

COMPORTAMENTO DE RESULTADOS NA VARIAÇÃO DE ESPESSURA ENTRE ENSAIO E SIMULAÇÃO DO LATÃO 70/30 LAMINADO A FRIO NO MODO NAKAZIMA EM MÁQUINA DE ENSAIOS DE FITAS E CHAPAS¹

André Ferrus Filho²
Fábio Rubio²
Nilson Yukihiro Tamashiro²
Rubens Wolney Dechechĩ²
Antenor Ferreira Filho³
Valdir Costa⁴

Resumo

Estudou-se as diferenças de comportamento para a variação de espessura entre o ensaio, simulação e teoria pelo método Nakazima de fitas com 0,25 mm de espessura do latão 70/30 ou UNS C26000, liga composta de 70%Cu-30%Zn, muito aplicada em estampagem de cartuchos e que requer grande estampabilidade. No ensaio Nakazima as variações ou deformações planares e de espessura foram realizadas por um punção semi-esférico e os resultados destas deformações foram obtidos por medição direta da malha de deformação com auxílio de software e imagens e a espessura com o auxílio do dispositivo de medição. Os parâmetros aplicados no caso real e características mecânicas serviram para alimentar tanto o banco de dados do software como os modelos teóricos. Os modelos virtuais dos corpos de prova Nakazima foram submetidos a condições semelhantes das aplicadas no ensaio físico. O comportamento dos corpos de prova real e virtual bem como, sua variação de espessura apresentou grande proximidade de resultados. As espessuras e as regiões de escoamento ficaram em posições muito próximas apesar do fator atrito não ter sido isolado. A simulação apresentou resultados próximos aos reais e representa em muito as condições reais.

Palavras chave: Nakazima; Afinamento de parede; Curva limite de conformação; AutoForm; Latão cartucho Máquina de ensaio Erichsen.

BEHAVIOR COMPARATIVE STUDY BETWEEN RESULTS OBTAINED TEST AND SIMULATION OF THE 70-30 BRASS COLD ROLLING IN THE NAKAZIMA MODE OF THE SHEET AND STRIP METAL TEST MACHINE

Abstract

In this article we studied the differences in behavior for the variation in thickness between the simulation and test based theory method Nakazima of tape with 0.25 mm thickness brass 70/30 or UNS C26000, alloy composed of 70% Cu-30% Zn, much applied in printing cartridges and requires great formability. In the trial Nakazima variations or deformations of planar and thickness were performed by a semi-spherical punch and the results of these strains were obtained by direct measurement of mesh deformation with the aid of software and images and thickness with the aid of the measuring device. The parameters applied in the real case and mechanical characteristics served to enter data in both the database software as the theoretical models. The virtual models of the specimens Nakazima were subjected to similar conditions applied in the physical testing. The behavior of the specimens real and virtual as well as its thickness variation showed close proximity of results. The thickness and drain regions were in locations very close despite the friction factor was not isolated. The simulation showed results similar to those in very real and represents the actual conditions.

Key words: Nakazima; Forming limit curve; AutoForm; Cartridge brass; Erichsen test machine.

¹ Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Tecnologia Mecânica, Especialista, Professor da Área de Tecnologia em Mecatrônica e Alimentos da Faculdade de Tecnologia Termomecânica, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

³ Membro da ABM; Doutor em metalurgia, Diretor Industrial, BrasmetalWaelzholz, Diadema, SP, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Especialista, Professor da Área de Tecnologia em Mecatrônica e Alimentos da Faculdade de Tecnologia Termomecânica, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As atividades industriais modernas aplicam diversos materiais metálicos e principalmente os não ferrosos. No passado a falta de conhecimento sobre as propriedades dos materiais e a influência da composição química levava as empresas a ajustar os parâmetros de processo com base no comportamento do material durante o processo, como resultado os processos e produtos não permaneciam estáveis por muito tempo, ou seja, não havia garantias de que a qualidade do produto final fosse a mesma em todo o lote. Com o processo sem garantias de repetibilidade e qualidade devido à falta de dados mais refinados, o volume de produtos que não atendiam as especificações técnicas era elevado e assim resultando no aumento dos custos operacionais e finais e na confiança do produto perante o usuário.

Para aplicação nos diversos modos de processos de produção os parâmetros metalúrgicos do material se fazem necessários. Por meio de ensaios diversificados os dados podem ser levantados e aplicados de forma conjugada ou isolada na busca do melhor desempenho, tanto do material em processo quanto do processo produtivo. Os resultados dos ensaios são de grande auxílio na orientação durante a elaboração de novas ligas (composição) para aplicação específica ou buscando um melhor desempenho na aplicação final do produto.

A atividade industrial moderna se vale de recursos computacionais avançados para a simulação do comportamento e desempenho do material em processos e na aplicação final do produto. A simulação é realizada com auxílio de softwares específicos que reproduzem o processo e suas particularidades. A fidelidade dos dados de características mecânicas do material e do processo para alimentar o banco de dados destes programas é de extrema importância, pois interfere diretamente nos resultados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material escolhido para este trabalho foi o latão 70/30 ou UNS C26000 no modo de ensaio a frio. O latão 70/30 é composto de uma liga de cobre, zinco, chumbo e ferro conforme especificado na Tabela 1. O material foi obtido da Termomecanica São Paulo S/A, já cortado de modo apropriado formando uma família de 7 corpos de prova com larguras específicas e espessura de 0,25 mm para o ensaio Nakazima, estes foram extraídos de uma bobina normal de processo. Após a formatação receberam gravação de uma malha de deformação com círculos de diâmetro 2,5 mm por método eletro químico.

O equipamento para desenvolver as deformações e coleta de dados foi a máquina Erichsen (Modelo 142-20).

Tabela 1– Composição Química básica do latão 70/30 conforme catalogo TM⁽¹⁾

Composição Química	
Cobre	68,5 – 71,5 %
Chumbo	0,070 % máximo
Ferro	0,050 % máximo
Zinco	Restante

2.2 Métodos

A determinação do ensaio a ser realizado e sua simulação foi baseada nos equipamentos e softwares disponíveis nos laboratórios da Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT) dentro do Centro Educacional da Fundação Salvador Arena.

O ensaio aplicado foi o Nakazima desenvolvido na máquina Erichsen (Modelo 142-20) conforme Figura 1, enquanto que o software usado para simulação foi o AutoForm® da AutoForm Engineering GmbH, que foi desenvolvido para trabalhos de conformação mecânica de chapas e muito aplicado em indústrias do mundo todo. Os corpos de prova, ferramental e parâmetros aplicados para o ensaio real foram reproduzidos para o ambiente virtual do software com a finalidade de garantir a proximidade dos resultados.



Figura 1. Equipamento Erichsen do laboratório da FTT.

O ensaio Nakazima baseia-se na utilização de um punção semi-esférico que provoca uma deformação em corpos de prova com faixas de largura diferentes, mas proporcionais. Nos corpos de prova são gravadas malhas de deformação por toda a área do corpo, que são compostas por um reticulado de figuras geométricas com dimensões conhecidas e iguais, sendo o mais comum formado por círculos. A deformação do corpo de prova deve seguir até que ocorra o escoamento ou fratura em uma dada região. A carga de final (estricção) do corpo de prova, a velocidade da deformação, a carga do prensa chapas e as rugosidades deste sistema são parâmetros importantes no ensaio, visto que estes fatores podem alterar o momento e a posição da fratura.

Após a estrição são lidas as deformações das figuras geométricas (círculos) em duas direções principais e perpendiculares entre si, sendo uma longitudinal e outra transversal por toda uma linha, que parte do topo até o pé do corpo de prova. Estas dimensões representam a máxima e mínima deformação sendo denominadas como (ϵ_1, ϵ_2) , que são dados importantes para elaboração da Curva Limite de Conformação (CLC) do material.

A Curva Limite de Conformação ou CLC é um sistema gráfico que nos permite verificar os limites de deformação do material. Esta é composta de dois eixos que representam as deformações, sendo o eixo horizontal o que representa as menores deformações (ϵ_2) e o vertical as maiores deformações (ϵ_1). Os dados de estampabilidade do material, ou seja, os valores máximos das deformações possíveis no material sem prejuízo são fornecidos pela interpretação da curva característica gerada pelo ensaio em cada material. Os dados para a plotagem da curva são obtidos pela medição das deformações e posterior cálculo com estes resultados.

Quando do surgimento de uma fratura dúctil o ensaio demonstra as deformações limites, segundo Moreira et al.⁽²⁾ analisando assim a distribuição de deformações obtida nas proximidades da zona fraturada. As malhas de círculos impressas na superfície das chapas ensaiadas servem como fonte de medidas das deformações. Hecker⁽³⁾ propõe uma metodologia que define as deformações limites como valores limites entre as deformações principais das elipses que apresentam uma estricção, uma fratura e de elipses em zonas adjacentes isentas da estricção ou da fratura. Segundo Srour⁽⁴⁾ após a escolha de uma elipse adequada para medição das deformações, tem-se no diâmetro maior da elipse a maior deformação principal convencional, e no menor diâmetro a menor deformação principal convencional.

As deformações convencionais e as verdadeiras são calculadas através das seguintes fórmulas:⁽⁵⁾

- maior deformação:

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

- verdadeira
$$\epsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad (2)$$

- menor deformação:

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

- verdadeira
$$\epsilon_2 = \ln(1 + e_2) \quad (4)$$

onde: - D_0 é o diâmetro inicial do círculo.
 - D_1 é o diâmetro maior final da elipse.
 - D_2 é o diâmetro menor final da elipse.

Para se medir os diâmetros e calcular as deformações, são utilizados vários métodos. Para fazer o cálculo correto da deformação utiliza-se medir o comprimento final de cada borda da elipse, entre a fratura e a ponta da curva. O cálculo é feito com relação ao diâmetro inicial através das equações (5), (6) e (7), onde D_{1F} e D_{2F} são os comprimentos entre a fratura e as pontas da elipse na direção de maior deformação:

- deformação de um lado da elipse:
$$e_{1F} = \frac{D_{1F} - D_0}{D_0} \quad (5)$$

- deformação do segundo lado da elipse:
$$e_{2F} = \frac{D_{2F} - D_0}{D_0} \quad (6)$$

- deformação do diâmetro maior da elipse é:

$$e_1 = e_{1F} + e_{2F} + 1 = \frac{D_{1F} - D_0}{D_0} + \frac{D_{2F} - D_0}{D_0} + \frac{D_0}{D_0} = \frac{D_{1F} + D_{2F} - D_0}{D_0} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (7)$$

Keeler⁽⁶⁾ realizou estudos de caso para os quais foram realizados cálculos envolvendo a constância de volume do material deformado, tanto para as deformações de engenharia (convencionais) quanto para as deformações verdadeiras da chapa estampada, como mostram as equações (8) e (9):

$$(e_1 + 1) * (e_2 + 1) * (e_3 + 1) = 1 \quad (8)$$

$$(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) = 0 \quad (9)$$

Onde: e_3 é a deformação convencional no sentido da espessura da chapa, ou seja, representa o afinamento do material, enquanto que ϵ_3 representa a deformação verdadeira no sentido da espessura do material.

2.2.1 Ensaio Nakazima

Os corpos de prova (Figura 2) tiveram suas dimensões de largura determinada para o método Nakazima e foram extraídos de uma bobina de linha, e em seguida os comprimentos das tiras foram ajustados de modo ideal, ou seja, maior que diâmetro de 120 mm, pois a matriz de corte da máquina já ajusta o diâmetro do corpo de prova.

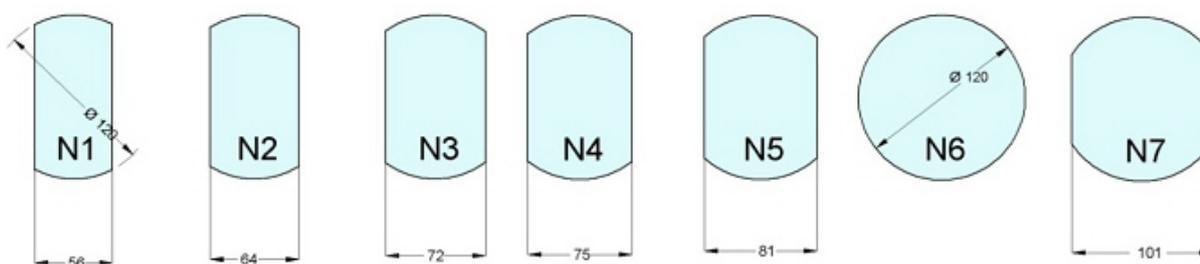


Figura 2. Representação dos corpos de prova para o ensaio Nakazima.⁽⁷⁾

O sistema de gravação aplicado foi o eletroquímico como pode ser visto na Figura 3.

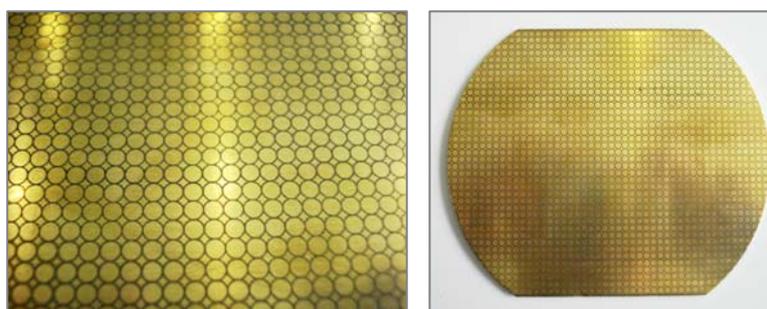


Figura 3. Resultado das gravações dos círculos no corpo de prova.

A montagem do ferramental para o ensaio Nakazima é composta por um conjunto de placas e punção, onde sua escolha leva em conta a espessura da chapa e o tipo de ensaio a ser realizado, são montados no porta ferramentas e o sistema é fechado para a liberação do ensaio, conforme Figura 4.



Figura 4. Detalhe do conjunto ferramental e do porta ferramenta.

A medição dos corpos de prova estampados e a coletas de dados (dimensões) foram feitas após os corpos de prova sofrerem as deformações do processo (Figura 5). Em uma primeira etapa foi levantada a variação de espessura do corpo de prova ao longo de uma determinada linha do topo até o pé. No segundo momento imagens capturadas da superfície da amostra foram processadas no software AutoCAD® para melhor visualização das deformações ocorridas na malha gravada e assim possibilitar as medições destas deformações com maior precisão.

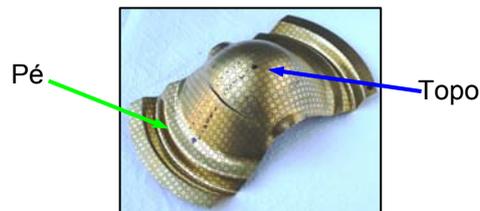


Figura 5. Posição das medições.

Os cálculos das deformações foram feitos partindo dos valores do eixo menor e maior de cada elipse medida, de acordo com as fórmulas já apresentadas anteriormente. Com os valores das deformações de engenharia, calculamos os valores das deformações verdadeiras ϵ_1 e ϵ_2 e com estes determinamos ϵ_3 e a variação de espessura teórica, assim comparamos com os resultados reais com os da simulação.

Medição da variação da espessura diretamente com relógio comparador (Figura 6), posicionando a ponta apalpadora no centro de cada círculo deformado. A escala do apalpador foi ajustada sobre a esfera, de modo que a leitura fosse a espessura direta e a forma de contato por meio de esferas gera um ponto de contato, eliminando qualquer fonte de erro proveniente da forma do contato. As fontes de erro provenientes de outros modos foram minimizadas pelo dispositivo.

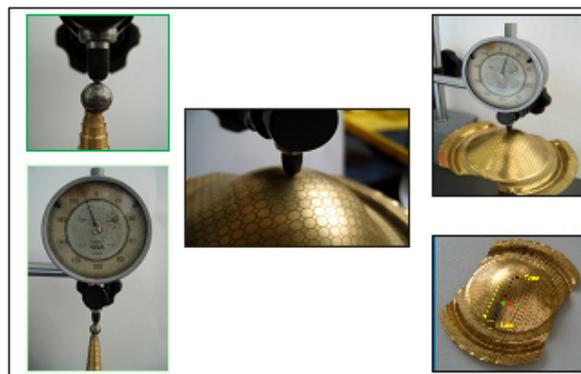


Figura 6. Dispositivo para medição de espessura.

Para a medição da deformação da malha gravada nos corpos de prova sem a perda de referência e escala foi realizada a captura da imagem com um dispositivo, composto por uma câmera fotográfica digital, haste magnética, desempenho em aço e escala de medição, conforme pode ser visto na Figura 7.

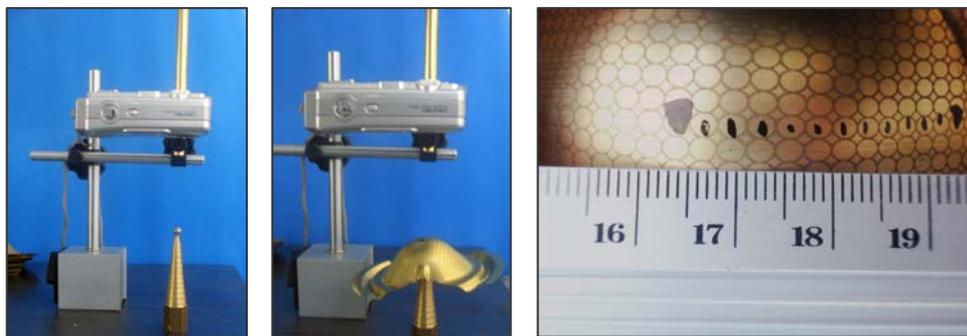


Figura 7. Dispositivo para medição e detalhe da imagem capturada.

O tratamento dos dados com software AutoCad (Figura 8) demandou trabalho e muita concentração para não resultar em erros de valores e medidas.

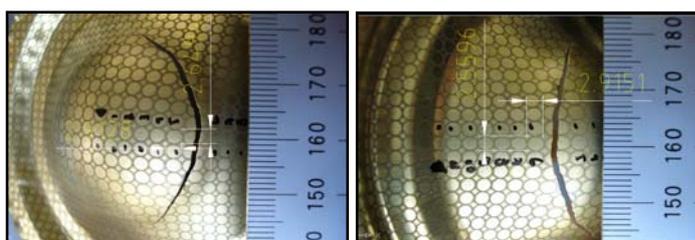


Figura 8. Medição do corpo de prova LF1N6 em software.

2.2.2 Simulação AutoForm®

Para a simulação, cada corpo de prova teve seu desenho do blank e entrada de informações sobre as características do material coletados dos ensaios. A figura 9 apresenta o ferramental virtual construído.

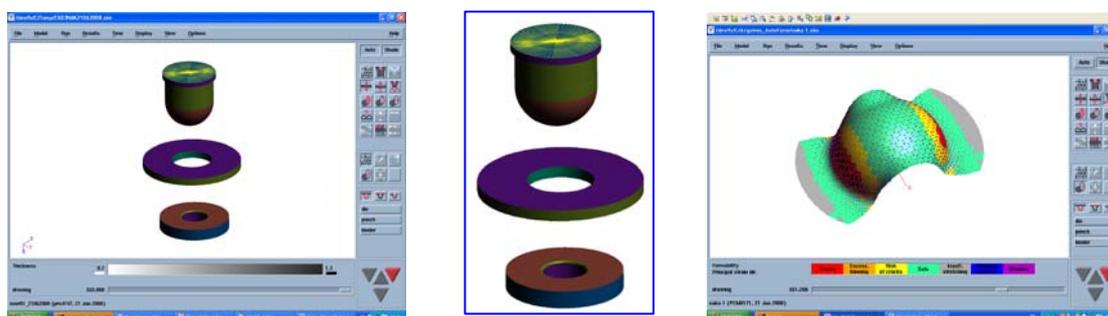


Figura 9. Ferramental virtual e detalhe.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para a variação de espessura apresentaram grande proximidade nos casos entre o real e o simulado, já entre a medição e os cálculos experimentais derivados das deformações planares os resultados foram excelentes.

O resultado verificado mostrou o afinamento da chapa mais acentuado nas proximidades da estrição e a deformação das elipses apresentaram comportamentos diferentes para a faixa abaixo e acima da fratura. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre os resultados de espessura nos modos real, teórico e simulado.

Tabela 2. Variações de espessura nos modos real, teórico e simulado

posição	corpo de prova																					
	N1			N2			N3			N4			N5			N6			N7			
	teórico	real	simulado	teórico	real	simulado	teórico	real	simulado	teórico	real	simulado	teórico	real	simulado	teórico	real	simulado	teórico	real	simulado	
Topo	1	0,209	0,216	0,218	0,209	0,217	0,218	0,222	0,220	0,209	0,219	0,213	0,209	0,234	0,218	0,208	0,210	0,204	0,131	0,207	0,209	0,131
	2	0,207	0,211	0,215	0,207	0,213	0,211	0,215	0,217	0,202	0,231	0,210	0,202	0,234	0,212	0,196	0,197	0,202	0,118	0,210	0,206	0,122
	3	0,209	0,208	0,192	0,204	0,208	0,192	0,208	0,213	0,194	0,224	0,208	0,194	0,231	0,208	0,187	0,209	0,197	0,105	0,209	0,203	0,105
	4	0,214	0,205	0,173	0,203	0,205	0,181	0,205	0,209	0,183	0,219	0,203	0,176	0,236	0,202	0,174	0,205	0,193	0,097	0,203	0,199	0,096
	5	0,189	0,202		0,198	0,202	0,173	0,202	0,204	0,176	0,217	0,198	0,169	0,227	0,199		0,201	0,187		0,194	0,194	0,084
	6	0,191	0,201	0,152	0,201	0,197	0,139	0,205	0,205	0,164	0,212	0,196	0,150	0,222	0,193	0,157	0,194	0,000	0,095	0,200	0,188	0,000
	7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,184	0,000	0,000	0,000	
Fratura	8	0,193	0,204	0,124	0,210	0,211	0,119	0,211	0,209	0,146	0,206	0,195	0,129	0,236	0,199	0,135	0,201	0,187	0,138	0,206	0,193	0,099
	9	0,203	0,211		0,212	0,218		0,216	0,215	0,135	0,219	0,203	0,122	0,252	0,211	0,129	0,220	0,205		0,217	0,208	
	10	0,213	0,215	0,127	0,215	0,220	0,199	0,243	0,221	0,131	0,232	0,211	0,137	0,242	0,218	0,164	0,212	0,215	0,199	0,220	0,213	0,145
	11	0,212	0,218		0,229	0,223		0,242	0,227	0,140	0,246	0,218	0,175	0,256	0,225	0,194	0,233	0,213		0,229	0,222	
Pé	12	0,209	0,223	0,205	0,242	0,225	0,219	0,229	0,234	0,180	0,245	0,225	0,200	0,264	0,231	0,227	0,233	0,226	0,225	0,230	0,229	0,193
	13																					

A apresentação em modo gráfico (Figuras 10 a 16) demonstra claramente o perfil de comportamento da variação de espessura entre os métodos aplicados, estes foram gerados partindo-se dos valores da Tabela 2.



Figura 10. Modo gráfico CP-N1.

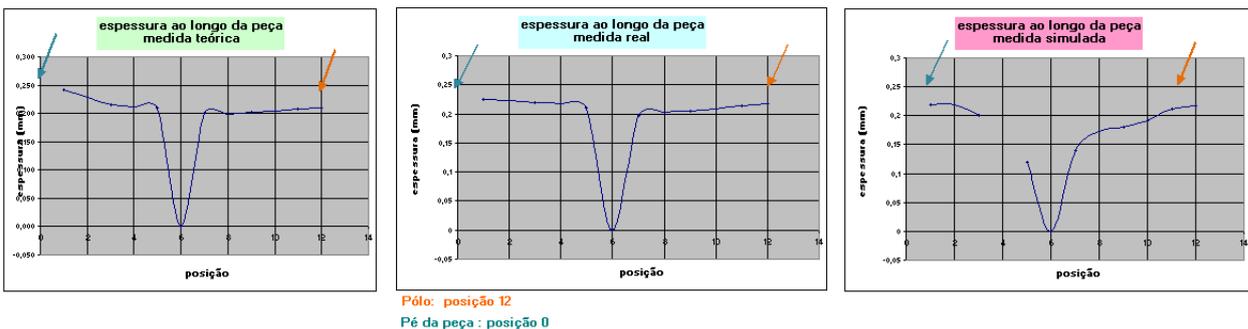
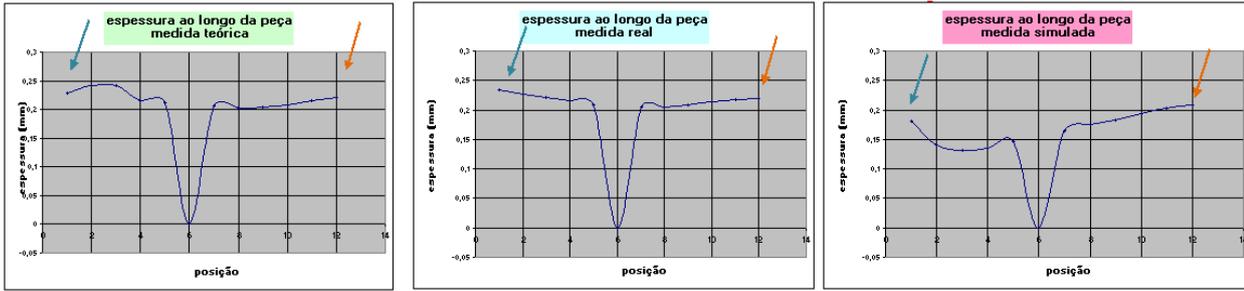
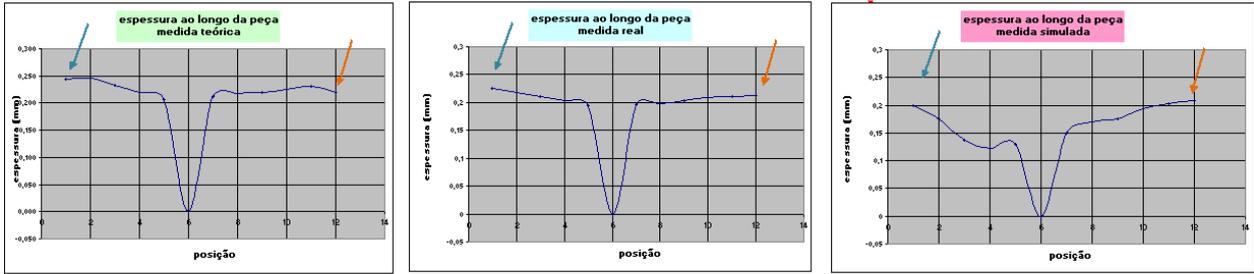


Figura 11. Modo gráfico CP-N2



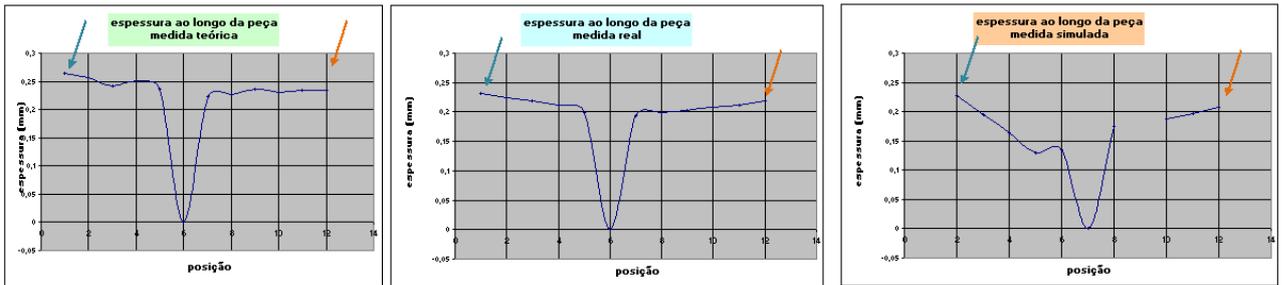
Pólo: posição 12
 Pé da peça : posição 0

Figura 12. Modo gráfico CP-N3.



Pólo: posição 12
 Pé da peça : posição 0

Figura 13. Modo gráfico CP-N4.



Pólo: posição 12
 Pé da peça : posição 0

Figura 14. Modo gráfico CP-N5.



CP-N7

Pólo: posição 12
 Pé da peça : posição 0

Figura 15. Modo gráfico CP-N6.

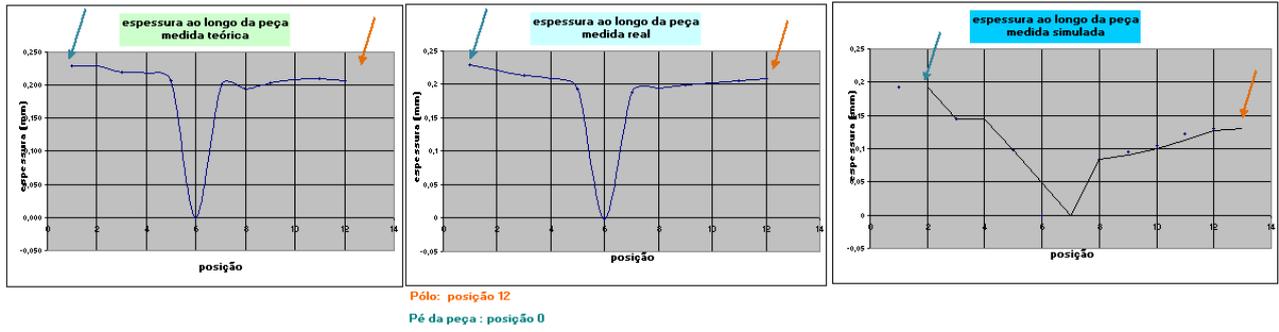


Figura 16. Modo gráfico CP-N7

As Figuras 17 a 23 apresentam os sete corpos de prova ensaiados fisicamente e os virtuais com suas respectivas deformações planares.

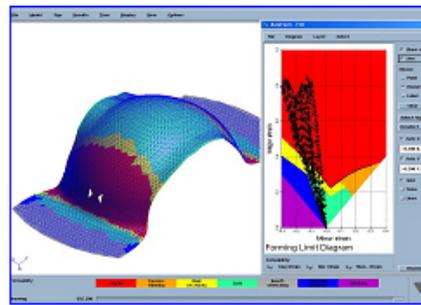
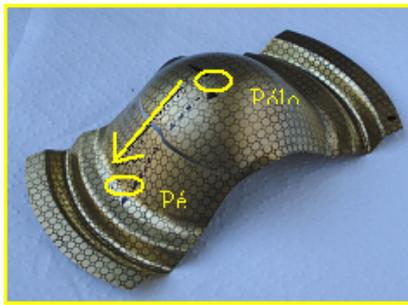


Figura 17. Imagem do corpo de prova N1, real e simulado.

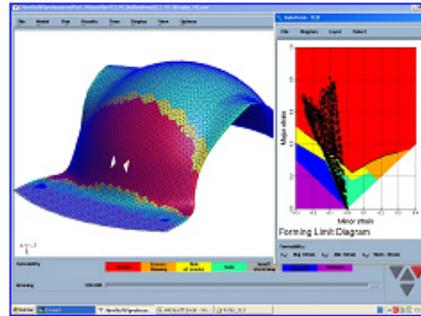
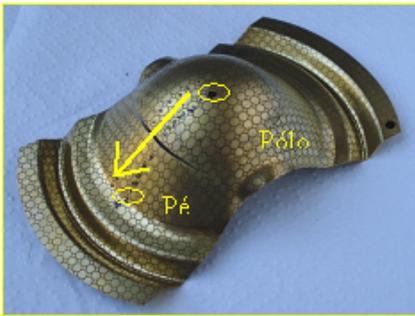


Figura 18. Imagem do corpo de prova N2, real e simulado.

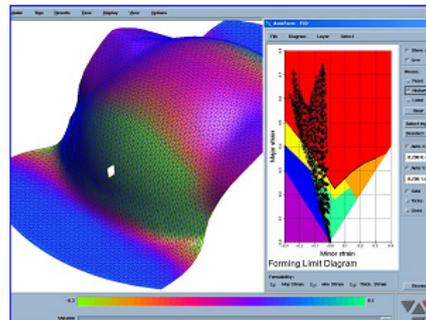
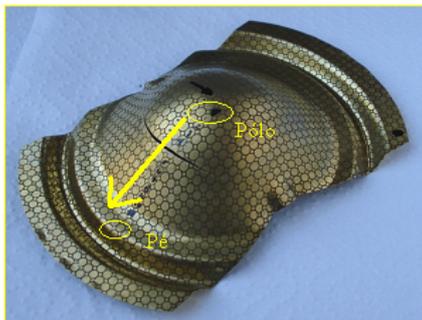


Figura 19. Imagem do corpo de prova N3, real e simulado.

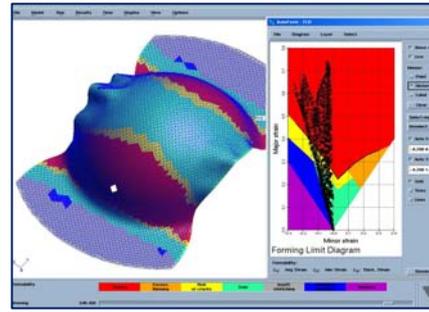
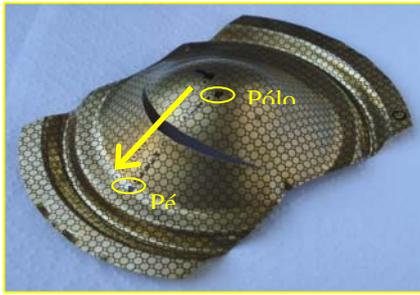


Figura 20. Imagem do corpo de prova N4, real e simulado.

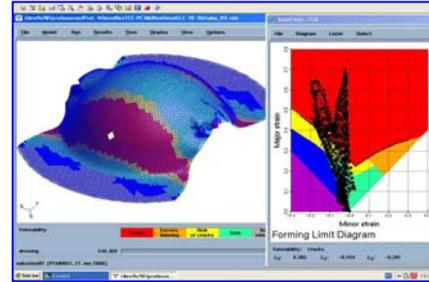
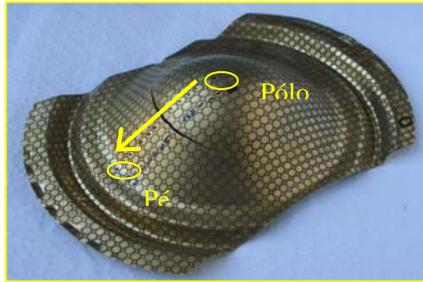


Figura 21. Imagem do corpo de prova N5, real e simulado.

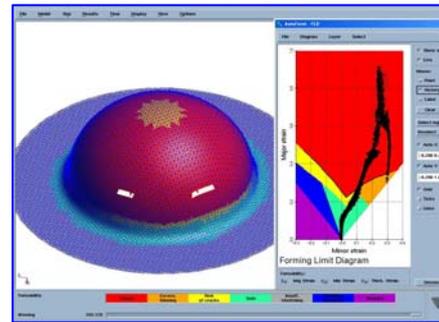
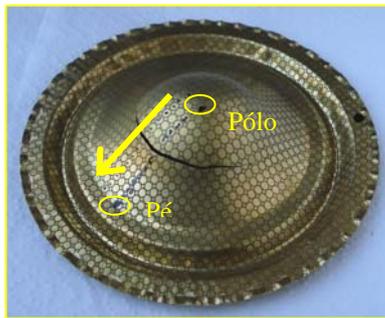


Figura 22. Imagem do corpo de prova N6, real e simulado.

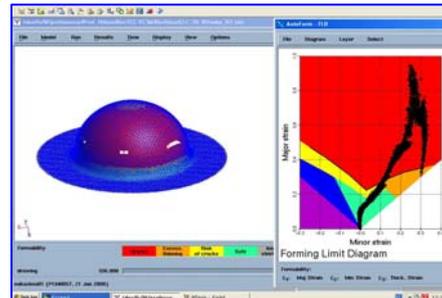
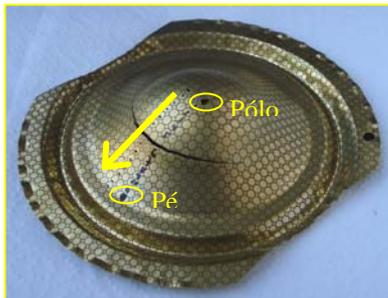


Figura 23. Imagem do corpo de prova N7, real e simulado.

4 CONCLUSÕES

- Os resultados para variação de espessura da tira entre o ensaio real e simulação ficaram muito próximos, demonstrando uma assinatura de processo, isto é, confirmam que a dinâmica vetorial do software se aproxima em muito da realidade. As medições de outras grandezas dos corpos de prova como, por exemplo, sua deformação planar apresenta mesmo comportamento entre os resultados teóricos, reais e simulados.

- A simulação auxilia muito no desenvolvimento de novos produtos e processos sem a necessidade de gerar ferramental e todo o aparato para elaboração prática. Os valores dos parâmetros de comportamento do material que possibilitam o software analisar e simular o comportamento do material sob a forma de um produto em processo necessita de resultados com alto grau de confiabilidade. A reprodução no perfil de assinatura do comportamento nas curvas de variação de espessura nos leva a um alto grau de acerto da simulação, deste modo qualquer que seja o produto que estejamos simulando seu processo, as chances de acerto nos resultados margeia um percentual elevado de aproximação com a realidade. Assim isto permite que qualquer aplicação em deformação com este material possa ser simulada com bom êxito.
- A deformação ocorreu corretamente, porém o lado de tensões biaxiais do corpo de prova, que se situa acima da região fraturada sofreu interferência do atrito entre o CP e o punção de estiramento. Na simulação foi inserido um valor para o atrito que provocasse a mesma situação e que nos parece foi um bom valor já que as estricções ocorreram em regiões muito similares entre o real e o virtual.
- O sucesso da simulação depende da precisão do *banco de dados* sobre as características do material do produto, do ferramental, da máquina de processo e do lubrificante que altera a condição do atrito, além da geração do modelo do ferramental em 2D e 3D.
- A simulação economiza recursos materiais e tempo, podendo seus resultados, serem aplicados sobre uma simulação de peças (conformação). Os ensaios geram resultados em geral numéricos para aplicação na construção de diagramas e gráficos de comportamento dos materiais, estes dados são aplicados em estudos posteriores ou geram banco de dados para simuladores.
- A simulação demonstrou que com os dados aplicados e gerados corretamente não seria necessário testar a aplicação e um ambiente real. Esta possibilidade permite elaborar novos produtos e testar suas condições em ambiente virtual.

Agradecimentos

A Fundação Salvador Arena mantenedora do Centro Educacional da Fundação Salvador Arena por proporcionar acesso a equipamentos e softwares de ponta;
A Termomecânica São Paulo S/A que faz parte da Fundação Salvador Arena por disponibilizar os materiais empregados nos ensaios;
A todos os colaboradores do Centro Educacional da Fundação Salvador Arena que tornaram os trabalhos possíveis de serem realizados;
Aos colegas que trabalharam na geração dos dados e simulações.

REFERÊNCIAS

- 1 Termomecânica São Paulo S/A, Catálogo de produtos, disponível em: <http://www.termomecânica.com.br/website/files/materiais>
- 2 MOREIRA, L. P.; SAMPAIO, A. P.; FERRON, G.; LACERDA, A. C. *Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial nas deformações limites em chapas*. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 39-49, 2003.

- 3 ASM handbook. Volume 10: Materials Characterization, ASM INTERNATIONAL, 9a ed., 1988.
- 4 ASM handbook. Volume 14b: Metalworking: Sheet Forming, ASM INTERNATIONAL, 2006.
- 5 DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2.ed., 1981.
- 6 KEELER, S. P. Properties related to forming. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v.74, n. 8, p. 94-103, apr. 1968.
- 7 R.L.PLAUT. Notas de aula - *in* Pós graduação em Processos de Conformação Mecânica de Materiais Metálicos, PECE-USP-FTT, São Bernardo do Campo, 2009.