CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

FELIPE MARIANO BRANDÃO

SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA COM ENVELHECIMENTO.

São Bernardo do Campo

2013

FELIPE MARIANO BRANDÃO

SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA COM ENVELHECIMENTO.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário da FEI para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

São Bernardo do Campo

2013

Brandão, Felipe Mariano
Simulação pelo método dos elementos finitos do processo de conformação por fluência com envelhecimento / Felipe Mariano Brandão. São Bernardo do Campo, 2013.
94 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.
Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

1. Conformação por Fluência com Envelhecimento. 2. Retorno Elástico. 3. Elementos Finitos. 4. Propriedades Mecânicas. I. Bortolussi, Roberto, orient. II. Título.

CDU 621.961

Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Felipe Mariano Brandão **Matrícula:** 211110-2

Título do Trabalho: Simulação pelo método dos elementos finitos do processo de conformação por fluência com envelhecimento.

Área de Concentração: Materiais e Processos

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Data da realização da defesa: 25/04/2013

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

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 25 de Abril de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: _____

Prof. Dr. Sergio Delijaicov

Ass.: _____

Prof. Dr. Dilermando Nagle Travessa

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

Dedico esta obra a meus familiares e principalmente a minha mãe que estará sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Bortolussi pelo incentivo, ajuda e paciência a mim dedicado.

A equipe do projeto *Creep Age Forming* da Escola Politécnica da USP, pelo conhecimento adquirido juntos.

A Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER) que acreditou no projeto e forneceu todos os recursos necessários.

Ao Professor mestre em Engenharia Mecânica William Naville, pelo apoio tanto na realização da fase experimental quanto nas constantes discussões técnicas desse trabalho.

Aos meus amigos técnicos do Centro de Laboratórios Mecânicos da FEI (Oficina Mecânica, Laboratório de Materiais e IPEI) pela colaboração e incentivo.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio e compreensão nos momentos de estudo e preocupações.

Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.

Henry Ford

RESUMO

A indústria aeroespacial busca sempre a melhoria contínua de seus produtos visando alcançar a menor relação entre peso e resistência mecânica, e isso acarreta no surgimento de inúmeros processos de fabricação, dentre os quais se destaca a conformação por fluência com envelhecimento, do inglês *Creep Age Forming* (CAF), também conhecido como *Creep Forming* ou *Age Forming*. Este processo é empregado na fabricação de painéis de asa e nele atuam simultaneamente três fenômenos: fluência, relaxação e envelhecimento artificial. Temperatura e tempo de processo são definidos para que a fluência não atinja o estágio terciário e para que a peça final atinja as propriedades mecânicas de interesse através do envelhecimento. Com isso o mecanismo de fluência é interrompido, fazendo com que haja o fenômeno de retorno elástico. O retorno elástico deve ser previsto e seu efeito ser compensado no ferramental. Neste trabalho caracterizaram-se as propriedades mecânicas da liga Al 7050 e obteve-se experimentalmente o modelo de fluência que caracteriza o CAF. Com isso, utilizando o método dos elementos finitos simulou-se 2 geometrias propostas, determinando-se assim o retorno elástico, o campo de tensões atuantes e as tensões residuais após o processo.

Palavras chave: Conformação por fluência com envelhecimento, retorno elástico, Elementos finitos, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The aerospace industry always seeks continuous improvement of its products in order to achieve the lowest ratio among weight and resistance and its generates many manufacturing processes as the Creep Age Forming (CAF), also known as Creep Forming or Age Forming. This process is used to manufacture wing panels and three phenomena work on it simultaneously: creep, relaxation and aging. Temperature and process time are set to the creep does not reach the tertiary stage and the final piece obtains the desirable mechanical properties by aging. However, the creep does not occur completely, so there is the springback phenomenon. The springback should be predicted and this effect should be compensated in tooling. This work characterized the mechanical properties of the alloy Al 7050 and obtained experimentally the model of creep that characterizes the CAF. With this, using the finite element simulated 2 geometries, thus determining the springback, the stress acting and residual stresses after the process.

Keywords: Creep age forming, springback, Finite elements, mechanical properties.

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, h_c, H^*, n, Q, C_0,	Constantes do material
γ, C_A, C_{SS}, m_0, m_1, m_2 e m_3	Constantes do material
$\dot{\varepsilon}_e$	Taxa de deformação por fluência
σ_e	Tensão inicial aplicada
σ_A	Limite de escoamento devido ao crescimento do precipitado
σ_{ss}	Limite de escoamento da solução sólida
σ_Y	Limite de escoamento da liga
$\dot{H}$	Taxa de endurecimento por deformação
H	Endurecimento por deformação
$\dot{r}_p$	Taxa de crescimento do raio do precipitado
r_p	Raio do precipitado
K_{11}	Raio de curvatura na direção x
K_{22}	Raio de curvatura na direção y
ε_{TOTAL}	Deformação total
$\varepsilon_{FLUÊNCIA}$	Deformação por fluência
$\varepsilon_{ELÁSTICA}$	Deformação elástica
$\varepsilon_{ENDURECIMENTO}$	Deformação devido o endurecimento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tensões iniciais aplicadas no experimento de CAF. 56
Tabela 2- Evolução da tensão de escoamento em função do tempo de envelhecimento. 65
Tabela 3- Resultados de retorno elástico experimental. 70
Tabela 4- Retorno elástico – Geometria de curvatura simples. 75
Tabela 5- Retorno elástico – Geometria de dupla curvatura. 77
Tabela 6- Resultados de tensão residual. 81
Tabela 7- Resultados de tensões residuais. 84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução na aviação comercial brasileira. 16
Figura 2 - Painel de asa manufaturado por CAF. 17
Figura 3 - Gulfstream G-IV. 21
Figura 4 - Painel de asa antes e após o CAF. 21
Figura 5 – Principais componentes da asa. 22
Figura 6 - Autoclave para CAF. 22
Figura 7 - Representação do processo de CAF. 23
Figura 8 - Variação do módulo com a variação da temperatura. 24
Figura 9 – Correlação entre fluência e relaxação (queda da deformação elástica). 25
Figura 10 - Curva de deformação por fluência. 25
Figura 11 - Variação da taxa de deformação durante a fluência. 26
Figura 12 - Curva de deformação por fluência em função da temperatura. 26
Figura 13 - Curva de deformação por fluência em função da tensão aplicada. 27
Figura 14 - Curva de relaxação por tempo em diferentes tensões. 28
Figura 15 - Curva de relaxação por tempo em diferentes temperaturas. 28
Figura 16 - Curvas de envelhecimento para a liga Al 2024. 29
Figura 17 – Intervalo onde ocorre o processo de CAF. 30
Figura 18 – Representação da compensação do retorno elástico 31
Figura 19 – Tensão residual em diferentes processos de fabricação de painéis aeronáuticos. 31
Figura 20 - Distorção de painel após a soldagem e após o CAF. 32
Figura 21 – Retorno elástico em função do tempo de conformação. 33
Figura 22 – Retorno elástico em função de diferentes curvaturas. 33
Figura 23 - Etapas envolvendo o desenvolvimento de um produto. 34
Figura 24 - Representação da utilização de algoritmos evolutivos. 36
Figura 25 - Diferença da tensão de escoamento entre o modelo proposto e o real. 37
Figura 26 - Comportamento de fluência sob tração e compressão – René 85 à 649ºC. 38
Figura 27 - Comparação entre modelo simplificado e curva de fluência. 39
Figura 28 – Metodologia de cálculo do modelo simplificado. 40
Figura 29 - Comparação entre modelo unificado e simplificado. 41
Figura 30 - Representação de malha e elementos. 42
Figura 31 - Procedimentos de um programa CAE. 43

Figura 32 - Simplificação de um sólido 3D para uma superfície 2D. 44
Figura 33 - Representação de geometria unidimensional com a malha. 45
Figura 34 - Elementos bidimensionais. 45
Figura 35 – Comportamento do elemento bidimensional. 45
Figura 36 - Elementos tridimensionais. 46
Figura 37 - Material fornecido para os ensaios. 48
Figura 38 – Representação da condição TAF. 48
Figura 39 - Geometria de curvatura simples. 49
Figura 40 - Geometria de dupla curvatura. 49
Figura 41 - Corpo de prova para ensaios de tração. 50
Figura 42 - Corpo de prova usinado. 50
Figura 43 - Estufa Fanem. 51
Figura 44 – Controle da temperatura por termopar. 51
Figura 45 - Máquina de tração - MTS. 52
Figura 46 - Forno construído para os ensaios. 53
Figura 47 - Corpo de prova com termopar. 53
Figura 48 – Extensômetro mecânico. 54
Figura 49 – Corpo de prova para ensaio CAF – Espessura 3 mm. 55
Figura 50 – Corpo de prova para ensaio CAF – Espessura 9 mm. 55
Figura 51 – Matriz para ensaio CAF – Raio de 1500 mm. 56
Figura 52 – Matriz para ensaio CAF – Raio de 2000 e 2500 mm. 56
Figura 53 - Corpo de prova de fluência. 57
Figura 54 – Tridimensional Mitutoyo. 58
Figura 55 - Roseta extensométrica. 60
Figura 56 - Representação da roseta com sua numeração. 60
Figura 57 - Representação da ligação em 1/4 de ponte. 61
Figura 58 - Equipamento para medidas de tensões residuais. 62
Figura 59 – Geometria de curvatura simples com extensômetros colados. 63
Figura 60 – Conjunto montado para ensaio de alívio total de tensão. 63
Figura 61 – Evolução da tensão de escoamento em função do tempo de envelhecimento. 65
Figura 62 – Tensão inicial - Geometria de curvatura simples – Espessura de 5 mm. 66
Figura 63 – Tensão inicial - Geometria de dupla curvatura – Espessura de 5 mm. 67
Figura 64 – Tensão inicial - Geometria de dupla curvatura – Espessura de 12 mm. 67
Figura 65 – Curva de fluência. 190MPa@177ºC. 68

Figura 66 – Evolução da tensão de escoamento em função do tempo de envelhecimento. 69
Figura 67 – Medidas de flecha inicial. 70
Figura 68 – Retorno elástico experimental vs. simulação. 72
Figura 69 – Retorno elástico experimental vs. simulação – Modelo ajustado. 73
Figura 70 – Retorno elástico experimental vs. simulação para todos níveis de tensão. 73
Figura 71 – Secções longitudinais das geometrias de dupla curvatura. 76
Figura 72 – Secções transversais das geometrias de dupla curvatura. 76
Figura 73 –Tensão residual máxima principal- Curvatura simples – Esp. de 5 mm. 78
Figura 74 –Tensão residual mínima principal- Curvatura simples – Esp. de 5 mm. 79
Figura 75 –Tensão residual máxima principal- Dupla curvatura – Esp. de 5 mm. 79
Figura 76 –Tensão residual mínima principal- Dupla curvatura – Esp. de 5 mm. 80
Figura 77 –Tensão residual máxima principal- Dupla curvatura – Esp. de 12 mm. 80
Figura 78 –Tensão residual mínima principal- Dupla curvatura – Esp. de 12 mm. 81
Figura 79 – Gráfico da tensão principal máxima em função da profundidade. 82
Figura 80 – Gráfico da tensão principal mínima em função da profundidade. 83
Figura 81 – Elemento retirado após o ensaio de alívio total de tensão. 83
Figura 82 – Resultado de tensão inicial de von Mises. 91
Figura 83 – Resultado de deslocamentos iniciais na direção z. 92
Figura 84 – Resultado de deslocamentos finais na direção z. 92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **16**

1.1 Cenário da indústria aeronáutica **16**

1.2 Objetivo **18**

1.3 Estruturação **18**

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **19**

2.1 Ligas de alumínio **19**

2.2 Histórico do CAF **20**

2.3 Processo CAF **22**

2.4 Modelos propostos **35**

2.4.1 Modelo unificado **35**

2.4.2 Modelo simplificado 38

2.5 Modelamento numérico computacional **41**

3 MATERIAIS E MÉTODOS **47**

3.1 Definição da liga **47**

3.2 Definição das geometrias **48**

3.3 Preparação dos corpos de prova **49**

3.4 Ensaios de tração a quente **52**

3.5 Níveis de tensão **54**

3.6 Matriz para ensaio CAF **54**

3.7 Ensaios de fluência **57**

3.8 Ensaios de CAF **57**

3.9 Simulação do processo CAF e obtenção do modelo simplificado **58**

3.10 Tensão residual por furo cego incremental **59**

3.10.1 Procedimento para instrumentação do corpo de prova. **60**

3.10.2 Procedimento para a realização do ensaio **61**

3.11 TENSÃO RESIDUAL POR ALÍVIO TOTAL DAS TENSÕES **62**

4 RESULTADOS **64**

4.1 Ensaios de tração a quente **64**

4.2 Tensão inicial das geometrias definidas **66**

4.3 Ensaio de fluência **68**

4.4 Determinação do tempo de processo CAF **69**

4.6 Modelo simplificado **71**

4.7 Simulação final das geometrias definidas **74**

4.7.1 Retorno elástico 74

4.7.2 Tensões residuais 78

5 CONCLUSÕES **85**

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS **87**

REFERÊNCIAS **88**

APÊNDICE A **91**

1 INTRODUÇÃO

A busca pela solução de problemas industriais ocasiona a constante pesquisa de novas tecnologias, proporcionando assim um diferencial no atual mercado extremamente competitivo. Isto se dá de maneira mais acentuada na indústria aeronáutica.

1.1 Cenário da indústria aeronáutica

Nas últimas décadas a aviação comercial deixou de ser meramente um meio de transporte sofisticado passando a ser literalmente um transporte de pessoas e carga. Passagens a preços acessíveis difundiu a oferta deste meio de transporte em diferentes classes sociais. Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o volume de passageiros transportados no mercado aéreo doméstico brasileiro em fevereiro de 2011 aumentou em 9,34% com relação ao mesmo período do ano de 2010. A figura 1 exibe pesquisa realizada pela ANAC onde mostra o aumento do número de passageiros transportados na última década, bem como a queda no preço de passagens e aumento do preço do combustível (Passos, 2013).

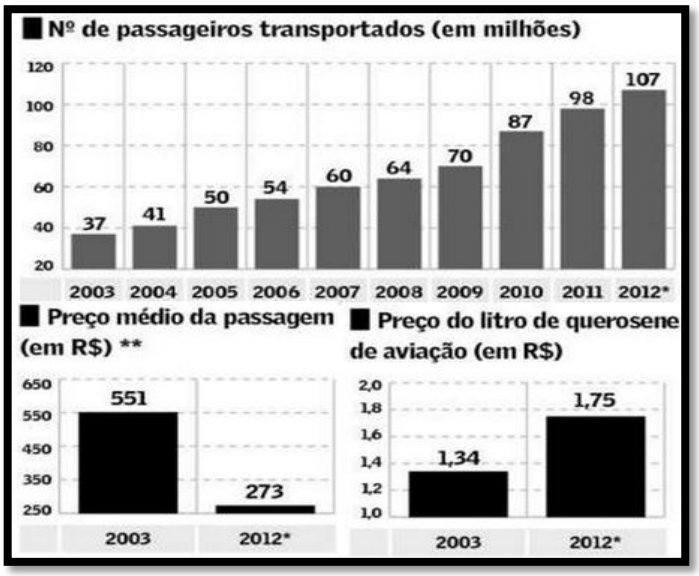

Figura 1 - Evolução na aviação comercial brasileira.
Fonte: Autor, adaptado de Alfredo Passos, 2013.

Este aumento de passageiros se dá principalmente pelo surgimento de novas companhias aéreas que, com a alta concorrência, reduzem os preços das passagens para atrair novos clientes. Entretanto a competição entre companhias acaba refletindo na competição entre as empresas fabricantes de aeronaves.

Os fatores considerados críticos para a indústria aeronáutica, no que tange à melhoria contínua de seus produtos, é alcançar a melhores relações entre peso, resistência mecânica, performance e custo. O peso é o fator principal, uma vez que afeta diretamente na velocidade de cruzeiro máxima, distância máxima de voo, consumo de combustível, capacidade em carga e assim no custo de operação, meta a ser minimizada pelas companhias aéreas.

Com a necessidade de diminuir tal relação, há o surgimento de inúmeros processos de fabricação dentre os quais se destaca a conformação por fluência com envelhecimento, do inglês *Creep Age Forming* (CAF), também conhecido como *creep forming* ou *age forming.*

O CAF é um processo de conformação em temperaturas acima da ambiente, aplicado a ligas de alumínio, onde atuam simultaneamente os mecanismos de fluência e relaxação através de carregamento constante imposto e endurecimento por precipitação ou envelhecimento (Jeunechamps et al., 2006). A combinação desses fenômenos promove a deformação permanente e, consequentemente, consegue-se obter a curvatura final para o painel de asa (Figura 2). Seu carregamento é feito dentro do regime elástico do material e como a fluência atinge apenas o estágio secundário o mecanismo é interrompido, fazendo com que na etapa de descarregamento haja o fenômeno de retorno elástico que deve ser previsto para então ser compensado no ferramental.

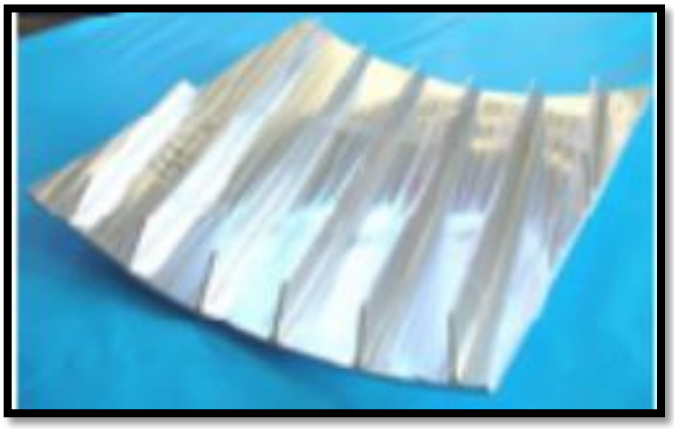

Figura 2 - Painel de asa manufaturado por CAF.
Fonte: Autor, adaptado de Eberl et al, 2006.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo principal a simulação do processo de CAF pelo método dos elementos finitos visando obter o retorno elástico em 2 geometrias propostas. Para tal, faz-se necessária a caracterização das propriedades mecânicas da liga que será utilizada, bem como estabelecer um modelo matemático de fluência capaz de reproduzir o processo. Este modelo de fluência será obtido através de procedimentos experimentais que tentam se aproximar ao máximo do processo.

1.3 Estruturação

No capítulo 1 apresenta-se o cenário da indústria aeronáutica, bem como a definição do processo de CAF e a sua grande importância. Este capítulo também detalha os objetivos do presente trabalho. No capítulo 2 realiza-se uma introdução sobre as ligas de alumínio e aborda-se de maneira detalhada o processo de CAF e por fim propõem-se dois modelos matemáticos capazes de simular o processo pelo método dos elementos finitos. No capítulo 3 demonstra-se a metodologia aplicada para a caracterização mecânica da liga. No mesmo capítulo também é demonstrada a metodologia utilizada para simular o processo de CAF, utilizando o software MSC Patran como pré e pós-processador e o software MSC Marc como “solver”. Finalmente, os resultados obtidos e as conclusões são detalhados nos capítulos 4 e 5 respectivamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Fribourg (2009) os requisitos gerais para a seleção de materiais estruturais das aeronaves são: baixo peso, propriedades mecânicas elevadas, baixa suscetibilidade à corrosão, alta tolerância a dano e prolongada vida em fadiga, onde neste contexto se aplicam as ligas de alumínio.

Mesmo com o crescente uso de materiais compósitos, o alumínio é bastante utilizado em aeronaves comerciais. Segundo Tang (2009), Boeing 787, recente avião da companhia americana é manufaturado 50% em compósitos, 15% em alumínio e 12% em titânio, sendo o restante aço e outras ligas.

2.1 Ligas de alumínio

O alumínio provém do minério denominado bauxita. Segundo Martins (2008), este é um dos minérios mais abundantes na crosta terrestre e o mesmo submetido ao refino e posterior reação eletrolítica gera o alumínio puro. Do alumínio puro se origina uma série de ligas por meio da adição de elementos químicos com o objetivo de melhorar as suas propriedades.

Segundo a classificação da *The Aluminium Association* as ligas de alumínio trabalhadas mecanicamente estão divididas basicamente em nove séries, sendo elas:

a) 1xxx – Alumínio puro.
b) 2xxx - Ligas contendo como elemento principal de adição o cobre e de elementos secundários como o magnésio e o lítio. São empregadas na indústria aeronáutica e aeroespacial.
c) 3xxx - Ligas contendo como elemento principal de adição o manganês.
d) 4xxx - Ligas contendo como elemento principal de adição o silício.
e) 5xxx - Ligas contendo como elemento principal de adição o magnésio.
f) 6xxx - Ligas contendo como elemento principal de adição o magnésio e o silício.

g) 7xxx - Ligas contendo como elemento principal de adição o zinco e elementos secundários como o cobre, magnésio, cromo e zircônio. Estas também são muito empregadas na indústria aeronáutica e aeroespacial.
h) 8xxx – Ligas contendo como elementos principais o estanho, lítio, ferro, cobre e magnésio.
i) 9xxx – Série de ligas reservada para uso futuro.

Dentre estas ligas, as mais utilizadas na indústria aeronáutica são as das séries 2xxx e 7xxx, pois as mesmas são passíveis de tratamentos térmicos, o que possibilita melhoria nas propriedades mecânicas. A série 2xxx possui boa usinabilidade, porém baixa resistência à corrosão e características de soldagem limitadas. Segundo Bakavos et al.(2004) outro ponto de atenção é que durante o processo de envelhecimento sob tensão constante em ligas da série 2xxx há o alinhamento dos precipitados, o que contribui com a facilidade de propagação de dano no componente. Já para as ligas da série 7xxx este fenômeno ocorre, porém de maneira menos significativa. Além disso, a série 7xxx possui boas propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão e boa conformabilidade.

Com as características apresentadas, a liga 7xxx torna-se o foco para aplicação do processo de *Creep Age Forming*. Restringindo ainda mais as ligas para o processo de *Creep Age Forming*, se propôs apenas a utilização da liga Al 7050 neste trabalho.

2.2 Histórico do CAF

Segundo Koehler et al. (2008), a primeira aplicação do processo CAF que se tem conhecimento foi na fabricação de componentes do tanque de combustível do veículo espacial Saturn. Em meados da década de 80 este processo passa a ser aplicado na indústria aeronáutica pela Textron Aerostructures com o objetivo de conformar grandes painéis de asa em alumínio, com dimensões superiores a 15 m.

Devido à dificuldade de se produzir em larga escala, inicialmente o processo teve apenas aplicações militares, como no bombardeiro americano B-1B. Em seguida o avião de caça Hawk, desenvolvido pela empresa BAE Systems para atender a força aérea inglesa, teve seu painel de asa superior também conformado por fluência com envelhecimento. Quem

introduziu o processo de CAF na aviação comercial foi a empresa Gulfstream com o projeto G-IV (Figura 3) (Jeunechamps et al., 2006).

Figura 3 - Gulfstream G-IV.
Fonte: Airlines, 2012.

Jambu et al. (2002), cita que um dos aviões que se encontra em evidência e possui os componentes da asa fabricados pelo processo de CAF é o Airbus A380, maior avião comercial já fabricado. Seu processo de fabricação foi desenvolvido pela empresa Qinetiq e junto ao painel de asa foram soldados reforçadores através do processo de *Laser Beam Welding* (LBW) em seguida submetendo-o ao processo de CAF, como ilustra a figura 4, antes e após a conformação.

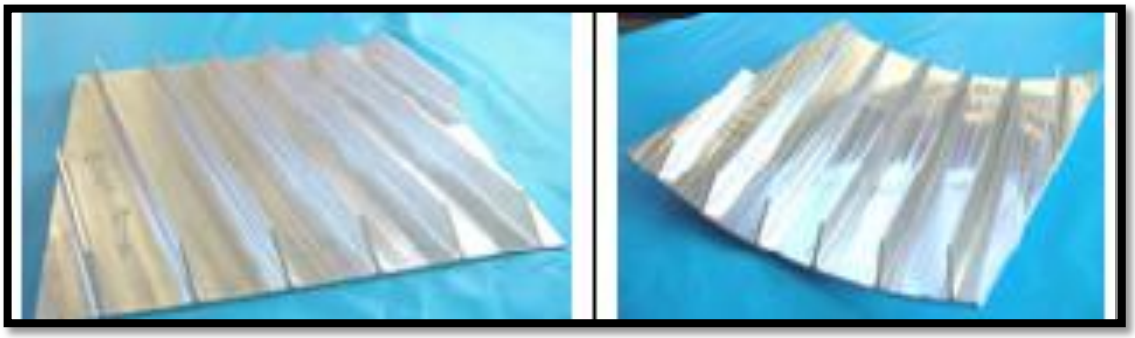

Figura 4 - Painel de asa antes e após o CAF.
Fonte: Eberl et al, 2006.

Eberl et al. (2006), cita que desde 2005 tem-se em desenvolvimento o projeto europeu *Ageform* que visa estudar melhorias contínuas no processo e conta com a presença de fornecedores de ligas de alumínio, representantes da indústria aeronáutica e aeroespacial e também universidades de renome internacional.

2.3 Processo CAF

A confecção de painéis de asas maiores e com curvaturas mais complexas pode não ser possível de se resolver com processos de conformação convencionais, como é o casso do dobramento, dobramento seguido do envelhecimento, laminação e laminação seguida de envelhecimento. É neste contexto que se encaixa o CAF, capaz de fabricar painéis através de geometrias complexas previamente usinadas. Segundo Eberl et al. (2006), o processo apresenta baixo custo e uma boa conformação para componentes de asa.

O CAF é um processo de conformação que envolve temperatura, aplicado a painéis de asa (Figura 5) onde atua a deformação induzida por tensão constante ao longo do tempo (fluência) e concorrente a esse fenômeno tem-se a relaxação da tensão e endurecimento por precipitação (envelhecimento artificial). Estes fenômenos promovem deformação permanente e, consequentemente, consegue-se obter a curvatura final esejada.

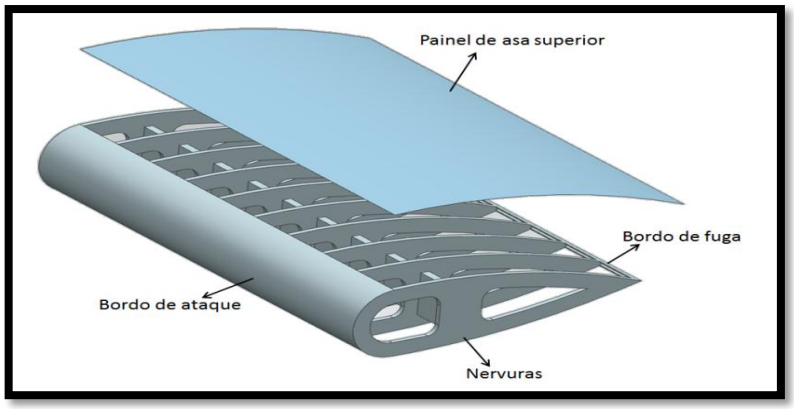

Figura 5 – Principais componentes da asa.
Fonte: Autor, 2012.

Figura 6 - Autoclave para CAF.
Fonte: Cadinfo, 2012.

O processo é realizado em autoclave, como mostra a figura 6, que é responsável por oferecer temperatura e a pressão necessárias para a conformação do painel que pode ser dividido em três etapas principais: condição inicial, carregamento e descarregamento.

O painel de asa a ser conformado é colocado sobre o ferramental. Entre os dois é produzido vácuo através de um sistema específico para este fim, como representa a condição inicial da figura 7. Todo o conjunto é então colocado dentro da autoclave. Esta exercerá a pressão e temperatura sob o painel a ser conformado, etapa de carregamento. A temperatura, juntamente com o tempo de processo são otimizadas para que a chapa obtenha as propriedades mecânicas de interesse através do envelhecimento e além disso para que a fluência não atinja o estágio terciário, o que introduziria dano ao painel. Por fim, há o descarregamento da pressão e seguido do resfriamento, onde observa-se o retorno elástico, representado também na figura 7.

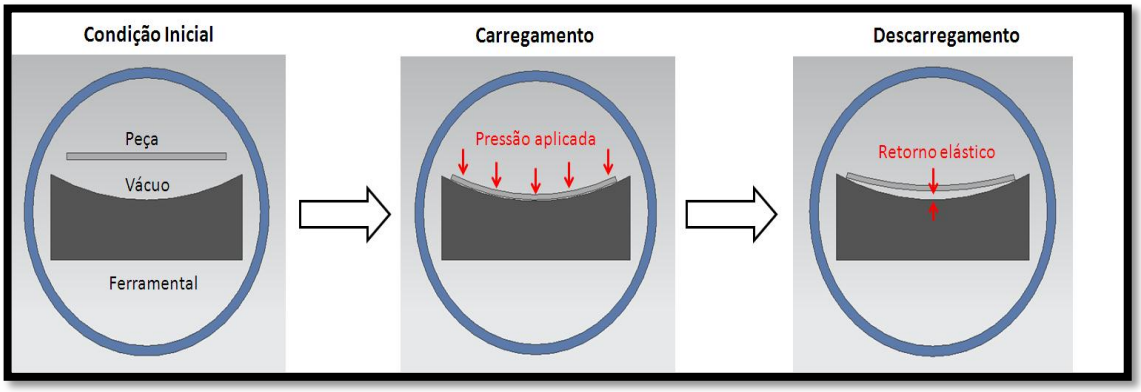

Figura 7 - Representação do processo de CAF.
Fonte: Autor, 2013.

Parte-se então para o entendimento das diferentes etapas do CAF e todos os fenômenos ocorrentes em cada instante do processo. Durante a etapa de aplicação de carga, que por ser instantânea e estar no regime elástico do material, só há deformação elástica. Entretanto, por ser um processo de conformação acima da temperatura ambiente, a deformação elástica sofre um decréscimo em função da queda do módulo de elasticidade, quando comparada com a deformação elástica na temperatura ambiente.

Em consulta a dados do site The Engineering Toolbox, para a liga Al 7050, nas temperaturas de conformação entre 175 e 180ºC, a queda no módulo de elasticidade chega a 10% quando comparado com o módulo na temperatura ambiente, como mostra a figura 8. Então, durante a etapa de carregamento, considerar o módulo de elasticidade na temperatura ambiente provocaria um erro no valor de tensão inicial.

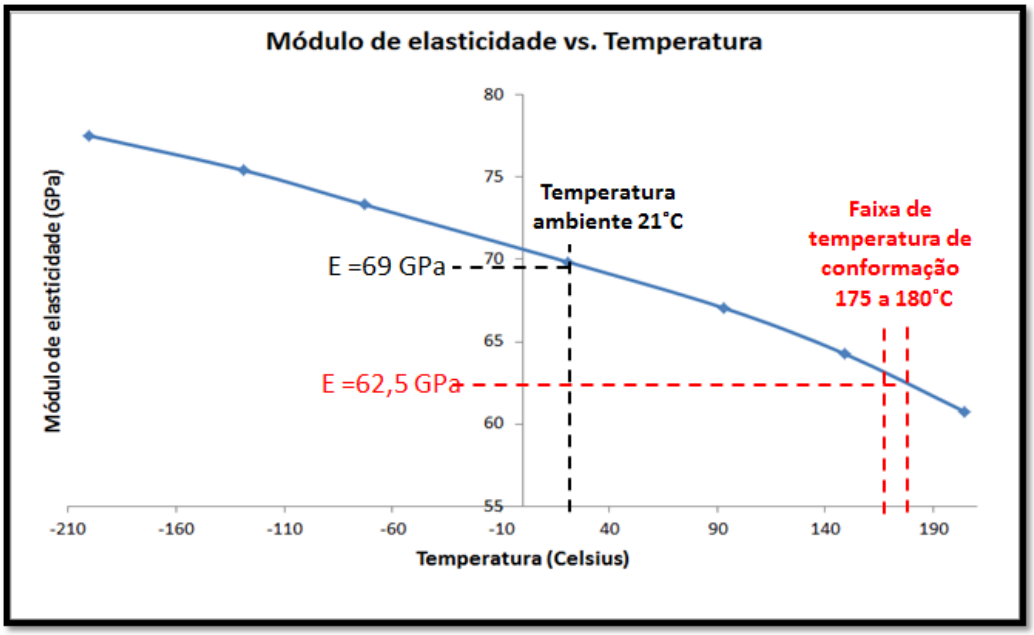

Figura 8 - Variação do módulo com a variação da temperatura.
Fonte: Autor, adaptado de The Engineering Toolbox, 2013.

Após o carregamento inicia-se a segunda etapa do processo que está relacionada com a deformação por fluência ao longo do tempo e segue a seguinte equação:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elástica} + \varepsilon_{fluência} \quad (1)$$

A deformação total é gerada pelo ferramental utilizado, ou seja, constante ao longo do processo. A deformação elástica é a gerada pelo carregamento inicial imposto. Por fim, tem-se a deformação por fluência que é ocasionada pela aplicação de tensão constante abaixo do limite de escoamento e segundo Ashby (1999) em temperaturas acima de 33,3% da temperatura de fusão da liga. Dados do site The Engineering Toolbox mostram que a temperatura de fusão de ligas de alumínio varia entre 463 e 671ºC.

Ao passo em que ocorre o aumento de deformação por fluência, a deformação elástica sofre um decréscimo, fenômeno conhecido como relaxação da tensão. Os fenômenos de fluência e relaxação são iguais e opostos, quando consideramos materiais que não sofrem endurecimento por precipitação, como mostra a figura 9.

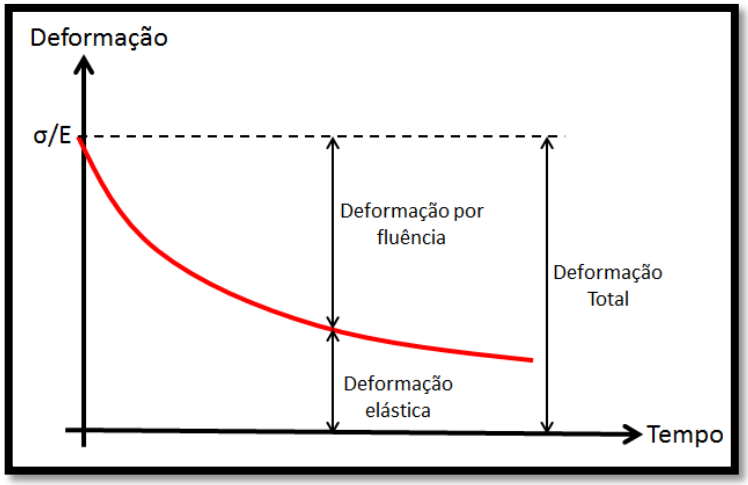

Figura 9 – Correlação entre fluência e relaxação (queda da deformação elástica).
Fonte: Autor, 2013.

No mecanismo de fluência, com a tensão constante tem-se a variação da deformação em função do tempo, que é a curva típica do ensaio de fluência e pela sua inclinação em qualquer ponto tem-se a taxa de deformação por fluência. O ensaio de fluência é dividido em três estágios: primário, secundário e terciário, como pode ser observado nas figuras 10 e 11. Durante o estágio primário tem-se uma queda no valor de taxa de deformação por fluência. Em seguida tem-se o estágio secundário, onde a taxa de deformação passa a ser constante. Por fim, chega-se no estágio terciário onde a taxa de deformação passa a ser crescente fazendo o material se deformar até sua ruptura Neste estágio que há a introdução de dano ao material.

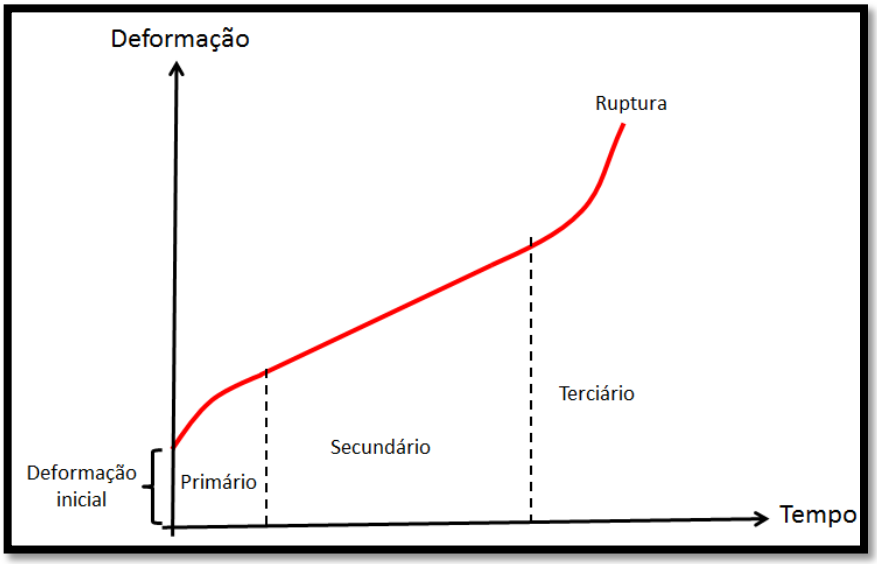

Figura 10 - Curva de deformação por fluência.
Fonte: Autor, 2013.

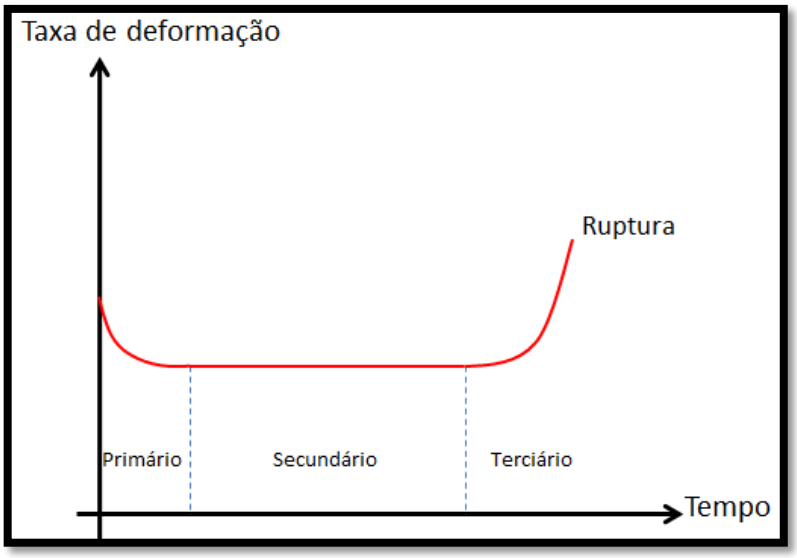

Figura 11 - Variação da taxa de deformação durante a fluência.
Fonte: Autor, 2013.

Segundo Kandare et al. (2009), a deformação por fluência é acelerada com o aumento da temperatura ou aumento da tensão aplicada. A figura 12 mostra a variação da deformação por fluência para diferentes níveis de temperatura, com o mesmo valor de tensão aplicada (50 MPa) para a liga Al 5083. A figura 13 mostra a variação da deformação por fluência em uma mesma temperatura (350ºC), para a mesma liga e com diferentes níveis de tensão.

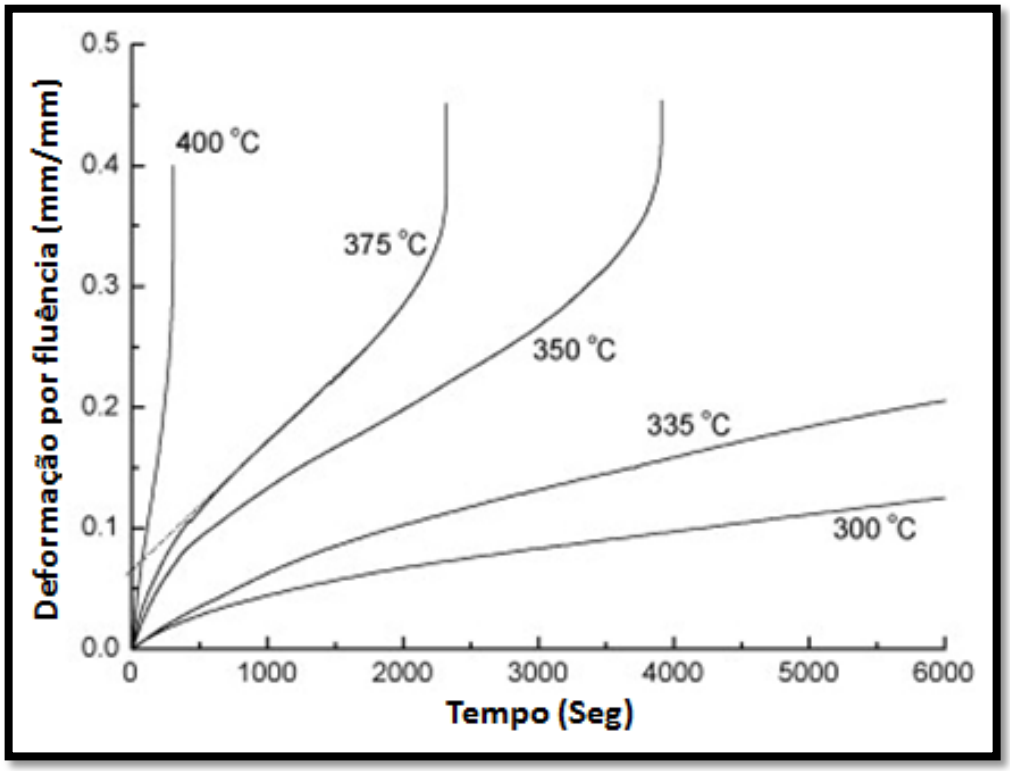

Figura 12 - Curva de deformação por fluência em função da temperatura.
Fonte: Autor, adaptado de Kandare, 2009.

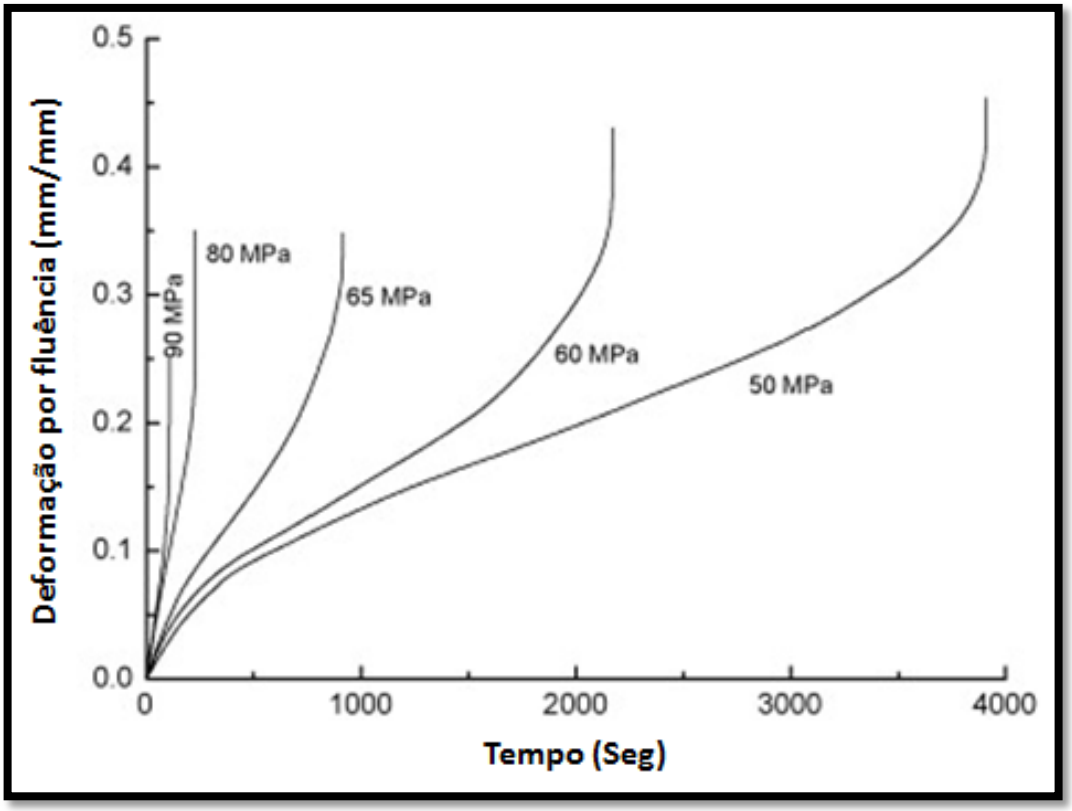

Figura 13 - Curva de deformação por fluência em função da tensão aplicada.
Fonte: Autor, adaptado de Kandare, 2009.

A relaxação é visualizada quando aplica-se uma deformação constante e monitora-se a variação da tensão ao longo do tempo. Este mecanismo também é acelerado quando se tem o aumento da tensão aplicada e da temperatura. Na figura 14 exibe-se a curva de relaxação da liga Al 7475 para diferentes níveis de tensão, de modo que tensões mais elevadas (295MPa) conduzem a uma maior relaxação, maior deformação por fluência e consequentemente menor retorno elástico. (Eberl, 2006)

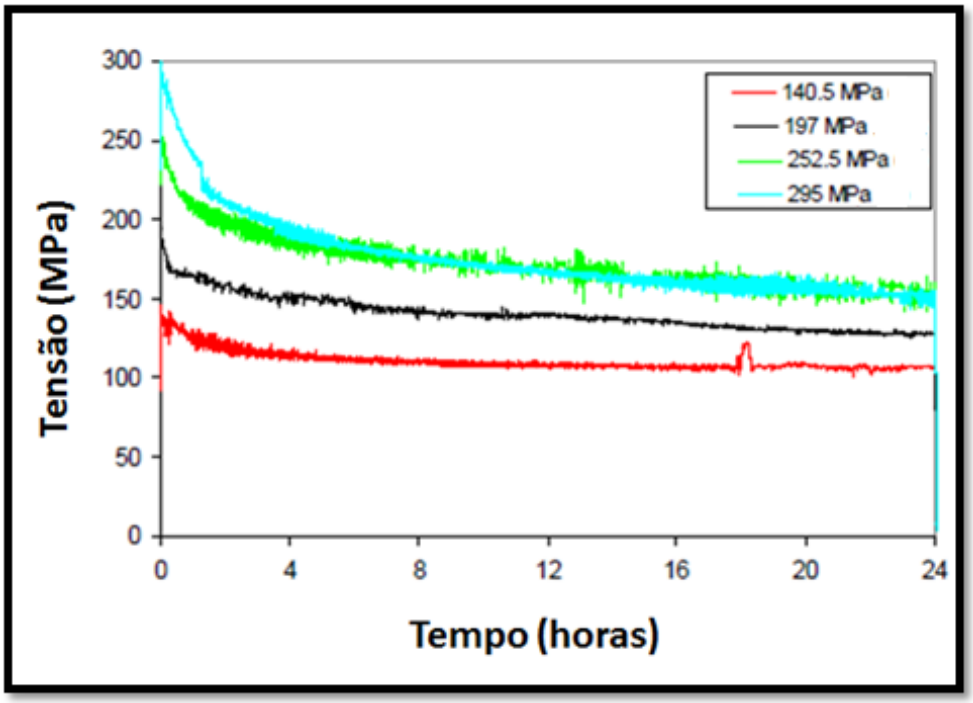

Figura 14 - Curva de relaxação por tempo em diferentes tensões.
Fonte: Autor, adaptado de Eberl, 2006.

Já a figura 15 mostra diferentes curvas de relaxação, também para a liga Al 7475, entretanto para diferentes temperaturas, onde observa-se que o aumento da temperatura (200ºC) também aumenta a relaxação provocando assim a maior deformação por fluência e menor retorno elástico. (Eberl, 2006)

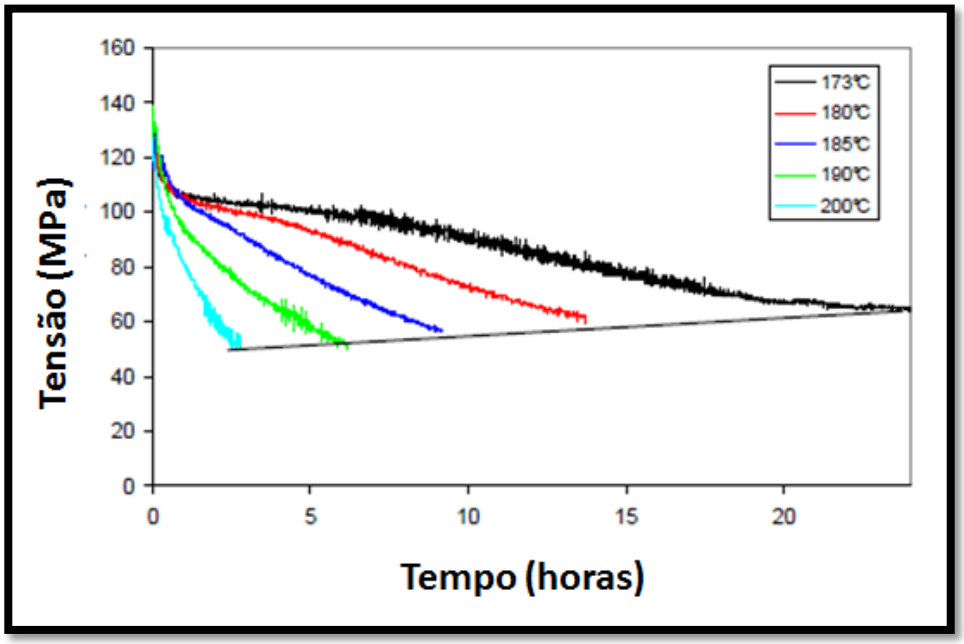

Figura 15 - Curva de relaxação por tempo em diferentes temperaturas.
Fonte: Autor, adaptado de Eberl, 2006.

Além disso, durante a etapa de fluência e relaxação, há o envelhecimento artificial, ou endurecimento por precipitação, e com isso a tensão limite de escoamento varia ao longo do tempo, fazendo com que em determinados momentos a deformação por fluência possa aumentar ou diminuir. Para o modelamento mais completo processo CAF deve-se levar em conta esta terceira variável através da deformação devido ao endurecimento e com isso a equação que rege o segundo estágio de processo é reescrita da seguinte maneira:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{elástica}} + \varepsilon_{\text{fluência}} - \varepsilon_{\text{endurecimento}} \tag{2}$$

A deformação por endurecimento também é influenciada pela temperatura, bem como pelo tempo de envelhecimento. Como dito anteriormente, as variáveis temperatura e tempo para o CAF são otimizadas para que se obtenha a propriedade mecânica de interesse e para que o processo não atinja o estágio terciário da fluência, o que introduziria danos ao componente.

A figura 16 representa um mapa típico de curvas características do processo de envelhecimento de ligas de alumínio para diferentes temperaturas. Através destas curvas e juntamente com as curvas de fluência, são escolhidos tempo e temperatura para o processo.

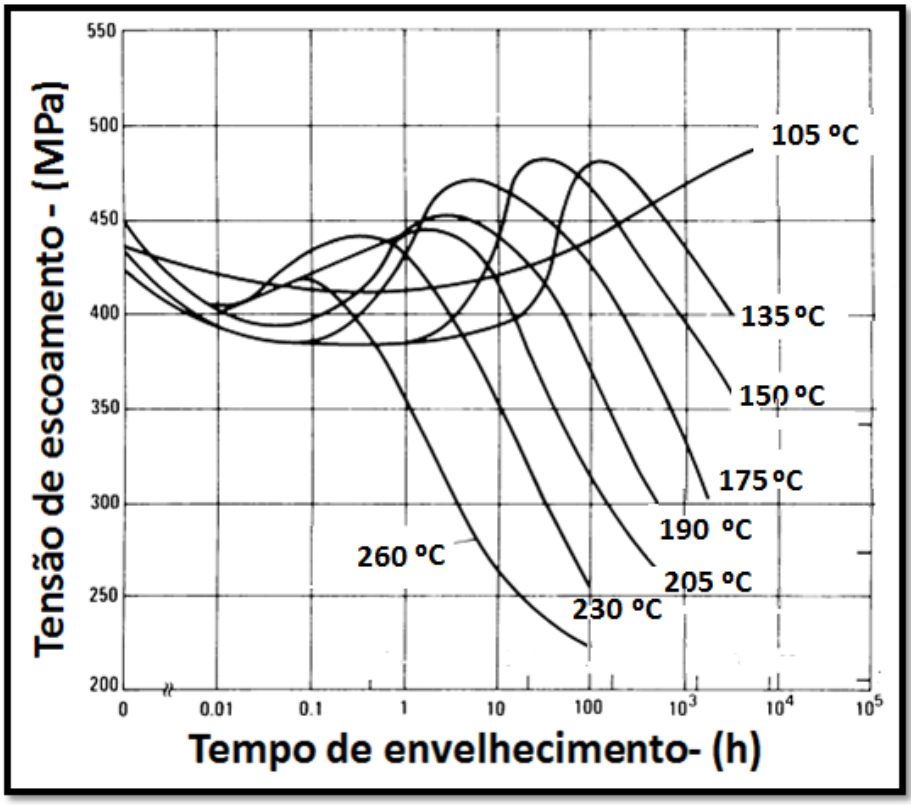

Figura 16 - Curvas de envelhecimento para a liga Al 2024.
Fonte: Autor, adaptado de ASM Handbook, 1991.

A última etapa do processamento por CAF é o descarregamento que, como o carregamento, também é realizado na temperatura de processo. Como a fluência é interrompida antes do estágio terciário, após o descarregamento o material sofre o fenômeno conhecido como retorno elástico ou recuperação elástica. A figura 17 representa uma curva de tensão vs. deformação obtida por um ensaio de tração e mostra o intervalo em que o processo de CAF ocorre, onde se tem a etapa de carregamento no regime elástico até uma tensão inicial. Note que a tensão inicial aplicada não excede o limite de escoamento (σ_{LE}). Em seguida ocorre a deformação por fluência e a relaxação da tensão, mantendo a deformação constante. Por fim tem-se o descarregamento onde o painel adquiriu a deformação final. A diferença entre a deformação inicial e a deformação final é o chamado retorno elástico.

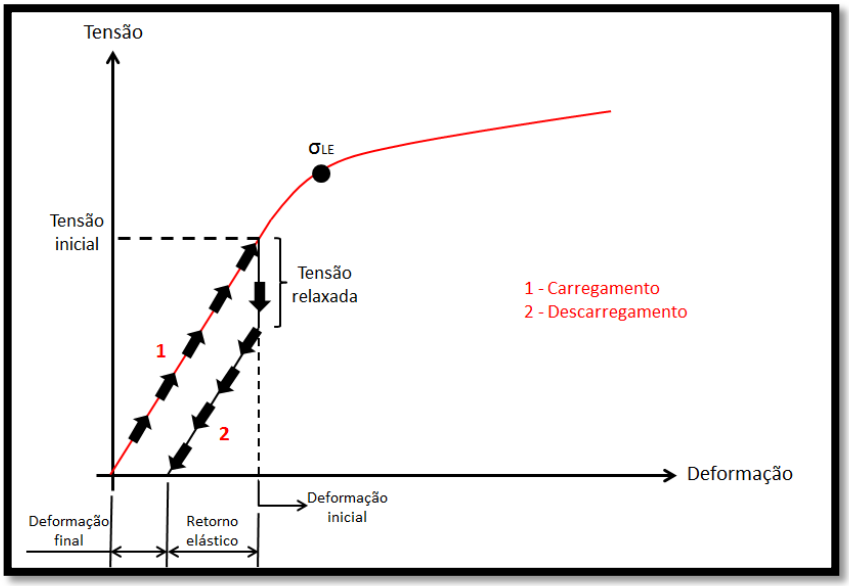

Figura 17 – Intervalo onde ocorre o processo de CAF.
Fonte: Autor, 2013.

Para que se possa realizar qualquer curvatura definida por projeto, o retorno elástico deve ser previsto e o seu efeito deve ser compensado no ferramental (Figura 18). Um ponto importante é que após o redimensionamento do ferramental, a pressão exercida pela autoclave deve garantir contato total entre painel e ferramental.

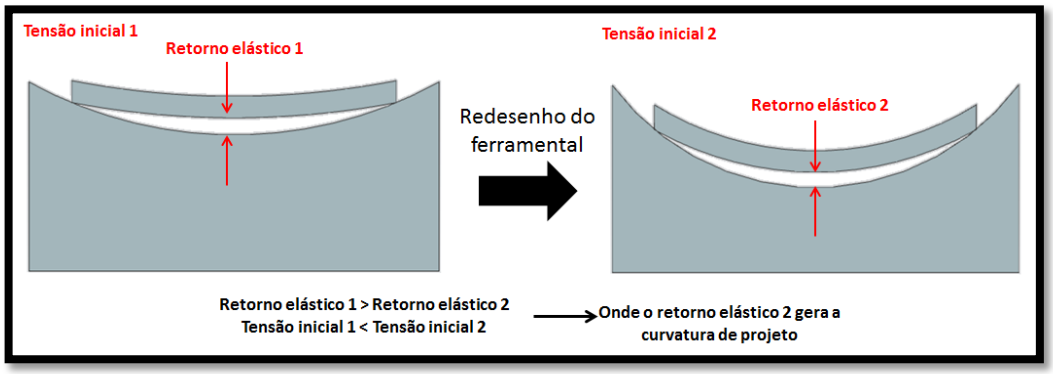

Figura 18 – Representação da compensação do retorno elástico
Fonte: Autor, 2013.

Quando comparado com os métodos concorrentes o CAF possui como pontos fortes o baixo nível de tensão residual, boa precisão dimensional, maior repetibilidade e a possibilidade da fabricação de geometrias complexas, evitando assim o uso de junções como rebites e soldas. Como pontos fracos destaca-se a previsão do retorno elástico e o processo ser aplicado apenas em ligas que sofrem endurecimento por precipitação.

Experimentos realizados por Holman (1989) comprovaram o baixo nível de tensão residual gerado pelo processo (Figura 19), onde para uma mesma geometria, utilizou-se para a conformação processos concorrentes ao CAF.

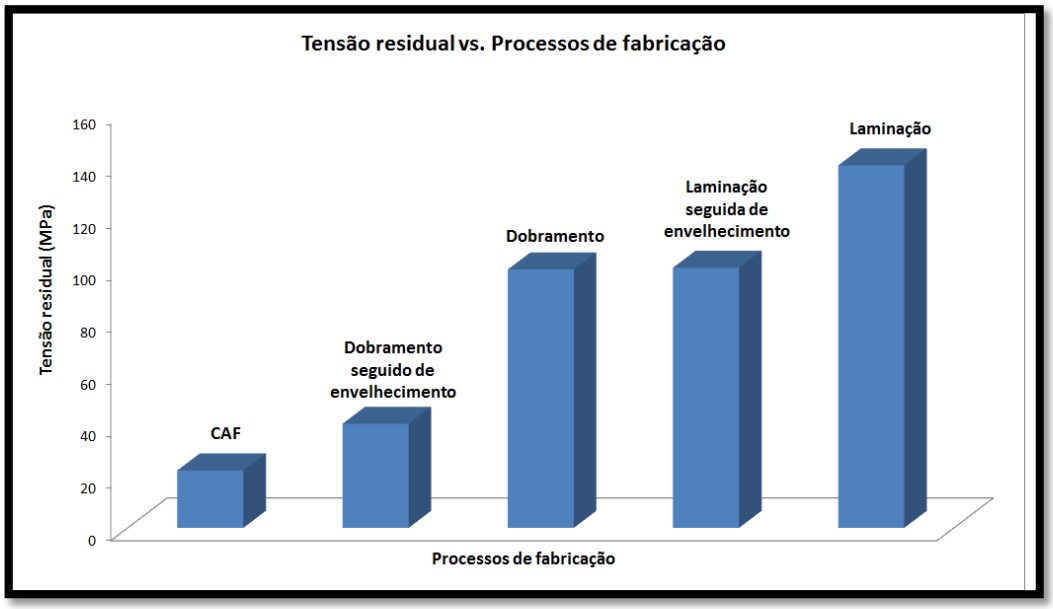

Figura 19 – Tensão residual em diferentes processos de fabricação de painéis aeronáuticos.
Fonte: Autor adaptado de Eberl et al., 2006.

Além do baixo nível de tensão residual, outro ponto forte do processo CAF é a boa qualidade dimensional do painel gerado, facilitando assim sua montagem final. Um estudo realizado por Eberl et al. (2006) através de um painel conceito (Figura 20) mostra que para o aumento da rigidez do painel utilizam-se reforçadores soldados por diferentes processos. Entretanto, o aquecimento seguido do resfriamento durante a soldagem, provoca empenamento no painel. Experimentos mostram que painéis sujeitos ao processo de soldagem e em seguida sujeitos ao CAF, geram uma redução em seu empenamento. (Figura 20).

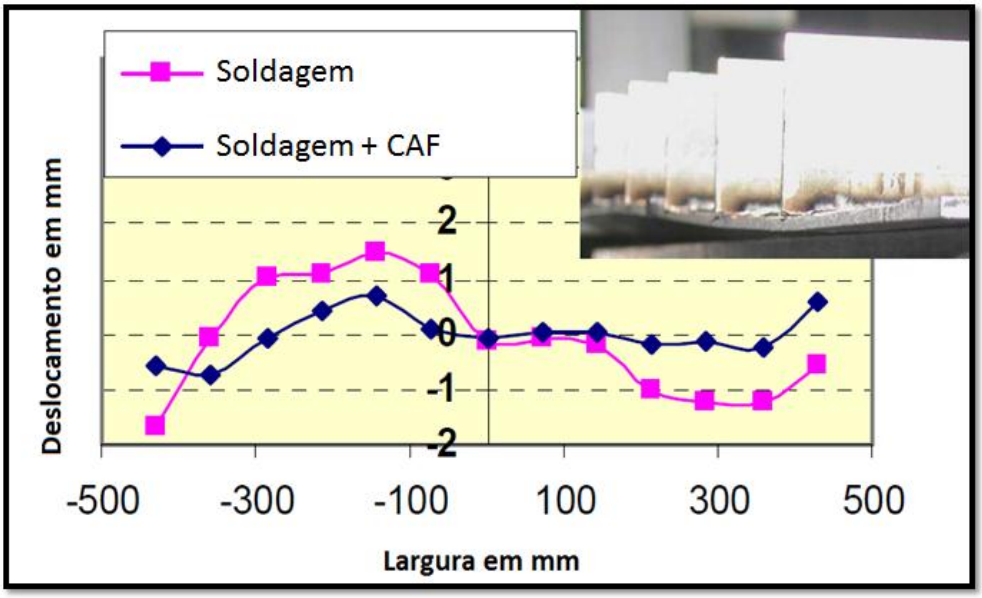

Figura 20 - Distorção de painel após a soldagem e após o CAF.
Fonte: Autor adaptado de Eberl et al., 2006.

Algumas premissas para que ocorra o processo de CAF devem ser levadas em conta, dentre as quais pode destacar:

a) a liga deve possuir boas propriedades mecânicas e consequentemente susceptível ao endurecimento por precipitação;
b) o carregamento imposto não pode exceder o limite de escoamento da liga;
c) a fluência não deve atingir o estágio terciário.

Atendendo a todas as necessidades do CAF, o problema se restringe em monitorar o retorno elástico do material após o descarregamento, que segundo Jeunechamps et al. (2006), pode ser superior a 70% da flecha inicial. A figura 21 mostra valores de retorno elástico obtidos por modelo computacional, onde para uma mesma curvatura variou-se o tempo de conformação e a espessura da geometria. A variação da espessura implica na variação do nível de tensão inicial aplicada.

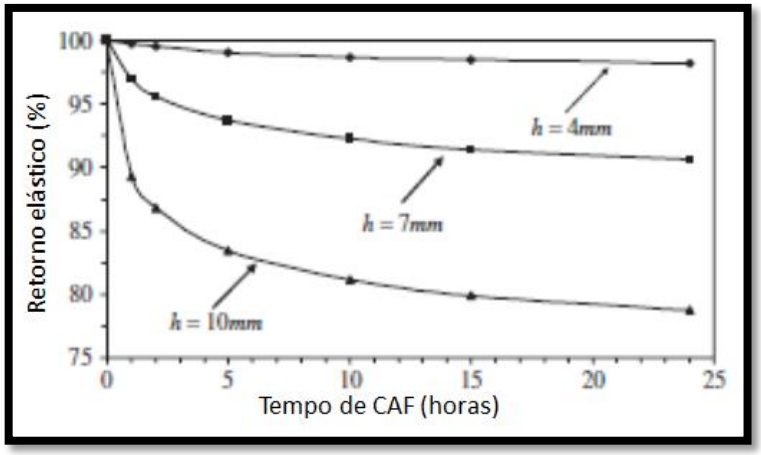

Figura 21 – Retorno elástico em função do tempo de conformação.
Fonte: Autor, adaptado de Jeunechamps, 2006.

Quanto maior a espessura, maior o nível de tensão inicial e com isso maior será a deformação por fluência, gerando assim um menor retorno elástico. O tempo de processo também faz com que a deformação por fluência aumente, gerando também um menor retorno elástico.

Estudos realizados por Jeunechamps et al. (2006) através de simulações por elementos finitos, mostram a influência da dupla curvatura no retorno elástico. Na figura 22 pode-se observar o retorno elástico em função da curvatura, onde:

K_{11} = curvatura na direção x = $\frac{1}{\text{raio de curvatura na direção x}}$

K_{22} = curvatura na direção y = $\frac{1}{\text{raio de curvatura na direção y}}$

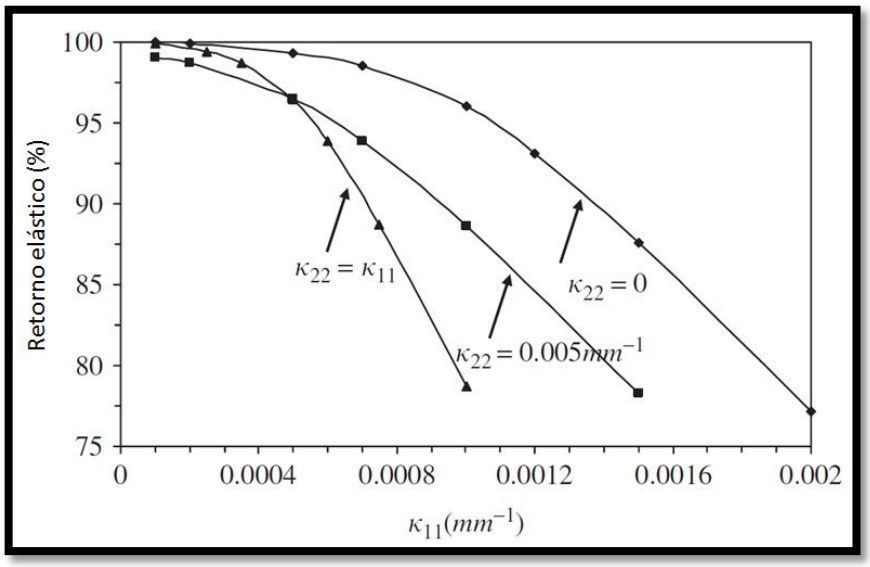

Figura 22 – Retorno elástico em função de diferentes curvaturas.
Fonte: Autor, adaptado de Jeunechamps, 2006.

Nesta figura exibem-se resultados de retorno elástico para geometria de curvatura simples (K_{22}=0) e também para geometrias de curvatura dupla (K_{22}= K_{11} ou K_{22}=0,005 mm^{-1}). Por exemplo em um ferramental de dupla curvatura e com raios iguais (K_{22}= K_{11}), para um raio de 1250 mm, ou K_{11}=0,0008 mm^{-1}, tem-se um retorno elástico de aproximadamente 86%. Já para uma geometria de curvatura simples (K_{22}=0), para o mesmo raio de 1250 mm, ou K_{11}=0,0008 mm^{-1}, tem-se um retorno elástico de aproximadamente 98%, que comprova que geometrias com dupla curvatura possuem um retorno elástico menor do que geometrias de curvatura simples.

Uma vez definidos os parâmetros principais do processo, o problema se restringe no controle do retorno elástico. Este poderia ser obtido experimentalmente. Porém, construir inúmeros protótipos para que um produto seja concretizado torna-se muito oneroso para qualquer empresa. Lança-se mão do uso de *softwares* capazes de simular processos de conformação. Estes *softwares* são denominados CAE (*Computer Aided Engineering)* e trabalham em conjunto com outros dois *softwares*, que são*:*

a) CAD *(Computer Aided Design)*, relacionado com o desenho do produto;
b) CAM *(Computer Aided Manufacturing)*, relacionado com a fabricação do produto.

Figura 23 - Etapas envolvendo o desenvolvimento de um produto.
Fonte: Autor, 2013.

No desenvolvimento de qualquer produto o primeiro passo é o modelamento do mesmo em um programa do tipo CAD. Em seguida, o produto passa para um programa CAE. Neste programa é feito, por exemplo, a análise estrutural do produto a fim de observar se o mesmo resistirá ou não aos esforços impostos (torção, tração, compressão, flexão) que ele estará sujeito. Caso o produto não suporte as solicitações atuantes, então é feito um novo projeto. Mas caso ocorra a validação pelo programa CAE, é feito então a construção do produto (CAM).

Em vista disso, nota-se que o programa CAE é uma importante ferramenta durante a elaboração de um projeto, pois evita a construção de inúmeros protótipos e prioriza a chamada manufatura enxuta *(lean manufacturing)*. Esta elimina desperdícios desde a concepção até a fabricação do produto, aumentando sua qualidade e diminuindo tempo e custo de produção.

Para que seja possível a simulação do processo de CAF e previsão do retorno elástico via método dos elementos finitos é necessário definir o modelo de material que rege o acoplamento entre todos os fenômenos ocorrentes.

2.4 Modelos propostos

No presente trabalho, aborda-se a aplicação de duas metodologias para caracterizar o fenômeno de CAF. A primeira trata do modelo unificado conhecido também por teoria da inelasticidade. A outra metodologia trata em estabelecer, através de ensaios experimentais, um modelo simplificado para o material.

2.4.1 Modelo unificado

O projeto CAF ocorre em parceria com a EMBRAER e Escola Politécnica da USP, esta última como sendo a responsável pela implementação do modelo unificado. O modelo foi proposto por Jeunechamps et al. (2006), que reúne muitas contribuições de trabalhos científicos sobre o processo de CAF e é baseado em uma série de equações que acoplam tanto os fenômenos de fluência e relaxação quanto os fenômenos que envolvem a metalurgia física do processo, como o endurecimento por precipitação.

As equações que regem o modelo são:

$$\dot{\varepsilon}_e = A \sinh\left\{B[(\sigma_e - \sigma_A)(1 - H)]\left(\frac{C_{SS}}{\sigma_{SS}}\right)^n\right\} \tag{3}$$

$$\dot{H} = \frac{h_c}{\sigma_e^{0,1}}\left(1 - \frac{H}{H^*}\right)\dot{\varepsilon}_e \tag{4}$$

$$\dot{r}_p = C_0\left(Q - r_p\right)^{m_0}\left(1 + \left|\frac{\dot{\varepsilon}_e}{\gamma}\right|^{m_1}\right) \tag{5}$$

$$\sigma_A = C_A\, r_p^{m_2} \tag{6}$$

$$\sigma_{SS} = C_{SS}\left(1 + r_p\right)^{-m_3} \quad (7)$$

$$\sigma_{LE} = \sigma_A + \sigma_{SS} \quad (8)$$

Onde A, B, h_c, H^*, n, Q, C_0, γ, C_A, C_{SS}, m_0, m_1, m_2 e m_3 são constantes relativas ao material em estudo e segundo Jeunechamps et al. 2006, tais constantes são determinadas por um sistema de otimização de dados experimentais com base em algoritimos evolutivos, onde a medida que os resultados experimentais não vão convergindo com as equações propostas, criam-se novas possibilidades de valores até que os erros sejam minimizados. Tal metodologia pode ser melhor compreendida com a figura 24.

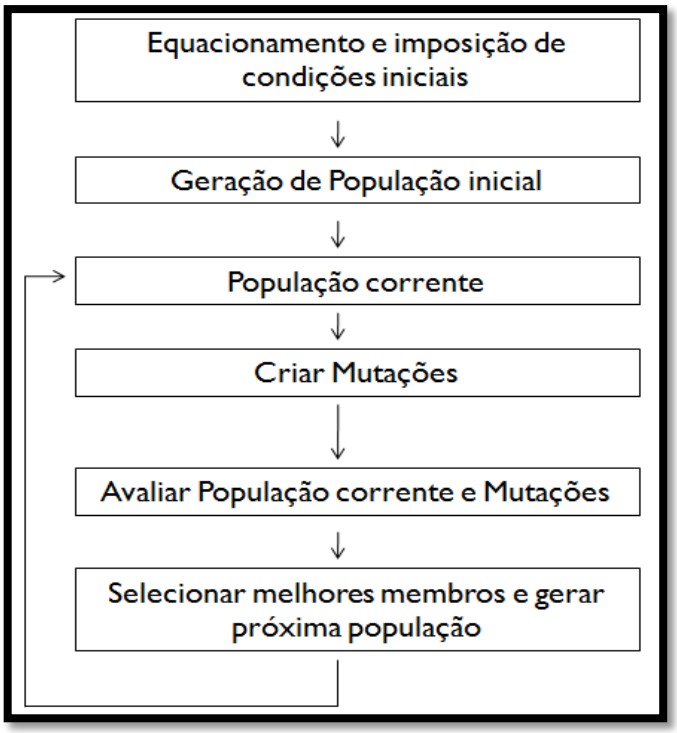

Figura 24 - Representação da utilização de algoritmos evolutivos.
Fonte: Ribeiro, 2012.

Analisando o modelo proposto, a equação 3 descreve a taxa de deformação por fluência onde nela, além das constantes do material, há a tensão inicial aplicada, o endurecimento por deformação, o aumento do limite de escoamento devido ao crescimento do precipitado e a redução do limite de escoamento devido a solução sólida também devida ao crescimento do precipitado.

A equação 4 trata da taxa de endurecimento por deformação, onde além das constantes do material há a tensão inicial aplicada, o endurecimento por deformação e a taxa de deformação por fluência. Já na equação 5 descreve-se a taxa de crescimento do raio do

precipitado, onde além das constantes, têm-se o raio do precipitado e a taxa de deformação por fluência.

Na equação 6 tem-se o aumento do limite de escoamento devido ao crescimento do precipitado. Nesta, além das constantes há a parcela referente ao raio do precipitado. A estrutura de qualquer liga de alumínio é baseada em solução sólida, com os precipitados dispersos nela. A medida que o precipitado cresce, a solução sólida diminui. Com isso, a equação 7 trata da redução do limite de escoamento da solução sólida em função do crescimento do precipitado, que também depende de constantes e do raio do precipitado. Por fim, a equação 8 trata do limite de escoamento da liga que nada mais é do que a soma entre o aumento do limite de escoamento devido ao crescimento do precipitado e a redução do limite de escoamento da solução sólida.

Para que se obtenham as constantes do modelo unificado é necessária a realização de diversos experimentos, dentre os quais pode-se destacar: ensaios de fluência, relaxação, tração e caracterização microestrutural com a medida do raio do precipitado. Entretanto, mesmo sendo um modelo bastante elaborado possui erros deixando-o distante do modelo ideal.

O primeiro erro é o fato de o modelo apresentar uma discrepância durante a curva de envelhecimento em função da tensão de escoamento do material. No modelo real a tensão de escoamento atingiria um ponto de máximo, seguido de um decréscimo. Já no modelo proposto, isso não ocorre, como pode ser representado na figura 25.

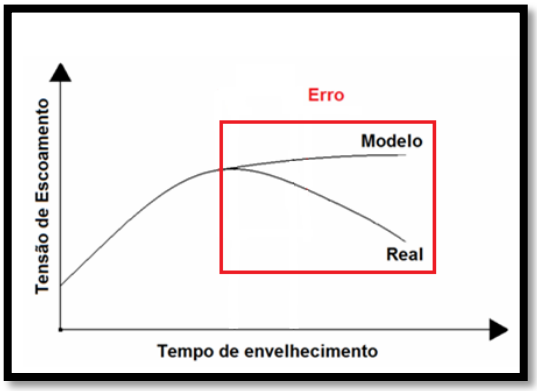

Figura 25 - Diferença da tensão de escoamento entre o modelo proposto e o real.
Fonte: Autor, adaptado de Ribeiro et al., 2012.

Outro ponto importante é o fato do mecanismo de fluência, aliado ao envelhecimento da liga, possuir comportamentos diferentes entre regiões sob tração e compressão e o modelo não leva em consideração tal fato, como mostra a figura 26.

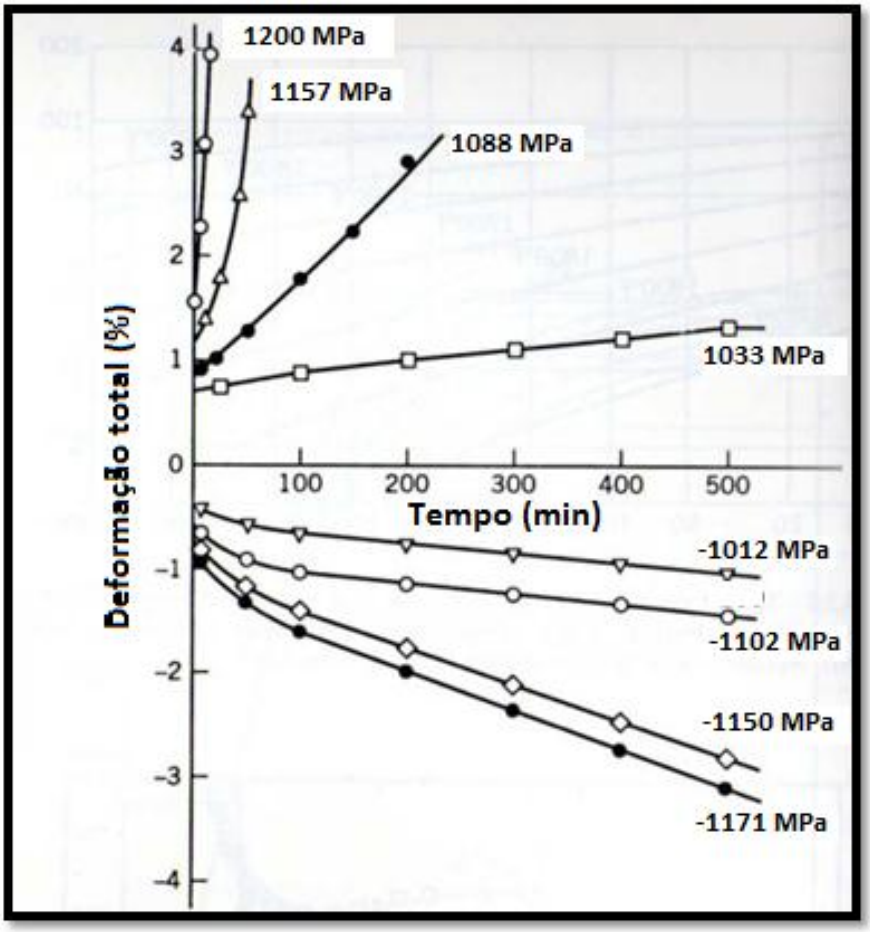

Figura 26 - Comportamento de fluência sob tração e compressão – René 85 à 649ºC.
Fonte: Stourffer, 1996.

Há um terceiro ponto. Na literatura publicada até o presente momento não se encontram resultados experimentais do modelo.

2.4.2 Modelo simplificado

Como dito anteriormente, pelo fato do modelo unificado, relativo ao comportamento de fluência da liga, ser desenvolvido paralelamente com o modelo computacional, ainda não se tem um resultado final. Em vista disso propõe-se um segundo modelo de fluência baseado em uma lei de potência, como mostra a equação 9.

$$\dot{\varepsilon} = K * \sigma_{inicial}{}^{n} \qquad (9)$$

Onde:

K = constante do material

n = constante do material

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação por fluência

σ = tensão aplicada

O modelo já vem acoplado no software de elementos finitos, o que torna rápida a sua aplicação. No software este modelo trabalha com um processo interativo de cálculo, onde a partir de um carregamento inicial imposto, o software calcula as tensões iniciais em cada elemento. Este valor de tensão é então imposto ao modelo simplificado, que juntamente com as constantes K e n do material, obtém a taxa de deformação por fluência em cada elemento. Esta é mantida constante ao longo do processo, o que faz o modelo simplificado descrever apenas o estágio secundário da fluência (estágio onde a taxa de deformação é constante – Figura 11).

A figura 27 representa a deformação por fluência ocorrente no processo CAF e a deformação por fluência pelo modelo simplificado. O modelo simplificado não descreve o estágio primário de fluência, mas o mesmo possibilita o ajuste da deformação final do processo. Esta deformação final está diretamente relacionada com o retorno elástico.

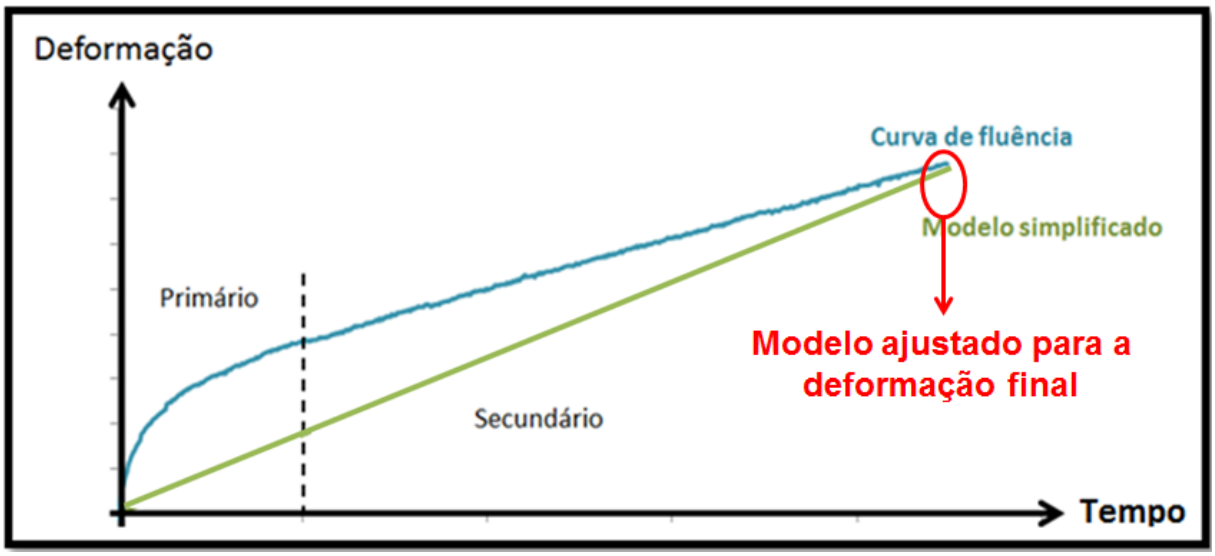

Figura 27 - Comparação entre modelo simplificado e curva de fluência.
Fonte: Autor, 2013.

Outro ponto importante é que o modelo simplificado não descreve a deformação por endurecimento, citada na equação 2, onde a deformação total é deformação elástica mais a

deformação por fluência menos a deformação por endurecimento. Sendo assim a equação que rege o modelo simplificado é dada por:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{elástica}} + \varepsilon_{\text{fluência}} \tag{10}$$

Sabe-se também que pelo processo ser conduzido sob um ferramental rígido, a deformação total não varia. Com isso, se há aumento de deformação por fluência e a deformação total é constante, deve então haver a queda da deformação elástica, fenômeno conhecido como relaxação (Figura 28).

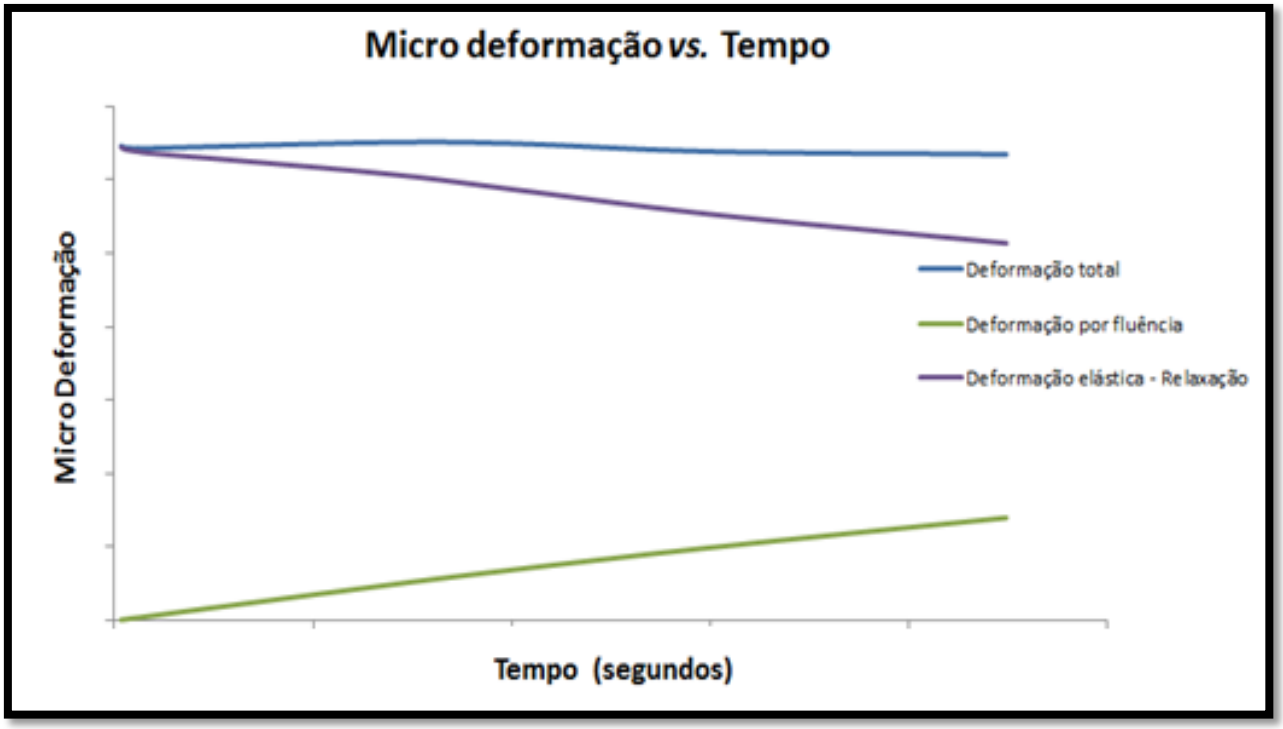

Figura 28 – Metodologia de cálculo do modelo simplificado.
Fonte: Autor, 2013.

Estabelecendo um comparativo entre os modelos, onde o modelo unificado segue como base uma lei de seno hiperbólico e o modelo simplificado é baseado em uma lei de potência, ambos possuem comportamento semelhante, como esquematizado na figura 29.

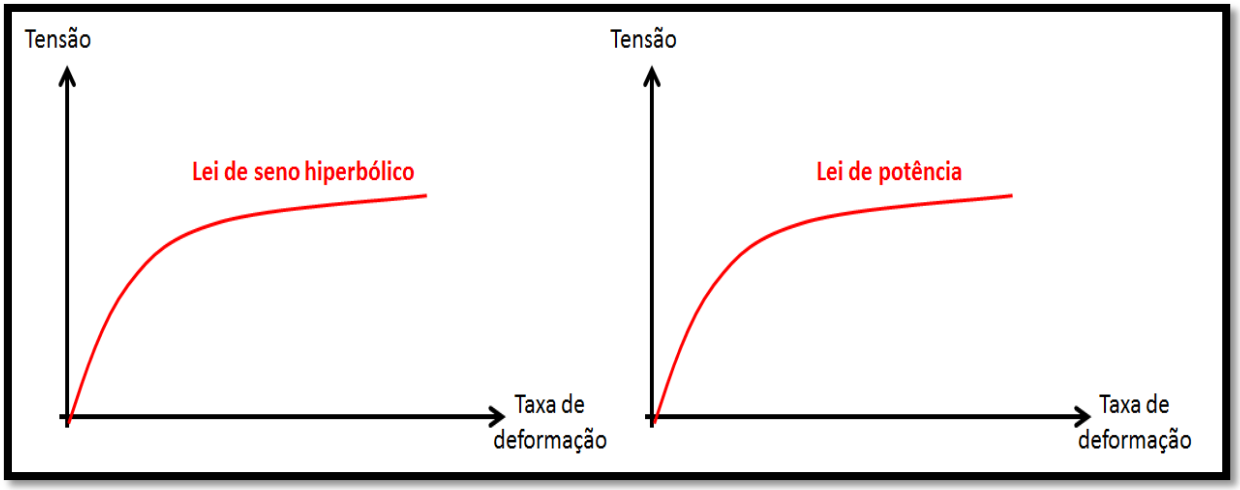

Figura 29 - Comparação entre modelo unificado e simplificado.
Fonte: Autor, 2013.

A vantagem de se utilizar o modelo de seno hiperbólico é a possibilidade de acoplar ao mesmo outros fatores além da deformação por fluência, como é o caso de mudanças na microestrutura do material. Já o modelo de lei de potência acoplado ao software não permite isso, fazendo com que o processo de CAF seja governado apenas pela fluência.

Contudo, no presente trabalho utilizar-se-á o modelo simplificado, pois o objetivo principal do trabalho é a previsão do retorno elástico. Este está ligado diretamente à deformação final no estágio secundário, podendo assim desprezar a deformação sofrida no estágio primário.

2.5 Modelamento numérico computacional

Na engenharia básica, aprende-se a solucionar, pela Resistência dos Materiais clássica, modelos simples, tais como; vigas, barras, perfis, etc. Entretanto, na vida real é necessária a solução de geometrias mais complexas e para tal, aplica-se o método dos elementos finitos (MEF).

O MEF consiste na divisão de um sistema complexo em um número finito de pequenas regiões, denominadas elementos, transformando o modelo contínuo em um modelo discreto.

A essa divisão do sistema dá-se o nome de malha, que é composta de inúmeros elementos com arestas e a interseção entre as arestas dá-se o nome de nó, como pode ser observado na figura 30.

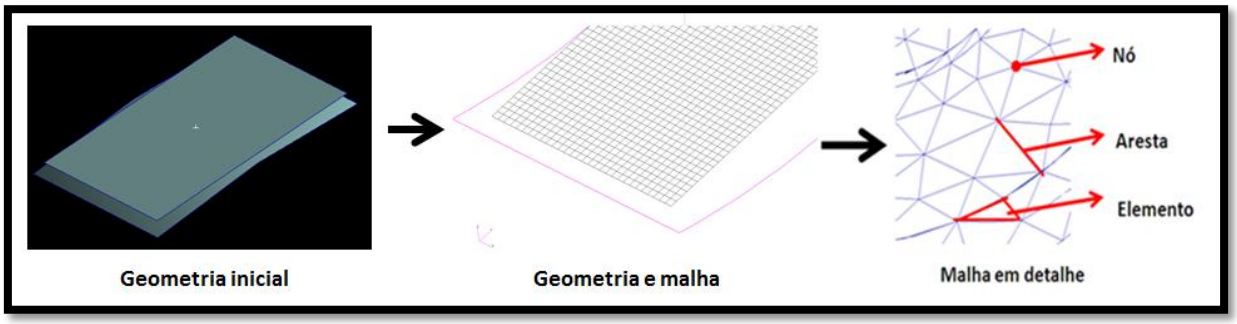

Figura 30 - Representação de malha e elementos.
Fonte: Autor, 2013.

Com isso, ao invés de se buscar uma função que satisfaça o sistema completo, busca-se uma função que satisfaça o elemento, assim quando se tem a somatória de todas as funções dos elementos, tem-se a solução do sistema.

Segundo Alves Filho (2006), uma análise pelo método dos elementos finitos é dividida em três partes:

a) Pré-processamento, que consiste na montagem do modelo discretizado;
b) Processamento, que são os cálculos realizados para o modelo montado;
c) Pós-processamento, que consiste na interpretação dos resultados.

Qualquer software baseado no MEF possui procedimentos comuns para a construção do modelo discretizado e esses procedimentos podem ser observados na figura 31.

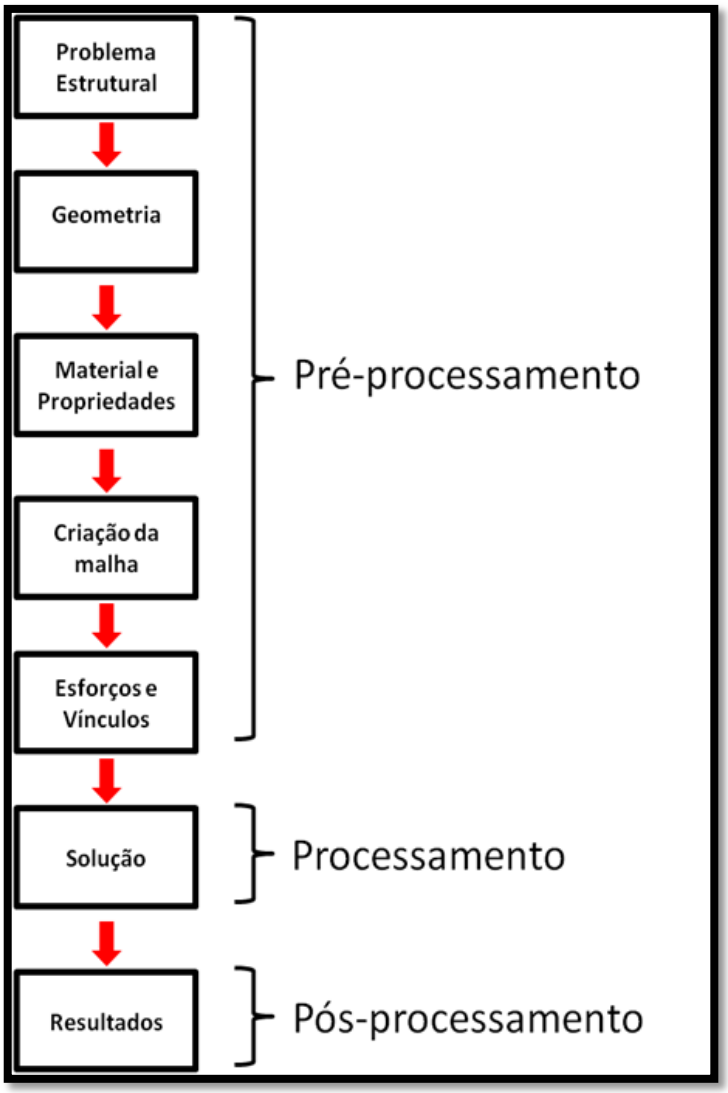

Figura 31 - Procedimentos de um programa CAE.
Fonte: Autor, 2013.

Onde, define-se como:

a) **Problema estrutural:** Natureza física do problema que se deseja simular.
b) **Geometria:** Desenho do modelo em estudo. Pode ser construída no próprio programa CAE, porém, normalmente é importada de um programa CAD.
c) **Materiais e Propriedades:** Definição dos materiais a serem utilizados na análise, bem como suas propriedades mecânicas.
d) **Malha:** Criação de malha com os elementos apropriados.
e) **Esforços e Vínculos:** Aplicação dos esforços atuantes e definição dos graus de liberdade e restrições de movimento.
f) **Solução:** Solução das equações teóricas.
g) **Resultados:** Análise dos dados obtidos e possíveis comparações.

Todos os critérios descritos devem ser cuidadosamente determinados para que o resultado computacional tenha uma boa qualidade e possa ser confrontado com resultados experimentais. Entretanto, os critérios de geometria e malhas devem ser muito bem definidos, pois com pequenas modificações podem-se gerar melhores resultados e tempos computacionais menores.

Em qualquer modelo de elementos finitos devem ser feitas simplificações geométricas quanto a detalhes ou até mesmo quanto à forma, sempre visando a qualidade dos resultados. A presença de singularidades, tais como roscas, chanfros, raios de arredondamento, etc. dificultam a criação de uma boa malha. Elas podem não agregar rigidez ao sistema e podem distorcer a malha, havendo então a necessidade de utilizar elementos muito pequenos. Mas, a remoção das singularidades só deve ser feita se esses locais não atuarem como concentradores de tensão.

Outra simplificação que pode ser feita se refere ao uso de geometrias unidimensionais (linhas), bidimensionais (superfícies) ou tridimensionais (sólidos). A figura 32 mostra a simplificação realizada, onde devido a simplicidade do sólido optou-se por trabalhar com uma superfície.

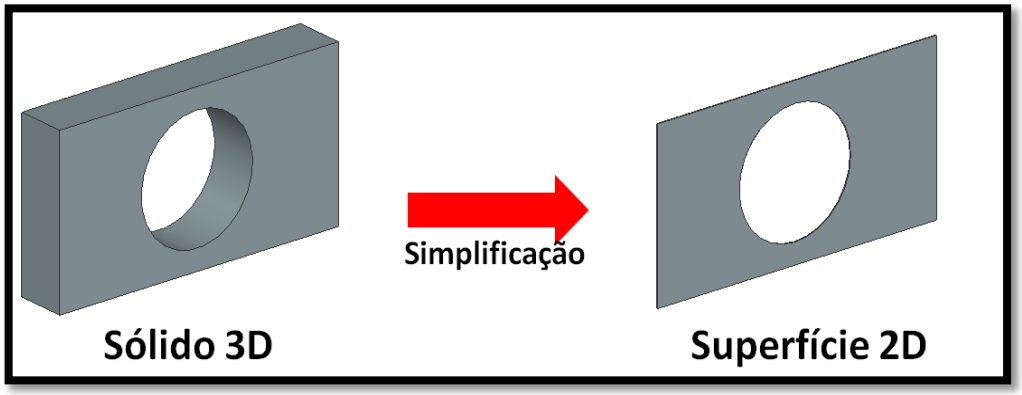

Figura 32 - Simplificação de um sólido 3D para uma superfície 2D.
Fonte: Autor, 2013.

Outro ponto abordado são os critérios para a criação da malha. Esta depende diretamente da geometria construída e faz-se necessário a verificação de sua qualidade. Para geometrias unidimensionais a malha é gerada sob as linhas de referência com a criação de nós e elementos. Pelos nós, aplicam-se os vínculos e os esforços atuantes, como ilustra a figura 33.

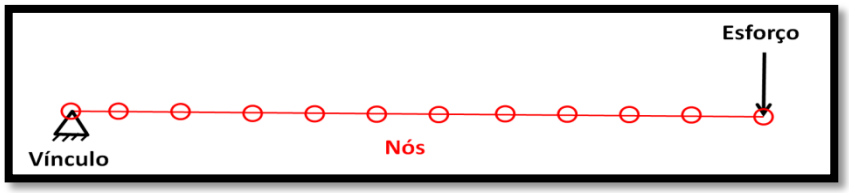

Figura 33 - Representação de geometria unidimensional com a malha.
Fonte: Autor, 2013.

Já para geometrias bidimensionais existem elementos do tipo triangular e elementos do tipo quadrangular, mas cada um com suas particularidades quanto ao número de nós, como pode ser visto da figura 34.

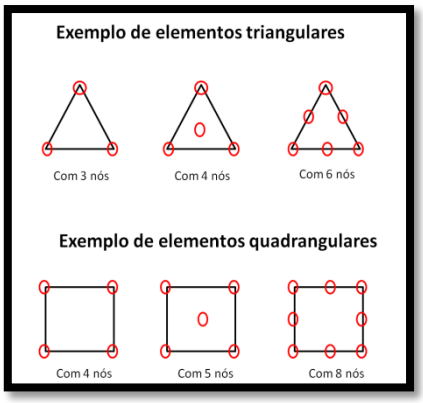

Figura 34 - Elementos bidimensionais.
Fonte: Autor, 2013.

O elemento triangular é muito utilizado longe das regiões de interesse e é um elemento que gera baixa distorção. Já o elemento quadrangular é utilizado próximo às regiões de interesse, pois estima muito bem as tensões e quanto maior a quantidade de nós presente nele, melhor o resultado que se tem. Em contra partida, este elemento pode gerar grande distorção da malha.

Quando se tem geometrias com grande superfície e espessuras pequenas e constantes, torna-se vantajosa a simulação por elementos bidimensionais do tipo casca. Este, quando sujeito a um carregamento de flexão possibilita a rotação do elemento, conforme índica a figura 35. Esta propriedade não existe em elementos sólidos.

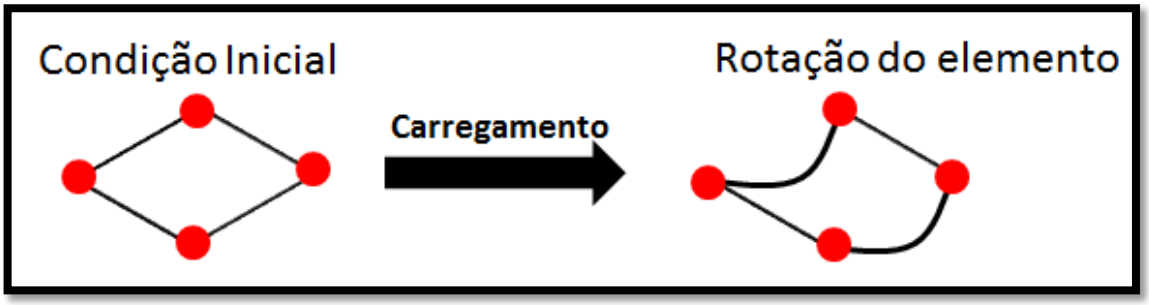

Figura 35 – Comportamento do elemento bidimensional.
Fonte: Autor, 2013.

Para geometrias tridimensionais existem elementos dos tipos tetraédricos, pentaedricos e hexaédricos, mas cada um com suas particularidades quanto ao número de nós, como podem ser observados na figura 36.

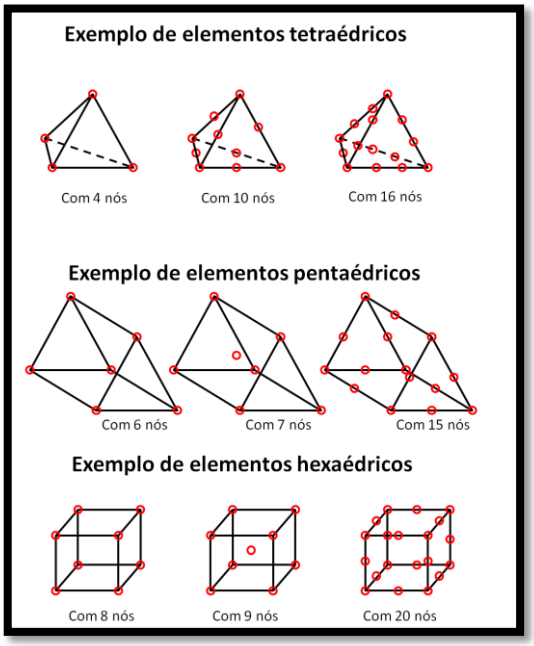

Figura 36 - Elementos tridimensionais.
Fonte: Autor, 2013.

O elemento tetraédrico é menos preciso, pois geralmente possui menor número de nós. Em contra partida, não gera grandes distorções na malha. Já o elemento hexaédrico é mais preciso, porém gera alta distorção na malha. Tem-se também um elemento intermediário de formato pentaedrico.

Após a criação da malha deve-se realizar uma série de testes para verificar sua qualidade, evitando que a mesma comprometa os resultados. Nestes testes incluem: número mínimo de elementos, verificações de distorção do elemento, elemento duplicado e teste de colapso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para tornar possível a simulação do processo de CAF, a metodologia utilizada para a obtenção dos dados para o trabalho contemplou as seguintes atividades:

a) Definição da liga;
b) Ensaios de tração a quente;
c) Definição das geometrias;
d) Simulação numérica para obtenção da tensão inicial para as geometrias;
e) Projeto das matrizes para realizar os ensaios CAF;
f) Ensaio de fluência;
g) Ensaio de CAF;
h) Obtenção do modelo simplificado;
i) Simulação final das geometrias definidas.

3.1 Definição da liga

Como dito anteriormente, as ligas preferenciais para se realizar o CAF são da série 7xxx. No presente trabalho focar-se-á na liga Al 7050. Outro ponto importante é a definição da condição inicial da liga. Esta liga de alumínio é sensível ao envelhecimento natural na condição solubilizada, assim a chapa fornecida para o presente trabalho passou por tratamento térmico após a solubilização para que a mesma ficasse com sua estrutura estável. O tratamento térmico feito na chapa foi conforme a *Aerospace Material Specification* - AMS2772E. Primeiramente se solubilizou a chapa na temperatura de 477ºC seguido de envelhecimento artificial na temperatura de 121ºC entre 6 e 8 horas. Após o envelhecimento artificial a chapa passa a ser chamada de Al 7050 – condição TAF (Figura 37) e esta possui espessura de 12,7 mm.

Figura 37 - Material fornecido para os ensaios.
Fonte: Autor, 2013.

Esta condição definida como TAF encontra-se anteriormente ao T6, que na curva de envelhecimento é o ponto de máxima dureza e resistência mecânica, como representa a figura 38.

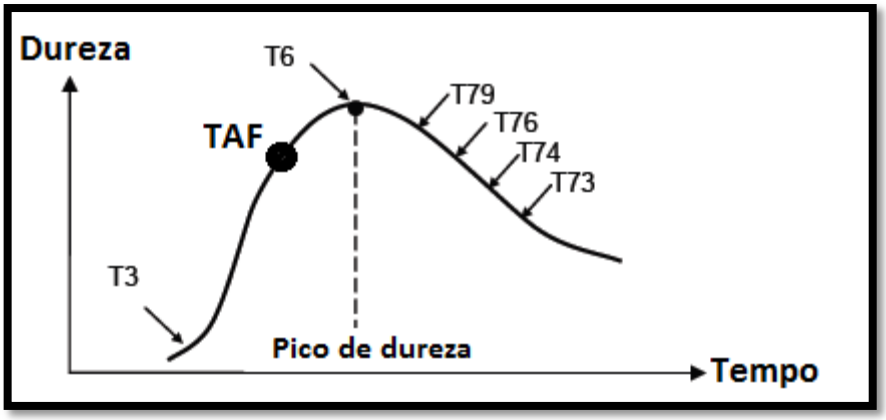

Figura 38 – Representação da condição TAF.
Fonte: Autor, 2013.

3.2 Definição das geometrias

As geometrias principais e os raios dos ferramentais foram definidas pela EMBRAER. Trata-se de uma geometria com curvatura simples na espessura de 5 mm, com suas principais dimensões mostradas na figura 39 e outra geometria de curvatura dupla nas espessuras de 5 e 12 mm, com suas principais dimensões mostradas na figura 40.

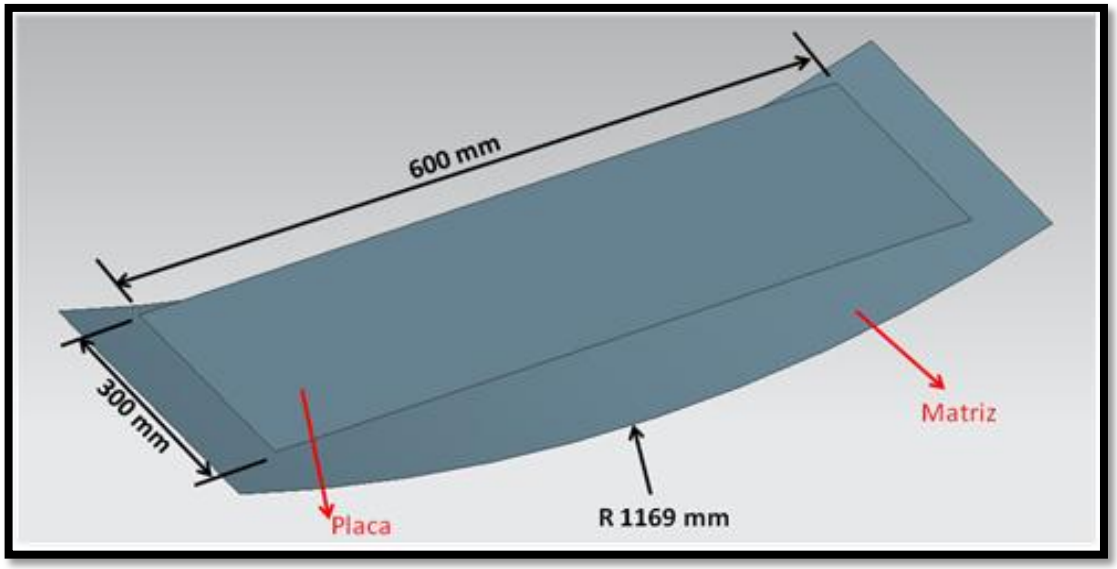

Figura 39 - Geometria de curvatura simples.
Fonte: Autor, 2013.

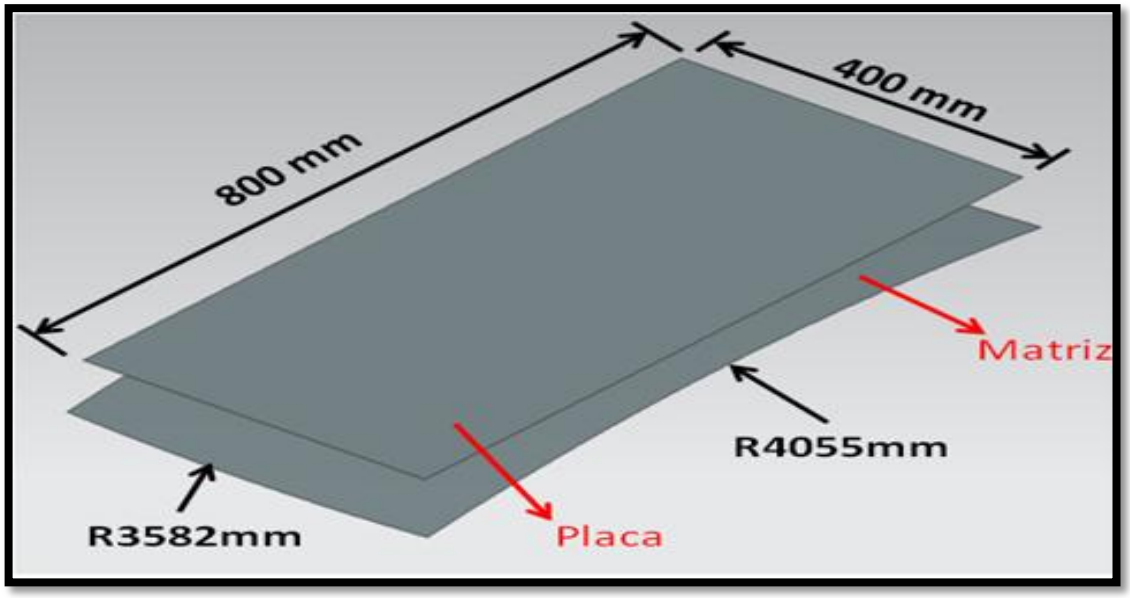

Figura 40 - Geometria de dupla curvatura.
Fonte: Autor, 2013.

3.3 Preparação dos corpos de prova

Em seguida retiraram-se os corpos de prova de tração da chapa fornecida. Os corpos de prova seguiram dimensões conforme norma ASTM E-21 que trata de ensaios de tração para temperaturas elevadas. Os corpos de prova foram retirados no sentido de laminação (Figuras 41 e 42).

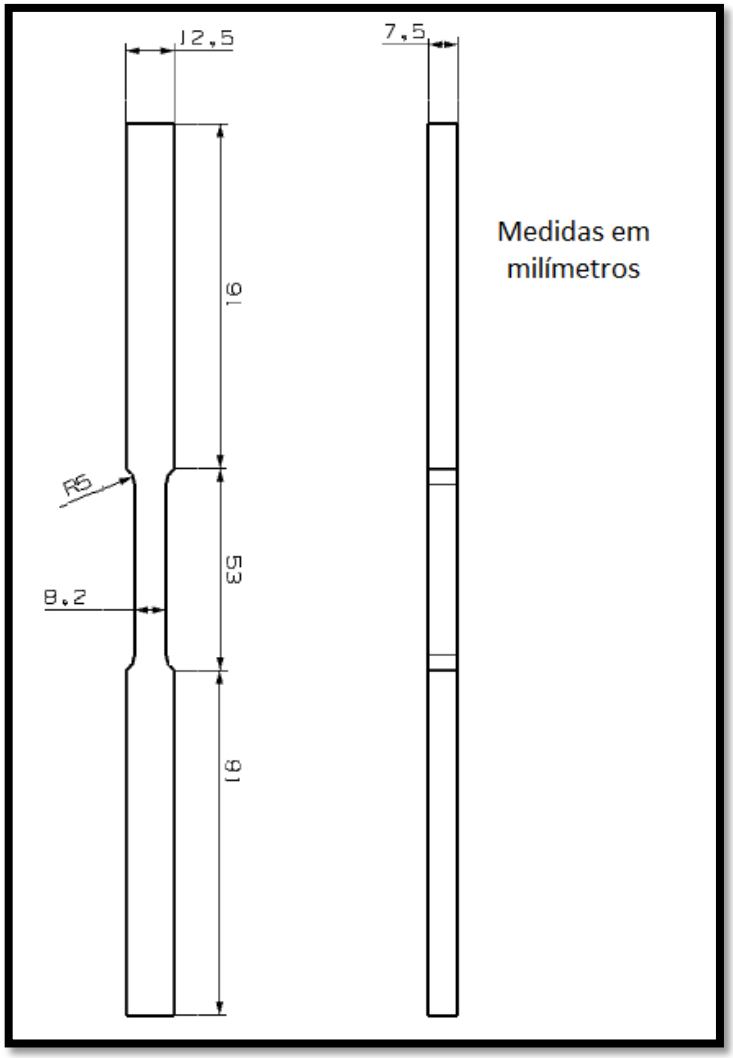

Figura 41 - Corpo de prova para ensaios de tração.
Fonte: Autor, 2013.

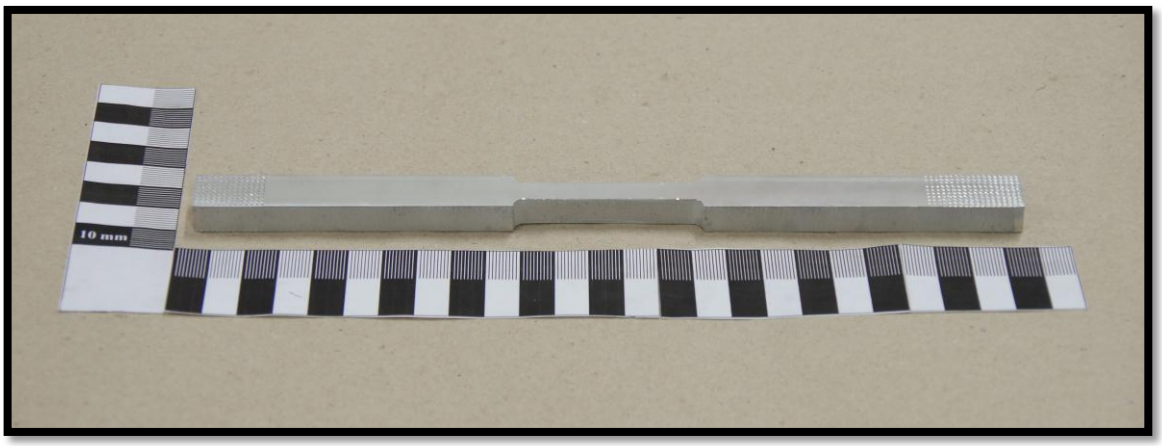

Figura 42 - Corpo de prova usinado.
Fonte: Autor, 2013.

Para levantar a evolução do limite de escoamento a quente em função do tempo de envelhecimento fez-se necessário o tratamento de envelhecimento artificial dos corpos de

prova. Para a liga Al7050 a temperatura de envelhecimento foi de 177ºC, temperatura utilizada para a conformação e recomendada conforme AMS2772E. Alguns cuidados foram tomados durante este processo. Primeiramente o tratamento foi realizado em uma estufa, como mostra a figura 43, com controle de +/-1ºC.

Figura 43 - Estufa Fanem.
Fonte: Autor, 2013.

Dentro da estufa colocou-se uma bandeja com areia refratária que foi aquecida até a temperatura determinada para o material descrito acima. Utilizou-se um termopar para verificar a temperatura, figura 44. A bandeja é necessária para que quando a areia chegasse à temperatura de envelhecimento, o corpo de prova seria introduzido nela e com isso atingiria a temperatura de maneira mais rápida evitando assim qualquer erro induzido devido a demora durante o aquecimento do material. A areia também serve para reter o calor quando a estufa for aberta para se retirar o corpo de prova.

Figura 44 – Controle da temperatura por termopar.
Fonte: Autor, 2013.

Os tempos de envelhecimento também foram previamente definidos, sendo: 2, 6, 12 e 24 horas, com os corpos de prova posteriormente resfriados em água. Para cada condição de envelhecimento realizou-se 3 ensaios de tração, a fim de obter uma média.

3.4 Ensaios de tração a quente

Em seguida iniciaram-se os ensaios de tração a quente, na temperatura de 177ºC, que é a utilizada durante a conformação. Neste foi possível determinar a queda do módulo de elasticidade devido o aumento da temperatura, bem como a variação do limite de escoamento a quente ao longo do processo CAF, a fim de garantir que em nenhum momento o processo atinja o regime plástico.

Para estes ensaios utilizou-se a máquina de tração MTS (Material Test System – Modelo 810), como mostra a figura 45. Esta máquina possui capacidade de 25 kN , curso de 80 mm e incertezas da ordem de 1%.

Figura 45 - Máquina de tração - MTS.
Fonte: Autor, 2013.

Para a realização dos ensaios foi necessária a construção de um forno dedicado a fim de evitar erros induzido devido ao tempo de aquecimento e estabilização da temperatura, uma

vez que ligas de alumínio são sensíveis a envelhecimento artificial e quanto maior o tempo para a estabilização da temperatura de ensaio, maior será a mudança microestrutural sofrida. O forno final pode ser observado na figura 46 e nota-se a presença de um soprador térmico que é o responsável por garantir a homogeneidade da temperatura através de convecção forçada. Este forno possui um controlador que possibilita a precisão de +/-1ºC e necessita de 30 minutos para atingir a temperatura de 177ºC, considerado um tempo baixo.

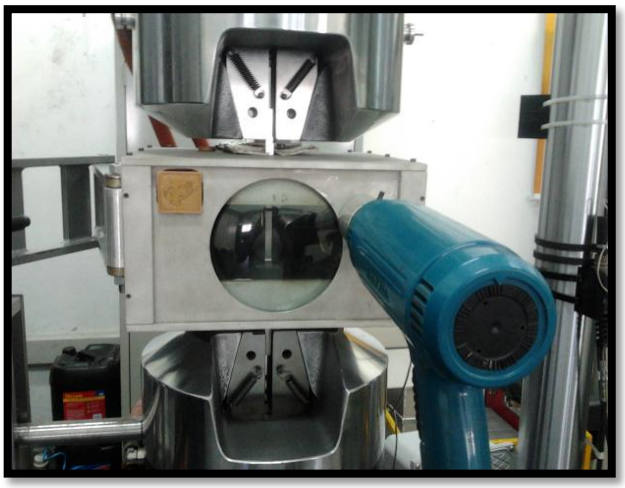

Figura 46 - Forno construído para os ensaios.
Fonte: Autor, 2013.

Após a construção do forno, e antes de se iniciar os ensaios, foi necessária a calibração da temperatura, uma vez que a temperatura imposta pelo controlador não era a mesma que chegava ao corpo de prova devido as perdas térmicas pelas garras da máquina de tração. O primeiro passo foi fazer um furo no corpo de prova para se colocar um termopar de contato o mais próximo possível do seu núcleo, como mostra a figura 47. Em seguida corrigiu-se a temperatura do controlador até que o corpo de prova atingisse a temperatura desejada.

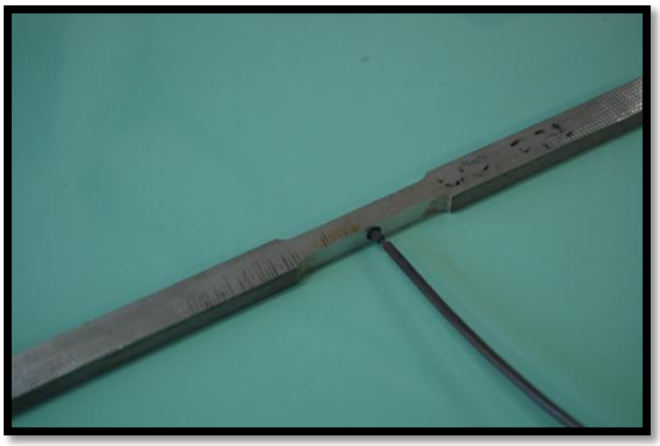

Figura 47 - Corpo de prova com termopar.
Fonte: Autor, 2013.

A construção do forno dedicado possibilitou também a utilização de um extensômetro mecânico, compensado termicamente, para a medida de deformação verdadeira, sendo esta deformação necessária para obter o módulo de elasticidade e o limite de escoamento, ambos a quente (Figura 48).

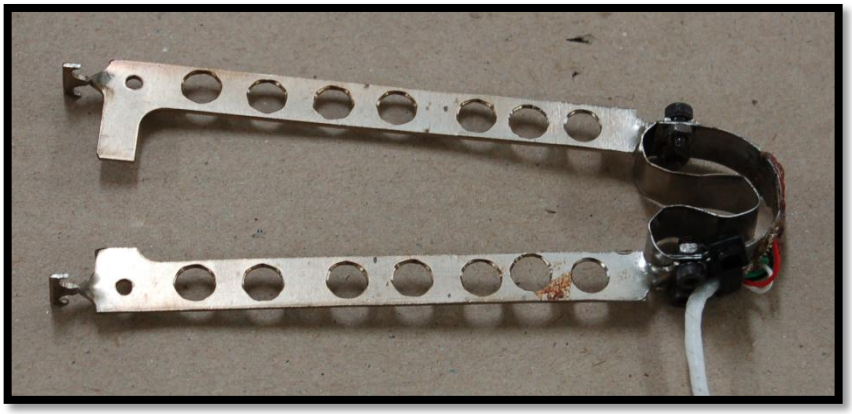

Figura 48 – Extensômetro mecânico.
Fonte: Autor, 2013.

3.5 Níveis de tensão

Em seguida realizou-se simulações das geometrias definidas pela EMBRAER para saber quais os níveis de tensões iniciais que tais geometrias propostas geravam. Para as simulações utilizou-se o MSC Patran como pré e pós-processador e o MSC Marc como solver. Os valores de tensões serão descritos no capítulo 4.

3.6 Matriz para ensaio CAF

Com os valores das tensões iniciais tornou-se possível projetar os corpos de prova, bem como as matrizes para realizar o processo CAF. Construiu-se 2 matrizes com 3 raios de curvatura diferentes a fim de variar o nível de tensão aplicada. Adicionalmente variou-se a espessura do corpo de prova em 2 níveis para também variar a tensão inicial. Com isso tem-se 6 níveis de tensão inicial aplicada.

Das tensões iniciais obtidas pela simulação das geometrias propostas definiu-se os raios de curvatura e espessura do corpo de prova para ensaio CAF de modo que o nível de tensões aplicadas nos experimentos de CAF atingisse as tensões das geometrias propostas.

A primeira etapa foi preparar os corpos de prova para realizar a conformação. Definiu-se estes com espessuras de 3 e 9 mm e com 170 mm de comprimento por 18 mm de largura, como mostram as figuras 49 e 50. Retiraram-se os corpos de prova no sentido de laminação da chapa fornecida.

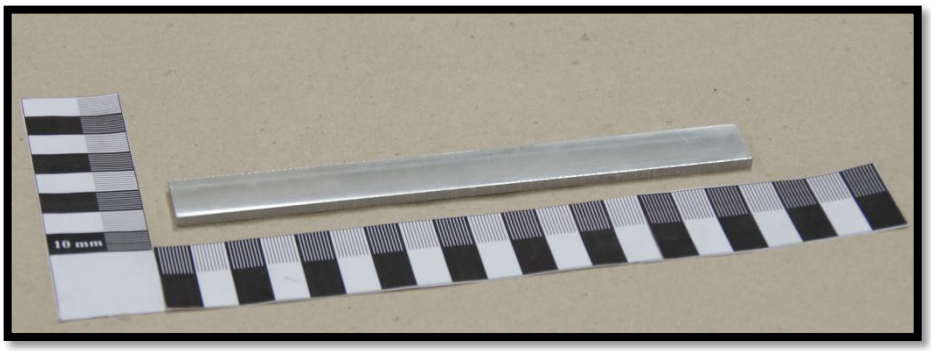

Figura 49 – Corpo de prova para ensaio CAF – Espessura 3 mm.
Fonte: Autor, 2013.

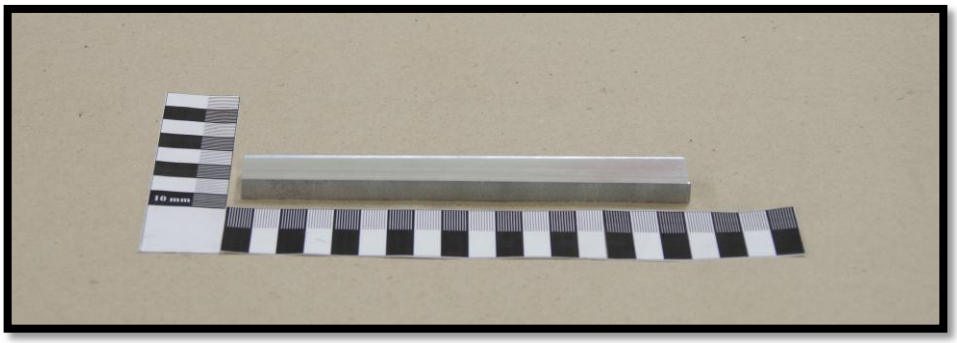

Figura 50 – Corpo de prova para ensaio CAF – Espessura 9 mm.
Fonte: Autor, 2013.

Após a definição das dimensões do corpo de prova para o CAF, definiu-se as curvaturas das matrizes com raios de 1500, 2000 e 2500 milímetros, como mostram as figuras 51 e 52. Com isso as tensões iniciais para cada condição podem ser vistas na tabela 1.

As matrizes foram confeccionadas em aço, priorizando qualidade no acabamento superficial para minimizar problemas com atrito.

Tabela 1- Tensões iniciais aplicadas no experimento de CAF.

Espessura do CDP mm	Raio de curvatura mm	Tensão inicial MPa
3	2500	39
3	2000	45
3	1500	61
9	2500	115
9	2000	143
9	1500	196

Fonte: Autor, 2013.

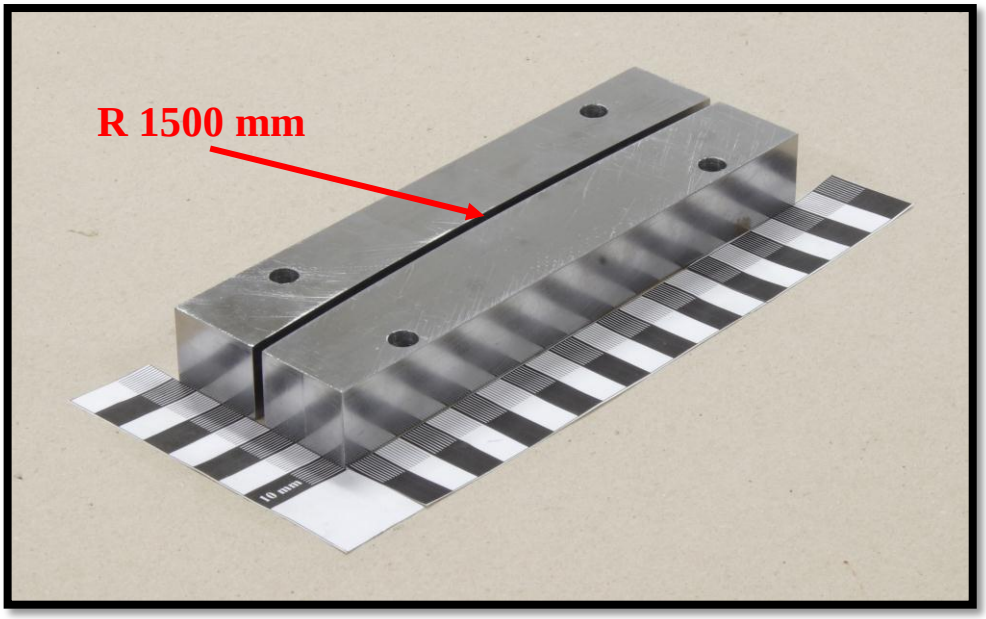

Figura 51 – Matriz para ensaio CAF – Raio de 1500 mm.
Fonte: Autor, 2013.

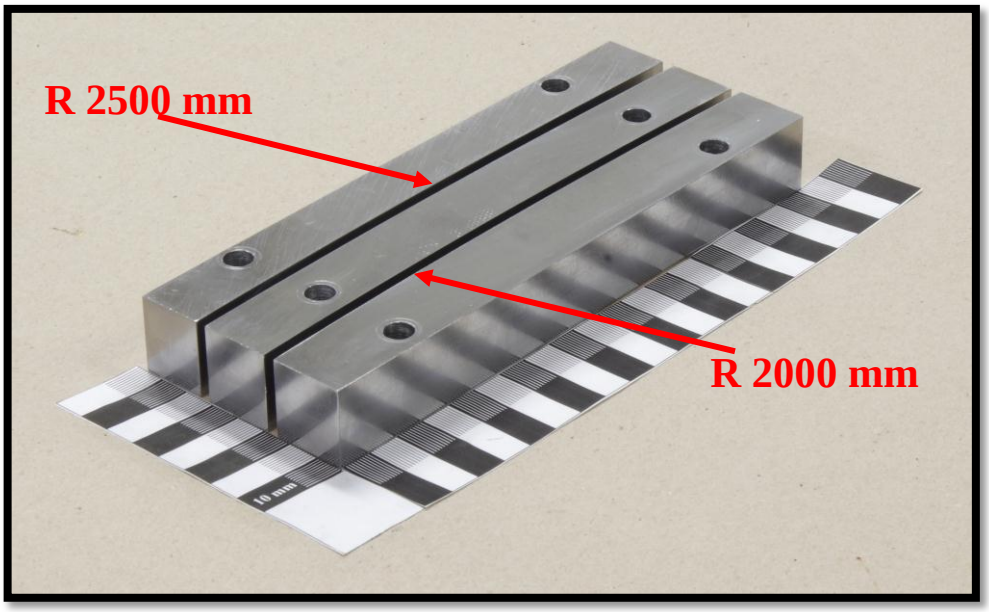

Figura 52 – Matriz para ensaio CAF – Raio de 2000 e 2500 mm.
Fonte: Autor, 2013.

3.7 Ensaios de fluência

O ensaio de fluência foi contratado da empresa Sistema de Teste em Materiais (STM) e foi realizado de acordo com a norma ASTM E-139. A figura 53 representa a geometria do corpo de prova utilizado.

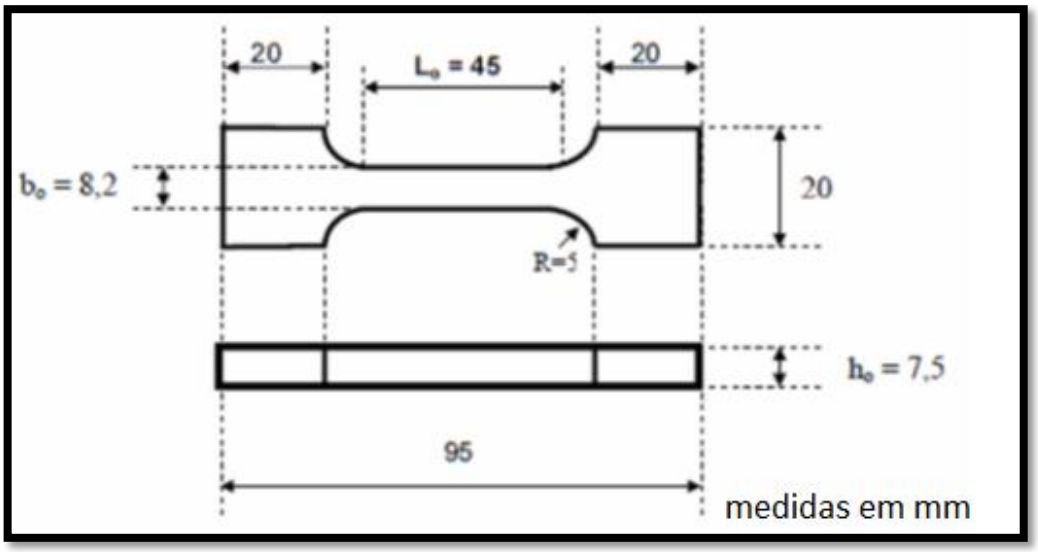

Figura 53 - Corpo de prova de fluência.
Fonte: Empresa STM, 2012.

O ensaio consistiu em aquecer o corpo de prova até a temperatura de 177ºC, temperatura de conformação, em seguida aplicou-se o carregamento por peso morto e monitorou-se a deformação ao longo do tempo.

Neste ensaio obteve-se o tempo ideal de conformação que será descrito nos resultados. Com isso foi possível realizar os ensaios de CAF em matrizes.

3.8 Ensaios de CAF

Os ensaios de CAF foram realizados em uma estufa Fanen, com controle de +/-1ºC também na temperatura de 177ºC. A estufa possui ventilação forçada internamente, o que possibilita uma melhor homogeneidade da temperatura, bem como um rápido aquecimento.

A carga foi aplicada através de prisioneiros, de modo que o corpo de prova encostasse em ambos os lados da matriz.

Após os ensaios de CAF, as medidas de flechas finais dos corpos de prova sujeitos ao processo CAF foram obtidas através da tridimensional Mitutoyo QM Measure 353 (Figura 54). Tais medidas finais são necessárias para o cálculo de retorno elástico.

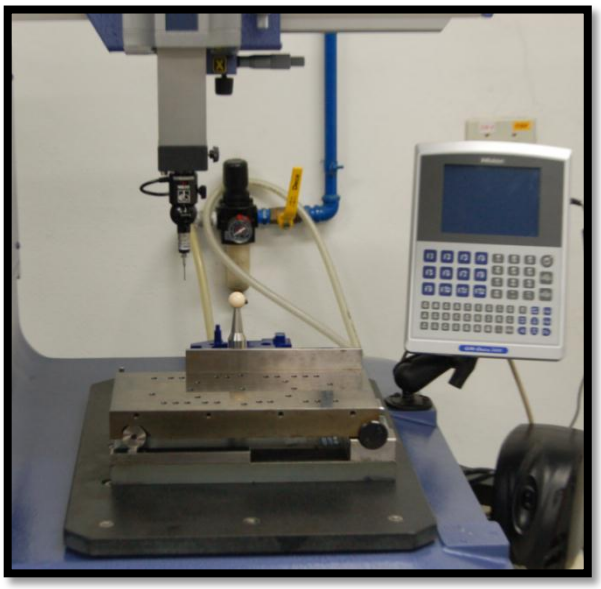

Figura 54 – Tridimensional Mitutoyo.
Fonte: Autor, 2013.

3.9 Simulação do processo CAF e obtenção do modelo simplificado

Para a simulação novamente utilizou-se dos softwares MSC. Patran e MSC. Marc e nesta vale-se listar as principais ações tomadas no software:

a) Criou-se as geometrias em software CAD. Pela simplicidade das geometrias e a fim de economizar tempo computacional desenharam-se ambas como superfícies;
b) Importação da geometria no formato Parasolid, tomando cuidado com o as unidades de medida;
c) Gerou-se a malha, utilizando elemento Quad4, pois testes preliminares comprovaram que tal elemento é muito eficiente para simulações que trabalham com contato. Estes elementos também possibilitam sua rotação, conforme descrito no tópico 2.5.
d) Inseriu-se material, onde nesta etapa inseriu-se tanto o módulo de elasticidade a quente quanto o modelo simplificado, ambos obtidos experimentalmente e serão detalhados nos resultados;

e) Colocou-se propriedades, onde por ser uma simulação com superfície sujeita a uma carga de flexão, utilizou-se elemento de casca;
f) Impôs-se restrições de deslocamento na translação a fim de evitar que a geometria ficasse solta no espaço;
g) Criou-se contato entre a matriz e a placa. Como a região de estudo é a placa aplicou-se o contato de corpo deformável. Já para a matriz aplicou-se o contato de corpo rígido, o que evita a criação de malha e também diminui o tempo computacional. Na matriz também foi utilizado o comando de aproximação dos corpos, pois para evitar conflitos de geometria os mesmos foram desenhados a certa distância;
h) Gerou-se *load case*, onde este é dependente do tempo;
i) Impôs-se carregamento através de uma tabela de tempo em função da pressão. A pressão aplicada é referente a autoclave, 7 bar, condição necessária para que haja contato total da placa com o ferramental (matriz);
j) Por fim construiu-se uma análise dividida em 3 etapas: Aproximação dos corpos, carregamento (fluência) e descarregamento.

Com a metodologia descrita acima e juntamente com os resultados experimentais de retorno elástico, partiu-se para a etapa de obtenção do modelo simplificado através de simulações realizadas, onde variou-se as constantes K e n do modelo até que os resultados experimentais convergissem com os resultados da simulação.

Com o modelo simplificado obtido, que será melhor descrito no capítulo de resultados, foi possível realizar a simulação final das geometrias de curvatura simples e dupla curvatura.

3.10 Tensão residual por furo cego incremental

Como contribuição do presente trabalho foi realizada a análise experimental da tensão residual de uma geometria já conformada por CAF. Essa geometria trata-se de uma curvatura simples e sua conformação atendeu todas as premissas do processo CAF, citadas no tópico 2.3. Porém não se tem conhecimento das dimensões do ferramental utilizado e nem o resultado de retorno elástico obtido.

Na análise de tensão residual pelo furo cego foram realizados 3 ensaios na mesma geometria.

A seguir descreve-se toda a metodologia utilizada para a preparação e realização do ensaio de furo cego.

3.10.1 Procedimento para instrumentação do corpo de prova.

a) Selecionou-se a região onde irão ser coladas as rosetas;

b) Neutralizou-se (Neutralizador / Exel Sensors) a superfície até a região ficar completamente limpa;

c) Traçaram-se as linhas para o posicionamento das rosetas.

d) Posicionaram-se as rosetas com fita adesiva.

Modelo da roseta utilizada: PA-13-062RE-120-L/ Exel Sensors

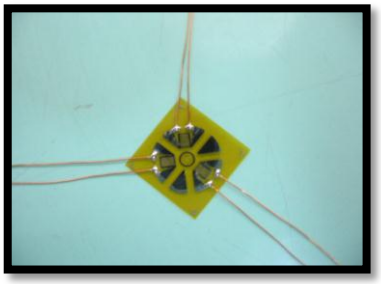

Figura 55 - Roseta extensométrica.
Fonte: Autor, 2013.

e) Passou-se o ativador (Ativador–7452 / Loctite) e esperou-se por aproximadamente um minuto;

f) Passou-se a cola (Cola-756 / Loctite) e pressionou-se a região da roseta por 5 minutos à uma pressão confortável;

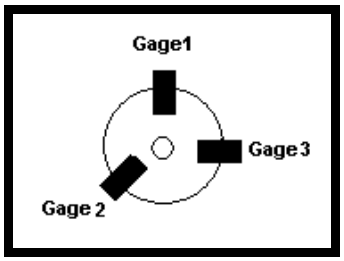

Figura 56 - Representação da roseta com sua numeração.
Fonte: Autor, 2013.

g) Soldou-se o cabo 3 x 26 AWG (Cabo Sparflex colado Sn / Metalúrgica Spar) no terminal conforme ilustrado.

Figura 57 - Representação da ligação em 1/4 de ponte.
Fonte: Autor, 2013.

h) Soldou-se o terminal de conexão para o equipamento Spider8 (HBM).

3.10.2 Procedimento para a realização do ensaio

Para realizar o ensaio, utilizou-se o equipamento Sint (Figura 58), da fabricante Sint Technology, cujo qual é totalmente automatizado, o que minimiza os erros provocados pelo operador. Foi necessário também o uso do equipamento Spider8, da fabricante HBM, para a aquisição dos valores de deformação aliviada. As principais etapas foram:

a) Colou-se (Cola-756 / Loctite) o corpo de prova em uma chapa de aço para que assim pudesse entrar com o equipamento de realização dos ensaios de furo cego.

b) Fixou-se o tripé do equipamento de furação na chapa de curvatura simples.

c) Com o auxílio do microscópio de posicionamento localizou-se o centro da roseta. Deslocou-se com parafusos a lente do microscópio, até coincidir a intersecção dos eixos graduados do microscópio com o centro da roseta.

d) Em seguida retirou-se o microscópio e montou-se a turbina.

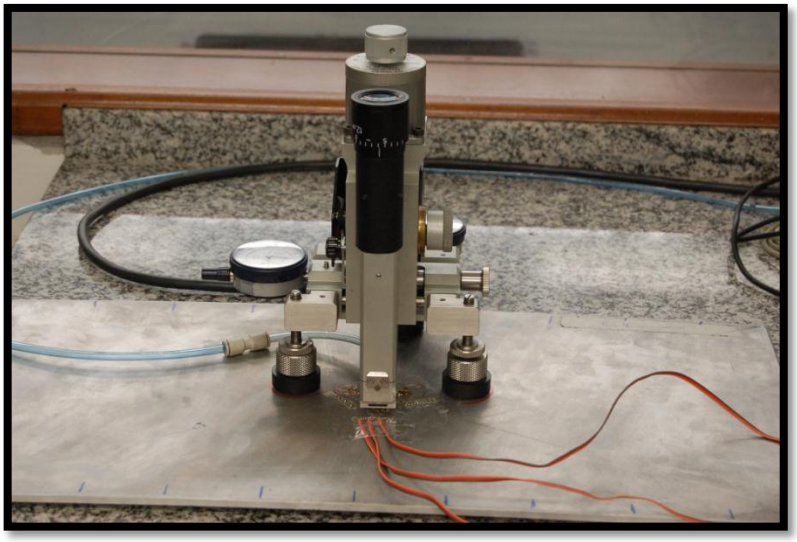

Figura 58 - Equipamento para medidas de tensões residuais.
Fonte: Autor, 2013.

A última etapa foi ajustar as variáveis do software do equipamento, tais como velocidade de ensaio, tempo para aquisição dos dados e equipamento de aquisição utilizado. Basicamente o é conduzido por uma turbina de alta rotação com uma fresa de topo (1,8 milímetros de diâmetro), que aprofunda com velocidade definida. Quando a turbina chega à profundidade definida ela para e o equipamento de aquisição Spider8 lê o valor de deformação. Em seguida a turbina volta a funcionar indo até a outra profundidade definida e assim por diante até a profundidade total desejada. Por isso a técnica é conhecida como furo-cego incremental.

3.11 Tensão residual por alívio total das tensões

Agora será descrita a metodologia do ensaio realizado com alívio total das tensões. Como este ensaio só é possível realizar uma única vez por geometria fez-se o mesmo após as medidas pelo furo-cego. Também por possibilitar apenas um único ensaio, colou-se 3 extensômetros (Figura 59) afim de descartar qualquer roseta mal colada. As técnicas de colagem das rosetas foram as mesmas descritas para o ensaio do furo-cego, entretanto a roseta utilizada trata-se do modelo PA-13-062RB-120-L da fabricante Exel Sensors.

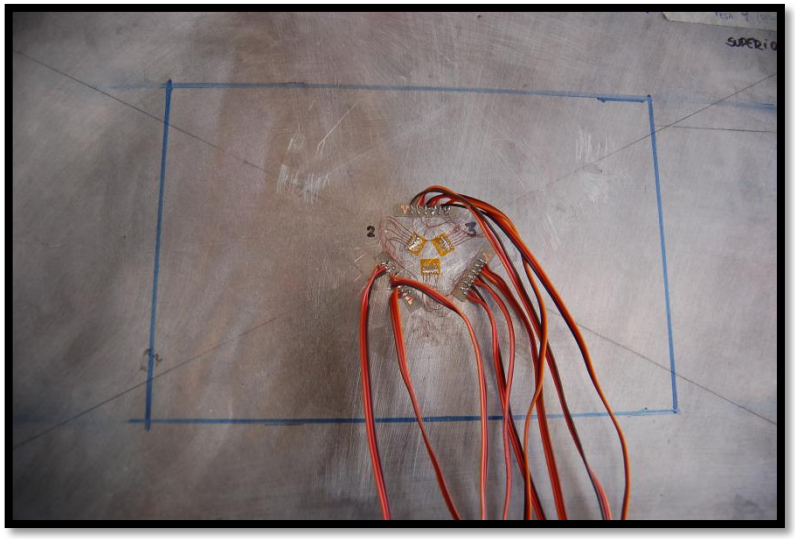

Figura 59 – Geometria de curvatura simples com extensômetros colados.
Fonte: Autor, 2013.

Em seguida ligaram-se todas as rosetas nos equipamentos de aquisição P3 e P3500 da fabricante Vishay e zeraram-se todos os canais. (Figura 60)

Figura 60 – Conjunto montado para ensaio de alívio total de tensão.
Fonte: Autor, 2013.

Por fim, iniciou-se o ensaio. Cortou-se a geometria em uma região pré-estabelecida, como mostra a figura 7, a fim de retirar um elemento que aliviasse toda a tensão interna e com isso leu-se as deformações totais aliviadas, tendo assim as tensões residuais.

O corte foi realizado com uma serra de disco, da maneira mais lenta possível para que a peça não aquecesse o que influenciaria no resultado.

4 RESULTADOS

Para facilitar o melhor entendimento do processo de CAF, bem como realizar as discussões, os resultados serão apresentados da seguinte maneira:

a) Ensaios de tração a quente;
b) Nível de tensão inicial das geometrias definidas;
c) Ensaio de fluência;
d) Ensaios de CAF – Matriz;
e) Modelo simplificado;
f) Simulação final das geometrias definidas.

4.1 Ensaios de tração a quente

O primeiro resultado obtido pelos ensaios de tração a quente foi o módulo de elasticidade na temperatura de 177ºC. Tal módulo fez-se necessário para a simulação, uma vez que o processo de carregamento e descarregamento ocorre a quente. Um possível erro no módulo geraria problemas tanto no valor da tensão inicial aplicada quanto no valor de retorno elástico.

O valor médio obtido nos ensaios foi de 64095 MPa com desvio padrão de 1777 MPa, onde notou-se uma queda de aproximadamente 12% quando comparado com o módulo na temperatura ambiente (73000 MPa).

Em seguida obteve-se a evolução do limite de escoamento, também na temperatura de 177ºC, para diferentes tempos de envelhecimento. Este resultado é necessário, pois é premissa do processo CAF a tensão inicial não ultrapassar o limite de escoamento do material. Além disso, tal evolução ajuda na determinação do tempo de processo CAF, uma vez que se consegue estimar a tensão de escoamento da peça após o processo. É apenas uma estimativa, pois o limite de escoamento obtido é na temperatura de 177ºC e o limite de escoamento da peça já conformada, que estará na temperatura ambiente, será maior.

A tabela 2 mostra a evolução do limite de escoamento a 177ºC em função do tempo de envelhecimento, partindo da condição inicial TAF.

Foram realizados 3 ensaios para cada condição de envelhecimento para verificar a repetibilidade e estabelecer uma média.

Tabela 2- Evolução da tensão de escoamento A 177ºC em função do tempo de envelhecimento.

Tensão de escoamento a 177ºC					
Condição do material	Ensaio 1 MPa	Ensaio 2 MPa	Ensaio 3 MPa	Média MPa	Desvio Padrão MPa
TAF	378	379	374	**377**	**2,160**
TAF+2 HORAS	445	434	431	**437**	**6,018**
TAF+6 HORAS	397	402	394	**398**	**3,300**
TAF+12 HORAS	334	331	327	**331**	**2,867**
TAF+24 HORAS	327	333	328	**329**	**2,625**

Fonte: Autor, 2013.

A figura 61 mostra graficamente a média da tensão limite de escoamento a 177ºC em função do tempo de envelhecimento.

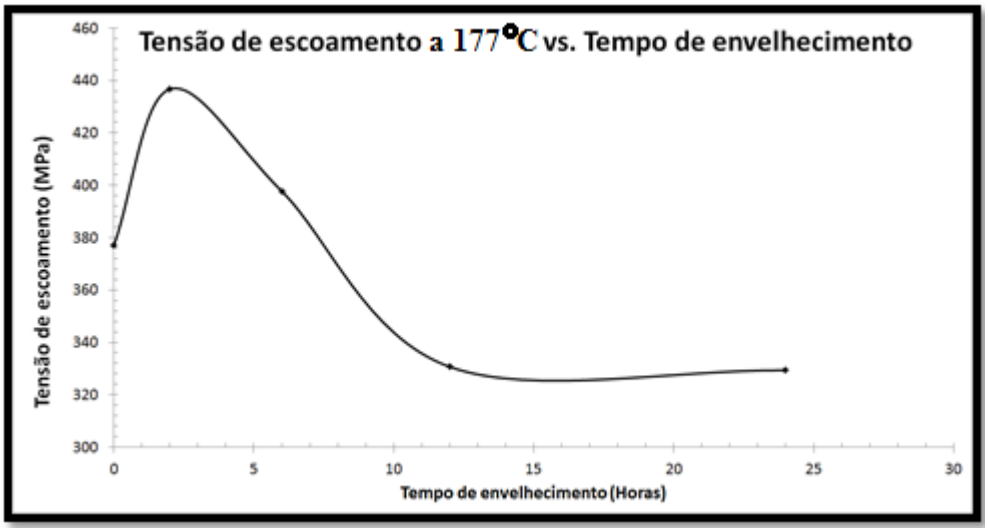

Figura 61 – Evolução da tensão de escoamento em função do tempo de envelhecimento.
Fonte: Autor, 2013.

Notou-se que o material parte de uma condição inicial de tensão (TAF), com limite de escoamento a 177ºC em torno de 377 MPa, onde atinge o pico de limite de escoamento por volta de 2 horas e por fim chega na situação de superenvelhecida por volta de 12 horas.

4.2 Tensão inicial das geometrias definidas

Aqui mostra-se as tensões inicias geradas pelas geometrias propostas. Todas as tensões que são apresentadas a seguir corresponde à tensões equivalentes de von Mises. Como para realizar a simulação não é necessário introduzir a tensão de escoamento, este passa a ser um fator comparativo para os resultados obtidos. Outro ponto importante é que não pode ocorrer plasticidade em nenhum momento durante o processo de CAF. Então para comparar a tensão inicial aplicada deve-se utilizar a menor tensão de escoamento à quente durante o processo de envelhecimento, e admitindo que na pior das hipóteses o processo CAF ocorreria em 24 horas, a menor tensão de escoamento seria 329 MPa . Confrontando os valores de limite de escoamento e a simulação de tensão inicial verificou-se em todas as geometrias que as tensões aplicadas não excederam o limite de escoamento do material.

Na geometria de curvatura simples para a espessura de 5 mm notou-se alguns picos no valor de tensão inicial (Figura 62). Este problema foi ocasionado por problemas entre os elementos de contato adotados na simulação. Estas regiões foram descartadas e considerou-se a tensão inicial obtida na região central, pois nesta a tensão se encontra constante (Figura 62). Através do software obteve-se precisamente seu valor nesta região, chegando a 131 MPa. Esta tensão está abaixo do limite de escoamento do material na temperatura de 177ºC, atendendo assim a premissa do processo de CAF.

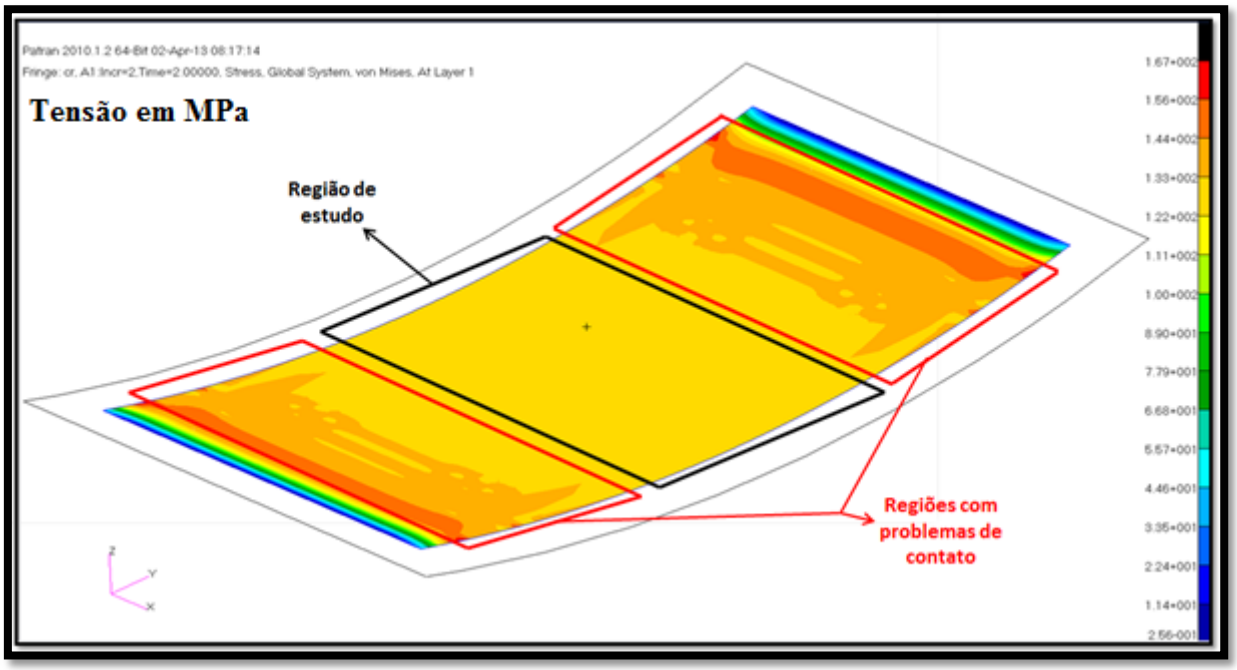

Figura 62 – Tensão inicial - Geometria de curvatura simples – Espessura de 5 mm.
Fonte: Autor, 2013.

Na geometria de dupla curvatura, na espessura de 5 mm e na de 12 mm os problemas de contato não foram identificados, com isso as tensões iniciais aplicada foram de 101 MPa e 173 MPa respectivamente. Estas também não ultrapassam o limite de escoamento, como mostram as figuras 63 e 64.

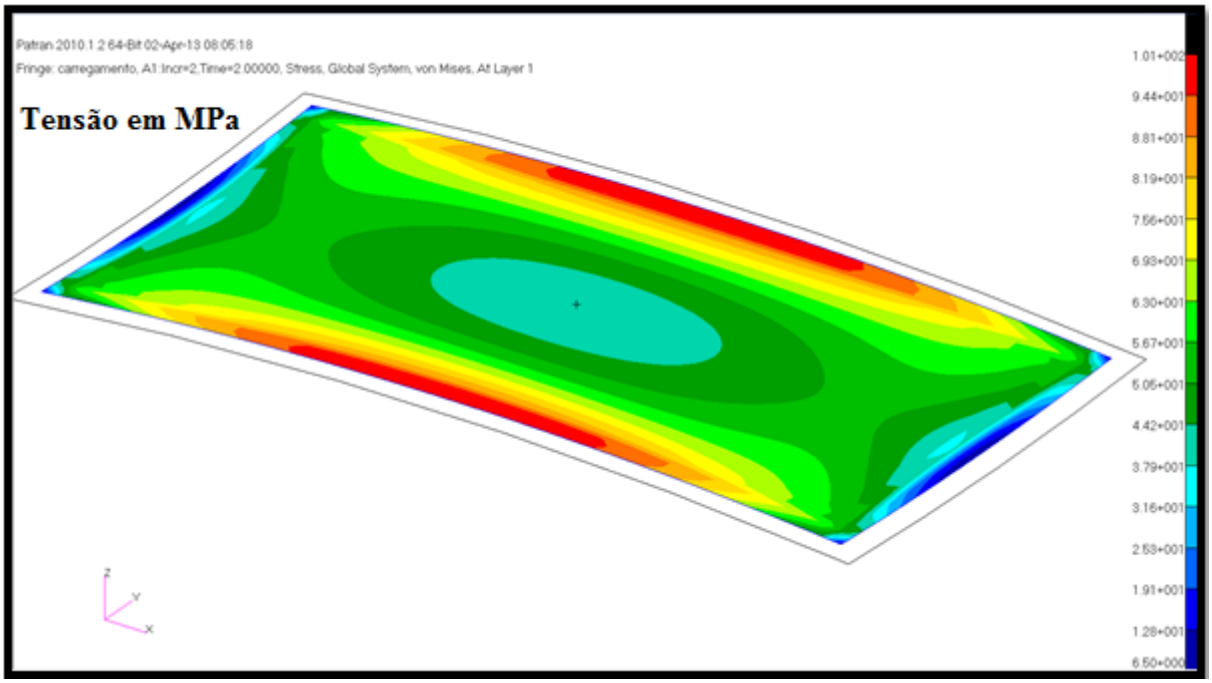

Figura 63 – Tensão inicial - Geometria de dupla curvatura – Espessura de 5 mm.
Fonte: Autor, 2013.

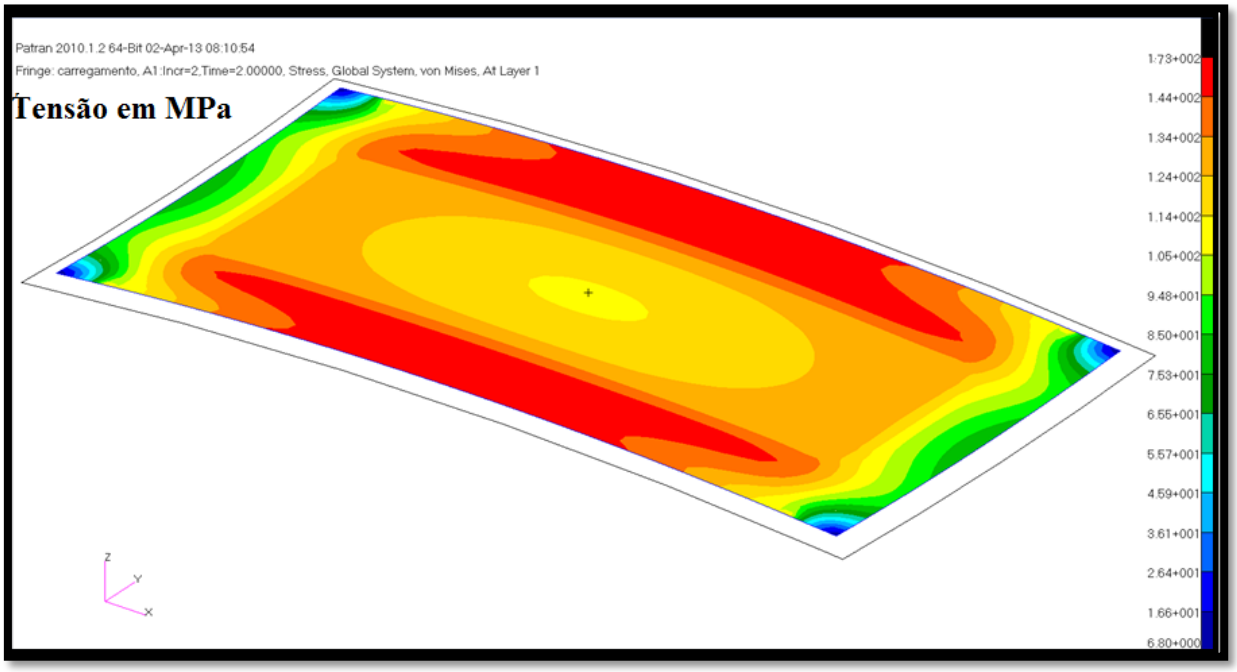

Figura 64 – Tensão inicial - Geometria de dupla curvatura – Espessura de 12 mm.
Fonte: Autor, 2013.

4.3 Ensaio de fluência

O ensaio de fluência foi executado pela empresa STM (Sistemas de testes em materiais). A figura 65 mostra a curva de fluência obtida para a liga Al 7050, onde o ensaio foi conduzido na temperatura de 177ºC a uma tensão inicial de 190 MPa.

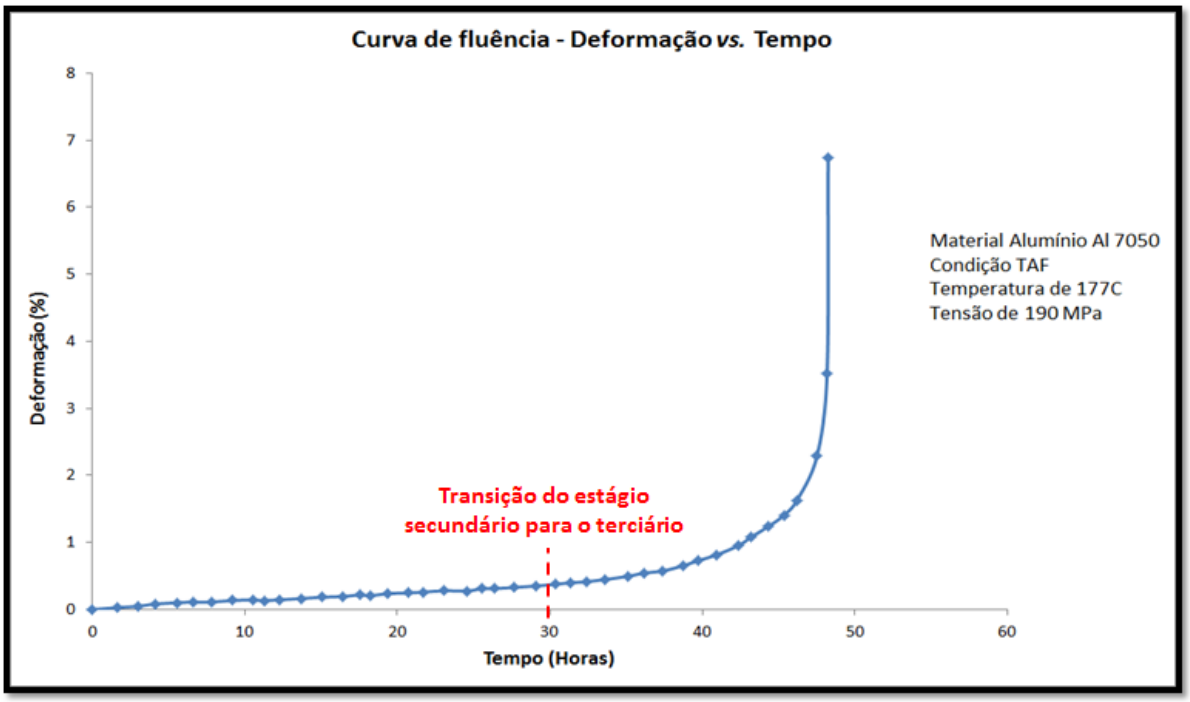

Figura 65 – Curva de fluência. 190MPa@177ºC.
Fonte: Autor, adaptado de STM, 2012.

A tensão aplicada no ensaio (190 MPa) superestima as tensões iniciais descritas no tópico anterior e com isto é possível observar o intervalo do estágio secundário. Este intervalo é necessário para definir o tempo de processo CAF, afim de que não seja introduzido dano à geometria a ser conformada. Este intervalo está em aproximadamente 30 horas.

Constatou-se que ensaios de fluência convencionais não servem para alimentar o modelo unificado descrito anteriormente, pois estes ensaios têm como principal resultado o tempo total até a ruptura por fluência (estágio terciário) e para o modelo unificado faz-se necessária a caracterização dos estágios primário e secundário.

Outro ponto importante é que os ensaios convencionais aplicam-se a carga de maneira gradual, em média 1 hora e 30 minutos para aplicação total, e isto é outro problema impactante visto que se tratando de uma liga de alumínio, na temperatura de 177ºC, já passa a sofrer envelhecimento artificial.

4.4 Determinação do tempo de processo CAF

Confrontando os resultados da variação do limite de escoamento a quente e o resultado do ensaio de fluência é possível determinar o tempo para o processo CAF. Para a liga Al 7050, partindo da condição TAF, nota-se que um tempo ótimo para o processo é 8 horas. Com este tempo garante-se, pela curva de fluência (Figura 65), que o processo não atinja o estágio terciário, e também não há grande perda de propriedades mecânicas em função da condição inicial TAF (perda de aproximadamente 3% do limite de escoamento inicial – Figura 66).

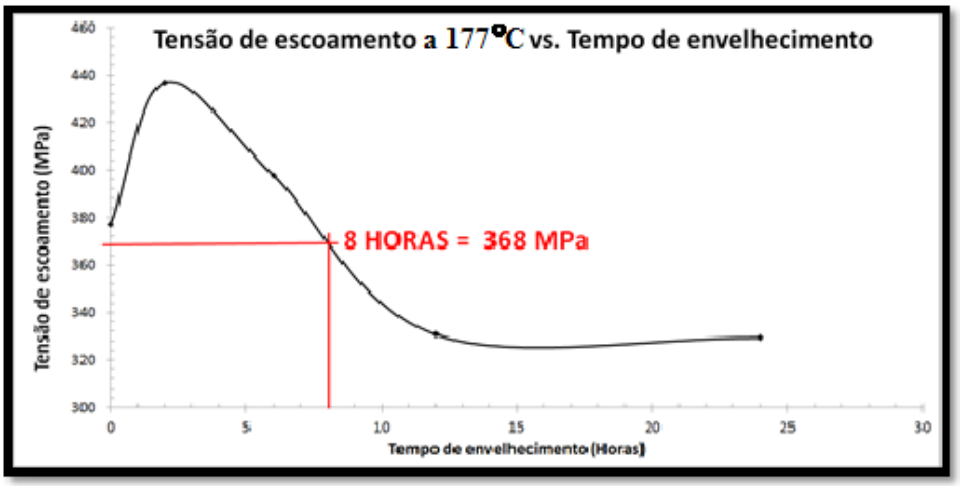

Figura 66 – Evolução da tensão de escoamento em função do tempo de envelhecimento.
Fonte: Autor, 2013.

Com o tempo de processo definido em 8 horas e analisando a figura 58, onde mostra a evolução do limite de escoamento com o tempo de envelhecimento, conclui-se que o processo CAF ultrapassa o estágio de têmpera T6, referente ao pico da curva de dureza e consequentemente o pico de tensão de escoamento, mas não é possível estimar qual é o estágio final após o processo.

4.5 Ensaios de CAF - Matriz

A partir de então se iniciam os ensaios de CAF nas matrizes expostas anteriormente (Tópico 3.6). Para o cálculo de retorno elástico utilizou-se a formulação clássica que relaciona retorno elástico com as flechas inicial e final, conforme a equação 13.

$$\text{Retorno elástico} = \left(\frac{\text{flecha inicical} - \text{flecha final}}{\text{flecha inicial}}\right) * 100 \qquad (13)$$

A flecha inicial depende do raio de curvatura e do tamanho do corpo de prova. Como havia diferenças no comprimento dos corpos de prova de CAF as flechas iniciais foram obtidas através do software CAD Nx 7.5, onde desenhou-se o raio do ferramental e o comprimento real de cada corpo de prova, obtendo-se assim a flecha inicial, como mostra a figura 67. Já a flecha final foi obtida por medidas na tridimensional, descrita na metodologia. Com isso foi possível calcular o retorno elástico, como mostra a tabela 3. Os resultados são exibidos em função da tensão inicial aplicada, sendo que para cada tensão, realizou-se 3 ensaios para verificar a repetibilidade.

Figura 67 – Medidas de flecha inicial.
Fonte: Autor, 2013.

Tabela 3- Resultados de retorno elástico experimental.

		EXPERIMENTAL				
		Tensão aplicada (MPa)	Flecha inicial (mm)	Flecha final (mm)	Retorno elástico (%)	Retorno elástico médio (%)
9 mm	RÉPLICAS	196	2,32588	0,535	77,00	77,28
		196	2,35384	0,533	77,36	
		196	2,43873	0,549	77,49	
	RÉPLICAS	143,6	1,75428	0,358	79,59	79,45
		143,6	1,84985	0,3715	79,92	
		143,6	1,75428	0,371	78,85	
	RÉPLICAS	115,7	1,4032	0,267	80,97	81,06
		115,7	1,45393	0,266	81,70	
		115,7	1,39483	0,272	80,50	
3 mm	RÉPLICAS	61,3	2,52512	0,41375	83,61	83,18
		61,3	2,49616	0,41975	83,18	
		61,3	2,51062	0,433	82,75	
	RÉPLICAS	45,2	1,82839	0,274	85,01	84,49
		45,2	1,87143	0,283	84,88	
		45,2	1,89314	0,3109	83,58	
	RÉPLICAS	39,3	1,51425	0,2254	85,11	85,79
		39,3	1,45393	0,2189	84,94	
		39,3	1,49689	0,18975	87,32	

Fonte: Autor, 2013.

Com estes ensaios nota-se uma boa repetibilidade do processo CAF, bem como o aumento do retorno elástico em função do decréscimo da tensão inicial aplicada, ou seja, quanto menor a tensão aplicada, menor será a deformação por fluência ocorrida e maior será o retorno elástico.

A partir dos resultados experimentais foi possível obter o modelo simplificado que rege o processo CAF. Um ponto importante a se destacar é que o modelo simplificado obtido é válido apenas para a liga Al 7050 na condição inicial TAF.

4.6 Modelo simplificado

Para determinar o modelo simplificado utilizou-se os resultados experimentais de retorno elástico dos 3 níveis mais altos de tensão (197,6, 143,6, 115,7 MPa). Após encontrado o modelo, verificou-se se o mesmo atenderia os 3 níveis inferiores.

Graficamente exibiu-se resultados de retorno elástico médio em função da tensão inicial aplicada, (Figura 68- experimental). Com este resultado partiu-se para a simulação. Para entendimento da obtenção do retorno elástico pela simulação, no apêndice A mostra-se o procedimento realizado para um dos níveis de tensão.

Como dito anteriormente, o modelo simplificado é governado pelo coeficiente K e o expoente n, onde o coeficiente K nada mais é do que a inclinação da curva. Na primeira simulação, fixou-se o valor do coeficiente K em $7e^{-12}$ (s^{-1}) e variou-se o valor do expoente n até que o retorno elástico da simulação para corpos de prova com nível de tensão de 197,6 MPa coincidisse com o retorno elástico experimental (77,28%). O valor de n encontrado para tal foi de 1,614.

Então com o valor de K e n obtidos, simularam-se as outras condições de tensão inicial, obtendo os outros retornos elásticos (Figura 68 – simulação 1). Notou-se que para os outros dois níveis de tensão, os valores de retorno elástico sofreram uma diferença. Entretanto este era apenas um problema de inclinação da curva, ou seja, a variação do coeficiente K alteraria o modelo.

Em seguida realizou-se uma segunda simulação, modificando o valor do coeficiente K para $7e^{-11}$ (s^{-1}). Novamente variou-se o valor do expoente n até que o retorno elástico da simulação para corpos de prova com nível de tensão de 197,6 MPa coincidisse com o retorno elástico experimental (77,28%). O valor de n encontrado desta vez foi de 1,139.

Então com o valor de K e n obtidos, simularam-se as outras condições de tensão inicial, obtendo os outros retornos elásticos (Figura 68 – simulação 2).

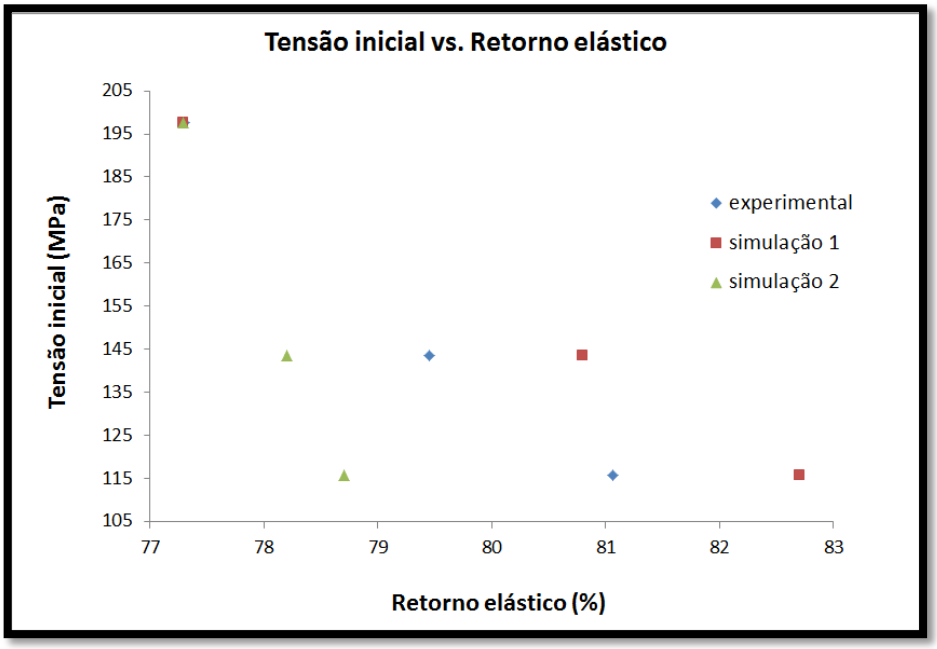

Figura 68 – Retorno elástico experimental vs. simulação.
Fonte: Autor, 2013.

Novamente notou-se que para os outros dois níveis de tensão, os valores de retorno elástico também tinham uma diferença, concluindo que o problema de inclinação da curva persistia. O processo de variação do coeficiente K e n foi realizado até que as curvas de simulação e experimental coincidissem, (Figura 69 – simulação 3).

Com isso obteve-se o modelo simplificado:

$$\dot{\varepsilon} = 2e^{-11} * \sigma^{1,398}$$

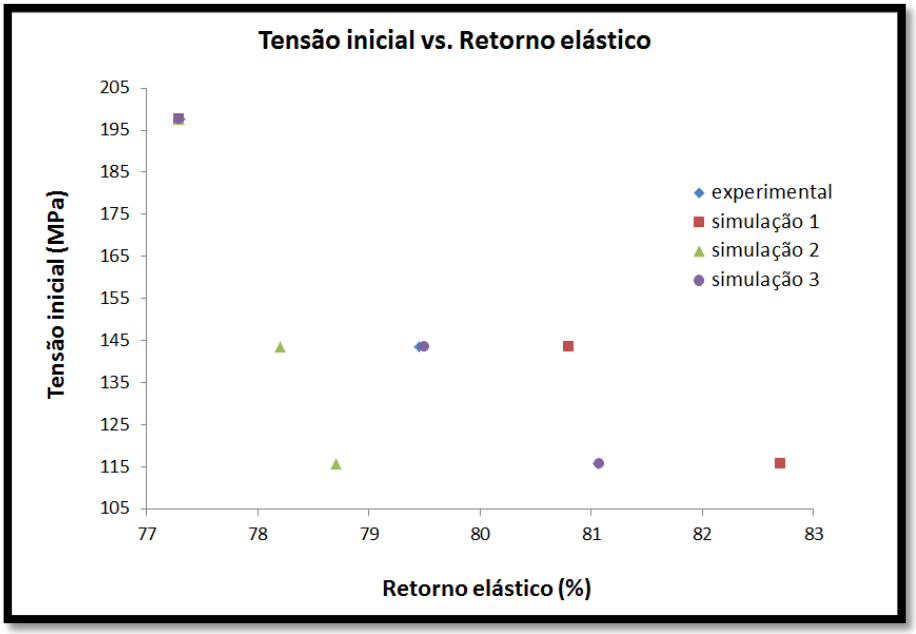

Figura 69 – Retorno elástico experimental vs. simulação – Modelo ajustado.
Fonte: Autor, 2013.

Observa-se uma ótima aproximação do modelo experimental com o modelo simplificado obtido por simulação. A partir do modelo simplificado definido realizou-se a simulação para os níveis mais baixos de tensão inicial. Os resultados de retorno elástico tanto experimental quanto de simulação são exibidos na figura 70.

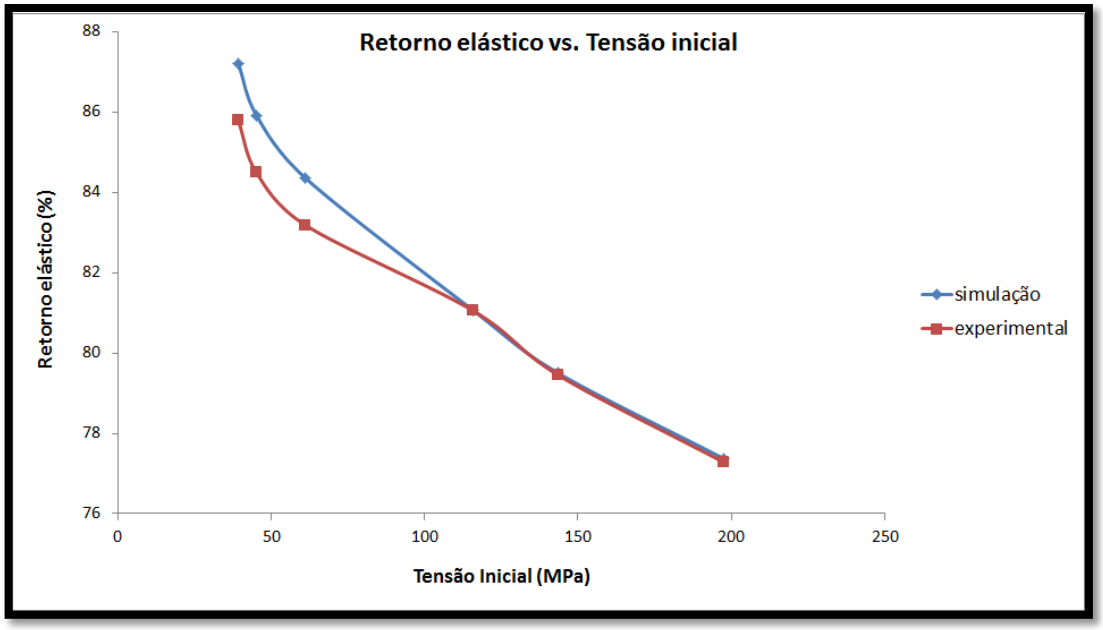

Figura 70 – Retorno elástico experimental vs. simulação para todos níveis de tensão.
Fonte: Autor, 2013.

Nota-se uma diferença do modelo simplificado em relação ao modelo experimental para tensões baixas. Entretanto, constatou-se que esse erro foi devido ao ensaio experimental.

Para as tensões menores utilizou-se a redução de espessura do corpo de prova de CAF. Porém durante a usinagem, por ser uma espessura muito pequena (3mm), ocorreu um ligeiro empenamento inicial e como se trabalha com pequenas grandezas, qualquer diferença de décimos de milímetros afeta de maneira significativa o cálculo do retorno elástico. Este empenamento deveria ser medido e compensado no cálculo da flecha final. Se isto tivesse ocorrido, a curva experimental subiria ainda mais ficando mais próxima da simulação. Contudo, consegue-se observar que o modelo simplificado proposto representa muito bem os ensaios experimentais realizados, sendo assim possível simular as geometrias definidas pela EMBRAER.

4.7 Simulação final das geometrias definidas

Alguns aspectos foram observados e testados na simulação, dentre os quais pode-se destacar: o módulo de elasticidade varia com a temperatura e consequentemente o coeficiente de Poisson também varia. Mas, modificando o seu valor na simulação este não gerou grandes diferenças nos resultados de retorno elástico, sendo assim considerou-se o mesmo igual a 0,33 (temperatura ambiente). Outro ponto analisado foi o atrito entre o ferramental e a placa a ser conformada. No presente trabalho não foi considerado atrito pois a variação do mesmo não gera grandes efeitos no retorno elástico.

Como as tensões iniciais já foram apresentadas no tópico 4.2 agora exibe-se apenas o retorno elástico e as tensões residuais, ambos após a etapa de descarregamento.

4.7.1 Retorno elástico

Inicia-se pelo retorno elástico. Como a geometria de curvatura dupla não possui raio constante utilizou-se a fórmula que leva em conta o raio final da peça e o raio inicial ou do ferramental. Sendo assim, o cálculo do retorno elástico é dado por:

$$\text{Retorno elástico} = \left(\frac{\text{raio final} - \text{raio inicial}}{\text{raio final}}\right) * 100 \qquad (14)$$

Para a geometria de curvatura simples o raio inicial é dado pela própria matriz, ou seja, é uma condição de projeto, sendo de 1169 mm. Já nos raios finais, para se obter boa precisão dos resultados, realizou-se uma ação conjunta dos softwares Patran, UGS NX 7.5 e Microsoft Excel, onde através de uma nuvem de pontos dos deslocamentos finais obteve-se a superfície final e consequentemente o raio final. Com isso obteve-se o retorno elástico demonstrado na tabela 4.

Tabela 4- Retorno elástico – Geometria de curvatura simples.

Curvaturas simples			
Espessura (mm)	Raio inicial (mm)	Raio final (mm)	Retorno elástico (%)
5	1169	5949	80,35

Fonte: Autor, 2013.

Obteve-se bom resultado quando comparado com os ensaios experimentais realizados em matriz. Nos experimentos, aplicou-se as tensões de 143,6 e 115,7 MPa e obteve-se retorno elástico de 79,45 e 81,06% respectivamente. Na simulação da geometria de curvatura simples, com tensão inicial de 131 MPa (valor de tensão entre as duas realizadas experimentalmente), o retorno elástico obtido foi de 80,35%, que garante um bom resultado obtido.

Na geometria de dupla curvatura, como dito anteriormente, têm-se a variação do raio ao longo da mesma. Com isso adotou-se a metodologia de dividir a geometria em 5 secções longitudinais e 5 secções transversais. Os raios iniciais são dados pela própria matriz e os raios finais foram obtidos com a ajuda dos softwares Patran, UGS NX 7.5 e Microsoft Excel, também gerando superfícies através dos deslocamentos finais. As figuras 71 e 72 mostram as secções escolhidas na geometria de dupla curvatura.

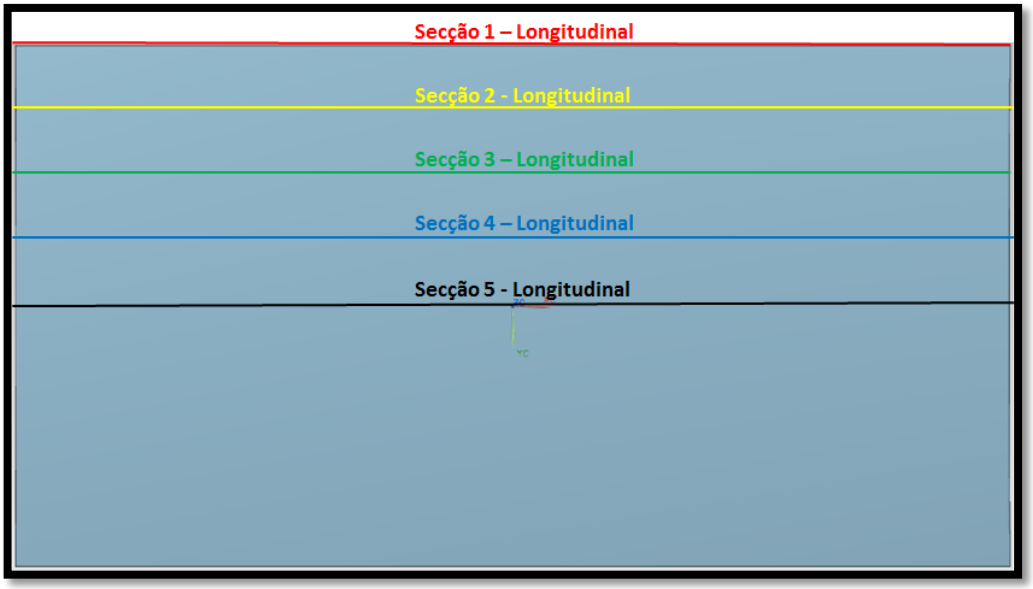

Figura 71 – Secções longitudinais das geometrias de dupla curvatura.
Fonte: Autor, 2013.

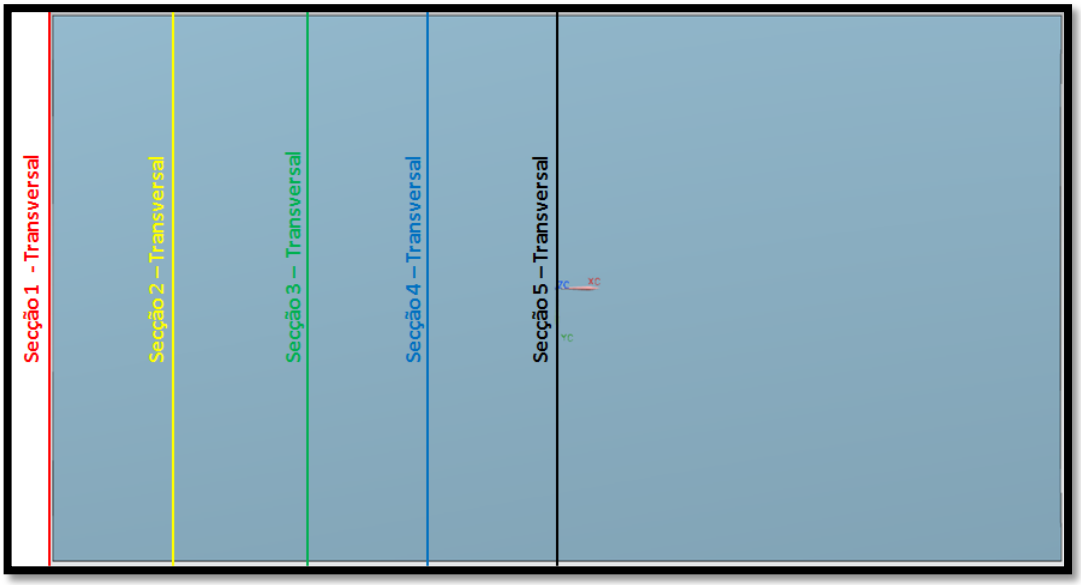

Figura 72 – Secções transversais das geometrias de dupla curvatura.
Fonte: Autor, 2013.

Com os raios iniciais e finais determinados é possível então o cálculo do retorno elástico, como mostra a tabela 5.

Tabela 5- Retorno elástico – Geometria de dupla curvatura.

Dupla curvatura					
Secção	Espessura (mm)	Raio inicial (mm)	Raio final (mm)	Retorno Elástico (%)	Retorno elástico médio (%)
1 - longitudinal	5	4062,2	18675,6	78,25	78,52
2 - longitudinal	5	4059,4	18826	78,44	
3 - longitudinal	5	4057,1	18934,9	78,57	
4 - longitudinal	5	4055,7	19000,9	78,66	
5 - longitudinal	5	4055,1	19023	78,68	
1 - transversal	5	3601,3	19430,4	81,47	80,69
2 - transversal	5	3582,7	18805,1	80,95	
3 - transversal	5	3581,3	18382,4	80,52	
4 - transversal	5	3577	18137,9	80,28	
5 - transversal	5	3570,4	18057,8	80,23	
1 - longitudinal	12	4062,2	17344,1	76,58	76,74
2 - longitudinal	12	4059,4	17416,9	76,69	
3 - longitudinal	12	4057,1	17469,2	76,78	
4 - longitudinal	12	4055,7	17500,8	76,83	
5 - longitudinal	12	4055,1	17511,3	76,84	
1 - transversal	12	3601,3	16548	78,24	77,85
2 - transversal	12	3582,7	16288,3	78,00	
3 - transversal	12	3581,3	16107,7	77,77	
4 - transversal	12	3577	15976,2	77,61	
5 - transversal	12	3570,4	15966	77,64	

Fonte: Autor, 2013.

Um ponto importante pode ser observado com estes resultados comprova o trabalho publicado por Jeunechamps et al., 2006, onde cita que geometrias com dupla curvatura possuem retorno elástico menor do que geometrias de curvatura simples.

Na geometria de curvatura simples, com um nível de tensão de 131 MPa, tem-se um retorno elástico de 80,35%. Sabe-se que quanto menor o nível de tensão aplicado menor será a deformação por fluência e consequentemente maior o retorno elástico. Porém, na geometria de dupla curvatura com espessura de 5 milímetros onde tem-se uma tensão inicial de 101 MPa, o retorno elástico médio foi de79,60%.

Contudo, obtiveram-se bons resultados computacionais, mas ambas as geometrias ainda não foram confrontadas com ensaios experimentais. O valor de retorno elástico pode ser minimizado aumentando o tempo de conformação desde que não atinja o estágio terciário de fluência. Para isso faz-se necessário um estudo durante o projeto de qual a tensão de escoamento necessária ao final da conformação. Por exemplo, se cálculos estruturais garantirem que a tensão de escoamento possa ser da ordem de 300 MPa (Figura 66), o tempo

de processo CAF pode ser aumentado de 8 horas para até 24 horas, com isso haveria maior deformação por fluência e um retorno elástico menor.

4.7.2 Tensões residuais

Por fim tem-se os resultados de tensões residuais obtidos pela simulação das geometrias propostas. Para a análise de tensões residuais dois pontos devem ser levados em conta. O primeiro é que o software de elementos finitos não leva em conta tensões residuais existentes na geometria antes do processo CAF, causadas por processos anteriores. Outro ponto a se destacar é que tensão residual nunca deve ser analisada como equivalente de von Mises, pois é de grande interesse saber qual é o sentido da tensão (compressiva ou trativa). Sendo assim todas serão exibidas por tensões máximas e mínimas principais.

Inicia-se pela curvatura simples com espessura de 5mm, onde as figuras 73 e 74 mostram respectivamente as tensões máxima e mínima principal em MPa.

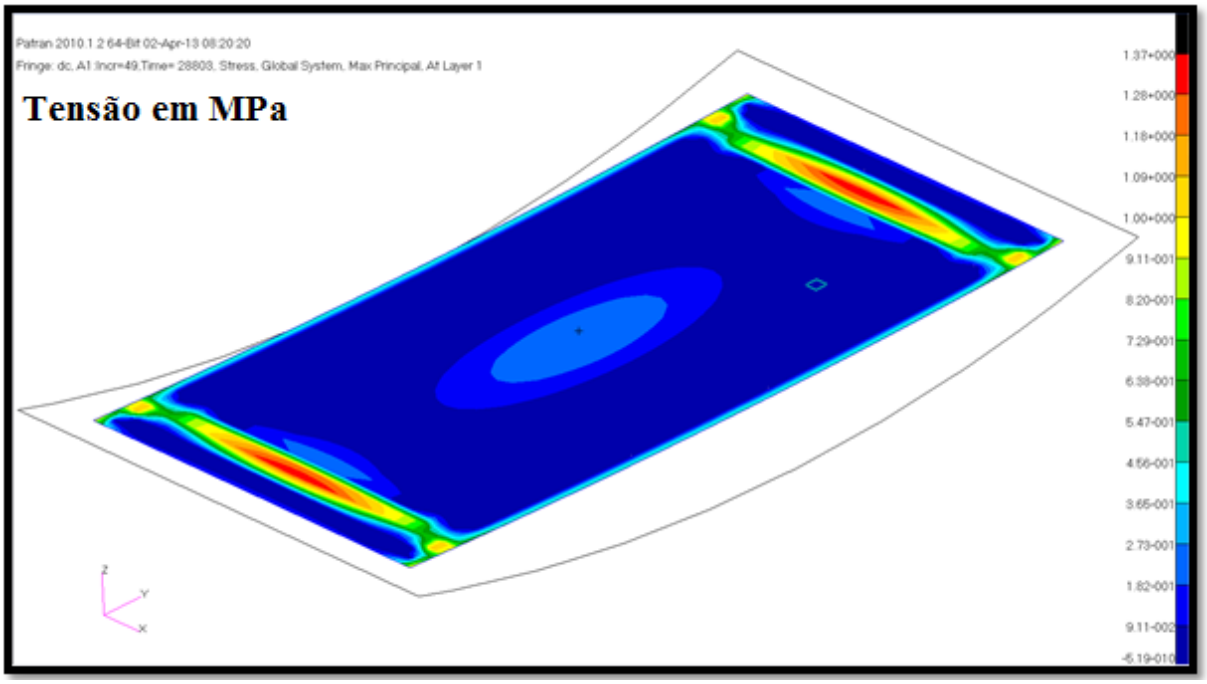

Figura 73 –Tensão residual máxima principal- Curvatura simples – Esp. de 5 mm.
Fonte: Autor, 2013.

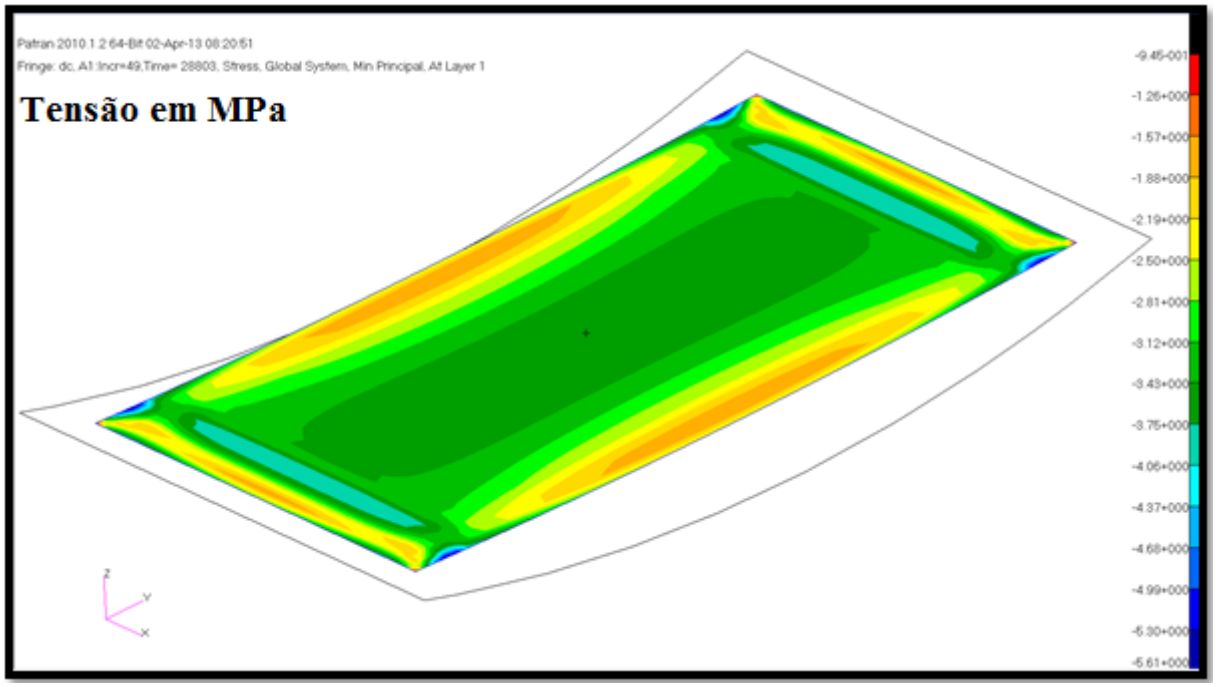

Figura 74 –Tensão residual mínima principal- Curvatura simples – Esp. de 5 mm.
Fonte: Autor, 2013.

Notou-se efetivamente um baixo nível de tensão residual gerado pelo processo CAF, variando entre 1,37 MPa e -5,61 MPa.

Em seguida analisa-se a geometria de curvatura dupla com espessura de 5mm, onde as figuras 75 e 76 mostram respectivamente as tensões máxima e mínima principal em MPa.

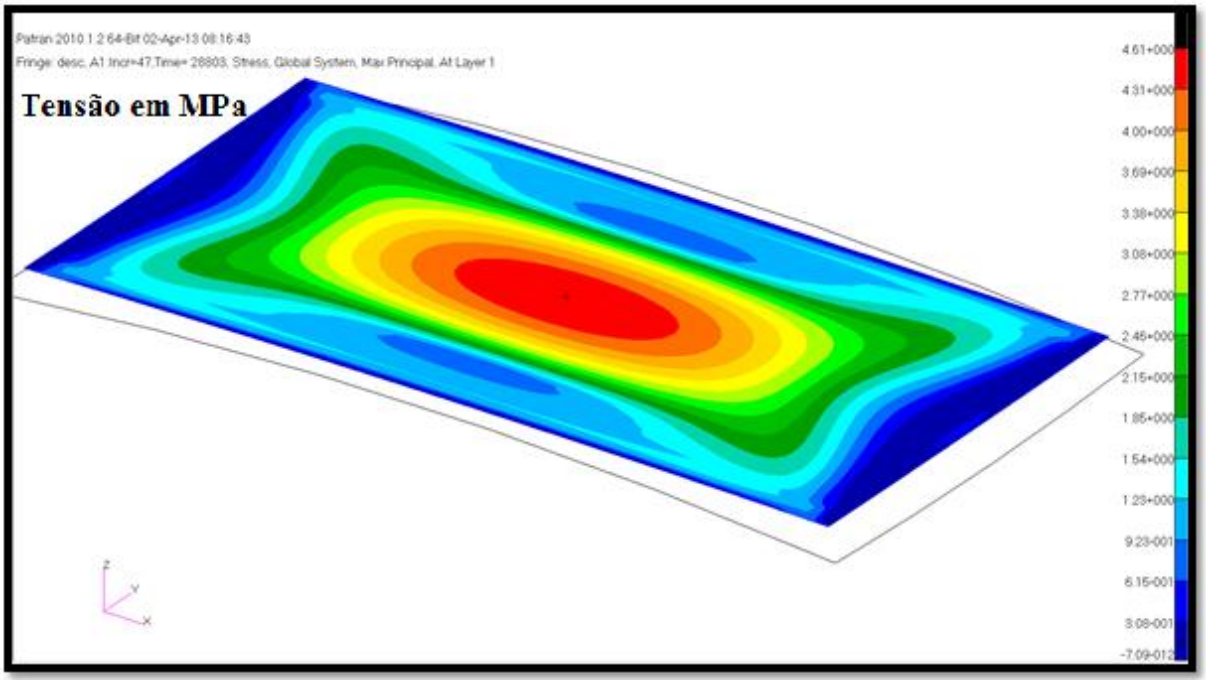

Figura 75 –Tensão residual máxima principal- Dupla curvatura – Esp. de 5 mm.
Fonte: Autor, 2013.

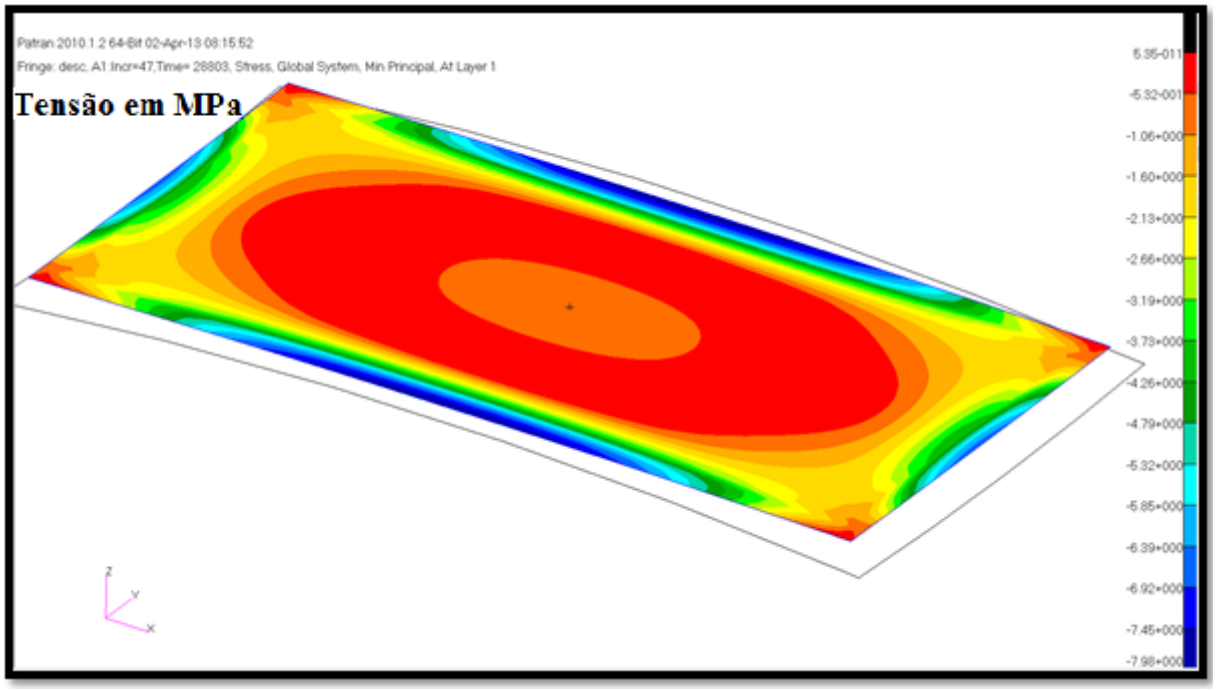

Figura 76 –Tensão residual mínima principal- Dupla curvatura – Esp. de 5 mm.
Fonte: Autor, 2013.

Também obteve-se um baixo nível de tensão residual gerado pelo processo CAF, variando entre 4,61 MPa e -7,98 MPa.

Por fim analisa-se a geometria de curvatura dupla com espessura de 12mm, onde as figuras 77 e 78 mostram respectivamente as tensões máxima e mínima principal em MPa.

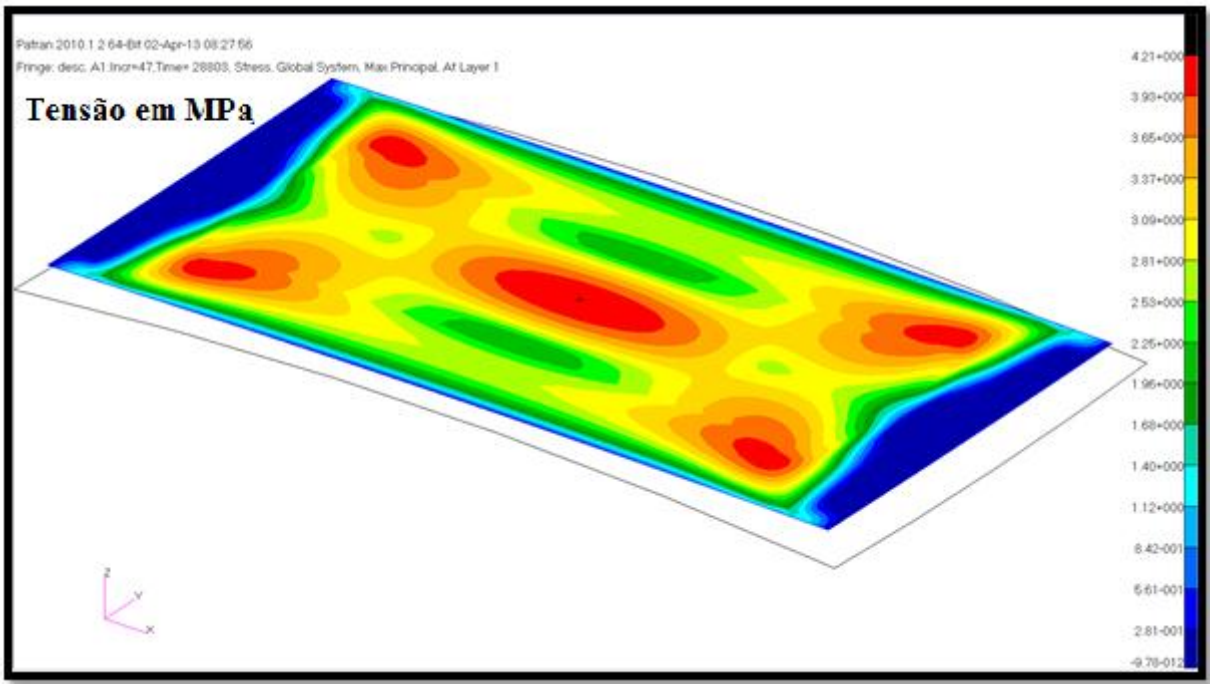

Figura 77 –Tensão residual máxima principal- Dupla curvatura – Esp. de 12 mm.
Fonte: Autor, 2013.

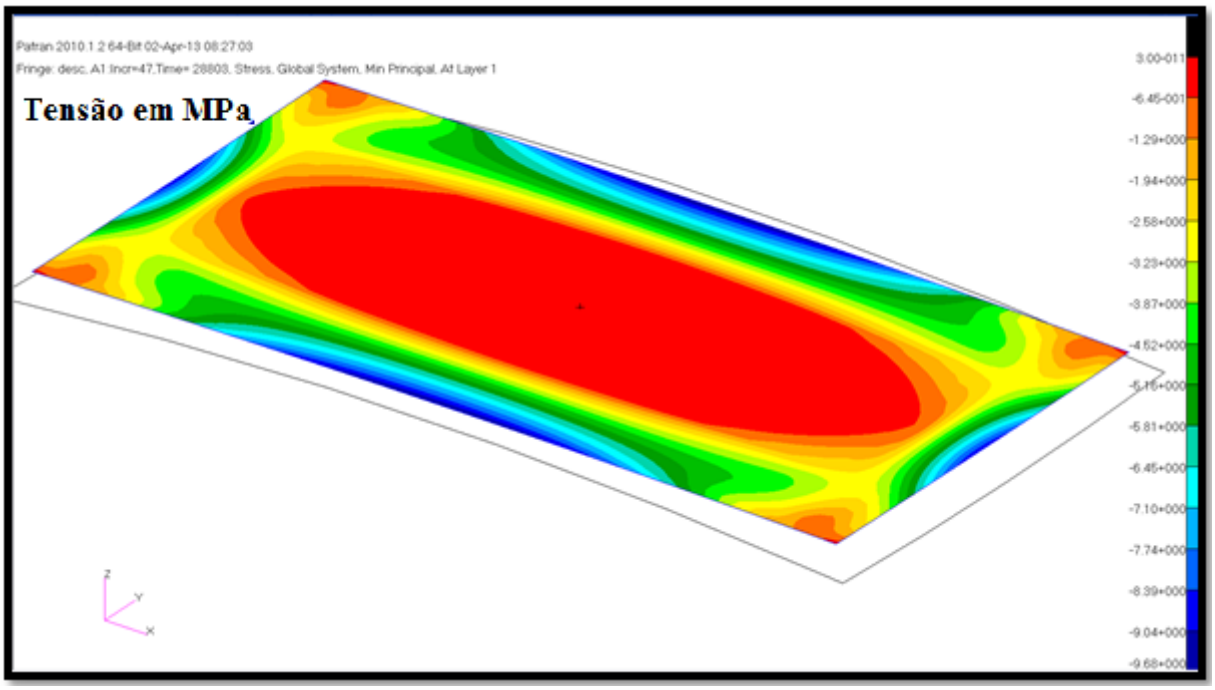

Figura 78 –Tensão residual mínima principal- Dupla curvatura – Esp. de 12 mm.
Fonte: Autor, 2013.

Novamente obteve-se um baixo nível de tensão residual gerado pelo processo CAF, variando entre 4,21 MPa e -9,68 MPa.

Para uma melhor visualização, os resultados de tensões residuais máximas e mínimas principais são exibidos na tabela 6

Tabela 6- Resultados de tensão residual.

Tensão residual - Simulação			
Geometria	Espessura (mm)	Tensão máxima principal - σ1 (MPa)	Tensão mínima principal - σ2 (MPa)
Curvatura simples	5	1,37	-5,61
Curvatura dupla	5	4,61	-7,98
Curvatura dupla	12	4,21	-9,68

Fonte: Autor, 2013.

Notou-se que modelo gera um baixo nível de tensão residual, chegando a ser desprezível, o que gera benefícios nas geometrias tanto no aumento de sua vida útil quanto na sua qualidade dimensional final.

Entretanto estes valores servem apenas como base qualitativa, pois como dito anteriormente o software de elementos finitos não leva em conta tensões residuais já existentes no material devido a processos anteriores, logo analisar estas tensões apenas pelo software pode gerar erros.

Como contribuição do presente trabalho foi realizada a análise experimental da tensão residual de uma geometria já conformada por CAF. As tensões residuais foram analisadas por duas técnicas: furo cego incremental e alívio total de tensões. Na análise de tensão residual pelo furo cego foram realizados 3 ensaios na mesma geometria e também utiliza-se das tensões principais para os resultados devido possibilitarem a análise do sentido da tensão residual (compressão ou tração).

A figura 79 mostra a evolução da tensão principal máxima em função da profundidade da geometria, onde nota-se que o método apresentou repetibilidade e um baixo nível de tensão residual chegando a serem tensões compressivas abaixo da superfície, o que é um ponto forte, pois há principalmente o aumento da vida útil do componente.

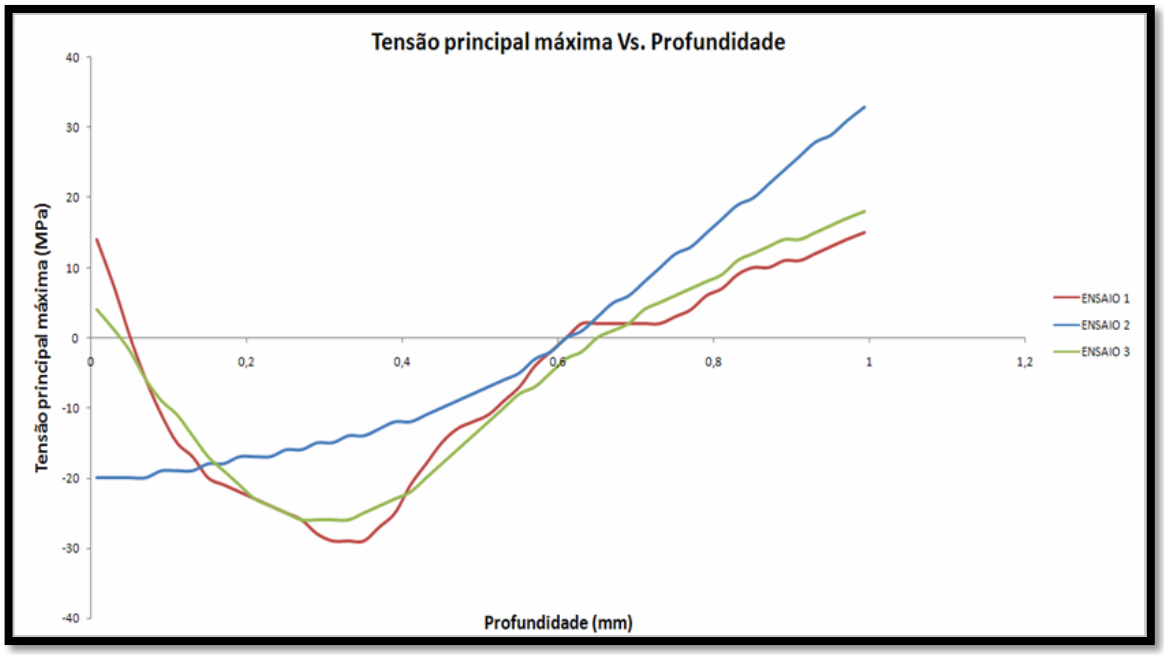

Figura 79 – Gráfico da tensão principal máxima em função da profundidade.
Fonte: Autor, 2013.

Na figura 80 mostra-se a tensão principal mínima em função da profundidade. Novamente nota-se repetibilidade do ensaio e também nota-se um baixo nível de tensão.

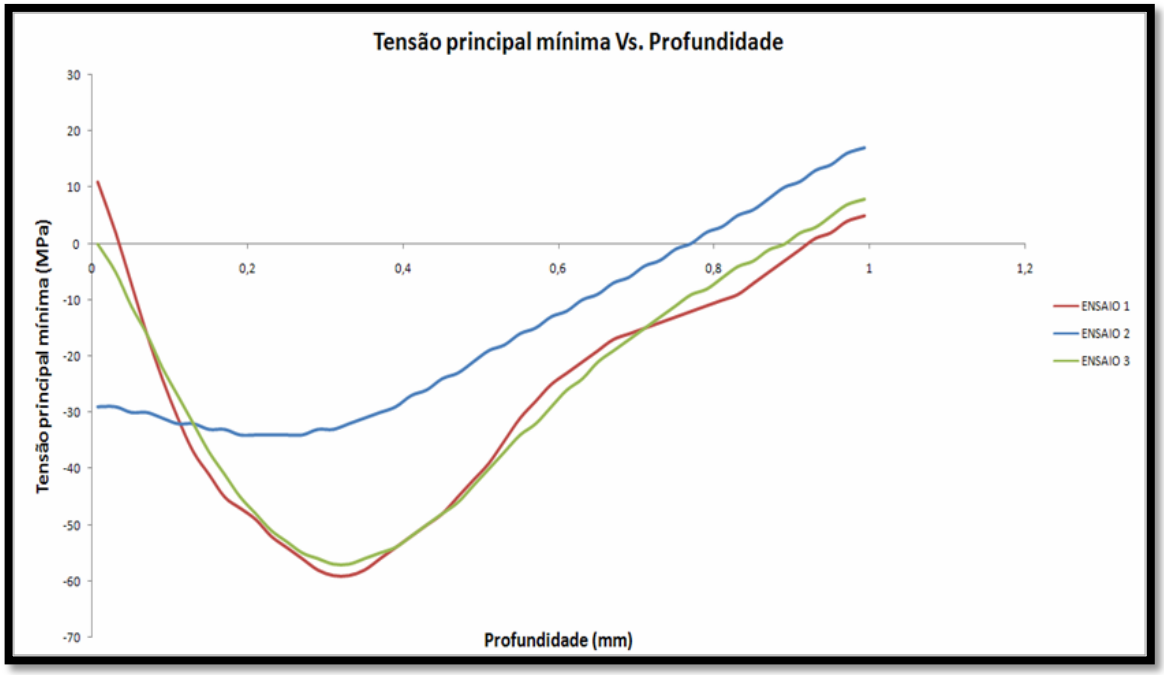

Figura 80 – Gráfico da tensão principal mínima em função da profundidade.
Fonte: Autor, 2013.

A segunda técnica utilizada para a medida de tensão residual foi a técnica do alívio total de tensões e por ser uma técnica destrutiva, realizou-se apenas um ensaio. Para descartar o erro que pudesse ocorrer pela colagem do extensômetro elétrico, realizou-se o ensaio com 3 rosetas coladas na peça. Nesta técnica também se utiliza das tensões principais para a análise dos resultados. A figura 81 mostra a geometria após o corte de alivio total e a tabela 7 mostra os resultados obtidos.

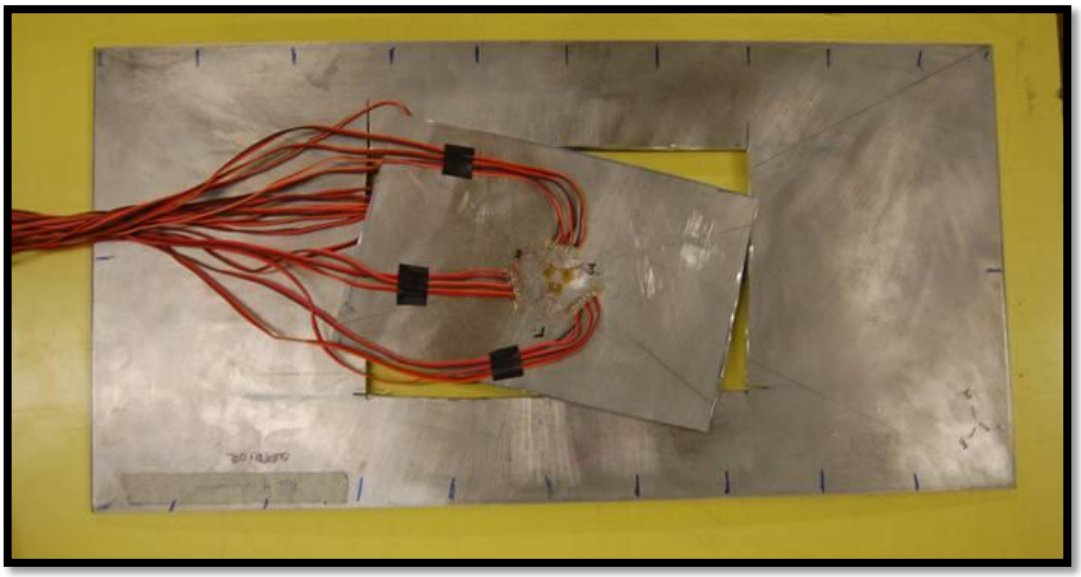

Figura 81 – Elemento retirado após o ensaio de alívio total de tensão.
Fonte: Autor, 2013.

Tabela 7- Resultados de tensões residuais.

	Tensão principal máxima MPa	Tensão principal mínima MPa
Roseta 1	0,71	-13,13
Roseta 2	1,49	-12,39
Roseta 3	9,36	-2,72

Fonte: Autor, 2013.

Novamente nota-se um baixo nível de tensão residual. Houve também uma boa repetição da metodologia quando comparado os resultados da roseta 1 com a roseta 2. A discrepância do valor obtido pela roseta 3 pode ser devido a algum problema relacionado com o extensômetro elétrico utilizado.

5 CONCLUSÕES

Atualmente o modelo unificado é o mais adotado para a simulação do processo de CAF. Este modelo é extremamente complexo, apresenta alguns erros e em todas as literaturas onde tal modelo é utilizado não há resultados experimentais. Com isso propôs-se o modelo simplificado, obtido por experimentos e que atendeu de maneira significativa o processo.

Em vista dos resultados obtidos pode-se concluir que:

a) A construção do forno foi essencial para a boa qualidade dos resultados obtidos. Com este obteve-se um rápido aquecimento do corpo de prova e também uma boa distribuição da temperatura. A mesma conclusão foi observada pela construção do extensômetro capaz de trabalhar com confiança acima da temperatura ambiente e com isso tem-se boa leitura das medidas de deformação necessárias para se obter o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento, ambos a quente.

b) Os resultados de caracterização mecânica aproximam-se dos apresentados na literatura, onde para o módulo de elasticidade a quente há uma queda de 12,5% em relação à temperatura ambiente. Simular o processo CAF com o módulo na temperatura ambiente provocaria erro quanto ao nível de tensão aplicado e consequentemente afetaria na deformação por fluência e retorno elástico. Já o limite de escoamento há um aumento do seu valor em função do tempo de envelhecimento, seguido de um decréscimo até que haja o superenvelhecimento da liga.

c) Outro ponto importante observado é que o ensaio de fluência convencional não serve para caracterizar o processo de CAF, uma vez que não descreve com clareza o estágio primário da fluência, condição necessária para o uso do modelo unificado. Entretanto, com tais ensaios foi possível determinar o tempo de transição entre o estágio secundário e terciário.

d) Com os resultados de limite de escoamento e deformação por fluência foi possível determinar o período de processo CAF. Este foi definido em 8 horas (Figura 60) e com isso atingem-se todas as premissas necessárias para que ocorra o processo de CAF.

e) Quanto ao modelo computacional, já se tem a metodologia correta para simular o processo CAF através do modelo simplificado. Este modelo simplificado foi obtido por ensaios experimentais de CAF em matrizes e apresentou bons

resultados para níveis altos de tensão. Uma melhor qualidade na preparação dos corpos de prova para níveis baixos de tensão melhoraria os resultados obtidos. Com o modelo simplificado obtido até o presente momento foi possível simular as geometrias propostas.

f) Os valores de retorno elástico estão próximos a encontrados por simulação computacional em algumas literaturas, uma vez que em nenhuma delas mostrou-se resultados experimentais. O resultado de retorno elástico pode ser minimizado aumentando o tempo de conformação. Para isso é necessário saber qual é a tensão limite de escoamento final desejada para o componente, sendo assim possível redimensionar o período de conformação.

g) Observou-se que a simulação do processo CAF identifica um baixo nível de tensões residuais ao final do processo, o que gera um benefício nas geometrias tanto no aumento de sua vida útil quanto na qualidade dimensional da peça final. Entretanto estes valores servem apenas como base qualitativa, pois como dito anteriormente o software de elementos finitos não leva em conta tensões residuais já existentes devido a processos anteriores. Esses baixos níveis de tensões residuais foram comprovados adicionalmente por experimentos de furo cego e alívio total de tensões.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com os resultados obtidos no presente trabalho, propõe-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

a) Estabelecer uma metodologia para ensaios de fluência, uma vez que ensaios convencionais não servem para caracterizar o processo CAF. Propõe-se ensaios com aquisição por vídeo extensômetria, conseguindo assim descrever claramente os estágios primário e secundário de fluência.
b) Realização de ensaios experimentais de CAF para as geometrias propostas a fim de confrontar os resultados obtidos na simulação com resultados experimentais.
c) Estudo para verificar a viabilidade do uso de um novo modelo já acoplado ao software MSC Marc versão 2011, chamado de Modelo de Anand que é muito semelhante ao modelo unificado, porém, por ser acoplado ao software, não faz necessário o uso de sub-rotinas.

REFERÊNCIAS

AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION 2772 E: **Heat Treatment of Aluminum Alloy Raw Materials**. EUA, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – **Dados de fevereiro confirmam crescimento do mercado aéreo**. Disponível em: < http://www.anac.gov.br/Noticia.as px?ttCD_CHAVE=140&slCD_ORIGEM=0>. Acesso em: 18/01/2013.

AIRLINES – **Gulfstream Aerospace G-IV**. Disponível em: < http://www.airliners.net /aircraft-data/stats.main?id=238>. Acesso em: 05/06/2012.

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

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Heat Treating**, v.4, EUA: ASM International, 1991 (ASM Handbook).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E-21: **Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials**, Philadelphia, EUA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E-139: **Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials**, Philadelphia, EUA, 2011.

ASHBY, M., F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 2. ed., Massachusetts: EUA, 1999.

BAKAVOS, D.; PRANGNELL, P. B.; DIF, R.. **A Comparison of the Effects of Ageforming on the Precipitation Behaviour in 2xxx, 6xxx and 7xxx Aerospace Alloys.** Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, Australasia, v.28, 2004.

CADINFO – Disponível em:< http://ciaux.dbm.com.au/editorial/A380-3.htm>. Acesso em: 05/06/2012

EBERL, F. et al. **Ageformable Panels for Commercial Aircraft**. International Congress of the Aeronautical Sciences, 25th, Hamburg, 2006.

FERNANDES, F. C. F.; FILHO, M. G. **Manufatura enxuta**: Uma revisão que classifica e analisa os trabalhos apontando perspectivas de pesquisas futuras, v.11, p. 1-19, São Carlos, 2004.

FINDLEY, W. N., LAI, J. S., ONARAM, K. **Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials**. New York: Dover Publications, 1976.

FRIBOURG, G.. **Couplages entre précipitation et plasticité dans un alliage d'aluminium 7xxx**:application à des traitements thermomécaniques de reduction des distorsions dans des composants aéronautiques. 2009. Tese de doutorado, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble.

HOLMAN, M. C., **Autoclave age forming large aluminum aircraft panels**. **Journal of Mechanical Work Technology**. p. 477-488, 1989.

JAMBU, S. et al. **Creep forming of AlMgSc alloys for aeronautic and space applications**. **International Congress of the Aeronautical Sciences**, Toronto, p. 632.1-632.7, 2002.

JEUNECHAMPS, P. et al. **A closed form technique to predict springback in creep age forming. International Journal of Mechanical Sciences**, v.48, p. 621-629, jan. 2006.

KANDARE, E. et al. **Creep-based life prediction modelling of aluminium in fire. Materials Science and Engineering A**, p. 1185 – 1193, out. 2009.

KOEHLER W.; PLEGE B.; SAHM K. F**. Metal Forming: Specialized Procedures for the Aircraft Industry**. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, p. 5427-543, 2008.

LIN J., DEAN T.A., HO, K.C. **Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets**. **International Journal of Plasticity**, v.20, p. 733-751, 2004.

MACKENZIE, D. S.; TOTTEN, G. E. **Handbook of Aluminum**, v.1 Physical Metallurgy and Processes, New York, 2003.

MARTINS, M. M. M., **Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082.** Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008..

MSC.Marc User Documentation: Copyright © 2007 MSC.Software Corporation.

PASSOS, Alfredo. **Inteligência Competitiva Empresas Aéreas (1):** Em 2013, companhias vão manter oferta justa e aumentar preço. Disponível em: <http://alfredopassos .wordpress.com/2012/12/26/inteligencia-competitiva-empresas-aereas-1-em-2013-companhias-vao-manter-oferta-justa-e-aumentar-preco/>. Acesso em:18/01/2013.

REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. **Physical metallurgy principles.** 3ed. Boston, 1994.
HATCH, J. E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. Ohio, 1984.

RIBEIRO, F. et al. **Conformação por fluência com envelhecimento: Fundamentos e aplicações em conformações cilíndricas**. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Rio Grande do Sul, abr. 2011.

RIBEIRO, F. et al. **Modelagem da conformação por fluência com envelhecimento – *Creep Age Forming*. 30ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas**, Rio Grande do Sul, out. 2010.

RIBEIRO, F. **Modelagem experimental e numérica do processo de conformação de painéis aeronáuticos pelo processo de conformação por fluência com envelhecimento (*Creep Age Forming*).** Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SANTOS, N. B. **Avaliação de um critério de equivalência entre dados de tração a quente e fluência em aços**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

SANTOS, R. G. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas, 2006.

STOUFFER, D. C.; DAME, T. **Inelastic deformation of metals**. New York. Joh Wiley & Sons, 1996.

SOARES, M., R., N. **Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio**. Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

TANG, C. S.; ZIMMERMAN J. D**. Managing New Product Development and Supply Chain Risks: The Boeing 787 Case.** Disponível em <http://aquadoc.typepad.com/ files/boeing-787-case.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2013.

THE ALUMINIUM ASSOCIATION. Disponível em:< http://www.aluminum.org>. Acesso em 06 mai. 2013.

THE ENGINEERING TOOLBOX. **Young Modulus od Elasticity for Metals and Alloys**. Disponível em:<http:// http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html> . Acesso em: 26 mar. 2013.

WATCHAM, K. **Airbus A380 takes creep age-forming to new heights**. Materials World 12 , p. 10-11, 2004.

WEINER, W. **Simulação do processo de conformação por fluência e envelhecimento aplicado a chapas de alumínio curvas com e sem reforço longitudinal.** Dissertação de mestrado, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.

WILLIAMS, J. C.; STARKE, E. A.; **Progress in structural materials for aerospace systems, Acta Materialia**, v.51, p. 5775-5799, ago 2003.

APÊNDICE A

Neste apêndice são mostrados os resultados obtidos pela simulação do processo CAF na matriz, bem como o cálculo do retorno elástico para um nível de tensão. Como dito anteriormente, devido a simplicidade do modelo de CAF, a simulação foi realizada com elementos de casca.

Inicia-se os resultados pela tensão inicial aplicada para comprovar que a mesma não atinge o limite de escoamento, como mostra a figura 82. A tensão analisada é a de von Mises.

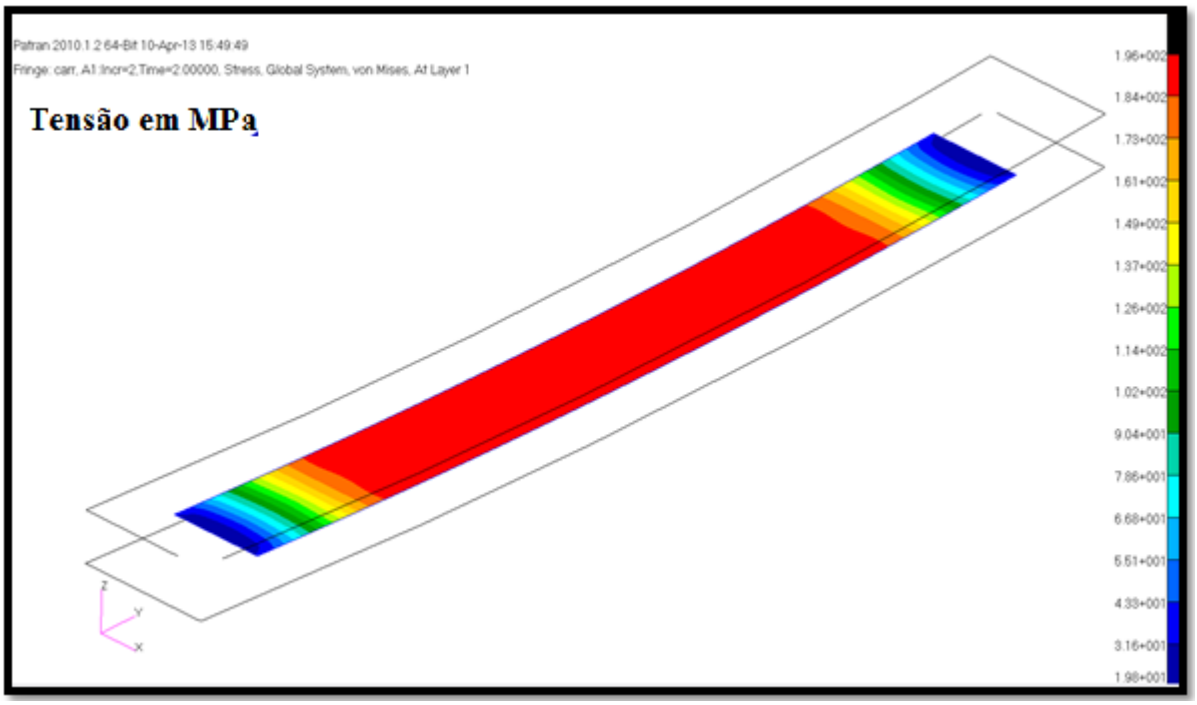

Figura 82 – Resultado de tensão inicial de von Mises.
Fonte: Autor, 2013.

Nota-se na figura 82 que a tensão inicial é de 196 MPa e comprova-se que a mesma está abaixo do limite de escoamento.

Por fim, analisaram-se os deslocamentos iniciais e finais na direção normal à conformação (direção z) para obter as flechas iniciais e finais. As figuras 83 e 84 exibem os resultados de deslocamento em milímetros.

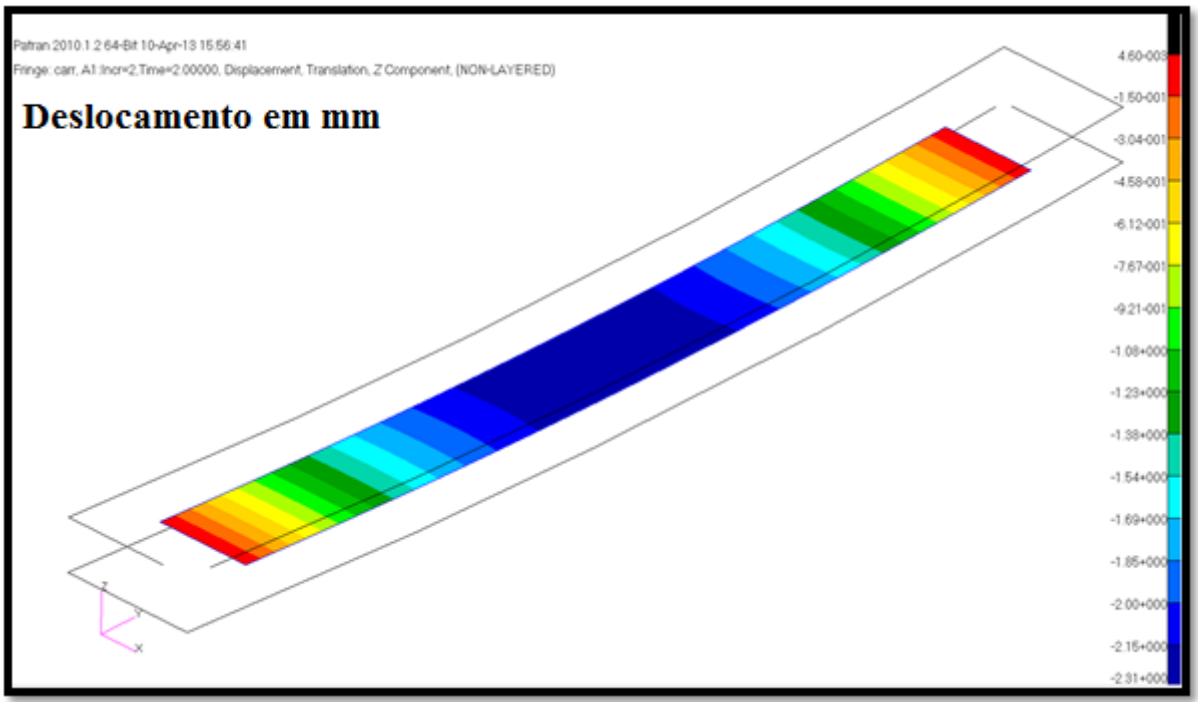

Figura 83 – Resultado de deslocamentos iniciais na direção z.
Fonte: Autor, 2013.

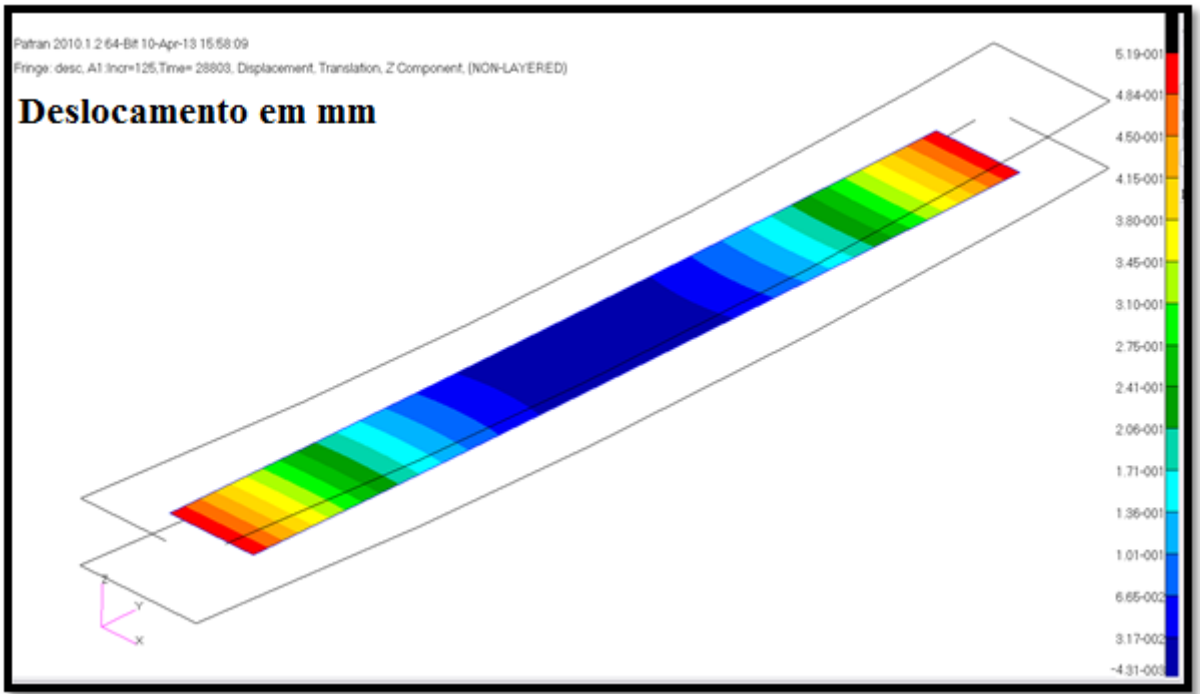

Figura 84 – Resultado de deslocamentos finais na direção z.
Fonte: Autor, 2013.

As flechas são calculadas pela diferença entre os deslocamentos da ponta e do centro do corpo de prova. Com isso, tem-se:

Flecha inicial = 0,00460 – (-2,31) = 2,3054

Flecha final = 0,00431 – (-0,519) = 0,52331

A partir dos valores de flechas foi possível o cálculo do retorno elástico seguindo a equação 13, onde:

$$\text{Retorno elástico} = \left(\frac{\text{flecha inicical} - \text{flecha final}}{\text{flecha inicial}}\right) * 100$$

$$\text{Retorno elástico} = \left(\frac{2{,}3054 - 0{,}52331}{2{,}3054}\right) * 100$$

$$\text{Retorno elástico} = 77{,}3\%$$