

SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO ENSAIO NAKAZIMA PARA OBTENÇÃO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO DO AÇO DC04

Sergio Luiz Manenti

Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho, Curitiba - PR

luiz.manenti@pucpr.br

Pedro Regodzinski Junior

Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho, Curitiba - PR

pedro.regodzinski@pucpr.edu.br

Paulo Victor Prestes Marcondes

Universidade Federal do Paraná. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 - Jardim das Américas, Curitiba - PR

marcondes@ufpr.br

Ricardo Diego Torres

Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho, Curitiba - PR

ricardo.torres@pucpr.br

Resumo. A Curva Limite de Conformação (CLC) é um método usado para determinar as máximas deformações que uma chapa metálica pode atingir em processos de estampagem por embutimento e estiramento. O Ensaio Nakazima permite determinar a CLC de um material através da estampagem de amostras com diferentes geometrias usando um punção hemisférico. Com esse ensaio é possível obter diferentes razões de deformação para cada geometria de amostra, desde as deformações no campo de embutimento até o estiramento. Na simulação do Ensaio Nakazima pelo software Altair Inspire™ Form foram obtidas diferentes razões de deformação para cada amostra e foram avaliadas três condições de lubrificação para a amostra de geometria circular. Foi obtida a Curva Limite de Conformação para o aço comercial DC04. Comparando com o modelo de Keeler, os pontos da CLC tiveram variação máxima de 31% abaixo dos valores previstos pelo modelo e em comparação com o modelo NADDRG (North American Deep Drawing Research Group), houve variação máxima dos pontos da CLC de 13% abaixo dos valores do modelo.

Palavras-chave: conformação mecânica; estampagem; (CLC) -Curva Limite de Conformação; ensaio Nakazima, simulação por elementos finitos.

1. Introdução

A conformação mecânica é o processo de fabricação usado para produzir a maior parte das peças no setor automobilístico (Anup e Shete, 2014). Dentro da conformação mecânica, o principal processo é a estampagem, em que transforma chapas inicialmente planas em geometrias requeridas, sem que haja defeitos como rupturas, rugas e riscos, oriundos do processo de estampagem (Shinge e Dabade, 2018a).

Devido à complexidade dos processos de conformação, com destaque a estampagem, são necessários vários testes para determinar o comportamento de deformação das chapas metálicas em diferentes condições de trabalho mecânico (Schwindt, et al. 2015a).

Nos testes para determinar a conformabilidade para chapas metálicas, busca-se atingir as máximas deformações que o material pode suportar de acordo com as solicitações mecânicas do processo de conformação, desde a faixa de deformações de embutimento até o estiramento. A Curva Limite de Conformação - (CLC) é a representação geométrica dos pontos de máxima deformação que o material pode atingir para processos de estampagem por embutimento e estiramento, restringindo cada material pelo seu ponto do limite de resistência. O conhecimento da CLC de um material é de extrema importância para que os processos de conformação garantam qualidade nas peças finais (Henriques, et al. 2010a).

A CLC é usada durante o projeto de qualquer produto fabricado por estampagem e é altamente aplicada na indústria de chapas metálicas, sendo considerada uma das mais importantes ferramentas na identificação do limite de conformabilidade dos materiais. Com o ensaio Nakazima, proposto por Nakazima no final da década de 60 em *Study on the formability of Steel Sheets* (Estudo sobre a conformabilidade em chapas de aço), é possível obter os pontos de deformação em toda a extensão da CLC através da estampagem de amostras de diferentes geometrias usando uma matriz de punção hemisférico. Atualmente o ensaio Nakazima é altamente usado na indústria para obter as CLC dos aços, devido a simplicidade das ferramentas usadas no ensaio e a baixa complexidade das amostras (Henriques, et al. 2010a; Kumar,

et al. 2016a). A CLC não é um parâmetro que depende apenas do material da chapa, pois varia de acordo com a espessura da chapa e condições de lubrificação na estampagem (Carvalho, *et al.* 2015a).

Na Figura 1, é representada uma CLC com as diferentes regiões de deformação no campo de embutimento, deformação plana e estiramento.

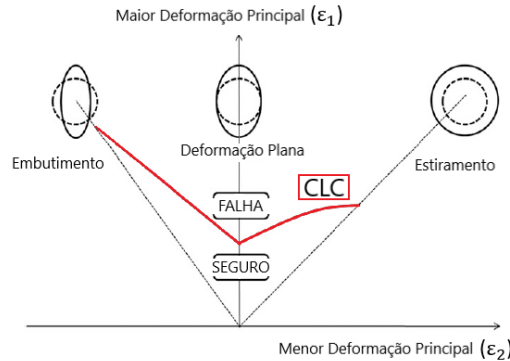


Figura 1 - Curva Limite de Conformação, adaptado de (Shinge e Dabade, 2018b).

Para obter a CLC de forma experimental, uma malha de círculos é impressa nos corpos de prova antes do ensaio. Após o ensaio, os círculos são distorcidos e assumem uma forma de elipse representado na Figura 2, onde são feitas medições do diâmetro maior D_1 e menor D_2 do círculo inicial D_0 , conforme elipse representado na Figura 3, (Camargo, *et al.* 2003).



Figura 2 - Corpo de prova gravado com malha circular após a deformação (Lumelskyj, *et al.* 2015).

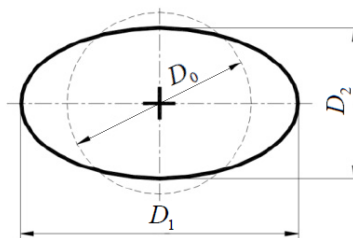


Figura 3 - Avaliação dos diâmetros maior e menor da elipse. Adaptado de (Evin, *et al.* 2014).

Na elipse escolhida para medir as deformações, tem-se a maior deformação principal convencional calculada a partir do diâmetro maior da elipse pela Equação 1 e a maior deformação e verdadeira é obtida pela Equação 2, segundo (Henriques, *et al.* 2010).

$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad (2)$$

A partir do menor diâmetro da elipse, tem-se a menor deformação convencional obtida a partir da Equação 3 e a menor deformação verdadeira calculada pela Equação 4.

$$e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(1 + e_2) \quad (4)$$

O material estudado nesse artigo é a chapa de aço DC04 comercial, que é um aço ferrítico com ultra baixo teor de carbono e baixo teor de elementos de liga. Esse aço é de qualidade comercialmente classificado como EEP (Estampagem Extra Profunda), possui grande capacidade de deformação e é muito usado na indústria automobilística para a fabricação de peças externas e internas para carrocerias (Soyarslan, *et al.* 2011). O objetivo deste estudo foi determinar a Curva Limite de Conformação para o aço DC04 através da Simulação do Ensaio Nakazima no software *Altair Inspire™ Form* 2019 e comparar com modelos teóricos existentes de CLC, a fim de validar o modelo para ser realizado em qualquer outro material de chapa para estampagem.

2. Simulação Computacional

2.1 Software, material e parâmetros de simulação

As simulações foram realizadas na versão estudantil do software *Altair Inspire™ Form* 2019, que possibilita a modelagem computadorizada e simulação do processo de estampagem de chapas metálicas. Na Tabela 1 estão presentes as propriedades mecânicas do aço comercial DC04 obtidas a partir dos resultados de ensaios já realizados em laboratório na PUCPR.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço DC04.

Tensão de escoamento	189 MPa
Tensão última de tração	278 MPa
n	0,21
r_{0°	2,7
r_{45°	2,3
r_{90°	1,8

Da Tabela 1, n é o coeficiente de encruamento do material, r_{0° é a anisotropia na direção de laminação, r_{45° é medido a 45° em relação à direção de laminação e r_{90° é a anisotropia medida na direção perpendicular ao sentido de laminação, de acordo com a Figura 4.



Figura 4 - Orientação de corte de corpos de prova para determinação da anisotropia (Lora, *et al.* 2009a).

O coeficiente de encruamento (n) indica a capacidade do material de distribuir as deformações ao longo do seu volume, influenciando diretamente na capacidade do material esticar. O coeficiente de anisotropia (r) define a razão entre as deformações principais no sentido da largura e espessura de uma chapa metálica, influenciando na capacidade do material embutir. Os materiais apresentam diferentes valores de anisotropia em função da direção em que o material foi laminado (Lora, *et al.* 2009b).

O modelo usado nas simulações, representado na Figura 5, foi desenhado com base no ensaio Nakazima estudado por Hashemi, *et al.* (2014), onde foram seguidos os parâmetros da norma ISO 12004.

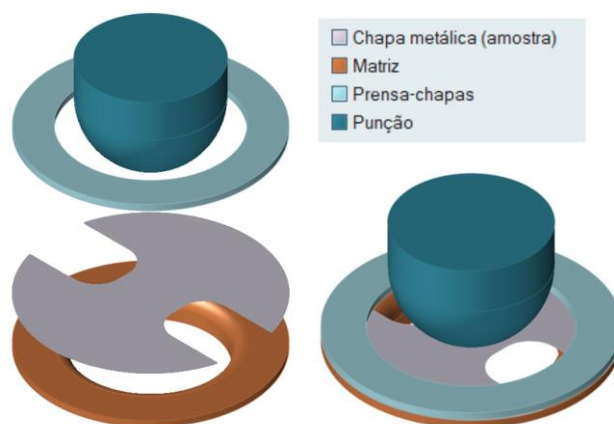


Figura 5- Representação do modelo 3D usado na simulação do Ensaio Nakazima.

O critério de parada adotado na simulação foi o mesmo adotado para um teste experimental, onde, após atingir um ponto máximo, a força do punção começa a diminuir, indicando *necking* (empescoçamento), que é o início do estiramento localizado da amostra conforme representado na Figura 6.

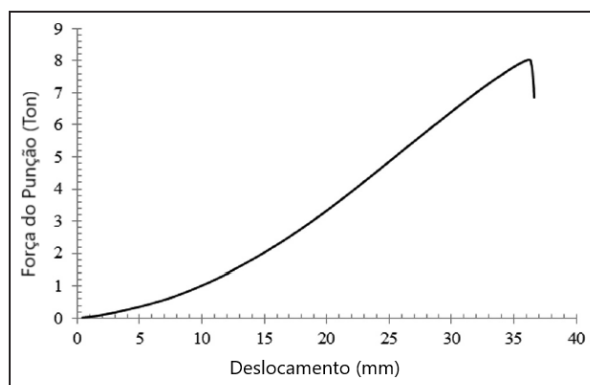


Figura 6 - Força do Punção em função do deslocamento, adaptado de (Hashemi, *et al.* 2014).

Na Figura 7 está um desenho esquemático com as medidas usadas no modelo do ensaio Nakazima, baseado na norma ISO 12004.

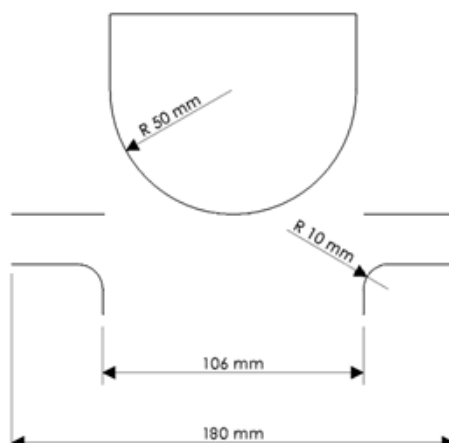


Figura 7 – Representação esquemática do modelo do punção hemisférico, prensa-chapas e matriz.

A geometria das amostras da simulação, representada na Figura 8, está de acordo com a ISO 12004-2 (Slota, *et al.* 2015), com estreitamento central com comprimento de 50 mm e cantos arredondados com filete de 20mm. Diferentes larguras representadas por (w) no estreitamento das amostras possibilitam diferentes razões de deformação entre as deformações ϵ_1 e ϵ_2 .

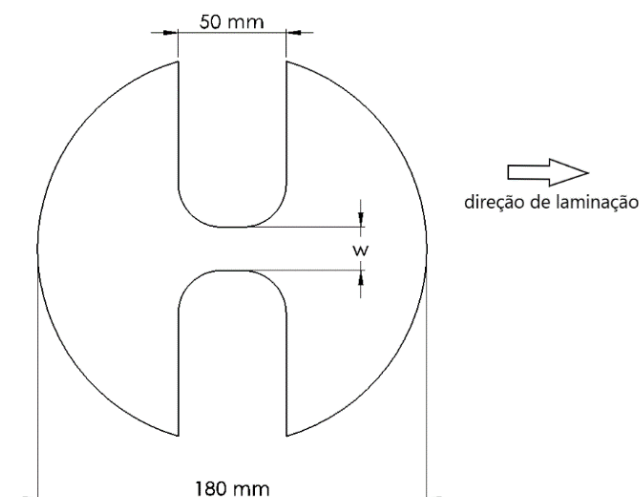


Figura 8 – Geometria das amostras, com a largura $w = 30, 40, 50, 80, 100, 110, 120$ e modelo circular sem estreitamento, com diâmetro de 180mm.

O coeficiente de atrito entre o punção e as amostras para todas as simulações foi escolhido de acordo com o estudo de Lumelskyj, *et al.* (2019), onde foi adotado o coeficiente de atrito de Coulomb $\mu = 0,04$. Esse coeficiente representa uma condição de lubrificação com folha de teflon. Para obter diferentes razões de deformação para a amostra circular foram feitas simulações adicionais com coeficientes de atrito $\mu = 0,10$ e $\mu = 0,20$. A velocidade do punção para todas as simulações é de 2 mm/s e a espessura das amostras é de 1 mm. A força (F) e coeficiente de atrito (μ) do prensa-chapas foram escolhidos de forma a manter a amostra totalmente presa junto com a matriz durante simulação, conforme norma do ensaio Nakazima. O tamanho da malha de elementos finitos é de 4 mm, tamanho padrão de malha do *Altair Inspire™ Form*.

O modelo de deformação do *Altair Inspire™ Form* é o Hill 1948 representado na Figura 9, onde desta forma o software calcula as tensões desenvolvidas no material durante a simulação dos processos de estampagem. Os pontos de medição foram escolhidos nos nós em que a tensão equivalente é igual a tensão limite verdadeira do material, pelo critério Hill 1948, caracterizando as regiões de *necking* na amostra (Kumar, *et al.* 2016b). Foram coletados os valores de deformação em oito pontos por amostra para obter valores médios e o procedimento de escolha dos pontos está ilustrado na Figura 10.

Tensão de Escoamento:	189 MPa
Tensão Limite:	278 MPa
Coeficiente de resistência:	475 MPa
Encruamento:	0.21
R00:	2.7
R45:	2.3
R90:	1.8
Critério de escoamento:	Hill 1948 ▼

Figura 9 – Propriedades mecânicas do aço DC04 usadas no *Altair Inspire™ Form*.

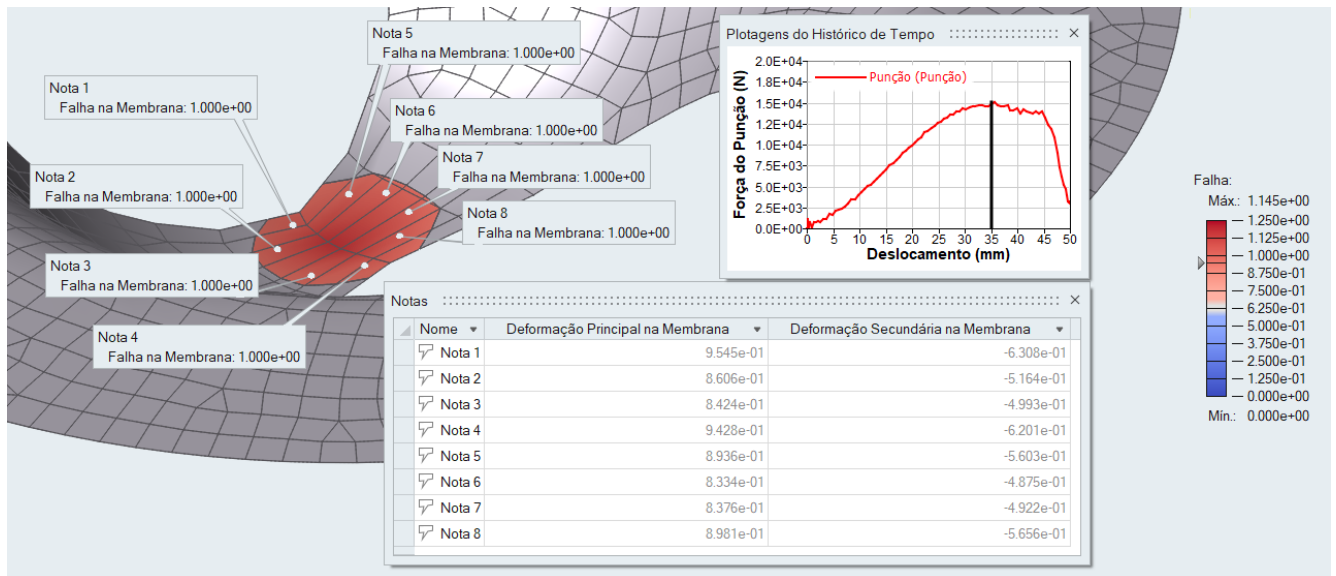


Figura 10 – Escolha dos pontos de medição das deformações.

2.1 Modelos Teóricos de CLC

O conceito de CLC foi inicialmente desenvolvido por Keeler e Backofen em 1963, mais tarde aprofundado por Goodwin em 1968 (Schwindt, *et al.* 2015a; Kumlu, *et al.* 2019). O modelo analítico de Keeler (Aksen, *et al.* 2020a) determina as deformações limite nos dois lados da CLC através das equações 5,6,7 e 8:

Para $\varepsilon_2 = 0$, no estado plano de tensões, tem-se ε_1 definido pela Equação 5 e ε_0 calculado pela Equação 6:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = \ln \left[(23,3 + 14,13t) \frac{n}{0,21} \right] \quad (6)$$

Para $\varepsilon_2 < 0$, no campo de embutimento, ε_1 é calculado pela Equação 7:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2(0,027254\varepsilon_2 - 1,1965) \quad (7)$$

E Para $\varepsilon_2 > 0$, na região de estiramento, ε_1 é definido pela Equação 8:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2(-0,008565\varepsilon_2 + 0,784854) \quad (8)$$

Onde t é a espessura da chapa em mm e n é o coeficiente de encruamento do material. ε_2 é a menor deformação verdadeira, representada no eixo das abscissas e ε_1 é a maior deformação verdadeira, encontrada no eixo das ordenadas.

O modelo teórico pelo método NADDRG (*North American Deep Drawing Research Group*) é proposto de forma a determinar a CLC de um material de forma simplificada (Carvalho, *et al.* 2015b). Com esse método é possível obter as deformações limite através das seguintes equações:

Para $\varepsilon_2 = 0$, tem-se o estado plano de tensões, onde ε_1 e ε_0 são calculados pela Equação 9 e Equação 10:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \quad (9)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{n}{0,21} (0,233 + 0,141t) \quad (10)$$

Para $\varepsilon_2 < 0$, na região de embutimento, ε_1 é calculado pela Equação 11:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 - \varepsilon_2 \quad (11)$$

E Para $\varepsilon_2 > 0$, no campo de estiramento, tem-se ε_1 definido pela Equação 12:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + 0,36\varepsilon_2 \quad (12)$$

Onde, t é a espessura da chapa em mm e n é o coeficiente de encruamento do material.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 2 encontram-se os valores médios das deformações principais verdadeiras ε_1 e ε_2 para todas as amostras simuladas. A amostra circular foi simulada com o coeficiente de atrito $\mu = 0,04$, mesmo coeficiente usado para as outras amostras e adicionalmente com as condições de atrito $\mu = 0,10$ e $\mu = 0,20$.

Tabela 2 - Resultado da medição das deformações.

Amostra	ε_1	ε_2
w = 30 mm	0,864	-0,524
w = 40 mm	0,765	-0,432
w = 50 mm	0,698	-0,371
w = 80 mm	0,475	-0,154
w = 100 mm	0,378	-0,056
w = 110 mm	0,337	0,014
w = 120 mm	0,357	0,059
circular	0,431	0,336
circular $\mu = 0,10$	0,413	0,211
circular $\mu = 0,20$	0,372	0,085

Na Figura 11 é possível observar a geometria deformada das amostras após as simulações. O gradiente de cores representa os indicadores de falha, relativos à tensão desenvolvida na amostra no momento das medições. Na legenda é possível acompanhar os índices de falha na extensão das amostras. Nos pontos onde o índice é igual a 1 a amostra atingiu sua deformação máxima, no início do *necking*. Nos índices de falha maiores que 1, a amostra falhou e sofreu estricção.

A Figura 12 demonstra a forma como a geometria das amostras altera as razões de deformação durante o ensaio. No estreitamento central das amostras, menores larguras (w) forneceram deformações no campo de embutimento e com o aumento gradual na largura foram observadas deformações mais próximas do ponto de deformação plana ($\varepsilon_2 = 0$) até o início do campo de estiramento (Lora, *et al.* 2009c). A geometria circular forneceu as maiores deformações no campo de estiramento.

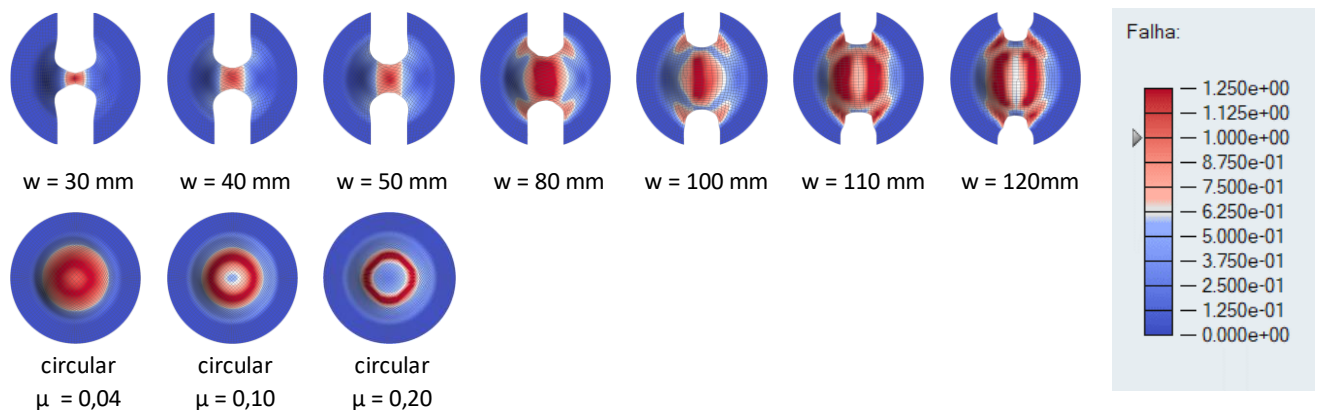


Figura 11 - Geometria deformada das amostras.

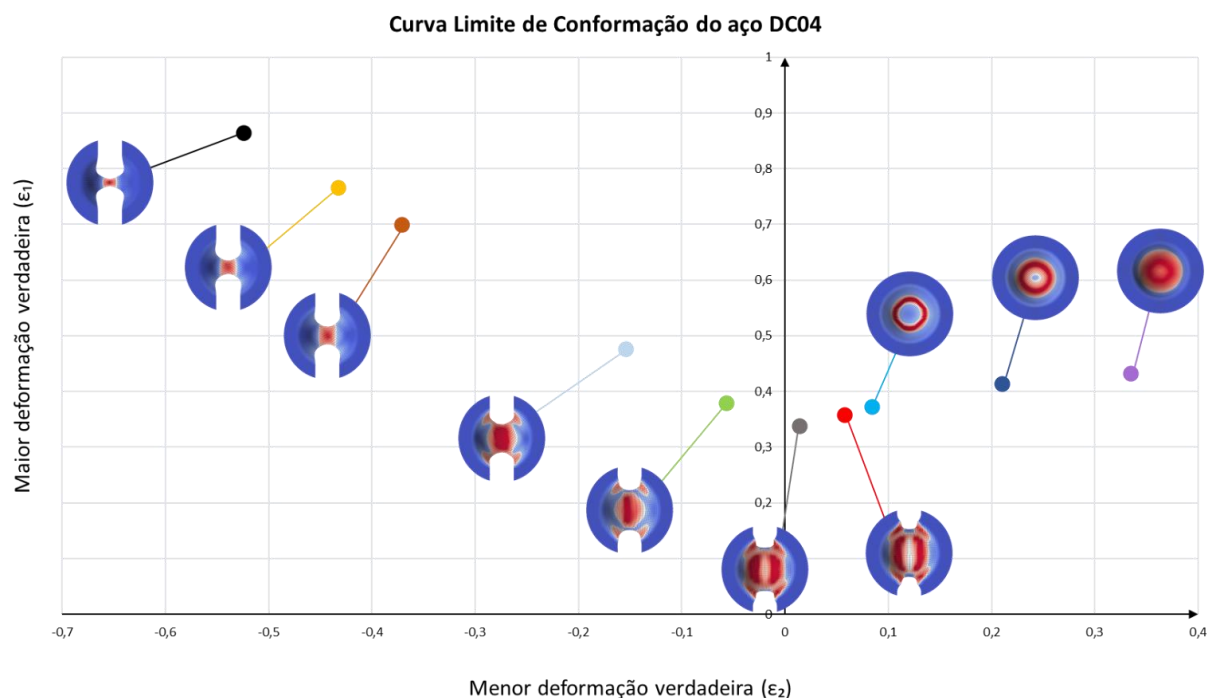


Figura 12 - Influência da geometria das amostras nas razões de deformação.

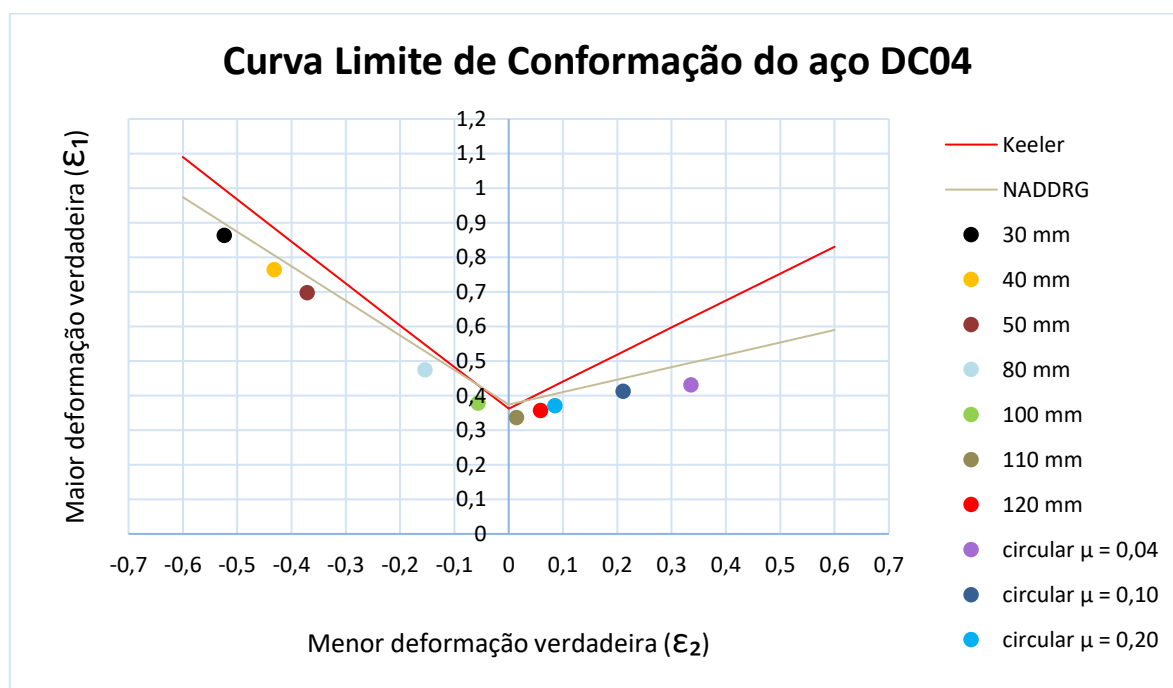


Figura 13 – Curva Limite de Conformação para o DC04 obtida pela medição das deformações verdadeiras ϵ_1 e ϵ_2 na simulação, junto com as curvas dos modelos teóricos de Keeler e *North American Deep Drawing Research Group*.

A lubrificação é um importante parâmetro que permite a uma mesma geometria alcançar diferentes razões de deformação com diferentes condições de atrito. Na amostra circular, as deformações de estiramento foram maiores à medida que o coeficiente de atrito foi diminuindo, portanto, para uma peça atingir as maiores deformações de estiramento é necessária uma condição de lubrificação com baixo atrito, como o caso do coeficiente de atrito $\mu = 0,04$ adotado nas simulações. As deformações apresentadas na Tabela 2 foram usadas para determinar a Curva Limite de Conformação do aço DC04, na Figura 13, onde também é possível observar as curvas obtidas através das equações dos métodos analíticos de Keeler (Aksen, et al. 2020b) e NADDRG (Carvalho, et al. 2015c).

Na Tabela 3 os valores de deformação medidos na simulação são comparados com os modelos teóricos de Keeler e NADDRG.

Tabela 3 – Maior deformação verdadeira ϵ_1 medida e calculada pelos métodos analíticos de Keeler e NADDRG.

Amostra	ϵ_2	ϵ_1 (medida)	ϵ_1 (Keeler)	ϵ_1 (NADDRG)	erro Keeler (%)	erro NADDRG (%)
w = 30 mm	-0,524	0,864	0,996	0,898	13,28	3,75
w = 40 mm	-0,432	0,765	0,884	0,806	13,52	5,12
w = 50 mm	-0,371	0,698	0,810	0,745	13,78	6,28
w = 80 mm	-0,154	0,475	0,547	0,528	13,10	9,94
w = 100 mm	-0,056	0,378	0,430	0,430	11,93	12,05
w = 110 mm	0,014	0,337	0,374	0,379	9,72	11,06
w = 120 mm	0,059	0,357	0,408	0,395	12,49	9,59
circular	0,336	0,431	0,625	0,495	30,98	12,87
circular $\mu = 0,10$	0,211	0,413	0,527	0,450	21,68	8,21
circular $\mu = 0,20$	0,085	0,372	0,429	0,405	13,36	8,16

Na Tabela 3, usando as equações dos modelos de Keeler e *North American Deep Drawing Research Group* (NADDRG), foram calculadas as maiores deformações verdadeiras ϵ_1 em função das menores deformações verdadeiras ϵ_2 , de forma a comparar com as maiores deformações verdadeiras medidas na simulação.

As deformações medidas na parte de embutimento, lado esquerdo da CLC ($\epsilon_2 < 0$), tiveram uma diferença de aproximadamente 13% do modelo de Keeler. Na parte de estiramento, lado direito da CLC ($\epsilon_2 > 0$), a diferença de valores entre as medições e o modelo começaram em torno de 10% na deformação plana ($\epsilon_2 = 0$) mas foram aumentando com valores maiores de ϵ_2 , chegando até em torno de 31% para os maiores valores de ϵ_2 .

Na parte de embutimento, comparando com o modelo NADDRG, nos menores valores de ϵ_2 , a diferença entre as medições e o modelo inicia por volta de 4%, mas vai aumentando em até 11% à medida que ϵ_2 se aproxima do ponto de deformação plana. Para os maiores valores de ϵ_2 , na parte de estiramento, a diferença é de aproximadamente 13%. Em pontos intermediários de ϵ_2 , entre a deformação plana e o maior ponto de deformação de estiramento a variação entre os valores é em torno de 8%. Na Figura 14 é possível observar o comportamento dos erros relativos descrito acima na comparação dos valores medidos com os modelos teóricos.

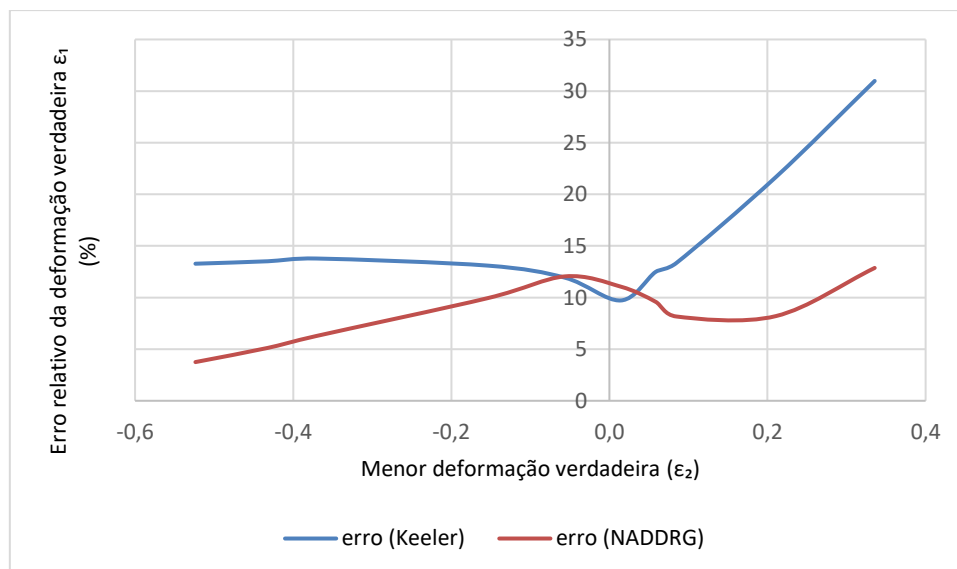


Figura 14 - Erro das medições em relação aos modelos teóricos.

4. Conclusões

Foi construído e simulado o modelo do Ensaio Nakazima no software *Altair Inspire™ Form*. Com esse modelo é possível criar a Curva Limite de Conformação para qualquer tipo de material para chapas usadas em processos de estampagem, desde que possua os dados das propriedades mecânicas do material. A CLC obtida pela simulação do modelo do Ensaio Nakazima no *Altair Inspire™ Form* prevê deformações limite menores para o material, comparando com os modelos teóricos de Keeler e *North American Deep Drawing Research Group*, logo, a estampagem de uma peça levando em consideração a CLC obtida pela simulação no software estará sempre dentro da zona segura das Curvas Limite de Conformação dos modelos teóricos de Keeler e NADDRG, usados na comparação.

4. REFERÊNCIAS

- Aksen, T. A., Sener, B., Firat, M. Failure prediction capability of generalized plastic work criterion. *Procedia Manufacturing*, 2020; 47:1235-1240.
- Anup, S. A., Shete, M. T. Formability analysis of deep drawing process by finite element simulation. *International Journal of Science and Research*, 2014; 3.
- Camargo, E. J., Chemin Filho, R. A., Srour Jr, E. H., Marcondes, P. V. Influência do entalhe em corpos de prova do ensaio Nakajima, 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003.
- Carvalho, M. S., Lora, F. A., Sartori, J. R., Coelho, R. S. Estudo teórico da estampabilidade do aço lean duplex UNS S32304 através da simulação numérica do ensaio de cinco punções. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015.
- Evin, E., Tomáš, M., Kmec, J., Németh, S., Katalinic, B., Wessely, E. The deformation properties of high strength steel sheets for auto-body components. *Procedia Engineering*, 2014; 69: 758-767.
- Hashemi, M., Mamusi, H., Masoumi, A. A simulation-based approach to the determination of forming limit diagrams. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2014.
- Henriques, A. D., Assis, G. M., Carneiro, G. C., Batista, F. A., Landre, J. Análise comparativa numérico-experimental para obtenção da curva limite de conformação do aço. *Nono Simpósio de Mecânica Computacional*, 2010.
- INTERNATIONAL STANDARD – ISO 12004-2 Metallic materials – Sheet and strip – Determination of forming-limit curves – Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory.
- Kumar, S. D., Amjith, T. R., Anjaneyulu, C. Forming limit diagram generation of aluminum alloy AA2014 using Nakazima test simulation tool. *Procedia Technology*, 2016; 24:386 – 393.
- Kumlu, C., Esener, E., First, M. Predictive modelling of Trip600 steel formability performance using analytical and numerical methods. *Eng. Res. Express*, 2019.
- Lora, F. A., Folle, L. F., Schaeffer, L. Caracterização das propriedades tecnológicas do aço BH180 e BH220 e o cálculo do coeficiente de atrito no processo de estampagem profunda. 64º Congresso Anual da ABM, 2009.
- Lumelskyj, D., Rojek, J., Lazarescu, L., Banabic, D. Determination of forming limit curve by finite element method simulations. *Procedia Manufacturing*, 2019; 27: 78-82.
- Lumelskyj, D., Rojek, J., Tkocz, M. Numerical simulations of Nakazima formability tests with prediction of failure. *Ro. J. Techn. Sci. – Appl. Mechanics*, 2015; 60:184-194.
- Schwindt, C. D., Stout, M., Iurman, L., Signorelli, J. W. Forming limit curve determination of a DP-780 steel sheet. *Procedia Materials Science*, 2015; 8:978-985.
- Shinge, V. R., Dabade, U. A. Experimental investigation on forming limit diagram of mild carbon steel sheet. *Procedia Manufacturing*, 2018; 20:141-146.
- Slota, J., Jurčišin, M., Spišák, E., Tomáš, M., Šiser, M. Experimental flc determination of high strength steel sheet metal. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2015.
- Soyarslan, C., Fassmann, D. P. F., Plugge, B., Isik, K., Kwiatkowski, L., Schaper, M., Brosius, A., Tekkaya, A. E. An experimental and numerical assessment of sheet-bulk formability of mild steel DC04. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE NAKAZIMA TEST TO OBTAIN THE FORMING LIMIT CURVE OF THE STEEL DC04

Abstract. *The Forming Limit Curve (FLD) is a method used to determine the maximum deformations that a sheet metal can undergo in processes of forming by deep drawing and stretching. The Nakazima test allows to determine the FLC of a material through stamping samples with different geometries using a hemispherical punch. With this test is possible to achieve several strain paths, from deep drawing to stretching, according to the geometry of the sample. In the finite element simulation of the Nakazima test using the software Altair Inspire™ Form there were obtained different strain paths to each sample and three lubrication conditions in the circular geometry were checked. The FLC to the commercial grade steel DC04 was obtained. Comparing the results to the Keeler's model, the FLC values had a maximum variation of 31% below the values predicted by the model and comparing to NADDRG's model (North American Deep Drawing Research Group), there was a maximum variation of 13% below the model's predicted values.*

Key words: Sheet Metal forming; Stamping; Forming Limit Curve; Nakazima test, Finite Element Simulation.