos passes e suas curvas obtidas [2]

CONCLUSÕES

A partir do conhecimento do estado da arte sobre a simulação física do processamento termomecânico em máquinas de torção a quente, é possível afirmar que:

- Com as inovações tecnológicas nas máquinas, os pesquisadores puderam controlar com maior precisão as variáveis de processamento, como temperatura, taxa de deformação e tensão aplicada. Isso permitiu a realização de experimentos mais complexos e detalhados, contribuindo para um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos no processamento mecânico de metais, incluindo a possibilidade de realizar vários passes nos ensaios e de "congelar" a microestrutura para analisar a sua evolução ao longo do tempo.;
- A facilidade de operação resultou em um aumento significativo no volume de publicações em revistas nacionais e internacionais de alto impacto na área de processamento termomecânico. Isso demonstra o impacto positivo dessas máquinas na comunidade científica. Desde 1988, foram mais de 70 publicações em revistas, considerando as três gerações: Primeira e segunda gerações no PPGCEM UFSCAR e terceira geração no IFMA;
- Para aprimoramento da máquina, é necessário o desenvolvimento de sistemas mais automatizados, melhor configuração de sensores, ampliação da compatibilidade com outros metais e a capacidade de simular cenários mais complexos de processamento, como compressão e torção simultâneas.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio recebido pela FAPEMA e pela CAPES, através do PPGEM/IFMA. Agradecimento especial ao orientador professor Doutor Eden Santos Silva e ao LabEnsaios.

REFERÊNCIAS

[1] GERONIMO, F. H. C. Caracterização microestrutural e modelagem do amaciamento dinâmico a quente do aço inoxidável austenítico ASTM F 138, utilizado em implantes ortopédicos. 2014, 157p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – PPGCEM/UFSCAR.

[2] BALANCIN, O. Simulação física do processamento a quente de materiais metálicos. In: 67 ABM INTERNATIONAL CONGRESS, Rio de Janeiro, RJ, 2012. Abm Proceedings. p-599-610. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/2594-5327-20944

[3] SILVA. E. S. Caracterização e modelagem do comportamento plástico a quente do aço inoxidável austenítico ISO 5832-9, utilizado em implantes ortopédicos. 2011, 221p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – PPGCEM/UFSCAR.

[4] SILVA. E. S. et al. Hot deformation behavior of a n-bearing austenitic stainless steel biomaterial. In: 67 ABM INTERNATIONAL CONGRESS, Rio de Janeiro, RJ, 2012. Abm Proceedings. p-391-402. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/2594-5327-20909.

[5] DE SOUSA SULZBACH, Gláucia Adriane et al. Constitutive analysis of stress–strain curves in dynamic softening of high Nb-and N-containing austenitic stainless-steel biomaterial. Journal of Materials Research and Technology, v. 19, p. 4939-4956, 2022.

[6] FIELDS. D.S e BACKOFEN. W.A. Determination of Strain Hardening Characteristics by Torsion Testing, Proc. Amer. Soc. Test. Mater. v.57.p1263, 1957