



## ESTUDO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS E UTILIZAÇÃO DE STRAIN-GAGES EM ENSAIOS DINÂMICOS E COMPARAÇÃO ENTRE AS CALIBRAÇÕES ESTÁTICA E DINÂMICA DA CÉLULA DE CARGA

**Carla Nagata<sup>1</sup>, Antônio de Pádua Lima Filho<sup>2</sup>**

Universidade Estadual Paulista, UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, (1) [carla@dem.feis.unesp.br](mailto:carla@dem.feis.unesp.br), (2) [padua@dem.feis.unesp.br](mailto:padua@dem.feis.unesp.br) - Ilha Solteira, SP, Brasil.

**Euler Barreto Júnior**

Consultor Técnico em Extensometria, [euler@projetonet.com.br](mailto:euler@projetonet.com.br)

**Resumo.** *No presente trabalho discussões sobre a instrumentação de uma prensa excêntrica para estimar o valor da sua carga de operação utilizando strain-gages são feitas. Quatro strain-gages foram posicionados na haste da prensa excêntrica (12 toneladas de capacidade), a qual transmite o movimento entre a máquina e seu cabeçote. Uma prensa mecânica foi usada para obter a curva de calibração da haste instrumentada. Dessa forma, o trabalho discute a calibração estática feita na prensa mecânica para estimar o valor da carga na prensa excêntrica (carregamento dinâmico). Para a verificação da eficiência da instrumentação foram realizados ensaios de corte, por puncionamento, em tiras de alumínio em ambas as prensas. O parâmetro de interesse é a força de corte. Esta teve seu valor comparado também com as equações, que estimam esta força, encontradas na literatura.*

**Palavras-chave:** *Extensometria, instrumentação, calibração, aquisição de sinais.*

### 1. INTRODUÇÃO

Em um sistema de aquisição de sinais, pode ser observado sinais do tipo estático ou dinâmico. Este último apresenta variação com o tempo (Figliola & Beasley, 1991). Para ensaios dinâmicos, condicionadores de sinais com alta frequência de resposta são usados para obter dados de forma rápida, sem que ocorra a degeneração do sinal gerado (ISO 14556:2000(E)). Segundo a norma ASTM E1237-93 (1993), muitas considerações devem ser feitas para especificar corretamente o tipo de extensômetro. Por exemplo, fatores geométricos como dimensões da grelha e do filme, resistência elétrica do elemento sensitivo, fator de extensômetro e compensação de temperatura. A faixa de temperatura de trabalho, estabilidade, aplicação e tipo do material base onde o mesmo será fixado, também devem ser levados em consideração.

Neste trabalho, o material da base dos *strain-gages* é constituído de epoxy e fio metálico de constantan. Este possui a propriedade de auto compensação de temperatura e uma resistência elétrica de 120  $\Omega$  (Catálogo EXCEL, 1998). A fixação dos *strain-gages* na

superfície da estrutura, deve ser feita de modo que a resistência elétrica dos mesmos possa variar com a deformação da superfície do material de base (ASTM E1237-93, 1993).

Ireland (1977), relata que um sinal obtido em uma célula de carga, é uma combinação bastante complexa da resposta verdadeira, forças inerciais, flutuações de baixa frequência das ondas refletidas e ruídos provenientes do sistema de aquisição. Então, um conhecimento prévio do comportamento do sistema de aquisição de sinais e a relação entrada/saída do sinal é fundamental (Rodrigues, 2000).

A instrumentação de máquinas e equipamentos é utilizada visando um processo de otimização ou controle da produção. Schaeffer *et al.* (2000) utilizou células de carga para a medição das forças de corte e do prendedor de chapas, como também o deslocamento do punção, visando a otimização da qualidade final da peça cortada.

O processo de puncionamento é amplamente empregado no corte de chapas e folhas metálicas utilizando um ferramental constituído de punção e matriz. Comparado com a fundição, forjamento ou usinagem, é um processo fácil, rápido e econômico para obter peças no tamanho, forma e acabamento desejado (Luo, 1997). Neste tipo de operação, está envolvido um conjunto de três forças: a força do punção (corte), a força de ejeção de *blank* da cavidade da matriz e a força do extrator (Chan *et al.*, 1998).

O afastamento entre o punção e a matriz é denominado de vão de quebra ou folga (Doyle, 1978). Assim, quando o punção desce, empurra o material para dentro da cavidade da matriz. Durante este percurso, tensões cisalhantes provocam o corte do material (superfície brilhante) entre as bordas do punção e da matriz. Posteriormente uma superfície rugosa é formada devida a ruptura do material. Se a folga for correta, as trincas de ruptura inferior e superior se encontram e tem-se a fratura da peça. Caso a folga seja muito grande ou pequena, as trincas não se encontrarão, e uma quantidade adicional de energia terá que ser fornecida e assim, a fratura é dita rasgada (ASM Handbook, 1996).

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é empregar a calibração estática (taxa de deformação de  $10^{-5}$  a  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) de um componente de uma prensa excêntrica (haste), para estimar a carga no ensaio dinâmico de baixa velocidade (taxa de deformação de  $10^{-1}$  a  $10^2 \text{ s}^{-1}$ ), Dieter (1988). Para isso, corte de *blanks* por puncionamento em tiras de alumínio, foi usado para verificar se a calibração estática feita, pode ser utilizada para avaliar a carga na prensa excêntrica (carregamento dinâmico).

O equipamento instrumentado neste trabalho é uma prensa excêntrica de 12 toneladas de capacidade. O local escolhido para a colagem dos extensômetros elétricos, foi a haste da prensa que liga o cabeçote da mesma com o restante do equipamento.

Naturalmente, o fenômeno de impacto do punção sobre uma chapa, é influenciado pelo ângulo de impacto, geometria e características do material do punção e da chapa a ser cortada durante o uso desta prensa, e finalmente da velocidade de carregamento (Zukas *et al.*, 1992). Entretanto, neste trabalho, somente será analisado a influência da velocidade de corte na carga das duas prensas.

A força de corte dos *blanks* foi estimada através da resistência a tração (Kalpakjian, 1997) e da resistência ao cisalhamento do material (Crane, 1944), para efeito de comparação com os valores obtidos na prensa instrumentada.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Colagem dos extensômetros

Os extensômetros foram colados em ponte de *Wheatstone* que é um circuito muito utilizado em extensometria, tanto para medições de deformações estáticas como dinâmicas, (Juvinall, 1967).

Este tipo de circuito permite eliminar a influência da temperatura (Barreto, 1998) sobre os extensômetros. Após a colagem, é necessário a aplicação de pressão sobre os mesmos através de grampos de pressão (Figura 1). *Aqui* a pressão foi de 0,49 MPa. A cura e pós-cura, para o alívio de tensões no adesivo, foram realizadas em um forno mufla a 180° C por 120 minutos e 190° C por 90 minutos, respectivamente (Catálogo EXCEL, 1998).

A fixação dos cabos coletores de dados foi feita de modo que qualquer solicitação não danificasse a célula de carga. E *após* fixados, uma camada de borracha de silicone, não corrosiva, para a proteção da célula, foi aplicada. Esta camada tem por finalidade proteger a célula de carga contra óleos, graxas ou qualquer outro material que possa comprometer o desempenho dos extensômetros.

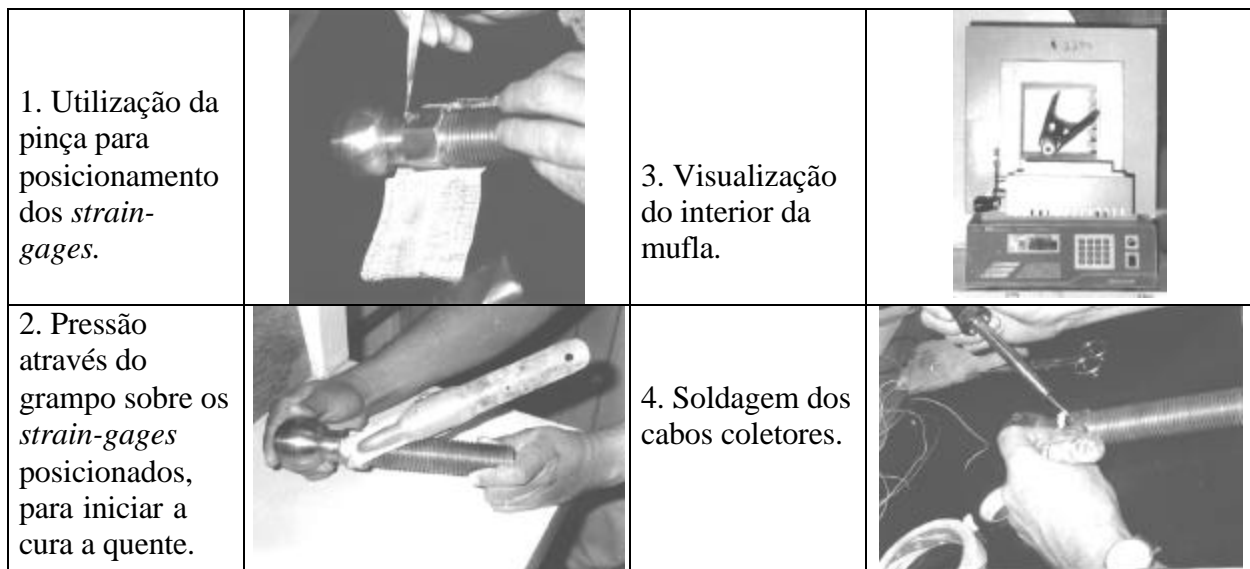


Figura 1. Sequência de colagem dos extensômetros na haste da prensa excêntrica.

#### 3.2 . Calibração

Como os *strain-gages* possuem um comportamento linear (Barreto, 1998), a calibração efetuada, pode ser extrapolada para uma carga superior. Então, a calibração foi realizada numa prensa mecânica de 4 toneladas de capacidade, modelo C1006 da PAVITEST (Figura 2) para estimar a carga até 12 toneladas (capacidade máxima da prensa excêntrica instrumentada neste trabalho).

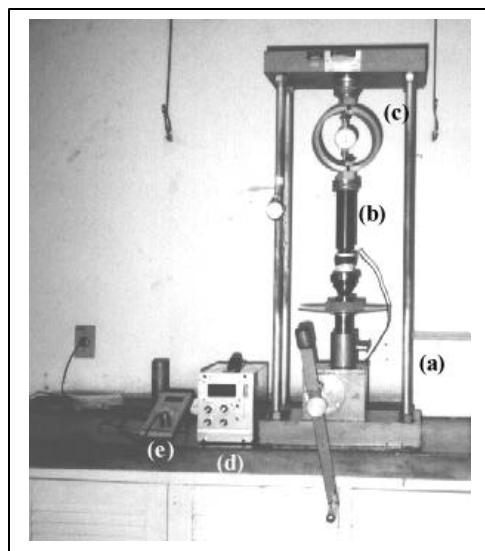


Figura 2. Sistema de calibração da célula de carga.

Na Figura 2, estão representados: (a) prensa estática de 4 ton de capacidade, modelo C 1006 da Pavitest; (b) haste da prensa excêntrica; (c) anel dinamométrico; (d) indicador digital de deformação modelo TMDE da Transdutec; (e) multímetro modelo MIC 7000FT DMM.

Assim, através da aplicação gradual da carga na prensa estática, os valores da carga foram obtidos pela leitura no relógio comparador, acoplado no anel dinamométrico.

Para alimentar a ponte e captar os sinais elétricos obtidos da deformação dos *strain-gages*, foi utilizado um amplificador e condicionador digital de sinais modelo TMDE. A variação de tensão de saída deste condicionador foi registrada por um multímetro, modelo MIC 7000FT DMM, para que fosse possível plotar uma curva e encontrar a equação de calibração para a célula de carga (veja Resultados e Discussão).

### 3.3. Ensaio de corte

A força de corte foi medida para avaliar o sucesso da instrumentação na prensa excêntrica. O ensaio de corte foi escolhido por ser o mais viável em termos de material disponível no laboratório e o mais simples de ser implementado. Os ensaios foram realizados em ambas as prensas para que os resultados entre o corte estático e o corte dinâmico fossem comparados. Para isto, uma matriz e um punção circular foram usinados e são mostrados na Figura 3. Este ferramental foi feito de aço ABNT 1040 (material disponível na oficina do DEM/FEIS/UNESP).

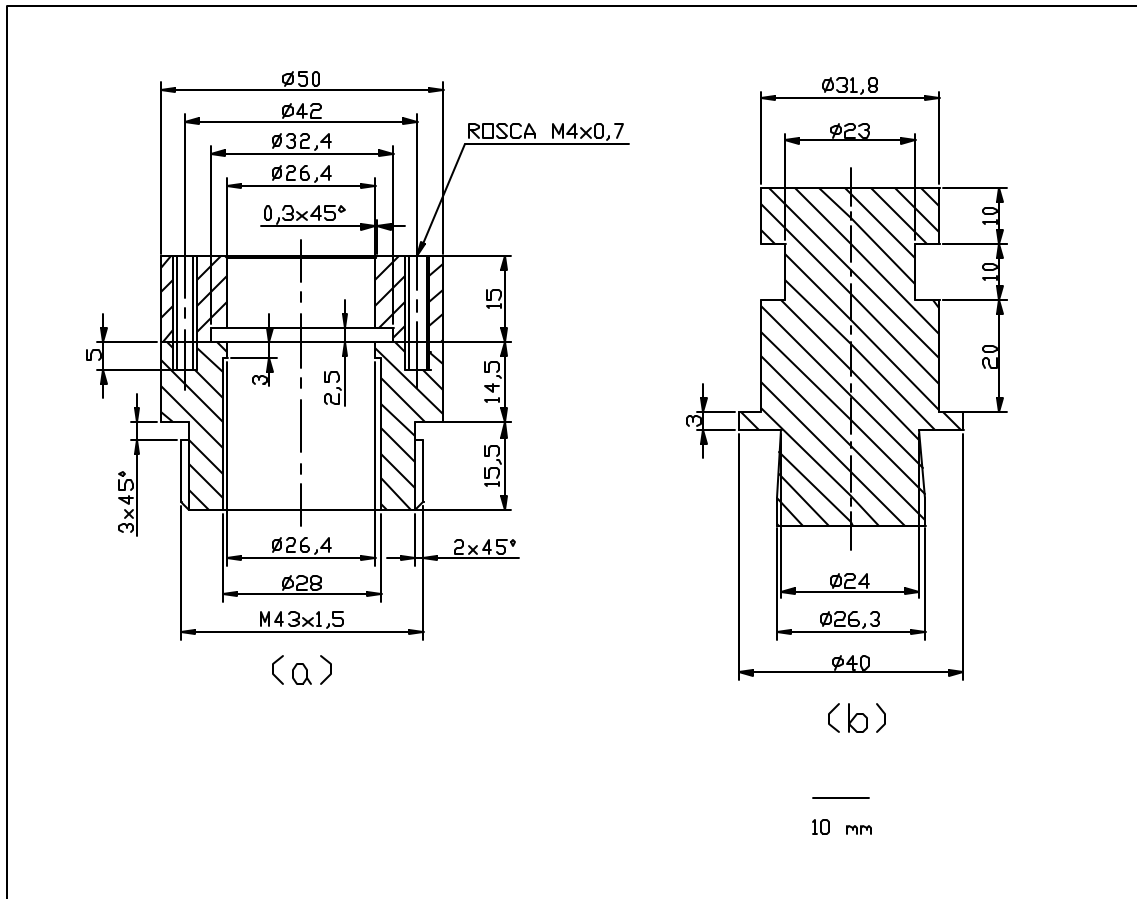


Figura 3. Projeto do ferramental para cortar *blanks* de alumínio. (a) matriz (b) punção.

Para aquisição de sinais referente aos ensaios de corte em ambas as prensas, um sistema de medição composto por um condicionador de sinais e um osciloscópio digital de memória (TEKTRONIX TDS 210) acoplado a um microcomputador Pentium 75 MHz, foi montado. Figura 4 mostra a prensa excêntrica instrumentada.

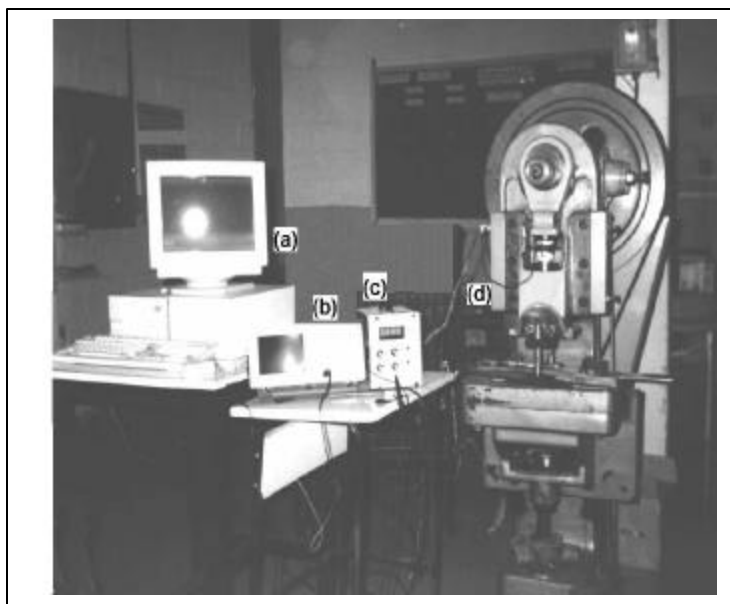


Figura 4. Montagem do sistema de medição. (a) microcomputador (Pentium 75 MHz); (b) osciloscópio TEKTRONIX TDS 210; (c) TMDE TRANSDUTEC; (d) prensa excêntrica (12 toneladas de capacidade).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A equação de calibração estática da célula de carga é apresentada na Equação (1). É a equação de uma reta e isto satisfaz o comportamento linear dos *strain-gages* como mencionado anteriormente.

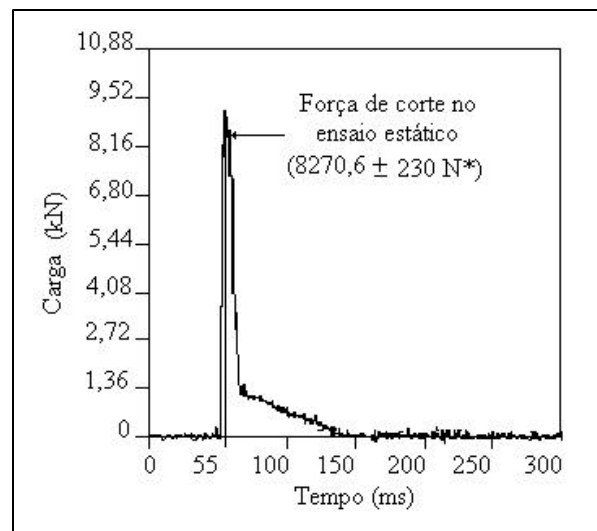
$$F[N] = 7,12T[mV] \quad (1)$$

onde F e T são respectivamente a força em Newton e a tensão medida no multímetro em milivolts.

Figura 5 ilustra o perfil do carregamento progressivo de corte feito para *blank* de alumínio de  $\phi$  26,4 mm, obtido na prensa de 12 toneladas instrumentada. O *software* WAVESTAR foi usado para obter os pontos da curva da Figura 5. O valor da carga medida na prensa estática, é assinalado nesta curva para efeito de comparação, a qual está bem próxima da força de corte na prensa excêntrica.

O *blank* de alumínio apresentou uma aresta de corte com pouca formação de rebarba como observado na Figura 6, uma vez que o ferramental construído foi especialmente projetado para este fim (Provenza, 1987).

A prensa instrumentada por Schaeffer *et al.* (2000) mostra curvas características da força de corte versus tempo para aço inoxidável de 1mm de espessura, variando a folga entre matriz e punção. A maior força de corte obtida foi para uma folga entre punção e matriz de 5 %. Este punção foi chanfrado (0,5mm x 45°) para simular uma situação de desgaste.



\*Os valores para os intervalos de confiança foram calculados tomando 5 amostras com 95% de confiabilidade.  
Figura 5. Perfil de carregamento progressivo para o *blank* de alumínio 1050 H14 de  $\phi$  26,4mm, cortado na prensa excêntrica. Nesta está indicado o valor da força de corte no ensaio estático para efeito de comparação com o ensaio dinâmico.

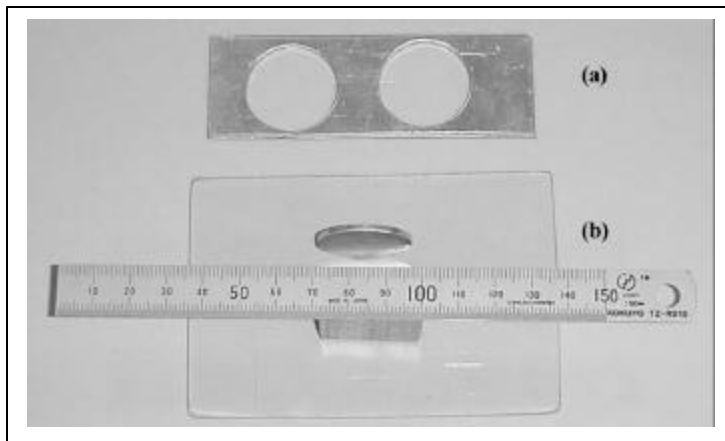


Figura 6. (a) Tira de alumínio cortada; (b) Perfil de corte dos *blanks* de alumínio.

Tabela 1 compara os valores da força de corte obtidos na prensa estática e excêntrica, com os estimados teoricamente por Kalpakjian (1997) e Crane (1944).

Tabela 1. Valores teóricos e experimentais máximos para força de corte ( $F_c$ ).

Método		Força de Corte ( $F_c$ ) [N]
Teórico	Experimental	
Kalpakjian (1997) $F_c = 0,7\sigma_t S$	–	9865,1*
Crane (1944) $F_c = \sigma_{cis} S$	–	11605,0*
-	Prensa Excêntrica	9454,6 ± 100**
-	Prensa Estática	8270,6 ± 230**

\*Dados do fabricante ( $\sigma_t = 85 \text{ N/mm}^2$ ;  $\sigma_{cis} = 70 \text{ N/mm}^2$ ); S – área de corte.

\*\*5 amostras com confiabilidade de 95 %.

A força de corte obtida no ensaio estático pela prensa mecânica foi 12,5 % menor que no ensaio dinâmico, isto já era esperado pois a velocidade de impacto, a taxa de deformação e a deformação plástica localizada influenciam a força de corte (Zukas *et al.* 1992).

Por outro lado, quando se compara a força de corte por Kalpakjian com a força de corte dinâmica (Tabela 1), esta apresentou uma diferença de 4,16 % abaixo da teórica. Este resultado próximo, valida a instrumentação da prensa excêntrica feita neste trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

A Equação (1) de calibração está de acordo com a expectativa, uma vez que atendeu a condição de alta linearidade dos extensômetros (Barreto, 1998). Assim, pode-se afirmar que os extensômetros foram bem posicionados e colados na haste da prensa excêntrica.

A instrumentação da prensa excêntrica apresentou resultados conservadores quando comparados com os da prensa estática. Isto pode ser explicado pela elevada taxa de carregamento da prensa excêntrica.

Dessa forma, trabalhos posteriores de conformação mecânica poderão ser monitorados na prensa excêntrica instrumentada.

## ***Agradecimentos***

Aos professores, Gilberto Pechoto de Melo do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e José Carlos Rossi do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), pelo total apoio técnico e empréstimo de equipamentos. Agradeço também aos técnicos dos Departamentos da Engenharia Civil, Sr. Mário Roberto Correia Ferreira; Engenharia Elétrica, Sr. Everaldo Leandro de Moraes e Engenharia Mecânica, Sr. Marino Teixeira Caetano pelo auxílio no desenvolvimentos da pesquisa. E a FAPESP pelo suporte financeiro.

## **REFERÊNCIAS**

- ASM Handbook, 1996, Forming and Forging, vol. 14, ASM International, 4<sup>th</sup> printing.
- ASTM Designation: E1237-93, 1993, Standard Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages, ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing and Subcommittee E-28.14 on Strain Gages.
- Barreto, E. J., 1998, Módulo I – Aprenda Extensometria, Princípio de Funcionamento do Extensômetro.
- Catálogo Extensômetros Elétricos, 1998, EXCEL Engenharia de Sensores Ltda.
- Chan, L.C., Lee, T.C., Wu, B.J. and Cheung, W.M., 1998, Experimental Study on the Shearing Behaviour of Fine Blanking Versus Bar Cropping, Journal of Materials Processing Technology 80-81, pg. 126-130.
- Crane, E.V., 1944, Plastic Working os Metals ans Non-Metalic Materials, 3<sup>rd</sup> ed. 4<sup>th</sup> printing, New York, John Willey & Sons, Inc., London Chapman & Hall, Ltda.
- Dieter, G.E., 1988, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, London.
- Doyle, L.E., 1978, Processos de Fabricação e Materiais para Engenheiros, Editora Edgard Blücher Ltda..
- Figliola, S.R. and Besaley, D.E., 1991, Theory and Design for Mechanical Measurements, JohnWilley & Sons, EUA.
- Ireland, D.R., 1977, Critical Rewiew of Instrumented Impact Charpy Test, Cambridge: The Welding Institute, Conference Technical Publication.
- International Standard ISO 14556, 2000, Steel – Charpy V-Notch Pendulum Impact Test- Instrumented Test Metod, First Edition.
- Juvinall, R.C., 1967, Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Kalpakjian, S., 1997, Manufacturing Process for Engineering Materials, 3<sup>rd</sup> ed., Addison-Wesley, Menlo Park, California.
- Luo, S.Y., 1997, Studies on the Wear Conditions and the Sehard Edges in Punching, Elsevier Science Wear 208, pg. 81-90.
- Provenza, F., 1987, Estampos III PROTEC, Editora F. Provenza, São Paulo/SP.
- Rodrigues, A.R., Tokimatsu, R.C., Arato Júnior, A. e Delforge, D.Y.M., 2000, Avaliação da Arquitetura de Aquisição de Sinais Adotada na Medida da Tenacidade à Fratura Dinâmica Aparente de Materiais Metálicos, 55<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro/RJ.
- Schaeffer, L., Richter, A. e Souza, J.H.C., 2000, Ferramenta Instrumentada para pesquisas em Processos de Cisalhamento de Chapas, in: 55<sup>o</sup> Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Zukas, J.A., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszczuk, L.B. and Curran, D.R., 1992, Impact Dynamics, 1<sup>st</sup> ed, Krieger Publishing Company, Malabar-Flórida.



**STUDY OF SIGNALS ACQUISITION SYSTEM AND UTILIZATION OF STRAIN-  
GAGES IN  
DYNAMIC TESTS AND COMPARISON BETWEEN STATIC AND DYNAMIC  
CALIBRATIONS OF LOAD CELL**

***Abstract.** In this paper, it is showed discussions about instrumentation of an eccentric press to evaluate the value of its load operation by strain-gages. These were attached at the eccentric press component which transmit the movement between the machine and its head. A mechanical press was used to acquire a calibration curve. The paper discuss the application of this static calibration, to estimate the load in dynamic testing utilizing an eccentric press. Blanking testing by punching in aluminum strip, was carried out to verify the efficiency of the instrumentation made. The experimental measurement cutting forces as achieved, were compared with theoretical models.*

***Keywords:** Strain-gages, instrumentation, calibration, signals acquisition.*