

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

WALLAS WEINER DA SILVA

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA E
ENVELHECIMENTO APLICADO A CHAPAS DE ALUMÍNIO CURVAS COM E
SEM REFORÇO LONGITUDINAL**

São Bernardo do Campo

2012

WALLAS WEINER DA SILVA

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA E
ENVELHECIMENTO APLICADO A CHAPAS DE ALUMÍNIO CURVAS COM E
SEM REFORÇO LONGITUDINAL**

Dissertação apresentada ao Centro
Universitário da FEI, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica,
orientado pelo Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

São Bernardo do Campo

2012



Centro Universitário da FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Wallas Weiner da Silva

Matrícula: 209122-1

Título do Trabalho: **Simulação do processo de conformação por fluência e envelhecimento aplicado a chapas de alumínio curvas com e sem reforço longitudinal.**

Área de Concentração: Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Data da realização da defesa: 4 / Junho / 2012

ORIGINAL ASSINADA

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 4 / junho / 2012.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: _____

Prof. Dr. Sergio Delijaicov

Ass.: _____

Prof. Dr. José Roberto Berretta

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Bortolussi pelo apoio, orientação e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer também ao Mestrando Felipe Mariano Brandão pelo apoio, principalmente durante a execução da parte experimental.

A minha esposa pela compreensão e apoio dado nos momentos de dificuldades.

RESUMO

O processo de conformação de chapas de alumínio por fluência e envelhecimento, também conhecido como *creep age forming* – CAF tem sido utilizado na indústria aeroespacial para a fabricação de componentes de painéis com geometria complexa, principalmente painéis das asas de aeronaves. Através deste processo, é possível envelhecer e conformar o alumínio simultaneamente, melhorando as características mecânicas do material, especialmente do ponto de vista de fadiga, e reduzindo significativamente os custos de fabricação. O CAF baseia-se na complexa combinação de relaxação da tensão por fluência e endurecimento por envelhecimento. Uma das características deste processo é que os valores do retorno elástico costumam ser altos, e isso representa um grande desafio para a fabricação dos painéis. Portanto, faz-se necessário desenvolver métodos para se prever qual o valor total deste retorno elástico, para que se possa saber o formato da ferramenta que ao final do processo de fabricação forneça um produto com a geometria desejada. Neste trabalho buscou-se desenvolver um modelo de elementos finitos para que se possa prever o retorno elástico e estudar o campo de tensões residuais na chapa. Foram criados dois modelos de elementos finitos - um com reforçador longitudinal e outro sem - para se investigar o efeito da geometria no valor do retorno elástico. Por fim, os resultados obtidos através da simulação numérica foram comparados com os resultados experimentais obtidos, e a validade deste método foi discutida criticamente. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios para a previsão do retorno elástico.

Palavras-chave: Fluência. Envelhecimento artificial. Elementos finitos.

ABSTRACT

The Creep Age-Forming (CAF) process has been used in the aerospace industry to manufacture complex-shaped panel components, mainly aircraft wing skins. Through this process, the forming and aging of aluminum alloys can be accomplished at the same time, improving material performance, especially the fatigue life, and significantly reducing manufacturing costs. The CAF process is based on the complex combination of stress relaxation, creep and age-hardening. This process is characterized by huge spring-backs, which represent a challenge for manufacturing the components. Therefore, it is necessary to develop methods to predict the amount of springback, in order to develop a forming tool that will return parts with the desirable geometry at the end of the manufacturing process. The main objective of this work is to develop a finite element model that will predict the amount of springback and allow the study of residual stress on the plate. Two different models were analyzed - one with a stringer and another without it - in order to evaluate the geometry effect in the amount of springback. At the end, the finite element analysis results are compared to experimental data, and the method evaluation is discussed. The obtained results showed to be good to predict the spring back.

Key words: Creep. Age. Finite elements.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cálculo da flecha inicial	51
Tabela 2: Tabela de carregamento em função do tempo para o modelo sem reforçador	53
Tabela 3: Tabela de carregamento em função do tempo para o modelo com reforçador.....	54
Tabela 4: Resultados da simulação.....	60
Tabela 5: Flecha aplicada experimentalmente.....	61
Tabela 6: Dados experimentais de flecha após 24 horas	62
Tabela 7: Retorno elástico obtido experimentalmente	64
Tabela 8: Retorno elástico obtido por simulação	64
Tabela 9: Retorno elástico obtido por simulação	65
Tabela 10: Retorno elástico obtido por simulação comparado ao obtido experimentalmente.	65
Tabela 11: Flechas finais obtidas por simulação comparadas às obtidas experimentalmente .	66

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Curva de fluência – primeiro e segundo estágios	15
Figura 2 – Relaxação de tensão	15
Figura 3 – Primeira etapa: painel sobre a ferramenta antes da deformação	16
Figura 4– Segunda etapa: Painel sob carregamento conformado à ferramenta.....	17
Figura 5 – Terceira etapa: Painel com formato final após retirar o carregamento – após o retorno elástico	17
Figura 6 – Distribuição de tensões no material	20
Figura 7: Distribuição de tensões num corpo conformado a frio	21
Figura 8: Distribuição de tensões num corpo conformado pelo CAF	22
Figura 9 – Retorno Elástico	23
Figura 10: Comparação da distribuição de regiões de pouca fluência e significativa fluência em chapas com espessuras diferentes	24
Figura 11 – Curva de Fluência	26
Figura 12 - Efeito da tensão e da temperatura no comportamento à fluência	27
Figura 13 – Deformação plástica após descarregamento	28
Figura 14 – Ferramenta ajustável multi-pinos	29
Figura 15 – Ferramenta de superfície de “grampo”	30
Figura 16 – Ferramenta de nervuras soldadas	31
Figura 17 – Molde CAF para painel de asa do Gulfstream G-5.....	32
Figura 18 – Ferramenta com nervuras ajustáveis	33
Figura 19 – Imagem de CAD do ferramental das asas do A380	33
Figura 20 – Imagem de CAD do ferramental das asas do A380 sem a superfície superior	
Fonte: Bennett Associates. http://www.bennettmg.co.uk/Project_MD_Airbus.aspx	34
Figura 21 – Diagrama de fases hipoeutético	36
Figura 22 – Representação esquemática de vários estágios da formação do precipitado. (a) solução sólida supersaturada, (b) fase precipitada de transição, (c) fase de equilíbrio dentro da fase matriz.....	37
Figura 23 – Imagem de microscopia eletrônica mostra (1) liga envelhecida convencionalmente e (2) liga envelhecida sob tensão.....	38
Figura 24 – Estado geral de tensões	40
Figura 25: Ilustração de duas iterações do método de Newton-Raphson.....	42
Figura 26 – Modelo de elementos finitos de CAF	44

Figura 27 – Modelo de elementos finitos de CAF – curvatura cilíndrica	45
Figura 28 – Modelo de elementos finitos de CAF – curvatura esférica	45
Figura 29 – Ferramental para teste CAF com flexão em quatro pontos e diagramas de foga cortante e momento fletor	47
Figura 30 – Ferramental utilizado para flexão em quatro pontos.....	49
Figura 31 – Esquema de aplicação de cargas no corpo de prova	49
Figura 32 – Perfil do modelo sem reforçador. Comprimento de 200 mm.....	50
Figura 33 – Perfil do modelo com reforçador. Comprimento de 200 mm.....	50
Figura 34 – Modelo de elementos finitos para curvatura simples sem reforçador.....	52
Figura 35 – Modelo de elementos finitos para curvatura simples com reforçador.	52
Figura 36: Tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa.....	55
Figura 37: Tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa.....	55
Figura 38: Relaxação de tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa.....	56
Figura 39: Tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa.....	56
Figura 40: Flecha inicial na geometria simples – nível de referência: 220 MPa.....	57
Figura 41: Flecha inicial na geometria simples – nível de referência: 220 MPa.....	57
Figura 42: Tensão inicial na geometria simples – nível de referência: 300 MPa.....	58
Figura 43: Tensão inicial na geometria com reforçador – nível de referência: 300 MPa	58
Figura 44: Detalhe da tensão inicial na geometria com reforçador – nível de referência: 300 MPa.....	59
Figura 45: Detalhe da tensão inicial na geometria com reforçador – nível de referência: 300 MPa.....	59
Figura 46 – Ferramental de flexão em quatro pontos com o corpo de prova conformado na estufa.....	61
Figura 47 – Medição da Flecha	62
Figura 48 – Medição da Flecha	63
O gráfico na figura 49 mostra a curva do flecha final de acordo com a tensão aplicada dos dados obtidos experimentalmente para o CDP com reforço longitudinal.	65
Figura 49 – Flecha final <i>versus</i> tensão de referência.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_c - Deformação por fluência

t – tempo

σ – tensão de carregamento aplicada

σ_1 - tensão inicial

σ_2 – tensão final após a relaxação

$\dot{\epsilon}$ - taxa de deformação por fluência

ϵ_{in} - Deformação inelástica

ϵ_e - Deformação elástica

ϵ_T - Deformação total

a - Constante do material

R - Constante universal dos Gases

T - Temperatura

Q - Energia de ativação

u = Vetor deslocamento

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - tensões normais

τ_{xy}, τ_{yz} e τ_{zy} - tensões de cisalhamento no plano

E – módulo de elasticidade do material

ν – coeficiente de Poisson

G – módulo de elasticidade transversal

K = Matriz de rigidez do elemento

F = Carregamento aplicado

d – distância do ponto de aplicação

I_{Total} = momento de inércia total

A – área

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	O processo de conformação por fluência e envelhecimento (Creep Age Forming - CAF)	14
2.2	O mecanismo de fluência	25
2.3	HISTÓRICO DO CAF	28
2.4	Mecanismo de endurecimento por envelhecimento	35
2.5	Aplicação do método dos elementos finitos em CAF	38
2.5.1	O método de Elementos finitos em CAF.....	38
2.5.2	Relações tensão-deformação	39
2.5.3	O método de Newton-Raphson	42
2.5.4	Modelamento do material.....	43
2.5.4.1.	O modelo proposto por Lin (2007).....	43
2.5.4.2.	Os modelos propostos por Ho	45
2.5.4.3.	O modelo de flexão em quatro pontos.....	46
2.5.4.4.	Modelagem utilizada na simulação	47
3.	MODELOS UTILIZADOS	49
3.1	Obtenção da Flecha Inicial	51
3.2	Geração da Análise.....	52
3.3	Resultados obtidos.....	54
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	61
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	64
6.	CONCLUSÕES	67
	BIBLIOGRAFIA	68

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A crescente demanda da indústria aeroespacial pelo desenvolvimento de materiais com melhor desempenho – isto é, materiais com maior resistência e menor peso - com geometrias complexas e a custos mais baixos levou à pesquisa de métodos de conformação de chapas mais eficazes do que os tradicionais. Um destes processos, desenvolvido na década de 80, é o de conformação por fluência e envelhecimento, ou *creep age forming* – CAF (HOLMAN, 1989). Este processo tem sido utilizado pela indústria para a fabricação de grandes painéis de asas, pois estes apresentam uma curvatura aerodinâmica complexa e espessuras variáveis ao longo da envergadura e da corda da asa. Exemplos da aplicação desta tecnologia para a fabricação dos painéis superiores das asas podem ser encontrados em diversas aeronaves, como do executivo Gulfstream IV, o bombardeiro estratégico supersônico B-1B Lancer, os comerciais Airbus A330/340 e, mais recentemente, o A380 (JEUNECHAMPS et al. 2006).

Esta técnica de fabricação utiliza uma combinação de pressão e calor em autoclave, onde se aplica uma pressão uniforme em toda a superfície do painel, possibilitando a obtenção de formas mais complexas. Fundamentalmente, baseia-se em um fenômeno de relaxação da tensão no material, devido ao mecanismo de fluência termicamente ativado durante o tratamento de envelhecimento artificial. Com isso, obtém-se simultaneamente a conformação e o endurecimento da chapa. Uma de suas principais vantagens é que a estrutura final possui valores de tensão residual menores, se comparado com estruturas obtidas por meios tradicionais (JEUNECHAMPS et al. 2006).

Devido ao fato de que a curvatura nos componentes aeroespaciais costuma ser relativamente pequena, a deformação que o painel sofre é elástica. Esse é o principal problema para se aplicar o CAF; o retorno elástico da chapa quando se remove o carregamento e ela é resfriada no final do processo de fabricação. Assim, a forma final do painel é algo entre sua forma original e a forma da ferramenta utilizada. A conformação por fluência e envelhecimento costuma apresentar elevados valores de retorno elástico, o que significa que a geometria a ser empregada na ferramenta não é exatamente igual àquela que se deseja aplicar ao painel. Portanto, é necessário se calcular o valor total do retorno elástico ao final do processo para que se possa determinar a geometria da ferramenta a ser empregada.

O objetivo deste trabalho é estudar as características do CAF, para que se possa compreender como ele funciona e as variáveis envolvidas no processo bem como sua influência no resultado da peça final. Para isso, é inicialmente feita uma revisão da literatura, com o estudo de artigos publicados sobre o tema e um levantamento de propriedades para modelagem em um programa comercial de elementos finitos. Existe muita pesquisa sobre este tema, e basicamente, todas estão focadas em ligas de alumínio, pois estas são as que melhor se enquadram nos requisitos aeroespaciais de baixo peso, tolerância ao dano e resistência à fadiga e à corrosão.

Em seguida, é feita a implementação em elementos finitos para se avaliar o *retorno elástico* em um modelo de curvatura cilíndrica simples e outro com um reforço longitudinal; estes modelos são estudados para se avaliar o efeito do reforço no resultado obtido. O programa utilizado para o processamento destes modelos foi o MSC/Marc. Para o pré e pós-processamento foi utilizado o MSC/Patran.

Embora este estudo aborde modelos de curvatura cilíndrica com e sem reforço, como o mecanismo de fluência é similar, suas conclusões podem posteriormente ser aplicadas para a fabricação de painéis com geometrias mais complexas, com as devidas considerações que se fizerem necessárias.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir é feita uma breve revisão dos artigos e textos conhecidos, e montado um breve histórico do desenvolvimento do método CAF.

2.1 O processo de conformação por fluência e envelhecimento (Creep Age Forming - CAF)

Para se obter um melhor desempenho em termos de aerodinâmica, as aeronaves projetadas nos últimos anos adotam configurações complexas de perfis de asas, onde a geometria tanto na direção da corda quanto da envergadura têm uma combinação complicada. Para que o desempenho dessas asas seja realmente melhorado, elas precisam ser formadas em uma única peça, o que leva o componente a ter um desempenho aerodinâmico superior, além de apresentar menor peso e conseqüentemente menor custo.

Para se atingir este objetivo, o método de conformação por fluência e envelhecimento (*creep age forming*) foi desenvolvido como uma alternativa aos métodos tradicionais de conformação mecânica para a fabricação de grandes painéis de seções de asas com geometria complexa, utilizando na maioria das aplicações alumínio aeronáutico de elevada resistência. Neste processo, o painel é submetido a uma temperatura em que possa sofrer o processo de envelhecimento artificial ao mesmo tempo em que é conformado.

Um vácuo é criado entre o painel e a ferramenta, e o painel é submetido a uma pressão constante, que o força a ser conformado na ferramenta, enquanto isso, no interior do material, começa a formar um precipitado, devido ao efeito do tratamento térmico. A elevação da temperatura é tipicamente uma forma de se provocar a fluência no metal. O grau de deformação permanente obtido pelo mecanismo de fluência depende da tensão inicial aplicada no painel, da temperatura e da composição do material em si.

O CAF é foi concebido para se moldar chapas trabalhando no primeiro e segundo estágios da curva de fluência, por que nesta região da curva a chapa retém a maior parte da deformação (HO; LIN; DEAN, 2004). A Figura 1 a seguir mostra esses dois estágios da curva de fluência (fluência primária e secundária)

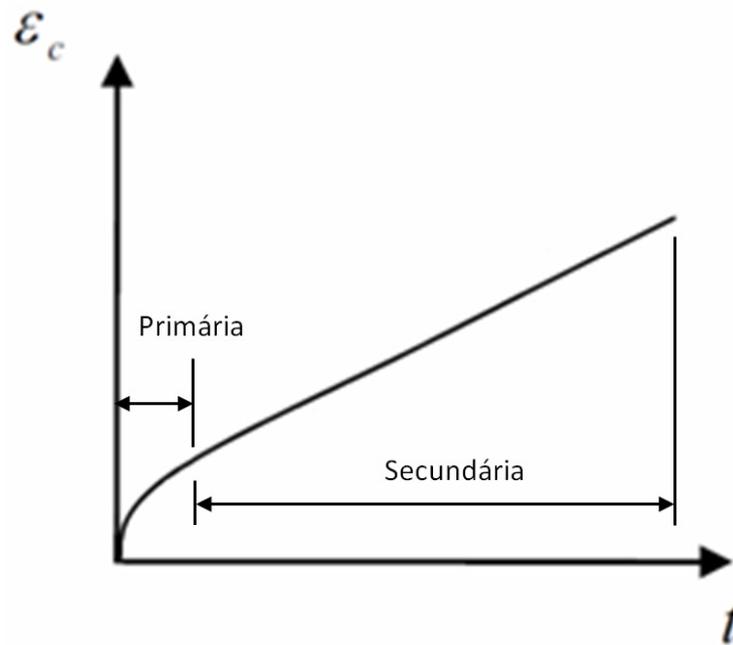


Figura 1 Curva de fluência – primeiro e segundo estágios
 Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 4

Com a relaxação do material, consegue-se manter uma parcela da deformação. O gráfico da Figura 2 mostra o efeito da relaxação de tensão, com a queda no nível de tensão do material de um valor σ_1 para um valor σ_2 , em função do tempo. A tensão inicialmente aplicada σ_1 é mantida por um período no qual o material é submetido a uma elevação de temperatura.

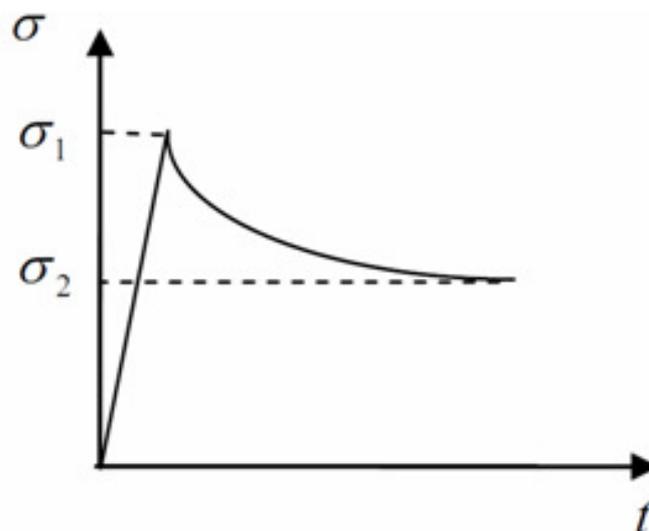


Figura 2 – Relaxação de tensão
 Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 4

A princípio, com um tempo muito longo de exposição à alta temperatura e o carregamento do painel, a relaxação do material seria total e a conformação do painel à ferramenta seria completa. Todavia, como o tempo e os ciclos de temperatura são limitados, similares ao que a indústria utiliza no processo de envelhecimento artificial, a deformação que o painel sofre não é permanente (não toda a deformação, apenas parte dela).

Assim sendo, o componente não adquire a forma da ferramenta, apresentando um retorno devido à eliminação da deformação elástica. Todavia, trabalhos anteriores mostram que a deformação por fluência surge principalmente no início do carregamento do painel, e que um aumento no tempo de exposição não significa um grande aumento de deformação plástica acumulada (HO; LIN; DEAN, 2004).

A aplicação do CAF na indústria depende da compreensão destes dois fenômenos (fluência e envelhecimento) que ocorrem simultaneamente. Como este método comprovadamente pode trazer redução de custos e melhora no desempenho do material, seu uso tem se tornado mais frequente, e por isso diversas pesquisas tem sido realizadas na área.

O processo de CAF ocorre em três etapas (ZHAN; LIN; DEAN, 2011):

1. Um painel plano é colocado sobre o molde, normalmente uma ferramenta côncava, cuja superfície foi projetada para compensar o retorno elástico após o processo. Então é criado vácuo entre as duas superfícies, do painel e da ferramenta, para que o painel se conforme ao molde devido à pressão na superfície superior, que pode tanto ser pressão da autoclave quanto de um ferramental mecânico. Essa etapa induz uma deformação elástica a Figura 3 ilustra esta etapa do processo.

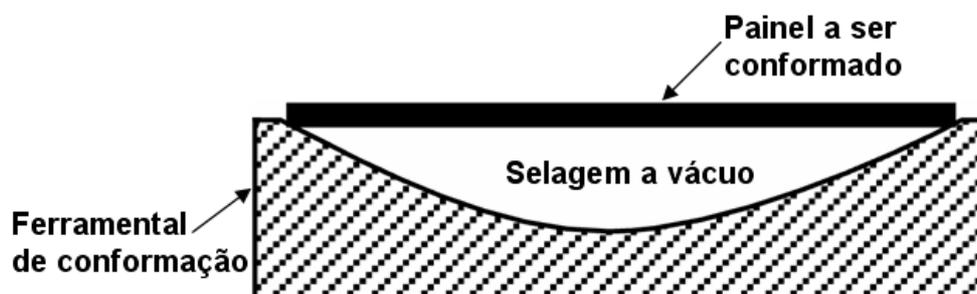


Figura 3 – Primeira etapa: painel sobre a ferramenta antes da deformação
Fonte: Holman M C, 1989, p. 479

2. A peça deformada, juntamente com a ferramenta é colocada num forno e aquecida à temperatura de envelhecimento necessária para o tratamento térmico da liga, onde permanece por um período entre vinte e quarenta e oito horas. Uma forma mais prática é fazer esse carregamento em uma autoclave, com sistema de pressão controlado. Assim, o painel é forçado até o contato com a ferramenta, enquanto o material passa pelo tratamento térmico. Esta etapa do processo é ilustrada pela Figura 4:

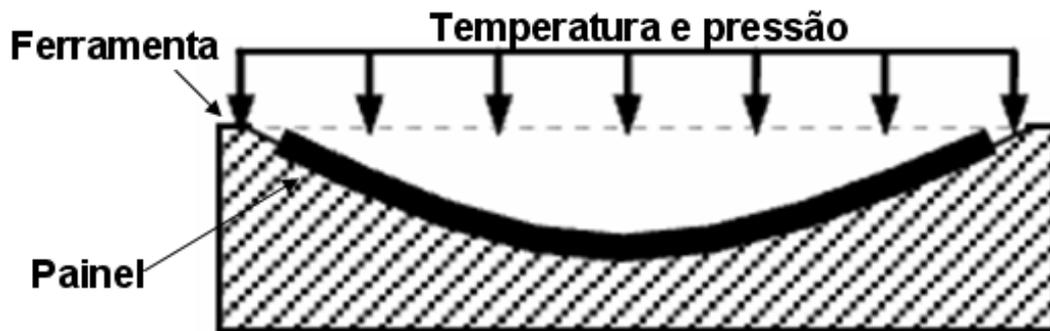


Figura 4– Segunda etapa: Painel sob carregamento conformado à ferramenta
Fonte: Holman M C, 1989, p. 479

3. Por fim, após o envelhecimento artificial, a temperatura é reduzida à temperatura ambiente e a pressão é retirada e a chapa liberada, o que permite um retorno elástico de uma parte da deformação sofrida pelo painel, conforme mostrado na Figura 5. As fases de carregamento e descarregamento são caracterizadas por uma resposta elástica da liga, enquanto no envelhecimento artificial a principal característica é uma deformação por fluência.

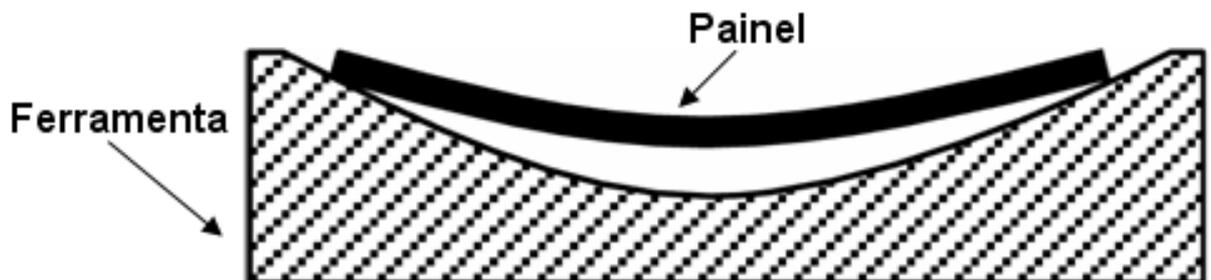


Figura 5 – Terceira etapa: Painel com formato final após retirar o carregamento – após o retorno elástico
Fonte: Holman M C, 1989, p. 479

O grande problema é que o retorno elástico no CAF é elevado comparado a técnicas tradicionais de fabricação, ficando na ordem de 65-80% (HO; LIN; DEAN, 2004), o que

torna difícil determinar a geometria exata da peça final, sendo ainda pior nos casos de painéis com dupla curvatura e espessura variável. Desta forma, para se chegar ao formato da ferramenta que servirá para se produzir a peça desejada, há uma série de testes e alterações de moldes, o que eleva consideravelmente o custo. Existe, portanto, uma grande necessidade em se desenvolver métodos computacionais para se prever o retorno elástico com precisão, garantindo um componente produzido dentro de apertadas tolerâncias, bem como a repetibilidade do processo de fabricação.

Deve-se notar que o material sofre carregamento em que a deformação resultante encontra-se ainda dentro do regime elástico, pois o raio de curvatura não é grande o suficiente para causar deformação plástica. Portanto, a deformação permanente sofrida pelo material é resultado da relaxação de tensão pela fluência e de uma alteração na estrutura interna do material durante a exposição à temperatura da autoclave, pois os elementos constituintes da liga se precipitam e alteram a sua microestrutura.

Comparativamente com métodos convencionais de conformação, o CAF apresenta as seguintes vantagens (ZHAN; LIN; DEAN, 2011):

- a) Baixa tensão residual nas chapas conformadas, o que aumenta a resistência do material à fadiga, à corrosão e também melhora a estabilidade (geométrica) do componente;
- b) aplicação de baixa tensão na conformação, pois as chapas são solicitadas em níveis de tensão abaixo do limite de escoamento do material, o que reduz os problemas associados ao processo tradicional de conformação de chapas, como a ocorrência de trincas, instabilidade plástica ou ruptura;
- c) o custo de ferramental pode ser significativamente mais baixo. No processo convencional, para se produzir grandes painéis, grandes prensas de alta capacidade, extremamente caras, são necessárias. Já no CAF, a ferramenta utilizada é mais barata, e pode-se utilizar o mesmo forno que se usa para tratamento térmico da chapa. Todavia, com a utilização da autoclave os custos podem ficar bem maiores.

- d) parte do processo de fabricação pode ser simplificado, uma vez que a conformação e o tratamento térmico da chapa ocorrem ao mesmo tempo.
- e) durante o envelhecimento artificial, o precipitado surge de forma orientada, na direção do carregamento. Isso aumenta a resistência da liga e fornece um meio de se controlar a anisotropia de ligas de alta resistência.

O CAF também apresenta algumas desvantagens, que limitam os tipos de componentes para os quais pode ser utilizado, entre as quais (ZHAN; LIN; DEAN, 2011):

- a) Somente pode ser utilizado para metais que passam pelo processo de envelhecimento artificial, como as ligas de alumínio das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX. Existe a possibilidade de se utilizar em outros metais que apresentem fluência significativa, desde que utilizem algum tipo de tratamento térmico para se melhorar propriedades mecânicas.
- b) Necessita de um ciclo longo para fabricar o componente, portanto somente pode ser utilizado para uma peça por vez ou então em pequenas quantidades de componentes.
- c) Dificuldade para se prever o inevitável retorno elástico, para se fabricar a ferramenta com a geometria correta, que fornecerá o componente com a geometria desejada ao final do processo.
- d) A formação do precipitado orientado na direção da aplicação da tensão reduz o limite de escoamento de algumas ligas, comparativamente com outras envelhecidas sem aplicação de forças externas.

Devido às características deste processo, o painel a ser trabalhado não é preso nas extremidades da ferramenta. Assim, a deformação que ele sofre é muito próxima de flexão pura, com baixa tensão aplicada. Portanto, ao final do processo, o painel terá baixa tensão superficial residual, mas terá ainda tensões compressivas em seu interior. Isto é um efeito desejável para um componente que sofrerá esforços de fadiga.

Tomando como exemplo o painel da Figura 6, vê-se que a superfície que está em contato com a ferramenta está sob tração e a superfície interna está sob compressão. Assim, percebe-se pelo gráfico de distribuição de tensões que as maiores tensões são sentidas pelas camadas mais externas do material.

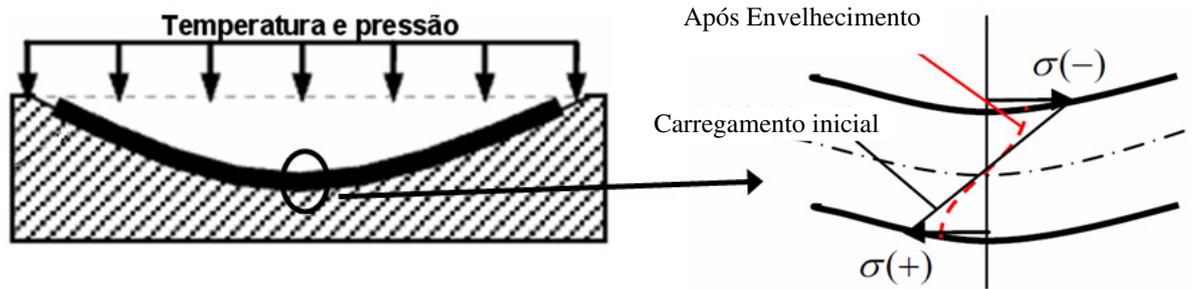


Figura 6 – Distribuição de tensões no material
 Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 4

Quando um corpo é carregado de forma que as tensões sobre ele estão dentro do limite de escoamento do material, assim que o carregamento for removido o corpo retornará ao seu estado inicial, portanto não haverá nenhuma mudança na sua geometria. Assim, para que se obtenha realmente uma mudança de geometria, pelos métodos tradicionais, é preciso que uma porção significativa do corpo sofra tensões acima do limite de escoamento. Após sofrer um carregamento acima de seu limite de escoamento, a relação entre tensão e deformação passa a não ser mais proporcional. Quando o carregamento é removido, a curva tensão-deformação é deslocada, mas sua inclinação é a mesma, ou seja, o módulo de elasticidade do material é o mesmo. A Figura 7 ilustra este efeito.

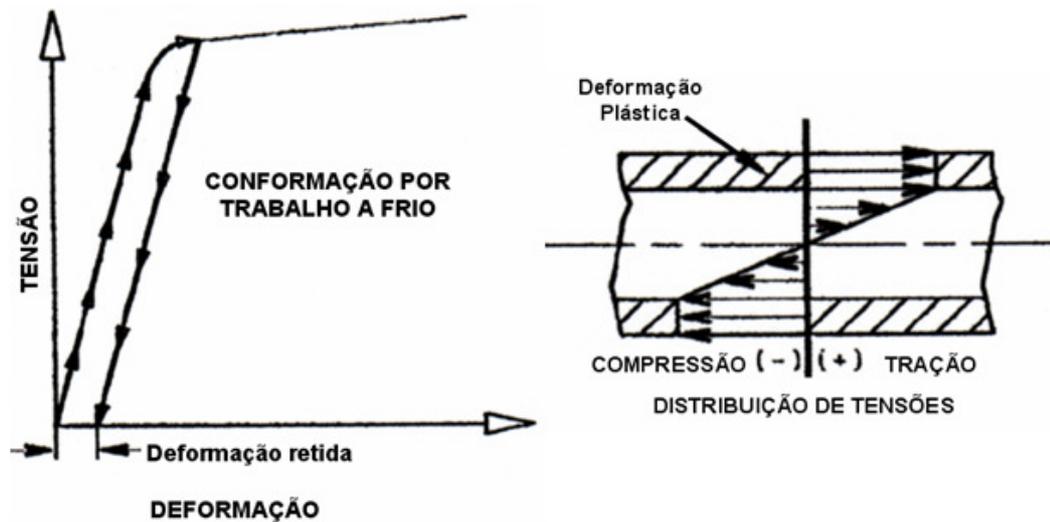


Figura 7: Distribuição de tensões num corpo conformado a frio
 Fonte: Holman M C, 1989, p. 481

Por outro lado, pode-se obter vantagens utilizando-se o método CAF. Considerando-se o painel da Figura 6, em que a superfície em contato com a ferramenta está sob tração, se o painel for conformado até uma geometria determinada, ainda com tensões atuando abaixo do limite de escoamento, não serão induzidas tensões na sua superfície, pois o CAF baseia-se no fenômeno da relaxação de tensão.

Assim, com o painel mantido nesta forma durante o ciclo de envelhecimento artificial, devido à exposição à temperatura, o nível de tensão na superfície do material irá reduzir, mesmo com a deformação permanecendo a mesma. A taxa de relaxação pode ser influenciada pelo nível de tensão inicial aplicado e pela temperatura. No entanto, estes fatores são limitados pelo limite de escoamento do material (deve-se trabalhar abaixo dele) e pelo ciclo de envelhecimento artificial selecionado. Uma vez que o ciclo de envelhecimento artificial estiver concluído, o carregamento é removido e o corpo é resfriado, o que permite um retorno elástico de parte da deformação, permanecendo apenas o montante de deformação relacionado à relaxação do material (HOLMAN, 1989),, como ilustra a Figura 8.

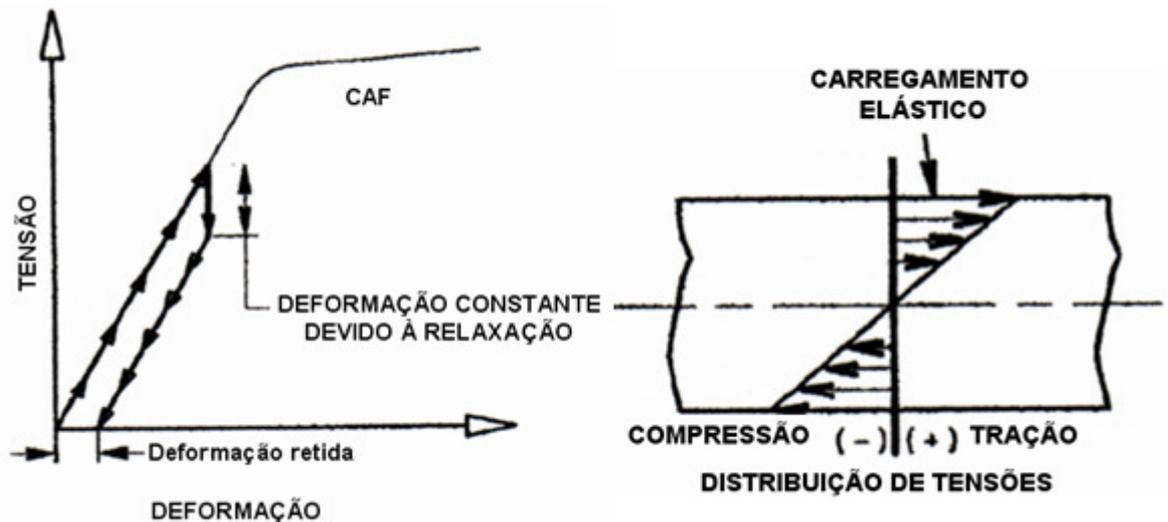


Figura 8: Distribuição de tensões num corpo conformado pelo CAF
 Fonte: Holman M C, 1989, p. 481

É importante perceber que o módulo de elasticidade do material é reduzido com o aumento da temperatura. Isso afeta a inclinação da curva tensão-deformação no descarregamento da chapa. Percebe-se também que ao final do processo não haverá tensões residuais atuando no corpo, como no caso do trabalho a frio – na verdade, a tensão residual não é completamente eliminada, mas bastante reduzida, devido ao retorno elástico.

Para substanciar este fato, Holman (1989) demonstrou os diferentes níveis de tensão em barras de 12,7 mm de alumínio 7075 conformadas num mesmo raio de curvatura por meio de diferentes métodos – conformação a frio, conformação a frio com posterior envelhecimento artificial, estampagem, estampagem com posterior envelhecimento artificial e CAF (HOLMAN, 1989). Depois de conformadas, os níveis de tensão residual foram medidos utilizando o método do furo cego (ASTM E 837-85) e os menores níveis de tensão residual foram encontradas na barra submetida ao método CAF.

O total de retorno elástico que ocorrerá na peça, conforme mostrado na Figura 9, é definido por diferentes fatores:

- a) O comportamento do material em fluência à temperatura elevada;
- b) a espessura da chapa;
- c) a tensão de carregamento inicial;
- d) a temperatura de exposição;
- e) o tempo de exposição;
- f) a curvatura da chapa e da ferramenta utilizada.

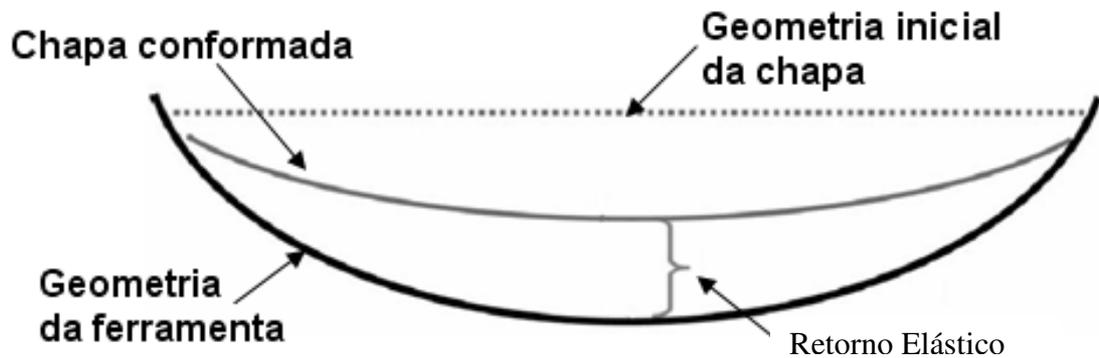


Figura 9 – Retorno Elástico
 Fonte: Ho; Lin; Dean, 2004, p. 741

Mudando-se as condições de carregamento, a espessura da chapa e utilizando-se materiais diferentes (propriedades diferentes), o retorno elástico pode variar, mas não pode ser totalmente eliminado, pois o tempo de aplicação da tensão e exposição à temperatura é limitado. Teoricamente, para que o material sofresse um relaxamento completo, seria necessário um tempo infinito de tratamento térmico; no entanto observa-se que a maior parte da deformação por fluência ocorre no início do processo e o aumento do tempo de tratamento térmico tem pouca influência no retorno elástico (HO; LIN; DEAN, 2004).

Isto significa que a deformação plástica do material está diretamente relacionada à temperatura do envelhecimento e ao tempo de exposição, além do nível de tensão de carregamento. No entanto, a bibliografia utilizada para este trabalho mostra que o nível de deformação em fluência depende muito do nível do carregamento inicial na conformação (HO; LIN; DEAN, 2004; LIN, et. al., 2007; ZHAN; LIN; DEAN, 2011). Além disso, após um determinado período com a chapa em contato com a ferramenta, ocorre a saturação da relaxação, e um período mais longo de carregamento/tratamento térmico não reduz o retorno elástico significativamente.

Além disso, a temperatura e o tempo de exposição são determinados pelas propriedades que se quer obter no processo de envelhecimento artificial, e não somente

com vistas a relaxação de tensão, isto é, são determinados pelo ciclo necessário para o envelhecimento artificial do material.

Ho, Lin e Dean (2004) demonstraram através de análise computacional que quanto maior a espessura da chapa utilizada, menor o total de retorno elástico. Isso ocorre porque quanto maior a espessura, maiores serão os valores de tensão nas superfícies. Assim, é possível determinar uma região no interior da peça, próximo à região da linha elástica que sofre pouca fluência, e mais próximo às superfícies regiões que sofrem significativa fluência. Quanto maior a região de fluência, menor será o retorno elástico, conforme ilustra a Figura 10.

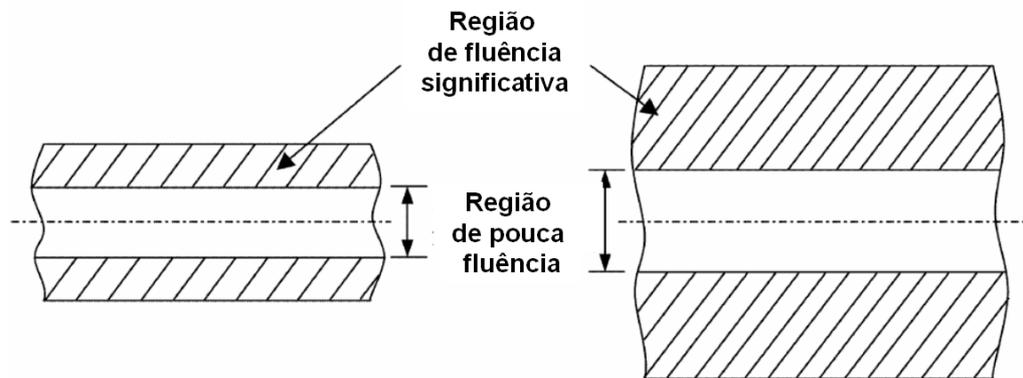


Figura 10: Comparação da distribuição de regiões de pouca fluência e significativa fluência em chapas com espessuras diferentes

Fonte: K.C. Ho, J. Lin, T.A. Dean, 2004, p. 748

Assim, a taxa de relaxação pode ser fortemente influenciada pela espessura do material, pois quanto mais espessa a chapa, maior o nível de tensão inicial na mesma.

2.2 O mecanismo de fluência

A fluência é um fenômeno de deformação plástica lenta, sob ação de uma carga constante aplicada durante longo período de tempo. O aumento da temperatura acentua o fenômeno, por que a deformação plástica torna-se progressivamente mais fácil de iniciar-se e de continuar. Em geral, o fenômeno da fluência é significativo a temperaturas acima de 150 °C para o alumínio (CHIAVERINI, 1986).

Em geral, a fluência é um problema que se quer evitar, pois é um limitante na vida útil dos componentes. Seu comportamento é determinado através de um ensaio, no qual o corpo de prova é submetido a uma carga constante, e a temperatura constante, onde se obtém a deformação em função do tempo. A figura 11 descreve um comportamento típico de fluência.

No fenômeno da fluência, as variáveis são: tensão, deformação, tempo e temperatura, o que indica sua relativa complexidade, pois há possibilidade de se traçar um grande número de curvas representativas, por exemplo, mantendo-se a temperatura constante e variando-se o nível de tensão, ou mantendo-se a mesma tensão para diferentes temperaturas.

A taxa de deformação por fluência é dada pelo coeficiente angular da curva de

fluência, $\frac{d\varepsilon}{dt}$. A curva mostra um comportamento elástico assim que a carga é aplicada, com uma deformação instantânea, seguida por um comportamento plástico que ocorre ao longo do tempo. A curva de fluência mostra três estágios distintos, como mostra a Figura 11:

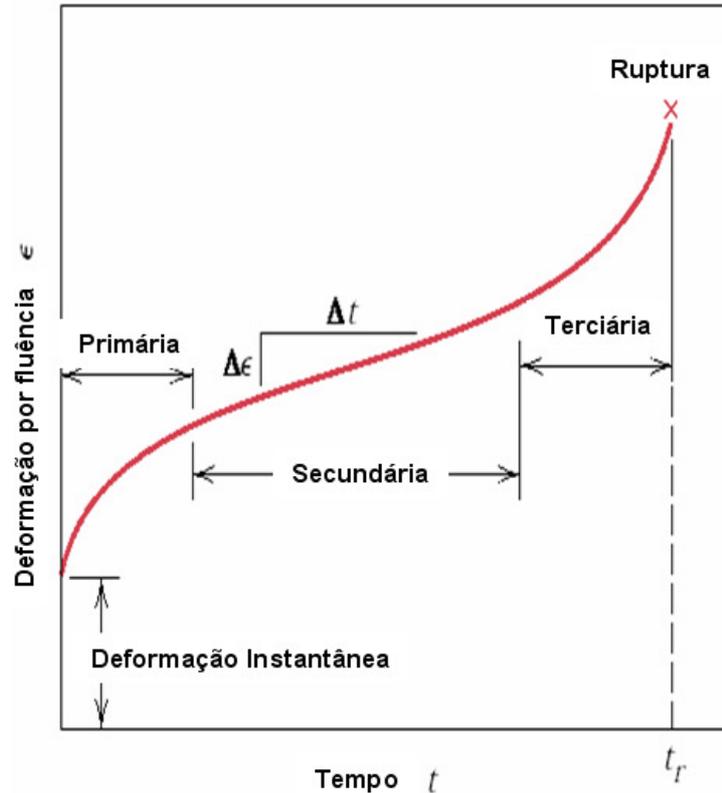


Figura 11 – Curva de Fluência

Fonte: Callister, William D. Ciência e Engenharia de Materiais, 7ª Ed. 2007, p. 175

- I. Estágio primário ou de fluência transiente: onde a velocidade de fluência é inicialmente elevada, mas apresenta uma taxa decrescente, o que indica aumento da resistência à fluência, devido ao encruamento do material. Em geral a fluência que ocorre no estágio primário é rápida e seu valor fica próximo a 1%. Essa deformação para a grande maioria das aplicações é considerada desprezível.
- II. Estágio secundário ou fluência em regime estacionário: A taxa de fluência é constante (curva linear) e apresenta uma duração mais longa. Ocorre um equilíbrio entre os processos de encruamento e recuperação, onde o material se torna mais dúctil e mantém sua capacidade de deformação.
- III. Estágio terciário: Aceleração na taxa de fluência, com estricção seguida de ruptura.

Tanto a temperatura quanto o nível da tensão aplicada influenciam as características da curva de fluência. Quanto maior a temperatura e/ou a tensão maior a deformação final por fluência que ocorre em menos tempo, conforme mostrado na Figura 12.

A equação (1), também conhecida como Equação de Arrhenius, mostra a relação entre a taxa de deformação por fluência e a temperatura (DOWLING, 1998).

$$\dot{\varepsilon} = a \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

Onde

- $\dot{\varepsilon}$ - taxa de deformação por fluência
- a - Constante que depende do material
- R - Constante universal dos Gases
- T - Temperatura (em Kelvin)
- Q - Energia de ativação, que é a barreira energética que precisa ser superada para que ocorra o movimento molecular.

Incluindo-se a relação de tensão, temos a equação (2).

$$\dot{\varepsilon} = a \cdot \sigma \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (2)$$

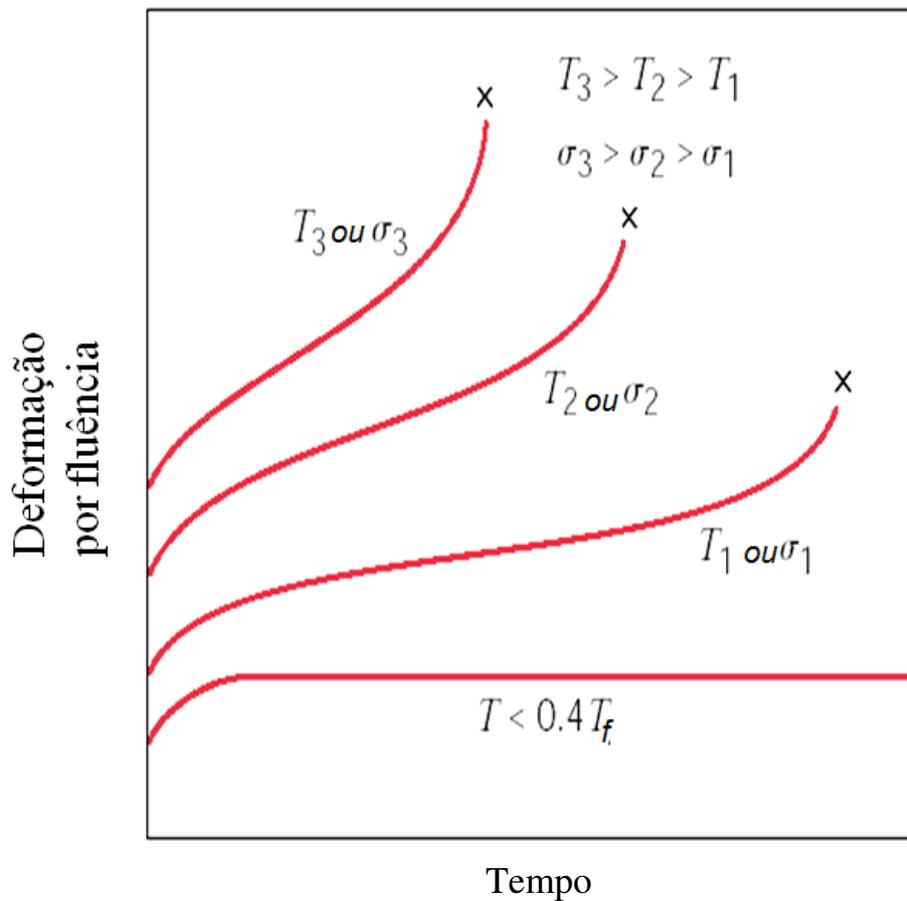
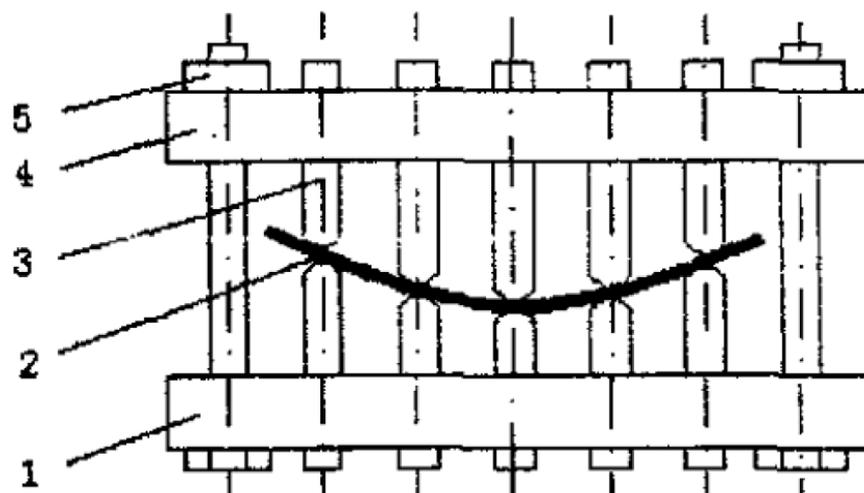


Figura 12 - Efeito da tensão e da temperatura no comportamento à fluência
 Fonte: Callister, William D. Ciência e Engenharia de Materiais, 7ª Ed. 2007, p. 176

painéis eram primeiramente conformados num molde e depois levados para o tratamento térmico em fornos.

No início do desenvolvimento do CAF, as chapas eram presas à ferramenta através de dispositivos mecânicos. As primeiras ferramentas desenvolvidas foram ferramentas ajustáveis multi-pinos, como a mostrada na Figura 14. Neste tipo de ferramenta, a chapa é colocada entre os pinos, que são ajustados através de porcas nas bases. Com a chapa conformada, o conjunto todo é levado para o tratamento térmico. Posteriormente, foram adaptados dispositivos hidráulicos e servomecanismos para se ajustar automaticamente a curvatura da chapa (ZHAN; LIN; DEAN, 2011).



1. Placa mãe inferior
2. Chapa
3. Pinos/pilares
4. Placa-mãe superior
5. Parafusos de ajuste

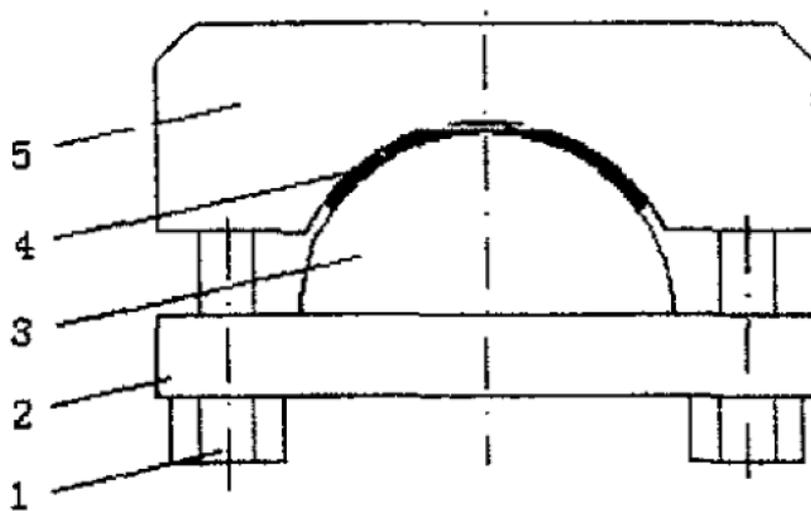
Figura 14 – Ferramenta ajustável multi-pinos
Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 5

Apesar da flexibilidade de permitir ajustes na curvatura do painel, a grande desvantagem deste tipo de ferramental é a presença de pequenos pontos de contato, o que leva a aplicação de elevada tensão localmente, podendo causar distorção da forma ou falha local.

Para solucionar os problemas apontados anteriormente, foi desenvolvido um outro tipo de ferramental: a ferramenta de superfície de “grampo”, como a mostrada na Figura 15,

essencialmente formada por dois moldes, um côncavo e outro convexo, que prendem firmemente o painel na forma desejada, com um contato ferramenta/peça contínuo.

Assim, a superfície da chapa resultante tem uma qualidade muito melhor, pois as tensões são distribuídas ao longo da superfície, sem pontos de concentração (ZHAN; LIN; DEAN, 2011).



1. Parafusos de fixação
2. Placa de suporte
3. Molde convexo
4. Chapa
5. Molde côncavo

Figura 15 – Ferramenta de superfície de “grampo”
 Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 5

Por outro lado, este tipo de ferramental não apresenta a mesma flexibilidade de ajuste da ferramenta anterior, pois há um molde dedicado para cada curvatura de chapa, o que torna os testes para se ajustar a ferramenta muito caros, além de ser muito mais pesada, pois os moldes são sólidos.

A partir de 1980 passou-se a utilizar o processo de conformação em autoclave, com ferramental mais leve. O primeiro ferramental deste tipo foi desenvolvido pela empresa Textron Aerostructures para a fabricação do extradorso das asas do bombadeiro estratégico B-1B, e o ferramental foi chamado de *autoclave forming aluminum* (AFA). Neste processo,

somente é necessário desenvolver o molde da parte inferior, pois a chapa ajusta-se ao molde através da pressão controlada na autoclave (HOLMAN, 1989).

As autoclaves utilizadas pela Textron Aerostructures para a produção das asas do bombardeiro estratégico supersônico B-1B Lancer são controladas por computador para se garantir a estabilidade do processo. Podem atingir pressões de até 200 psi (1380kPa) e temperaturas de até 600 °F (315°C), para conformar painéis de 15,2m de comprimento por 2,7m de largura e espessuras que variam de 2,5mm até 63,5mm (HOLMAN, 1989).

O molde deste tipo de ferramental é formado por nervuras soldadas a uma base com uma superfície de contato, onde o painel é colocado. Este tipo de ferramental é ilustrado na Figura 16:

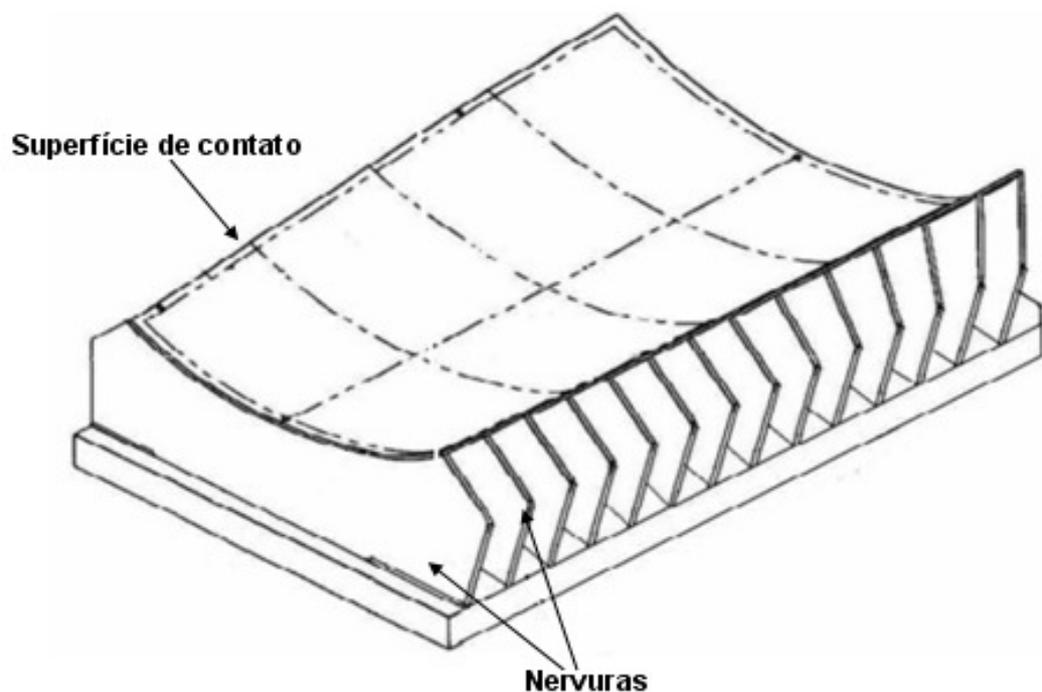


Figura 16 – Ferramenta de nervuras soldadas
Fonte: Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 6

Este tipo de ferramenta apresenta o inconveniente da dificuldade de se controlar a qualidade e precisão da solda das nervuras, além de existir considerações sobre o efeito do aquecimento nas soldas das nervuras. Pode haver expansão térmica nestes pontos, o que compromete a precisão da curvatura da chapa. Além disso, também há a dificuldade de se

fazer qualquer ajuste na ferramenta, para se compensar o retorno elástico (ZHAN; LIN; DEAN, 2011).

O CAF é empregado principalmente para a produção de grandes painéis. Uma das maiores ferramentas já produzidas foi projetada pela STADCO, EUA para a produção dos painéis do intradorso e extradorso das asas do Gulfstream G-5 (ZHAN; LIN; DEAN, 2011). Este ferramental é mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Molde CAF para painel de asa do Gulfstream G-5
Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 5

O custo de um ferramental deste porte é elevado, por isso o projeto deve ser preciso, com a ferramenta já prevendo o retorno elástico do painel após o processo. O principal objetivo para se desenvolver métodos de predição do retorno elástico é projetar a geometria da ferramenta para se obter o componente final desejado.

Em 2003 a Airbus desenvolveu um sistema de nervuras ajustáveis, para ser utilizado na fabricação das asas do superjumbo A380 (BENNETT ASSOCIATES, 2010). A principal característica deste ferramental é que a distância entre as nervuras pode ser ajustada, o que permite modificar a curvatura da ferramenta. No entanto o mecanismo de junção das nervuras

com a base, bem como com a superfície de contato são complexos. Um esquema deste tipo de ferramental é mostrado na figura 18.

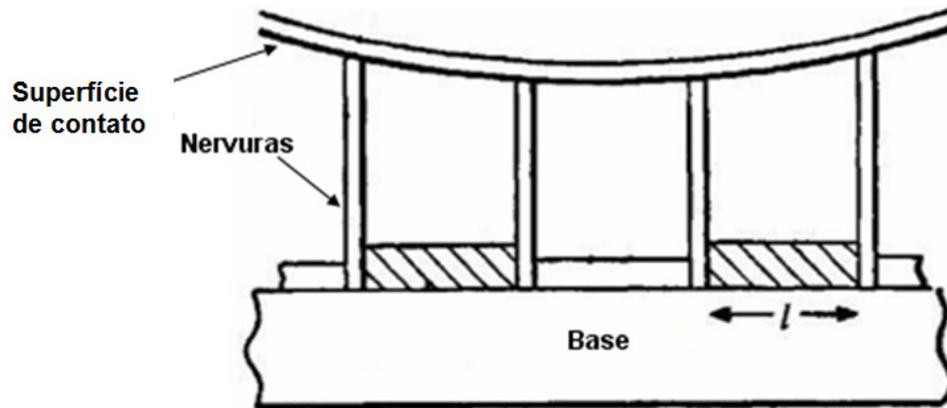


Figura 18 – Ferramenta com nervuras ajustáveis
 Fonte: Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 6

Este ferramental da Airbus foi desenvolvido por uma empresa inglesa de engenharia consultiva, a Bennett Associates. Devido à escala e complexidade do projeto A380, este desenvolvimento representou um grande desafio de engenharia. As asas desta aeronave têm 33m de comprimento, com 2,80 m de largura, e espessura de chapa variando de 3.0mm a 28.0mm com uma tolerância de $\pm 0,1$ mm. As nervuras da ferramenta são fabricadas em aço, e com os perfis cortados a laser, para se garantir maior precisão. As figuras 19 e 20 mostram alguns detalhes do ferramental desenvolvido para a Airbus.

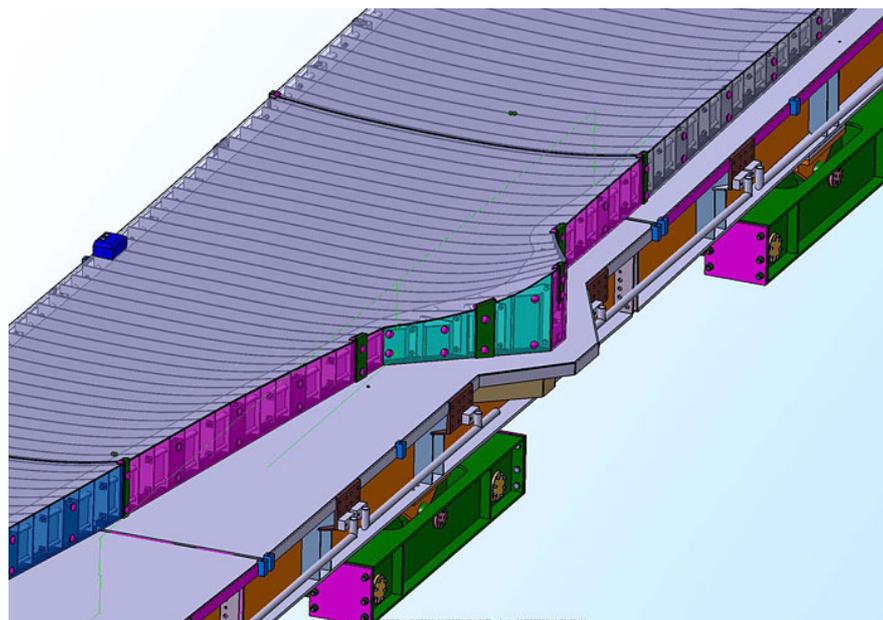


Figura 19 – Imagem de CAD do ferramental das asas do A380
 Fonte: Bennett Associates. http://www.bennettmg.co.uk/Project_MD_Airbus.aspx.

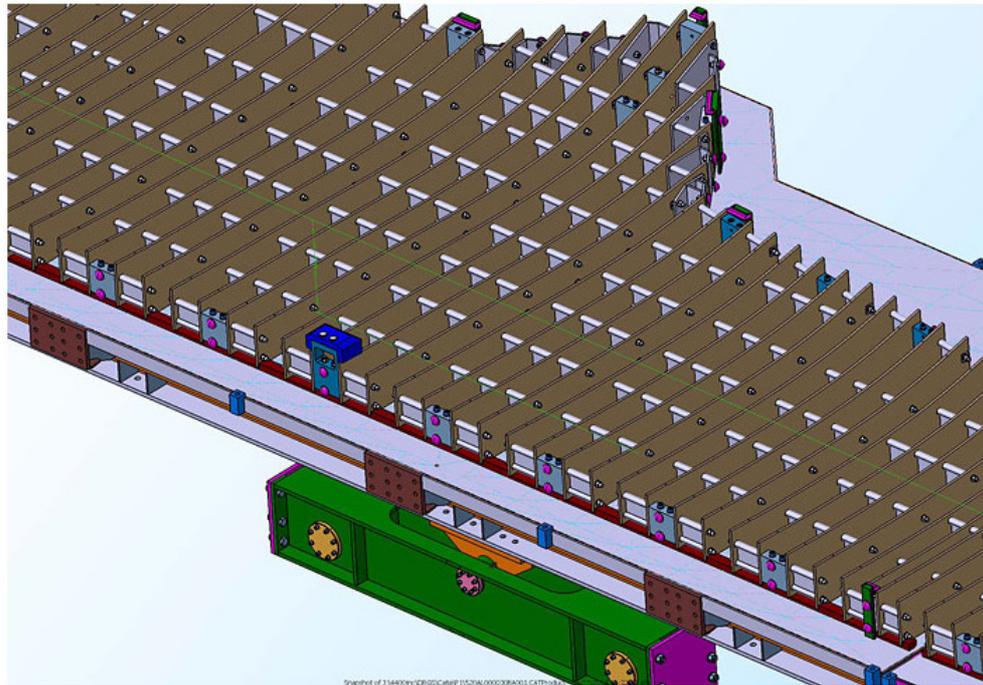


Figura 20 – Imagem de CAD do ferramental das asas do A380 sem a superfície superior Fonte: Bennett Associates. http://www.bennettmg.co.uk/Project_MD_Airbus.aspx.

Atualmente, a maior parte dos componentes que utilizam CAF são painéis de asas, mas já existem pesquisas para se fabricar, por exemplo, pás de turbinas de motores aeronáuticos. Existe também a possibilidade de se utilizar este método na fabricação de componentes de veículos espaciais e navios.

Os métodos tradicionais de fabricação de painéis de asas exigem que sejam fabricados diversos painéis menores, que posteriormente são rebitados. Isso eleva os custos de fabricação, além do produto final não ser tão aerodinâmico quanto um painel contínuo. Estes painéis menores são normalmente fabricados através de usinagem de blocos de alumínio, o que leva a um grande desperdício de material de alta qualidade.

Portanto, apesar do fato de que o custo do ferramental para se implementar o processo CAF ser elevado, para a fabricação de componentes de grandes dimensões ele se torna economicamente viável, especialmente quando comparado com métodos convencionais de fabricação, pois além de permitir economia de matéria prima e redução do tempo de montagem, leva a um produto final com um acabamento superior.

2.4 Mecanismo de endurecimento por envelhecimento

O endurecimento por precipitação ou por envelhecimento é uma técnica de comumente aplicada em ligas de alumínio, onde a precipitação de uma segunda fase de uma solução sólida supersaturada se forma na matriz original. A solução sólida supersaturada é obtida por resfriamento brusco de uma temperatura suficientemente alta. Este tratamento térmico, que causa a precipitação do soluto é chamado envelhecimento.

Embora o comportamento específico de cada liga possa variar, em geral a resposta da liga ao processo de endurecimento por envelhecimento apresenta as seguintes características:

- a) Formação de uma solução supersaturada a temperatura elevada
- b) O diagrama de fase deve mostrar uma linha *solvus* declinando

O tratamento de precipitação consiste das seguintes etapas (MEYERS, 1982):

- a) Solubilização: aquecimento da liga na região monofásica e manutenção por um tempo suficientemente longo para dissolver quaisquer precipitados solúveis
- b) Resfriamento: resfria-se rapidamente até a temperatura ambiente, de modo a evitar a formação de precipitados estáveis, obtendo-se uma solução sólida supersaturada
- c) Envelhecimento: O material fica à temperatura ambiente ou acima desta durante um período específico, resultando na formação de pequenas partículas

As pequenas partículas de uma nova fase são denominadas "precipitados" e a resistência mecânica se desenvolve com o tempo, ou à medida que a liga envelhece. Se o envelhecimento ocorre à temperatura ambiente, lenta e gradual, chamamos envelhecimento natural, porém se ocorre à temperatura acima da ambiente, de forma mais rápida, chamamos Envelhecimento artificial.

Este tipo de mecanismo de endurecimento é largamente empregado em algumas ligas de alumínio, magnésio, titânio, níquel, cobre e em algumas ligas de aços inoxidáveis.

Com o uso de um diagrama de fase na forma de um sistema binário hipoeutético A-B da Figura 21 o procedimento de tratamento térmico pode ser melhor entendido.

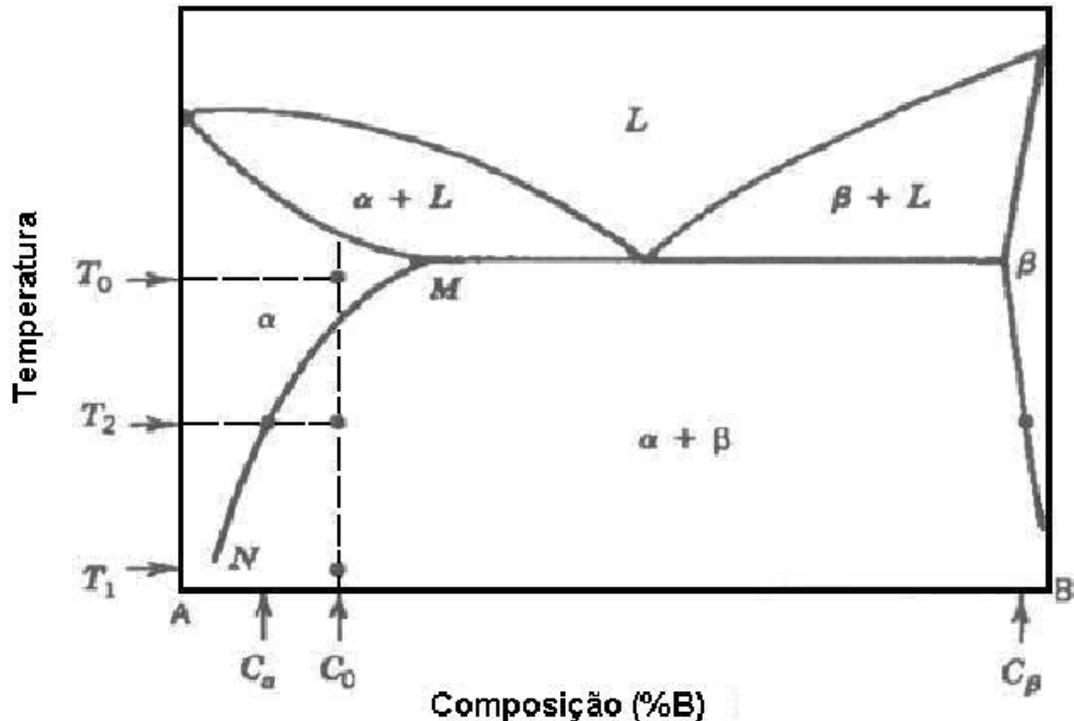


Figura 21 – Diagrama de fases hipoeutético

Fonte: Callister, William D. Ciência e Engenharia de Materiais, 7ª Ed. 2007, p. 293

Para que ocorra o endurecimento por precipitação é preciso que ocorra a solubilização de um componente no outro, com os átomos do soluto dissolvidos para formar uma solução sólida monofásica e deve haver também um limite de solubilidade que diminua rapidamente com a concentração do componente principal com a redução da temperatura.

Seguindo o diagrama da Figura 21, a liga de composição C_0 é aquecida até a temperatura T_0 (dentro do campo de fases α), que é mantida até que ocorra a total dissolução da fase β – que é o tratamento térmico de solubilização. Em seguida, para evitar a difusão da fase β na fase α a liga é resfriada rapidamente até a temperatura T_1 . Com isso obtém-se uma solução sólida α supersaturada de B, onde na temperatura T_1 tem uma taxa de difusão extremamente baixa.

A seguir, a solução sólida α supersaturada é aquecida a T_2 na região bifásica $\alpha + \beta$, onde as taxas de difusão são apreciáveis. Neste ponto, precipitados da fase β começam a se formar como partículas finamente dispersas. Após o tempo de envelhecimento apropriado na temperatura T_2 , a liga é resfriada até a temperatura ambiente; com este tipo de processo a resistência aumenta com o tempo até atingir um valor máximo e depois diminui (superenvelhecimento).

A Figura 22 mostra esquematicamente os vários estágios da formação do precipitado

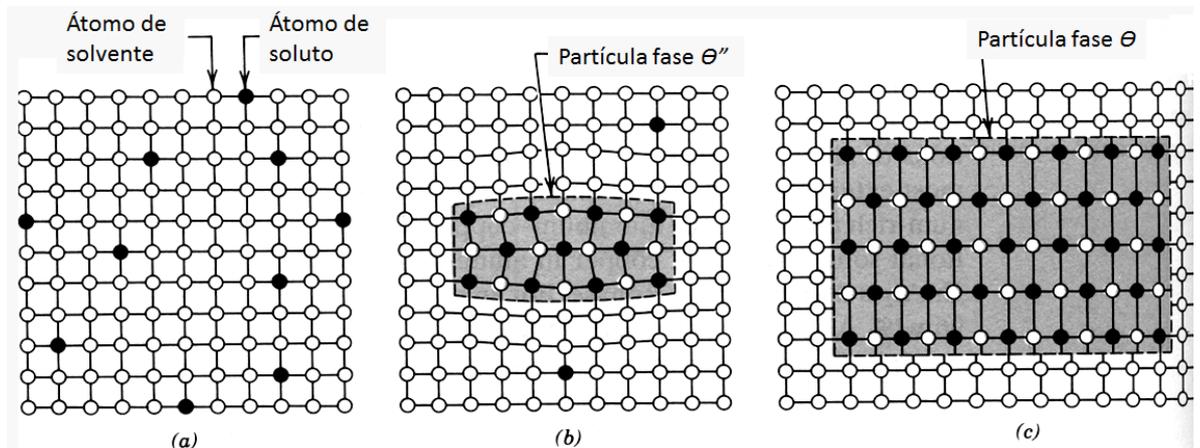


Figura 22 – Representação esquemática de vários estágios da formação do precipitado. (a) solução sólida supersaturada, (b) fase precipitada de transição, (c) fase de equilíbrio dentro da fase matriz.

Fonte: Associação Brasileira do Alumínio. Guia técnico do alumínio: tratamento térmico, 1ª Ed. 2003.p.32.

O envelhecimento artificial associado á aplicação de tensão sobre a chapa leva à formação de um precipitado alinhado com a direção da tensão aplicada (ZHAN; LIN; DEAN. 2010), vide figura 23.2. Com isso, apesar do material estar submetido a um nível de tensão ainda dentro do regime elástico, ele ainda retém alguma deformação devido a este realinhamento interno. A figura 23 mostra a diferença de uma liga envelhecida sob tensão e outra naturalmente:

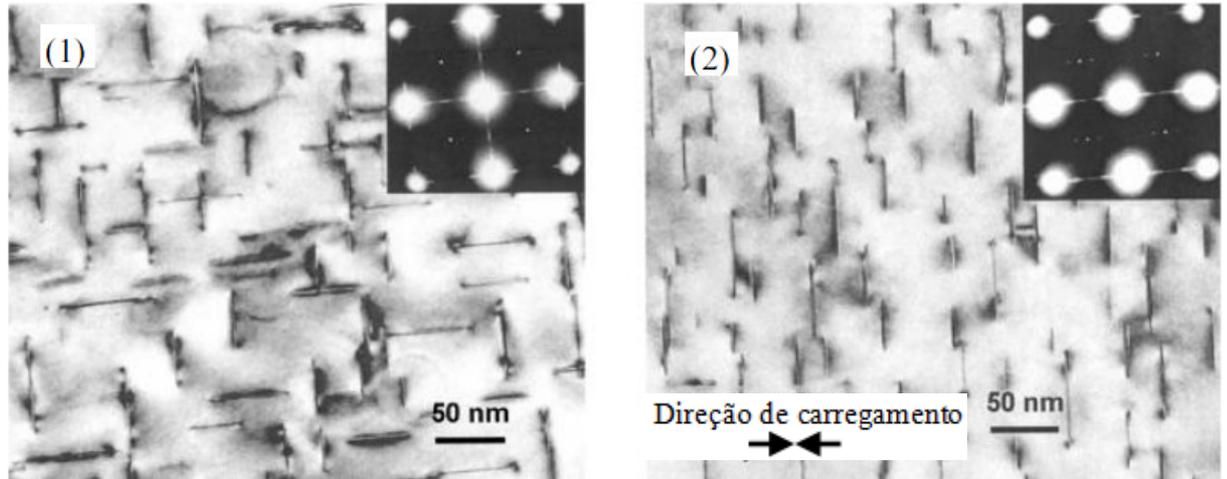


Figura 23 – Imagem de microscopia eletrônica mostra (1) liga envelhecida convencionalmente e (2) liga envelhecida sob tensão

Fonte: Zhan; Lin; Dean, 2011, p. 10

2.5 Aplicação do método dos elementos finitos em CAF

2.5.1 O método de Elementos finitos em CAF

O desenvolvimento do ferramental a ser utilizado para qualquer formato requerido é normalmente um processo iterativo e extensivo. É preciso se construir moldes e ajustá-los de acordo com os resultados obtidos. Como o ferramental utilizado é caro, incluindo as autoclaves com ao menos 2m-3m de diâmetro e 10m-15m de comprimento (Koehler, Plege, Sahm, 2008), além do molde em si, o desenvolvimento de técnicas de modelagem computacional se faz necessário. Com isso, deseja-se reduzir o trabalho de “*try-outs*” ou mesmo eliminá-los.

É importante observar que mesmo para partes que possuem uma geometria mais simples a simulação é complexa, visto que há a interação de diversos efeitos diferentes, como deformação elástica e plástica, fluência, relaxação de tensão e tensão residual que devem ser levados em consideração.

Para a solução de problemas deste tipo, aplica-se o métodos dos elementos finitos, que busca uma aproximação numérica da solução utilizando-se cálculo variacional, teoremas de energia e princípios de elasticidade (BARAN, 1988).

A primeira etapa do processo de modelagem computacional do fenômeno físico consiste na identificação dos fatores que influenciam o processo. Numa segunda etapa, escolhe-se o método numérico que será empregado. O Método dos Elementos Finitos (MEF) teve suas origens na área de análise de estruturas, porém com o desenvolvimento dos métodos numéricos e sua aplicação em computadores, teve sua aplicação estendida para outras áreas da engenharia. Todo o embasamento matemático deste método vem da análise de funcionais.

Para se chegar à formulação variacional de um problema na área de estruturas, pode-se utilizar o princípio dos trabalhos virtuais e da energia potencial mínima. Num problema unidimensional, para termos comparativos, tem-se a seguinte formulação clássica mostrada na equação (3) (RIBEIRO, 2004):

$$\frac{d^2u}{dx^2} + f(x) = 0 \quad \text{em } [0,1] \quad (3)$$

$$\begin{cases} u(1) = 0 & \text{(condição de contorno essencial)} \\ \frac{du}{dx}(0) = g & \text{(condição de contorno natural)} \end{cases} \quad (4)$$

O MEF resolve este problema por aproximação numérica, discretizando o domínio em elementos em uma malha com n pontos nodais.

2.5.2 Relações tensão-deformação

Num corpo em equilíbrio, temos o seguinte estado geral de tensões:

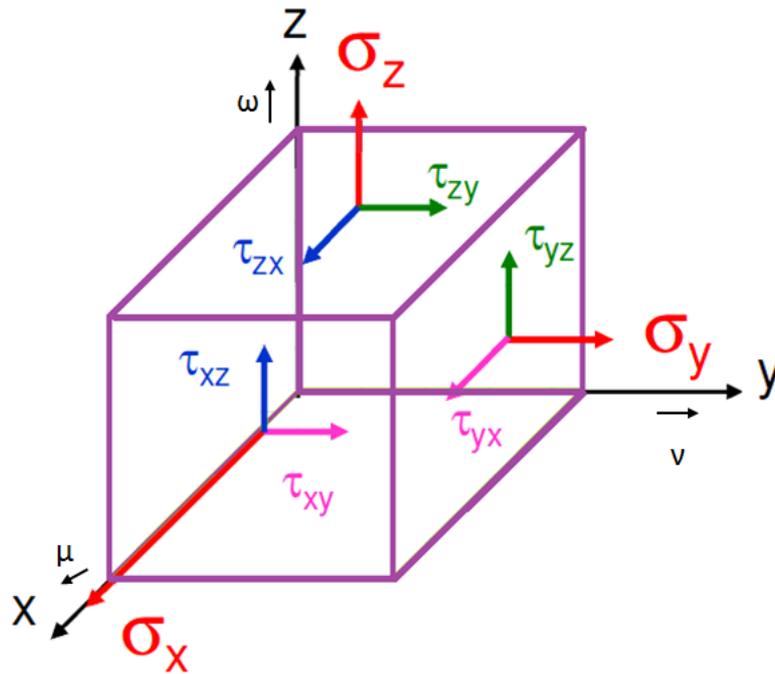


Figura 24 – Estado geral de tensões

onde σ_x , σ_y e σ_z , são tensões normais e τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} , são tensões cisalhantes. Da condição de equilíbrio, temos:

Para materiais no regime linear elástico, as relações tensão-deformação vêm da lei de Hooke generalizada e para materiais isotrópicos, usamos o módulo de Young e o o coeficiente de Poisson, então tem-se:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (7)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (8)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (9)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (10)$$

Como o módulo de elasticidade transversal G é dado por $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$, tem-se:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{(1 - 2\nu)}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (11)$$

Matricialmente:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (12)$$

Sendo que a matriz D simétrica para um material é:

$$D = \frac{E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 - \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 - \nu \end{bmatrix} \quad (13)$$

Numa forma generalizada, podemos escrever:

$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (14)$$

Onde:

$[\mathbf{K}]$ = Matriz de rigidez do elemento

$\{\mathbf{u}\}$ = Vetor deslocamento

$\{\mathbf{F}\}$ = Carregamento

O objetivo deste trabalho é determinar as propriedades do material para que se obtenha o valor de deslocamento sob um carregamento conhecido.

2.5.3 O método de Newton-Raphson

Para a resolução de equações não-lineares, o método numérico utilizado é o de Newton-Raphson. É um método de convergência relativamente rápida, principalmente se a estimativa inicial é suficientemente próxima à raiz da função.

A Figura 25 mostra a interpretação geométrica do método. Inicialmente, estimando-se um ponto qualquer do domínio da função, calcula-se a equação da tangente (derivada) da função nesse ponto, calcula-se o intercepto da tangente ao eixo das abcissas a fim de encontrar um novo ponto do domínio da função e repete-se o processo até tender a uma das raízes da função rapidamente deixar claro a não-convergência.

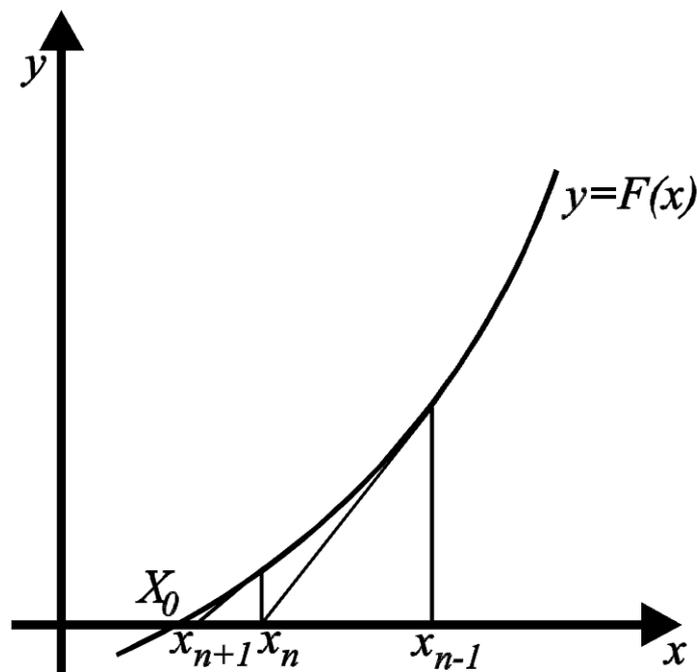


Figura 25: Ilustração de duas iterações do método de Newton-Raphson
 Fonte: Ruggiero, Lopes. – 1998. p. 68

A Figura 25 mostra duas iterações, estimando-se inicialmente X_{n-1} , que levou ao cálculo da aproximação X_n , e em seguida a X_{n+1} , que é bastante próximo da raiz da função

2.5.4 Modelamento do material

Para se fazer o modelamento do processo CAF, as propriedades do material são divididas em: parcela elástica e parcela inelástica.

Para o modelamento da parcela elástica consultou-se a literatura disponível. Para o modelamento da parcela inelástica, diversos autores utilizaram diferentes abordagens para se modelar o CAF.

2.5.4.1. O modelo proposto por Lin (2007)

Lin et al. (2007) modelou uma barra de liga de alumínio 7B04- T7451 que é carregada sobre uma ferramenta. Para obter-se as equações constitutivas de fluência, ele se baseou num modelo uniaxial simplificado definido por Kowalewski (1994) e obteve as constantes de material através de uma metodologia experimental. Ele utilizou o seguinte modelo constitutivo do material:

$$\varepsilon_c = A \sinh \left[B(\sigma - \sigma_0)(1 - H)^{m_0} \right] \quad (15)$$

$$\dot{H} = \frac{h}{\sigma^{m_1}} \left(1 - \frac{H}{H^*} \right) \varepsilon_c \quad (16)$$

Onde ε_c é a taxa de fluência efetiva, σ é a tensão efetiva e A , B , σ_0 , h , H^* , m_0 , m_1 são constantes do material e H é a taxa de variação que caracteriza o primeiro estágio de fluência.

h , H^* , m_1 caracterizam o primeiro estágio da fluência;

A , B caracterizam o segundo estágio

σ_0 , m_0 afetam toda a curva de fluência

Para se determinar as constantes do material, Lin (2007) determinou a seguinte função objetivo:

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} w_{ij} (t_{eij} - t_{cij})^2 \quad (17)$$

Onde:

- $F(x)$: função objetivo
- n : número de curvas de fluência experimentais
- m_j : número de dados experimentais na curva de fluência
- w_{ij} : peso relativo
- $t_{eij}-t_{cij}$: diferença de tempo entre um i de referência na curva experimental j o valor calculado com o mesmo valor de deformação por fluência no mesmo nível de tensão j .

Baseado no método dos mínimos quadrados, o valor da função objetivo é diretamente proporcional ao valor da área sob a curva experimental e calculada. A função é então integrada numericamente usando um método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Lin (2007) criou um modelo de elementos finitos de uma barra carregada sobre uma superfície rígida, conforme mostra a figura 26:

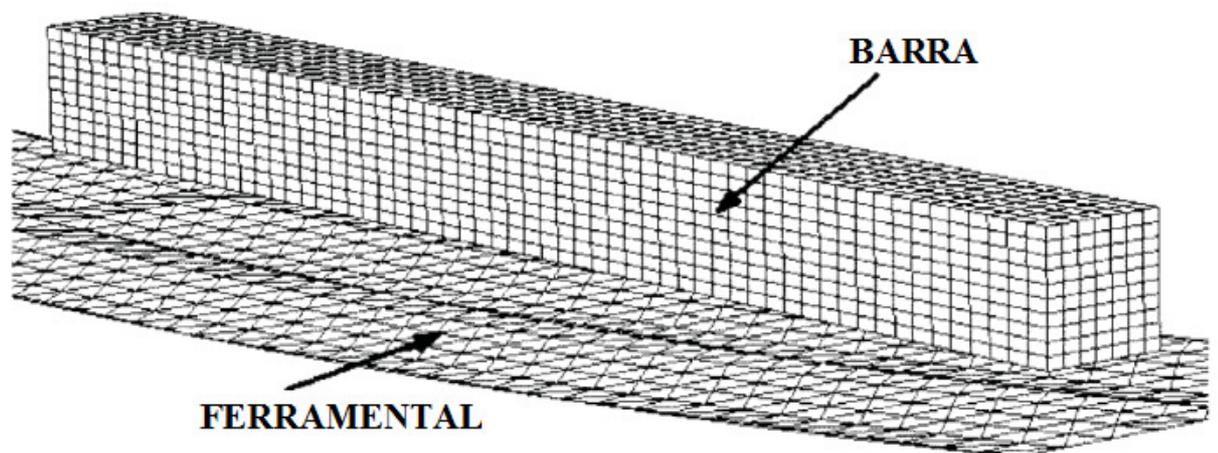


Figura 26 – Modelo de elementos finitos de CAF

Fonte: Lin et al. (2007) p. 566

Lin validou seu modelo experimentalmente e obteve bons resultados, conseguindo uma aproximação com erros de 5,2% a 8,8% no cálculo do retorno elástico (LIN et al. 2007).

2.5.4.2. Os modelos propostos por Ho

Um modelo diferente foi proposto por K. C. Ho et al (2004). Nesta trabalho, foram modeladas duas chapas diferentes: uma com curvatura cilíndrica, conforme mostra a figura 27, e outra com curvatura esférica, como mostrado na figura 28. O objetivo foi investigar a influência da geometria no retorno elástico.

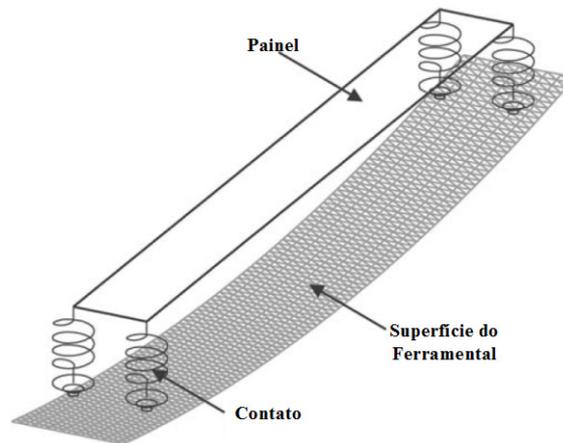


Figura 27 – Modelo de elementos finitos de CAF – curvatura cilíndrica

Fonte: K. C. Ho et al (2004). p. 738

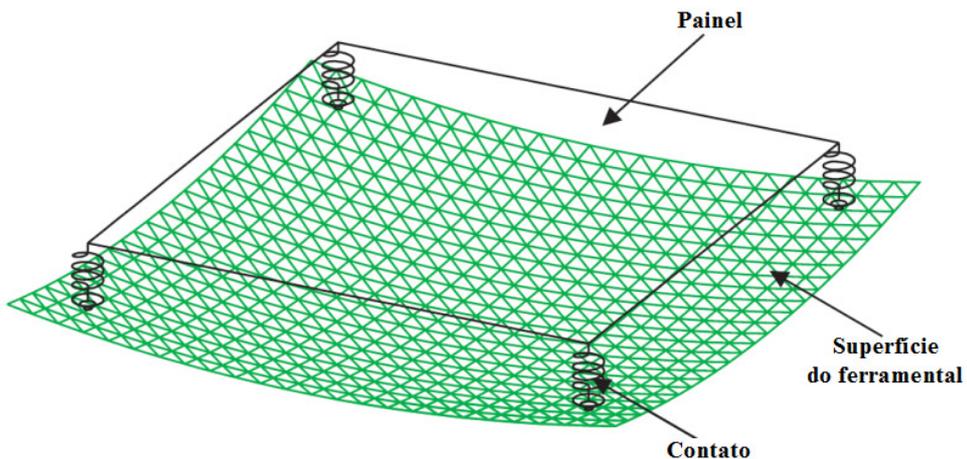


Figura 28 – Modelo de elementos finitos de CAF – curvatura esférica

Fonte: K. C. Ho et al (2004). p. 738

Em todos os casos estudados, o procedimento para se processar o modelo ocorre da seguinte forma:

- a) Fixar a placa mantendo-a a uma distância do ferramental;
- b) Modelar o contato, para que ele ocorra entre os elementos de placa da chapa com a ferramenta
- c) Aplicar uma carga de pressão perpendicular a superfície da chapa
- d) Manter o contato por um determinado período, para que possa ocorrer a fluência;
- e) Remover o carregamento
- f) Medir o retorno elástico

2.5.4.3. O modelo de flexão em quatro pontos

As abordagens estudadas até aqui se mostraram bastante complexas para serem validadas, pois exigiriam um ferramental que não estava disponível, portanto pesquisou-se um modelo em que o método experimental pudesse ser executado nas instalações do Centro Universitário da FEI. O Centro de Laboratórios mecânicos da FEI não dispõe de autoclave para se fazer a validação dos modelos propostos por Lin (2007) e Ho (2004).

Outro modelo proposto por Ho (2004, apud ZHAN, LIN; DEAN 2011), o modelo de flexão em quatro pontos, mostrou-se mais praticável. Trata-se de um ferramental relativamente simples de ser construído e que pode ser levado à estufa com o corpo de prova preso a ele. A grande vantagem desta abordagem, além da questão construtiva é que ele estabelece uma condição de momento constante na região central do corpo de prova, o que torna mais fácil estudar o nível de tensão e a relaxação nesta área.

A Figura 29 mostra o ferramental proposto por Ho e os gráficos de força cortante e momento fletor:

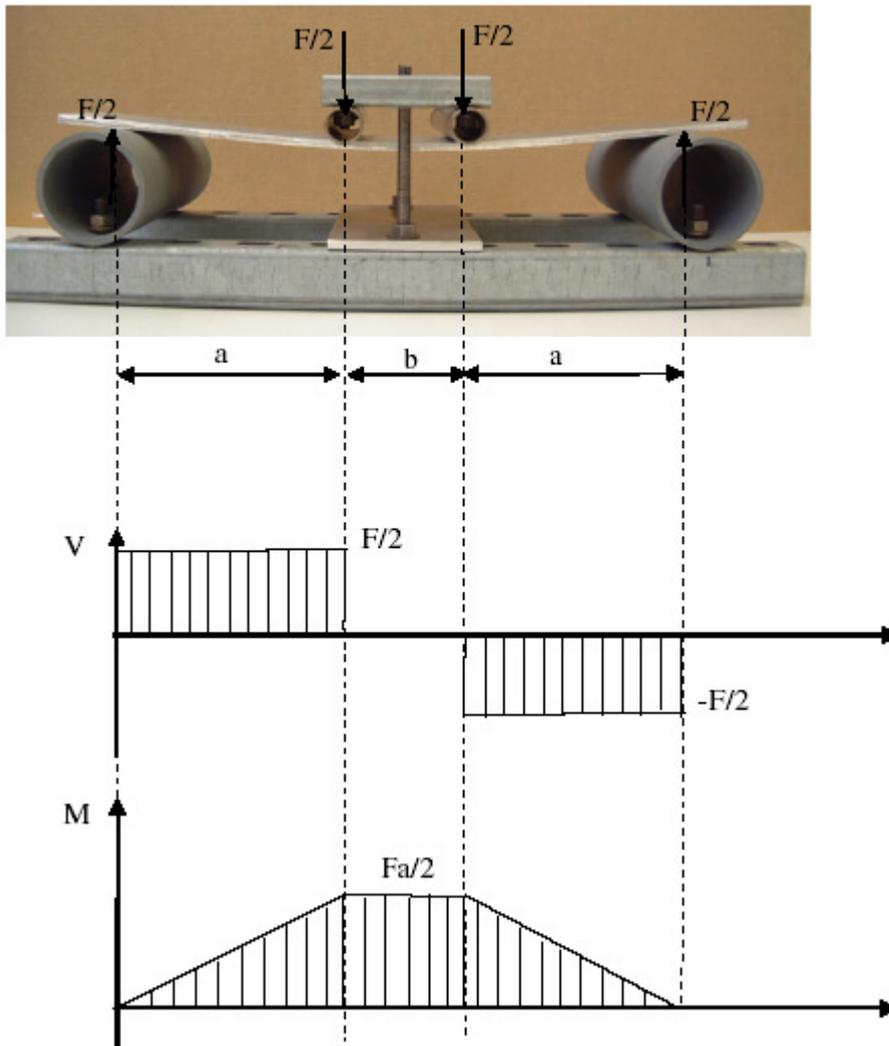


Figura 29 – Ferramental para teste CAF com flexão em quatro pontos e diagramas de força cortante e momento fletor

Fonte: Zhan; Lin; Dean (2011) p. 8

2.5.4.4. Modelagem utilizada na simulação

Como mostrado na Figura 12, tanto o nível de tensão quanto a temperatura influenciam o comportamento da curva de fluência. Considerou-se a taxa de fluência em regime estacionário.

A equação proposta por Lin é muito complexa, no entanto nem todos os fatores utilizados nesta equação representam influência significativa ou podem ser mensurados com precisão no processo – como por exemplo, o crescimento do grão. Portanto, ao invés de se

buscar uma modelagem detalhada, optou-se por uma abordagem com um modelo de lei de potência, que é mais conhecida e amplamente utilizada, inclusive já implementado no MSC/Marc. Esta abordagem permite uma verificação direta para validação dos resultados obtidos pelo modelo.

Considerando-se a equação (2), o comportamento da liga de alumínio foi modelado de acordo com a lei de potência mostrada na equação 18, com o objetivo de se levar em consideração o efeito da relaxação de tensão.

$$\dot{\varepsilon} = K \cdot \sigma^B \quad (18)$$

Esta equação foi obtida experimentalmente, e o expoente de tensão B foi ajustado através da simulação. Com isso, chegou ao resultado da equação 19.

$$\dot{\varepsilon} = 7e^{-19} \cdot \sigma^{4.7} \quad (19)$$

O ajuste equação foi feito através da medição da flecha final obtida experimentalmente, isto é, com o resultado experimental obtido, o expoente B foi variado na simulação até que a flecha final da simulação se aproximasse da experimental. Isto foi feito para um nível de tensão, para o modelo com reforço. Com este valor de B , foram feitas as simulações para outros níveis de tensão, obtendo-se então correlação dos resultados experimentais e teóricos.

3. MODELOS UTILIZADOS

Para validação do modelo de Elementos Finitos, foi utilizada uma abordagem semelhante à que foi utilizada por K. C. Ho et al (2004, apud ZHAN; LIN; DEAN, 2011). O ferramental utilizado foi fabricado nas instalações do Centro Universitário da FEI.

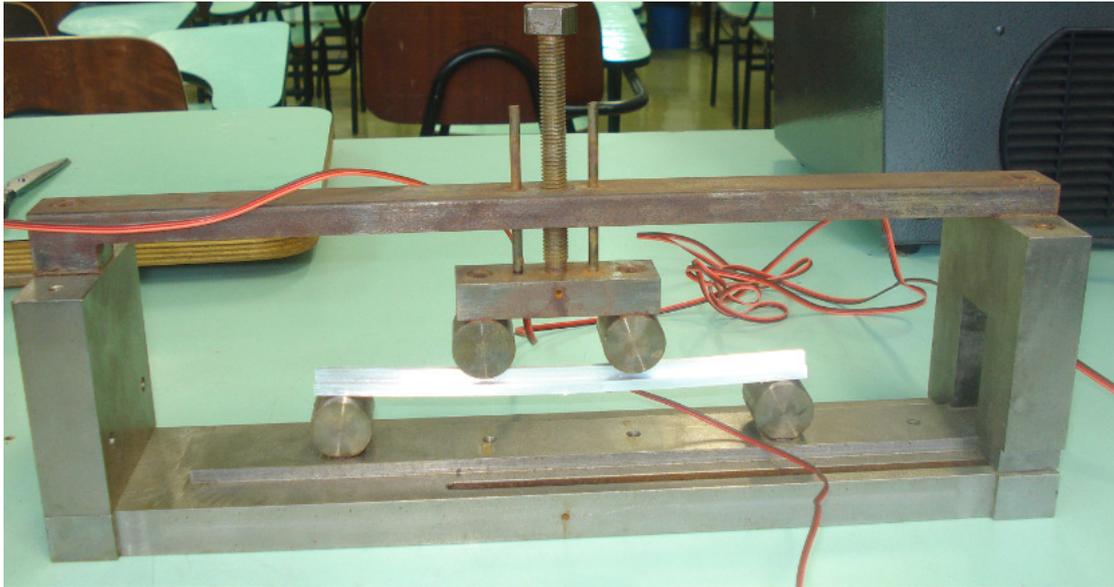


Figura 30 – Ferramental utilizado para flexão em quatro pontos.

O ferramental foi construído de tal forma que os pontos de apoio estão a 60 mm dos pontos de aplicação de carga. Assim, foi elaborado o modelo de aplicação de cargas mostrado na Figura 31:

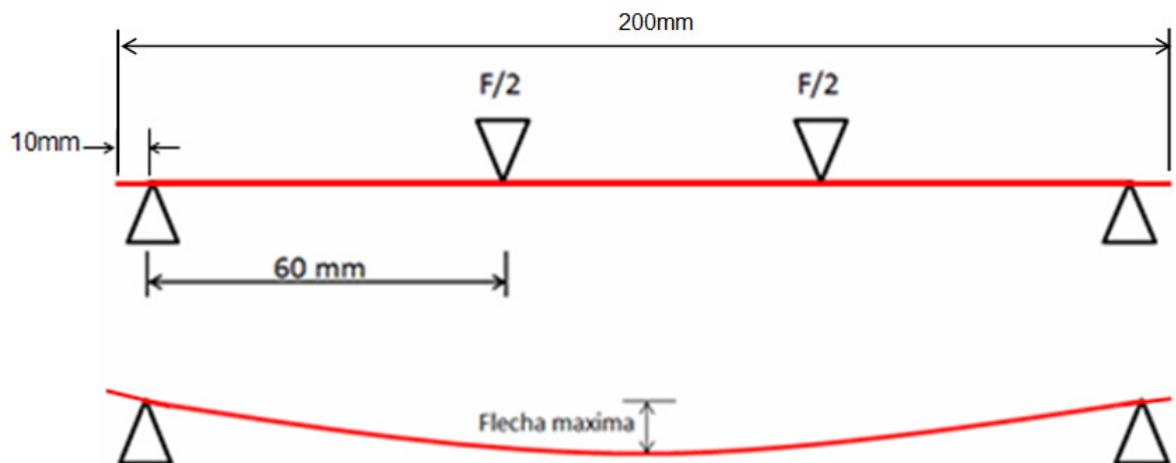


Figura 31 – Esquema de aplicação de cargas no corpo de prova

Fonte: Autor, 2011

Foram criados dois modelos de elementos finitos, sendo o primeiro um perfil simples de 12 mm X 200mm com 5mm de espessura.

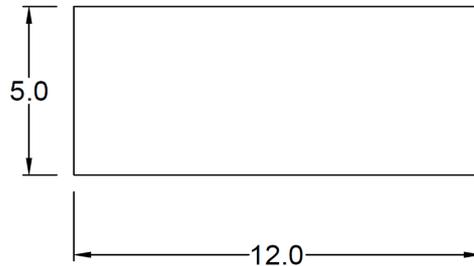


Figura 32 – Perfil do modelo sem reforçador. Comprimento de 200 mm.

Fonte: Autor, 2012

O segundo modelo possui as mesmas dimensões do anterior, porém foi acrescentado a ele um reforçador longitudinal de 3mm X 5mm.

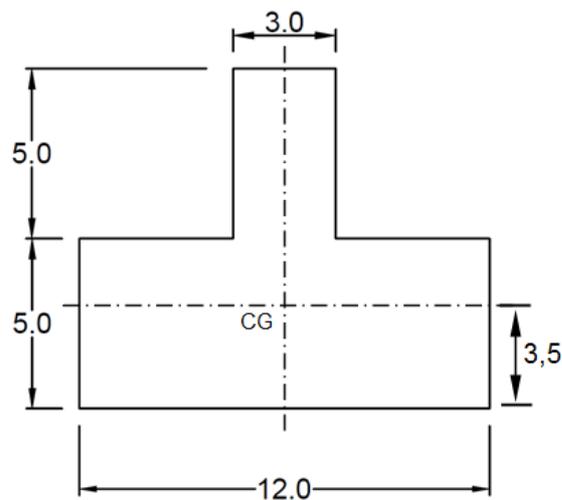


Figura 33 – Perfil do modelo com reforçador. Comprimento de 200 mm.

Fonte: Autor, 2012

Com o objetivo de se verificar o efeito do nível de tensão inicial sobre o retorno elástico, nestes modelos foram aplicados três níveis de tensão diferentes: 220MPa; 260MPa; 300MPa.

O material utilizado foi a liga de alumínio 7475TAF. As propriedades deste material são divididas em: parcela elástica e parcela inelástica.

Para o modelamento da parcela elástica foram adotadas as seguintes propriedades:

Módulo de elasticidade ($E_{163^{\circ}\text{C}} = 73 \text{ GPa}$)

Coefficiente de Poisson ($\nu = 0,33$)

Densidade ($\rho = 2,82\text{g/cm}^3$)

Para a parcela inelástica, foi adotado um modelo de fluência de lei de potência utilizado em algumas literaturas, e aplicado no Patran como uma lei de potência, dada pela equação 18.

3.1 Obtenção da Flecha Inicial

Foi calculada a flecha inicial com a aplicação da tensão inicial em cada corpo de prova. Através da simulação computacional, chegou-se à mesma flecha inicial. O cálculo da flecha máxima foi obtido através da equação 19.

$$Flecha_{MAX} = \frac{23 \cdot F/2 \cdot d^3}{24 \cdot E \cdot I_{Total}} \quad (20)$$

Fonte: Pinto, 2005

Sendo que o carregamento foi obtido pela equação 21.

$$\sigma = \frac{F/2 \cdot A_1 \cdot d}{I_{Total}} \quad (21)$$

$$F = 2 \cdot \left(\frac{\sigma \cdot I_{Total}}{A_1 \cdot d} \right) \quad (22)$$

A Tabela 1 mostra o cálculo do carregamento e da flecha máxima

Tabela 1: Cálculo da flecha inicial

	Geometria com reforçador			Geometria sem reforçador		
Tensão inicial [MPa]	220	260	300	220	260	300
Momento de inércia [mm ⁴]	456,25	456,25	456,25	125	125	125
Carregamento [KN]	956	1130	1304	367	433	500
Flecha inicial [mm]	2,97	3,51	4,05	4,16	4,92	5,67

Fonte: Autor, 2012

3.2 Geração da Análise

Para se gerar a malha, utilizou-se um elemento do tipo tetraédrico e com 10 nós (Tet10). Como se trata de uma geometria simétrica, foi criado apenas metade do modelo, e criou-se condições de contorno de restrições nas direções X e Y. Tanto o apoio como o punção foram modelados como corpos rígidos e indeformáveis. As malhas obtidas são mostradas na Figura 34 e na Figura 35.

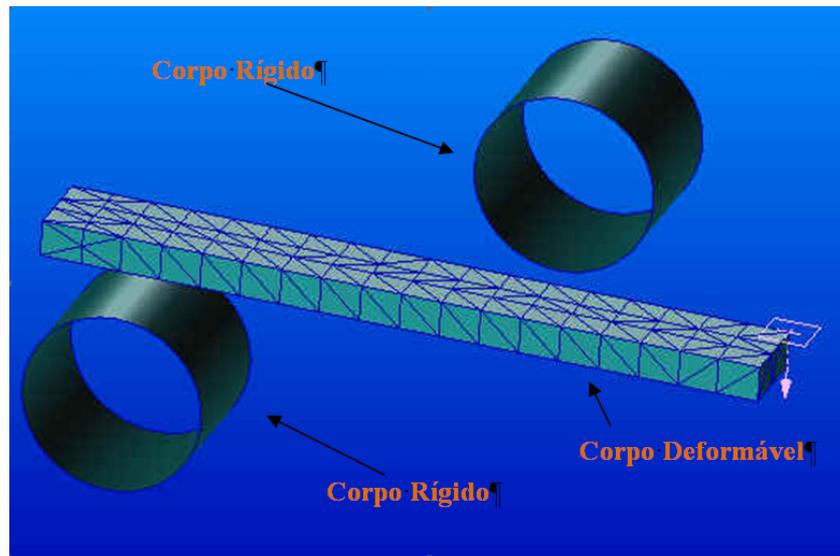


Figura 34 – Modelo de elementos finitos para curvatura simples sem reforçador.

Fonte: Autor, 2012

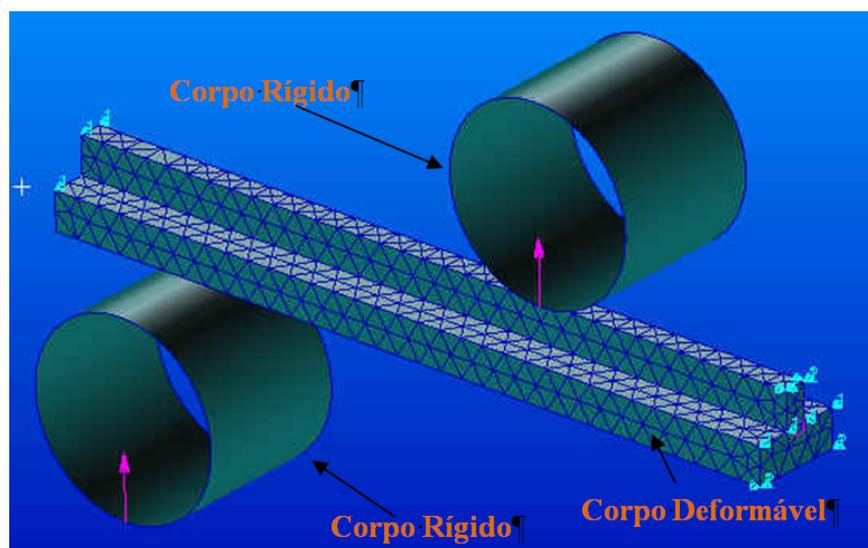


Figura 35 – Modelo de elementos finitos para curvatura simples com reforçador.

Fonte: Autor, 2012

O modo de análise padrão do Patran é estático. Para se criar a análise de fluência, foi preciso criar um load case dependente do tempo.

Para aplicação do carregamento inicial, criou-se uma tabela de deslocamento em função do tempo para cada geometria. Nesta tabela, é aplicada a flecha máxima no ponto de aplicação da carga F/2 Figura 31, que fica a 60 mm do apoio, de forma que no centro do CDP se obtém as flechas iniciais mostradas na Tabela 1.

O tempo de exposição à temperatura de 163 °C adotado foi de 24 horas (equivalente a 86400 s). O valor do deslocamento (flecha) nos momentos t-3 e t-4 são diferentes para cada modelo (com reforçador e sem), pois são níveis de tensão diferentes.

A Tabela 2 mostra os valores carregados para os três níveis de tensão no modelo sem reforçador.

Tabela 2: Tabela de carregamento em função do tempo para o modelo sem reforçador

		220 MPa	260 MPa	300 MPa	
	Tempo [s]	Deslocamento em Z [mm]	Deslocamento em Z [mm]	Deslocamento em Z [mm]	
t ₁	0	0	0	0	
t ₂	1	0	0	0	
t ₃	1,01	3,6	4,32	4,98	← Posição do Punção
t ₄	86401,01	3,6	4,32	4,98	
t ₅	86401,02	0	0	0	
t ₆	86402,02	0	0	0	

Fonte: Autor, 2012

A Tabela 3 mostra os valores carregados para os três níveis de tensão no modelo com reforçador.

Tabela 3: Tabela de carregamento em função do tempo para o modelo com reforçador

		220 MPa	260 MPa	300 MPa	
	Tempo [s]	Deslocamento em Z [mm]	Deslocamento em Z [mm]	Deslocamento em Z [mm]	
t ₁	0	0	0	0	
t ₂	1	0	0	0	
t ₃	1,01	2,6	3,08	3,56	← Posição do Punção
t ₄	86401,01	2,6	3,08	3,56	
t ₅	86401,02	0	0	0	
t ₆	86402,02	0	0	0	

Fonte: Autor, 2012

Por fim foi criada a análise de fluência usando-se a função CREEP do Patran e o *load case* do modelo ficou dividido em 3 etapas:

- a) Aproximação dos corpos
- b) Carregamento – etapa de fluência
- c) Descarregamento – retorno elástico

3.3 Resultados obtidos

Para o material utilizado, a liga de alumínio 7475, o limite de escoamento na temperatura ambiente é 440 MPa; à 163° C este valor cai para 340 MPa. Verificou-se inicialmente o nível de tensão aplicado ao modelo sem reforçador. Para o nível de tensão de referência de 220 MPa. As tensões mostradas são de Von Mises.

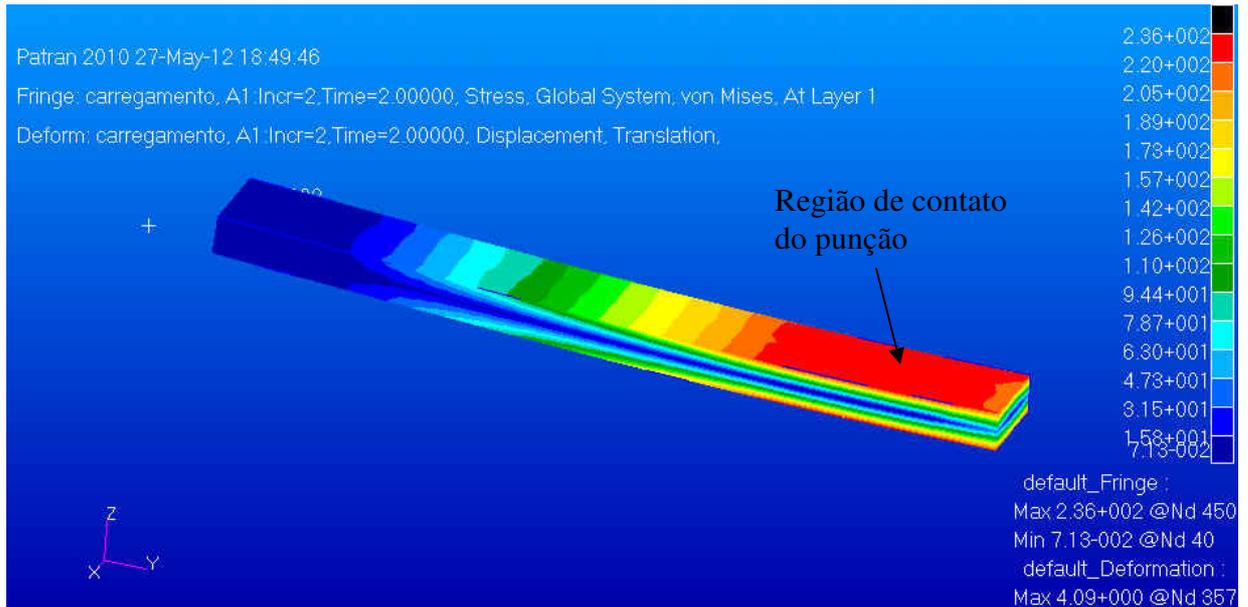


Figura 36: Tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa
 Fonte: Autor, 2012

Identificou-se que nas camadas mais externas do material a tensão excedeu ligeiramente o nível de referência, porém ainda dentro do regime elástico.

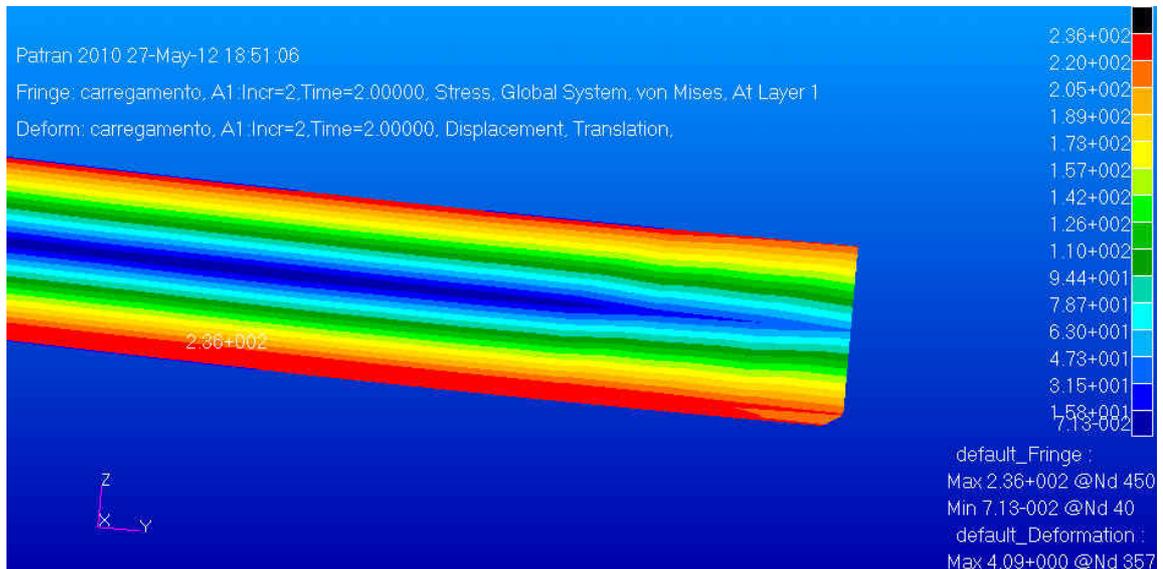


Figura 37: Tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa
 Fonte: Autor, 2012

Verificou-se que no último passo de cálculo antes do descarregamento ocorreu a relaxação da tensão, devido à fluência do material. Este passo ocorreu no tempo de 21 horas (75752s).

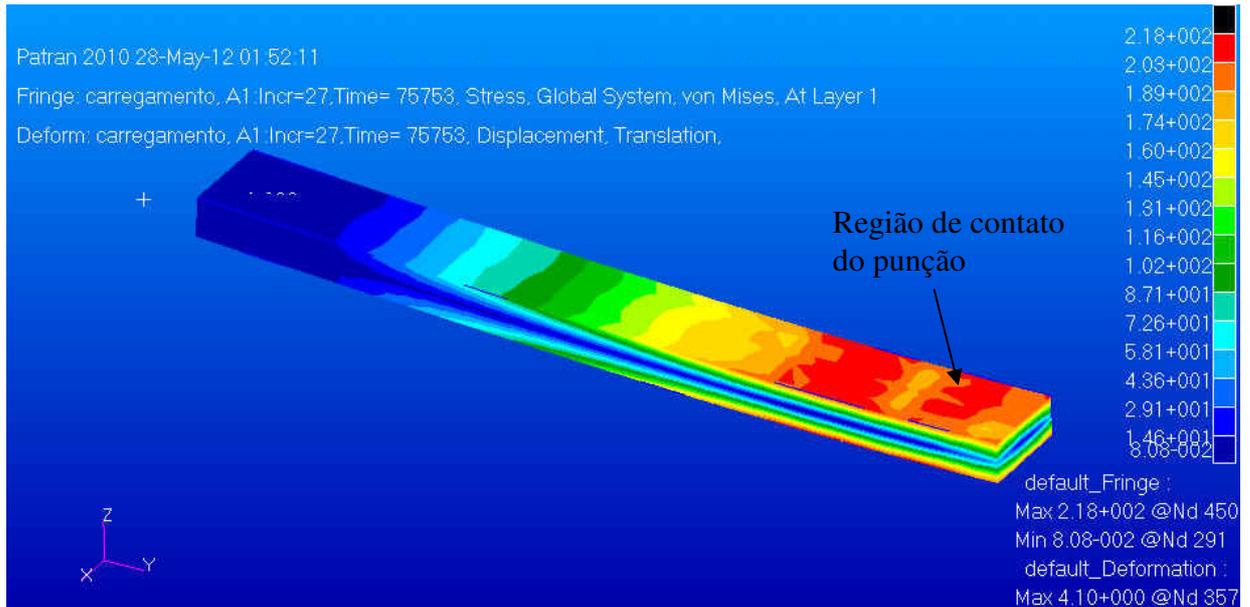


Figura 38: Relaxação de tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa
Fonte: Autor, 2012

Após a remoção completa da carga, verifica-se um certo nível de tensão residual, conforme mostrado na Figura 39. Nota-se que no local de contato com o punção, permanece um nível mais elevado de tensão residual.

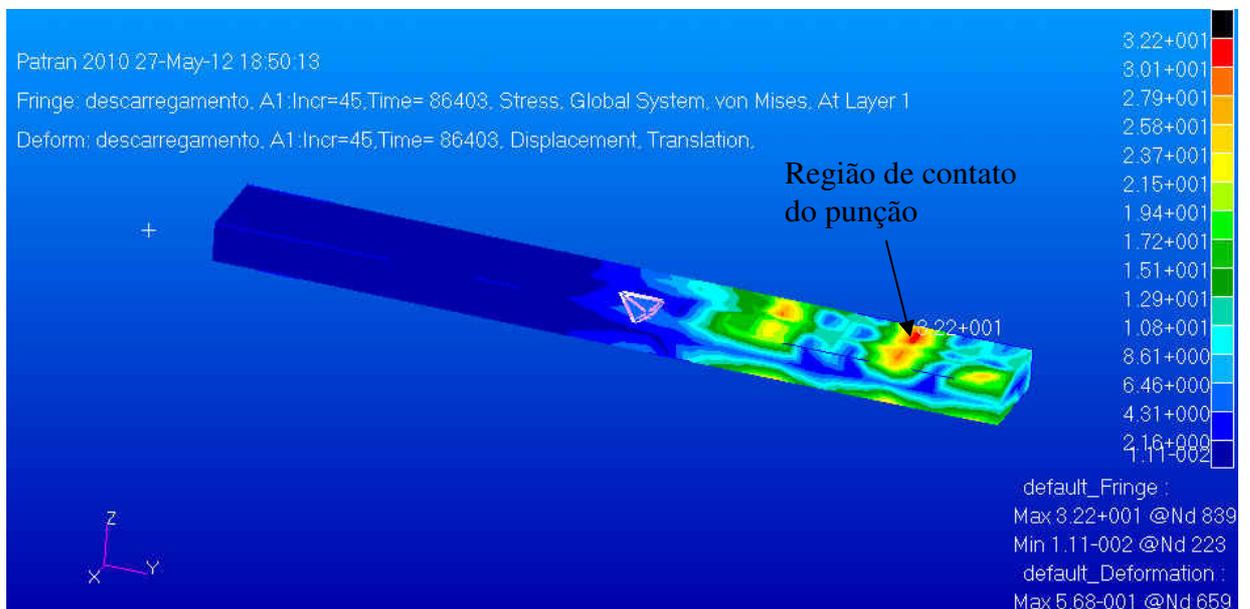


Figura 39: Tensão na geometria simples – nível de referência: 220 MPa
Fonte: Autor, 2012

Em seguida, verificou-se o nível de deformação e o retorno elástico. A flecha inicial obtida na simulação mostrada na Figura 40 ficou conforme a calculada, mostrada na Tabela 4 e a aplicada no ensaio mostrada na Tabela 5.

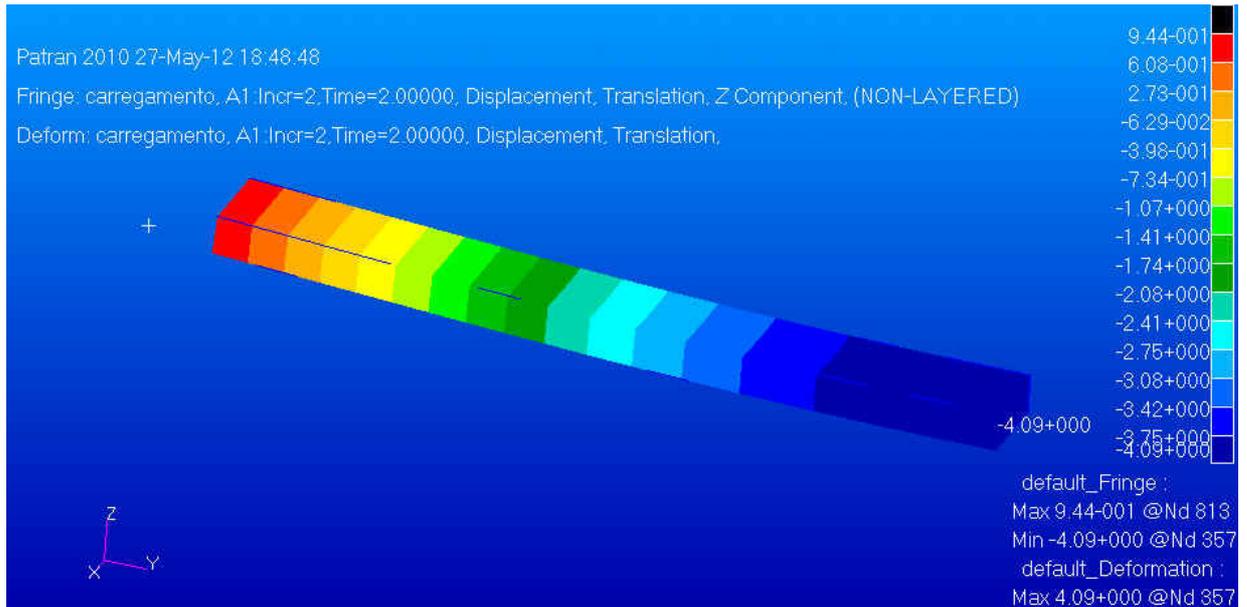


Figura 40: Flecha inicial na geometria simples – nível de referência: 220 MPa
 Fonte: Autor, 2012

A flecha residual após o carregamento é mostrada na Figura 41

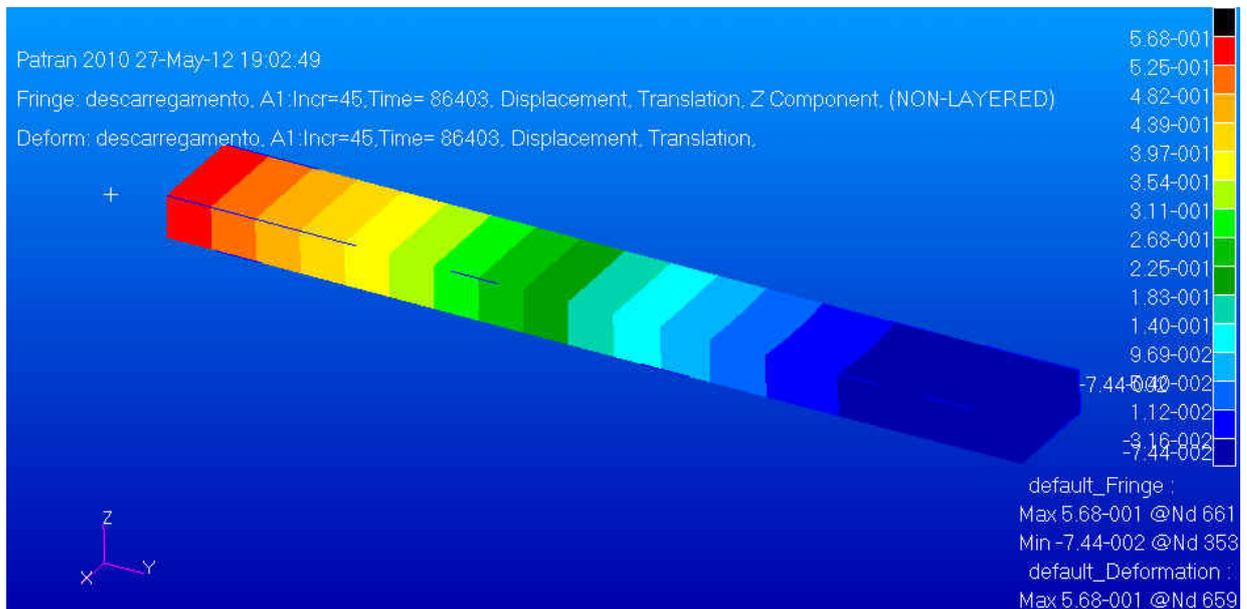


Figura 41: Flecha inicial na geometria simples – nível de referência: 220 MPa
 Fonte: Autor, 2012

O efeito de concentração de tensão na região do ponto de aplicação da carga – contato do punção com o corpo de prova – mostrou-se cada vez mais visível à medida que se aumentou a carga aplicada. A Figura 42 mostra um detalhe da região para a aplicação da carga de referência de 300 MPa para o CDP sem reforço.

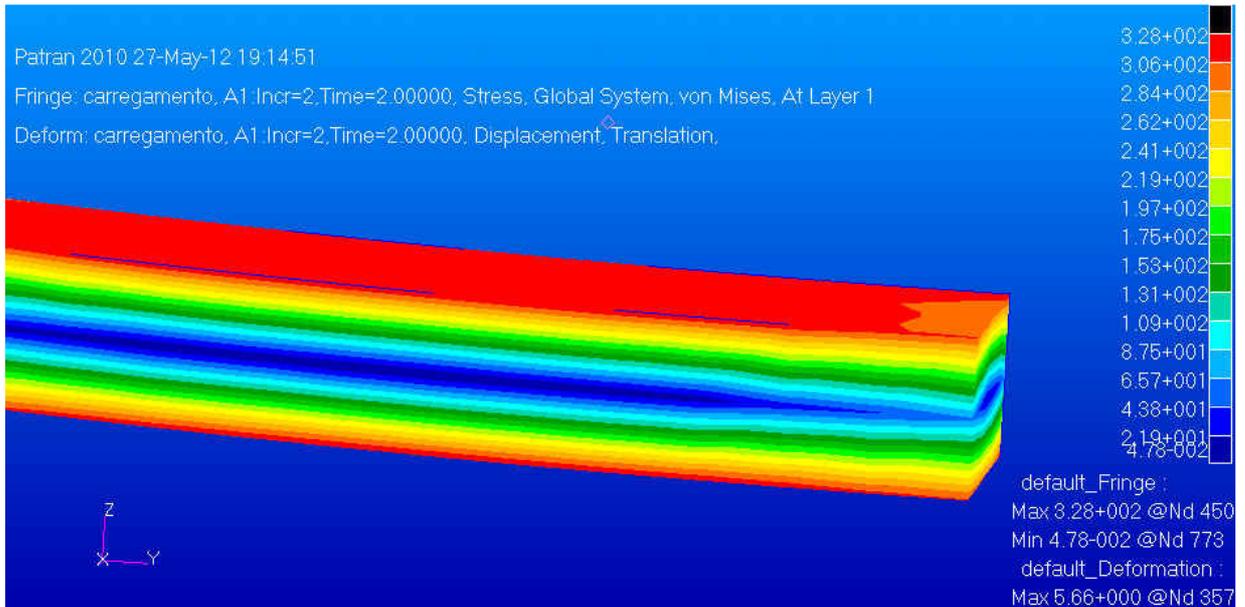


Figura 42: Tensão inicial na geometria simples – nível de referência: 300 MPa
 Fonte: Autor, 2012

Percebe-se que além da concentração de tensão na região do punção também há um carregamento maior que o esperado nas camadas externas do material, neste caso também devido à condição de contorno aplicada e à própria geometria da peça. Este efeito foi ainda mais preponderante para o CDP com reforçador, com a tensão de referência de 300 MPa. A Figura 43 mostra este efeito, com o nível de tensão na região de concentração chegando a 660 MPa, mas logo em seguida caindo, chegando a 350 MPa.

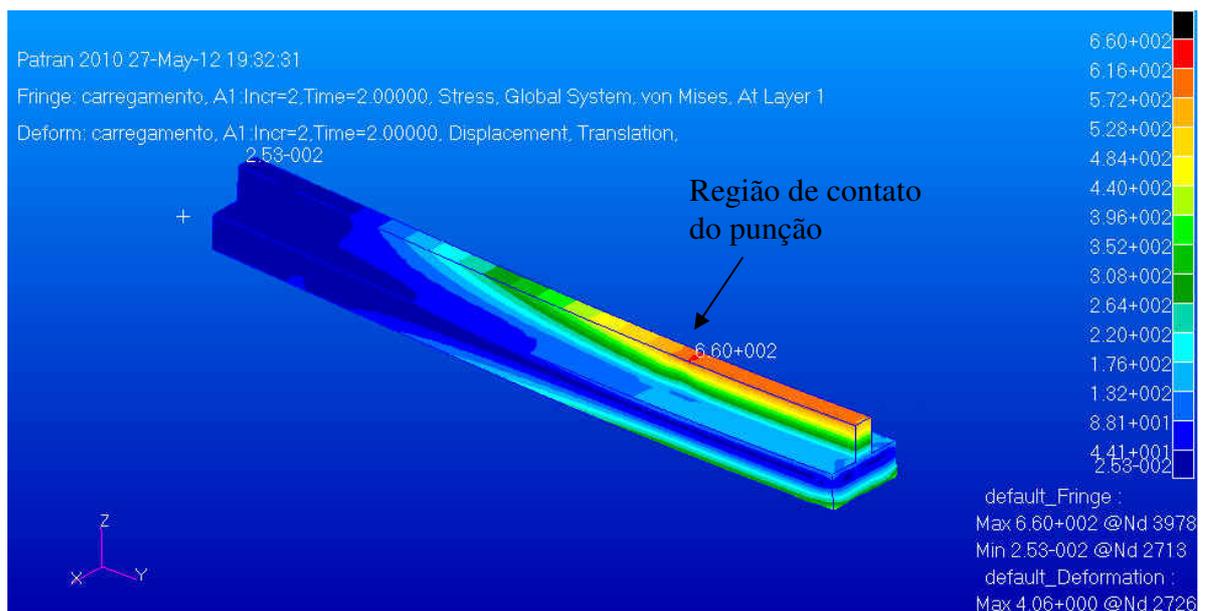


Figura 43: Tensão inicial na geometria com reforçador – nível de referência: 300 MPa
 Fonte: Autor, 2012

Nota-se que o efeito é concentrado nas fibras superiores do corpo de prova, próximo ao ponto de contato do punção e à condição de restrição na direção Y no centro de simetria. Na Figura 44 é possível notar que afastando-se um pouco desta região superior, o nível de tensão cai bastante, e nas fibras inferiores o valor de tensão é bem próximo ao do nível de referência esperado.

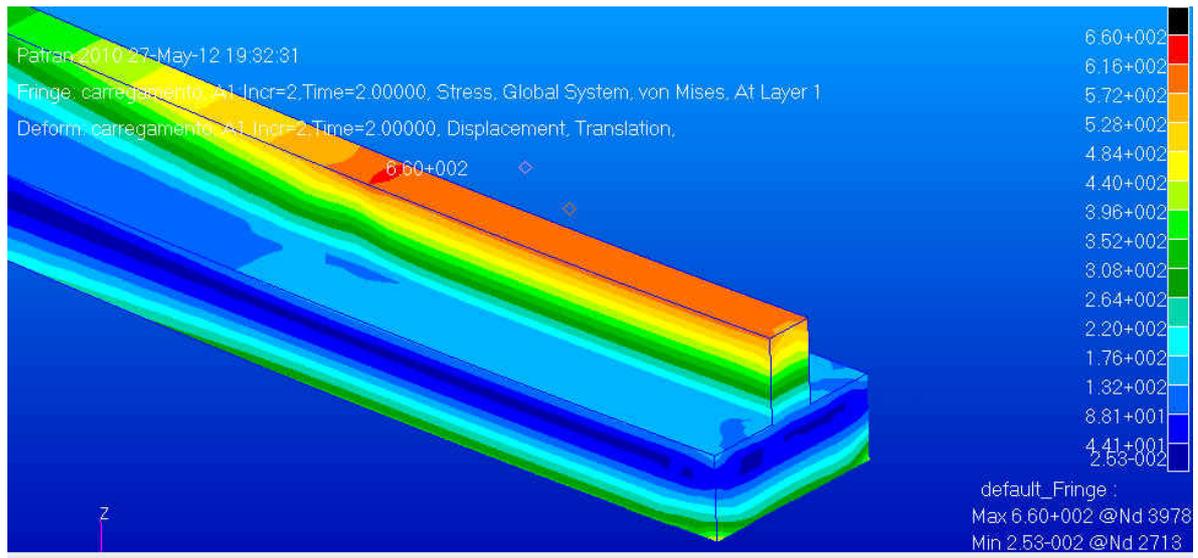


Figura 44: Detalhe da tensão inicial na geometria com reforçador – nível de referência: 300 MPa
 Fonte: Autor, 2012

Verificou-se então se ocorreu o efeito esperado de relaxação da tensão pela fluência do material. A Figura 45 mostra este efeito.

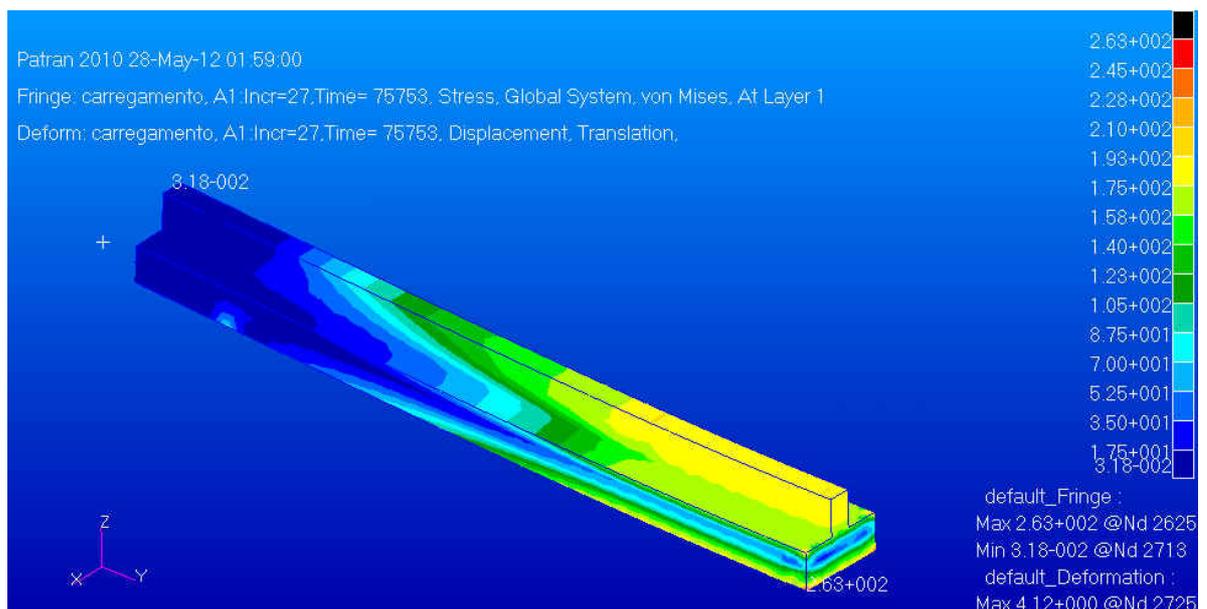


Figura 45: Detalhe da tensão inicial na geometria com reforçador – nível de referência: 300 MPa
 Fonte: Autor, 2012

Pelo mostrado na Figura 44 e na Figura 45, é possível concluir que houve relaxação da tensão após o tempo de exposição à temperatura de 163 °C.

Como a tensão de escoamento do material a 163°C é de 330 MPa, conclui-se que houve escoamento – deformação plástica – em uma porção do material.

Por definição, no processo CAF não deve aparecer nenhum nível de deformação plástica pelo escoamento do material. No entanto, considerou-se que o nível de tensão que excedeu o escoamento foi observado numa região concentrada do material, por isso ainda válido para estudo do CAF; todavia é possível que este efeito cause impacto no resultado final do retorno elástico.

Os resultados obtidos pela simulação para todas as geometrias e níveis de tensão estudados são mostrados na Tabela 4

Tabela 4: Resultados da simulação

	Com reforçador			Sem reforçador		
Tensão de referência [MPa]	220	260	300	220	260	300
Flecha inicial [mm]	2,96	3,51	4,06	4,1	4,91	5,66
Flecha final [mm]	1,19	1,73	2,31	0,64	1,187	3,7
Tensão inicial punção [MPa]	475	569	660	236	284	328
Tensão inicial [MPa]	317	341	396	205	265	306
Tensão de relaxação [MPa]	239	252	263	218	249	271
Tensão residual punção [MPa]	136	156	171	32	49	63
Tensão residual [MPa]	72	93	91	15	29	50

Fonte: Autor, 2012

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O ferramental mostrado na Figura 46 foi utilizado para validação do modelo de Elementos Finitos.

Para ativação do mecanismo de fluência, os CDPs foram conformados e colocados juntamente com o ferramental numa estufa a 163 graus Celsius.

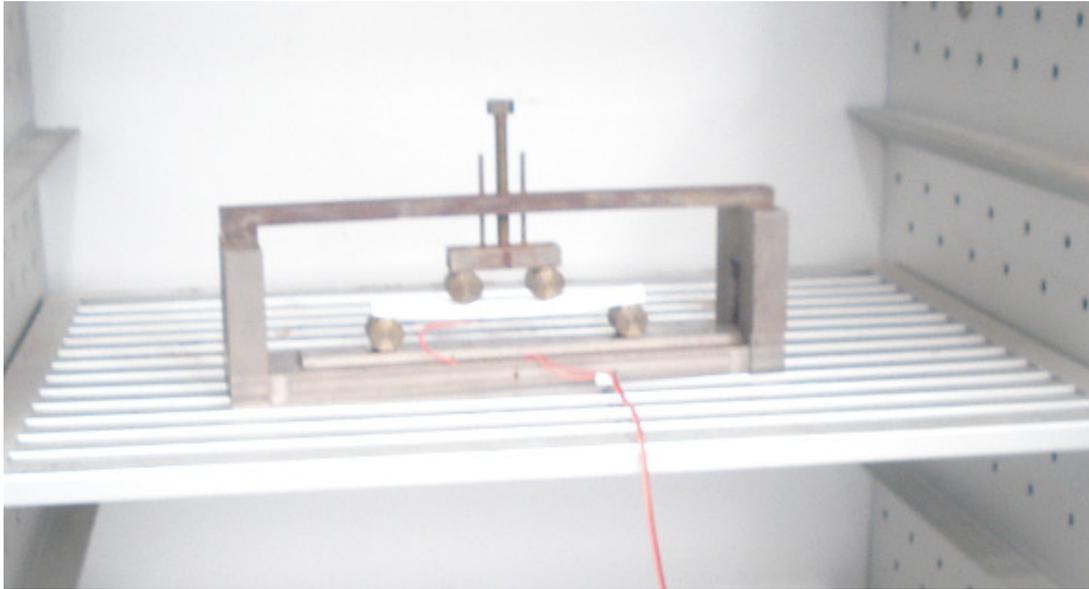


Figura 46 – Ferramental de flexão em quatro pontos com o corpo de prova conformado na estufa.

Fonte: Autor, 2012

Foram ensaiados três corpos de prova com reforçador, em diferentes níveis de tensão: 220MPa; 260MPa; 300MPa. Utilizou-se um strain gage colado no centro do corpo de prova para se calcular o nível de tensão aplicado. A leitura de microdeformações do gage foi o indicativo do nível de tensão de referência. A Tabela 5 mostra a flecha e a leitura do strain-gage para cada corpo de prova.

Tabela 5: Flecha aplicada experimentalmente

	Geometria com reforçador		
Flecha inicial [mm]	2,97	3,51	4,05
Leitura do gage [μ d]	3014	3562	4110

Fonte: Autor, 2012

Não foram ensaiados corpos de prova sem reforçador, pois se considerou o modelo validado apenas ensaiando um tipo de geometria.

O tempo de permanência na estufa foi de 24 horas. A Tabela 6 mostra as flechas finais obtidas após a retirada dos CDPs e resfriamento à temperatura ambiente

Tabela 6: Dados experimentais de flecha após 24 horas

Nível de tensão	220 MPa	260 MPa	300 MPa
FLECHA	1,18 mm	1,72 mm	2,40 mm

Fonte: Autor, 2012

A Figura 47 e a Figura 48 mostram o procedimento para medição da flecha máxima final.

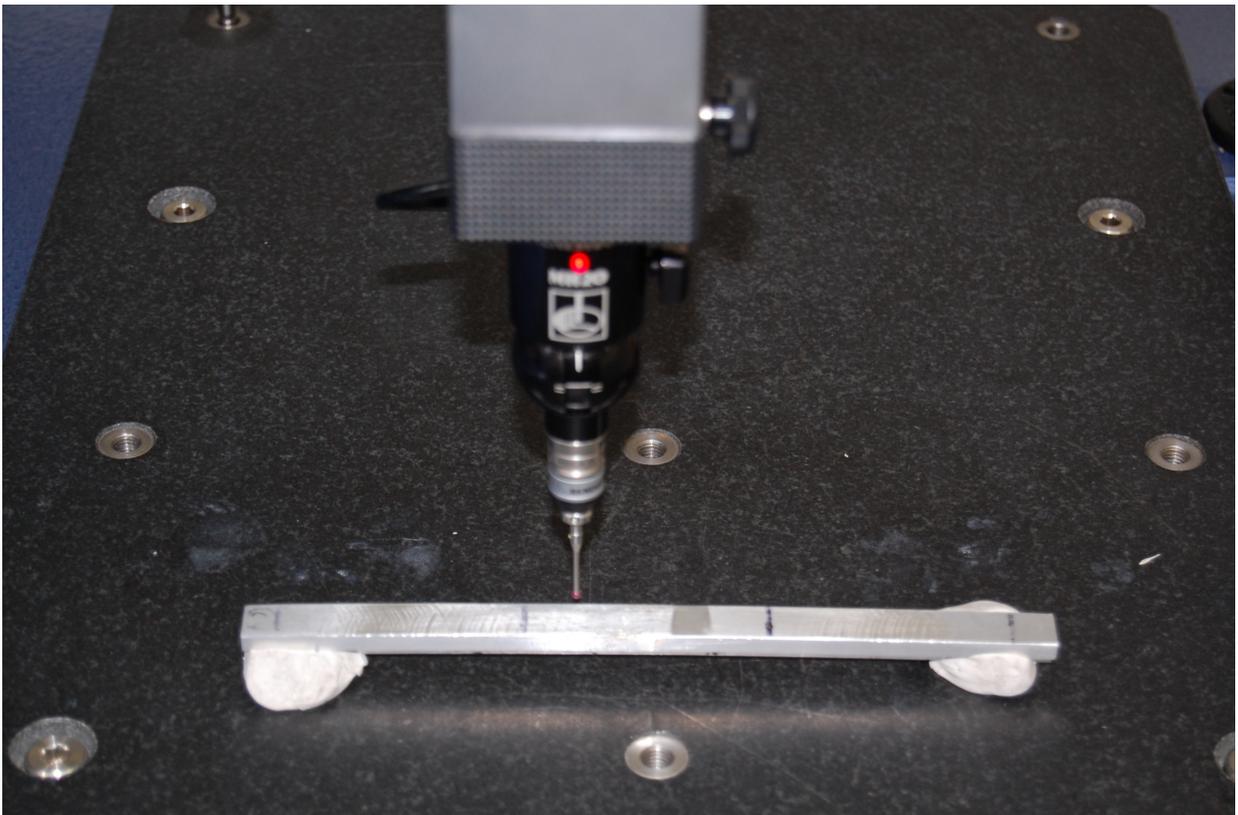


Figura 47 – Medição da Flecha

Fonte: Autor, 2012



Figura 48 – Medição da Flecha

Fonte: Autor, 2012

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Foram ensaiados três corpos de prova com reforçador, em diferentes níveis de tensão: 220MPa; 260MPa; 300MPa. Utilizou-se um strain gage colado no centro do corpo de prova para se calcular a tensão através do deslocamento (flecha no centro do corpo de prova).

O retorno elástico foi calculado através da seguinte equação:

$$\text{Retorno}_{\text{Elástico}} = \frac{\text{Flecha}_{\text{INICIAL}} - \text{Flecha}_{\text{FINAL}}}{\text{Flecha}_{\text{INICIAL}}} * 100 \quad (23)$$

Fonte: Autor, adaptado de Ho, Lin, Dean, 2003

Assim, calculou-se o retorno elástico para a simulação e comparou-se com o resultado do retorno elástico calculado experimentalmente.

A Tabela 7 mostra o resultado do retorno elástico obtido experimentalmente, para o corpo de prova com reforçador longitudinal.

Tabela 7: Retorno elástico obtido experimentalmente

	Experimental - com reforçador		
	220	260	300
Tensão de referência [MPa]	220	260	300
Flecha inicial [mm]	2,97	3,51	4,05
Flecha final [mm]	1,18	1,72	2,4
Retorno Elástico	60,27%	51,00%	40,74%

Fonte: Autor, 2012

A Tabela 8 mostra o resultado do retorno elástico obtido por simulação para um corpo de prova com reforçador e a Tabela 9 mostra o resultado do retorno elástico obtido por simulação para um corpo de prova sem reforçador

Tabela 8: Retorno elástico obtido por simulação

	Simulação - com reforçador		
	220	260	300
Tensão de referência [MPa]	220	260	300
Flecha inicial [mm]	2,96	3,51	4,06
Flecha final [mm]	1,19	1,73	2,31
Retorno Elástico	59,80%	50,71%	43,10%

Fonte: Autor, 2012

Tabela 9: Retorno elástico obtido por simulação

Tensão de referência [MPa]	Simulação - sem reforçador		
	220	260	300
Flecha inicial [mm]	4,1	4,91	5,66
Flecha final [mm]	0,64	1,187	3,7
Retorno Elástico	84,39%	75,82%	34,63%

Fonte: Autor, 2012

O gráfico na figura 49 mostra a curva do flecha final de acordo com a tensão aplicada dos dados obtidos experimentalmente para o CDP com reforço longitudinal.

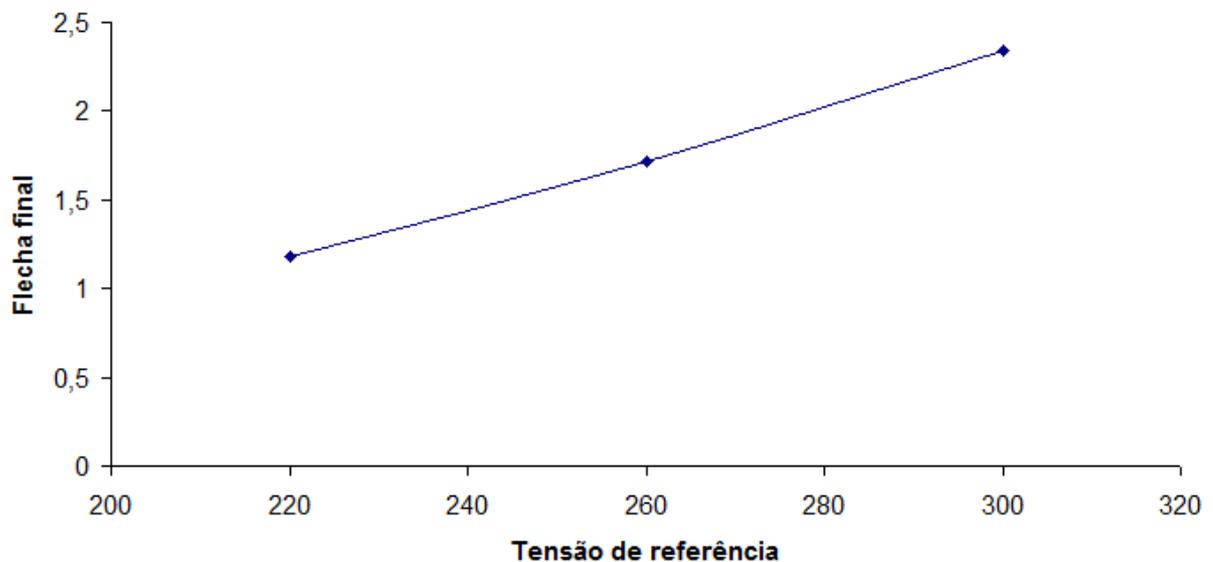


Figura 50 – Flecha final *versus* tensão de referência

Fonte: Autor, 2012

Comparando-se o percentual de retorno elástico obtido experimentalmente e por simulação do corpo de prova com reforçador, como mostrado na Tabela 10, percebe-se que se conseguiu atingir boa correlação dos resultados.

Tabela 10: Retorno elástico obtido por simulação comparado ao obtido experimentalmente

Tensão de referência [MPa]	Retorno Elástico		
	220	260	300
Retorno Elástico Experimental	60,27%	51,00%	40,74%
Retorno Elástico por Simulação	59,80%	50,71%	43,10%
Diferença	0,47%	0,28%	-2,36%

Fonte: Autor, 2012

Comparando-se as flechas finais obtidas experimentalmente e por simulação do corpo de prova com reforçador, como mostrado na Tabela 11, percebe-se que também há uma boa correlação.

Tabela 11: Flechas finais obtidas por simulação comparadas às obtidas experimentalmente

Tensão de referência [MPa]	Flecha Final		
	220	260	300
Flecha final Experimental [mm]	1,18	1,72	2,4
Flecha final por Simulação [mm]	1,19	1,73	2,31
Diferença	0,84%	0,58%	-3,90%

Fonte: Autor, 2012

A literatura indica que a faixa de erro aceitável é da ordem de 5,2% (LIN et al. 2007). Assim sendo, o modelo de lei de potência proposto foi validado, pois indica um erro máximo de 3,90%.

Percebe-se que houve uma diferença maior no CDP com maior nível de tensão. Esta diferença ocorreu devido ao efeito do escoamento local do material. Inicialmente este efeito não era desejado, pois o processo CAF não prevê deformação plástica. Todavia, foi verificado que um certo nível de deformação plástica é aceitável e pode até mesmo ser desejável, pelo fato de se poder trabalhar com espessuras maiores e curvaturas menores. Além disso, dependendo do componente a ser fabricado, pode-se até mesmo melhorar o desempenho em fadiga. Porém, deve-se investigar caso a caso, e tudo depende do projeto do componente final e como ele será solicitado.

6. CONCLUSÕES

O modelo de potência utilizado mostrou uma boa correlação com os resultados experimentais para a predição do retorno elástico para a geometria com reforçador. Uma vez que este modelo foi validado, fez-se também a simulação para uma geometria sem reforçador.

Percebeu-se que o nível de retorno elástico foi bem maior no modelo sem reforçador. Este efeito já era esperado, uma vez que o reforçador aumenta a rigidez, e com isso reduz o retorno elástico.

O reforçador também levou a um aumento localizado de tensão, o que fez que ocorresse um nível de deformação plástica nas fibras mais externas na região do reforçador. Este efeito contribuiu para aumentar a diferença entre o retorno elástico previsto e o obtido experimentalmente, em especial no maior nível de tensão de referência empregado. Devido ao escoamento no material, foi induzido um nível de tensão residual maior do que o esperado para o processo de conformação CAF.

Mesmo com o efeito de escoamento localizado observado, o nível de correlação foi satisfatório, pois os resultados obtidos foram próximos dos resultados apresentados na literatura (LIN et al. 2007). Portanto, o modelo proposto foi validado.

Todavia, para trabalhos futuros, faz-se necessário realizar novos ensaios, evitando-se níveis de tensão maiores que a tensão de escoamento do material, e gradativamente aumentar o valor da tensão aplicada para se obter escoamento parcial do material e se investigar os ganhos desta abordagem.

Também sugere-se realizar simulações de conformação por fluência e envelhecimento envolvendo geometrias diferentes das propostas neste trabalho para uma melhor investigação do modelo de lei de potência utilizado. Uma etapa seguinte ao trabalho aqui apresentado é a realização da conformação de uma chapa, que se aproxima de um componente real.

BIBLIOGRAFIA

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE, 4. Ed.**, São Paulo: Érica, 2006.

Associação Brasileira do Alumínio. **Guia técnico do alumínio: tratamento térmico, 1ª Ed.** São Paulo: ABAL, 2003.

BARAN, Nicolas M. **Finite Element Analysis on Microcomputers.** New York: McGraw-Hill, 1998.

BENNETT ASSOCIATES. **Airbus A380 Takes Creep Forming to New Levels.** Disponível em: http://www.bennettmg.co.uk/Project_MD_Airbus.aspx. Acesso em 10 Jan. 2011.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais, 7ª Ed.** Rio de Janeiro: LTC, c2008

CHANDRUPATLA, Tirupathi, R; BELEGUNDU, Ashok D. **Introduction to Finite Elements in Engineering – 3rd Edition**, Englewood Cliffs, N. J. :Prentice-Hall, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica, Volume I, 2ª Ed.** Rio de Janeiro, RJ: McGraw-Hill, 1986.

DOWLING, Norman E. **Mechanical Behavior of Material, 2nd Ed.** New Jersey: Prentice-Hall 1998.

DU, X.D. Study on ageing and creep of Al–0.1Zr alloy. **Materials Science and Engineering A** 432 (2006) 84–89

HOSFORD, William F. **Metal Forming Mechanics and Metallurgy, 3ª Ed.** Cambridge: Cambridge University, 2007

HOLMAN, M. C. Autoclave age forming large aluminum aircraft panels. **Journal of Mechanical Working Technology**, USA 1989; 20(9): 477-488.

HO, K.C.; LIN, J.; DEAN T.A. Constitutive modelling of primary creep for age forming an aluminium alloy. **Journal of Materials Processing Technology** 153–154 (2004) 122–127.

HO, K.C.; LIN, J.; DEAN T.A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets. **International Journal of Plasticity** 20 (2004) 733–751

HO, K.C.; LIN, J.; DEAN T.A. An integrated process for modelling of precipitation hardening and springback in creep age-forming. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 46 (2006) 1266–1270

JEUNECHAMPS, P.-P. et al. A closed form technique to predict springback in creep age-forming. **Ntional Journal of Mechanical Sciences** 48 (2006) 621–629

KOEHLER, W.; PLEGE B.; SAHM K. F. Metal Forming: Specialized Procedures for the Aircraft Industry. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology** (2008) pp 5427-5433

KOWALEWSKI, Z. L.; HAYHURST, D. R.; DYSON, B. F. Mechanisms-based creep constitutive equations for an aluminum alloy. **Journal of Strain Analysis** (1994) : 309-316.

LAYTON, R. E. Fabrication skin segments for the Saturn buster – simultaneous aging and forming. **Am. Machinist metalworking. Manufact.** 5,67-70

LIN, Huang et al. FEM Analysis of Spring-backs in Age Forming of Aluminum Alloy Plates. **Chinese Journal of Aeronautics** 20(2007) 564-569

MSC SOFTWARE CORPORATION. **Introdução ao MSC Patran e MSC Marc** 2007.

MSC SOFTWARE CORPORATION. **MSC MARC 2007 r1, Theory and User Information Manual**, 2007

MSC SOFTWARE CORPORATION. **MARC 2007 r1, Volume E: Marc User's Guide**, 2007

MEYERS, Marc A; CHAWLA, Krishan K. **Princípios de Metalurgia Mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

PINTO, João Luiz Teixeira. **Compêndio de Resistência dos Materiais**. São José dos Campos: JAC, 2005

RIBEIRO, Fernando L. B. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004

RUGGIERO, Márcia A. Gomes; Lopes, Vera Lúcia da Rocha. **Cálculo Numérico – aspectos teóricos e computacionais, 2ª Edição**. São Paulo ; Rio de Janeiro ; Lisboa: Makron: Access Intelligence, 1988.

STARINK, M.J. et. al. Development Of New Damage Tolerant Alloys For Age-Forming. **Materials Science Forum**, 2002, vol. 396-402, pp 601-606

STARINK, M.J. et al. 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** 418 (2006) 241–249

SALLAH, M.; PEDDIESON, J.; FOROUDASTAN, S. A mathematical model of autoclave age forming. **Journal of Materials Processing Technology** 1991; 28(1-2): 211-219.

TAKAFUMI Adachi, et al. Age Forming Technology for Aircraft Wing Skin. Materials Forum Volume – 2004, pp 202-207

ZHAN, Lihua; LIN, J.; DEAN T.A. A Review of the Development of Creep Age Forming: Experimentation, Modelling and Applications. *International Journal of MachineTools&Manufacture* 51 (2011):1-17.