



AValiação DO *SPRING BACK* DE Painéis REFORÇADOS DE AI7475 SUBMETIDOS AO PROCESSO DE *CREEP AGE FORMING*¹

Diego José Inforzato²
Carlos de Moura Neto³
Paulo Roberto Costa Junior⁴
Fernando Ferreira Fernandez⁵
Dilermando Nagle Travessa⁶

Resumo

Creep age forming é um processo de fabricação que vem despertando interesse na indústria aeronáutica pelo potencial de obtenção de peças curvas com geometrias complexas. Neste processo, o ciclo de tratamento térmico do material é utilizado para, simultaneamente ao envelhecimento, relaxar tensões externas aplicadas, por mecanismos de fluência e confere à peça um novo contorno. Ao final da conformação, o retorno elástico observado pode ser superior a 70% e a sua previsão é essencial para o sucesso do processo. Este trabalho trata da adaptação de um modelo mecânico simples para uma estimativa prévia do retorno elástico e da deflexão final de painéis reforçados, empregados na construção de aeronaves, submetidos ao *creep age forming*. Painéis foram fabricados e conformados em autoclave, avaliando-se curvatura e retorno elástico em diversas secções. Boa correlação entre retorno elástico e deflexão final estimados pelo método e medidos nas peças reais foi verificada, mostrando que este processo apresenta grande potencial para a conformação de painéis reforçados, sendo que o retorno elástico pode ser previsto através de um modelo mecânico simples.

Palavras-chave: *Creep age forming*; Retorno elástico; Modelo analítico; AI7475.

SPRING BACK EVALUATION OF CREEP AGE FORMED AI7475 STIFFENED PANELS

Abstract

Creep age forming is an interesting process for the airframe industry, as it is able to form contoured parts with complex shapes. In that process, the ageing cycle of the material is applied to relax external loads on the part through creep mechanisms. Those relaxed stresses impose a new curvature to the part. At the end of the process, significant spring back (sometimes higher than 70%) is observed and the success depends on how that spring back can be predicted. That work deals with the adaptation of a simple mechanical modeling to prior estimate the spring back and the final curvature of complex creep age formed stiffened panels. Real panels were manufactured and formed in autoclave and their final curvature and spring back were measured on several sections. A good correlation between these measurements and the values predicted by the model was found, showing the high potential of this process to form stiffened panels, as well as the possibility to previously estimate the spring back, through a simple model.

Key words: *Creep age forming*; Spring back; Analytical modeling; AI7475.

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

² Mestre, aluno de Doutorado do ITA - Embraer – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.

³ Professor Doutor – ITA – Instituto Tecnológico Aeronáutico.

⁴ Mestre, aluno de Doutorado do ITA - Embraer – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.

⁵ Mestre - Embraer – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.

⁶ Doutor - Embraer – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.



1 INTRODUÇÃO

Age-forming, *creep forming* ou *creep-age forming* (doravante também denominado *creep age forming*) são sinônimos de um processo de conformação que combina dois fenômenos dependentes da temperatura: fluência e envelhecimento por precipitação. Assim, uma tradução adequada para o português seria conformação por fluência e envelhecimento. Além da temperatura, estes fenômenos são fortemente dependentes do tempo.

Neste processo, a peça que se deseja conformar é forçada contra um ferramental que possui uma certa curvatura, através de dispositivos mecânicos de fixação ou mais comumente através de técnicas que empregam bolsas de vácuo e autoclave, sem que seu limite elástico seja ultrapassado. O conjunto é então aquecido e, sob efeito da temperatura, ocorrem simultaneamente o envelhecimento (ou endurecimento por precipitação) e a relaxação das tensões geradas pela força que mantém o contato da peça contra o ferramental, através de mecanismos de fluência. Finalmente, a peça é resfriada e, com a remoção das forças externas, um retorno elástico neste trabalho também denominado *spring back*) é verificado.

O *creep age forming* em autoclave apresenta uma vantagem em relação aos dispositivos mecânicos, uma vez que aplica uniformemente as forças. Entretanto, em peças com geometrias complexas e espessuras variáveis podem haver transições abruptas de rigidez, e nestes casos uma combinação da pressão exercida pelo autoclave com dispositivos mecânicos aplicando forças adicionais em regiões mais rígidas pode trazer melhores resultados. O uso de contra-chapas ou ferramentais “macho” e “fêmea” também são comuns para auxiliar na distribuição da pressão do autoclave. Os ferramentais para uso em autoclave representam um desafio a mais para o processo, uma vez que deles depende a manutenção das restrições, além de permitirem a montagem de bolsas de vácuo que são fundamentais para o processo.

Em ligas de alumínio, o processo é, portanto, aplicável àquelas que são tratáveis termicamente, sendo que as condições de temperatura e tempo são determinadas com vistas às propriedades mecânicas finais obtidas pelo envelhecimento por precipitação. Conseqüentemente, o processo não é otimizado para a fluência e, desta forma, o retorno elástico ou *spring back* é significativo, da ordem de 40% a 70%.⁽¹⁾

O *creep age forming* tem sido aplicado com sucesso na indústria aeroespacial, mais especificamente em revestimentos de asa de grande espessura. Exemplos desta aplicação datam das décadas de 1970 e 1980, nos revestimentos superiores do bombardeiro B1B, e do jato executivo Gulfstream GIV, fabricados pela antiga Textron, dos jatos comerciais da Airbus A330/340 fabricados pela própria Airbus, mas desenvolvidos em associação com a Textron e o revestimento superior do caça Hawk pela BAe.^(1,2) O Airbus A380, maior avião comercial já fabricado, lançado no final da década de 1990 e certificado em 2006 é o último grande exemplo de aplicação deste processo para a fabricação de revestimentos e reforçadores longitudinais superiores de asa. Nestas aplicações, curvaturas suaves, porém complexas, são desejáveis para o produto final e neste caso o *creep age forming* pode apresentar vantagens em relação a outros processos concorrentes como *roll forming*, que apresenta limitações quanto à obtenção de duplas curvaturas ou celas, *peen forming*, que apresenta limitações quanto à repetibilidade e potencial de automação e a usinagem no contorno final, que demanda grande quantidade de matéria prima e tempo de usinagem. Outra vantagem do *creep age forming* frente a



outros processos de conformação é o baixo nível de tensões residuais do produto final,⁽¹⁾ o que pode elevar a vida do componente em uso, sobretudo em aplicações sujeitas à fadiga.

As grandes dificuldades do processo de *creep age forming* consistem, de um lado na demanda por ligas cuja metalurgia favoreça a aplicação do processo tendo como resultado um produto com resistência mecânica adequada e tolerante a dano (com baixa taxa de propagação de trincas e alta tenacidade à fratura) e por outro lado na estimativa prévia do retorno elástico para, assim, projetar ferramentais que “compensem” este efeito e resultem em peças com alta precisão geométrica e dimensional. Nestes dois campos se encontram a grande maioria dos trabalhos científicos e tecnológicos publicados sobre o processo.

O modelamento do retorno elástico é bastante complexo, sobretudo em painéis reforçados, onde, além da elevada rigidez, existem transições abruptas de espessura em regiões pequenas. Além disso, as propriedades do material são transientes durante o processo, uma vez que mudam continuamente com o envelhecimento (endurecimento por precipitação). Vários modelos, desde matemáticos/fenomenológicos mais simples⁽³⁾ até numéricos empregando elementos finitos têm sido desenvolvidos. Na grande maioria, o comportamento de placas simples e de espessura constante é modelado utilizando-se equações de equilíbrio e equações constitutivas que descrevem o comportamento em fluência do material. Ho, Li e Dean⁽⁴⁾ estabeleceram equações constitutivas para a liga Al7010, descrevendo simultaneamente a fluência e o endurecimento por precipitação. Estas equações foram utilizadas posteriormente num modelo por elementos finitos⁽⁵⁾ para a simulação de placas espessas com dupla curvatura e concluíram que o retorno elástico diminui linearmente à medida em que a razão entre os raios de curvatura em duas direções perpendiculares se aproxima de 1. Este modelo permite ainda uma quantificação da diminuição do retorno elástico em função do aumento da espessura e do tempo de processo, até um ponto de saturação. Considerando-se que o processo é similar a um dobramento puro, e que a taxa de relaxação das tensões é função, além da temperatura e do tempo, do nível de tensão inicial, o decréscimo da tensão a partir da superfície do material até o centro (próximo da linha neutra) resulta numa diminuição da taxa de relaxação nesta região e, como consequência, o retorno elástico nunca será zero. Além disso, com aumento na espessura, para uma mesma curvatura, as tensões nas superfícies externas aumentam e, conseqüentemente, a taxa de relaxação. Outra grande contribuição deste trabalho é a definição de um parâmetro definido pelo produto da curvatura média (média em duas direções perpendiculares) pela espessura. Quando este parâmetro é mantido constante, o retorno elástico não varia com a espessura do material.⁽⁵⁾

O uso de ligas adequadas para o processo de *creep age forming*, combinando altas taxas de relaxação com um comportamento mecânico tolerante ao dano, também é um aspecto fundamental do processo. A liga Al2024 na condição T351 (envelhecida naturalmente) é uma das mais usadas em revestimentos inferiores de asas, devido às suas características de tolerância ao dano, que são perdidas com o envelhecimento artificial (nas condições T6 ou T8). Conseqüentemente, esta liga não é adequada para o processo. Nestas aplicações, a liga Al7475 na condição superenvelhecida (T73) é uma boa alternativa. Neste caso, existe a possibilidade de conciliar o tratamento de superenvelhecimento com a conformação a partir da condição solução sólida supersaturada (W), em dois estágios: o primeiro a 121°C entre 6 horas a 8 horas, e o segundo a 163°C entre 24 e 30 horas. Assim, existe um



grande potencial para a relaxação das tensões⁽⁴⁾ que garantem a conformação. Entretanto, um ciclo muito longo em autoclave aumenta consideravelmente o custo do processo, além da capacidade de relaxação no primeiro estágio, no qual o material endurece por precipitação, ser questionável. Outra possibilidade é de que o ciclo de conformação ocorra apenas no segundo estágio, com o primeiro ocorrendo num forno de envelhecimento comum.⁽⁶⁾ Nestas condições, a conformação ocorreria durante o superenvelhecimento, no qual a resistência mecânica da liga tende a diminuir. Robey, Prangnell e Dip⁽⁷⁾ verificaram que durante o segundo estágio, a taxa de relaxação desta liga é bastante significativa devido à dissolução das zonas GP (formadas no primeiro estágio) em favor da nucleação da fase η' que marca o início do superenvelhecimento. Ainda segundo estes autores, a taxa de relaxação é significativa para tensões maiores que 30% da tensão de escoamento na temperatura, outra constatação para o fato de que o retorno elástico sempre estará presente no processo [5], uma vez que suas semelhanças com o dobramento puro resultam numa linha neutra cujas tensões tendem a zero nas suas proximidades. Novas ligas da série Al2XXX com adições de Li, Zr e Sc também estão sendo desenvolvidas para o processo de *creep age forming*.⁽⁸⁾ O papel do Li nestas ligas, em quantidades entre 0,5 e 1,6% em peso, é o aumento da tolerância ao dano enquanto que o Zr e o Sc têm a função de estabilizar a microestrutura e maximizar a relaxação das tensões.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da liga Al7475, na forma de painéis reforçados, para conformação através do processo de *creep age forming* em autoclave. Este potencial é verificado experimentalmente através da avaliação do nível de retorno elástico observado na conformação, com curvatura simples, de uma peça representativa de geometria complexa, composta de reforçadores longitudinais e um reforçador transversal numa das extremidades, além de espessuras variáveis. Um modelo físico⁽⁵⁾ para a estimativa da deflexão final e de retorno elástico é utilizado para o presente caso, e seus resultados são comparados com os resultados experimentais observados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material, Fabricação das Peças e Conformação

Três peças iguais representativas de aplicações aeronáuticas foram fabricadas a partir de uma placa da liga Al7475-T7351 de 50,8 mm de espessura e de especificação SAE AMS 4202D.⁽⁹⁾ Antes da usinagem, a placa foi solubilizada num primeiro estágio a 477°C por 180 minutos e num segundo estágio a 513°C por 60 minutos (condição W), conforme especificação SAE AMS 2770,⁽¹⁰⁾ e depois envelhecida a 121°C por 6 horas, o que corresponde ao primeiro estágio de envelhecimento para a condição T73, conforme especificação SAE AMS 2772.⁽¹¹⁾ Tanto a solubilização quanto o primeiro estágio de envelhecimento foram realizados em forno ao ar com aquecimento por resistências elétricas. A Figura 1A detalha a geometria da peça usinada, cujas dimensões básicas são 600 x 300 x 47 mm (comprimento, largura e espessura máxima). As espessuras, tanto da casca quanto de alguns reforçadores, variam suavemente ao longo do comprimento e da largura, conforme mostrado na Figura 1B.

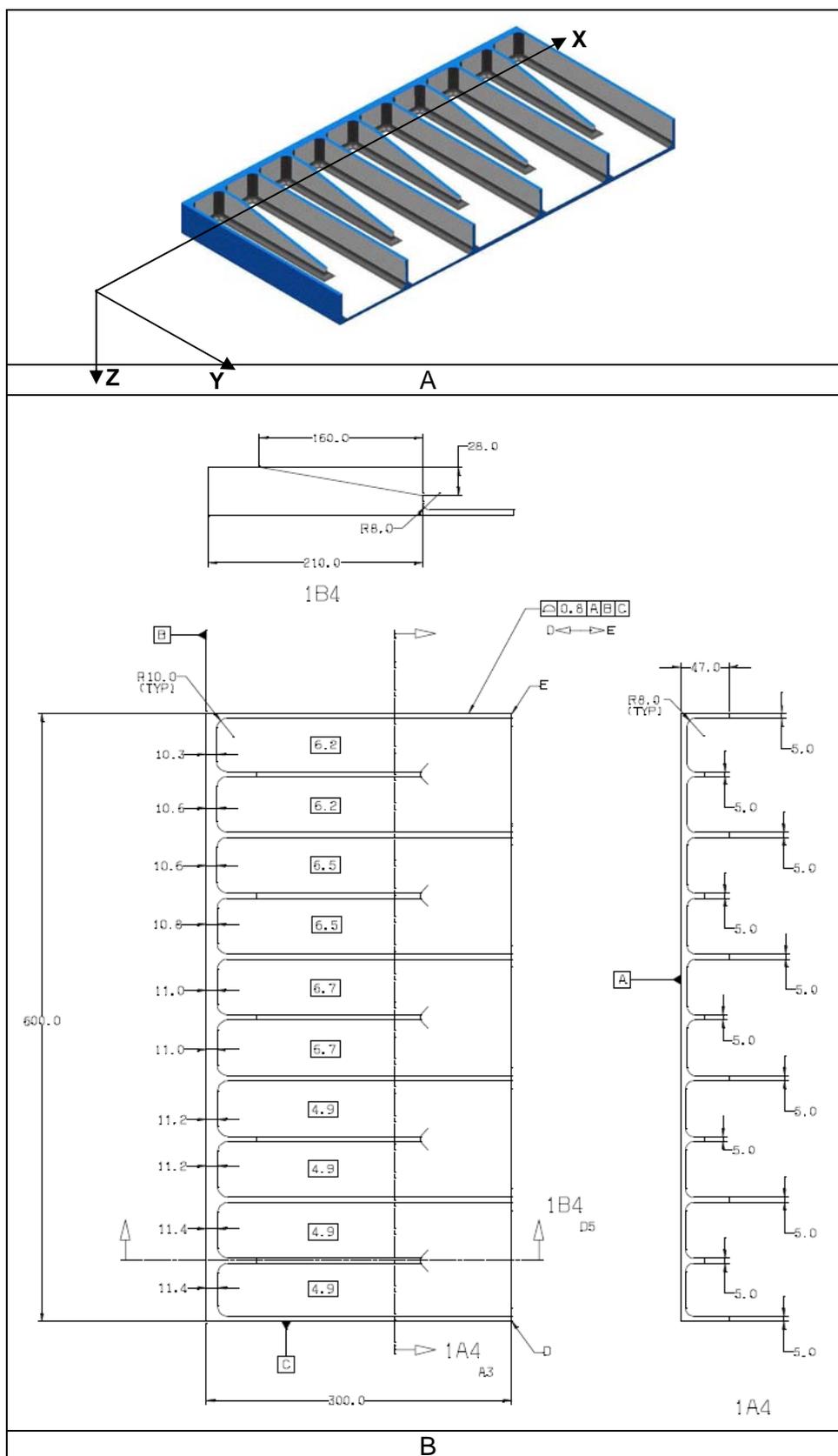


Figura 1: A- Vista em perspectiva das peças usinadas e submetidas ao processo de creep age forming, B- Detalhes do projeto com as variações de espessura.

Para a conformação destas peças em autoclave, foi fabricado um ferramental específico, tipo “fêmea”, mostrado na Figura 2. Este ferramental apresenta um raio único na direção X, e constante ao longo de Y (sistemas de coordenada da Figura 1A). Já na direção Y não há curvatura (raio infinito e curvatura zero). O raio na direção X foi definido empiricamente com base nos resultados de retorno elástico observados em testes de conformação de chapas e placas planas (sem reforçadores).⁽¹¹⁾ Técnicas de construção de bolsas de vácuo, tipicamente empregadas na fabricação de compósitos de uso aeronáutico, foram utilizadas. A bolsa de vácuo garante a remoção completa do ar entre a peça e o ferramental, permitindo assim que durante a conformação em autoclave, com a aplicação de pressão externa, possa haver um contato uniforme entre a peça e o ferramental. A Figura 2 mostra a bolsa de vácuo construída em uma das peças.

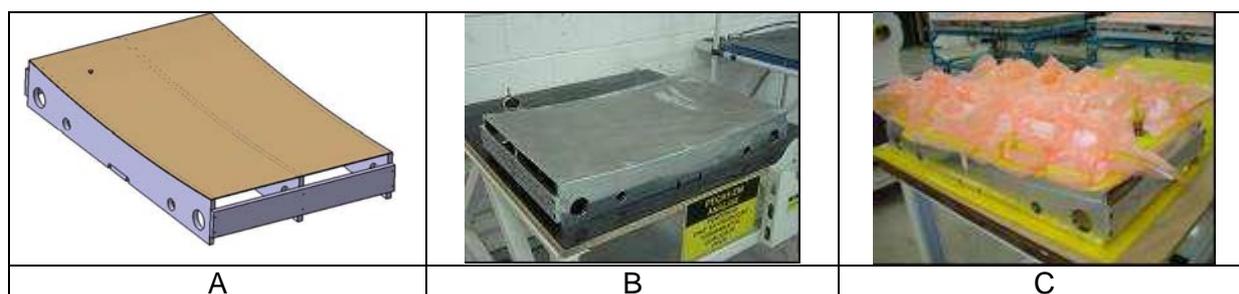


Figura 2: A- Aspecto da superfície do ferramental empregado, B- Ferramental fabricado para a conformação das peças, C- Aplicação de bolsa de vácuo em uma das peças conformadas.

A conformação das peças ocorreu em autoclave sob uma pressão externa de 7 atm, a uma temperatura de 163°C por 24 horas, correspondendo ao segundo estágio (superenvelhecimento) da liga Al7475 para a condição final T73.⁽¹¹⁾ O vácuo dentro da bolsa é mantido durante todo o ciclo e a pressão externa foi aplicada apenas após o atingimento do patamar de temperatura.

Após a conformação, a deflexão final foi medida em um equipamento ótico à laser de controle dimensional 3D (*laser tracking*), com o registro das deflexões em 5 perfis do plano X-Z, igualmente espaçados ao longo de Y, incluídas as duas extremidades, conforme mostrado na Figura 3.

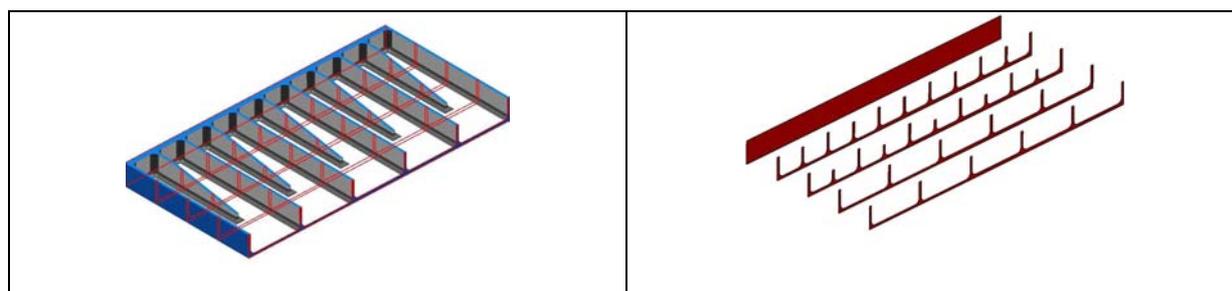


Figura 3: Perfis transversais de medição da curvatura nas peças conformadas, e para cálculo do momento de inércia.

Com os resultados da deflexão calculou-se os raios médios e então a curvatura de cada secção, utilizando-se as equações:

$$r = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \delta^2}{2 * \delta} \text{ e } r = \frac{1}{k_{11}},$$

onde r é o raio devido à deflexão após a conformação, L é a distância da base, ou, comprimento da peça, δ é a deflexão medida e k_{11} é a curvatura da peça. O retorno elástico nos 5 difentes perfís transversais da peça correspondeu então à diferença entre a deflexão da curvatura do ferramental e a deflexão da curvatura final das peças (uma média aritimética das deflexões das 3 peças nestas 5 posições).

2.2 Método de Estimativa do *Spring Back (sb)* e Deflexão Final

Para a estimativa do retorno elástico e deflexão final, utilizando-se o modelo matemático / físico proposto na literatura,⁽⁵⁾ os momentos de inércia de cada secção transversal da peça, nos mesmos perfís em que foram medidas as deflexões (Figura 3) foram calculados através de um modelo 3D gerado no ambiente do software CATIA®. Como o modelo é desenvolvido para placas de espessura constante e sem reforçadores, neste trabalho empregou-se o conceito de uma espessura constante equivalente, com um mesmo momento de inércia:

$$M^y = \frac{L * h^3}{12},$$

$$h_{eq} = \sqrt[3]{\frac{12 * M^y}{L}},$$

onde M^y é o momento de inérica de cada secção transversal, e h_{eq} é a espessura equivalente de cada uma das cinco secções transversais parametrizadas pelo momento de inércia da secção correspondente.

O módulo de rigidez à flexão (D), e os momentos de flexão inicial (M_{11}^0) e final do processo (M_{11}), para cada secção [5], foram calculados pelas expressões:

$$D = \frac{E * h^3}{12},$$

$$M_{11}^0 = D * k_{11}^0,$$

e

$$k_{11}^0 = \frac{1}{r^0},$$

onde E é o módulo de elasticidade do material ($E=10200 \text{ ksi} = 70300 \text{ MPa}$, k_{11}^0 é a curvatura inicial (igual a $0,00026667 \text{ mm}^{-1}$, para o raio inicial que é o raio do ferramental, constante e igual a 3750 mm), e o M_{11}^0 é o momento para conferir a curvatura e deflexão inicial à peça. k_{11} é a curvatura final e M_{11} é o momento para conferir a curvatura e deflexão final à peça, após o *creep age forming*. As deflexões inicial (δ^0) e final (δ), e o spring back (sb), foram calculados pelas expressões:

$$\delta^0 = \frac{M_{11}^0}{2 * D} * \left(\frac{L}{2}\right)^2,$$

$$\delta = \frac{M_{11}}{2 * D} * \left(\frac{L}{2}\right)^2,$$

$$sb(\%) = 100 * \left(1 - \frac{\delta}{\delta^0}\right),$$

3 RESULTADOS

A Figura 4 mostra as medidas de deflexão obtidas em uma das peças. Nota-se que na extremidade superior, coincidente com o reforçador transversal da peça, as deflexões foram sensivelmente menores. Observou-se ainda que as deflexões nas extremidades laterais (esquerda e direita) tiveram acentuada variação entre as três peças, devido a um leve empenamento global destas e da forma de medição. Nestas regiões, como as deflexões são próximas de zero, qualquer pequena variação na medida entre as 3 peças resulta num erro percentual elevado para a medida do retorno elástico médio. Desta forma, estes pontos foram desconsiderados no cálculo do raio de curvatura médio das secções. A Tabela 1 apresenta as deflexões médias medidas nas três peças, e a Tabela 2 traz as medidas da deflexão central ($x = 300\text{mm}$, conforme sistema de coordenadas da Figura 1A) em cada um dos perfís (secções), os raios e curvaturas médios calculados para cada secção, e outro resultado importante medido para o conceito da peça integrada com reforçadores transversais e longitudinais, que é o momento de inércia de cada secção transversal da peça.

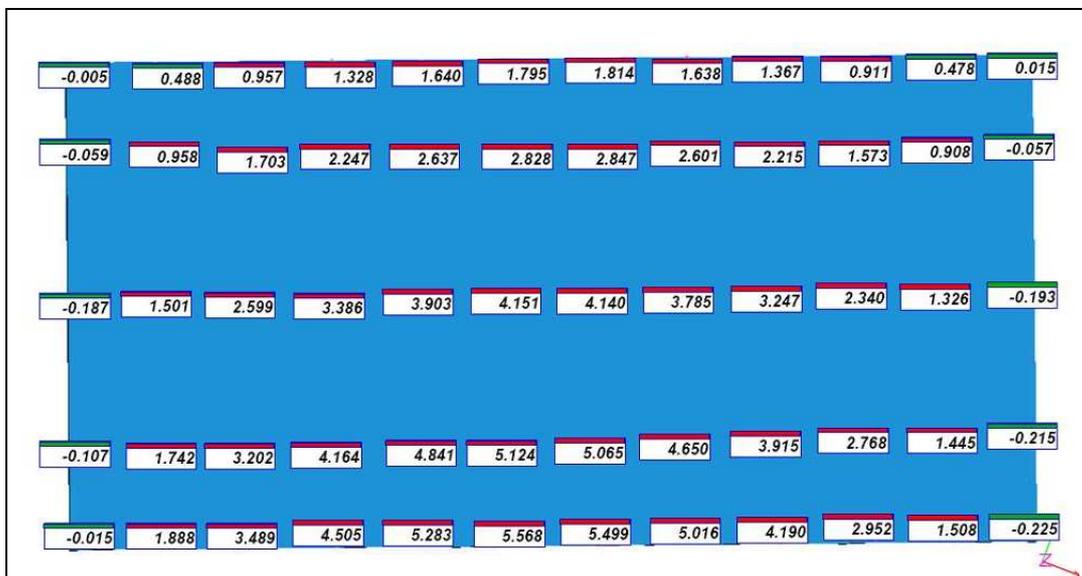


Figura 4: Medidas das deflexões na superfície de uma das peças, após a conformação [mm].



Tabela 1: Deflexões médias para as 3 peças medidas nos perfis transversais [mm]

Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5
0,48	1,08	1,56	1,74	1,84
0,93	1,78	2,58	3,08	3,39
1,30	2,33	3,30	3,99	4,48
1,59	2,69	3,78	4,64	5,24
1,73	2,89	4,03	4,92	5,52
1,73	2,91	4,02	4,88	5,48
1,58	2,69	3,73	4,53	5,09
1,30	2,34	3,24	3,87	4,29
0,88	1,76	2,46	2,91	3,20
0,46	1,07	1,49	1,60	1,63

Tabela 2: Deflexão central média entre as peças [mm], raios médios [mm] e curvaturas médias [mm^{-1}] para cada secção (perfil)

	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5
Deflexão central após CAF	1,73	2,91	4,02	4,88	5,48
Raio após CAF	26037,51	15474,23	11181,21	9222,49	8208,93
Curvatura após CAF	3,84E-05	6,46E-05	8,94E-05	10,84E-05	12,18E-05
My	5191150,00	972319,76	755869,10	687817,20	687817,20

Finalmente, com estes resultados, e com as deflexões do ferramental (para um raio de 3750 mm, conforme projeto e verificação com controle dimensional em equipamento 3D), calculou-se o retorno elástico médio (ou *spring back*, sb) para cada secção, fazendo-se uma média aritmética para as três peças, conforme a Tabela 3. Como o modelo é todo formulado para peças simples (sem reforçadores), com geometria com espessuras constantes, fez-se então uma adaptação do resultado obtido nas peças deste trabalho, calculando-se uma espessura equivalente que resultou num momento de inércia (M_y) idêntico aos momentos de inércia de cada secção apresentados na Tabela 2. Estas espessuras equivalentes calculadas estão presentes na Tabela 4.

Tabela 3: *Spring back* médio para cada secção calculado a partir das deflexões

	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5
Média sb	86,88	75,43	65,51	59,21	55,10

Tabela 4: Espessura equivalente de cada secção transversal da peça

	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5
	h_{eq1}	h_{eq2}	h_{eq3}	h_{eq4}	h_{eq5}
Espessura equivalente (h_{eq}) [mm]	47,00	26,89	24,73	23,96	23,96

O resultado do cálculo do módulo de rigidez à flexão (D), e dos momentos de flexão inicial (M_{11}^0) e final do processo (M_{11}), para cada secção, são apresentados na Tabela 5, assim como as deflexões (δ) e o retorno elástico (sb).

Tabela 5: Valores calculados do módulo de rigidez à flexão, momentos de flexão inicial e final, deflexão inicial e final

	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5
Rigidez à flexão (D) [MPa*mm³]	608039399,5	113887813,1	88534941,8	80564022,8	80564028,6
Momento fletor inicial M₁₁⁰ [N]	162143,80	30370,10	23609,30	21483,70	21483,70
Momento fletor final M₁₁ [N]	23352,40	7359,80	7918,20	8735,60	9814,20
Deflexão inicial [mm]	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Deflexão final [mm]	1,73	2,91	4,02	4,88	5,48
sb matemático	85,60	75,77	66,46	59,34	54,32

4 DISCUSSÃO

Na ausência de parâmetros de fluência para o material, nas condições empregadas neste trabalho, apenas parte do modelo proposto na literatura⁽⁵⁾ foi avaliada. Esta se refere ao cálculo da deflexão de vigas simples e dos momentos responsáveis por estas deflexões. Isto resultou num modelo bastante simples e de boa precisão. Além disso, a adequação aqui proposta, de aproximar secções transversais complexas, como as das peças utilizadas neste trabalho, para secções simples de mesmo momento de inércia (através de uma espessura equivalente) mostrou-se bastante adequada. Os resultados de retorno elástico medidos experimentalmente tiveram valores bastante satisfatórios quando comparados com os valores calculados (maior diferença absoluta de 1,28). A Tabela 6 apresenta os valores de *spring back* calculados e medidos experimentalmente, para fins de comparação. São apresentados também os desvios percentuais absolutos e relativos.

Tabela 6: *Spring back* calculado, empírico, diferença em valor absoluto [%] e diferença relativa em valor percentual

	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5
sb matemático	85,60	75,77	66,46	59,34	54,32
sb empírico	86,88	75,43	65,51	59,21	55,10
diferença	-1,28	0,34	0,95	0,13	-0,78
diferença (%)	-1,50	0,451	1,43	0,21	1,44

Vale ressaltar que o modelo tomado como referência da literatura utiliza como uma de suas entradas o parâmetro curvatura final obtida através de equações constitutivas de relaxação de tensões por mecanismos de fluência e envelhecimento. Como já mencionado, nesse trabalho, estes valores de entrada foram tomados a partir da medição de peças reais, e ainda assim uma boa correlação foi observada.

Como regra geral, a literatura mostra que a quantidade de retorno elástico tende a diminuir com o aumento da espessura em placas de secção transversal constante. Neste trabalho este efeito não é explícito, uma vez que o efeito da rigidez da peça (composta por reforçadores longitudinais e um transversal) é mais significativo. Além disso, no presente trabalho foram conformadas peças cujas secções transversais

variam ao longo do comprimento (eixo Y). As maiores espessuras absolutas ou equivalentes (neste momento faz-se importante a utilização deste termo aqui definido como espessura equivalente), são também as de maior rigidez, e todas as secções estão ligadas entre si mecanicamente por fazerem parte de uma única peça. Desta forma o efeito da rigidez das secções adjacentes está presente em todas as secções existentes, o que não foi considerado neste trabalho. Isto seria recomendável para um aumento na precisão da estimativa do retorno elástico e possibilitando que a compensação no raio do ferramental seja suave e contínua para cada incremento infinitesimal na direção Y. Esta abordagem é fundamental na medida em que a complexidade das peças aumenta. Espera-se, por exemplo, que uma boa correlação entre o modelo proposto (incluindo as adaptações empregadas neste trabalho) e peças com dupla curvatura, do tipo “sela”, muito comuns no setor aeronáutico.

Com relação à liga Al7475, o *creep age forming* empregado no segundo estágio do superenvelhecimento (condição T73) mostrou-se satisfatório. Deflexões significativas foram obtidas, mesmo para uma peça de elevada rigidez como a empregada neste trabalho. Assim, espera-se que o processo seja satisfatório para a confecção de peças reais, de curvaturas suaves, porém complexas. Como o processo ocorreu dentro de um ciclo de tempo e temperatura compatível com as melhores práticas de envelhecimento, espera-se que as propriedades mecânicas da peça conformada sejam igualmente satisfatórias.

5 CONCLUSÃO

O método empregado para a estimativa do retorno elástico, incluindo as adaptações deste trabalho, é válido para a liga Al7475, dentro do ciclo de envelhecimento recomendável. As deflexões experimentalmente medidas foram consistentes com os valores previstos e sua magnitude foi suficiente para conformar peças reais. Observou-se ainda que o retorno elástico varia significativamente com a rigidez e o momento de inércia de secções adjacentes.

O método empregado e suas adaptações que envolvem a introdução do conceito de espessura equivalente para a conversão de secções transversais complexas para simples (de espessura constante) apresentou ótima correlação com os resultados experimentais. A máxima diferença absoluta de 1,28% observada no retorno elástico garante que a compensação no ferramental seja precisamente estimada, garantindo uma peça final com boa precisão geométrica.

No presente trabalho, ficou constatado que a fabricação de peças com geometria complexa, incluindo reforçadores perpendiculares e paralelos à direção da curvatura, é possível através do processo de *creep age forming*, na liga Al7475, simultaneamente ao segundo estágio do envelhecimento para a condição T73. A estimativa do retorno elástico, que garante a confecção de ferramentais que garantam a curvatura final desejada para a peça, é também possível, através de uma metodologia simples e rápida.

Agradecimentos

À Dra. Danieli A. P. Reis (ITA) pelo conhecimento compartilhado e incentivo, Mário H. Garcia, Zildo de Abreu, William R. S. Assis, Edson Cintra (Embraer) pela preparação das peças e confecção das bolsas de vácuo, Donizetti G. da Silva e Fernanda de Andrade (Embraer) pela programação e execução da conformação em

autoclave e Ricardo M. Melo (Embraer), responsável pelo projeto da peça no CATIA®. Um agradecimento especial aos co-autores do trabalho e a todos os colaboradores e incentivadores deste projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 HOLMAN, M. C. Autoclave age forming large aluminum aircraft panels. *Journal of Mechanical Working Technology*, v. 20, p. 477-488, 1989.
- 2 BREWER, H. Age forming integrally stiffened aluminum aerospace structures in an autoclave. AIAA-89-2087 – AIAA/AHS/ASEE Aircraft Design, Systems and Operations Conference, p. 6-8, Seattle 1989.
- 3 NARIMETLA, S. P., PEDDIESTON, J., BUCHANAN, G. R. A simple unified age formig model. *Materials Research Communications*, v. 27, n. 6, p. 631-636, 2000.
- 4 HO, K. C., LIN, J., DEAN, T.A. Constitutive modelling of primary creep for age forming a aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* v. 153-154, p. 122-127, 2004.
- 5 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.
- 6 ADASHI, T., KIMURA, S. NAGAYAMA, T., TAKEHYSA, H., SHIMANUKI, M. Age forming technology for aircraft wing skin. *Materials Fórum*, v. 28, p. 202-207, 2004.
- 7 ROBEY, R. F., PRANGNELL, P. B., DIF, R. A comparison of the stress relaxation behaviour of three aluminium aerospace alloys for use in age-forming applications. *Materials Fórum*, v. 28, p. 132-138, 2004.
- 8 STARINK, M. J., GAO, N., KAMP, N., WANG, S. C., PITCHER, P. D., SINCLAIR, I. Relations between microstructure, precipitation, age-formability and damage tolerance of Al-Cu-Mg-Li (Mn, Zr, Sc) alloys for age forming. *Materials Science and Engineering A*, v. 48, p. 241-249, 2006.
- 9 SAE AMS 4202D: Aluminum Alloy Plate 5.7Zn - 2.2Mg - 1.6Cu - 0.22Cr (7475-T7351) Solution Heat Treated, Stress Relieved by Stretching, and Precipitation Heat Treated - UNS A97475. SAE International, 2005.
- 10 SAE AMS 2770H: Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloy Parts. SAE International, 2006.
- 11 SAE AMS 2772E: Heat Treatment of Aluminum Alloy Raw Materials. SAE International, 2008.