

ANÁLISE EXPERIMENTAL, NUMÉRICA E ANALÍTICA DA EVOLUÇÃO DA FORÇA E ESPESSURA DE UM COPO DE AÇO LI NO PROCESSAMENTO POR *IRONING*¹

Frederico de Castro Magalhães²

Renato Otto Diniz³

Paulo Roberto Cetlin⁴

Haroldo Béria Campos⁵

Resumo

Foi construída uma ferramenta para realizar o embutimento e três passes de *ironing* de um copo em aço LI, com prensa-chapa fixo e para avaliar as forças e as espessuras nos passes de *ironing* durante o deslocamento do punção. O estudo foi realizado experimentalmente através do ferramental construído e teoricamente, através de modelagem e simulação numérico-computacional, utilizando o aplicativo computacional DEFORM 2D. Além disso, é avaliada a força máxima nos passes de *ironing* através de métodos analíticos propostos na literatura. Os resultados numérico-computacionais são comparados com os experimentais e com aqueles obtidos através de métodos analíticos.

Palavras-chave: *Ironing*, Método de elementos finitos; Aço LI; Força máxima no processo de *ironing*.

EXPERIMENTAL, NUMERICAL AND ANALYTICAL EVALUATION OF THE FORCE AND WALL THICKNESS EVOLUTIONS IN THE IRONING OF AN IF STEEL CUP

Abstract

A set of tools was prepared in order to perform the experimental deep drawing of an IF steel sheet, which was followed by three successive wall ironing passes. The applied forces and the wall thickness variation during ironing were evaluated. A theoretical approach to the question was also developed, utilizing the modeling and simulation of the process through a Finite Element Analysis (FEA) with the DEFORM-2D software. In addition, the maximum predicted loads in the ironing passes were calculated through various analytical methods proposed in the literature. The numerical results were compared with the experimental and analytical ones.

Key words: Ironing; Finite element methods; IF Steel; Wall thickness.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² M.Sc.Engenheiro Mecânico, Aluno de Doutorado do Curso de Pós Graduação em Eng. Mecânica da EEUFMG.

³ M.Sc.Engenheiro Mecânico, Embraer.

⁴ Engenheiro Mecânico, Dr. Prof. Titular do Depto. De Eng. Metalúrgica da EEUFMG.

⁵ Físico, Dr., Prof. Adjunto do Depto. de Eng. Mecânica da EEUFMG.

1 INTRODUÇÃO

O processo de *ironing*, apesar de ser bastante desconhecido, gera entre seus produtos, alguns com os quais convivemos bem de perto. Um exemplo típico é a latinha de cerveja. Porém, vários outros produtos podem ser obtidos por *ironing*, como é o caso do encapsulamento de projéteis bélicos, extintores de incêndio, componentes eletrônicos, etc.

Este processo foi desenvolvido há muitos anos atrás para a conformação a frio de peças tubulares com fundo fechado.⁽¹⁾ O embutimento em múltiplos estágios com recozimento intermediário foi então substituído por uma simples operação. Além disso, foram conseguidos acabamento superficial e controle dimensional excelentes.⁽¹⁾

No processo de *ironing*, um copo obtido por embutimento é forçado por um punção cilíndrico a passar através de anel cônico. Durante o processo, reduz-se a parede do copo, enquanto o seu comprimento é aumentado.⁽²⁾ Este processo é bastante similar à trefilação de tubos. Contudo, no *ironing*, o diâmetro interno da peça produzida não varia. Este processo pode ser repetido seguidas vezes até que se consiga uma parede bastante fina.

O processamento por *ironing* pode ser classificado como estágio simples ou de múltiplos estágios (Figura 1).

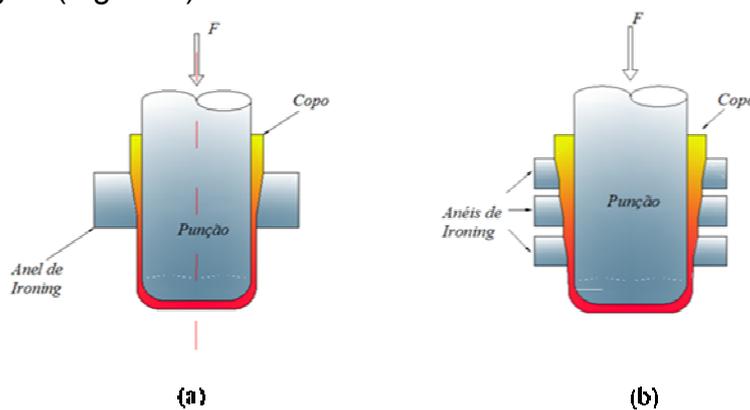


Figura 1 – Processo de *ironing* com um único estágio (a) ou com múltiplos estágios (b).

Panakin⁽³⁾ determinou, em seu trabalho, que a força do punção, ângulo do anel, atrito e a redução da espessura do copo, são os principais parâmetros que caracterizam o processo de *ironing*. A partir da interação entre estes parâmetros, ele desenvolveu regras de projeto para o processo e não predisse nenhuma vantagem considerável para o processo de *ironing* de múltiplos estágios. A contrário, pode vir ocorrer um bojamento do copo entre as matrizes.

Este trabalho visa aprimorar o processo de *ironing* e otimizá-lo para utilização na indústria de modo geral. Esta otimização e aprimoramento podem ser conseguidos através do conhecimento profundo do processo, mediante a construção de um ferramental para realizar o embutimento, com prensa-chapa fixo, e três passes de *ironing*, na forma de estágio simples, de um copo e fazendo uso da análise numérica, pelo emprego da técnica do método dos elementos finitos.

Partindo dessas considerações, este trabalho tem como objetivo estudar a conformabilidade de uma chapa de aço livre de intersticiais pelo processo de *ironing*, uma vez que, este material tem tido uma crescente demanda na indústria automobilística.

Para o estudo da conformabilidade do aço livre de intersticiais, serão avaliadas, nos três passes de *ironing*, as cargas em função do deslocamento do punção e as espessuras dos copos. Os gráficos gerados da carga em função do deslocamento do punção e da variação da espessura ao longo do copo mostram qualitativa e quantitativamente a evolução do processo de *ironing*. Estas avaliações serão realizadas experimentalmente através do ferramental construído, e teoricamente, através de modelagem e simulação numérico-computacional utilizando o aplicativo computacional DEFORM 2D. Além disso, é avaliada a força máxima nos passes de *ironing* através de métodos analíticos propostos na literatura. Os resultados numérico-computacionais são comparados com os experimentais e com aqueles obtidos através de métodos analíticos.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Construiu-se um ferramental para a execução de embutimento e *ironing* em laboratório para ser montado tanto em prensas hidráulicas quanto em máquinas universais de ensaios mecânicos. Esse ferramental pode ser visualizado no desenho esquemático da Figura 2.

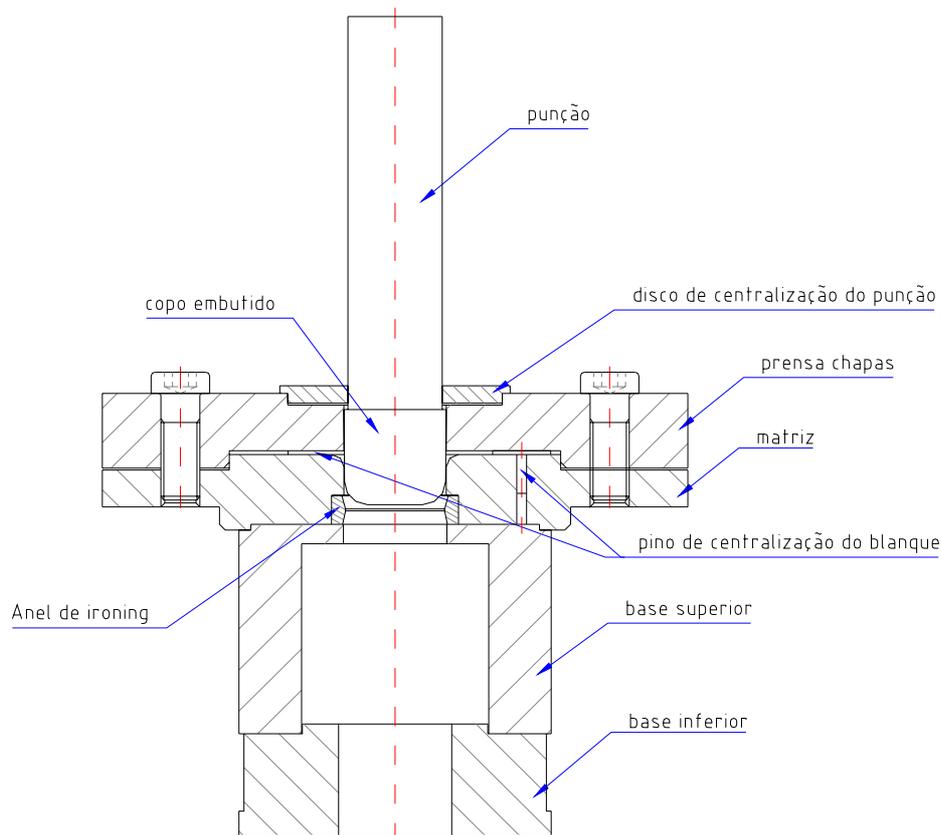


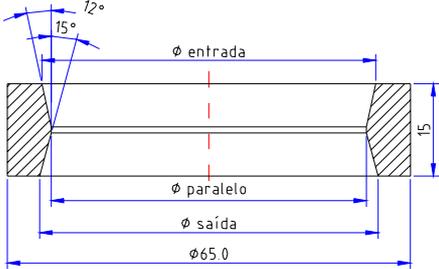
Figura 2 - Desenho da ferramenta de ensaios montada.

O ferramental é constituído de duas bases, para possibilitar a montagem em prensas com mesas furadas ou máquinas de ensaios mecânicos que, em geral, possuem mesa sem furo; uma matriz, na qual pode-se fazer o embutimento e encaixar os anéis de *ironing*; um prensa chapas preso à matriz por quatro parafusos Allen M20; três pinos de centralização do blanque, que também distanciam o prensa- chapas da matriz; discos de centralização do punção e um punção.

A matriz de embutimento possui um diâmetro interno de $52,5 \pm 0,1$ mm. O punção tem $48,29 \pm 0,01$ mm de diâmetro e 250 mm de comprimento. Uma chapa de aço IF de $1,78 \pm 0,01$ mm de espessura foi cortada em blanques de 100 mm de diâmetro para serem embutidos.

Para a realização do *ironing* foram construídos os seguintes conjuntos de anéis, como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Representação dos anéis de *ironing*

Anel de <i>ironing</i>	Conjunto/ Material	Passe	∅ Paralelo (mm)	∅ Saída(m m)	∅ Entrada (mm)
	Aço VC131 Temperado e Recoberto c/ Nitreto de Titânio	1	50,82	54,57	53,80
		2	49,81	53,56	52,79
		3	49,20	52,95	52,18

Para o processo de embutimento posicionaram-se as bases da matriz sobre a mesa da máquina de ensaios. Em seguida, colocou-se a matriz (sem anel de *ironing*) sobre a base, encaixando nela os pinos de centralização do blanque e distanciamento do prensa chapas. Posicionou-se, então o *blanque* na matriz, com a face galvanizada virada para cima (interface peça-punção). A face inferior (interface peça-matriz) fora lubrificada com graxa de bissulfeto de molibdênio. Depois de posicionado o *blanque*, colocou-se o prensa-chapas sobre a matriz que é posicionado através de pinos. Carregou-se, então, a máquina de ensaios, de forma a fazer no centro do prensa chapas uma força de 10 kN. Em seguida, apertaram-se os quatro parafusos Allen M20 e descarregou-se a máquina. Desta forma a matriz estava pronta para o ensaio. Encaixou-se em seguida o anel de centralização do punção e o punção. Isto feito, elevou-se a mesa da máquina até que a face superior do punção quase que tocasse o cabeçote superior da máquina de compressão.

Os ensaios de embutimento foram realizados montando-se a ferramenta descrita anteriormente, utilizando três pinos que forneceram uma distância entre o prensa-chapa fixo e a matriz de 2.00 mm, numa máquina universal de ensaios mecânicos marca Kratos, com capacidade de 490.5 kN, no módulo de compressão. A máquina em questão é equipada com um sistema de aquisição de dados por computador que possui como transdutores, uma célula de carga de 245.25 kN com resolução de 49.5 N e um LVDT de 500 mm com resolução de 0.1mm.

Após o embutimento, encaixou-se o primeiro anel de *ironing* (do conjunto de aço VC131 temperado) na matriz e carregou-se a máquina de forma a conseguir-se uma velocidade de deslocamento do pistão de aproximadamente 0,8 mm/s e coletaram-se os dados até que a carga torna-se nula. Descarregou-se a máquina, desmontou-se a matriz, manteve-se o copo obtido no punção e repetiu-se o procedimento descrito anteriormente, para os outros dois anéis de *ironing*

O material usado no trabalho foi o aço livre de elementos intersticiais, com uma espessura de 1.78 mm, galvanizado em uma das faces. Na chapa foram cortados 5 *blanques* de 100 mm de diâmetro para o processamento. Esses *blanques* foram embutidos com velocidade de deslocamento do punção de 0.8 mm/s, utilizando como lubrificante graxa à base de bissulfeto de molibdênio entre a chapa e a matriz.

2.1 Relações Analíticas

Com base na teoria elementar da plasticidade, a equação 1 empregada na trefilação de tubos com mandril móvel proposta por Siebel⁽⁴⁾, tem sido utilizada com sucesso, no cálculo da força no processo de *ironing*, conforme Figura 3.

$$F = A_1 \sigma_{f1} \left[\left(1 + \frac{\mu_q}{\text{tg}\alpha} \right) \varepsilon_{\max} + \frac{2}{3} \text{tg}\alpha \right] \quad (1)$$

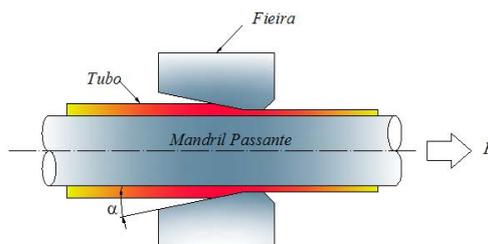


Figura 3 – Trefilação de tubo com mandril passante.

em que $\varepsilon_{\max} = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$. Nessa última equação A_0 é a área da seção transversal antes da trefilação e A_1 é área de seção transversal após a trefilação; α , o semi-ângulo da fieira, σ_{f1} , a tensão média de escoamento; e μ_q o coeficiente de atrito entre material/fieira.

LANGE⁽⁴⁾, em seu livro, faz algumas considerações importantes sobre o processo de *ironing*:

- A força de *ironing* aumenta com o número de anéis;
- O ângulo 2α afeta a força no fundo do copo para grandes reduções;
- A força que age no fundo do material é reduzida com a diminuição do ângulo do(s) anel (anéis), aproximando de zero para pequenos ângulos. A maioria dos trabalhos cita um ângulo ótimo de aproximadamente 12° .

2.2 Método dos Elementos Finitos

No aplicativo DEFORM 2D, de abordagem implícita, foi adotado o critério de escoamento de von Mises (R igual a 1 para todos os índices de anisotropia) e a utilização de elementos numéricos de formulação plástica axissimétrica para descrever o processo de conformação de embutimento. Para a discretização da chapa foi gerada uma malha de 700 elementos numéricos quadrados com cinco elementos ao longo da espessura, com quatro nós de integração.

Neste tipo de abordagem assume-se um equilíbrio quase-estático para descrever o processo de embutimento, desde que as condições de equilíbrio sejam asseguradas em cada passo de integração no tempo. Contudo, a avaliação do tempo de convergência está associada principalmente à mudança do estado de atrito e contato entre a ferramenta e a chapa durante a iteração. A Eq. (2) representa este tipo de formulação não-linear, onde o domínio é discretizado e a atuação de forças externas considerada. Os métodos numéricos de iteração direta, tais como, o

método de Newton-Raphson, o método da rigidez tangencial e o método da rigidez inicial são utilizados para solução deste tipo de problema.

$$[K(u)]\{u\} = -\{f\} \quad (2)$$

Em que K é a matriz de rigidez global, u é o vetor de deslocamentos nodais e f é o vetor de forças externas.

A modelagem e a simulação numérica foram realizadas, considerando-se o punção, o prensa chapa e a matriz como corpos rígidos. A velocidade do punção foi de 0.8 mm/s ao longo do curso de 60 mm. Foram adotados coeficientes de atrito entre: punção/chapa de 0,30, matriz/chapa de 0,12 e prensa chapa/chapa de 0,06. Foi utilizado módulo de elasticidade igual a 210 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A chapa de aço livre de interstícios em estudo foi caracterizada pela equação de Hollomon $\sigma = 508.7 \varepsilon^{0.242}$ obtida para amostras tracionadas segundo um eixo fazendo 45° com a direção de laminação.

As figuras 4a, 4b e 4c mostram uma gráfica da evolução da força, no processo de *ironing*, em função do curso do punção entre as curvas simuladas e as experimentais, para o primeiro, segundo e terceiro passe de *ironing* respectivamente.

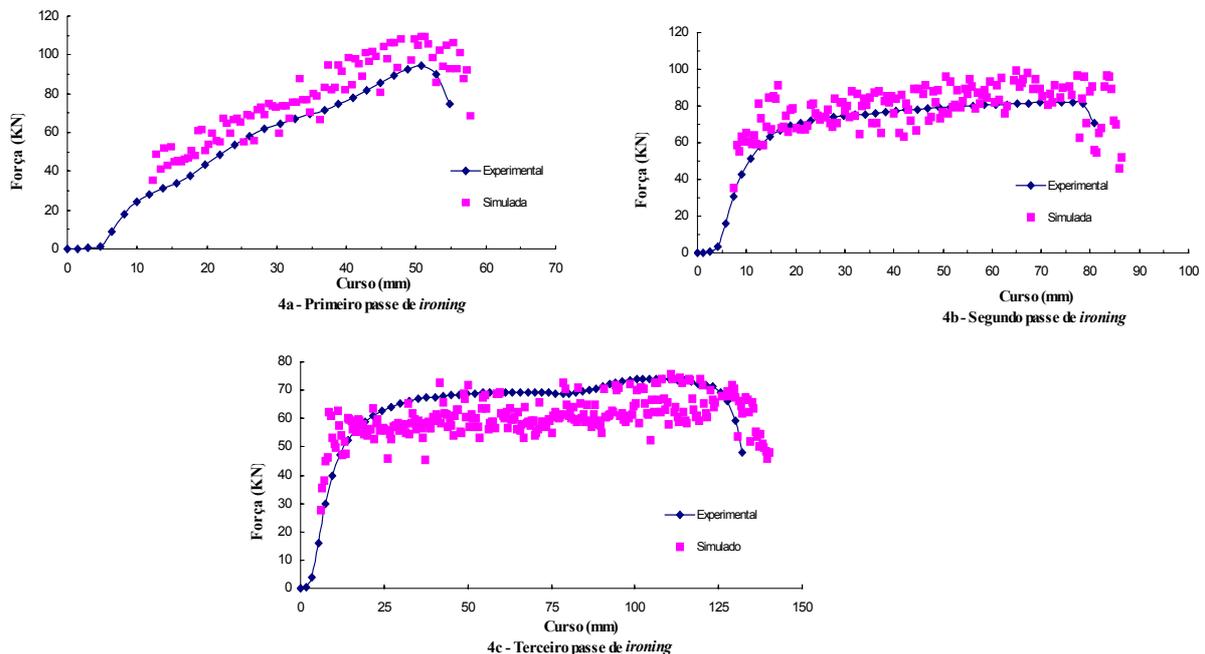


Figura 4. a,b,c: Valores experimentais e simulados da evolução da força em função do deslocamento do punção.

As curvas obtidas através da simulação acompanham os perfis das curvas experimentais. Percebe-se que o aumento da força do punção durante o processo de *ironing* é decorrente do aumento da taxa de redução na espessura e do aumento do encruamento do material, ambos em função da altura do copo.

O valor das forças máximas experimentais, simuladas e analíticas para cada passe de *ironing* são apresentadas na forma de tabela (Tabela 2).

Tabela 2 – Comparação das forças nos passes de *ironing* experimental, simulada e analítica.

	Força Experimental (kN)	Força Simulada (kN)	Força Analítica (kN)
1º Passe	94	102	103
2º Passe	84	98	95
3º Passe	73,9	78	67

Para o cálculo da força analítica, empregando a equação 1, a maior dificuldade encontrada foi no primeiro passe, uma vez que a espessura do copo embutido varia do topo até o raio de concordância. Para efeito de cálculo, foi adotada uma espessura média, e nos demais, as espessuras experimentais ao longo do copo.

Para o primeiro passe de *ironing*, foi observada a maior diferença entre os valores das forças experimentais e as simuladas. Isso é explicado pela variação na espessura entre o copo experimental e o simulado após o embutimento. A espessura da parede, após esse passe, pode ser considerada constante. Mesmo assim, após o segundo passe de *ironing*, ainda foi observado uma variação na força. Isso deixa claro que o perfil de encruamento apresentado pela chapa no primeiro passe não foi totalmente eliminado.

Analisando-se as curvas experimentais e simuladas, para o terceiro passe de *ironing*, deparou-se com uma concentração do número de pontos simulados menores do que a curva experimental, ao contrário do ocorrido nas curvas dos passes anteriores.

Para se verificar o ocorrido, foram examinadas as condições de não linearidade existentes no conjunto modelado. Percebeu-se que entre as não linearidades presentes, a mais suscetível à mudança é a condição de atrito, pois a sua influência nos valores das forças é direta, bastando para isso verificar possíveis mudanças de contato, principalmente a existência de descolamento do material em relação ao punção e ao anel de *ironing*. Para isso, foi analisada a interface material/punção e material/anel de *ironing*, ao longo dos copos do terceiro passe, durante toda a etapa de conformação.

Percebe-se que o material descola do punção variando de distância, de região para região. Esta não aderência modifica a condição de contato, gerando assim forças simuladas menores do que a força experimental. A Figura 5 procura retratar regiões onde houve aderência do material ao punção e variação da distância do descolamento do material/punção.

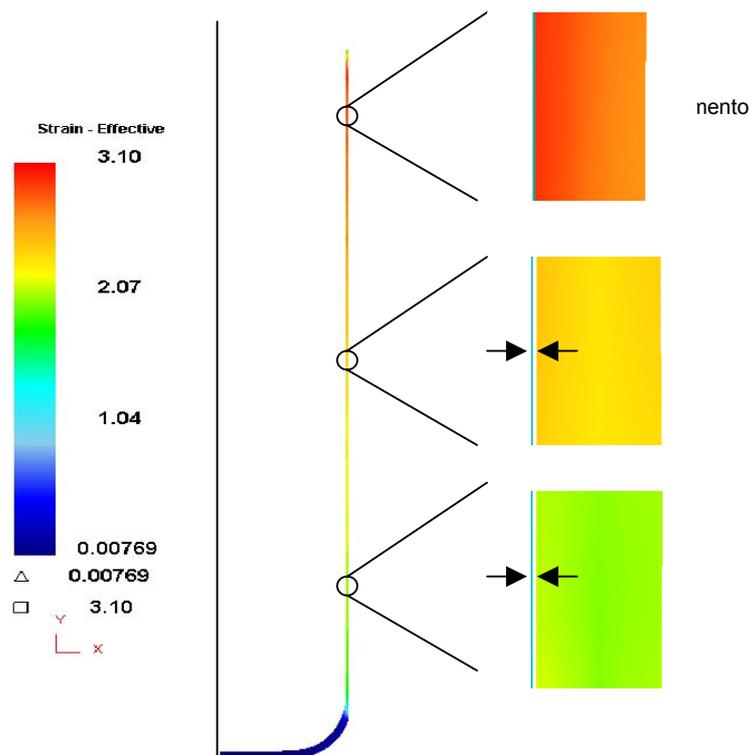
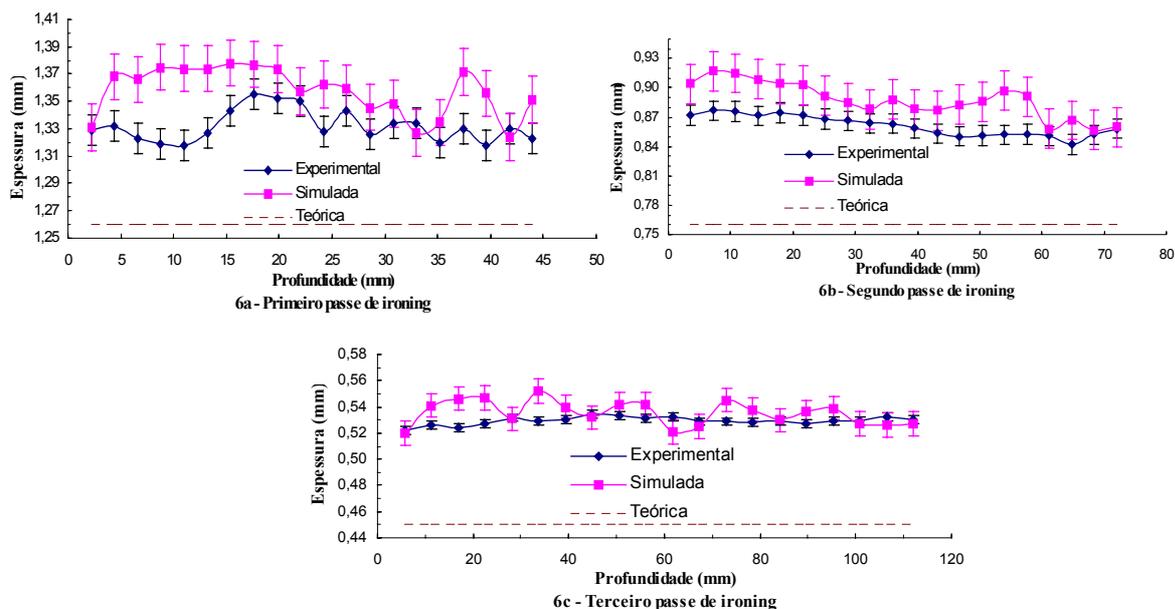


Figura 5. Variação da distância do descolamento do material/punção, no terceiro passe de *ironing*.

Para a análise da evolução da espessura simulada ao longo da altura dos copos resultantes do processamento por *ironing*, é considerada como referência a espessura teórica e as espessuras experimentais medidas na direção 45° em relação à direção de laminação, em cada passe. Para todos os copos foram realizadas 20 medições no total (Figuras 6a, 6b e 6c).

Como era de se esperar, as maiores diferenças entre as espessuras experimentais e simuladas foram detectadas no primeiro passe de *ironing*, uma vez que a espessura simulada ao longo do copo embutido foi superior à do copo experimental. Para os demais passes de *ironing*, as diferenças foram bem menores, em virtude das espessuras serem praticamente constantes ao longo do copo, antes do processo.

As diferenças existentes nas variações de espessuras entre o experimental/simulado e as espessuras teóricas, nos três passes de *ironing*, foram devidas aos deslocamentos radiais em cada anel (deformação elástica).



Figuras 6. a, b, c - Evolução da espessura ao longo da profundidade do copo experimental e a simulada para o primeiro, segundo e terceiro passe de *ironing* respectivamente.

4 CONCLUSÕES

Cada método de análise apresenta suas próprias vantagens e desvantagens. Alguns das relações analíticas e os resultados simulados por elementos finitos apresentadas neste trabalho são muito próximos dos resultados experimentais. As relações analíticas são obtidas a baixo custo ao passo que as simulações numéricas necessitam de grandes gastos com software, mas podem fornecer uma grande riqueza de detalhes do processo. Apesar dos custos associados à pesquisa experimental serem os mais elevados, os resultados experimentais são imprescindíveis em uma estratégia de pesquisa mais ampla em conformação mecânica.

Apesar da adoção de hipóteses simplificadoras como material isotrópico, considerar o processo de embutimento e o *ironing* como axisimétricos, os resultados obtidos, pelo aplicativo numérico DEFORM-2D, para o processo de embutimento foi satisfatório e, para os passes de *ironing*, bem consistentes com o experimental.

Os resultados analíticos para a previsão da força máxima através da formulação proposta pro Siebel^[4] foram significativamente relevantes por sua simplicidade e concordância com os resultados experimentais em um intervalo estreito de valores para o processo considerado neste trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Brasição pela colaboração e auxílio na construção do aparato experimental utilizado neste trabalho e aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 Bezerra, K., “*Ironing Extends Deep Drawing Process For High Quality Tubular Components*”, *Aluminium Today*, 6(1994)42.
- 2 Muraki, M. e Nakamura, T., “*Frictional Behavior of Lubricants During Deep Drawing an Ironing Process for Zinc-coated Steel Sheets*”, *Journal of Engineering Tribology*, 210(1996)189-197.
- 3 Panakin, W., “*Grundlagen des Tiefziehes zur Herstellung Zwierteiliger Dosen*”, *Werkstatt und Betrieb*, vol. 110, n 5, pp.313-319 (1977).
- 4 Kawai, N.; Saiki, H. e Saito, M., “*Experimental Analysis of ironing of Thin Metal Cups*”, *Journal of Tribology*, 111(1989)56-63.
- 5 Kawai, N.; Saiki, H. e Saito, M., “*Galling and Friction in Ironing of Thin Aluminum Cups*”, *Journal of Tribology*, 111(1989)64-69.
- 6 Kawai, N.; Saiki, H. e Saito, M., “*Effect of Galling on Metal Fracture in Cup Ironing Process*”, *Journal of Tribology*, 111(1989)692-697.
- 7 Kawai, N. e Dohda, K., “*Compatibility Between Tool Materials and Workpiece in Sheet-Metal Ironing Process*”, *Journal of Tribology*, 112(1990)275-281.
- 8 Kawai, N.; Dohda, K.; Saito, M.; Hayashi, N. e Wang, Z., “*Friction Behavior in the Cup Ironing Process of Aluminum Sheets*”, *Journal of Tribology*, 114(1992)175-180.
- 9 D.R.J. Owen and E. Hinton, *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, Pineridge Press, Swansea,
- 10 LANGE, K. *Handbook of Metal Forming*. 1. ed., New York: Mc Graw-Hill Book Co., 1987.