

# **AVALIAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS AISI 430 PELO MÉTODO EXPERIMENTAL DE NAKAZIMA E PELA MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL**

**Herbert Amarildo dos Santos, M.Sc.**

PUC-MG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Campus Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP.: 30535-610      E-mail: [herbertsh@hotmail.com](mailto:herbertsh@hotmail.com)

**Clovis Sperb de Barcellos, PhD.**

PUC-MG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Campus Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP.: 30535-610      E-mail: [clovis@pucminas.br](mailto:clovis@pucminas.br)

**Jánes Landre Júnior, Dr.**

PUC-MG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Campus Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP.: 30535-610      E-mail: [janes@pucminas.br](mailto:janes@pucminas.br)

**Resumo.** As CLC's são ferramentas amplamente empregadas nos estudos da estampabilidade dos aços e fornece grande auxílio nas investigações e melhorias dos processos de estampagem através do seu emprego na análise das deformações plásticas de peças metálicas. Elas são também susceptíveis à influência das propriedades mecânicas bem como das propriedades físicas dos materiais; portanto, pequenas variações numa destas propriedades podem causar uma alteração significativa das CLC's sendo então necessário reavaliar o posicionamento das CLC's, para cada variação em uma dessas propriedades. Neste trabalho é analisado o comportamento para a estampabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos da série 4, mais especificamente o 430, através da construção de uma CLC, utilizando o método experimental proposto por Nakazima e de uma outra CLC teórica, baseada no método de elementos, simulando o ensaio Nakazima por meio de modelagens numéricas computacionais, através do código PATRAN-MARC. Os resultados obtidos através das análises das tensões e deformações nos modelos teóricos se mostraram bem satisfatórios na comparação com os modelos experimentais indicando que as simulações numéricas dos modelos teóricos reproduziram muito bem os ensaios realizados para os modelos experimentais e desta forma pôde-se obter uma CLC teórica e outra experimental com comportamentos muito semelhantes.

**Palavras-chave:** Curva Limite de Conformação (CLC), processos de conformação e estampagem, método de elementos finitos (MEF).

## **1. INTRODUÇÃO**

Os processos de conformação de chapas metálicas e seu estudo são complexos e não pode ser facilmente quantificado como uma simples medida. Mas devido a extensivas pesquisas teóricas realizadas durante os últimos anos levando ao estudo das “CLC's”, curvas que indicam o limite de parâmetros de conformação de diferentes materiais, o entendimento e a compreensão deste assunto tem melhorado significativamente. O método de elementos finitos contribui para este progresso por atuar como um elo entre a mecânica dos meios contínuos, a plasticidade e a mecânica computacional através da análise numérica do processo de conformação, cujos resultados são

validados através de dados e resultados experimentais. Neste trabalho são apresentados, de forma sucinta os procedimentos metodológicos bem como os resultados obtidos, experimental e numérico, na avaliação da estampabilidade do aço inoxidável ferrítico AISI430.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - CONCEITOS BÁSICOS

Os aços Inoxidáveis ferríticos são ligas de Fe-Cr contendo em torno de 11,5 a 27% de Cr, também podem ser ligados com Mn e Si e ocasionalmente Ni, Al, Mo ou Ti. Eles são usados por possuírem boa resistência à corrosão e à oxidação a altas temperaturas, boa conformabilidade e resistente a formação de pites. O maior problema quanto a sua utilização dá-se devido a ele ser caracterizado por uma menor estampabilidade, principalmente em operações onde predomina o estiramento, porém pode apresentar ótimo desempenho em processos nos quais prevalece o embutimento, dependendo de seu coeficiente de anisotropia normal médio,  $\bar{R}$ , cujo valor varia entre 1,0 e 1,6. Quanto maior for o valor de  $\bar{R}$  maior será a aptidão ao embutimento, e o coeficiente de anisotropia Planar,  $\Delta R$ , deve ser mais próximo de 0, para evitar o orelhamento e a resistência ao estriamento.

O estudo da estrição e da capacidade de conformação em chapas metálicas, representado pelas CLC's é um recurso extremamente útil para se alcançar as expectativas de acordo com exigências estabelecidas pelos setores da indústria, que aliados à análise numérica computacional através do Método dos Elementos Finitos, permitem previsões e avanços ainda maiores a respeito das variáveis de projeto. A teoria da CLC ligada à simulação pelo FEM, pode levar a uma drástica redução do tempo e do custo de adaptação inicial das ferramentas, permitindo que sejam determinados mais facilmente vários parâmetros de processo com uma qualidade melhor do produto além de aumentar a confiabilidade no processo.

Nakazima propôs um método experimental de determinação de CLC que consiste na utilização de um punção de 100mm de diâmetro e de uma matriz de 106mm de diâmetro com freio para fixar, firmemente, o corpo-de-prova (CP). Os corpos de prova utilizados têm dimensões que variavam de 180mm x 100mm até 180mm x 40mm de 4 e 4mm, perfazendo um total de 16 corpos de prova diferentes. Porém a dimensão do ferramental e dos corpos-de-prova, bem como a quantidade deles, podem variar de um laboratório para outro. De qualquer forma, cada corpo de prova vai gerar pares de deformações,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , que são projetados na curva CLC.

## 3. PROCEDIMENTOS

O trabalho foi divido em duas fases, uma experimental e outra numérica, onde a segunda será validada pelo confronto comparativo de parâmetros do processo de obtenção da CLC experimental.

### 3.1. Procedimento Experimental

Realizou-se, primeiramente, o ensaio de tração do material e o ensaio Nakazima, depois foram realizadas as medições das deformações  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  e finalmente realizou-se a construção da CLC experimental. As propriedades mecânicas obtidas do ensaio de tração eram necessárias para que, posteriormente, fossem usadas para alimentar os dados de entrada do modelo teórico.

Os CP's submetidos ao ensaio de tração foram obtidos conforme norma ASTM E-8M e os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios INSTRON, Modelo 5583, com extensômetros e um sistema de aquisição de dados conectados a um computador, que por meio de um software forneceu os resultados do ensaio realizado. Durante os ensaios foram obtidos todos os valores referentes às propriedades mecânicas para o material de cada um dos 9 (nove) CP's bem como as 9 (nove) curvas tensão-deformação de engenharias ou convencionais. Através da conversão das curvas ( $\sigma_c \times \varepsilon_c$ ) convencionais obteve-se as curvas tensão-deformação ( $\sigma_R \times \varepsilon_R$ ) reais ou verdadeiras. Então de posse destes dados, reais, pôde-se gerar os gráficos com as respectivas curvas ( $\sigma_R \times \varepsilon_R$ ), nove curvas no total, sendo três para cada sentido de laminiação.

A curva ( $\sigma_R \times \varepsilon_R$ ) utilizada foi obtida através da média de dados de todas as 9 (nove) curvas, onde foram escolhidos então 35 pares de pontos ao longo desta curva para.

Os ensaios para a obtenção da CLC experimental pelo método de Nakazima foram realizados utilizando-se de 1 (uma) prensa universal Erichsen equipada com ferramental específico. Utilizou-se dois lotes, A e B, de um mesmo material/bobina para se obter maior confiabilidade do processo, com 9 (nove) CP's cada um, de espessura  $e=0,60\text{mm}$ , sendo seus comprimentos fixos, 200mm, e suas larguras variáveis com intervalos de 20mm, variando então de 200x40mm até 200x200mm. O sentido de laminação foi conservado na direção do comprimento.

Antes de serem ensaiados, os CP's foram inspecionados visualmente e marcados com redes de círculos entrelaçados, de diâmetros de aproximadamente  $d=5\text{mm}$ , por meio de um gravador eletroquímico. Depois foram preparados e ajustados as condições e os parâmetros de processo da máquina de ensaio Erichsen e do ferramental de ensaio Nakazima, e finalmente executou-se os ensaios dos CP's até que ocorresse a fratura de suas paredes.

Após o ensaio, a prensa universal forneceu a profundidade final de penetração do punção em cada CP e a força de carga máxima do punção aplicada sobre ele durante o ensaio. A rede círculos entrelaçados marcados nos corpos de prova transformam-se em elipses ou círculos de maior diâmetro, que vão fornecer os pares de maiores e menores deformações,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , respectivamente.

Para se obter as medidas de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  e construir a CLC experimental foram realizadas as medições dos comprimentos desses eixos,  $l_1$  e  $l_2$ , em cada CP, utilizando-se um estereoscópio óptico ligado a um analisador de imagens. E para se medir estes círculos deformados, de cada CP, escolheu-se uma elipse ou círculo de maior diâmetro, em que a fratura passava exatamente pelo seu centro, e então realizadas três medições para  $l_1$  e  $l_2$ , garantindo maior confiabilidade, lembrando que deve ser descontada a fratura durante as medições. Depois se determinou a média dos valores dos lotes A e B obtendo 9 pares de eixos, Eq.(1):

$$l_{1M} = \frac{(l_1 \text{ LoteA} + l_1 \text{ LoteB})}{2} \quad \text{e} \quad l_{2M} = \frac{(l_2 \text{ LoteA} + l_2 \text{ LoteB})}{2}. \quad (1)$$

Finalmente determinou-se os pares de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , de acordo com a Eq. (2) e traçou-se um gráfico com  $\varepsilon_1$  nas ordenadas e  $\varepsilon_2$  nas abscissas, para a média dos 09 corpos de prova obtendo-se, desta forma, o gráfico com a (CLC) do material.

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad \text{e} \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{l_2}{l_0}\right), \quad (2)$$

Para que posteriormente se pudesse validar os resultados numéricos com os experimentais, obteve-se as medidas das profundidades de ocorrência de fratura em cada um dos CP's,  $h$ , subtraindo-se do valor médio de penetração do punção (profundidade de estampagem), dos lotes A e B, as medidas  $h_1$  que foram realizadas a partir do centro de cada peça (ponto A da Fig. (1)) até a região de fratura, onde para tal usou-se: Um relógio comparador com resolução de 0,01mm e faixa nominal de 0 a 80,00mm, montado em um dispositivo sobre bancada de medição. Foram realizadas três medidas de  $h_1$ , para cada CP, e depois calculados os valores médios.

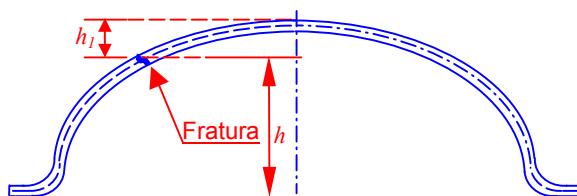


Figura (1) –Medição da profundidade  $h$  representado no desenho de uma calota deformada.

### 3.2. Procedimento Numérico

Nesta fase o objetivo foi de desenvolver uma metodologia para a construção de uma CLC teórica baseada no método de elementos finitos, simulando o ensaio experimental de Nakazima por meio de modelagens numéricas utilizando o código PATRAN-MARC e os seguintes equipamentos: um PC da marca *HP*, *Intel Pentium IV, 1.7 GHz*, HD de *30GB* e *1GB* de RAM.

Foram definidas na fase de **pré-processamento** as condições necessárias para que fosse reproduzido o ensaio Nakazima através da simulação numérica, onde os dados de entrada inseridos devem ser fiéis ao modelo físico. Foram definidos a geometria, as propriedades do material, o tipo de malha, as condições de carregamento, de contorno e de atrito, e também o tipo de análise, decidindo pelos parâmetros mais adequados de solução. Como no ensaio experimental de Nakazima, nesta fase numérica foram construídos 9 (nove) modelos com dimensões do conjunto ferramental e CP's que reproduzissem o modelo físico

A malha foi gerada apenas na chapa em contato com o punção e a matriz, sendo o punção e a matriz modelados como corpos-rígidos indeformáveis. E optou-se por escolher uma malha com elementos sólidos hexaédricos, o Hex8 que é o elemento hexaédrico mais simples por dispor apenas de 1 (um) nó em cada vértice sendo um total de 8 nós por elemento, com o intuito de obter resultados mais precisos, mesmo que para isso fosse necessário um maior tempo computacional.

O modelo foi construído inicialmente com uma malha simples sem a divisão de camadas das chapas, obtendo um número razoavelmente pequeno de elementos, com a intenção de testar a convergência dos modelos de acordo com as condições impostas a eles. Quando o modelo reproduziu conforme esperado obtendo solução completa, construiu-se uma nova malha, dividindo a chapa, de todos os modelos, em duas camadas fixas de 0,3mm (arestas do eixo z) e dividindo também o comprimento das outras arestas, dos eixos x e y, da chapa em n partes, obtendo-se assim uma razão de 0,6mm de comprimento nestas arestas da chapa de cada modelo.

Em seguida definiu-se o material bem como as suas propriedades, sendo suficientes na parte elástica: o módulo elástico ou módulo de *Young*, o coeficiente de *Poisson* e a densidade do material, obtidos no ensaio de tração do material. Depois foram criadas também as condições que definem o material como sendo elasto-plástico, onde utilizou-se da imposição dos 35 pares de pontos de dados da curva ( $\sigma_R \times \varepsilon_R$ ) obtidos do ensaio de tração.

Depois foram definidas as condições de contorno, de contato e de carregamento de cada modelo, sendo que apenas o corpo **Chapa** foi definido como corpo deformável, com coeficiente de atrito igual a 0,1 referente ao contato das interfaces feitas com a matriz e o prensa-chapas; o corpo “Punção” como corpo rígido-indeformável com controle de velocidade constante igual a 3mm/s (no eixo z) e o mesmo coeficiente de atrito de 0,1 na interface com o corpo “Chapa”, ver Tabela (7.3) velocidade de deslocamento do “Punção”; o corpo “Matriz” como corpo rígido-indeformável, assim como o “Punção”, com controle de posição fixa ( $x=0, y=0, z=0$ ), o corpo não se move e nem se deforma, com valor do coeficiente de atrito igual a 0,1 na interface com o corpo “Chapa”.

Na última etapa da fase de pré-processamento foram definidos os parâmetros e critérios da análise para cada modelo, sendo: **1**-Parâmetros de contato e atrito – definiu-se uma distância de tolerância de contato de 0,015mm em cada modelo para garantir a impenetrabilidade dos corpos e um coeficiente de atrito, conforme definido anteriormente, de 0,1, sendo atrito de *Coulomb* de força nodal. O contato se dá quando o “Punção” toca a “Chapa” e a quando a “Chapa”, por sua vez, toca o punção. **2**-Tipo de solução - foi definido, para cada um dos modelos, o método de solução por análises não-lineares dinâmicas implícitas com integração direta utilizando esquema de integração de *Houbolt* e o método de *Newton-Raphson* como parâmetro de iteração com tolerância de força residual relativa igual a 0,1 (um décimo), ou seja, o limite máximo da razão da força máxima residual imposta em um nó do modelo pela força máxima de reação obtida também em um nó do modelo é igual a 0,1 (um décimo); exceto para o Modelo 85x40 onde a tolerância foi definida por um de deslocamento incremental relativo igual a 1,0 (um), o que significa que a razão da variação do deslocamento de um nó do modelo pelo incremento de deslocamento deste mesmo nó seja no máximo igual a 1,0 (um), por se tratar de um ponto crítico dentre os demais modelos. **3**-Foram

utilizadas relações constitutivas, de carregamentos seguidos de deformações, com efeitos geométricos para grandes deslocamentos usando a formulação com atualização lagrangeana (FLA) exceto para o Modelo 85x40 onde foi utilizada a formulação lagrangeana total (FLT), devido à sua criticidade como descrito anteriormente. 4-Utilizou-se de incrementos fixos, sendo o tamanho do passo de tempo igual 0,1s (um décimo de segundo) e o número de incrementos e o tempo total variando de acordo com o critério de parada, pois o deslocamento total (profundidade de estampagem) da “Chapa” de cada modelo deve ser semelhante ao obtido no ensaio experimental.

E finalmente foi realizada a simulação numérica, propriamente dita e depois de realizada abriu-se o arquivo de saída de dados para verificar se houve êxito na solução do modelo, que é identificado através de um código numérico 3004. Há outros códigos numéricos de saída, que podem indicar possíveis falhas de solução e/ou quais os tipos mais prováveis de erro, com o objetivo de facilitar a tomada de decisões. Portanto, quando se verificou o êxito na solução, para cada um dos modelos, registrou-se o respectivo tempo computacional consumido para cada modelo e se buscou a fazer a análise, de acordo com a profundidade de estampagem obtida no resultado experimental, localizando o incremento que dava uma profundidade igual ou similar. Escolhido o incremento adequado, foram analisadas as profundidades de ocorrência de fratura, em cada um dos modelos, tomadas nas magnitudes de deslocamentos, deformações e tensões máximas cisalhantes. Tendo identificado as regiões de ocorrência de fratura, em cada um dos modelos, tomou-se um elemento desta região e gerou-se um resultado de maior e outro de menor deformação verdadeira,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , respectivamente, através da criação de uma função no próprio software que transforma a deformação de *Green-St.Venant*, maior e menor, nas deformações verdadeiras ou logarítmicas,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , sendo esta função uma equação do tipo:

$$\varepsilon_1 = \ln(\sqrt{1 + 2 * E_{maior}}) \quad \text{e} \quad \varepsilon_2 = \ln(\sqrt{1 + 2 * E_{menor}}), \quad (3)$$

onde  $E_{maior}$  é a maior deformação de *Green* e  $E_{menor}$  a menor.

Depois foi realizada a comparação das profundidades de ocorrência da fratura nos CP's estampados no ensaio experimental de Nakazima com as profundidades de ocorrência de fratura onde foram analisados os modelos numéricos, com o objetivo de constatar a semelhança dos modelos e obter assim a validação. Quando as comparações realizadas não obtêm um resultado satisfatório é necessário realizar um ou mais ajustes quantos forem necessários e adequados a cada parâmetro, na etapa de pré-processamento, simular novamente o modelo até que se possa obter a validação dos resultados de acordo com o critério de comparação proposto. E finalmente, tomou-se os valores de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , validados, de cada um dos modelos para a construção da (CLC) teórica.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O material escolhido foi o Aço Inox AISI 430A com espessura de 0,6 mm produzido na ACESITA e a composição química deste material, lote de material que foi trabalhado, é mostrada abaixo de acordo com a Tab. (1):

Tabela (1) – Composição química do material.

Composição Química Aço AISI P430A															
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	V	Ti	Sn	N <sub>2</sub>	
0,047	0,41	0,29	0,026	0,001	16,13	0,213	0,015	0,0043	0,0168	0,024	0,042	0,024	0,0041	0,0359	
<i>Densidade</i> $\rho = 7,7 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$															
<i>Dureza</i> 81,2 HBR															

A seguir é mostrada a curva ( $\sigma_R \times \varepsilon_R$ ) média de todas as 9 curvas, conforme Fig. (2).

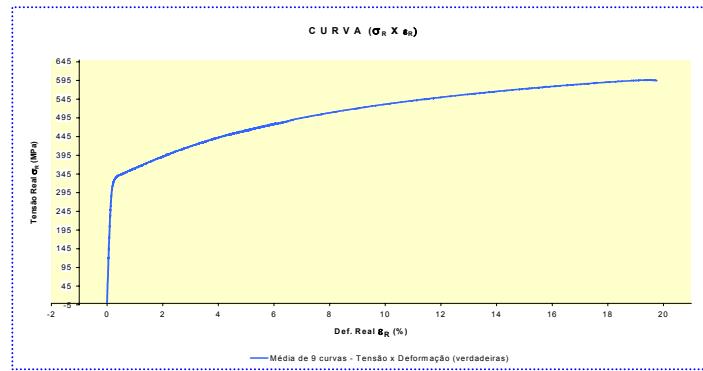


Figura (2) – Curva tensão-deformação verdadeira Aço Inox AISI 430A.

A Tab. (2) que mostra os coeficientes de anisotropia normal,  $R$ , média de três amostras, nos três sentidos de laminação e os valores de  $\bar{R}$  e  $\Delta R$ .

Tabela (2) – Coeficientes de anisotropia obtidos para o Aço Inox AISI 430A

Coeficiente de Anisotropia Normal Média e Planar - Aço AISI P430A					

De posse dos resultados de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , traçou-se a um gráfico com a CLC, Fig. (3), sendo os valores de  $\varepsilon_1$ , eixo das ordenadas e os de  $\varepsilon_2$ , eixo das abscissas.

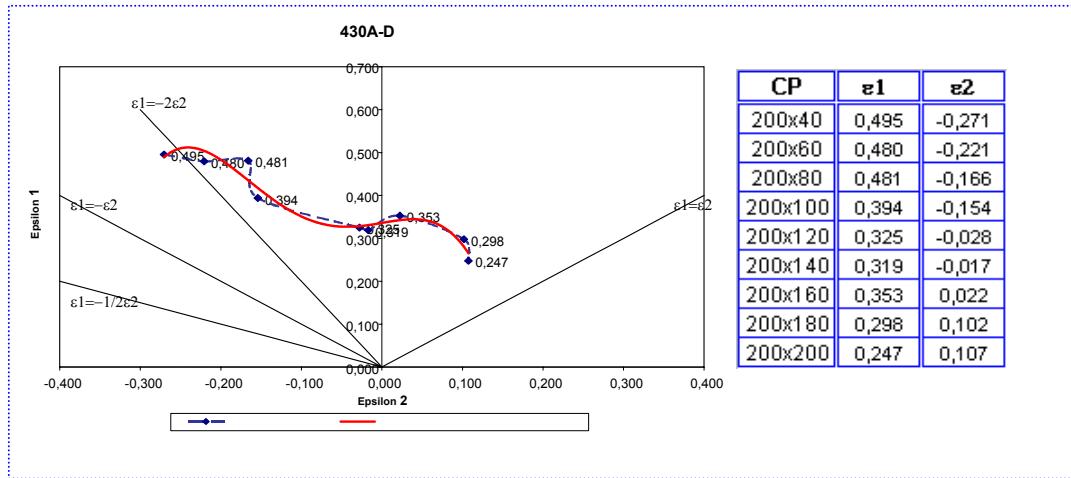


Figura (3) – CLC experimental do Aço Inox AISI 430A obtida pelo método de Nakazima.

A Tabela (3) mostra os resultados das profundidades de ocorrência de Fratura nos CP's.

Tabela (3) – Profundidades de ocorrência de Fratura nos CP's.

Medidas das Profundidades de Ocorrência de Fratura nos CP's (mm)									
CP's	200x40	200x60	200x80	200x100	200x120	200x140	200x160	200x180	200x200
Medida de h	20,04	18,82	25,75	29,32	28,95	24,52	28,43	26,91	26,31

Depois identificou-se as regiões de ocorrência de fratura, em cada um dos modelos, tomadas nas análises de magnitude dos deslocamentos, deformações e tensões máximas cisalhantes. Então, em cada um dos modelos, tomou-se na região identificada um elemento e fez gerar um resultado de

maior e menor deformação,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , respectivamente. A partir deste ponto, cada modelo será analisado separadamente através de seus gráficos de resultados numéricos. Para simplificar, foi colocado como exemplo de análise apenas um modelo, sendo que os demais foram analisados de forma análoga. No Modelo 200x200 (mm) a Fig. (4) mostra a profundidade de estampagem obtida no incremento 115 onde é mostrado no lado esquerdo (LE) a região de transição obtida na análise da máxima deformação cisalhante e no lado direito (LD) é mostrado o detalhe ampliado e o elemento selecionado no modelo 200x200(mm).

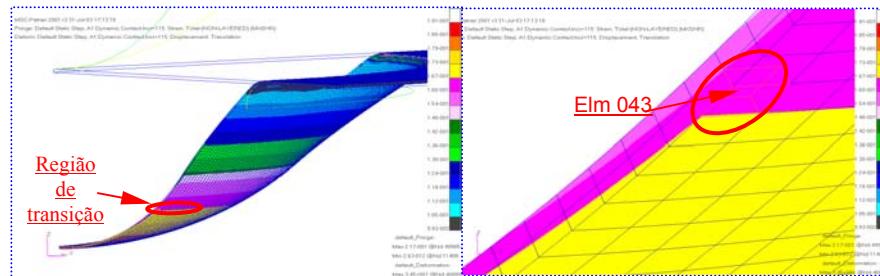


Figura (4) –Análise de máxima deformação cisalhante.

Em Seguida é mostrado no lado esquerdo (LE) da Fig.(5) a região de transição obtida pela análise de máxima tensão cisalhante e no lado direito (LD) é mostrado o detalhe ampliado.

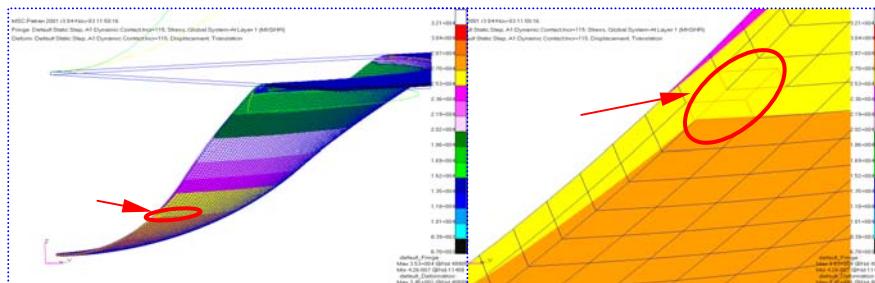


Figura (5) –Análise da máxima tensão cisalhante.

Na Figura (6) é mostrado o deslocamento do *Elm 043*, indicando a profundidade de estampagem onde ocorreu a fratura do modelo numérico de acordo com as análises anteriores.

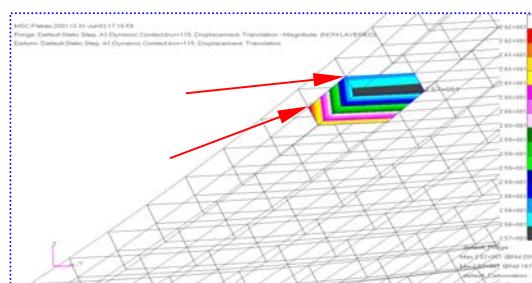


Figura (6) - Amplitude de deslocamento do *Elm 043* no modelo 200x200(mm).

A Tabela (4) mostra os resultados de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  para este modelo.

Tabela (4) – Valores de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  para o modelo 200x200 (mm).

Deformações Logarítmicas	Maior deformacão $\varepsilon_1$	Menor deformacão $\varepsilon_2$
Faixa de Valores	0,248 a 0,252	0,110 a 0,114

Depois, em cada um dos modelos, comparou-se as profundidades de ocorrência de fratura (região de transição) de cada um dos modelos numéricos com as profundidades de ocorrência de fratura dos CP's ensaiados para desta forma obter a validação de cada um dos modelos numéricos de acordo com os experimentais (Tab. (5)). E graficamente Fig. (7).

Tabela (5) – Profundidades de estampagens dos modelos numéricos e experimentais.

Comparação das Medidas das Profundidades de Estampagens (mm)									
Dimensão do CP (mm)	200x40	200x60	200x80	200x100	200x120	200x140	200x160	200x180	200x200
Modelo Experimental	44,52	45,03	46,36	44,03	39,17	32,45	35,35	36,19	34,52
Modelo Numérico	44,40	45,00	46,50	44,10	39,30	32,40	35,40	36,30	34,50
Diferença %	0,27%	0,07%	0,30%	0,16%	0,33%	0,15%	0,14%	0,30%	0,06%
Comparação das Medidas das Profundidades de Ocorrência de Fratura (mm)									
Dimensão do CP (mm)	200x40	200x60	200x80	200x100	200x120	200x140	200x160	200x180	200x200
Modelo Experimental	20,04	18,82	25,75	29,32	28,95	24,52	28,43	26,91	26,31
Modelo Numérico	20,20	18,70	25,60	29,40	29,10	24,60	28,50	27,0	26,2
Diferença %	0,79%	0,64%	0,59%	0,27%	0,52%	0,33%	0,25%	0,33%	0,42%

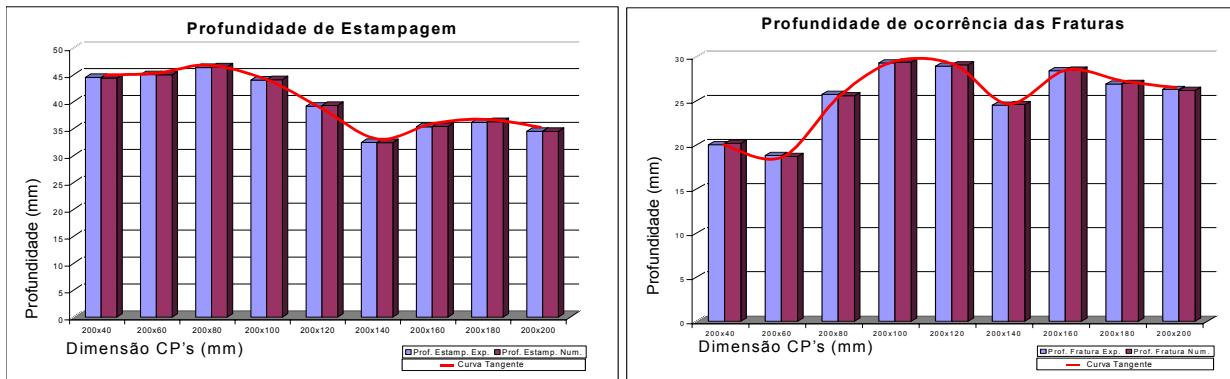


Figura (7) – (LE) profundidade de estampagem e (LD) profundidade de ocorrência de fratura.

Na Figura (7), no lado esquerdo (LE), nota-se, além da semelhança das profundidades obtidas nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas, um perfil de profundidades que é semelhante ao perfil de uma CLC, identificado na figura como *curva tangente* às magnitudes de profundidade. Porém no lado direito (LD) é mostrada apenas a semelhança das profundidades de ocorrência das fraturas obtidas nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas.

De um modo geral, as figuras acima mostraram semelhanças entre modelos numéricos com os experimentais, conforme critério adotado. Portanto, foram validados todos os modelos. Então tomando-se as faixas de valores de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  obtidas nos modelos numéricos, adotou-se como critério de segurança, optar pelos valores de módulos menores para ambos  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , evitando-se, deste modo, superdimensionar a CLC. Com base nestes valores de dados de  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  é mostrado, a seguir, a Fig.(8) que mostra a CLC gerada a partir dos dados obtidos pela análise numérica e comparando as CLC's, a numérica e a experimental. Ao lado os dados com as deformações logarítmicas para geração da CLC numérica.

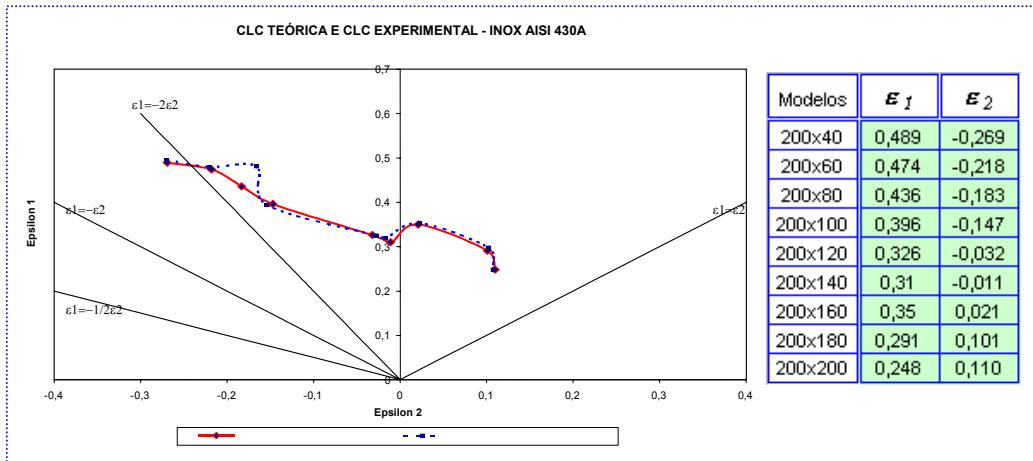


Figura (8) – CLC teórica do AISI 430A obtida pela simulação numérica do ensaio Nakazima e comparação das CLC's, a numérica e a experimental.

Com base na figura anterior notou-se que a CLC numérica obtida reproduziu de forma bem semelhante a CLC obtida experimentalmente, caracterizando-se, desta forma, que o modelo numérico foi bem discretizado. E a Tab. (6), a seguir, mostra uma análise comparativa de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ .

Tabela (6) – Análise comparativa das deformações verdadeiras dos modelos numéricos e experimentais.

Análise comparativa dos valores de $\epsilon_1$									
Modelos	200x40	200x60	200x80	200x100	200x120	200x140	200x160	200x180	200x200
experimental	0,495	0,480	0,481	0,394	0,325	0,319	0,353	0,298	0,247
numérico	0,489	0,474	0,436	0,396	0,326	0,310	0,350	0,291	0,248
Diferença (%)	1,30%	1,16%	10,32%	0,54%	0,35%	2,90%	0,79%	2,36%	0,22%
Análise comparativa dos valores de $\epsilon_2$									
Modelos	200x40	200x60	200x80	200x100	200x120	200x140	200x160	200x180	200x200
experimental	-0,271	-0,221	-0,166	-0,154	-0,028	-0,017	0,022	0,102	0,107
numérico	-0,269	-0,218	-0,183	-0,147	-0,032	-0,011	0,021	0,101	0,110
Diferença (%)	0,56%	1,24%	9,29%	4,73%	13,37%	54,55%	6,79%	0,94%	2,29%

#### 4. Conclusões

Conforme se pode verificar no gráfico da CLC, este aço é mais recomendado para o embutimento, lado esquerdo, onde predominam forças trativas e compressivas. O lado direito do gráfico mostra a magnitude e capacidade de estiramento do material, onde predominam forças trativas, indicando que este material tem seu limite máximo de estiramento praticamente na mesma ordem de grandeza do seu limite mínimo de embutimento. Percebe-se também que a curva Real (azul pontilhada) revela uma certa discrepância que pode estar associada a um defeito no material ou um tipo de escorregamento durante o processo, porém ela foi corrigida, adicionando uma linha de tendência polinomial (vermelha).

Do ponto de vista funcional, a análise da CLC numérica é a mesma realizada para a CLC experimental. Ela não apresentou nenhum ponto de discrepância como aconteceu na experimental, porém na modelagem numérica o material foi considerado como possuindo características *isotrópicas* ao invés de anisotrópicas com intuito de simplificar a modelagem, portanto é necessário também considerar este ponto. O perfil gráfico das profundidades de estampagem tem um perfil muito semelhante ao perfil da CLC, e merece ser melhor investigado quando utilizado punção hemisférica. Os erros comparativos encontrados são relativamente baixos e os resultados numéricos reproduziram bem os resultados experimentais. Porém, não se pode afirmar a exatidão de ambos, mas pode-se afirmar que foi alcançado o objetivo previsto de ser possível reproduzir numericamente o ensaio experimental realizado. Portanto, a metodologia proposta neste trabalho

pode ser bem aplicada na indústria de estamparia podendo resultar em grande economia nas fases de processo, de projeto e de construção de ferramentais.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Acesita pela colaboração prestada, à PUC-MG e à Fapemig.

## 6. REFERÊNCIAS

- Kobayashi, S. et al.. “Metal Forming and The Finite-Element Method”, 1 ed., New York, Oxford University Press, 1989.
- Lubliner, J. “Plasticity Theory”, California, Macmillan Publishing Company, 1990.
- Malvern, L.E. “Introduction to the Mechanics of a Continuous medium”, 1 ed. Michigan, Prentice-Hall, Inc, 1969.
- Bathe, K. 1996. “Finite element procedures”, 1 ed., New jersey, Prentice-Hall, inc.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

**Todos os direitos reservados aos autores.**

# EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE AISI 430 FERRITICS STAINLESS STEEL AND NUMERICAL SIMULATION OF NAKAZIMA ASSAY

**Herbert Amarildo dos Santos, M.Sc.**

PUC-MG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Campus Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brazil – CEP.: 30535-610      E-mail: [herbertsh@hotmail.com](mailto:herbertsh@hotmail.com)

**Clovis Sperb de Barcellos, PhD.**

PUC-MG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Campus Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brazil – CEP.: 30535-610      E-mail: [clovis@pucminas.br](mailto:clovis@pucminas.br)

**Jánes Landre Júnior, D.Sc.**

PUC-MG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Campus Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brazil – CEP.: 30535-610      E-mail: [janes@pucminas.br](mailto:janes@pucminas.br)

**Abstract.** The Forming Limit Curves are widely used tools in the studies of the formability of steel and great aid in the inquiries and improvements of the processes of stamping through the analysis of the deformations of metallic parts. They are linked to the influence of the mechanical properties as well as of the physical properties of the materials. Small variations in one of these properties can cause a significant change of the FLC. Then, for each variation it becomes necessary to reevaluate the shape of the FLC. In this work it is analyzed the variations for the ferritic stainless steel formability, of series 4, more specifically the 430. The Nakazima Experimental method was adapted and a numerical FLC was obtained by using the finite elements procedures to simulate the Nakazima assay. Presently the code PATRAN-MARC was used. The results gotten through the analyses of the tensions and deformations in the theoretical models shown them very satisfactory in the comparison with the experimental models indicating that the numerical simulations of the theoretical models had reproduced very well the assays carried through for the experimental models and therefore could be gotten a theoretical CLC and another experimental with very similar behaviors.

**Keywords.** Forming Limit Curves (FLC), forming process and stamping, finite elements procedures.