

## Equipamento

# Supervisão de corte de chapas eleva a segurança e o controle sobre o processo

Sistemas de produção modernos requerem supervisão dos fatores que influenciam a qualidade do produto. Nos processos de corte é possível obter estas informações pelo monitoramento da força do punção *versus* tempo, ângulo do martelo ou deslocamento do punção. Nos casos em que é importante obter um valor preciso da força na ferramenta, é necessário posicionar os sensores o mais próximo possível das partes onde as forças atuam, o que significa que a geometria dos sensores deve ser compacta e adequada a estas dimensões. Este trabalho apresenta uma ferramenta instrumentada para pesquisas no processo de corte que permite a variação controlada dos fatores do processo, tornando possível o estudo da sua influência na qualidade do corte. O uso de sensores para supervisão eleva a segurança do processo e o controle sobre o desgaste da ferramenta, sem a necessidade de interromper a produção.

L. F. Folle, J. H.C. Souza, A. Richter e L. Schaeffer

A supervisão do processo de estampagem pode auxiliar, por exemplo, no controle da qualidade do produto, no aumento do intervalo entre as manutenções preventivas e também na proteção da ferramenta em caso de falha em alguma etapa do processo de conformação. Em outras palavras: na redução dos custos de produção.

Um dos mais importantes parâmetros para a supervisão de processos

em ferramentas de estampagem é a força do punção, representada em função do tempo ou do deslocamento do punção<sup>(1,2)</sup>. Esta pode ser medida, por exemplo, por células de carga colocadas na estrutura da prensa ou diretamente na ferramenta<sup>(3,4)</sup>.

As diferentes posições possíveis para os sensores influenciam a qualidade do resultado da força a ser medida. Especialmente em ferramentas com molas ou com mais de um pun-

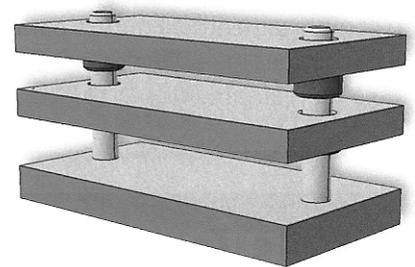


Fig. 1 – Base de estampo com duas colunas e placa intermediária

ção, uma medição correta da força não é possível por meio de sensores fixados na estrutura da prensa. Este tipo de instalação permite apenas medições comparativas<sup>(5)</sup>. Além disso, pontes de *strain gages* coladas diretamente nas partes ativas da ferramenta têm uma desvantagem que prejudica sua utilização na indústria: não são facilmente substituídas. Em caso de dano é preciso desmontar a ferramenta e instalar

Luis Fernando Folle, João Henrique Corrêa de Souza, Arno Richter e Lirio Schaeffer são pesquisadores do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS ([www.ufrgs.br/ldtm](http://www.ufrgs.br/ldtm)). Este artigo foi apresentado como palestra técnica durante o Congresso Corte e Conformação de Metais, realizado entre 29 e 31 de outubro de 2001 e durante a Conferência Nacional de Conformação de Chapas, realizada em 24 de outubro de 2000. Reprodução autorizada pelos autores.

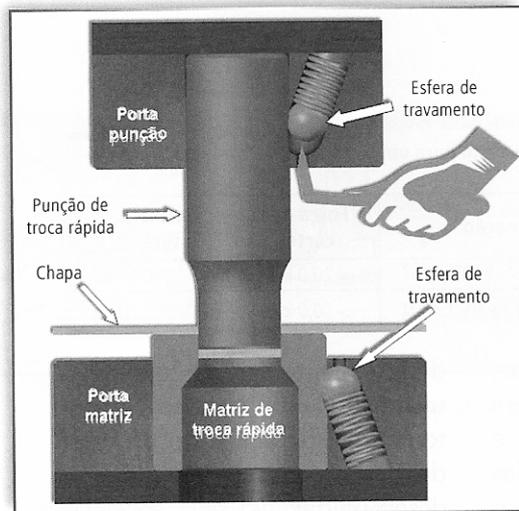


Fig. 2 – Sistema de encaixe com esfera usado no punção e na matriz de corte

novos sensores. Em medições que requerem exatidão no valor da força é necessário posicionar as células de carga o mais próximo possível das partes ativas da ferramenta, ou seja, onde a força em questão atua. Isto significa que a geometria do sensor precisa ser compacta e seu perfil adaptado às seções dos elementos da ferramenta<sup>(6)</sup>. Além disso, é importante ter em mente constantemente a redução dos custos de fabricação, evitando o uso de componentes não padronizados. Portanto, a supervisão de processo

utilizando sensores montados dentro da ferramenta requer um projeto cuidadoso tanto da ferramenta quanto dos sensores, para garantir o correto posicionamento destes em relação à força a ser medida e também um *design* compacto, dentro dos padrões dimensionais de ferramentas normais<sup>(7)</sup>. Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma

ferramenta de corte instrumentada elaborada especialmente para pesquisa e melhoria do processo<sup>(8)</sup>. O projeto visou obter uma ferramenta a mais similar possível à utilizada normalmente na indústria, construída inteiramente com componentes padronizados.

### A ferramenta instrumentada

Como estrutura principal foi utilizada uma base de estampo convencional com duas colunas-guia

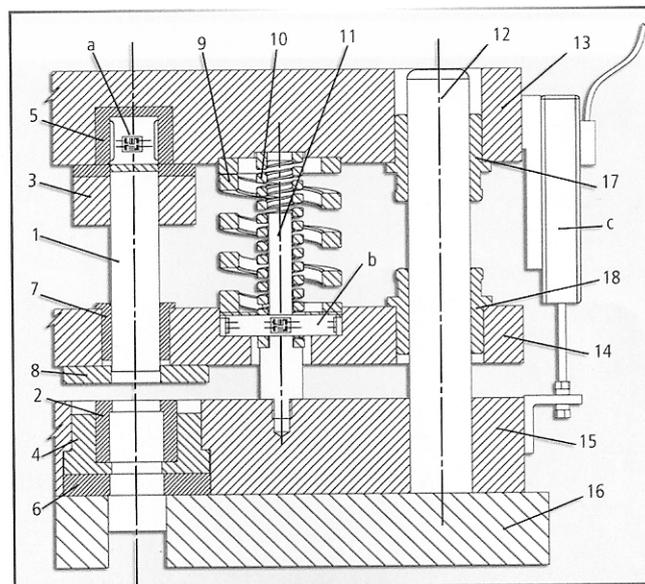


Fig. 3 – Corte parcial da ferramenta instrumentada, mostrando a localização dos sensores e demais componentes

## Equipamento

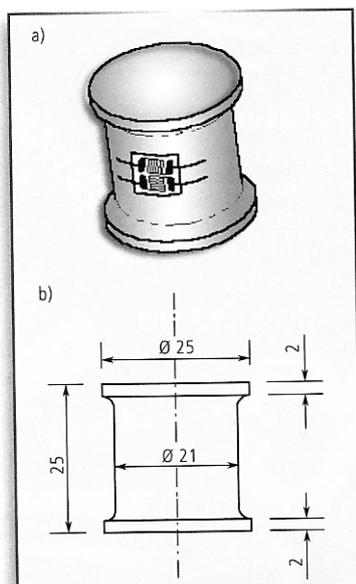


Fig. 4 – a) Vista em perspectiva;  
b) Dimensões da célula de carga.

e uma placa intermediária, que geralmente é um componente padrão usado em ferramentas de estampagem (figura 1, pág. 64).

As colunas-guia são fixadas na base inferior, com as placas superior e intermediária guiadas pelas colunas por meio de buchas deslizantes. Como o objetivo da ferramenta é permitir o estudo de

Tab. 1 – Exemplos de máxima força de corte para um punção de 25 mm de diâmetro em chapa com espessura de 1 mm

Tipo	Denominação	Força de corte	Tensão de ruptura ( $R_m$ )
Aço de baixo carbono	Fe P 04, St14, 1.0338	≈ 20,0 kN	270.....350 N/mm <sup>2</sup>
Aço inoxidável	304 S 15 X5 CrNi 18 10, 1.4301	> 50,0 kN	550.....750 N/mm <sup>2</sup>

diversas variações nos parâmetros de corte, é necessário usar um sistema de fixação de punção e matriz que permita a troca das partes ativas da ferramenta sem a necessidade de desmontá-la (propiciando, deste modo, uma grande economia de tempo e mão-de-obra) e, principalmente, sem perder o alinhamento entre punção e matriz. O problema foi resolvido com o uso de um sistema de travamento por esfera no punção e na matriz, como apresentado na figura 2 (pág. 65).

O punção foi fixado na placa superior, e a matriz na placa inferior. A placa intermediária fixa o prensa-chapas e serve como guia para o punção. A pressão exercida pelo prensa-chapas e a força de extração do punção são dadas por duas molas helicoidais. O projeto

da ferramenta permite também a utilização de molas prato ou elastoméricas, dependendo do valor de força de prensa-chapas que se deseja utilizar.

A instrumentação da ferramenta foi instalada o mais próximo possível das grandezas a serem medidas durante o processo. Três sensores foram instalados:

- Uma célula de carga de formato cilíndrico para medição da força de corte;
- Uma célula de carga de formato anelar para medição da força do prensa-chapas;
- Um sensor de deslocamento indutivo.

A figura 3 (pág. 65) mostra um corte longitudinal da ferramenta, revelando os componentes internos e o modo como os sensores foram

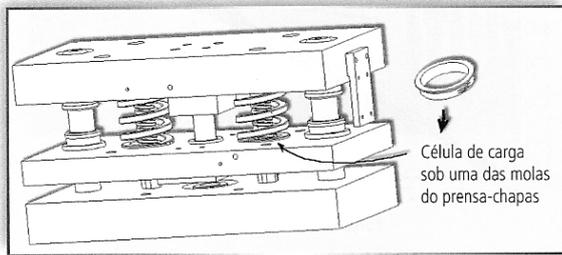


Fig. 5 – Esquema do posicionamento da célula de carga do prensa-chapas na ferramenta

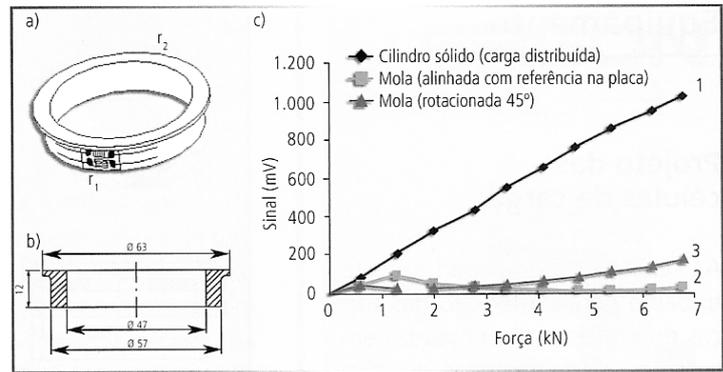


Fig. 6 – a) Posição dos extensômetros; b) Dimensões do anel; c) Curvas de calibração força (kN) versus sinal (mV).

instalados. Nela também pode ser visto o sensor de força do punção, sobre o qual o corpo do punção atua diretamente. Em "b" é mostrado o sensor de força do prensa-chapas, situado diretamente abaixo da mola responsável pela força deste. O sensor mede apenas metade da força total exercida pelo prensa-chapas. Em "c" é representado o sensor indutivo de deslocamento. Os componentes mostrados nas posições 1 e 2 são o punção e a matriz de troca rápida. Os itens 3 e 4 representam os suportes com travamento por esfera do punção e da matriz, respectivamente. Os itens 5 e 6 possuem a função de transmitir e distribuir a força de corte nas placas

superior e inferior da base de estampo, evitando grandes concentrações de tensão que podem levar a deformações permanentes das placas da ferramenta. Em 7 é mostrada a bucha que guia o punção no prensa-chapas. O item 8 representa o prensa-chapas. A mola da posição 9 é responsável pela força do prensa-chapas e pela extração do punção após o corte. Nas posições 10 e 11 está representada a mola de retorno e seu pino-guia. A mola de retorno tem como função elevar o conjunto superior da ferramenta (placa intermediária e placa superior), permitindo o posicionamento de uma nova chapa para o corte. A posição 12 representa uma das duas colunas

da base de estampo. Os itens 13, 14 e 15 são, respectivamente, as placas superior, intermediária e inferior da base de estampo. O item 16 representa a chamada placa-base da ferramenta. Esta foi equipada com um rasgo transversal que permite a retirada dos discos resultantes do processo de corte. Os itens 17 e 18 representam as guias deslizantes da base de estampo.

A ferramenta não possui um sistema de fixação na prensa em sua placa superior, pois foi concebida para trabalhar totalmente desacoplada da prensa. Isto elimina a possibilidade de que eventuais desalinhamentos da prensa prejudiquem o alinhamento entre o punção e a matriz<sup>(9)</sup>.

## Equipamento

### Projeto das células de carga

As células de carga usadas neste trabalho para a medição das forças do processo são baseadas em sensores extensométricos, que têm a forma de um filme ou película fina e são colados na face externa do componente de que se deseja medir a deformação. Durante a aplicação de uma força sobre o componente, este se deforma e, com ele, o sensor. Essa deformação do sensor ocasiona uma variação de sua fotorresistividade elétrica, o que pode ser medido por um circuito elétrico adequado (condicionador de sinais). Após sua construção, a célula precisa ser calibrada usando padrões de força, de modo que é possível associar o

valor de deformação ao valor de força. Diversos fatores devem ser levados em consideração durante a elaboração do projeto de sensores extensométricos, como por exemplo:

- a resistência mecânica da célula de carga em relação ao carregamento a ser medido;
- a geometria da célula;
- o espaço disponível para a célula dentro da ferramenta;

- o posicionamento dos extensômetros a serem colados na célula de carga.

O primeiro valor importante a ser determinado para a seleção de uma célula de carga para o punção é a força do processo, no caso, a força de corte. As forças envolvidas no corte, mesmo para chapas finas, são consideráveis. Para aços inoxidáveis ou aços modernos de

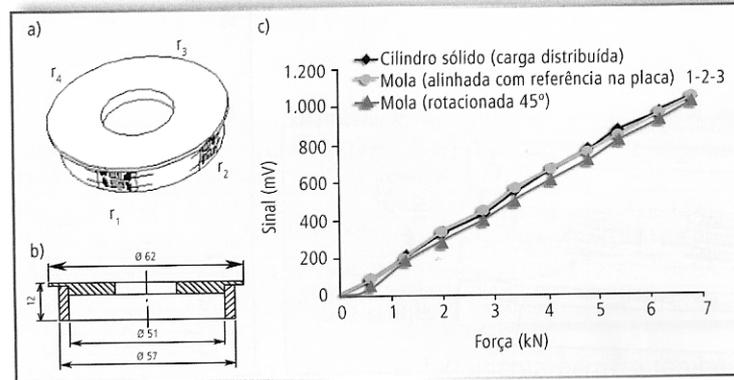


Fig. 7 – a) Nova posição dos extensômetros; b) Dimensões do novo anel; c) Novas curvas de calibração força (kN) versus sinal (mV).



Fig. 8 – Foto do Spider 8, usado no estudo e supervisão do processo

alta resistência a força necessária para o corte atinge valores muito grandes. A máxima força de corte  $F_{Smax}$  pode ser determinada por:

$$F_{Smax} = 0,8 \cdot R_m \cdot l_s \cdot s \quad (1)$$

Onde  $R_m$  é a resistência à tração,  $l_s$  é o comprimento da linha de corte e  $s$  é a espessura da chapa a ser cortada. A tabela 1 (pág. 66) mostra exemplos de cálculo da força máxima em um corte fechado de 25 mm de diâmetro, o mesmo usado neste trabalho, para uma chapa de 1 mm de espessura. A variação entre a força real medida no processo e o valor obtido por meio desta relação é de aproximadamente 20%<sup>(10)</sup>.

Para o dimensionamento da seção do sensor, dois fatores precisam ser considerados em conjunto:

- o valor da força a ser medida;
- o tamanho da deformação do sensor durante a aplicação da força.

Por um lado, a seção do sensor deve ser capaz de resistir ao esforço do processo e também da margem de segurança, que evita que alguma sobrecarga não intencional destrua

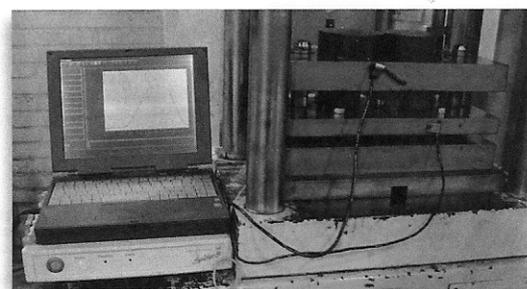


Fig. 9 – Sistema de investigação do processo de corte por cisalhamento

o sensor. Por outro lado, é preciso permitir uma certa deformação elástica do sensor, a qual será medida pelo sensor extensométrico – em forma de uma variação na resistência elétrica – e transformada pelo condicionador de sinais em uma variação de sinal elétrico. O valor ideal para a deformação relativa do sensor está em torno de<sup>(11)</sup>:

$$\varepsilon \cong 0,1\% \quad (2)$$

Entretanto, este valor pode variar de acordo com o tipo de extensômetro, de modo que é recomendada a consulta ao manual

Punção	Diâmetro	Folga	Chanfro
1	24,9 mm	0,05 mm	–
2	24,6 mm	0,20 mm	–
3	24,9 mm	0,05 mm	0,5 x 45°

do fabricante. A área da seção da célula de carga pode, então, ser calculada pela relação:

$$A_s = \frac{F_p}{\varepsilon \cdot E} \quad (3)$$

Onde  $A_s$  representa a área da seção da célula de carga,  $F_p$  a força do processo,  $\varepsilon$  a deformação relativa e  $E$  o módulo de elasticidade do material da célula. É importante também avaliar a relação entre altura e diâmetro do sensor para evitar flambagem.

O método de cálculo analítico aqui apresentado pode ser usado para o dimensionamento de sensores de geometria simples. Para geometrias mais complexas, é recomendável o uso de métodos numéricos, como simulação por elementos finitos, para o cálculo das

## Equipamento

tensões e deformações. A seguir, serão apresentadas as duas células de carga usadas neste trabalho.

### Célula de carga do punção

A célula de carga do punção tem formato cilíndrico, como mostrado na figura 4 (pág. 66). Foram usados dois sensores extensométricos biaxiais a 90° (conectados em um circuito de ponte de Wheatstone completa, de modo a compensar variações de temperatura).

### Célula de carga do prensa-chapas

A célula de carga do prensa-chapas consiste em um anel situado diretamente abaixo de uma das molas do

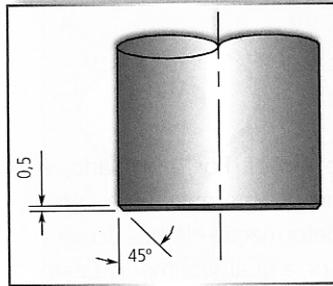


Fig. 10 – Chanfro aplicado a um dos punções para simular uma situação de desgaste

prensa-chapas, como mostrado na figura 5 (pág. 67).

O espaço para a instalação da célula é limitado pela espessura da placa intermediária, o que exigiu que fosse usado um sensor com dimensões desfavoráveis. Outro problema aparece com o uso de molas helicoidais. Por um lado, a mola requer uma certa compressão inicial, até se acomodar corretamente na posição de trabalho. Por outro lado, uma mola helicoidal não distribui sua força de forma uniforme sobre as superfícies

de apoio, ou seja, a força não é aplicada uniformemente sobre toda a superfície da célula de carga. Estes dois problemas prejudicam decisivamente a calibração do sensor, pois a resposta deste depende da posição da mola em relação a seu eixo de rotação.

Primeiramente foi construído um anel com dois extensômetros biaxiais a 90°, como mostram as figuras 6a e 6b (pág. 67). Esta célula apresenta muitos problemas na calibração quando são usadas molas helicoidais. O gráfico da figura 6c mostra três tentativas de calibração da célula. Em primeiro lugar, a calibração foi realizada utilizando, no lugar da mola, um cilindro sólido. O cilindro distribuiu o carregamento uniformemente sobre a célula, de modo que é possível a obtenção de uma curva

de calibração satisfatória, como mostra a curva 1.

Já com o uso das molas foi impossível calibrar o sensor. A tentativa de encontrar uma posição mais favorável da mola em relação ao sensor foi feita rotacionando a mola sobre uma marca de referência, refazendo a medição para cada posição. Porém, as tentativas não tiveram sucesso, como mostram as curvas 2 e 3 da figura 6c.

Para solucionar o problema, a célula de carga foi reprojeta e dividida em duas partes. A espessura da parede do anel foi reduzida para aumentar a deformação do sensor e, conseqüentemente, sua sensibilidade. Foram acrescentados dois outros extensômetros ao sensor, somando quatro no total, posicionados a 90° um com o outro. As figuras 7a e 7b (pág. 68) mostram as novas posições dos extensômetros e as novas dimensões da célula. Uma nova tentativa de calibração foi realizada com o novo modelo de sensor. A curva de calibração resultante é mostrada na figura 7c.

A curva 1 da figura 7c representa a calibração feita com um cilindro sólido no lugar de uma mola. As curvas 2 e 3 foram obtidas com molas helicoidais em duas posições diferentes, como explicado acima. O resultado foi a obtenção de curvas de calibração satisfatórias, independentemente da posição da mola em relação ao sensor, o que possibilitou o uso da nova célula na ferramenta.

### Teste do sistema

O sistema de aquisição no qual a ferramenta é conectada está mostrado na figura 8 (pág. 69). Este permite

a aquisição em até oito canais, que podem ser avaliados e mostrados em diagramas de força *versus* tempo ou força *versus* deslocamento. O sistema de aquisição de dados é o Spider 8, fabricado pela HBM, que é uma unidade eletrônica multicanal de aquisição de dados paralela.

A figura 9 (pág. 69) mostra o sistema completo de ferramenta e supervisão do processo montado em uma prensa.

Foram realizadas medições com a ferramenta em condições reais de trabalho. O objetivo foi avaliar a capacidade do sistema de medição de captar as alterações efetuadas nos parâmetros do processo de corte. Foram avaliadas alterações na folga entre punção e matriz e também a influência do desgaste do punção. Nos testes foram usadas três dimensões diferentes de punções, como mostra a tabela 2 (pág. 69).

No punção número três foi usado um chanfro, com o objetivo de simular uma situação de desgaste, como mostra a figura 10 (pág. 70). Foi utilizada uma chapa de aço de baixo carbono para conformação, com espessura 1 mm, e não foi usado nenhum tipo de lubrificante. Os resultados das medições estão representados na figura 11 (pág. 72).

### Supervisão do processo

A supervisão é baseada no fato de que diferenças no processo (que, por sua vez, resultam em diferenças na qualidade do produto) podem ser observadas em uma curva de força *versus* deslocamento, também chamada curva característica do processo. O perfeito funcionamento de sistemas deste tipo depende da repetibilidade do processo. A supervisão é realizada

## Equipamento

por meio da comparação da curva de cada novo corte com uma curva característica do processo, que foi previamente executada em condições ideais. A comparação é realizada com o uso de curvas-limite superior e inferior, que devem ser definidas usando o editor gráfico do sistema de supervisão. Um exemplo de processo de corte dividido em quatro partes – duas delas com diferentes curvas-limite – é mostrado na figura 12 (pág. 73). O cruzamento destas curvas-limite causa uma mensagem de erro e o desligamento imediato da prensa.

## Conclusões

Neste trabalho é apresentado um sistema de supervisão do processo

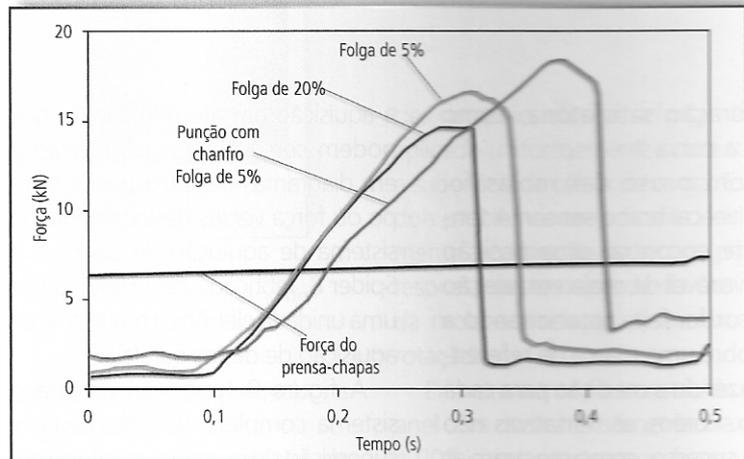


Fig. 11 – Resultado das medições de força do punção versus tempo

de corte por cisalhamento baseado em uma ferramenta de corte instrumentada. Os resultados mostram que é possível construir ferramentas instrumentadas para supervisão do processo usando apenas componentes padrão existentes no mercado.

Uma breve explanação sobre o dimensionamento de células

de carga foi apresentada, exemplificando alguns problemas possíveis durante o uso de sensores compactos para ferramentas. As diferenças observadas nas curvas mostraram que o sensor usado possui sensibilidade suficiente para detectar diferentes condições das partes ativas da ferramenta e alte-

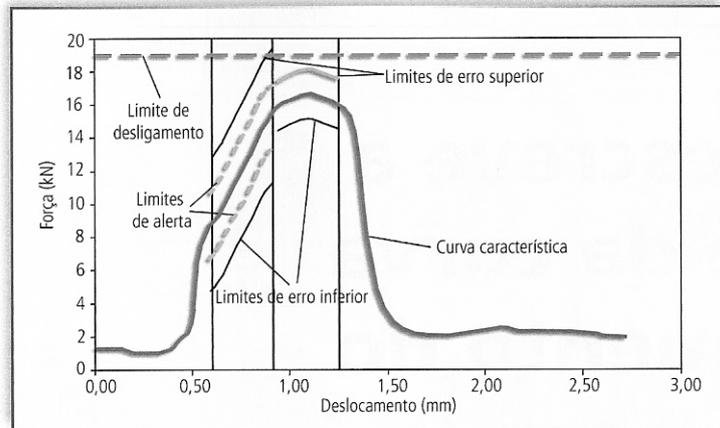


Fig. 12 – Curva força versus deslocamento de um processo de corte mostrando as curvas-limite de erro

rações efetuadas nos parâmetros do processo. Mostra também que o equipamento pode ser utilizado na pesquisa de métodos de supervisão de processos, tendo como base a aquisição e comparação do sinal do sensor com uma curva característica e curvas-limites do processo supervisionado.

Futuros trabalhos devem ser realizados para determinar o efeito de diferentes problemas na curva característica do processo, como trincas no punção ou na matriz, diferentes formas de desgaste, diferenças na qualidade do material cortado, efeitos de revestimentos anti-desgaste no processo, melhora da geometria da aresta de corte, etc. O sistema também pode ser usado para melhorar a qualidade da aresta cortada (do produto) e para determinar os parâmetros ideais de corte de materiais avançados, como chapas tipo sanduíche (metal-tecido-metal, metal-adesivo-metal, etc.), que começam a ser usadas intensamente na indústria automobilística, com finalidades como redução de peso e absorção de ruído.

## Referências

- 1) SPUR G.; STÖFERLE T. H. *Handbuch der Fertigungstechnik-Umformen-Zerteilen*. München: Carl Hanser Verlag, 1985.
- 2) RICHTER, A.; LIEBIG, H. P. Controle de Qualidade em Processos de Estampagem. In: ANAIS DO 55º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Rio de Janeiro, 24 a 28 de julho de 2000.
- 3) KÖNIG, W.; HERRES, W. U. Werkstückfehler anhand messbarer Prozesskenngrößen erkennen. *Industrie-Anzeiger*, v. 34, p. 31-33, 1988.
- 4) BRÜNINGHAUS, G. Prozessüberwachung an Stanzautomaten. *Blech Rohre Profile*, v. 40, n. 7/8, p. 580-584, 1993.
- 5) BREITLING, J. et al. Process control in blanking. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 71, p. 187-192, 1997.
- 6) RICHTER A.; SOUZA, J. H. C.; SCHAEFFER, L. Ferramenta Instrumentada para Pesquisas em Processos de Cisalhamento de Chapas. In: ANAIS DA III CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO METÁLICA. Porto Alegre, 24 a 27 de Outubro de 2000.
- 7) KEREMEDJIEV, G. Creative Sensors Instalations. *Metal Forming Magazine*, p. 74, nov. 1999.
- 8) RICHTER A.; SOUZA, J.H.C.; SCHAEFFER, L. In-Die Supervision of Shearing Process. In: ANAIS DA 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SHEET METAL. Leuven (Bélgica), 2 a 4 de Abril de 2000.
- 9) SIEGERT, K., LADWIG, J., Optimization of sheet metal forming processes by determination of the force vector and the position of its application. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 46, p. 393-399, 1994.
- 10) LANGE, K. *Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft – Band 3: Blechbearbeitung*. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- 11) TRÄNKLER, H.R.. *Taschenbuch der Messtechnik mit Schwerpunkt Sensortechnik*. München: Oldenbourg Verlag, 1996.
- 12) RICHTER, A. *Möglichkeiten und Grenzen der Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung beim Fügen durch Umformen*, 1997. Doctors Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg.