



AVALIAÇÃO DO *SPRING BACK* DE CHAPAS DE AI7475 SUBMETIDAS AO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA E ENVELHECIMENTO (*CREEP AGE-FORMING*)¹

Paulo Roberto Costa Junior²
Carlos de Moura Neto³
Diego José Inforzato²

Resumo

O processo de conformação por fluência e envelhecimento, também conhecido por *creep age-forming* (CAF) é utilizado principalmente na fabricação de revestimentos de aeronaves. Trata-se de um processo onde o princípio fundamental é a transformação de deformação elástica, originada na etapa de carregamento, em deformação plástica, pelo fenômeno de relaxamento de tensões, originado pelo processo de fluência do material. Como o tempo e temperatura estão limitados aos ciclos de envelhecimento artificial dos materiais, considerável parcela de retorno elástico ou *springback* é observado, uma vez que não há tempo e nem temperatura suficientes para relaxar totalmente as tensões. Como o *springback* é indesejável, faz-se necessário conhecer e tentar prever os valores envolvidos. O objetivo principal deste trabalho é calcular o *springback* para corpos-de-prova conformados por CAF e comparar estes resultados práticos com cálculos realizados por meio de um modelo existente, mas com simplificações impostas. Os resultados mostraram valores de *springback* da ordem de 74% para corpos-de-prova de 5,0mm de espessura e de 86% para corpos-de-prova de 12,0mm de espessura. Além disso, a variação entre os valores reais e os calculados pelo método simplificado foi de menos de 1% em todos os casos.

Palavras-chave: *Creep Age-Forming*; *Springback*; Conformação; Fluência.

SPRINGBACK EVALUATION OF AL7475 SHEETS UNDER CREEP AGE-FORMING PROCESS

Abstract

The creep age-forming process (CAF) is mainly used to manufacture aircraft wing skins. This is a process where the fundamental principle is the transformation of elastic strain, originated in the stage of loading on plastic deformation, due to phenomenon of relaxation of tensions, caused by the creep of material. As the temperature and time are limited to the cycles of artificial aging of materials, a considerable fraction of springback is observed, since there is no time or temperature sufficient to totally relax tensions. As the springback is undesirable, it is necessary to know and try to predict the values involved. The main objective of this work is to calculate the springback for coupons formed by CAF and compare these practical results with calculations performed by an existing model, but with simplifications imposed. The results show springback of the order of 74% for coupons 5.0 mm thickness and 86% for coupons 12.0 mm thickness. Moreover, the variation between actual results and those calculated by the simplified method was less than 1% in all cases.

Key words: Creep age-forming; Springback; Forming; Creep.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestre – EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A – Aluno de Doutorado do ITA.

³ Profº Dr. – ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão Bibliográfica

Na indústria aeroespacial, as demandas pela fabricação de painéis com melhor desempenho, têm aumentado. Como melhor desempenho, entende-se aumento de resistência mecânica e tenacidade, menor peso e melhora nas propriedades de resistência à fadiga e corrosão. O processo de conformação por fluência e envelhecimento, ou *creep age-forming* (CAF) tem sido desenvolvido e tem mostrado que é um processo de fabricação que pode atingir estes requisitos.⁽¹⁾

O processo de conformação por fluência e envelhecimento, também conhecido como *creep age-forming* (CAF) é um método de conformação que está baseado principalmente no fenômeno de relaxação de tensões, a qual ocorre durante o ciclo de envelhecimento artificial do material. A relaxação de tensões ocorre devido à exposição de um metal num ambiente a alta temperatura, por um determinado período de tempo. A quantidade de relaxação de tensões, bem como a taxa de alívio dependerá das tensões iniciais e dos materiais envolvidos.⁽²⁾

Como exemplo de aplicações, temos: o painel superior do Hawk, fabricado pela BAe com a liga AA7475; os painéis superiores do Gulfstream GIV, da aeronave de combate B1b e dos Airbus A330/A340, fabricados pela Textron; o painel da asa do A380, fabricado em conjunto pela Airbus e Bennett Associate.⁽³⁾

O processo *creep age-forming* consiste basicamente, na colocação de um painel metálico contra a superfície de uma ferramenta, sob regime elástico, e utilizando-se um sistema de bolsa de vácuo. Esta primeira etapa é conhecida como fase de carregamento. Estando o painel em total contato com a ferramenta, o conjunto é colocado dentro de uma autoclave e é aquecido e mantido por um determinado período de tempo em temperatura específica, sob uma pressão controlada. Nesta segunda etapa, conhecida como fase de fluência e envelhecimento, os constituintes do material precipitam e alteram a microestrutura do mesmo. Ao mesmo tempo, observa-se o fenômeno da relaxação de tensões, devido à fluência, que promove alguma deformação permanente no material.

Terminado o ciclo de envelhecimento, o painel é liberado e em função do efeito-mola (*springback*), retorna elasticamente para uma posição em algum lugar entre a posição inicial indeformada e a superfície da ferramenta. Esta terceira etapa é conhecida com fase de descarregamento.⁽³⁾ A Figura 1 ilustra, de forma esquemática, o processo CAF.

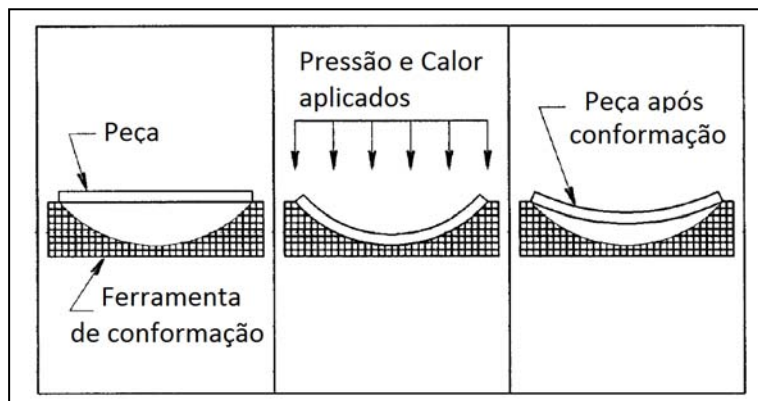


Figura 1 – Desenho esquemático do processo CAF.⁽²⁾

O retorno elástico, também conhecido como *springback*, ocorre devido à recuperação elástica das tensões. Pelo fato de as extremidades do painel a ser conformado não estarem fixas, a deformação observada é muito próxima à deformação que ocorre no dobramento puro, que é um processo que gera baixas deformações plásticas no painel conformado. Além disso, a máxima temperatura de operação e o tempo de conformação estão limitados aos ciclos de envelhecimento artificial de cada liga. O envelhecimento é necessário para que o material apresente as propriedades adequadas. Entretanto, as combinações de tempo e temperatura não são suficientes para relaxar totalmente as tensões induzidas. Assim, quando comparado com outros processos de conformação, os valores de *springback* são muito superiores.^(1,3,4)

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos, apresentar o processo de conformação por fluência e envelhecimento (*creep age-forming*) e apresentar os valores de retorno elástico (*springback*) observados na conformação por fluência e envelhecimento da liga de alumínio AA7475 em duas condições distintas de processamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, for utilizada a liga de alumínio AA7475, conforme especificação SAE AMS2772. Foram fabricados dois tipos de corpos-de-prova, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões dos corpos-de-prova utilizados

Liga	Espessura	Dimensões
Al 7475 T7651	5 mm	100 x 300 mm
Al 7475	12 mm	100 x 300 mm

Os corpos-de-prova foram obtidos a partir de chapas e placas da liga de alumínio AA7475, com espessuras de 0,200pol e 0,750pol, respectivamente.

Foram construídos dois ferramentais de conformação tipo fêmea, com raios constantes ao longo da superfície de 1600mm e 3750mm. Os corpos-de-prova foram preparados sobre o ferramental, utilizando-se a técnica de bolsa de vácuo, similar a que se utiliza na preparação para a cura de materiais compostos. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático dos ferramentais utilizados e uma foto da técnica de bolsa de vácuo.

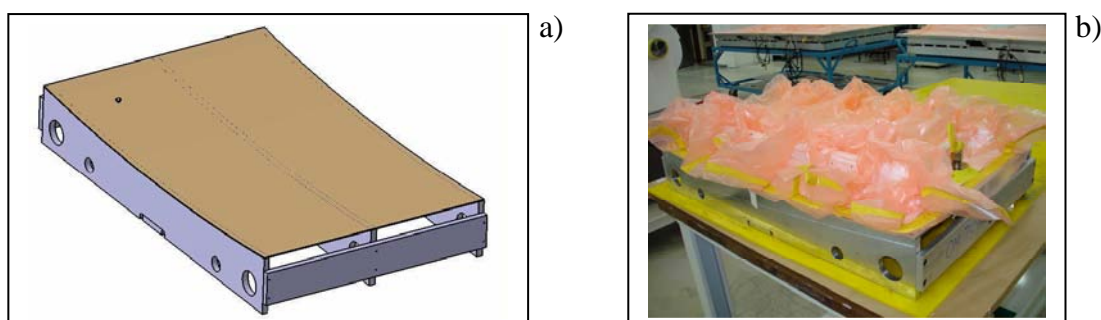


Figura 2 – a) Desenho esquemático de um dos ferramentais utilizados; b) Bolsa de vácuo.

A conformação foi realizada em uma autoclave, com controle computadorizado de temperatura e pressão. A variação de temperatura dentro da autoclave é de +/- 3°C. Como o objetivo principal deste trabalho é o de se apresentar o processo de conformação por envelhecimento e fluência (CAF) e o comportamento do material com relação ao retorno elástico (*springback*), os ciclos de tempo e temperatura não foram os ciclos corretos de envelhecimento da liga.

Para o corpo-de-prova obtido de chapa (5,0mm), o ciclo utilizado foi de 10 horas em autoclave, sob uma pressão de 6,9 bar e temperatura de 121°C. Para o corpo-de-prova obtido de placa (12,0mm), o ciclo utilizado foi de 24 horas em autoclave, sob uma pressão de 6,9 bar e temperatura de 163°C.

Após a conformação, os corpos-de-prova foram medidos em uma máquina tridimensional. A Figura 3 ilustra as posições das medições e o significado dos valores apresentados. Neste estudo, *springback* é definido pela relação entre a máxima distância vertical, medida em cada ponto, da peça não deformada até a superfície do ferramental e a distancia medida após a conformação, com relação à peça não deformada.

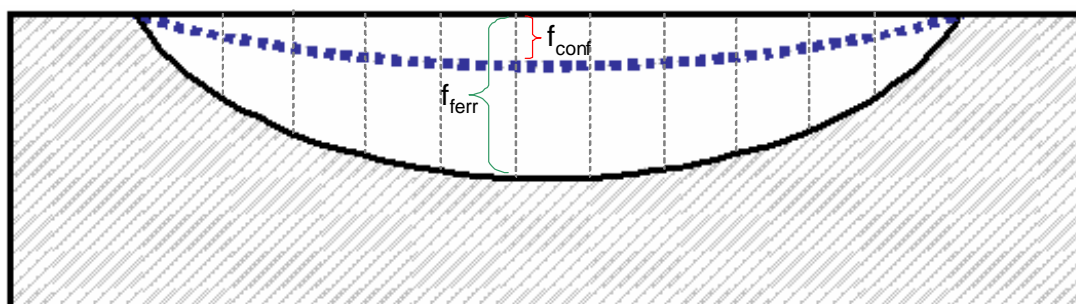


Figura 3 – Desenho esquemático representando as posições de medição e o significado dos valores.⁽⁴⁾

O cálculo do *springback* foi realizado utilizando-se a Equação 1:

$$SB(\%) = \left(\frac{f_{ferr} - f_{conf}}{f_{ferr}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Foram calculados os valores de *springback* nas posições indicadas na Figura 3. O método utilizado para a determinação do retorno elástico (*springback*) é empírico e necessariamente precisa que corpos-de-prova sejam conformados. Na indústria, é preferível que se preveja o *springback* evitando a realização de *try-outs* para diminuir custos e tempo de desenvolvimento.

Para isto é interessante utilizar modelos matemáticos que façam esta previsão. Assim, para iniciar o estudo dos modelos existentes, calculou-se o retorno elástico, ou *springback*, dos corpos-de-prova ensaiados e os resultados teóricos foram comparados com os resultados práticos.

O modelo de cálculo utilizado foi o desenvolvido por Jeunechamps e colaboradores. Para este trabalho específico, utilizou-se a formulação proposta para o cálculo de deflexão e retorno elástico dos estágios 1 e 3 (carregamento linear e descarregamento, respectivamente) somente, não levando-se em conta os parâmetros de fluência e envelhecimento do estágio 2. Além disso, como os

ferramentais de conformação apresentavam apenas uma curvatura, foi feita uma simplificação para efetuar os cálculos.

Para a utilização do modelo de Jeunechamps e colaboradores, inicialmente calculou-se o raio médio (r) de cada corte longitudinal do corpo-de-prova. Para o cálculo do raio utilizou-se a Equação 2:

$$r = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (f)^2}{(2f)} \quad (2),$$

onde L é o comprimento do corpo-de-prova e f é deflexão observada após a conformação.

O valor da curvatura (ρ) é o inverso do raio, ou seja:

$$\rho = \frac{1}{r} \quad (3).$$

O momento de inércia foi calculado pela Equação 4:

$$I = \frac{b(h)^3}{12} \quad (4),$$

onde b é base do retângulo e h é a altura do retângulo.

Como a geometria é simples e a espessura constante, o momento de inércia é o mesmo para todos os cortes.

O módulo de rigidez à flexão (D) é dado pela Equação 5:

$$D = EI \quad (5),$$

onde E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia.

O momento gerado quando o corpo-de-prova é pressionado elasticamente contra a superfície do ferramental é dado por:

$$M^0 = D\rho_0 \quad (6),$$

onde ρ_0 é a curvatura do ferramental, ou seja $1/r_{\text{ferr}}$.

O momento necessário para conferir a deflexão no corpo-de-prova após a conformação é dado por:

$$M = D\rho_{\text{conf}} \quad (7),$$

onde ρ_{conf} é a curvatura do corpo-de-prova após a conformação.

Com os valores dos momentos calculados, e com as dimensões dos corpos-de-prova, podem-se calcular as deflexões dos mesmos, antes e após a conformação por *creep age-forming*, utilizando-se as Equações 8 e 9:

$$f_i = \left(\frac{M^0}{2D} \right) * \left(\frac{L}{2} \right)^2 \quad (8)$$

$$f_f = \left(\frac{M}{2D} \right) * \left(\frac{L}{2} \right)^2 \quad (9),$$

onde f_i é a deflexão inicial (elástica) e f_f é a deflexão após a conformação.

O valor de *springback* (SB%) utilizando-se o modelo simplificado de Jeunechamps e colaboradores é dado pela Equação 10:

$$SB(\%) = \left(1 - \frac{f_f}{f_i} \right) * 100 \quad (10).$$

3 RESULTADOS

Após a conformação dos corpos-de-prova por *creep age-forming*, os mesmos foram medidos em máquina tridimensional, de forma a se obter as deflexões. As medições foram realizadas em três cortes longitudinais, como pode ser observado no exemplo da Figura 4.

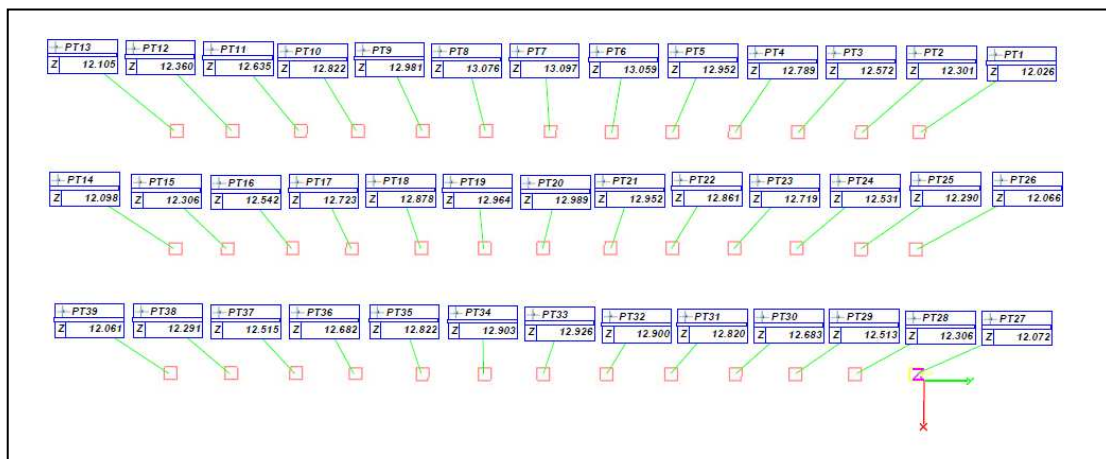


Figura 4 – Exemplo dos resultados das medições em um corpo-de-prova de 12,0 mm de espessura.

Com as medidas das deflexões e as medidas dos ferramentais, os valores de *springback* foram calculados utilizando-se a Equação 1. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 – Valores de *springback* calculados pelo modo empírico

Espessura do CDP	Springback (%)		
	Corte 1	Corte 2	Corte 3
5,0mm	73,33	74,63	73,47
12,0mm	87,30	86,91	86,02



É importante salientar que os valores obtidos para os corpos-de-prova com espessura de 5,0 mm e 12,0 mm não podem ser comparados, pois foram conformados em condições distintas de ferramental, temperatura e tempo.

Como continuação do estudo, calculou-se os valores de *springback* utilizando-se o modelo simplificado de Jeunechamps e colaboradores, a fim de se comparar os resultados práticos com o modelo alterado.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos para se obter os valores de *springback* utilizando o modelo de Jeunechamps e colaboradores simplificado para CDP de chapa de 5,0mm:

Tabela 3 – Resultados obtidos pelo modelo simplificado, para os corpos-de-prova de chapa de 5,0 mm

	Corte 1	Corte 2	Corte 3
r (mm)	14215,00	14783,00	14263,00
ρ_0 (mm ⁻¹)	$2,67 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-4}$
ρ_{conf} (mm ⁻¹)	$7,03 \times 10^{-5}$	$6,76 \times 10^{-5}$	$7,01 \times 10^{-5}$
I (mm ⁴)	3125,00	3125,00	3125,00
D (MPa.mm ³)	$7,32 \times 10^5$	$7,32 \times 10^5$	$7,32 \times 10^5$
M ⁰ (N)	195,22	195,22	195,22
M (N)	51,50	49,52	51,33
f _i (mm)	3,00	3,00	3,00
f _f (mm)	0,79	0,76	0,79
SB(%)	73,62	74,63	73,71

A Tabela 4 apresenta os resultados dos cálculos para se obter os valores de *springback* utilizando o modelo de Jeunechamps e colaboradores simplificado para CDP de placa de 12,0 mm:

Tabela 4 – Resultados obtidos pelo modelo simplificado, para os corpos-de-prova de placa de 12,0 mm

	Corte 1	Corte 2	Corte 3
r (mm)	11962,00	11693,00	11187,00
ρ_0 (mm ⁻¹)	$6,25 \times 10^{-4}$	$6,25 \times 10^{-4}$	$6,25 \times 10^{-4}$
ρ_{conf} (mm ⁻¹)	$8,36 \times 10^{-5}$	$8,55 \times 10^{-5}$	$8,93 \times 10^{-5}$
I (mm ⁴)	43200,00	43200,00	43200,00
D (MPa.mm ³)	$1,01 \times 10^7$	$1,01 \times 10^7$	$1,01 \times 10^7$
M ⁰ (N)	6325,02	6325,02	6325,02
M (N)	846,04	865,47	904,60
f _i (mm)	7,03	7,03	7,03
f _f (mm)	0,94	0,96	1,01
SB(%)	86,62	86,32	85,70

Com os valores de *springback* calculados pelo método empírico e pelo método simplificado apresentado por Jeunechamps e colaboradores, pode-se comparar os valores obtidos.

A Tabela 5 apresenta os resultados e as variações em valores absolutos e percentuais para a chapa de 5,0 mm.

**Tabela 5** – Comparação entre os valores de *springback*, para os corpos-de-prova de chapa de 5,0 mm

	Corte 1	Corte 2	Corte 3
SB(%) empírico	73,33	74,63	73,47
SB(%) modelo	73,62	74,63	73,71
variação	0,29	0,00	0,24
Variação (%)	0,40	0,00	0,33

A Tabela 6 apresenta os resultados e as variações em valores absolutos e percentuais para a placa de 12,0 mm.

Tabela 6 – Comparação entre os valores de *springback*, para os corpos-de-prova de placa de 12,0 mm

	Corte 1	Corte 2	Corte 3
SB(%) empírico	87,30	86,91	86,02
SB(%) modelo	86,62	86,32	85,70
variação	-0,68	-0,59	-0,32
Variação (%)	-0,79	-0,68	-0,37

4 DISCUSSÃO

O primeiro fato importante a ser discutido é a simplificação realizada no modelo proposto por Jeunechamps e colaboradores. Os cálculos foram realizados assumindo-se diversas simplificações. Uma delas é de que o método é utilizado para geometrias com dupla curvatura e os ensaios foram realizados com curvaturas simples. Outra simplificação adotada, que num próximo trabalho deve ser evitada, são os parâmetros de fluência e envelhecimento do material durante o ciclo de conformação.

Apesar disso, para um primeiro estudo, que tem por objetivo somente apresentar os valores encontrados de *springback* e tentar compará-los com algum modelo matemático que seja representativo, estas simplificações podem ser aceitas sem comprometer a qualidade do estudo em questão.

Com relação às condições dos ensaios, foram testados corpos-de-prova em duas espessuras distintas (5,0 mm e 12,0 mm). Observando os resultados de *springback* encontrados (da ordem de 74% para 5,0 mm e 86% para 12,0 mm) nota-se que há uma inversão da tendência de comportamento do retorno elástico com relação à espessura.

De acordo com vários autores,⁽¹⁻³⁾ o aumento da espessura deve resultar num menor valor de *springback*. Isto se deve ao fato de o processo de relaxação ser dependente, entre outros fatores, da tensão inicial induzida ao material. Em espessuras maiores, as fibras mais externas estão mais tensionadas do que em espessuras menores. Assim, é esperado que ocorra maior relaxação e conseqüentemente menor *springback*.

O fato novo que se apresenta neste estudo, é a diferença de rigidez entre os corpos-de-prova ($I=3.125 \text{ mm}^4$ para 5,0 mm e $I=43.200 \text{ mm}^4$ para 12,0 mm). Como pode ser visto no trabalho Jeunchamps e colaboradores, a rigidez afeta o resultado final após a conformação, como realmente pode ser observado nos valores de *springback*.

Com relação aos valores de *springback* encontrados a partir dos dois métodos distintos de cálculo, observa-se uma correspondência muito boa entre os resultados práticos obtidos e os resultados “teóricos” esperados pelo modelo simplificado que foi utilizado (variações de menos de 1% em todos os casos).

Este fato vem comprovar ainda mais que as simplificações, para este estudo, não comprometeram os resultados finais e, para esta situação, podem ser consideradas adequadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, é importante que se aplique o mesmo estudo em geometrias mais complexas, que simulem de forma mais acurada, a geometria de um painel de asa de uma aeronave.

Além disso, é fundamental que estudos a respeito do comportamento do material com relação à fluência sejam realizados. O processo de conformação por fluência e envelhecimento (*creep age-forming*) é baseado no fenômeno de fluência e estes parâmetros não podem ser desconsiderados.

5 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios práticos, foi possível primeiramente, apresentar a constatação física da conformação por *creep age-forming*. A partir deste ponto, as deflexões após conformação foram medidas e os valores de *springback* foram calculados para os corpos-de-prova de geometria simples.

Para os corpos-de-prova com 5,0 mm de espessura, os valores de *springback* ficaram em torno de 74% e para os corpos-de-prova com 12,0 mm de espessura, os valores de *springback* ficaram em torno de 86%

Ficou comprovado que a rigidez do corpo-de-prova influencia nos resultados de *springback* após a conformação por *creep age-forming* e que o modelo utilizado, apesar das simplificações adotadas, pode ser utilizado para a determinação e previsão de *springback* em peças com geometria simples e com uma única curvatura. Este fato pode ser observado quando se comparam as variações de menos de 1% entre os resultados obtidos pelos dois métodos distintos.

Agradecimentos

Prof^o Dr. Carlos de Moura Neto e Prof^a Dr. Danieli A. P. Reis pela orientação acadêmica, Mário H. Garcia, Zildo de Abreu, William R. S. Assis, Edson Cintra, Donizetti G. da Silva, Ricardo M. Melo, Fernanda de Andrade e Embraer pelo apoio na realização dos ensaios e nos recursos disponibilizados.

REFERÊNCIAS

- 1 LIN, J., HO, K.C., DEAN, T.A. An Integrated process for modeling of precipitation hardening and springback in creep age-forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, p. 477-488, 2006.
- 2 HOLMAN, M. C. Autoclave age forming large aluminum aircraft panels. *Journal of Mechanical Working Technology*, v. 20, p. 477-488, 1989.
- 3 JEUNECHAMPS, P. P., HO, K. C., Lin, J., PONTHOT, J. P., DEAN, T. A. A closed form technique to predict springback in creep age-forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 48, p. 621-629, 2006.
- 4 HO, K. C., LIN, J., DEAN, T.A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets. *International Journal of Plasticity* v. 20, p. 733-751, 2004.