

AVALIAÇÃO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO USANDO O TESTE DE MARCINIAK COMPARANDO COM TESTE DE NAKAZIMA PARA AVALIAÇÃO DE CHAPA DE AÇO DE ALTA ESTAMPABILIDADE

Ricardo A. dos Santos

ricardo@netpar.com.br

Luiz M. V. Tigrinho

tigrinho@ensitec.com.br

Ravilson A. C. Filho

ravilson@pop.com.br

Paulo V. P. Marcondes

marcondes@demec.ufpr.br

Universidade Federal do Paraná

Setor de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica

Centro Politécnico – Caixa Postal 19011

81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil

Resumo. *A conformação de chapas metálicas é destaque dentre os processos de fabricação. Hoje há um aumento na aplicação de novos materiais como aços de alta resistência e ligas de alumínio; a viabilidade do uso desses materiais depende do conhecimento de suas características e dos parâmetros dos processos de conformação. As curvas limite de conformação (CLC) são geralmente usadas como uma ferramenta para controle do nível de deformação dos materiais para produção de peças conforme exigências de projeto. Elas também são usadas nas indústrias para análise real de possíveis problemas na conformação de chapas ou comparação de conformabilidade de diferentes materiais. As CLCs são determinadas em testes tecnológicos nos quais a chapa é submetida a diferentes solicitações de embutimento profundo, deformação plana e estiramento biaxial. Nos testes mais utilizados, estas solicitações são realizadas pela deformação de tiras de chapa de diferentes larguras sobre punções de diferentes geometrias, como, por exemplo, ensaio de Nakazima que utiliza punção esférico e o ensaio de Marciniak com a utilização de punção cilíndrico, dentre outros. Este trabalho se utiliza do punção cilíndrico para obtenção da CLC comparando resultados do ensaio de Nakazima, com isso verificou-se a influência de algumas características do dummy blank no ensaio de Marciniak. O diâmetro do furo do dummy blank e sua espessura apresentaram variação na CLC. No ensaio de Marciniak utilizando dummy blank com espessura de 2 mm e furo de 50 mm apresentou melhores resultados.*

Palavras-chave: *Curva limite de conformação, Teste de Marciniak, Conformabilidade*

1. INTRODUÇÃO

Keeler e Backofen⁽⁷⁾ estudaram a falha no estiramento biaxial e construíram um mapa de tensão que foi o início do que conhecemos como diagrama limite de conformação (DLC). Keeler⁽⁹⁾ descobriu, ainda, que as propriedades do material têm grande influência na distribuição da tensão no estiramento biaxial. Ele construiu um mapa de tensão principal, que é separado por estados de

deformação. Marciniak e Kuczynski⁽¹¹⁾ determinaram um método numérico para levantamento da curva limite de conformação, baseado nas falhas durante a estrição do material. Mais adiante com o desenvolvimento da técnica experimental por Goodwin⁽⁵⁾, a curva limite de conformação de um aço para estampagem foi obtida através de ensaio prático e serviu de critério para muitos processos de estampagem.

Segundo Sampaio et al⁽¹⁴⁾, uma boa ferramenta que tem sido utilizada para relacionar o limite de conformação do material, determinado em escala laboratorial, com as deformações em escala industrial é a CLC. Essa relação permite concluir se o material e o processo estão adequados à manufatura da peça em questão. A utilização da CLC é uma importante ferramenta para o desenvolvimento da aplicação de um determinado produto, como por exemplo em testes da indústria automobilística.

Segundo Lorentz⁽¹⁰⁾ a curva limite de conformação (CLC) serve para uma compreensão da conformabilidade de chapas metálicas que é essencial para a produção de estampados de qualidade. Planejadores de processo e projetistas de ferramentas devem determinar o nível de conformabilidade requerido para cada peça a ser estampada, para então conhecerem o nível de conformação do material que utilizam.

Richter⁽¹³⁾ destaca que os experimentos mais utilizados para a determinação da curva limite de conformação são os métodos segundo Nakazima e Marciniak que utilizam punção esférico e punção cilíndrico, respectivamente, ambos utilizam chapas de diferentes larguras para avaliação de diferentes estados de deformação e obtenção da curva.

Atualmente ainda não existe uma norma específica para determinação da CLC. Por isso, a busca por um ensaio correto para determinação é um assunto muito discutido. As normas existentes dão algumas sugestões, mas não descrevem um procedimento para levantamento das curvas.

FLC Club⁽⁴⁾ destaca que o resultado disso é que diferentes laboratórios, determinam curvas diferentes para um mesmo material. Isso se deve pelas diferenças na forma e tamanho das ferramentas utilizadas, lubrificação durante o ensaio, tamanho da grade de medição, o cálculo dos valores de deformação, que são utilizados para construção da curva. Para geometrias mais complexas tem-se ainda a influência da escolha do caminho das deformações medidas.

Neste trabalho deseja-se utilizar o teste prático de Marciniak variando a espessura e diâmetro do furo do *dummy blank*, levantar a curva CLC de uma chapa de alta estampabilidade comparando resultados com obtidos através do ensaio de Nakazima.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado foi o DC06 DIN10152 laminado a frio, classificado como aço de alta estampabilidade, este é empregado na conformação de peças que exigem boa resistência mecânica, por exemplo, carroceria automotiva. A composição química do DC06 é apresentada na Tabela 1. Este aço foi submetido aos ensaios de Nakazima com punção esférico e de Marciniak com punção cilíndrico.

Tabela 1 – Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152.

Material	Composição Química (partes da massa em %, máx.)				
	C	P	S	Mn	Ti
DC 06+ZE	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

2.1 Ensaio Nakazima

Para realização do ensaio Nakazima⁽¹⁵⁾, foram confeccionados corpos de prova a partir da chapa metálica DC06, com 0,7 mm de espessura, a partir da qual se levantou a CLC. Ao todo foram utilizados 10 corpos de prova com diferentes dimensões, a fim de se produzir desde o modo de deformação por estiramento a embutimento profundo. Estas dimensões dos corpos de prova variam

desde 200 x 200mm até 200 x 40mm. A Figura 1 mostra as diferentes geometrias das chapas utilizadas nos ensaios.

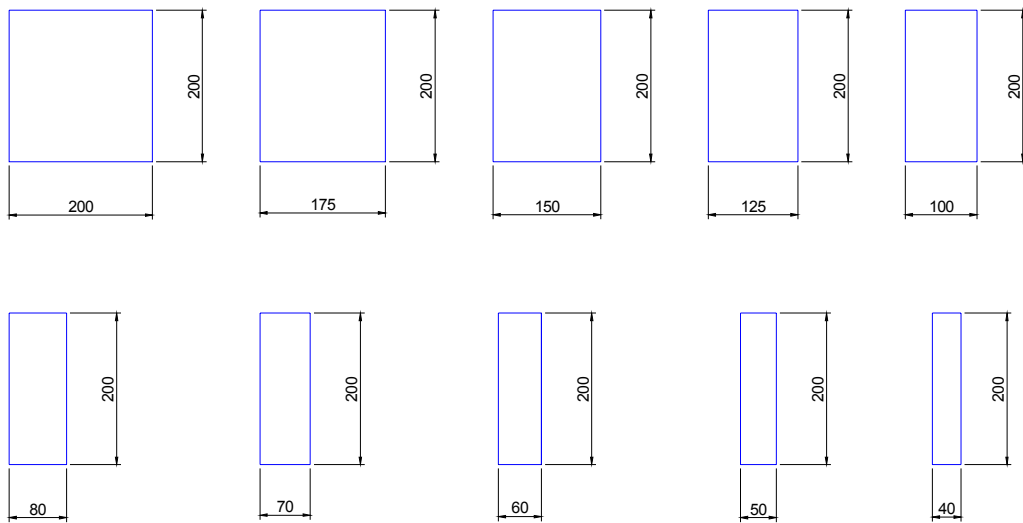


Figura 1 - Corpos de prova de diferentes larguras

Realizou-se o ensaio Nakazima até a ruptura do corpo de prova, a qual geralmente ocorre em apenas um dos lados do copo estampado, sendo medidas as elipses localizadas no lado oposto a ruptura do copo estampado.

2.2 Ensaio Marciniak

Segundo FLC Club⁽⁴⁾ o teste conforme Marciniak⁽¹²⁾ é executado usando um ferramental que é composto por um punção cilíndrico, um Matriz e um prensa chapas. Os corpos de prova são tiras de chapas retangulares em diferentes larguras e são cortados de forma que a direção longitudinal deles seja ortogonal ao sentido de laminação da chapa. Isto é feito em analogia ao ensaio de tração. Na preparação dos corpos de prova é aplicada uma grade de medição sobre da superfície da chapa de forma que a conformabilidade não seja influenciada. Entre o próprio corpo de prova e o punção fica uma chapa furada na parte central, assim não há atrito nenhum entre a face do punção e o corpo de prova. Esta chapa é chamada de “dummy blank” ou “driving blank” em inglês. Entre o corpo de prova e o *dummy blank* não há lubrificação para maximizar o atrito e evitar movimento relativo. Entre punção e *dummy blank* há lubrificação com óleo para diminuir o atrito e facilitar o escoamento.

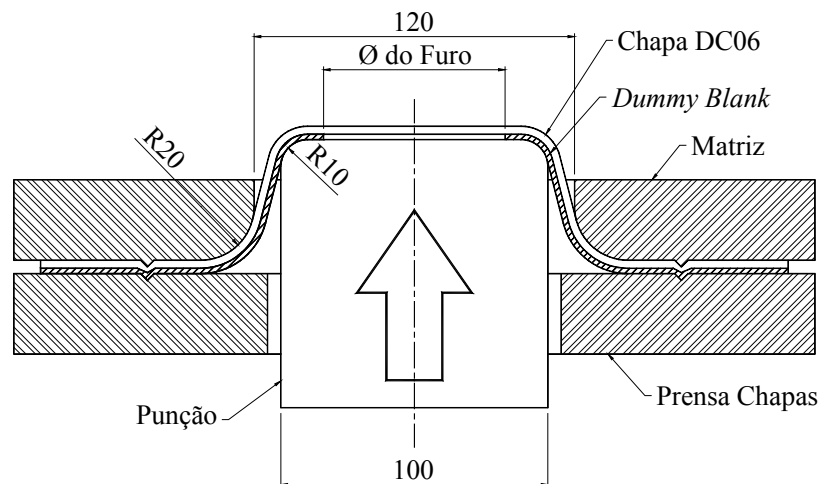


Figura 2 - Ferramental utilizado para execução do teste Marciniak

Foi realizado o ensaio de Marciniak com chapas de diferentes larguras, 200x200 mm, 200x175 mm, 200x150 mm, 200x125 mm, 200x100 mm e 200x80 mm afim de simular as condições de estiramento, estado plano e embutimento.

2.3 Medição e cálculo das deformações verdadeiras

Assim sendo, foram medidos os diâmetros maior e menor das elipses que se encontram nos pontos de maior deformação do material. Os cálculos das deformações da chapa estampada, segundo Hosford⁽⁶⁾, são dados pelas seguintes equações:

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

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

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

$$\varepsilon_1 = \ln(e_1 + 1) \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(e_2 + 1) \quad (5)$$

$$\varepsilon_3 = \ln(e_3 + 1) \quad (6)$$

Onde:

e_1 : Deformação maior da elipse;

e_2 : Deformação menor da elipse;

e_3 : Deformação no sentido da espessura da chapa;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: 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.

Os resultados foram traçados em um gráfico formando diagrama limite de conformação e em seguida com os pontos de máximo foram geradas as curvas limite de conformação para cada caso simulado. Os casos simulados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Casos estudados

Caso 1	Método de Nakazima	Chemin ⁽³⁾
Caso 2	Método de Marciniak	<i>Dummy blank</i> de espessura de 2 mm e furo de Ø 50 mm
Caso 3	Método de Marciniak	<i>Dummy blank</i> de espessura de 3 mm e furo de Ø 68 mm
Caso 4	Método de Marciniak	<i>Dummy blank</i> de espessura de 0,5 mm e furo de Ø 68 mm
Caso 5	Método de Marciniak	<i>Dummy blank</i> de espessura de 2 mm e furo de Ø 68 mm

2.4 Materiais e Equipamentos Utilizados

A prensa utilizada para os ensaios deve fornecer uma interface de onde se possa obter total controle de velocidade de avanço do punção, devendo esta ser constante, desta maneira, a prensa utilizada para execução dos ensaios foi uma prensa hidráulica. A velocidade utilizada foi de 80 mm/min.

O método de obtenção da curva CLC através dos ensaios Nakazima e Marciniak que consistiu na utilização de um punção hemisférico e punção cilíndrico respectivamente, ambos com diâmetro de 100 mm, a cabeça de punção hemisférico com raio de 50 mm e o punção cilíndrico com raio de 10 mm e a matriz com diâmetro de 120 mm. Este ferramental 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 dos punções foi o aço ferramenta D6, que 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 ABNT NBR1045, pois a sua solicitação durante o ensaio não justificaria a utilização de um material de maior resistência mecânica.

Foi utilizado óleo sintético como lubrificante, entre punção e chapa no ensaio Nakazima e entre punção e *dummy blank* no ensaio Marciniak.

A malha de círculos, com diâmetro de 4,2 mm, foi gravada 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 eletro óptica 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 monitor, 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 realizada em um gabarito plástico flexível e transparente conforme a figura 3, com resolução de 0,1mm, conforme a Figura 2, pois devido à concavidade adquirida durante o ensaio, paquímetros e micrômetros não garantiriam medidas precisas.

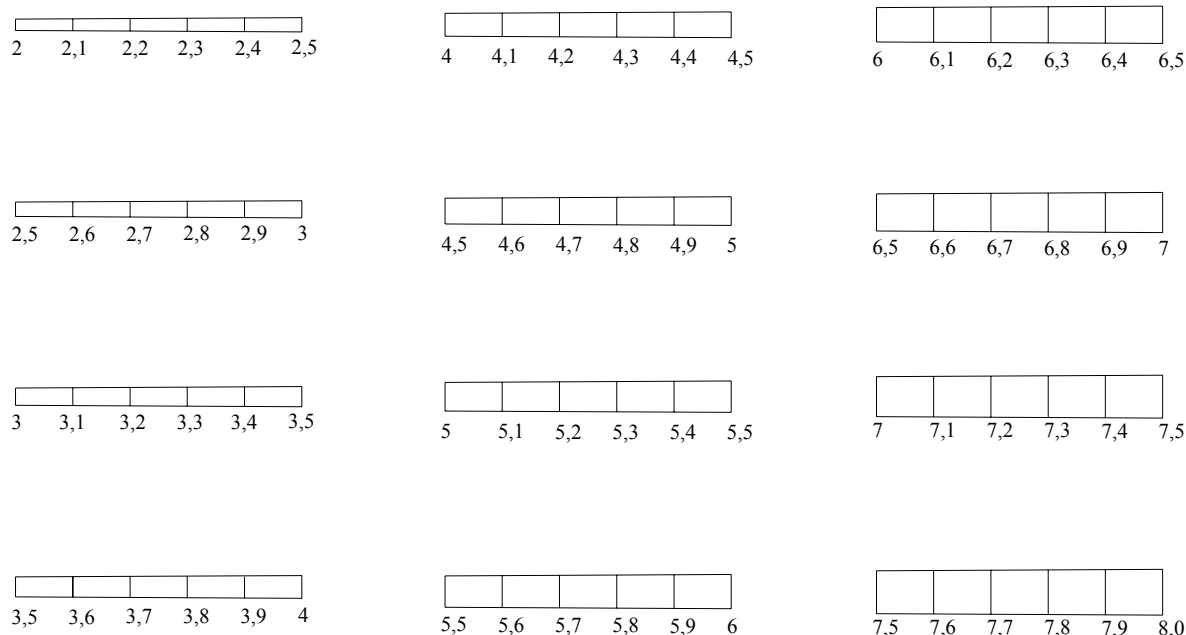


Figura 3: gabarito plástico flexível e transparente

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram medidas as elipses no pólo do punção e do lado oposto à trinca. A dispersão dos valores medidos ocorreu devido principalmente a alguns dummy blanks que se romperam durante a realização do ensaio. Com isso a CLC não ficou bem caracterizada Figura 4.

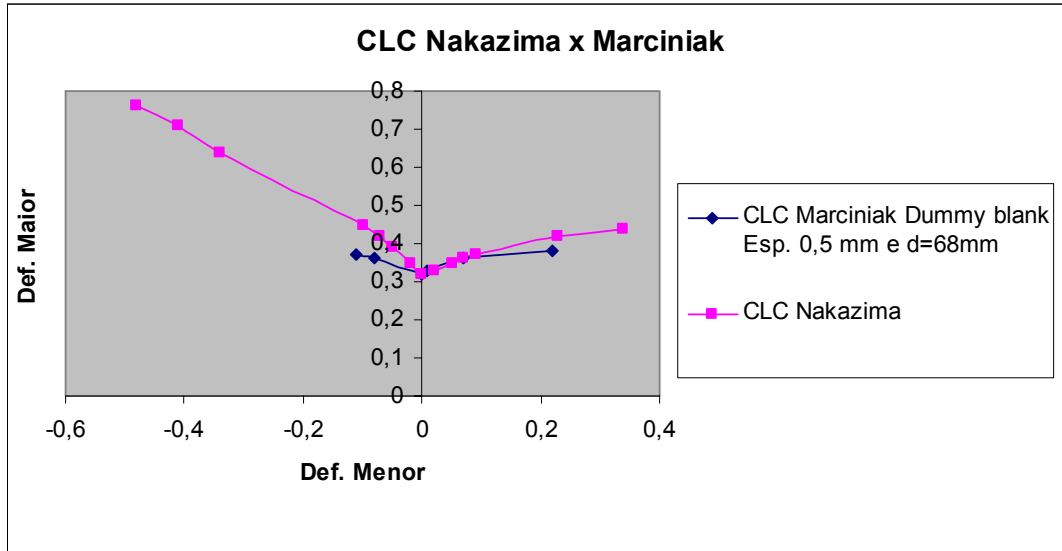


Figura 4 - CLC Nakazima comparada com CLC Marciniak

Podemos observar a CLC Marciniak comparada com a CLC Nakazima e a chapa não apresentou deformações de estiramento e embutimento suficientes para levantamento completo da CLC.

Foram adotados para continuação dos experimentos a utilização de dummy blanks com espessuras maiores, 2 mm e 3 mm, e com furo de diâmetro de 68 mm. Na Figura 5 é mostrado o diagrama limite de conformação com os pontos medidos das elipses dos corpos de prova mais espessos.

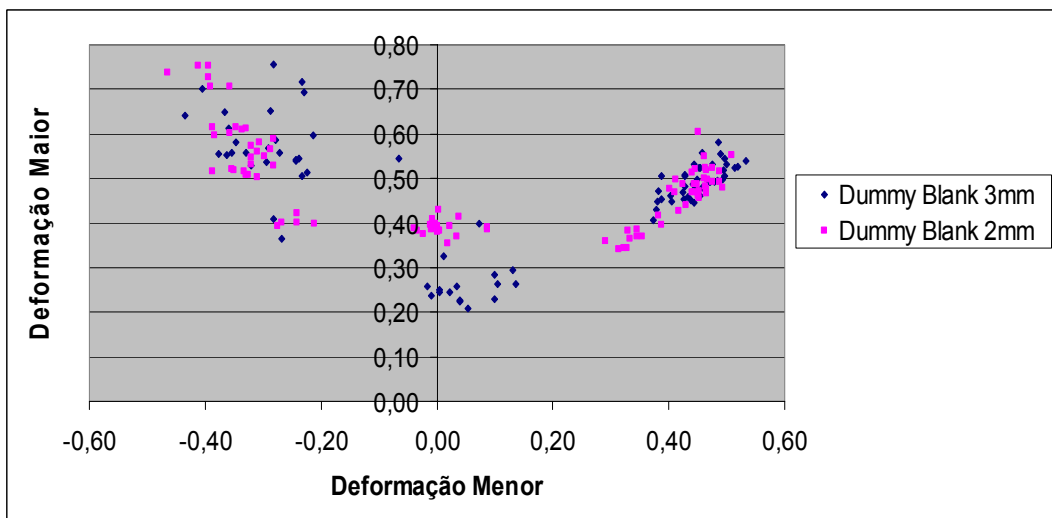


Figura 5 - DLC *dummy blank* com 2 mm e 3 mm de espessura

Os dummy blanks com 2 mm e 3 mm suportaram os esforços do ensaio e não se romperam. Na figura 43 pode-se observar que tanto do lado do embutimento com do lado do estiramento a nuvem de pontos dos ensaios.

As curvas CLCs com dummy blank de 2 mm e 3 mm foram traçadas e comparadas com a curva de Nakazima e são mostradas na Figura 6.

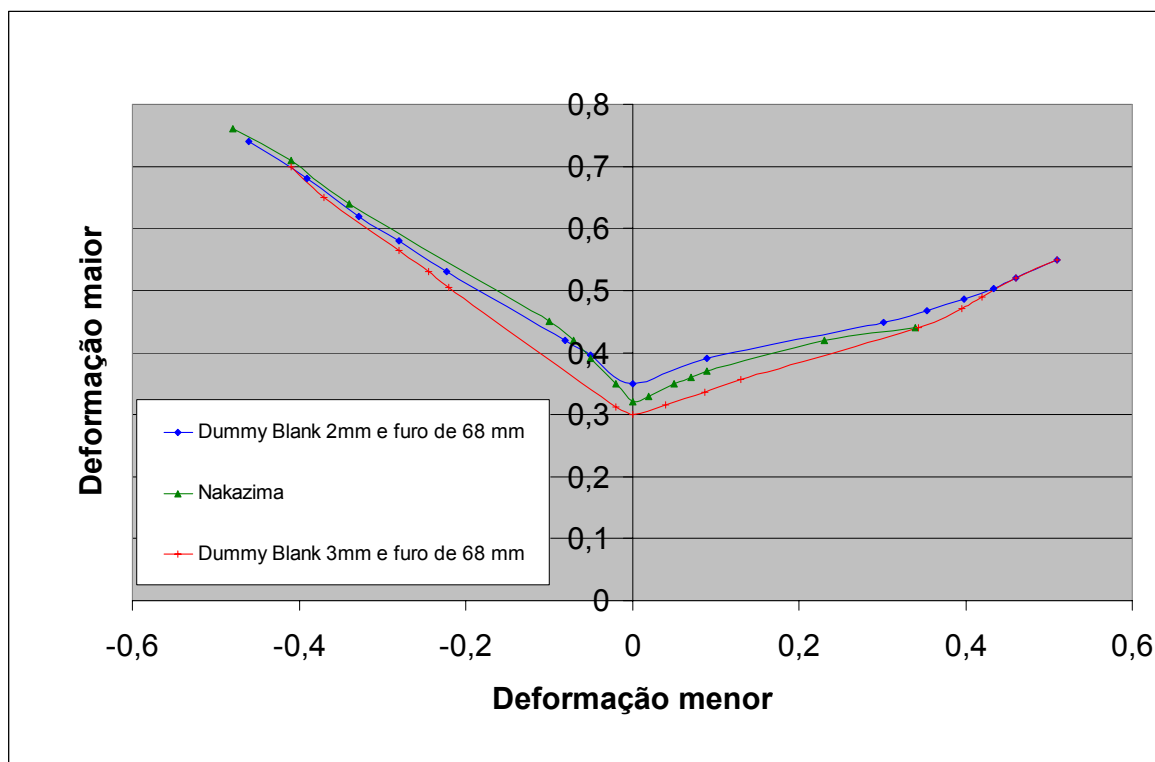


Figura 6 - CLCs com *dummy blanks* de 2 mm e 3 mm

Podemos observar na Figura 6 as curvas com *dummy blank* aproximaram-se bem da CLC feita pelo método de Nakazima. A explicação para a diferença nos níveis de deformações atingidas para o embutimento profundo e para o estiramento se encontra na variação da largura dos corpos de prova. A condição de deformação de embutimento é obtida pela liberação para a deformação usando uma chapa de menor largura e assim se permite obter os estados de tensão e deformação que se tem em um embutimento. À medida que se reduzia a largura dos corpos de prova se diminuía conseqüentemente a ação do prensa-chapas, que prende o material circunferencialmente em torno do punção, a fim de impedir o escorregamento da chapa. Desta forma, uma porção lateral dos corpos de prova mais estreitos que o diâmetro do prensa-chapas oferecia certa liberdade para o material se deformar, tendendo a promover um esforço uniaxial de tração, gerando assim um maior alongamento do corpo de prova no sentido do comprimento e uma redução na largura. Os círculos se transformam em elipses caso típico do embutimento profundo, ocasionou-se elipses mais alongadas (maior deformação ϵ_1) e estreitas (deformação negativa ϵ_2). Assim sendo, quanto menor a largura dos corpos de prova utilizados menores eram as deformações ϵ_2 obtidas, fato este que permitiu a obtenção de todo o perfil da CLC para o embutimento profundo. No ensaio de Marciniak foram utilizadas larguras diferentes nos corpos de prova comparando com ensaio de Nakazima.

Foi avaliado *dummy blank* com furo de 50 mm de diâmetro e espessura de 2 mm, objetivando avaliar a influência do diâmetro do furo, a curva limite de conformação do *dummy blank* com furo de 50 mm de diâmetro e espessura de 2 mm também foi levantada (Figura 7), verificaram-se mudanças com relação as CLCs com *dummy blanks* com furo de diâmetro 68 mm. E esta foi a CLC que mais se aproximou da CLC com ensaio do ensaio de Nakazima.

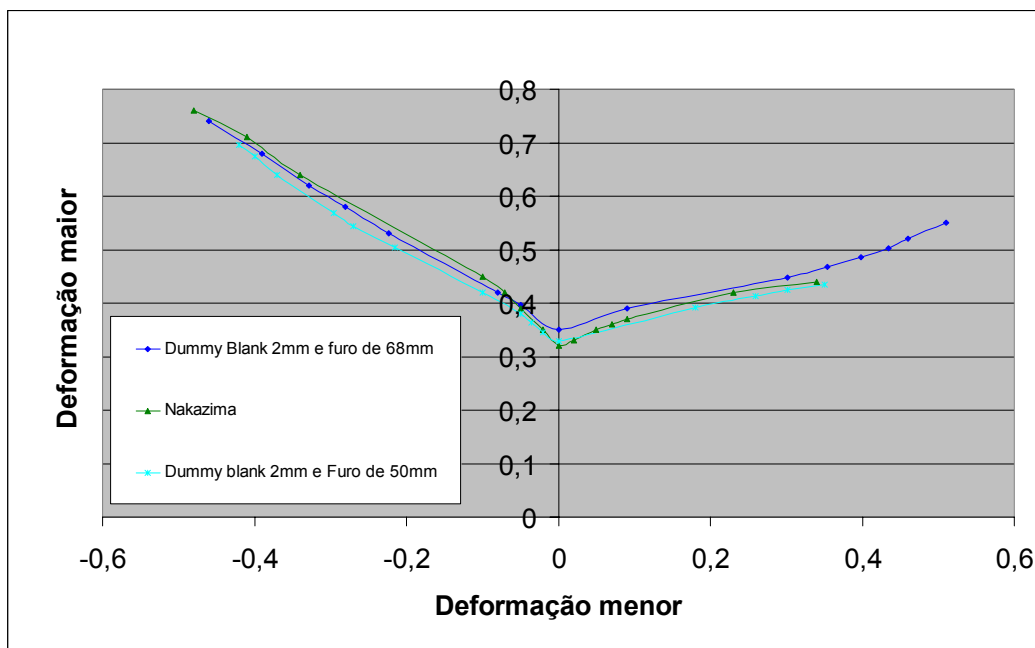


Figura 7 - CLC com *dummy blanks* de 2 mm de espessura e furo com diâmetro de 50 mm

Todas as situações propostas foram testadas e avaliadas, para cada caso foi gerada a CLC. Analisando todas as curvas da Figura 47 podemos observar que com *dummy blank* de 2 mm de espessura e furo de 50 mm de diâmetro no ensaio de Marciniak foi o que mais se aproximou da curva obtida através no ensaio de Nakazima, as CLC outras com furo de 68 também ficaram bem próximas. Podemos observar que entre o diâmetro de 50 mm e 68 mm houve pouca variação.

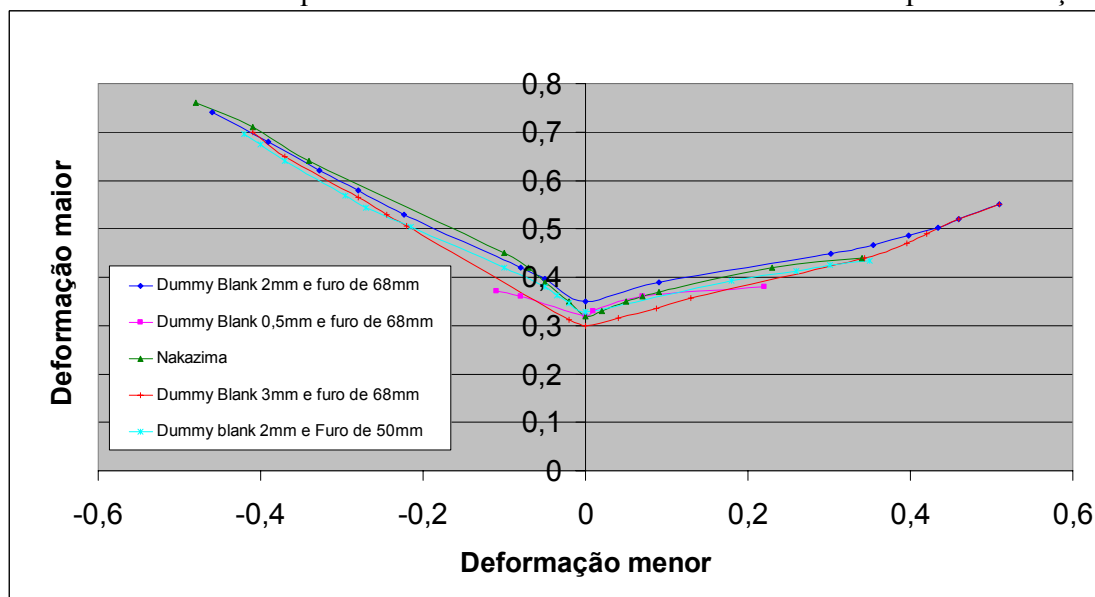


Figura 47 - Curvas Limite de Conformação de todos os casos estudados

5. CONCLUSÕES

Foram avaliados os ensaios de Marciniak e o ensaio de Nakazima para o levantamento da CLC de chapas de aço de alta estampabilidade. Para o ensaio de Marciniak verificou-se uma inviabilidade de trabalhar com *dummy blank* de pequenas espessuras no presente caso, 0,5 mm, pois esses romperam durante o ensaio. O caso que mais se aproximou ao ensaio de Nakazima foi quando se utilizou o *dummy blank* com espessura de 2 mm e furo de 50 mm. Para futuros trabalhos estaremos avaliando a influência do diâmetro furo do *dummy blank* no ensaio de Marciniak.

6. REFERÊNCIAS

1. ALTAN, T., OH, S., GEGEL, H. L. **Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações:** Publicação EESC-USP, São Carlos, 1999.
2. BORSOI, C. A., HENNIG, R., SCHAEFFER, L. **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, p. 50-59, 2000.
3. CHEMIN, R. A. **Avaliação da Deformação de Chapas e Curvas CLC para Diferentes Geometrias de Punções:** UFPR, Curitiba, 2004.
4. FLC CLUB. **Determination of Forming Limit Curves:** Proposal document of FLC Club to International Standardization Organization (ISO), 2004.
5. GOODWIN, G. M. **Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop:** Society of Automotive Engineers, technical paper n°. 680093, 1968.
6. HOSFORD, W. F., CADDELL, R. M. **Metal Forming – Mechanics and Metallurgy:** 2nd. Ed. N. J., Prentice Hall, 1993.
7. KEELER S. P. AND BACKOFEN W.A. **Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches:** ASM, Vol. 56, p. 25-48, 1963.
8. KEELER, S. P. **Determination of Forming Limits in Automotive Stampings:** Society of Automotive Engineers, technical paper n°. 650535, 1965.
9. KEELER, S. P. **Understanding Sheet Metal Formability:** Part 5 – Die Design and Lubrication, New York, 1968.
10. LORENTZ, R., GILAPA, G. M. **Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano:** I Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, p. 141-150, 1998.
11. MARCINIAK, Z. AND KUCZYNSKI, K. Limits Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal: Int. J. Mech. Science, vol. 9, p. 609-620, 1967.
12. MARCINIAK, Z., KUCZYNSKI, K. AND POKRA, T. Influence of The Plastic Properties of A Material On The Forming Limit Diagram For Sheet Metal In Tension: Int. J. Mech. Science., vol. 15, p. 789-805, 1973.
13. RICHTER, A. **Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação:** VI Conferência Nacional de deformação de chapas, Ed Lírio Schaeffer, Porto Alegre, 2003.
14. SAMPAIO, A. P., MARTINS, C. A., SOUZA, P. C. **Caracterização da Conformabilidade de Aço Livre de Intersticiais:** III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento / Brasil, Porto Alegre, 2003.
15. KIKUMA, K., NAKAJIMA, K. **Effect of Deformation and Mechanical Properties on Stretch Forming Limits of Steel Sheets:** ICSTIS, Sec. 5, p. 827-831, 1968.

FORMING LIMIT CURVE THROUGH MARCINIAK TEST FOR SHEET METAL VALUATION OF DEEP DRAWING STEEL

Ricardo A. Santos

ricardo@netpar.com.br

Luiz M. V. Tigrinho

tigrinho@netpar.com.br

Ravilson A. C. Filho

ravilson@demec.ufpr.br

Paulo V. P. Marcondes

marcondes@demec.ufpr.br

Address: Federal University of Paraná.

Tecnology Sector – Department of Mechanical Engineering

Polytechnic Center – Po. Box 19011

Zip code 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brazil

Phone: 55 41 33613431 Fax: 55 41 3613129

***Abstract.** The sheet metal forming is a very important process of manufacture. Nowadays, we have an increase of new materials applications like high strength steel and aluminum alloys; the viability for use this new materials depend of the knowledge of their properties and of the forming process parameters, too. The forming limit diagram (FLD) is generally used for control the materials deformation level in production. The FLD is used in the industries as an auxiliary tool for sheet metal forming problems. These FLDs are determined in technologic tests wherein the sheet metal is submitted to different deformation states: deep drawing, plan state and/or biaxial stretch. On the tests the sheet metal with different width are deformed on different geometry punches, for example, the Nakazima test uses a spherical punch and Marciniak test uses a cylindrical punch. In this work, a cylindrical punch was used, and the objective was to obtain the FLD for different dummy blanks thickness and a comparison with Nakazima test results was made. In the Marciniak test with dummy blank thickness' 2mm and hole' 50mm showed the best results.*

Keywords: Forming, Marciniak Test, Forming Limit Curve.