

# CONSTRUÇÃO E TESTES DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE TORÇÃO PLÁSTICA PARA LEVANTAMENTO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE METAIS

**José Divo Bressan**- Centro de Ciências Tecnológicas – CCT/UEDESC – Campus Universitário – Bom Retiro - 89.223-100 – Joinville – SC – Brasil. Fone: (47) 431-7258 Fax: (47) 431-7240.  
email: dem2jdb@joinville.udesc.br

**Ricardo Kirchoff Unfer**- Centro de Ciências Tecnológicas – CCT/UEDESC – Campus Universitário – Bom Retiro - 89.223-100 – Joinville – SC – Brasil. Fone: (47) 431-7258 Fax: (47) 431-7240.  
email: rkunfer@hotmail.com

**Resumo:** *O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento, operação e testes de uma máquina protótipo automatizada para a realização de ensaios de torção plástica à frio, realizados no Laboratório de Conformação Mecânica da UDESC – Joinville. Este equipamento consiste de uma máquina horizontal para ensaio de torção, utilizando o acionamento de um motor elétrico, um volante, uma embreagem, um eixo que prende o corpo de prova e um sistema de controle e aquisição de dados do ensaio. O ângulo de torção é medido através de um encoder e o torque por meio de uma célula de carga. Os testes foram realizados com uma rotação constante que impôs uma taxa de deformação de cisalhamento constante. Ajustando-se a velocidade de deformação dos testes a 61 rpm, foi possível simular a etapa inicial de desbaste na laminação de chapas que utiliza taxas de deformações de 2/s. Os materiais e o número de corpos de prova utilizados para os ensaios de torção plástica foram o aço SAE 1020, latão e cobre recozidos com 2 maciços e 2 ocos (tubulares), e alumínio com 1 maciço e 2 ocos respectivamente. Para determinação do parâmetro “m” (coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação) utilizou-se as curvas de tensão verdadeira versus deformação verdadeira obtidos tanto nos ensaios de tração simples como torção, considerando uma média de 3 valores de deformação verdadeira para o aço SAE 1020 e alumínio recozidos, sendo as duas taxas constantes de deformações usadas nos ensaios de tração de  $0,17 \times 10^{-2}/s$  e  $3,34 \times 10^{-2}/s$ , e 2/s na torção. Os valores do coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação no ensaio de tração do latão e cobre foi zero, porém, para aço 1020 e alumínio foram respectivamente de 0,013 e 0,027. Na torção os valores foram 0,072 e 0,045 para o aço e latão.*

**Palavras-Chaves:** *Ensaio de Torção, Encruamento, Plasticidade, Projeto de máquina.*

## 1. INTRODUÇÃO

O ensaio mecânico de tração uniaxial de materiais é o método experimental de laboratório comumente utilizado para se investigar o comportamento mecânico dos materiais. Entretanto, tem suas limitações principalmente no que se refere a taxa de deformação e ao estado uniaxial de tensões. As taxas utilizadas na tração simples raramente ultrapassam  $10^{-2}/s$ . Nos processos de conformação de metais como no forjamento e na laminação de chapas metálicas, as velocidades de deformação são superiores e podem atingir valores elevados de 10/s, como é o caso da operação de acabamento final na laminação de chapas. O comportamento plástico dos metais depende da taxa de deformação com que o material é solicitado. Portanto, para obtermos uma equação que represente o comportamento do material o mais real possível no forjamento ou laminação, devemos aplicar altas taxas de deformação plástica. Neste contexto, a máquina de ensaio de torção plástica tem sua aplicação na investigação do comportamento plástico sob altas velocidades de deformação.

O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento desta máquina e realizar ensaios de torção em materiais metálicos como aço, latão e alumínio recozidos, simulando o comportamento à deformação plástica com as mesmas velocidades que ocorrem nos processos industriais de conformação de metais como no caso da laminação e do forjamento à frio.

## 2. ANÁLISE DO ENSAIO DE TORÇÃO PLÁSTICA

Os ensaios de torção são aplicados nos materiais com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas tais como o módulo de elasticidade de cisalhamento ( $G$ ), a resistência de cisalhamento final, a tensão limite de ruptura no cisalhamento e a lei de encruamento plástico. Entretanto, podem ainda ser usados em corpos de prova maciços (hastes, eixos de rodas, brocas giratórias) e estruturas (vigas), para determinar a resposta do carregamento torsional.

Este tipo de ensaio é frequentemente utilizado em eixos de seção transversal circular pela aplicação de um momento torsional em torno do eixo longitudinal. Neste caso, a curva tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento pode ser determinada a partir de medições simultâneas do torque e do ângulo de rotação durante o ensaio através do comprimento de referência pré-determinado. A figura 1 a seguir mostra um corpo de prova cilíndrico com carregamento em torção. O desenvolvimento da equação do torque  $M$  total é dado a partir da análise de forças que atuam num elemento em uma seção transversal do corpo de prova, que pode ser visto na figura 1.

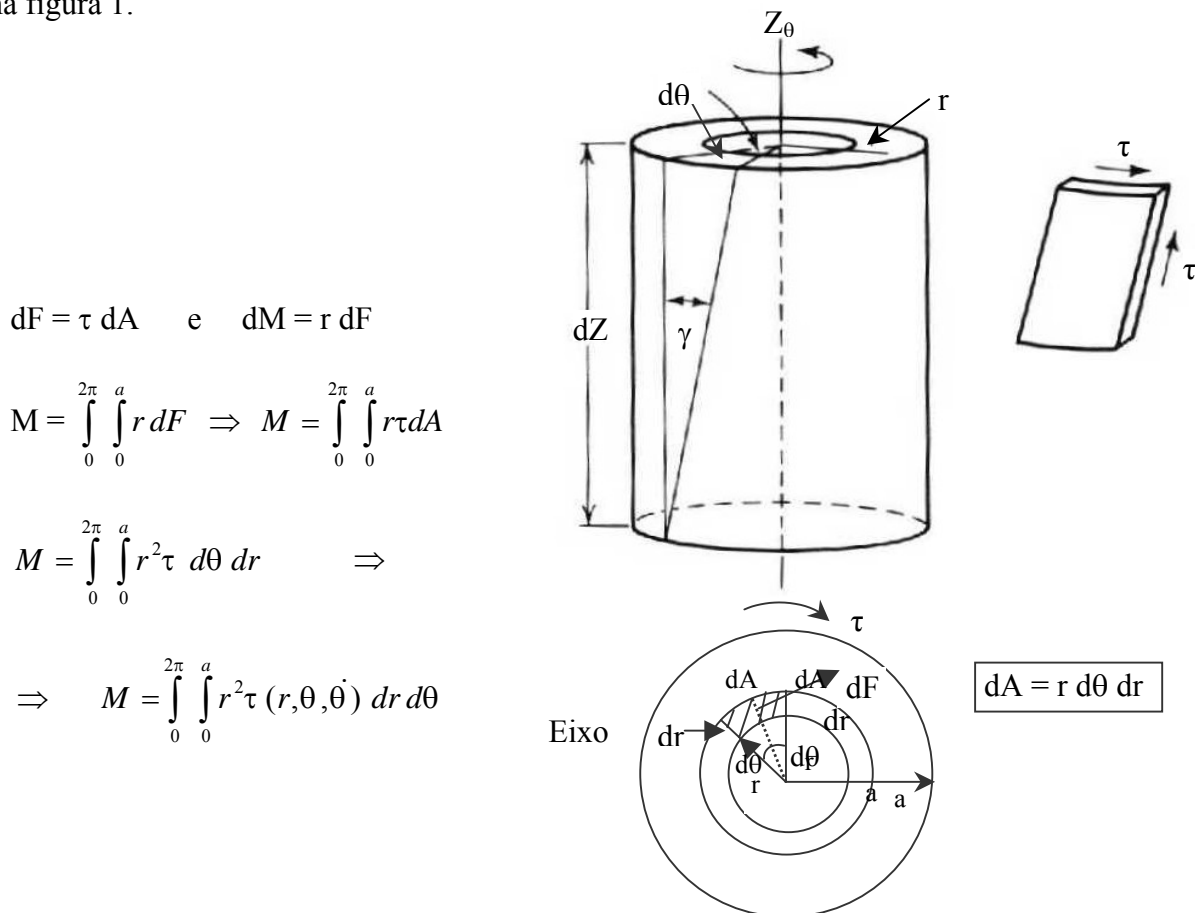


Figura 1. Seção circular de um eixo maciço submetido ao ensaio de torção.

De acordo com a análise teórica do torque considerando material com encruamento em corpos de prova maciços utilizado por Nadai [1] tem-se a seguinte equação:

$$M = \int_0^a \tau 2\pi r^2 dr \quad (1)$$

Mudando a variável  $r$  na equação 1 para  $\gamma$  ( $\gamma = r \theta/L$ ) e a tensão de cisalhamento  $\tau = f(\gamma)$  na superfície do corpo de prova (com encruamento), obtém-se a seguinte expressão para o torque:

$$M = \int_0^{\gamma_a} \frac{2\pi f(\gamma) \gamma^2 d\gamma}{\theta_L^3} \quad (2)$$

Diferenciando a equação 2 em função de  $\theta_L$  ( $\theta_L = \theta/L$ ) tem-se:

$$d(M\theta_L^3) = 2\pi f(\gamma_a) \gamma_a^2 d\gamma_a \quad (3)$$

Na superfície do corpo de prova tem-se:  $\tau_a = f(\gamma_a)$ . Substituindo  $\tau_a$  na equação 3 obtém-se:

$$d(M\theta_L^3) = 2\pi \tau_a a^3 \theta_L^2 d\theta_L \quad (4)$$

rearranjando a equação 4 em função da tensão de cisalhamento na superfície  $\tau_a$  resulta em:

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi a^3} \left[ 3M + \theta_L \frac{dM}{d\theta_L} \right] \quad (5)$$

O primeiro termo da equação 5 é o torque devido a tensão máxima de cisalhamento do  $\tau_a$  numa deformação completamente plástica do material. Os termos desta equação podem ser corretamente derivados a partir da curva torque-ângulo de rotação mostrado na figura abaixo.

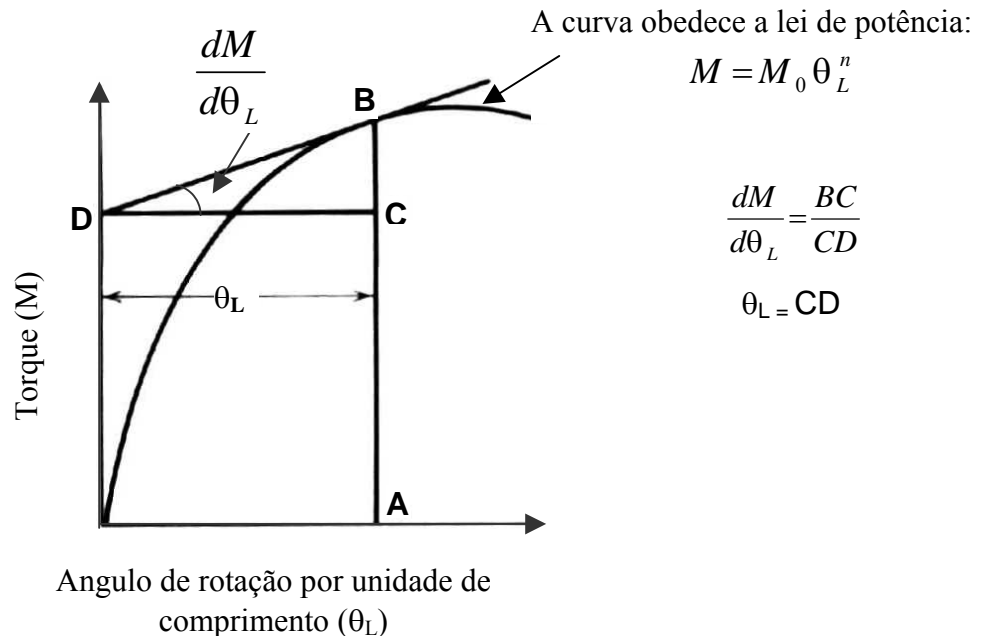


Figura 2. Relação matemática  $M_0\theta_L^n$  derivada da função encruamento no ensaio de torção.

$$\theta_L \frac{dM}{d\theta_L} = BC \quad (6)$$

Substituindo a equação 6 na equação 5 resulta em:

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi a^3} [ 3BA + BC ] \quad (7)$$

Derivando a expressão da lei da potência para o encruamento do torque tem-se:

$$M = M_0 \theta_L^n \Rightarrow \left( \frac{dM}{d\theta_L} \right)_{\theta_L} = \frac{nM}{\theta_L} \quad (8)$$

Substituindo a equação 8 na equação 5, de acordo com Canova et al. [4], obtém-se:

$$\tau_a = \frac{M}{2\pi a^3} [3 + n] \quad (9)$$

Considerando o material sensível ao efeito da taxa de deformação, derivando-se a equação da lei de potência, dada por McGregor et al. [2] e Fields et al. [3], resulta em:

$$M = M_0 \dot{\theta}_L^m \Rightarrow \left( \frac{dM}{d\dot{\theta}_L} \right)_{\theta_L} = \frac{mM}{\dot{\theta}_L} \quad (10)$$

De modo análogo ao item anterior (lei de potência para o encruamento), desenvolvendo a derivada do torque para um ângulo ( $\theta_L$ ) constante resulta nas seguintes equações para os corpos de prova maciço e oco ( $a_1$ : raio interno,  $a_2$ : raio externo) respectivamente:

$$\tau_a = \frac{M}{2\pi a^3} [3 + m + n] \quad \text{e} \quad \tau_a = \frac{M}{2\pi (a_2^3 - a_1^3)} (3 + n + m) \quad (11)$$

Onde  $\tau_a$  é a tensão de cisalhamento no campo plástico,  $n$  é coeficiente de encruamento e “ $m$ ” coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação.

As deformações de cisalhamento na superfície ( $\gamma_a$ ) do comprimento útil ( $L_u$ ) dos corpos de prova maciço e oco ( $a_1$ : raio interno,  $a_2$ : raio externo) respectivamente são dados por:

$$\gamma_a = \frac{a\theta}{L} \quad \text{e} \quad \gamma_a = \frac{\theta}{L_u} \left( \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \quad (12)$$

### 3. MÁQUINA DE ENSAIOS DE TORÇÃO PLÁSTICA

Como visto anteriormente, o objetivo do desenvolvimento desta máquina foi realizar ensaios de torção em materiais metálicos, simulando o comportamento à deformação plástica com as mesmas velocidades que ocorrem nos processos industriais de conformação de metais como no caso da laminação e do forjamento à frio. O equipamento consiste de uma máquina horizontal para ensaio de torção, utilizando o acionamento de um motor elétrico, um volante, uma embreagem, um eixo que prende o corpo de prova e um sistema de controle e aquisição de dados do ensaio. O ângulo de torção é medido através de um encoder e o torque por meio de uma célula de carga como visto na Fig. 3. O equipamento apresenta um sistema de aquisição de dados que registra os valores do torque em “Nm” e o ângulo de rotação em “graus” no qual foi possível determinar o comportamento das curvas dos materiais metálicos através da utilização das equações da plasticidade considerando diferentes geometrias de corpos de prova maciços e ocos (tubulares). Para determinação destes ensaios é necessário utilizar uma velocidade de deformação constante, o que possibilitará resultados mais confiáveis para simular o processo de laminação à frio.

A capacidade de torque máximo da máquina é de 150 Nm e a rotação de 600 rpm que são suficientes para simular o forjamento e a laminação.

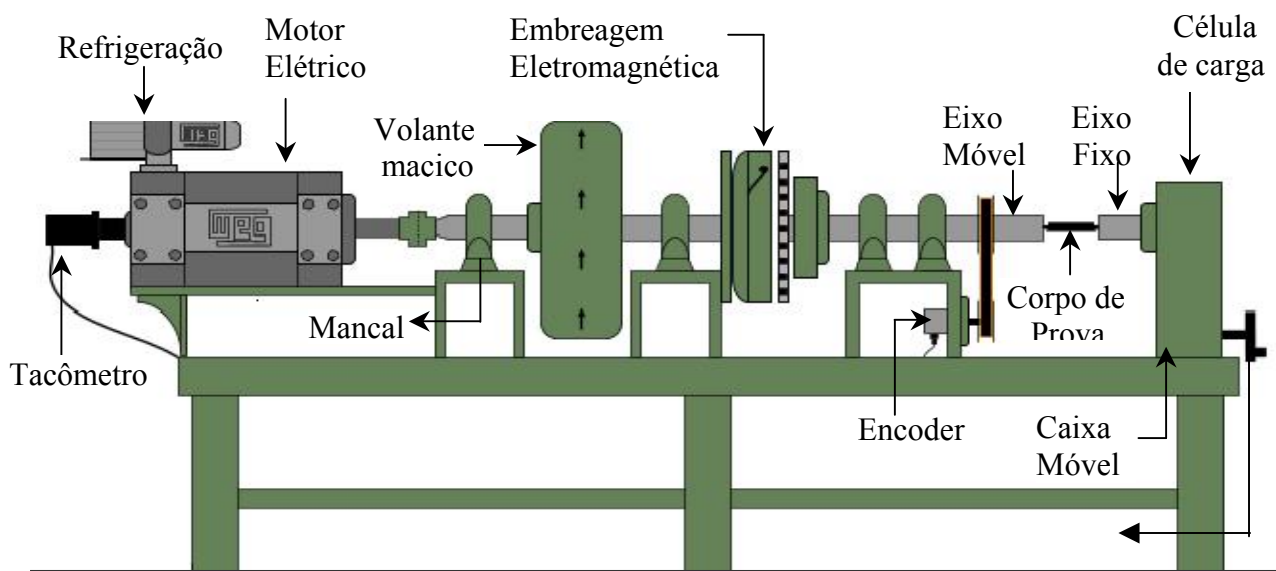


Figura 3. Esquema da Máquina de Ensaio de Torção Dinâmica com os principais acessórios.

#### 4. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizadas barras cilíndricas comerciais de aço, latão, cobre e alumínio com diâmetro de 19mm, para a obtenção de todos os corpos de prova usados nos ensaios de tração simples e torção plástica. Estas barras foram cortadas em pedaços e usinados nas dimensões e formatos específicos para cada geometria dos corpos de prova, que podem ser vistos na figura 4, bem como na tabela 1. Neste caso é importante ressaltar que o desenho da figura 4 foi retirado do trabalho desenvolvido por Pohlandt et al. [5]. Os cp's de tração uniaxial foram feitos de acordo com a norma ABNT.

Utilizaram-se, portanto, corpos de prova ocos e maciços na torção plástica, e somente maciços na tração simples. Na tabela 2 apresentam-se as condições do processo de tratamento térmico de recozimento dos materiais utilizados.

Nas figuras 5, 6, 7 e 8 mostram-se as micrografias dos materiais, onde é possível observar o tamanho médio dos grãos e impurezas. Na tabela 4 são relatadas as propriedades mecânicas obtidas do ensaio de tração simples que serão comparadas com as propriedades obtidas do ensaio de torção plástica.

Tabela 1. Dimensões dos corpos de prova realizados nos ensaios de Torção.

<b>CDP</b>		<b>Oco</b>					
Material / Dimensões	$L_{\text{útil}}$ (mm)	$L_{\text{total}}$ (mm)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	Espessura (mm)	R (mm)	rpm
Aço SAE 1020, Latão, Cobre e Alumínio	16	50	8	12	2	5	61
Aço SAE 1020, Latão, Cobre e Alumínio	8	42	8	12	2	5	61
<b>CDP</b>		<b>Maciço</b>					
Material / Dimensões	$L_{\text{útil}}$ (mm)	$L_{\text{total}}$ (mm)	$D_{\text{útil}}$ (mm)	R (mm)	rpm		
Latão, Cobre e Alumínio	16	50	12	5	61		
Aço SAE 1020	16	50	10	5	54		

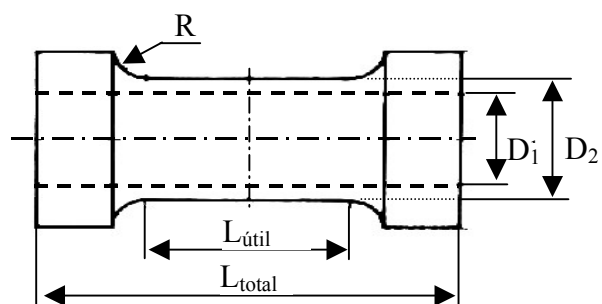


Figura 4. Corpo de prova utilizado nos ensaios experimentais de torção plástica.

Na realização dos ensaios de tração simples (uniaxial) e torção plástica foram utilizados corpos de prova recozidos, considerando diferentes condições do tratamento para cada material, que pode ser melhor observado na tabela 2 a seguir. O objetivo de realizar este tratamento térmico foi tornar os materiais mais dúcteis a fim de estudar as propriedades e comportamento das curvas de cada material, considerando ensaios com diferentes taxas de deformação.

Tabela 2. Parâmetros do tratamento de recozimento usado nos corpos de prova de tração e torção.

Material	Temperatura (°C)	Taxa aquec. (°C/min)	Tempo (min.)	Variação Temp. recozimento (°C)	Redução da dureza após tratamento recozimento %
Aço 1020	930	10	150	2,5	27
Latão	550	10	60	4	35
Cobre	450	10	60	5	19
Alumínio	450	10	40	6	33

O equipamento utilizado nos testes de tração uniaxial foi a máquina universal de ensaios mecânicos com capacidade máxima de 30 toneladas, marca EMIC, equipada com extensômetro.

Para os ensaios de torção utilizou-se a máquina automatizada desenvolvida no próprio Laboratório de Conformação Mecânica do CCT-UDESC Joinville com capacidade de torque até 150 Nm. Para se determinar as curvas de tensão de cisalhamento versus deformação, tensão equivalente versus deformação equivalente e as equações da plasticidade dos materiais, utilizaram-se os valores obtidos da aquisição de dados pelo programa Elipse gerados em uma tabela contendo torque (Nm) e ângulo de rotação (graus), que por sua vez é convertida para o programa microsoft excel. Com os valores do torque e ângulo de rotação convertidos para a planilha excel utilizou-se as equações específicas para os cálculos de tensão e deformação de cisalhamento dos corpos de prova maciços e ocos usados nos ensaios de torção plástica.

Antes e após a realização de cada ensaio foram feitas medições da geometria de cada corpo de prova. O instrumento utilizado na medição dos corpos de prova foi um paquímetro com precisão de 1 centésimo de milímetro.

O comportamento plástico do aço 1020, latão, cobre e alumínio recozidos foram obtidos nos ensaios de tração simples e da torção plástica. Os ensaios de torção foram realizados com uma taxa de deformação de 2/s, enquanto que os ensaios de tração com taxas de  $0,17 \times 10^{-2}/s$  e  $3,34 \times 10^{-2}/s$ . As propriedades de plasticidade de cada material podem ser observadas nas tabelas 3 e 4 a seguir.

Tabela 3. Propriedades Mecânicas obtidas do ensaio de tração uniaxial com taxas de deformação  $0,17 \times 10^{-2}/s$ . Para o cálculo do  $m$  utilizou-se  $3,34 \times 10^{-2}/s$ .

Material	Módulo Elastic. E (GPa)	Limite Escoam. $\sigma_{esc}$ (MPa)	Limite Resist. $\sigma_t$ (MPa)	Limite Rupt. $\sigma_{rup}$ (MPa)	Alongamento %	Dureza (HV)	Equação de encruamento $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \dot{\epsilon}^m$ (MPa)
Aço 1020	212	298	450	442	26	116	$\sigma = 860(0.012 + \epsilon)^{0.24} \dot{\epsilon}^{0.013}$
Latão	94	135	340	337	34	74	$\sigma = 800(0.026 + \epsilon)^{0.48}$
Cobre	82	182	257	289	21	66	$\sigma = 450(0.025 + \epsilon)^{0.20}$
Alumínio	74	73	138	130	26	33	$\sigma = 235(0.045 + \epsilon)^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.027}$

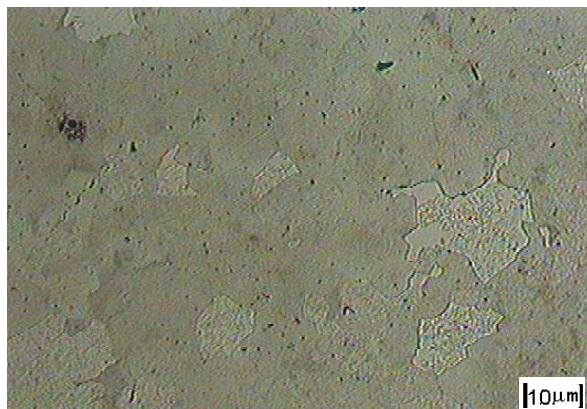


Figura 5. Micrografia do aço 1020 recozido. Aumento de 200x. Dureza 116HV.

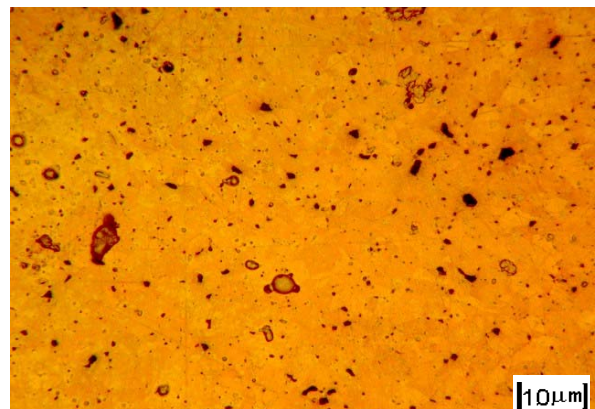


Figura 6. Micrografia do latão recozido. Aumento de 200x. Dureza 74HV.

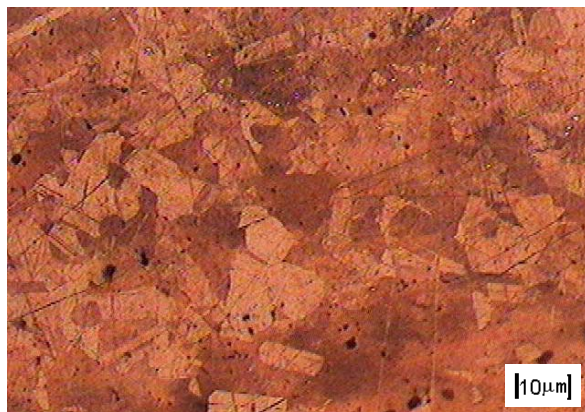


Figura 7. Micrografia do cobre recozido. Aumento de 200x. Dureza 66HV.

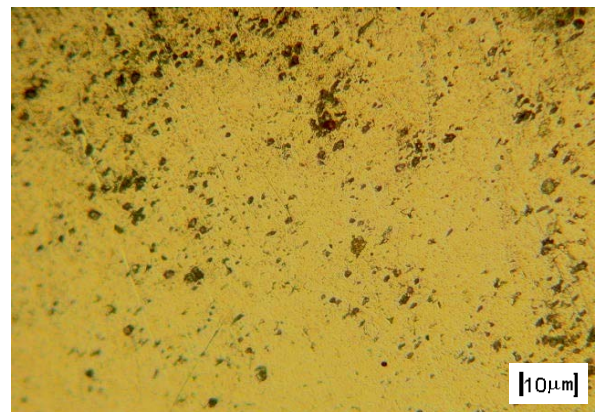


Figura 8. Micrografia do alumínio recozido. Aumento de 200x. Dureza de 33HV.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas figuras 9 e 11 observam-se exemplos de curvas de torque versus ângulo de torção obtidos da máquina de ensaio de torção plástica para o aço 1020 e o alumínio comercialmente puro recozidos. Os gráficos das figuras 10 e 12 representam as curvas de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento. As curvas foram determinadas através das equações 11 (equação da tensão de cisalhamento para corpos de prova maciços e ocos) e 12 (equação da deformação de cisalhamento na superfície dos corpos de prova maciços e ocos).

Tabela 4. Propriedades mecânicas obtidas do ensaio de torção sob taxa de deformação de 2/s.

Material	Módulo Elástico Cislh. G(GPa)	Limite Escoamento $\tau_{esc}$ (MPa)	Limite Resistência $\tau_t$ (MPa)	Limite Ruptura $\tau_{rup}$ (MPa)	m (*)	Equação do encruamento $\tau = K(\gamma_0 + \gamma)^n$ (MPa)
Aço 1020	85	209	425	424	0.072	$\tau = 580(0.005 + \gamma)^{0.20}$
Latão	37	149	283	283	0.045	$\tau = 435(0.02 + \gamma)^{0.22}$
Cobre	15	130	214	215	0	$\tau = 230(0.03 + \gamma)^{0.16}$
Alumínio	6	28	98	98	0	$\tau = 130(0.015 + \gamma)^{0.36}$

\* Obs.: valor obtido com os dados de tração uniaxial em relação a torção.

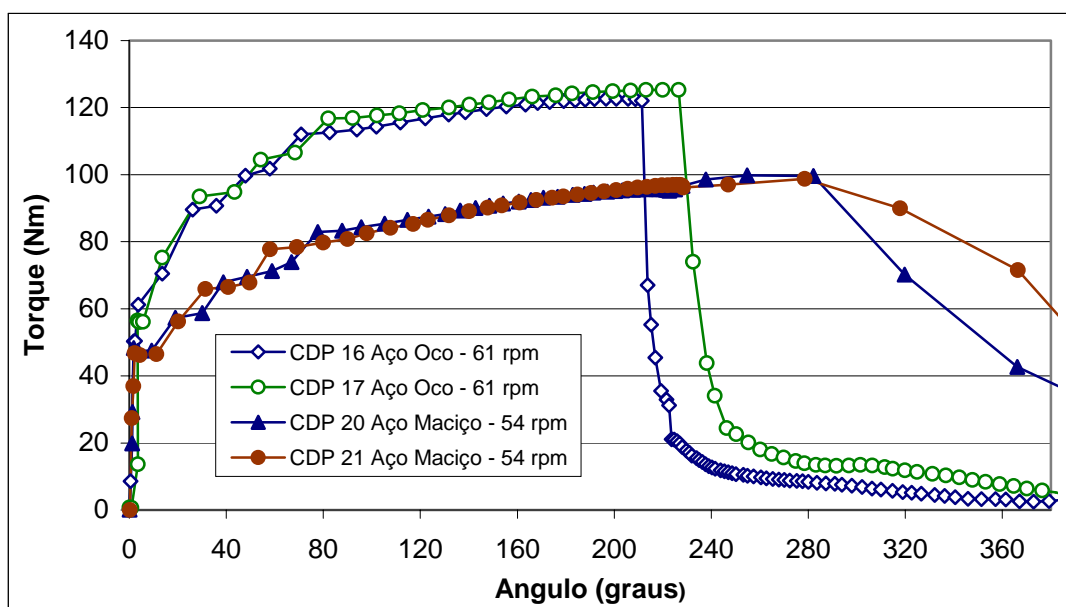


Figura 9. Curva experimental do torque versus ângulo realizado com diferentes velocidades de deformação do aço 1020 recozido.

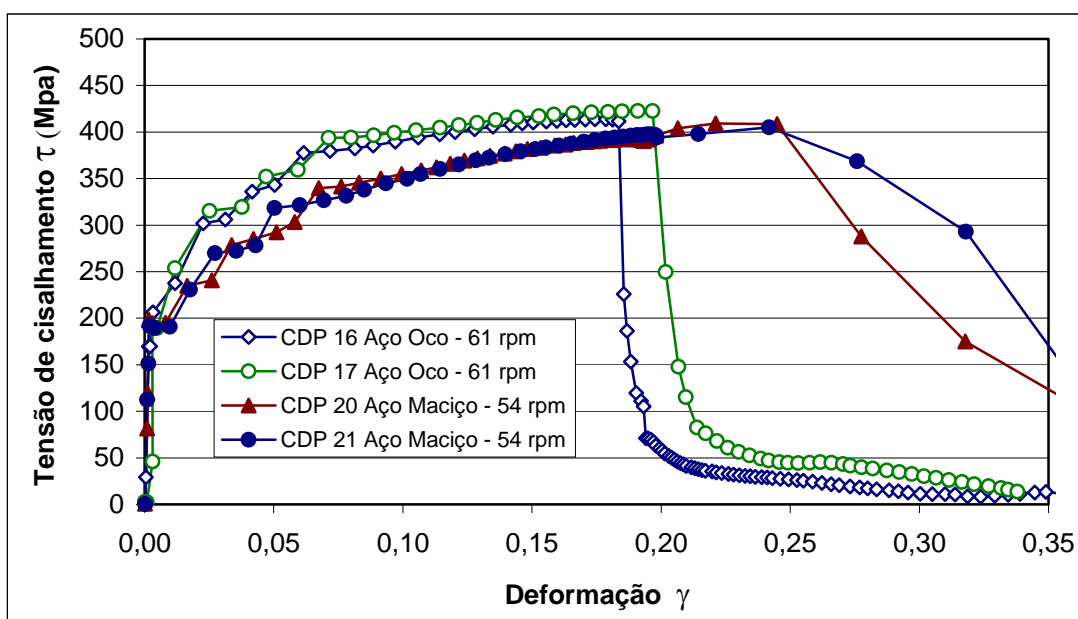


Figura 10. Curva experimental da tensão de cisalhamento versus deformação obtida da máquina de ensaio de torção plástica do aço 1020 recozido.



Nas curvas dos cdp's oco e maciço do aço é possível se observar, no início do escoamento, degraus bem acentuados devido ao encruamento do material ocorrer numa faixa local e se distribuir ao longo do cdp. Porém, o caso do cdp maciço apresentou valores de tensão de cisalhamento abaixo das tensões desenvolvidas no cdp oco em função da velocidade de deformação ser menor. Através desta observação entende-se que quanto menor for a velocidade do ensaio menor será a tensão de cisalhamento obtida. A instabilidade plástica para ambos os cdp's apresentaram pontos de ruptura diferentes devido a geometria e homogeneidade da estrutura do material.

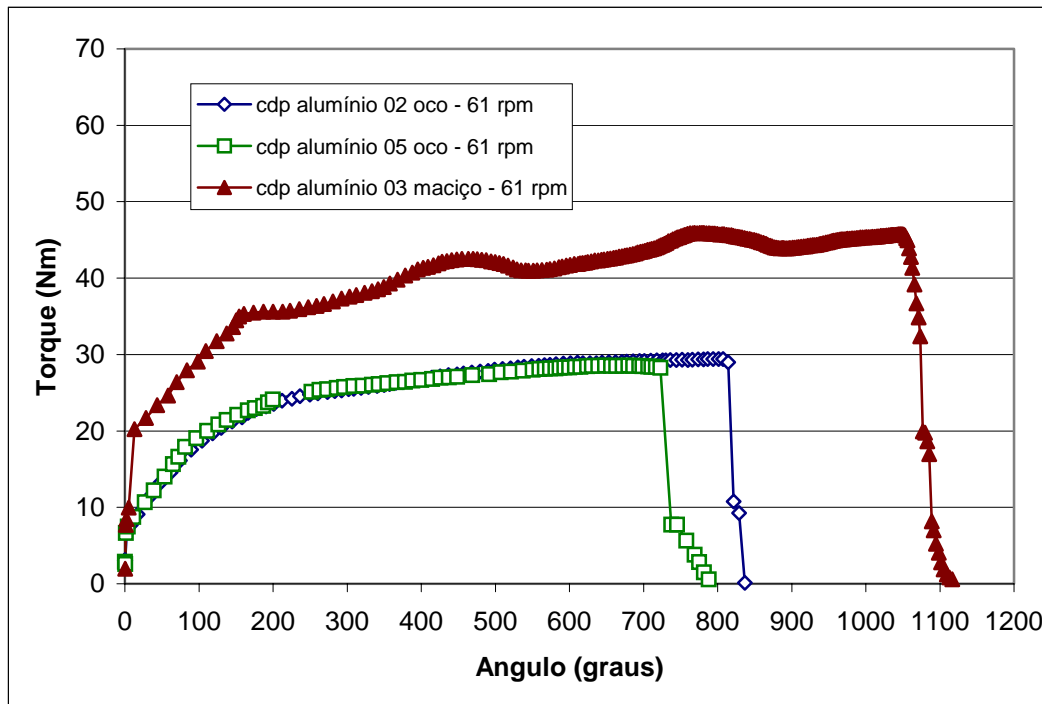


Figura 11. Curva experimental do alumínio recozido do torque versus ângulo obtida da máquina de torção plástica realizado com uma taxa de 2/s (61rpm).

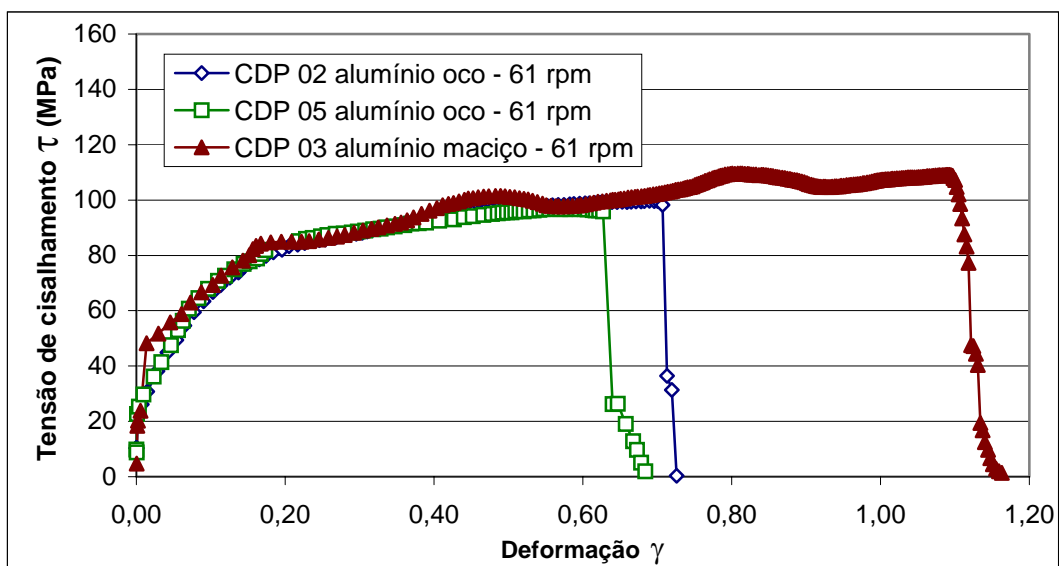


Figura 12. Curva experimental da tensão de cisalhamento versus deformação obtida da máquina de ensaio de torção plástica para o alumínio recozido.

Para os ensaios de torção plástica realizados com o alumínio recozido ocorreu uma superposição das curvas de ambos os tipos de corpos de prova, maciço e oco, no início do escoamento. Isto se deve possivelmente ao fato do material estar numa condição bastante dúctil.

## 6. CONCLUSÕES

Dos resultados experimentais obtidos dos ensaios de tração uniaxial e torção plástica do aço 1020, latão, cobre e alumínio recozidos deste trabalho, pode-se concluir que os comportamentos plásticos desses materiais apresentam diferentes valores dos parâmetros da equação de plasticidade, ou seja, o coeficiente de encruamento  $n$ , o coeficiente de resistência  $K$  e parâmetro  $m$ . Isto deve-se ao fato dos ensaios serem realizados com diferentes taxas de deformação: tração uniaxial com taxas de  $0,17 \times 10^{-2}/s$  e  $3,34 \times 10^{-2}/s$  e na torção plástica com uma alta taxa de  $2/s$ . Além disso, o estado de tensão na tração simples é uniaxial e na torção é de cisalhamento simples. Os valores do coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação  $m$  do aço 1020, alumínio e latão encontrados nos ensaios de tração uniaxial foram respectivamente 0,013 ; 0,027 e 0. Porém, os valores encontrados para este “ $m$ ” considerando as velocidades dos ensaios da tração uniaxial em relação a torção para estes materiais foram 0,072 ; 0 e 0,045 respectivamente. Desta forma, observa-se que “ $m$ ” depende da velocidade do ensaio e os corpos de prova ociosos são os mais indicados para os ensaios de torção plástica devido a não apresentarem um gradiente de tensão de cisalhamento na espessura do cdp .

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pela bolsa de mestrado recebida para desenvolver este trabalho bem como o apoio da UDESC e do CNPq.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] NADAI, A., Theory of Flow and Fracture of Solids, V.1, McGraw-Hill, New York, p.349,1950.
- [2] MCGREGOR, T.W.J., Elements of Mechanical Metallurgy. Macmillan, New York, p.64, 1967.
- [3] FIELDS, D.S. and BACKOFEN W.A., Proceedings ASTM, V.57, p. 1259, 1957.
- [4] CANOVA, G. R. et. al., in formability of Metallic Materials – 2000 A. D., J.R. Newby and B. A. Niemeier, Ed. ASTM, STP 753 , Philadelphia, p.189, 1982.
- [5] PÖHLANDT, K. and Tekkaya, A. E., Torsion testing plastic deformation to high strains and strain rates, Institut Fur Umformtechnik, Universit of Stuttgart, Germany, V. 1, p. 972-977, 1985.

## CONSTRUCTION AND TESTS OF A TORSION TEST EQUIPMENT FOR OBTAINING METALS PLASTIC BEHAVIOR

**José Divo Bressan** Centro de Ciências Tecnológicas – CCT/UDESC – Campus Universitário 89.223-100-Joinville, SC, Brasil. Fone:(47) 431-7258. Fax: 431-7240. dem2jdb@joinville.udesc.br

**Ricardo Kirchof Unfer** Centro de Ciências Tecnológicas - CCT/UDESC- Campus Universitário 89.223-100- Joinville, SC, Brasil. Fone: (47) 431-7258. Fax: 431-7240. rkunfer@hotmail.com

**Abstract:** *Present work aimed at developing, testing and operating a computerized prototype machine for performing cold plastic torsion tests. The operation and project of this machine were carried out in the Laboratory of Metal Forming at UDESC – Joinville. The equipment consists of a horizontal torsion machine, employing an electric motor, a wheel, a horizontal axle and a control and acquisition data system. The torsion angle is obtained by an encoder and the torque is measured by a load cell. Experimental tests were carried out at a constant angular speed that imposed a constant shear strain rate to the specimen. Setting the rotation speed to 60 rpm, it was possible to simulate the initial operation stage of sheet metal rolling process that utilizes the strain rate of about 2/s. The torsion tests have been carried out on materials such as annealed 1020 steel, brass, pure copper and pure aluminum. The strain rate sensitivity parameter  $m$  has been evaluated from the equivalent stress versus strain curve from tensile and torsion tests. The parameter  $m$  from tensile tests for brass and copper were zero, however, for 1020 steel and aluminum were respectively 0.013 and 0.027. In torsion test the values were 0.072 and 0.045 for steel and brass.*

**Keywords:** *Torsion Test, Plasticity, Work hardening, Equipment design.*