



## INFLUÊNCIA DO ENTALHE EM CORPOS DE PROVA DO ENSAIO NAKAJIMA

**Erik Jackson de Camargo**

[ejc@demec.ufpr.br](mailto:ejc@demec.ufpr.br)

**Ravilson A. Chemin Filho**

[ravilson@demec.ufpr.br](mailto:ravilson@demec.ufpr.br)

**Edouard H. Srour Jr.**

[sroure@kpb.krupp.com.br](mailto:sroure@kpb.krupp.com.br)

**Paulo Victor Prestes Marcondes**

[marcondes@demec.ufpr.br](mailto:marcondes@demec.ufpr.br)

**Endereço:** Universidade Federal do Paraná.  
Setor de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro Politécnico – Caixa Postal 19011  
CEP 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil  
Fone: (41) 361-3431 FAX: (41) 361-3129

**Resumo.** Na última década o estado do Paraná passou por uma grande transformação, deixou de ser apenas um grande pólo agrícola para se tornar também um dos maiores pólos industriais do país. Essa transformação tecnológica e econômica deve-se em grande parte a implantação das montadoras do ramo automotivo e suas sistemistas na região metropolitana de Curitiba. Como resultado desta transformação, houve um grande incentivo para novas pesquisas visando melhorias dos processos de fabricação destas indústrias. Com as inovações tecnológicas, faz-se necessária uma redução de peso cada vez maior na carroceria dos veículos, resultando em chapas cada vez mais finas (1,17 mm). Devido a essa espessura reduzida usualmente ocorrem formações de trincas nas áreas mais críticas de estampagem das chapas de aço, causando uma grande perda de tempo e de 'blanks' na realização do 'setup' das prensas. Como uma forma de se otimizar os processos de estampagem das chapas de aço, tem-se o gráfico DLC (diagrama limite de conformação) e a curva CLC (curva limite de conformação). Através destes gráficos pode-se obter as máximas profundidades de embutimento e estiramento das chapas de aço. O gráfico DLC e a curva CLC podem ser obtidos através do ensaio Nakajima, que consiste em medir as deformações máximas de uma malha de círculos pré-impresa nas chapas de aço. Neste trabalho, avaliou-se, a influência do entalhe dos corpos de prova na avaliação da estampabilidade por embutimento, ou seja, verificou-se os efeitos da supressão do entalhe nas condições de escorregamento da chapa na matriz e na modificação do estado de deformação.

**Palavras-chave:** Estampagem, Ensaio Nakajima, Curva CLC.

# 1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva busca, atualmente, reduzir o máximo possível o peso de seus veículos. Sendo assim, uma boa forma de atingir este propósito é reduzir de forma considerável a espessura das chapas de aço da carroceria dos veículos, pois de todas as partes metálicas dos veículos, esta é a que exerce menor influência na segurança dos usuários. Em consequência destas espessuras cada vez menores, muitos problemas podem surgir na estampagem destas carrocerias. Geralmente ocorrem trincas nas partes críticas como regiões de embutimento profundo e regiões de estiramento puro. A busca de solução deste problema serve de incentivo para se estudar alternativas de evitar estas trincas. A melhor maneira encontrada para resolvermos o caso das trincas nas chapas de aço é através do diagrama limite de conformação (DLC) o qual fornece a curva limite de conformação (CLC).

Uma forma de se obter o diagrama DLC destas chapas de aço é através do Ensaio de Nakajima. Este ensaio consiste em fazer a estampagem de corpos de prova para que se possa avaliar as suas condições de embutibilidade e de estiramento. Através do diagrama DLC e de sua respectiva curva CLC, pode-se observar as verdadeiras causas das fraturas das chapas de aço, e com isto apresentar alternativas para que se possa evitá-las.

Para que se obtenha a curva CLC, é necessário que se faça o levantamento de pontos no diagrama DLC tanto na região de estiramento como na região de embutimento. Isto é feito através de uma malha de círculos de diâmetro pré-determinado que é impressa nos corpos de prova antes da execução do ensaio. Logo após o ensaio é feita nova medição dos diâmetros dos círculos, nota-se que durante a conformação esses círculos são distorcidos formando círculos ou elipses, cujos diâmetros maior e menor representam as duas direções principais de deformação ao longo da superfície da chapa de aço [1-4]. Os corpos de prova apresentam dimensões variadas, sendo que alguns ficam com todo o contorno do copo estampado preso pelo “draw bed”, tendendo ao fenômeno de estiramento. Em contrapartida, os corpos de prova onde a geometria não permite a plena ação do “draw bed” em todo o contorno do copo estampado, tendem ao fenômeno de embutimento profundo, favorecendo o estado uniaxial de tração.

No presente trabalho estudou-se a influência do entalhe de corpos de prova do Ensaio Nakajima, sendo estes de fundamental importância para a coleta e precisão dos resultados dos ensaios. Analisou-se ainda, a influência causada pela presença ou ausência destes entalhes na forma de ruptura dos corpos de prova, procurando observar a necessidade ou não dos mesmos na confecção dos corpos de prova.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Ensaio Proposto

Para realização do Ensaio Nakajima, teste utilizado nos estudos em questão, é feita a confecção de corpos de prova a partir de chapas metálicas para que se possa, a partir destas, levantar a curva CLC. Os corpos de prova apresentam dimensões diferentes para que se possa reproduzir as mais variadas condições de estampagem, como estiramento e embutimento profundo. Estas dimensões podem variar desde corpos de prova com 200 X 200 mm, até corpos de prova com as dimensões mínimas de 200 X 40 mm. As figuras 1 e 2 apresentam as diferentes geometrias a partir das quais são confeccionados os corpos de prova.

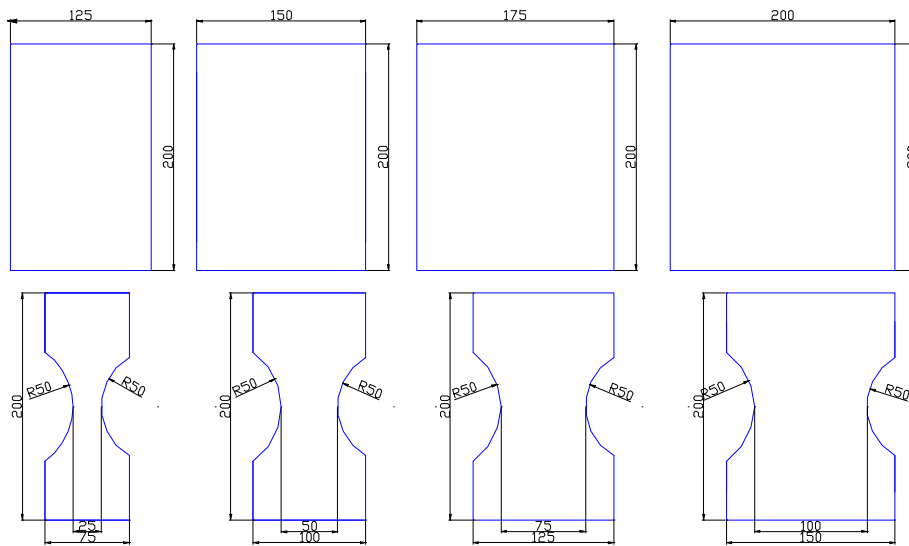


Figura 1: Corpos de prova com raio de entalhe constante igual a 50 mm

Nota-se (Figura 1) que esta configuração não apresenta variação do raio de entalhe. Este tipo de corpo de prova pode apresentar largura mínima de 25 mm, sendo o raio de entalhe constante igual a 50 mm.

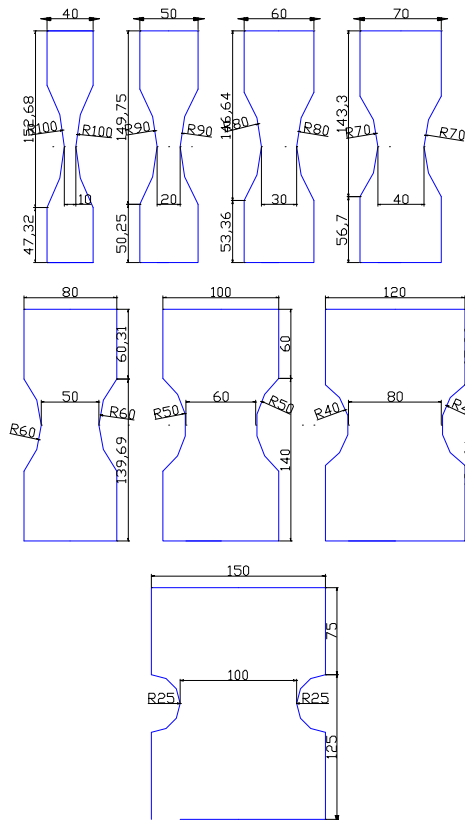


Figura 2: Corpos de prova com diâmetros de entalhe variados

Já a partir da configuração da figura 2, espera-se que a curva CLC seja melhor reproduzida para as condições de embutimento profundo, uma vez que estes corpos de prova chegam a apresentar largura na faixa de 10 mm.

O Ensaio Nakajima consiste em deformar os corpos de prova até a sua ruptura, a qual geralmente ocorre em apenas um dos lados do copo estampado. O procedimento para obtenção do diagrama DLC consiste em medir as elipses localizadas no lado oposto a ruptura do copo estampado. Assim, medem-se os diâmetros maior e menor das elipses que apresentam as maiores deformações,

plotando em seguida o gráfico que irá apresentar a curva CLC. Os pontos a serem plotados no gráfico DLC são obtidos através das seguintes equações:

$$e_1 = \frac{(Df_1 - Do_1)}{Do_1} \quad (1)$$

$$e_2 = \frac{(Df_2 - Do_2)}{Do_2} \quad (2)$$

$$e_3 = \frac{(Tf - To)}{To} \quad (3)$$

$$e_1 = \ln(e_1 + 1) \quad (4)$$

$$e_2 = \ln(e_2 + 1) \quad (5)$$

$$e_3 = \ln(e_3 + 1) \quad (6)$$

Onde:

$e_1$ : Deformação maior da elipse;

$e_2$ : Deformação menor da elipse;

$e_3$ : Deformação no sentido da espessura da chapa;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ : Deformações verdadeiras;

$Do_1=Do_2$ : Diâmetro inicial do círculo;

$Df_1$ : Diâmetro maior da elipse;

$Df_2$ : Diâmetro menor da elipse;

$To$ : Espessura inicial da chapa;

$Tf$ : Espessura final da chapa.

Analisar-se-á neste trabalho se os corpos de prova apresentados na figura 1 são capazes de fornecer as mesmas características de estampabilidade, se comparados aos modelos de corpos de prova mostrados na figura 2. Caso isto ocorra, pode ser dispensada a confecção de um número excessivo de corpos de prova com dimensões complexas (Figura 2). Analisar-se-á também a influência destes entalhes no escorregamento e modo de ruptura do corpo de prova.

## 2.2. Materiais e Equipamentos Utilizados

O tipo de prensa utilizado para o Ensaio Nakajima deve fornecer uma interface de onde se possa obter total controle de velocidade de avanço do punção, desta maneira, a prensa utilizada para execução desses ensaios foi uma prensa hidráulica.

O método de obtenção da curva CLC através do Ensaio Nakajima consiste na utilização de um punção com diâmetro de 100 mm, cabeça de punção com raio de 50 mm e matriz com diâmetro de 106 mm. Esta configuração de ferramental nos permite analisar chapas de aço com espessura de no máximo 3 mm, pois chapas com espessura superior não permitiriam o desenvolvimento do curso do punção. O material utilizado na confecção da cabeça hemisférica do punção foi o aço VC131, pois este material apresenta elevada resistência mecânica para suportar o atrito na interface com o corpo de prova. O corpo do punção, a matriz e o prensa-chapas foram confeccionados com aço 1045, pois a sua solicitação durante o ensaio não justificaria a utilização de um material de maior resistência mecânica.

Os corpos de prova foram feitos a partir de uma chapa de 1,17 mm de espessura, laminada a frio. O material é um aço específico para aplicações de estampagem de laterais de carrocerias de automóveis.

A malha de círculos foi feita através de serigrafia. Trata-se de uma forma inovadora de confecção desta malha, pois geralmente ela é feita com tratamento eletroquímico ou com marcação a laser. Com a utilização de uma tela convencional de serigrafia, e tinta especial para metais, reproduz-se facilmente a malha de círculos nos corpos de prova.

A monitoração da profundidade do copo estampado foi feita através de uma escala eletroóptica acoplada ao punção. Desta forma, pode-se zerar o curso do punção no momento em que sua cabeça tangencia o corpo de prova e a partir daí, medir seu deslocamento com uma precisão centesimal.

Como o ensaio consiste em deformar o material até a sua ruptura, a maneira visual é uma das melhores formas para que se tenha o controle de parar o ensaio assim que houver a ruptura do material. Como o ferramental fica inteiramente fechado, impossibilitando a visualização interna durante o ensaio, instalou-se uma micro-câmera através de um orifício na base que suporta a matriz. Desta forma o ensaio pode ser monitorado através de um aparelho televisor, o que garante a retirada da carga no momento exato da ruptura do corpo de prova.

A medição da malha dos corpos de prova foi executada em um projetor de perfil, pois devido à concavidade adquirida durante o ensaio, os paquímetros e os micrômetros não garantiriam precisão nas medidas.

### 2.3. Desenvolvimento Experimental

Primeiramente fez-se o corte dos corpos de prova. Os corpos de prova sem entalhe foram cortados em uma guilhotina, já os corpos de prova com entalhe foram confeccionados a partir de corte a laser.

Em seguida fez-se a pintura da malha de círculos nos corpos de prova. Após a pintura esperou-se um prazo de 48 horas para a secagem da tinta na chapa metálica.

Fez-se, também, um ajuste de vazão da prensa hidráulica para que a velocidade de avanço do punção fosse a menor possível, garantindo maior estampabilidade do material.

Para realização dos ensaios confeccionou-se dois corpos de prova de cada tipo apresentado nas figuras 1 e 2, desta forma consegue-se maior precisão nos dados (Figuras 4 e 5). Durante a realização dos ensaios, pode-se perceber o escorregamento e ruptura junto ao “draw bed” dos corpos de prova que foram confeccionados sem entalhe (Figura 3).



Figura 3: Corpo de prova 200 X 100 mm sem entalhe ensaiado



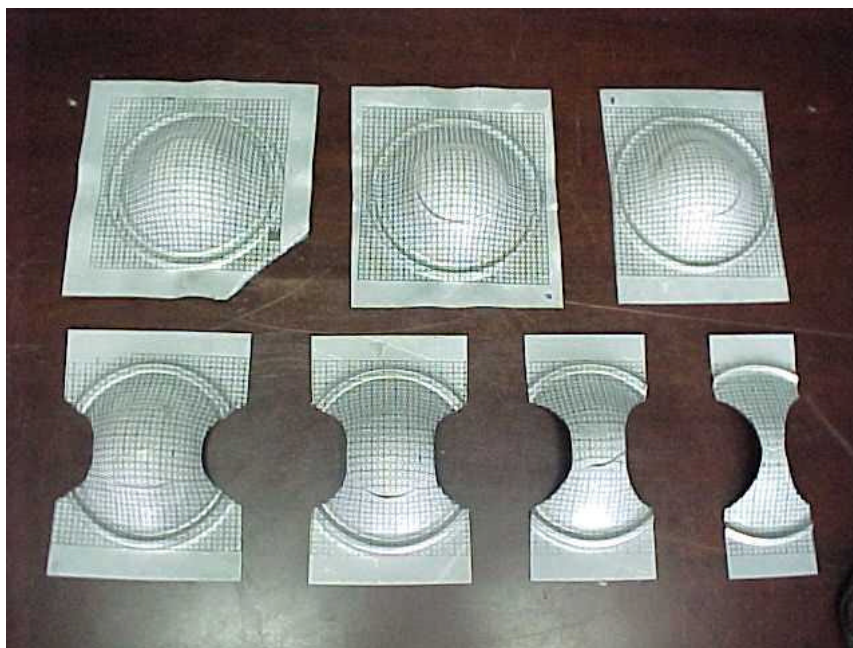


Figura 4: Corpos de prova com entalhe (raio 50 mm) após ensaio

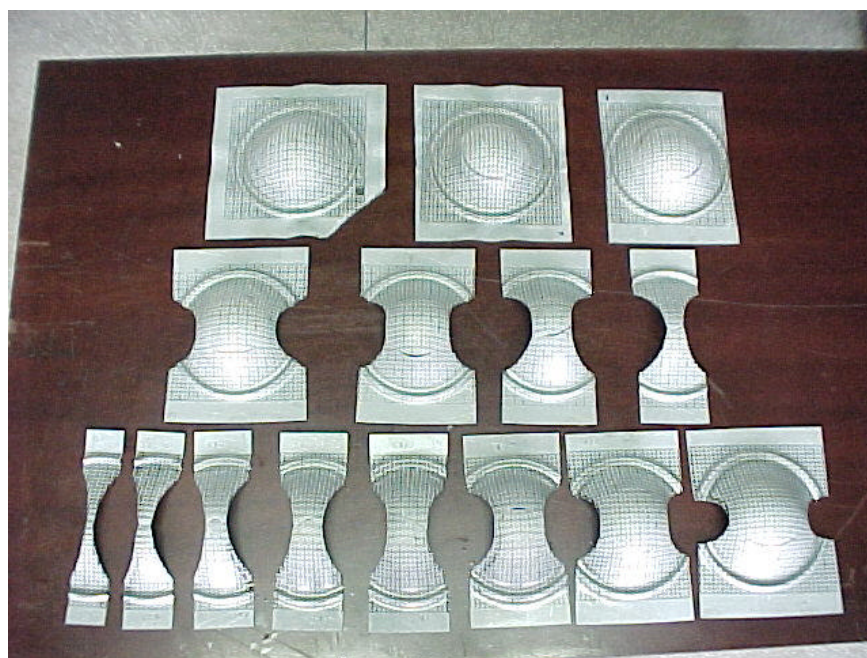


Figura 5: Corpos de prova com entalhe (raios variados) após ensaio

Para coleta de dados fez-se a medição dos diâmetros maior e menor das elipses no projetor de perfil.

Com os resultados da medição das elipses feitos no projetor de perfil, fez-se a adequação de valores através das equações 1 a 6 para a plotagem do digrama DLC. O software utilizado foi o Microsoft Excel.

### 3. RESULTADOS

O gráfico da figura 6 mostra as curvas CLC do material em análise. A curva em tonalidade verde representa a curva CLC fornecida pelo fabricante, a curva em rosa representa a curva CLC obtida pelos ensaios dos corpos de prova convencionais feitos conforme figura 1, e os pontos em

azul representam a faixa atingida pelos corpos de prova com raio de entalhe variado confeccionados conforme figura 2.

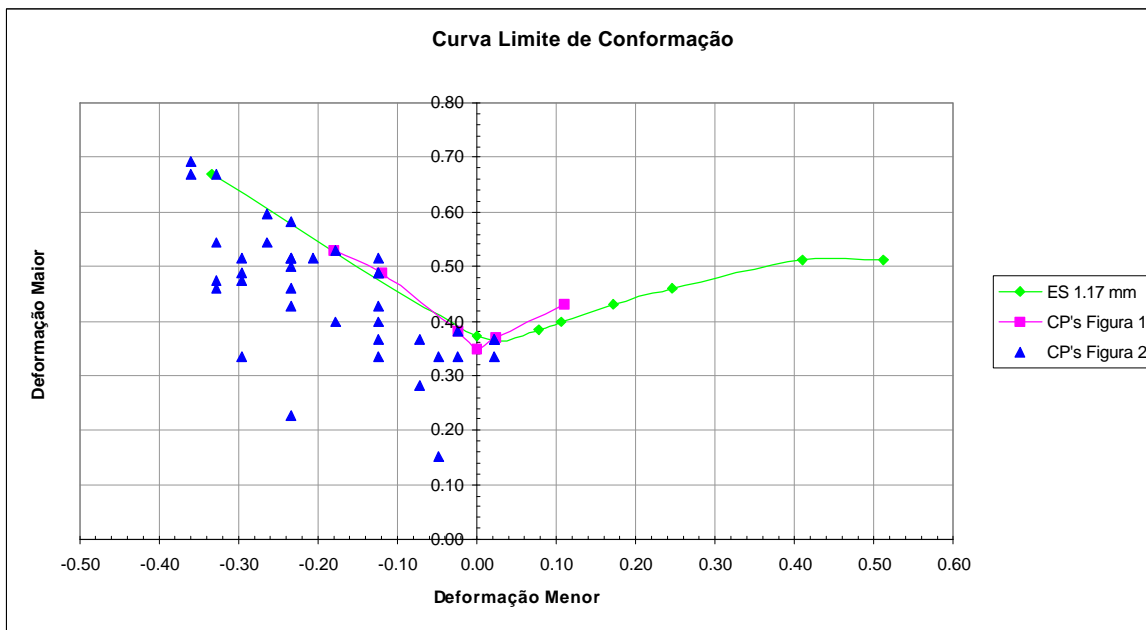


Figura 6: Diagrama Limite de Conformação para os diferentes corpos de prova

#### 4. DISCUSSÃO E ANÁLISES

Comparando a figura 3 com as figuras 4 e 5, percebe-se a grande contribuição fornecida pelo entalhe para a garantia do não escorregamento e ruptura da chapa junto ao “draw bed”, fato este também relatado por pesquisadores da CamSys [5]. Nos corpos de prova com entalhe (Figuras 4 e 5) há uma melhor distribuição da tensão ao longo da chapa (estado plano de deformação), o que evita uma diminuição acentuada de espessura na região de fixação do corpo de prova entre o anel prensa-chapas e a matriz, desta forma a ruptura se dá numa região próxima à cabeça do punção, que é o que se espera. Já no caso de corpos de prova sem entalhe (Figura 3), nota-se que a ruptura ocorre junto ao prensa-chapas devido ao modo da distribuição de tensão e à espessura da chapa ligeiramente menor nesta região.

Analisando o digrama limite de conformação (Figura 6), observa-se que o lado do estiramento não foi bem representado por nenhum dos dois tipos de confecção de corpos de prova apresentados no presente trabalho. Observou-se, empiricamente, que a lubrificação é o principal fator a ser somado para se obter pontos na região de estado biaxial de tensões (estiramento), lado direito da figura 6. O objetivo deste trabalho foi analisar a geometria de corpos de prova que forneçam condições de embutimento profundo e desta forma o lado direito (estiramento) da curva CLC foge do escopo do presente trabalho.

Observando o lado do embutimento do diagrama DLC (lado direito da figura 6), percebe-se que tanto os corpos de prova confeccionados conforme a figura 1 como os corpos de prova confeccionados conforme a figura 2 descrevem curvas similares à curva CLC fornecida pelo fabricante da chapa metálica. A diferença básica entre os tipos de corpos de prova, é que os corpos de prova confeccionados conforme figura 2 apresentam pontos que abrangem uma faixa maior da curva CLC fornecida pelo fabricante da chapa.

#### 5. CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios dos diferentes tipos de corpos de prova, constatou-se que o entalhe em corpos de prova destinados a representar as condições de embutimento profundo é de suma importância para evitar as condições de escorregamento e ruptura junto ao “draw bed”. Sem a

presença do entalhe a ruptura é verificada junto ao ‘draw bead’. Isto se deve ao modo da distribuição de tensão obtida sem a presença do entalhe e à espessura da chapa ligeiramente menor nesta região já que por exigência do ensaio a chapa deve ficar inteiramente presa pelo ‘draw bead’.

Como visto no diagrama DLC (Figura 6), pode-se trabalhar apenas com corpos de prova confeccionados conforme figura (1), pois estes atingem uma boa faixa da curva CLC para o lado do embutimento. Em contrapartida, se necessitar expressar a curva CLC atingindo uma faixa mais abrangente de embutimento profundo, faz-se necessário à confecção de corpos de prova conforme figura 2, visto que, com essas geometrias apresentam dimensões de área útil mais adequadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Universidade Federal do Paraná pela bolsa PIBIC e bolsa Trabalho (UFPR/TN). Aos Laboratórios de Conformação e de Metrologia do DEMEC/UFPR pela utilização das facilidades laboratoriais. A Gestamp Paraná S.A. pelo fornecimento das chapas metálicas e a COMP Ind. e Com. de Metais e Madeiras Ltda. pelo fornecimento do corte a laser dos corpos de prova.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SCHAEFFER, L., 1999, “Conformação Mecânica”, Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, Brasil, 167 p.
- [2] Altan, T., Oh, S., Gegel, H. L., 1999, “Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações”, Publicação EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil.
- [3] Borsoi, C. A., Hennig, R., Schaeffer, L., 2000, “Novo Teste Tecnológico no LdTM para a Melhor Determinação da Conformabilidade de Chapas Metálicas”, III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento / Porto Alegre/RS, Brasil, pp.50-59.
- [4] Lorentz, R., Gilapa, G. M., 1998, “Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano”, I Conferência Nacional de Conformação de Chapas / Porto Alegre/RS, Brasil, pp.141-150.
- [5] CamSys NEWSLETTER, Summer 2000, Troy, USA.

## THE INFLUENCE OF THE HOUR GLASS-TYPE GEOMETRY IN THE NAKAJIMA’S TEST

**Erik Jackson de Camargo**

[ejc@demec.ufpr.br](mailto:ejc@demec.ufpr.br)

**Ravilson A. Chemin Filho**

[ravilson@demec.ufpr.br](mailto:ravilson@demec.ufpr.br)

**Edouard H. Srour Jr.**

[sroure@kpb.krupp.com.br](mailto:sroure@kpb.krupp.com.br)

**Paulo Victor Prestes Marcondes**

[marcondes@demec.ufpr.br](mailto:marcondes@demec.ufpr.br)

**Address:** Universidade Federal do Paraná.  
Setor de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro Politécnico – Caixa Postal19011  
CEP 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil  
Fone: (41) 361-3431 FAX: (41) 361-3129



**Abstract.** *In the last decade the Paraná State has changed. Today, the Paraná State economics situation is not only based on agricultural issues and it is also formed by the Automotive Industries and their first levels companies. This new companies are seeking to know more about the materials forming characteristics in order to improve their quality production. In the present work, the test piece geometry for the Nakajima's test was analyzed in order to verify the geometry influence on the limit forming diagram (LFD) construction. Various hour glass-type geometries were carried out and their influence in the strain/stress behavior and rupture position during the tests was analyzed.*

**Keywords.** *Nakajima's Test, Forming Limit Curves, Deep Drawing, Sheet Metals.*