

**BRUNO TARÁBOLA SCARPIN**

**Modelagem numérica e experimental do processo de conformação por fluência  
com envelhecimento (*Creep Age Forming*)**

São Paulo  
(2013)

**BRUNO TARÁBOLA SCARPIN**

**Modelagem numérica e experimental do processo de conformação por fluência  
com envelhecimento (Creep Age Forming)**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha.

São Paulo  
(2013)

**BRUNO TARÁBOLA SCARPIN**

**Modelagem numérica e experimental do processo de conformação por fluência  
com envelhecimento (Creep Age Forming)**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico

Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha.

São Paulo  
(2013)

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Scarpin, Bruno Tarábola**

**Modelagem numérica e experimental do processo de conformação por fluência com envelhecimento (creep age forming) /  
B.T. Scarpin. -- São Paulo, 2013.**

**82 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1. Alumínio 2. Conformação mecânica 3. Fluência dos materiais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

SCARPIN, B.T. **Modelagem experimental e numérica do processo de conformação por fluência com envelhecimento (*Creep Age Forming*)**. São Paulo. 2013. 74 p. (Trabalho de Formatura) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

*Dedico este trabalho de formatura aos  
meus pais, Fernando Scarpin Neto e  
Rosemary Tarábola Scarpin.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a toda a minha família pelo apoio incondicional durante todo o meu período de aprendizagem. Ele foi fundamental para lidar com as dificuldades encontradas durante meu trajeto na Escola Politécnica.

Agradeço a orientação do Prof. Gilmar Ferreira Batalha pelas oportunidades que me concedeu e que me motivaram durante a realização deste trabalho.

À Embraer por ter colaborado ativamente, tanto no lado financeiro quanto com a realização de experimentos e orientação.

Aos colegas do laboratório LEFA da EPUSP que me ajudaram direta ou indiretamente duramente o período de pesquisa para a realização deste trabalho.

"O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário"  
(Albert Einstein)

## RESUMO

Conformação por fluência com envelhecimento (*Creep Age Forming - CAF*) é um processo de conformação baseado em fenômenos de fluência e relaxação ocorrendo conjuntamente com o envelhecimento artificial de uma liga metálica (liga de alumínio). As pesquisas no assunto tem se intensificado na última década e as aplicações estão cada vez mais extensas, mas ainda existem muitos problemas em aberto para que a técnica seja mais bem aplicada. O Projeto de Formatura é composto de duas etapas. Na primeira, são usadas técnicas de otimização heurísticas para o tratamento de dados de ensaios de fluência e obtenção de um modelo para a aplicação em programas de elementos finitos. A segunda etapa consiste no projeto de um dispositivo que simule, em menor escala, o ferramental usado para conformação de peças reais e usá-lo para conformar pequenas peças em ambiente com temperatura controlada. Foram feitos experimentos com uma liga de alumínio aeronáutico da série 7XXX a 193°C, por 9 horas. Os resultados são comparados com simulações pelo método dos elementos finitos, geradas na etapa anterior. Tanto a primeira quanto a segunda etapa do trabalho são baseadas em peças com curvatura simples, ou seja, em apenas um eixo.

**Palavras-chave:** alumínio, fluência, conformação, envelhecimento, retorno elástico

## ABSTRACT

Creep age forming (CAF) is a new forming method based on creep and relaxation phenomena that occur in conjunction with artificial aging of the metallic alloy (ex. aluminum alloy). The research on the subject has intensified in the last decade and applications are increasingly extensive, but there are still many open issues to be solved for the technique to be best applied. The Undergraduating Project is composed of two steps. The first one uses heuristic optimization techniques for the treatment of creep tests data and obtain a model for use in finite element programs. The second step consists in designing a device that simulates, to lesser dimensions, the tools used for shaping real pieces and use it to shape small parts in a controlled temperature environment. Experiments with a aeronautic aluminum alloy from 7XXX series at 193°C, for 9 hours were made. They were compared to simulations using finite elements method generated in the previous step. Both the first and the second phases of the project were based on parts with a single curve, i.e. in only one axis.

**Keywords:** aluminum, creep, forming, aging, springback

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas da conformação por CAF (Adaptada de Eberl, 2006).

Figura 2. Airbus A380, maior avião comercial do mundo, e um painel de sua asa conformado por Creep Age Forming (Watcham, 2004).

Figura 3. Formato de uma curva típica de fluência em que é mostrada a deformação e a taxa de deformação correspondente (Adaptada de Spigarelli)

Figura 4. Formato típico de curvas de relaxação. Quanto maior a temperatura, mais rápido é o decaimento da tensão.

Figura 5. Micrografias eletrônicas de transmissão da amostra AA7050-TAF

Figura 6. Equações constitutivas com constantes de dano: representam melhor o segundo e terceiro estágios de fluência (Li, 2002).

Figura 7. Equações constitutivas que representam melhor o primeiro e segundo estágios de fluência (Ho, 2004).

Figura 8. Gráfico da Função Objetivo em função da constante A (Lin, 2002).

Figura 9. Variação da Função Objetivo em relação à constante A de acordo com o modelo de Ho (2004).

Figura 10. Exemplo de curva de deformação por tempo gerada pelas equações propostas, mostrando a sua capacidade de modelar o comportamento de fluência.

Figura 11. Evolução da variável de estado (back stress) com o tempo.

Figura 12. Esquema que resume a ideia básica de solução por mutações usada pelos Algoritmos Evolutivos.

Figura 13. Comparação entre curvas previstas (linhas sólidas) e experimentais (triângulos) na liga AA7010 a 150°C (Lin, 2004).

Figura 14. Comparação entre quatro curvas previstas (linha azul) e experimentais (linha verde) na liga AA7010 a 150°C usando as equações 13 e 14.

Figura 15. Comparação entre três curvas previstas (linha azul) e experimentais (linha verde) na liga AA7010 a 150°C

Figura 16. Esquema demonstrando a definição de retorno elástico em peças com curvatura simples.

Figura 17. Modelo inicial em FEM sob carregamento.

Figura 18. Rascunho do novo modelo proposto para simulação em FEA.

Figura 19. Desenho da montagem completa em ABAQUS.

Figura 20. Superfícies definidas para entrarem em contato.

Figura 21. Janela para criação de uma propriedade de contato com coeficiente de atrito de 0,3.

Figura 22. Interação entre duas superfícies (Manual do ABAQUS).

Figura 23. Opções usadas para estabelecer contato.

Figura 24. Condições de contorno aplicadas ao modelo.

Figura 25. Detalhe de uma parte do blank com a malha especificada.

Figura 26. Estado de tensões logo após a deformação.

Figura 27. Estado de tensões depois do período de relaxação das tensões.

Figura 28. Estado de tensões depois de voltar o punção para a posição original.

Figura 29. Evolução do deslocamento do canto inferior direito do modelo.

Figura 30. Proposta de ferramenta experimental para conformação CAF (Lin, 2007).

Figura 31. Ferramenta iraniana para conformação por CAF (Jeshvaghani, 2012).

Figura 32. Estrutura de reforçadores (ribs) para construção de ferramentais complexos (US8303729, 2012).

Figura 33 - Modelos de ferramentas para ensaio de curvatura simples em CAF (Yang, 2013)

Figura 34. Primeira iteração do desenho da ferramenta.

Figura 35. Vista isométrica da ferramenta para simulação experimental de CAF.

Figura 36. Vista frontal da ferramenta para simulação experimental de CAF. Em destaque, a região que é simulada no ABAQUS e usada para comparação.

Figura 37. Passos para realização do ensaio de CAF.

Figura 38. A) Barra quadrada de aço baixo carbono. B) Anéis de aço inox. C) Material para corpo de provas em alumínio aeronáutico. D) Punções usinados em aço inox.

Figura 39. Fresamento dos corpos de prova para diminuição de espessura.

Figura 40. Mecanismo de simulação experimental de CAF.

Figura 41. Modelo de viga bi-apoiada para cálculo de esforços.

Figura 42. Forno usado para impor temperatura controlada ao experimento.

Figura 43. Posição do mecanismo dentro do forno e termopar em contato direto com o corpo de provas.

Figura 44. Corpo de provas após experimento de CAF.

Figura 45. Regiões para medida de altura após o ensaio.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	MODELAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO SOB CONDIÇÕES DE FLUÊNCIA .....	16
3.	O PROBLEMA DAS CONSTANTES DE FLUÊNCIA .....	23
3.1.	Algoritmos evolutivos de otimização.....	28
3.2.	Resultados preliminares .....	31
4.	MODELAGEM NUMÉRICA DE UMA PEÇA COM CURVATURA SIMPLES.....	33
4.1.	Introdução ao <i>software</i> de Elementos Finitos .....	34
4.2.	Desenho da peça e da ferramenta .....	36
4.3.	Material .....	37
4.4.	<i>Steps</i> .....	39
4.5.	Contato entre a peça e a ferramenta .....	39
4.6.	Condições de Contorno .....	44
4.7.	Malha.....	44
4.8.	Resultados .....	46
5.	PROJETO DE FERRAMENTA COM CURVATURA SIMPLES PARA CONFORMAÇÃO EXPERIMENTAL .....	48
6.1.	Materiais e métodos para a fabricação do protótipo .....	55
6.2.	Análise de Esforços Mecânicos no ferramental CAF .....	58
6.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	60
6.1.	Medida de retorno elástico no corpo de provas.....	62
7.	CONCLUSÕES .....	64
8.	REFERÊNCIAS .....	66
9.	APÊNDICE A - Código do Algoritmo Genético em MATLAB .....	68
10.	APÊNDICE B - Função Objetivo em MATLAB .....	72
11.	APÊNDICE C - Subrotina em Fortran para implementação do modelo de fluência .....	73
12.	APÊNDICE D - Desenhos de fabricação para ferramental.....	75

## 1. INTRODUÇÃO

Conformação por fluência com envelhecimento, mais conhecido como Creep Age Forming (CAF), é um novo método de conformação baseado em fenômenos de fluência e relaxação que ocorrem conjuntamente com o envelhecimento artificial do metal em uma autoclave. Foi desenvolvido para manufatura de painéis em ligas de alumínio tratáveis termicamente, particularmente painéis aeronáuticos, que requerem grande precisão e possibilidade de fabricação de peças com curvaturas complexas. Diferente de outros métodos de fabricação, como jateamento com granalha (shot-peening), estiramento, estampagem e trefilação, componentes feitos por CAF exigem menores tensões para a conformação e possuem menores tensões residuais, que por um lado diminuem a chance de ruptura e instabilidade plástica durante a fabricação e por outro aumentam a resistência à fadiga e à corrosão da peça final. A Fig. 1 ilustra o processo realizado em autoclave.



Figura 1. Etapas da conformação por CAF (Adaptada de Eberl, 2006).

As pesquisas no assunto tem se intensificado na ultima década e as aplicações estão cada vez mais extensas (Fig. 2), mas ainda existem muitos problemas em aberto para que a técnica seja melhor aplicada. Um dos principais é prever com precisão o retorno elástico (springback) da peça conformada. Para isso é necessário estabelecer um modelo de equações constitutivas adequadas que acoplem as propriedades tanto macroscópicas quanto microestruturais do material. Até o momento, a interação entre os fenômenos de fluência/relaxação e precipitação (envelhecimento) não foi totalmente compreendida.



Figura 2. Airbus A380, maior avião comercial do mundo, e um painel de sua asa conformado por Creep Age Forming (Watcham, 2004).

Deve-se considerar que este é um nicho tecnológico em desenvolvimento e com grande importância competitiva entre as grandes empresas de produtos aeronáuticos, logo, o estado da arte neste assunto está nos laboratórios dessas companhias, já que muito do que se desenvolve não é divulgado. No entanto, podemos destacar alguns trabalhos mais recentes com propostas que se aproximam deste Trabalho de Formatura.

Um grupo de pesquisa iraniano (Jeshvaghani, 2012) inovou ao usar peças conformadas em laboratório, em condições multiaxiais de tensão, para o estudo da evolução das propriedades microestruturais da liga. Até então, estas propriedades eram retiradas de corpos de provas de ensaios uniaxiais. Engenheiros e pesquisadores da EMBRAER (2010) também usaram um pequeno ferramental para conformar uma peça

(de geometria complexa, inclusive). Porém, o foco neste caso foi a tentativa de prever o retorno elástico por meios analíticos.

O trabalho que mais se aproxima da proposta desta monografia foi feito por Lin (2007). Nele, uma peça de curvatura simples é conformada em condições de laboratório e comparada com simulações feitas em elementos finitos.

Por fim, a patente US8303729 (2012) mostra que são grandes os esforços dentro das empresas (Airbus, no caso) para aprimorar a parte operacional do processo. O documento mostra complexos mecanismos de ferramentas com geometria variável para aplicação em Creep Age Forming.

## 2. MODELAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO SOB CONDIÇÕES DE FLUÊNCIA

Os mecanismos de fluência ocorrem em metais quando a carga é aplicada a uma temperatura relativamente elevada , tipicamente 40% a 70% do ponto de fusão. Sob esta condição, o material inicialmente sofre uma deformação elástica reversível, que é independente do tempo . Normalmente não ocorre deformação plástica já que as cargas são abaixo do limite de escoamento do material a essa temperatura. Este tipo de deformação, nesta fase, deve ser evitada pois pode levar à microfissuras e/ou instabilidades, resultando em pontos de concentração de tensões, que diminuem o desempenho em relação à fadiga e propagação de trincas na peça que será solicitada em sua aplicação real.

A deformação elástica inicial é seguida por uma deformação plástica permanente, que é dependente do tempo. O mecanismo de fluência envolve a difusão de átomos, movimento de discordâncias e deslizamento nos contornos de grão. Ele é dividido em três etapas bem definidas (primário, secundário e terciário ), facilmente observadas em ensaios de fluência uniaxiais. Para estes testes , as condições de carga e temperatura são escolhidos e a deformação do material é registrada como uma função do tempo. Um gráfico típico de ensaio de fluência é visto na Fig. 3. Normalmente , vários casos são necessárias para caracterizar o desempenho do material em fluência. Existem alguns modelos para os mecanismos de fluência desenvolvidos por Coble (1963) e Nabarro - Herring (1948 e 1950), entre outros modelos.

À medida em que o processo de CAF ocorre, tempo e temperatura são relativamente baixos (determinado pela condição de endurecimento por precipitação, ou seja pelo tratamento térmico) e, consequentemente, os mecanismos de fluência estão confinados nos estágios primários e secundários. A fase secundária é também conhecida como fase estacionária, e é caracterizada pela menor taxa de deformação alcançada durante todo o processo. Deslizamentos no contorno de grão raramente ocorre durante CAF , já que é típico da fase terciária. O material não chega a alcançar esta fase no

processo, porque nela há o surgimento de pequenos danos (como poros), que são indesejáveis.

Curvas de relaxamento também são frequentemente utilizadas, como vistas na Fig. 4. Em tais curvas é possível verificar como as cargas no material estão relaxando (decaindo) devido ao fenômeno de fluênciia. Neste tipo de ensaio, o material é submetido a uma deformação constante, enquanto a sua tensão é aquisitada em função do tempo.

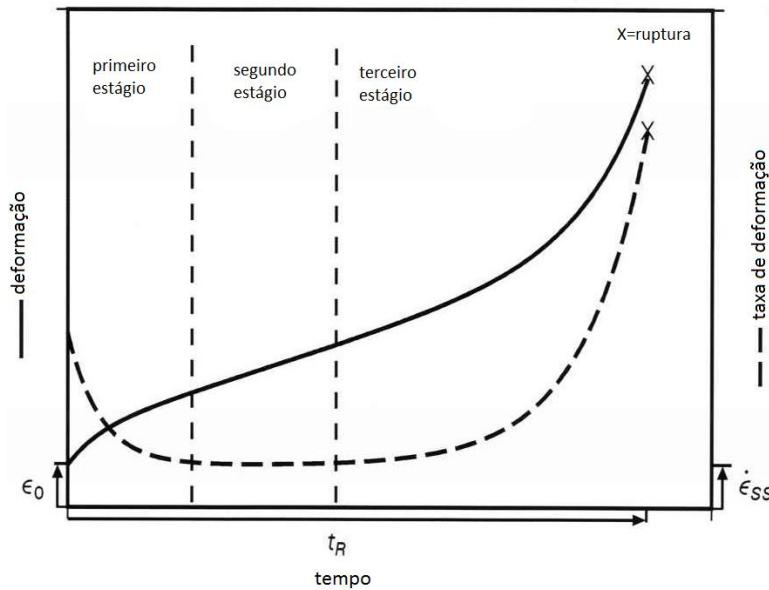


Figura 3. Formato de uma curva típica de fluênciia em que é mostrada a deformação e a taxa de deformação correspondente (Adaptada de Spigarelli)

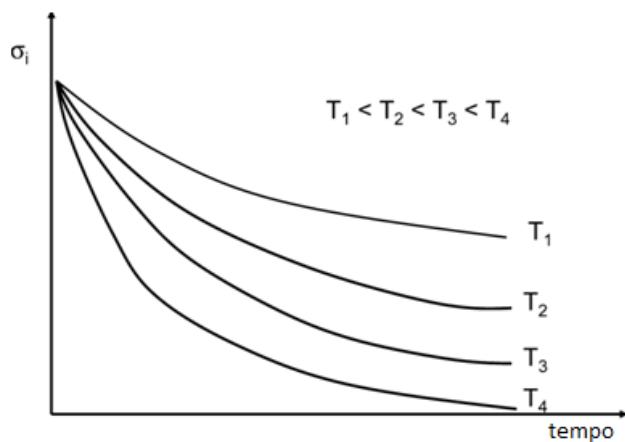


Figura 4. Formato típico de curvas de relaxamento. Quanto maior a temperatura, mais rápido é o decaimento da tensão.

Algumas pesquisas têm sido realizadas para investigar e estabelecer novas equações constitutivas de ligas leves sob condições CAF. Todos eles são baseados em modelos uniaxial. A maioria dos modelos de tensão uniaxial fluência são escritos como uma função da tensão constante, a temperatura constante e o tempo total, como se mostra na Eq. (1).

$$\epsilon^c = f(\sigma, t, T) \quad (1)$$

Sallah (1991), por exemplo, usou uma equação constitutiva inelástica convencional para simulação de conformação com envelhecimento em autoclave, na qual foram utilizados dois modelos de relaxamento (modelo de Maxwell linear e Walker/Wilson) para a previsão de curvas de relaxamento de tensão em condições CAF. Os dados experimentais obtidos a partir da Textron Aerostructures em vigas foram utilizados para validar o modelo. Guines (2008) utilizou um modelo tradicional de fluência (lei de potência) para prever a deformação plástica, os fenômenos de relaxamento de tensão, que ocorre durante a exposição térmica no CAF. Uma ferramenta com curvatura simples foi utilizada no processo de modelagem. A influência de diferentes condições de aperto mecânicos sobre o corpo de provas (para mantê-lo fixo à ferramenta) foram analisadas. Ambas as investigações consideraram apenas os efeitos convencionais de fluência e relaxação no CAF, enquanto efeitos dos mecanismos de endurecimento (como a precipitação dos elementos de liga) não foram modelados.

Ho (2004) utilizou um conjunto de equações constitutivas desenvolvido por Kowalewski (1994) para descrever a deformação plástica. Essas equações consideram nucleação de precipitado, crescimento e seus efeitos sobre a evolução da propriedade mecânica durante a deformação plástica em condições CAF. Estes foram chamados a partir de então de modelos unificados.

A modelagem unificada tenta descrever qualquer deformação inelástica por meio de um conjunto de equações de variáveis de estado e utilizando-se de taxas de variáveis envolvidas para modelar a evolução temporal dos fenômenos. Isto porque, de a-

cordo com o princípio da objetividade, equações constitutivas devem necessariamente ser indiferente à mudança de referência (tempo e espaço). Stouffer (1996) apresenta toda a teoria matemática para este tipo de equação constitutiva, conforme resumidamente explicado abaixo.

Esta abordagem pode ser caracterizada por uma equação cinemática , uma equação cinética e um conjunto de equações de evolução variável de estado :

- **Equação cinemática:** Descreve a deformação total, como uma soma de deformação elástica e uma integral da taxa de deformação inelástica. A deformação elástica vem das leis clássicas da elasticidade.

$$\varepsilon^{\text{total}} = \varepsilon^{\text{elástico}} + \int_0^t \dot{\varepsilon}^{\text{inelástico}} dt \quad (2)$$

- **Equação cinética:** Consiste na taxa de deformação inelástica em função de variáveis de estado e da tensão. matematicamente ,

$$\dot{\varepsilon}^{\text{inelástico}} = \dot{\varepsilon}^{\text{inelástico}}(\sigma, T, \mu_k, \dots) \quad (3)$$

- **Equações para as taxas das variáveis de estado:** As alterações no estado consistem nas características da microestrutura consideradas no modelo, dadas por variáveis de estado cuja evolução tem algum significado prático; matematicamente ,

$$\dot{\mu}_k = \dot{\mu}_k (\dot{\varepsilon}^{\text{inelástico}}, \sigma, T, \mu_i, \dots) \quad (4)$$

Esta estrutura fornece equações matemáticas que podem ser usadas para todos os fenômenos relevantes para o estudo da fluênciia em um único sistema de equações diferenciais, que descrevem as variáveis de estado do modelo. Para formular as equa-

ções cinéticas , pode ser usado funções de potência, exponencial, seno hiperbólico. Esta última se destaca por seu uso em modelos de fluênci com o envelhecimento, além de ser mais conhecida por modelar de maneira mais fiel as regiões com concentração de tensão.

No modelo unificado, o envelhecimento pode ser representado pelo raio dos precipitados como uma variável de estado. O *back stress*, ou *dislocation density*, tal como referido por Zhan (2011), que representa o equilíbrio entre o endurecimento e de recuperação, é uma outra variável de estado. O modelo mais simples de *back stress* é representado pela Eq. (5).

$$\dot{H} = f_1 \dot{\varepsilon}^I - g_1 H \left| \dot{\varepsilon}^I \right| \quad (5)$$

Onde  $f_1$  e  $g_1$  são constantes.

O primeiro termo simula o crescimento do *back stress*, ou endurecimento por deformação , e é proporcional à taxa de deformação plástica. O segundo termo simula a taxa de recuperação dinâmica e depende da taxa de deformação e do valor corrente da variável de estado. A recuperação dinâmica ocorre simultaneamente com a deformação. O módulo é aplicado para se obter o sinal correto do termo da recuperação (independente da tração ou compressão) .

No estágio estacionário, esta variável de estado está saturada, ou seja, os dois termos descritos se anulam e sua taxa de evolução vai a zero, como mostra a Eq. (6).

$$\dot{H} = 0 = f_1 \dot{\varepsilon}^I - g_1 H_m \left| \dot{\varepsilon}^I \right| \quad (6)$$

O valor máximo do *back stress*, neste caso, é dado por:

$$H_m = \frac{f_1}{g_1} \quad (7)$$

E a equação da evolução desta variável de estado pode ser descrita como:

$$\dot{H} = f_1 \left( 1 - \frac{H}{H_m} \right) \dot{\varepsilon}^I \quad (8)$$

O primeiro trabalho para considerar as alterações metalúrgicas na fluência do alumínio foi realizada por Kovalewski , Hayhusrt e Dyson (1994). As equações têm modelos mais elaborados para o envelhecimento. O conjunto de Eq. (9) a (12) foi apresentada. Ela é válida para os casos uniaxial e multiaxial. A tensão indicada por  $\sigma$  pode ser calculada como von Mises ou a tensão máxima eficaz.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \operatorname{senh} \left\{ \frac{B\sigma(1-H)}{(1-\varphi)(1-\varpi_2)} \right\} \quad (9)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{h}{\sigma} \frac{d\varepsilon}{dt} \left\{ 1 - \frac{H}{H^*} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{K_c}{3} (1 - \varphi)^4 \quad (11)$$

$$\frac{d\varpi_2}{dt} = D A \operatorname{senh} \left\{ \frac{B\sigma(1-H)}{(1-\varphi)(1-\varpi_2)} \right\} \quad (12)$$

A, B, H \*, H, Kc e D são as propriedades do material .

A Eq. (9) consiste em uma equação de fluxo inelástica usando o seno hiperbólico. Este é um dos três tipos básicos de equações de taxa de deformação por fluência .

A Eq. (10) é a formulação de *back stress*. Os valores da variável H começam a crescer até atingir o seu valor máximo, o chamado H \* (saturado), quando a deformação entra no estado de equilíbrio, parando de agir sobre a taxa de deformação.

A Eq. (11) modela a terceira fase de fluênci com a variável  $\varphi$ , que varia, por conveniência, entre 0 e 1. Esta equação é proveniente da teoria da mecânica da fratura para modelar a nucleação e crescimento de cavitação nos limites dos grãos. A evolução do dano é caracterizado pelos parâmetros  $K_c$  e  $D$ . A Eq. (12) caracteriza a evolução de outra variável de estado relacionada ao terceiro estágio de fluênci.

A Fig. 5 mostra uma imagem feita por micrografia eletrônica de transmissão pela Pós doutoranda Érika Prados. Nela podemos observar, na escala dos nanômetros, a presença dos precipitados que, durante o envelhecimento, crescem e influenciam nas propriedades mecânicas da liga.

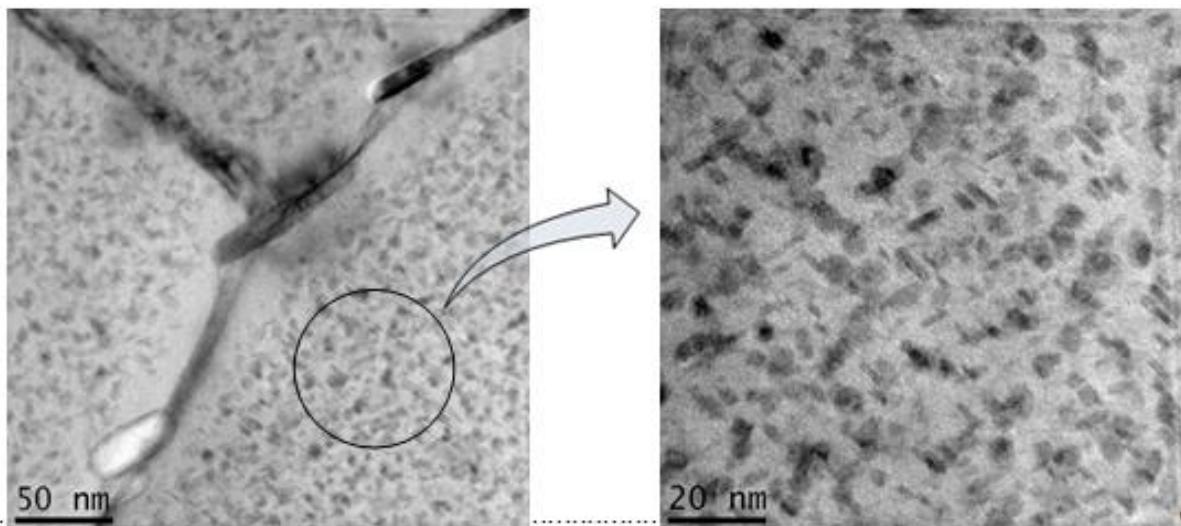


Figura 5. Micrografias eletrônicas de transmissão da amostra AA7050-TAF

### 3. O PROBLEMA DAS CONSTANTES DE FLUÊNCIA

Esta etapa do projeto tem como objetivo obter as constantes do modelo de fluência adotado (equações constitutivas), que pode ser um já existente ou um novo modelo. Utilizou-se a plataforma de desenvolvimento MATLAB para codificar o algoritmo.

Nas Fig. 6 e 7, pode-se observar o comportamento dos dois principais modelos de fluência uniaxiais encontrados na literatura recente. O primeiro, adotado por Li (2002), prioriza a representação do segundo e terceiro estágios de fluência, pois incluem constantes de dano na formulação, enquanto o segundo (Ho, 2004) demonstra uma melhor representação dos primeiro e segundo estágios de fluência. A princípio, o segundo modelo foi escolhido por modelar melhor o período em que ocorre a conformação por fluência (até 24h), além de que o material não deve atingir um estágio em que há dano em sua microestrutura, podendo comprometer a qualidade da peça.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{A}{(1 - \omega_2)^n} \sinh\left(\frac{B\sigma(1 - H)}{1 - \phi}\right),$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{h}{\sigma} \frac{d\varepsilon}{dt} \left(1 - \frac{H}{H^*}\right),$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{K_c}{3}(1 - \phi)^4,$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{DA}{(1 - \omega_2)^n} \sinh\left(\frac{B\sigma(1 - H)}{1 - \phi}\right),$$

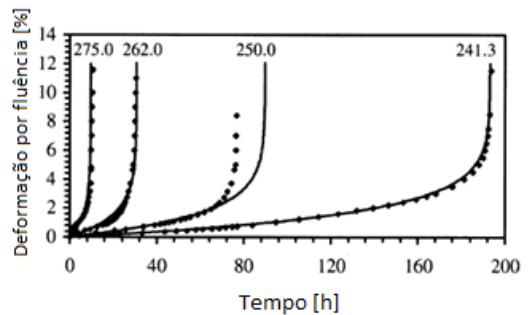


Figura 6. Equações constitutivas com constantes de dano: representam melhor o segundo e terceiro estágios de fluência (Li, 2002).

$$\dot{\varepsilon}_c = A \sinh \left\{ B(\sigma - \sigma_A)(1 - H) \left( \frac{C_{SS}}{\sigma_{SS}} \right)^n \right\}$$

$$\dot{H} = \frac{h}{\sigma^{0.1}} \left( 1 - \frac{H}{H^*} \right) \dot{\varepsilon}_c$$

$$\dot{r} = C_0 \dot{\varepsilon}_c^{0.2} (Q - r)^{1/3}$$

$$\sigma_A = C_A r^{m_0}$$

$$\sigma_{SS} = C_{SS} (1 + r)^{-m_1}$$

$$\sigma_y = \sigma_{SS} + \sigma_A$$

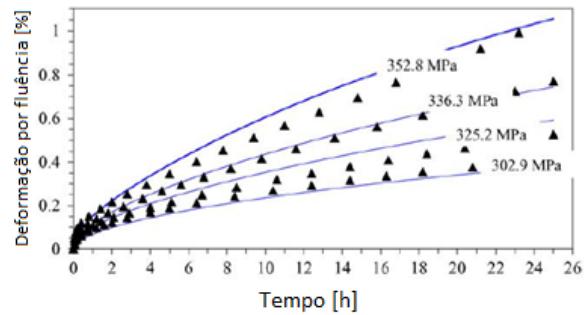


Figura 7. Equações constitutivas que representam melhor o primeiro e segundo estágios de fluência (Ho, 2004).

Nessas equações, observamos dez constantes: A, B,  $H^*$ , h,  $C_0$ ,  $C_A$ , Q,  $m_1$ ,  $m_0$  e n. O algoritmo deve receber os pontos de um ensaio de fluência (que priorize os primeiro e segundo estágios) e retornar as constantes de fluência que melhor representam aquele material ensaiado.

Serão feitas neste momento algumas considerações que envolvem a Função Objetivo do problema (que será definida mais à frente) apenas com o intuito de mostrar o que foi considerado na escolha das melhores equações para serem usadas no projeto.

Como podemos observar na Fig. 8, extraída do artigo de B. Li, tomando o exemplo da constante A e variando a mesma em torno do ponto ótimo, concluímos que a Função Objetivo usada com base no primeiro modelo possui um ponto de inflexão. Logo, métodos analíticos de otimização não podem ser usados. De fato, além deste comportamento, a complexidade da Função Objetivo torna impraticável a sua diferenciação simbólica.

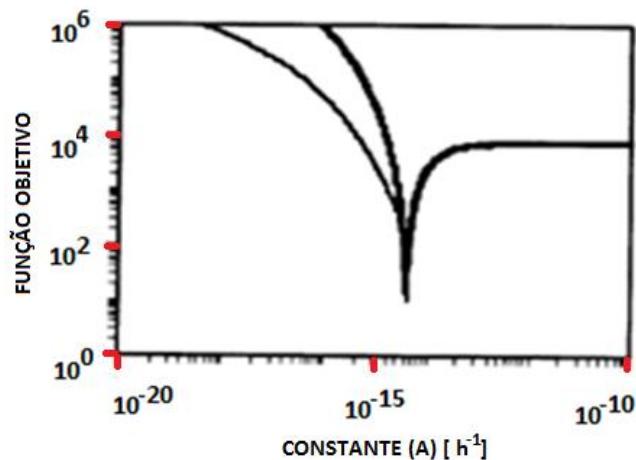


Figura 8. Gráfico da Função Objetivo em função da constante A (Lin, 2002).

No segundo modelo Ho (2004), a variação da Função Objetivo em relação à constante A fica como representado na Fig. 9, lembrando que, nesses gráficos, as demais constantes foram mantidas em um valor fixo.

Apesar de agora ser aparentemente diferenciável, devemos lembrar que ainda se trata de uma função multivariável (dez constantes de fluência), e métodos iterativos de otimização podem ser muito menos custosos que abordar o problema pelas formas convencionais do cálculo.

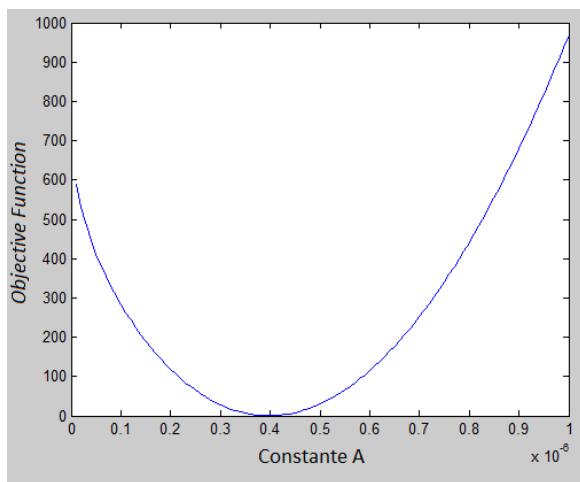


Figura 9. Variação da Função Objetivo em relação à constante A de acordo com o modelo de Ho (2004).

Tentativas foram feitas em torno do segundo conjunto de equações, e alguns problemas foram constatados. Os modelos são muito complexos do ponto de vista de modelagem macroestrutural. Como se pode notar, muitos dos parâmetros, como  $r$  (raio do precipitado) e  $\sigma_{ss}$  (acúmulo de tensão na solução sólida), são de caracterização microestrutural. Eles exercem, por consequência, influência no comportamento mecânico da liga. No entanto, observou-se que é possível simplificar o equacionamento do modelo, mantendo suas características principais. A Fig. 10 mostra um exemplo de curva gerada pelo novo modelo.

Uma proposta de equacionamento está nas Eq. (13) e (14), que consideram apenas influência do *back stress* ( $H$ ) na curva, como uma variável de estado única.

$$\dot{\varepsilon}_c = A \operatorname{senh} \{B\sigma(1 - H)\} \quad (13)$$

$$\dot{H} = \frac{h}{\sigma^n} \left(1 - \frac{H}{H^*}\right) \dot{\varepsilon}_c \quad (14)$$

*Back stress* é o nome dado ao balanço entre o encruamento (causado pela deformação) e a recuperação microestrutural, dado a alta temperatura. Em suma, podemos dizer que todos os eventos microestruturais que foram ignorados estão sintetizados na forma desta variável de estado. A Fig. 11 ilustra a evolução desta variável no tempo. Observe que há um valor em que o *back stress* satura e se mantém constante ( $H^*$ ). Isso caracteriza o fim do primeiro estágio de fluência e o início do segundo (taxa de deformação constante). Esta formulação é suficiente para medir o acúmulo de deformação por fluência e assim quantificar o retorno elástico que ocorre nas peças conformadas. Os modelos de otimização por Algoritmos Genéticos foram então aplicados nestas equações.

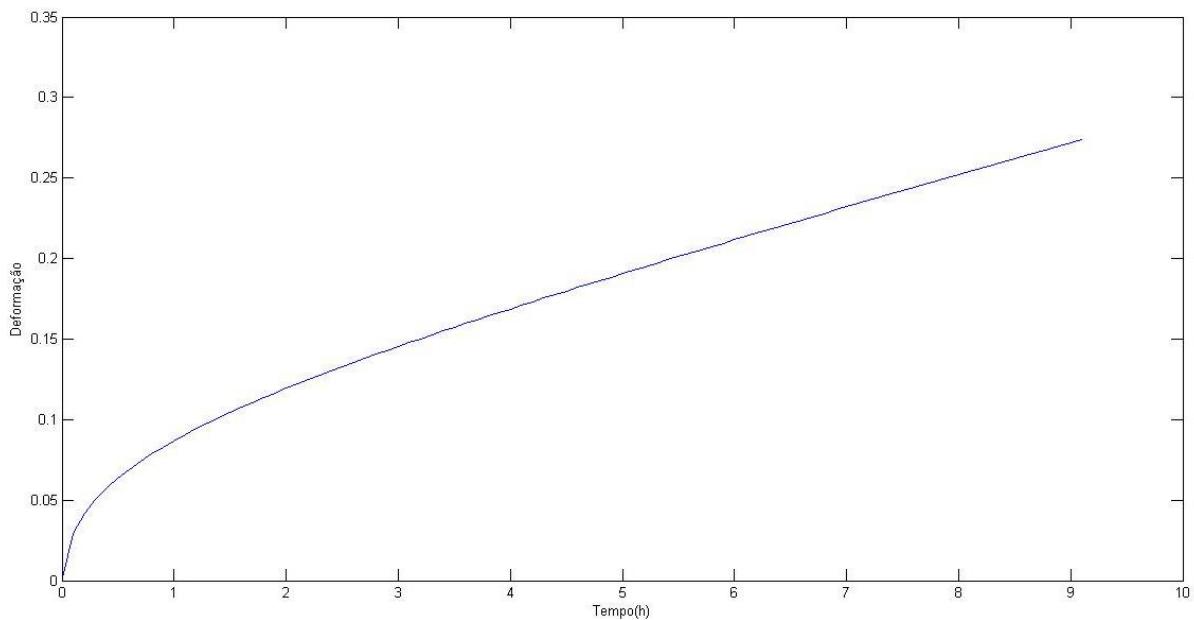


Figura 10. Exemplo de curva de deformação por tempo gerada pelas equações propostas, mostrando a sua capacidade de modelar o comportamento de fluênciа.

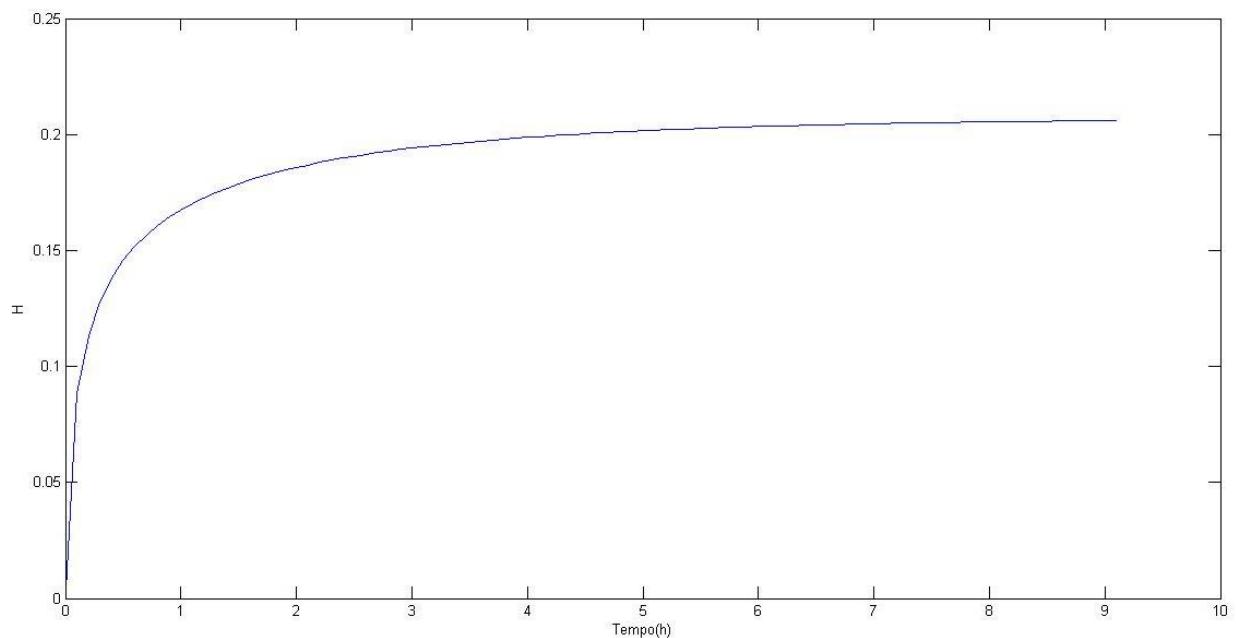


Figura 11. Evolução da variável de estado (*back stress*) com o tempo.

### 3.1. Algoritmos evolutivos de otimização

O problema de modelar o comportamento mecânico da liga se resume na otimização de uma função (Eq. (15)) definida como o somatório dos quadrados das diferenças dos pontos das curvas experimental e teórica, ou seja, que define a diferença entre a curva iterada e o ensaio experimental por meio de um escalar. Minimizando essa função (chamada de Função Objetivo) usando as constantes como domínio, aproximam-se as duas curvas. Assim, obtêm-se os valores que melhor aproximam a formulação teórica do resultado experimental. Na equação, os  $\varepsilon^t$  são as ordenadas da curva teórica e os  $\varepsilon^m$ , da curva experimental (Li, 2002).

$$F(x) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (\varepsilon_{ij}^t - \varepsilon_{ij}^m)^2 \quad (15)$$

Os Algoritmos Evolutivos, dentre eles os Algoritmos Genéticos, compõe um grupo de técnicas da Ciência da Computação usadas para atacar problemas de otimização e de busca. Esses algoritmos são baseados em conceitos de sistemas biológicos como mutação e hereditariedade.

A evolução (caminho para a solução) geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções (geralmente chamado de população) criado aleatoriamente e é realizada por meio de gerações. A cada geração, a adaptação de cada solução na população é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinação para formar uma nova população. A nova população então é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo, até um critério de parada ser atingido.

O esquema da Fig. 12 ilustra o funcionamento do algoritmo.

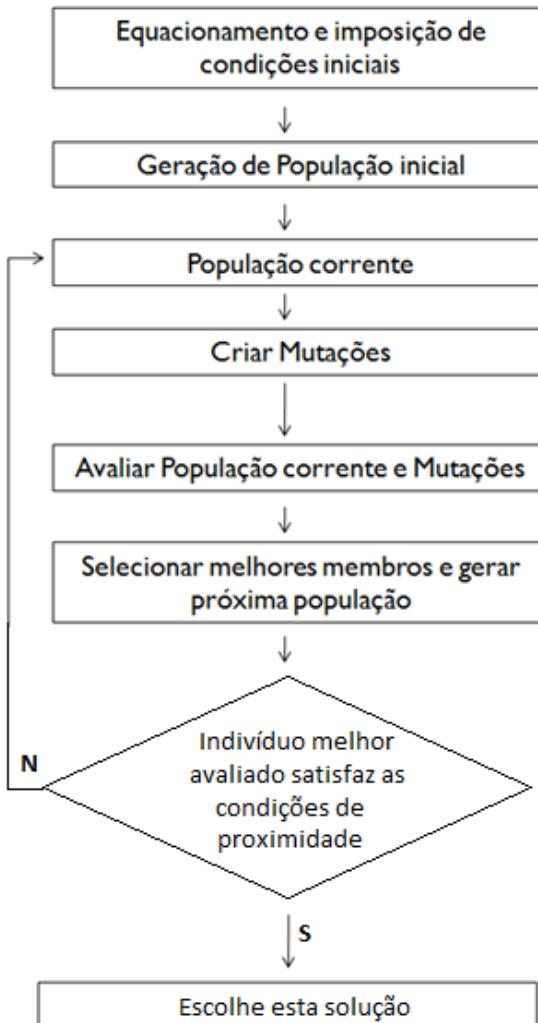


Figura 12. Esquema que resume a ideia básica de solução por mutações usada pelos Algoritmos Evolutivos.

No caso em questão, a população é formada por um conjunto de  $\mu$  pares de vetores reais  $(X_i, \eta_i)$ , onde os  $X_i$  são as variáveis objetivas (as constantes de fluência) e os  $\eta_i$  são desvios padrão para as mutações Gaussianas. As mutações são dadas pelas Eq. (16) e (17), para  $j=1,\dots,5$  (Li, 2002):

$$x_i'(j) = x_i(j) + \eta_i(j)N_j(0,1) \quad (16)$$

$$\eta_i' = \eta_i(j)\exp(\tau'N(0,1) + \tau N_j(0,1)) \quad (17)$$

Onde  $x_i(j)$ ,  $x_i'(j)$ ,  $\eta_i(j)$  e  $\eta_i'(j)$  são os componentes  $j$  dos vetores  $X_i$ ,  $X_i'$ ,  $\eta_i$  e  $\eta_i'$  respectivamente.  $N(0, 1)$  é um número aleatório normalmente distribuído, unidimensional, de média zero e desvio padrão um.  $N_j(0, 1)$  indica que um novo número aleatório é gerado para cada  $j$ . Os fatores  $\tau$  e  $\tau'$  são comumente adotados como  $(\sqrt{2\sqrt{n}})^{-1}$  e  $(\sqrt{2n})^{-1}$ , com  $n=5$  para o nosso caso (número de variáveis).

Para aumentar as chances de aproximação e introduzir uma maior rapidez e precisão nas iterações, decidiu-se por introduzir um segundo tipo de mutação a cada iteração utilizando, ao invés de distribuições Normais (Gaussianas), distribuições de Cauchy (Li, 2002). Assim, a cada iteração, é criada uma mutação pela distribuição Normal e uma pela distribuição de Cauchy para cada indivíduo. A melhor avaliada é escolhida e a outra descartada. A ideia de usar esta distribuição vem da tentativa de tentar “fugir” dos mínimos locais, já que ela adiciona maior probabilidade de avaliar pontos longe dos atuais. As mutações são dadas pela Eq. (18), onde  $\delta_j$  é uma variável aleatória de Cauchy, gerada para cada  $j$ .

$$x_i'(j) = x_i(j) + \eta_i(j)\delta_j \quad (18)$$

Em resumo, essa técnica usa distribuições estatísticas para estimar uma solução mais próxima da ótima que a atual. Ou seja, o método se utiliza de transições probabilísticas ao invés de regras determinísticas. Se a solução gerada for mais bem avaliada (gera o menor escalar quando aplicada na Função Objetivo) que a original, essa irá compor a nova população a ser iterada, senão, a última solução continua compondo a população corrente.

Os Apêndices A e B mostram, respectivamente, a listagem do Algoritmo e da Função Objetivo gerados em MATLAB com base nos conceitos explicados.

### 3.2. Resultados preliminares

Em uma tentativa de testar o algoritmo em curvas mais próximas das condições de conformação por fluência, foram retirados pontos de uma figura publicada por Lin (2004), com ensaios de fluencia em uma liga AA7010 a 150°C. Para isso um programa chamado Engauge Digitizer foi usado. A Fig. 13 ilustra o gráfico que foi diretamente retirado deste artigo (Lin, 2004).

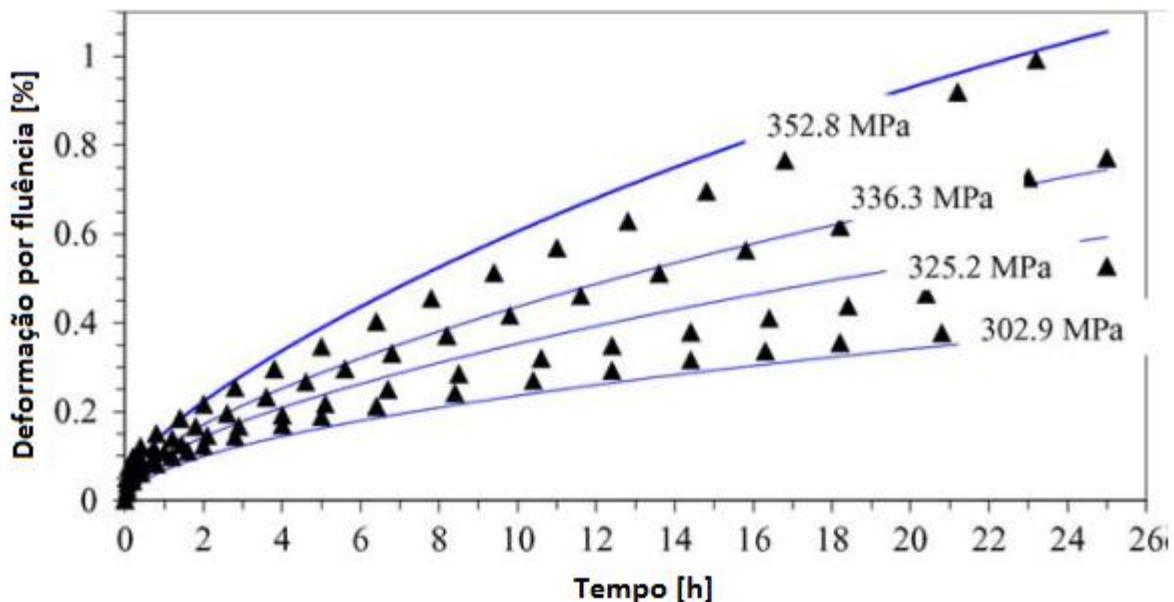


Figura 13. Comparação entre curvas previstas (linhas sólidas) e experimentais (triângulos) na liga AA7010 a 150°C (Lin, 2004)

A seguir são mostrados nas Fig. 14 e 15 dois resultados obtidos com essas curvas retiradas da literatura utilizando o Algoritmo Evolutivo explicado anteriormente e as Eq. (13) e (14) para a modelagem sob fluência.

A Fig. 14 ilustra o resultado da otimização explicada anteriormente para as quatro curvas do artigo (Lin, 2004). Foram usadas as mesmas tensões: 302.9 , 325.2, 336.3

e 352.8 MPa. Apesar das curvas estarem com um pequeno erro constante, o resultado é satisfatório e aparentemente melhor que o obtido por Lin (2004).

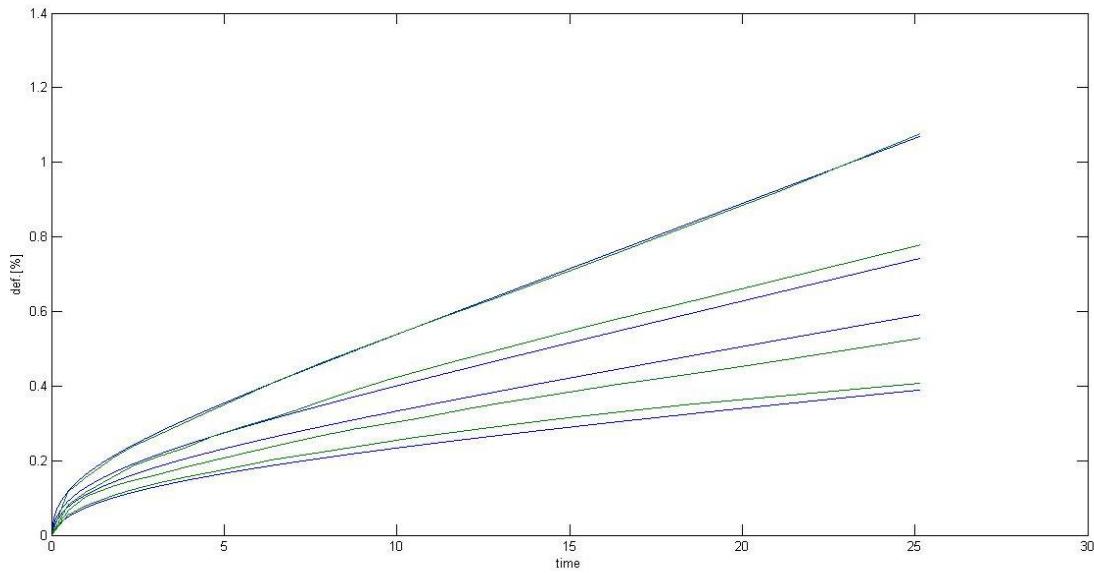


Figura 14. Comparação entre quatro curvas previstas (linha azul) e experimentais (linha verde) na liga AA7010 a 150°C usando as equações 13 e 14.

É possível notar que quanto maior o número de curvas a serem aproximadas, mais difícil é de se obter um bom resultado, já que o sistema total a ser otimizado aumenta em complexidade. Na Fig. 15 o mesmo processo foi feito excluindo-se a curva de 325.2 MPa. Nota-se que o resultado é muito bom. O pequeno erro constante entre as curvas é pouco preocupante, já que as taxas de deformação são praticamente iguais em todas as tensões (entre prevista e experimental).

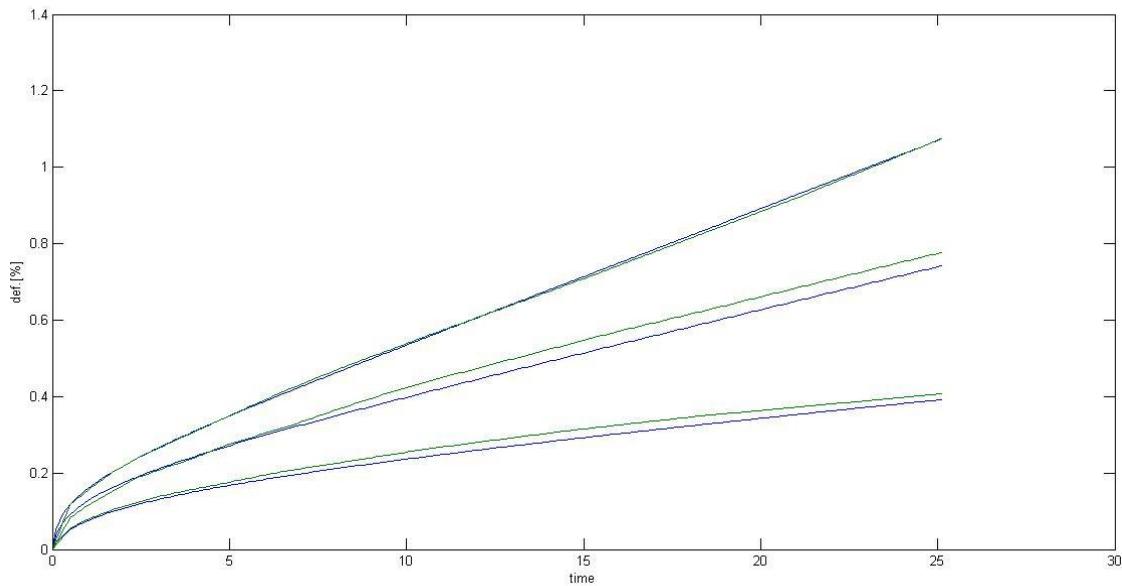


Figura 15. Comparação entre três curvas previstas (linha azul) e experimentais (linha verde) na liga AA7010 a 150°C

#### 4. MODELAGEM NUMÉRICA DE UMA PEÇA COM CURVATURA SIMPLES

Deve-se fazer uma definição importante: o *springback*. Este fenômeno representa o retorno elástico que ocorre na peça conformada após a retirada da carga. A Fig. 16 e a Eq. (19) ilustram a definição de *springback* em uma peça de curvatura simples. Este fenômeno é o parâmetro de maior importância para a verificação e validação da modelagem do processo.

$$R = \frac{\overline{OP'}}{\overline{OP}} \quad (19)$$

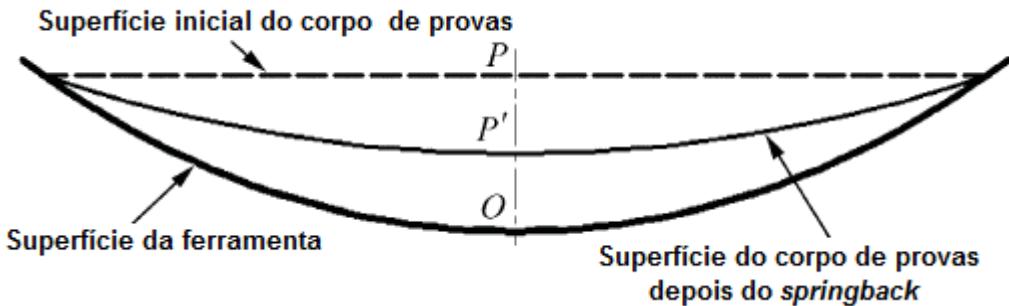


Figura 16. Esquema demonstrando a definição de retorno elástico em peças com curvatura simples.

#### 4.1. Introdução ao **software** de Elementos Finitos

O processo de *Creep Age Forming* envolve um estado de deformações tridimensional muito particular, que deve ser considerado para sua modelagem. Neste contexto, esta parte do trabalho irá mostrar uma modelagem em um programa de elementos finitos de um de um processo de CAF em uma peça de curvatura simples, ou seja, em apenas duas dimensões espaciais.

O programa escolhido para a análise foi o ABAQUS/CAE, da *Dassault Systemes S.A.*. A razão da escolha deste programa foi sua larga utilização tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico (é utilizado em muitos artigos da literatura para o mesmo propósito). Além disso, o programa oferece uma boa interface com o usuário para entrada de dados e construção do modelo. O processo de análise de um modelo se baseia em três etapas fundamentais:

- *Pré-processamento*: Modelagem física da estrutura analisada, condições de contorno e cargas aplicadas.
- *Simulação*: Solução do modelo proposto por algoritmos de elementos finitos.

- *Pós-processamento:* Geração de arquivos de saída para análise da simulação, como gráficos, animações, etc.

Esta etapa tem por objetivo detalhar a modelagem usada na simulação em elementos finitos com o software ABAQUS. Após um longo período de aprendizagem em relação aos obstáculos encontrados neste tipo de simulação, chegou-se ao modelo definitivo que irá ser usado no final deste trabalho para ser comparado com os ensaios planejados.

Inicialmente o modelo usado para representar a conformação estava em duas dimensões, porém, possuía um eixo de simetria (Fig. 17).



Figura 17. Modelo inicial em FEM sob carregamento.

Foi proposto um novo modelo no qual este eixo de simetria é usado para simplificar a simulação, de modo que a peça passou a ser representada como uma espécie de viga engastada que assenta sobre uma superfície curva, como mostra a Fig. 18. A deformação é imposta por uma outra superfície circular em contato com a peça. Esses componentes representam partes reais do ensaio que foi planejado, e estas partes serão detalhadas mais a frente neste mesmo trabalho.

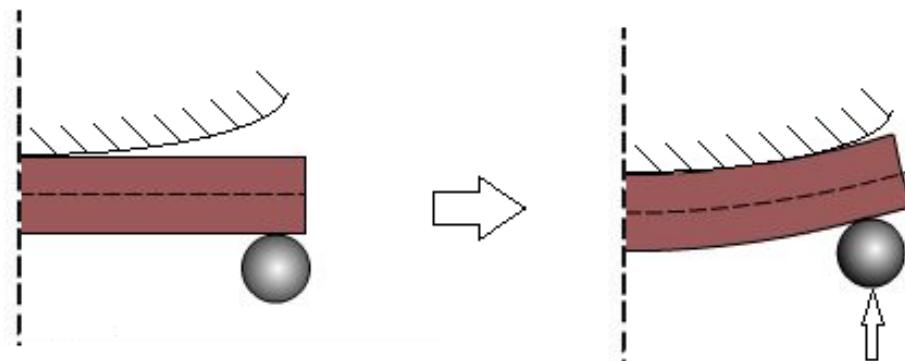


Figura 18. Rascunho do novo modelo proposto para simulação em FEA.

A seguir será feita uma descrição das principais etapas da modelagem do ensaio no software ABAQUS. Vale ressaltar que, para efeito de análise em elementos finitos, não é necessário que sejam desenhadas a peça e ferramenta em 3D. Um problema pode ser bem modelado bastando escolher corretamente as condições de contorno e de contato entre as peças, como será visto a diante.

#### 4.2. Desenho da peça e da ferramenta

Uma peça de curvatura simples apresenta deformações e deslocamentos apenas no plano normal ao eixo de curvatura, logo, podemos reduzir o problema à este plano, diminuindo o custo computacional. Portanto, a peça e ferramenta foram desenhadas em 2D mas representam sem prejuízos uma peça 3D.

O modelo é composto por apenas três partes: o perfil da peça ensaiada, nomeada de *blank*, a superfície curva da ferramenta, nomeada de *punção*, e a superfície cilíndrica que irá aplicar a deformação, nomeada de *apoio*.

O *punção* é uma linha em contato com o *blank* na extremidade esquerda e com um raio de curvatura constante e definido. O *blank* é modelado como um retângulo em que sua altura é a espessura do corpo de provas e sua base é a metade do comprimento do mesmo. A Fig. 19 ilustra os elementos montados, em contato, da maneira que será rodada a análise.

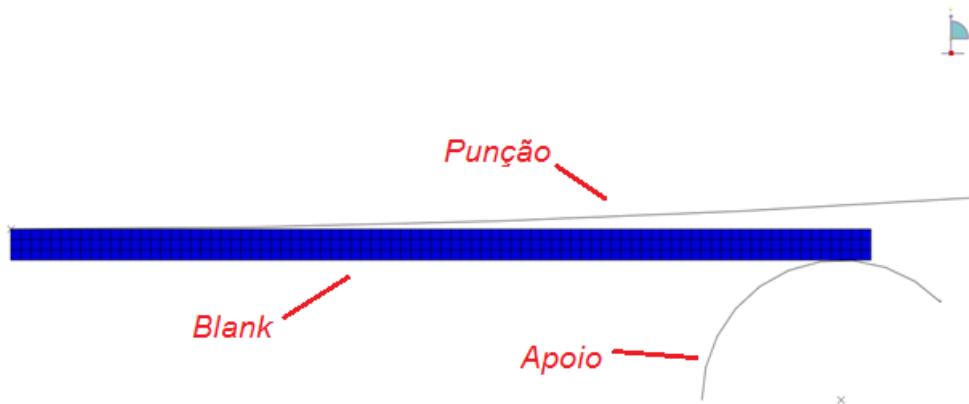


Figura 19. Desenho da montagem completa em ABAQUS.

### 4.3. Material

A definição de material é a parte mais importante de uma análise de fluência. Para as ferramentas (*punção e apoio*), foi usado um recurso de corpo rígido, ou seja, as mesmas são superfícies indeformáveis. Esta é uma boa proposição, já que a ferramenta real é de aço e possui temperatura de fluência e tensão de escoamento muito maiores das usuais do ensaio. Para a peça, feito de uma liga aeronáutica de alumínio, deve-se informar todos os dados necessários que sejam caracterizadas a deformação elástica e por fluência.

Todas as informações para caracterizar o comportamento mecânico da liga de alumínio (Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson e constantes da lei de fluência) foram retiradas de ensaios de tração a quente e fluência uniaxiais, como abordado nas seções anteriores deste trabalho.

O ABAQUS possui três opções de equações prontas para caracterizar a deformação por fluência: duas chamadas de Leis de Potência (*powerlaws*) e uma baseada em uma função seno-hiperbólica. As primeiras são mais atraentes pela sua simplicidade, no entanto, a aplicação deve se limitar a casos mais simples, com pouca variação de tensão. Em casos em que a taxa de deformação por fluência possui uma dependência tipicamente exponencial da tensão, como em pontos de concentração de tensão, a função com seno-hiperbólico é mais recomendada. Foi escolhida uma quarta opção em que o usuário pode introduzir no programa um modelo próprio usando uma subrotina em Fortran.

Para usar uma subrotina de usuário, é necessária a instalação de outros programas que irão ser utilizados para a edição e compilação do código em Fortran. Estes programas são o Microsoft Visual Studio e o Intel Fortran Compiler. Ao instalar o segundo, é criada uma extensão no primeiro que permite a edição de códigos Fortran de forma mais amigável ao usuário, já que se trata de uma linguagem de programação antiga e com algumas peculiaridades.

Após estas instalações, é necessário fazer uma série de alterações nas variáveis de estado do computador e nos links de abertura dos programas para que seja possível

que o ABAQUS dê os comandos de compilação e que esta seja feita no momento da análise, tornando assim, a compilação da subrotina e a análise em elementos finitos um evento só para o usuário.

O nome da subrotina usada é CREEP. No manual para usuários deste tipo de recurso do ABAQUS está mais bem explicado como devem ser usadas as variáveis que devem ser manipuladas. Abaixo são listadas as variáveis que representam parâmetros do comportamento mecânico de cada elemento da peça e que devem ser alteradas a cada iteração da simulação.

- **DECRA(1):** Incremento de deformação por fluência equivalente (uniaxial).
- **DECRA(5):** Derivada do incremento de deformação em relação à tensão aplicada. Usado quando é necessária que seja feita integração implícita.
- **STATEV(1):** Este vetor é usado para armazenar variáveis de estado entre uma interação e outra. Neste caso, o vetor possui apenas um elemento (*back stress*).

Foi introduzida uma subrotina chamada SDVINI para ser executada antes da CREEP. Este código é usado para iniciar as variáveis de estado (vetor STATEV) antes que sejam usadas nos incrementos seguintes pelas outras subrotinas. No caso, o STATEV(1) (*back stress*, citado anteriormente) é iniciado com o valor zero, segundo visto na literatura e no trabalho anterior deste mesmo autor.

Foram tomados alguns cuidados com a precisão das constantes e variáveis na subrotina CREEP. As constantes foram declaradas com precisão dupla e a variável de estado, a cada passo da simulação, passa por uma checagem se está dentro dos valores normais, ou seja, maior que zero e menor que  $H^*$  (que é uma das constantes de entrada e representa a saturação).

O Apêndice C contém a subrotina que foi escrita para modelar a deformação por fluência da peça segundo as Eq. (13) e (14). Os valores das constantes de fluência foram deixados em branco, para indicar que esta subrotina aceita quaisquer valores vindos do algoritmo em MATLAB descrito neste próprio trabalho.

#### **4.4. Steps**

Em qualquer análise por elementos finitos, devemos definir os passos da simulação, comumente chamados de *steps*.

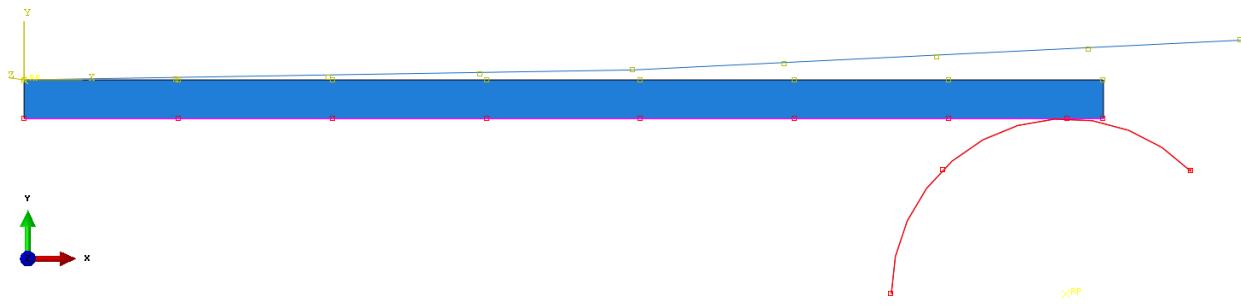
Toda simulação possui um *step* inicial, criado automaticamente pelo programa. Este deve ser usado para estabelecer as condições de contorno e de interação (contato) do modelo. Pode-se criar outros *steps* para caracterizar diferentes passos da análise. Neste caso, foi criado apenas mais um, com o nome de *Creep*, onde é aplicado um deslocamento sobre o elemento *apoio*, como explicado mais adiante.

#### **4.5. Contato entre a peça e a ferramenta**

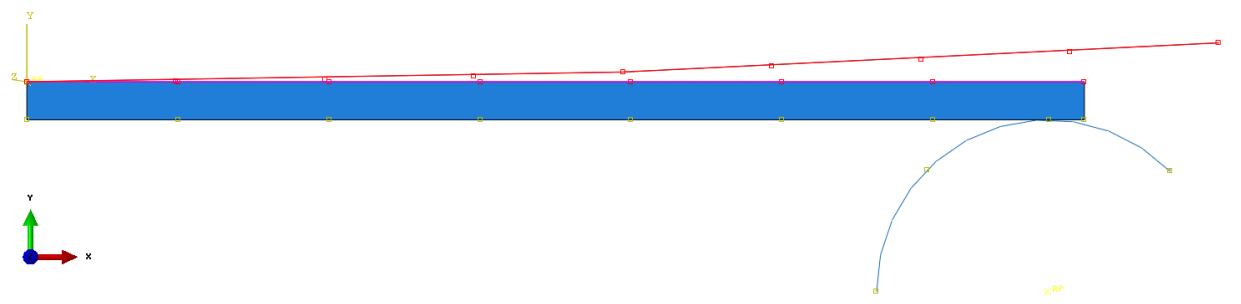
Um software de simulação não reconhece sozinho os possíveis contatos que podem ocorrer durante uma análise. Devem-se definir as superfícies que estarão em contato, assim como estabelecer propriedades de contato como, por exemplo, o coeficiente de atrito.

As superfícies que entrarão em contato no modelo proposto são a superfície inferior do *blank* com o *apoio* e a superfície superior do *blank* com o *punção*. A Fig. 20 mostra as superfícies que estarão em contato em destaque. Em lilás está a superfície do *blank* e em vermelho estão as superfícies das ferramentas.

Antes de criar uma interação entre as superfícies, deve-se estabelecer uma propriedade para a mesma. Neste caso, esta propriedade foi simplesmente atribuir um coeficiente de atrito de 0,3 entre as duas superfícies, como mostra a Fig. 21. Este valor foi escolhido por ser usual em simulações de estampagem.



(a)



(b)

Figura 20. Superfícies definidas para entrarem em contato.

(a) contato da superfície inferior do blank com o apoio.

(b) contato da superfície superior do blank com o punção.

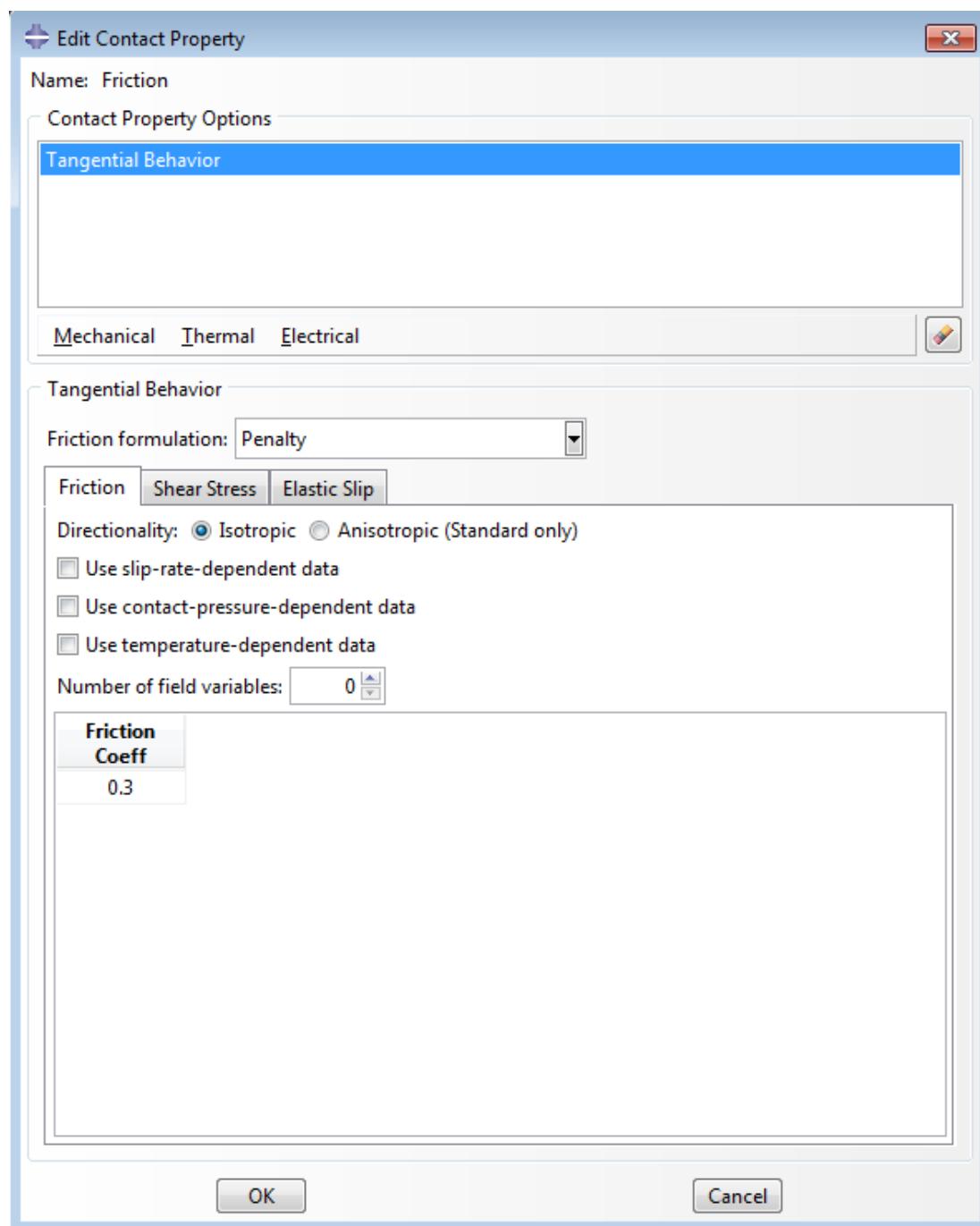


Figura 21. Janela para criação de uma propriedade de contato com coeficiente de atrito de 0,3.

Agora se pode criar uma interação de contato entre as superfícies definidas, usando a propriedade de atrito. Esta foi uma parte complicada do trabalho, pois existem muitos parâmetros que podem ser modificados e que são essenciais para o sucesso da análise.

Antes de iniciar as configurações, deve-se atentar para a classificação das superfícies entre *Master surface* ou *Slave surface*. Segundo o manual do usuário do software, a *Slave surface* deve ser sempre a superfície com malha mais refinada (que será definida adiante) e que sofrerá maior deformação. Neste contexto, esta classificação deve ser dada ao à superfície do *blank*. Todo caso, o manual recomenda em outra seção que superfícies rígidas que entrarão em contato sempre devem ser classificadas como *Master surface*.

A Fig. 22 ilustra como é reconhecido o contato entre as partes no ABAQUS. Os nós da *Slave surface* não podem penetrar nos segmentos que formam a *Master surface*. No entanto, é possível que a *Master surface* penetre na *Slave surface*. Logo, deve-se atentar para que a malha criada seja fina o suficiente para criar o efeito de contato desejado.

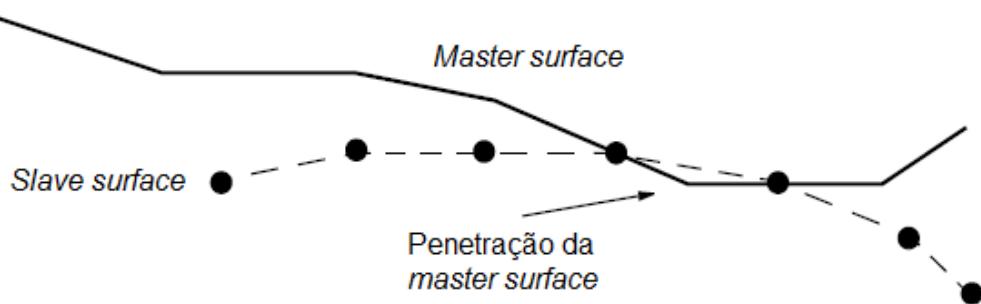


Figura 22. Interação entre duas superfícies (Manual do ABAQUS).

A Fig. 23 mostra as opções usadas para a simulação. Com as opções padrão o programa não gerou contato. Uma superfície simplesmente ignorava a existência da outra. Após a mudança das opções *Sliding formulation* para *Small sliding* e *Discretization method* para *Node to surface*, as superfícies passaram a entrar em contato.

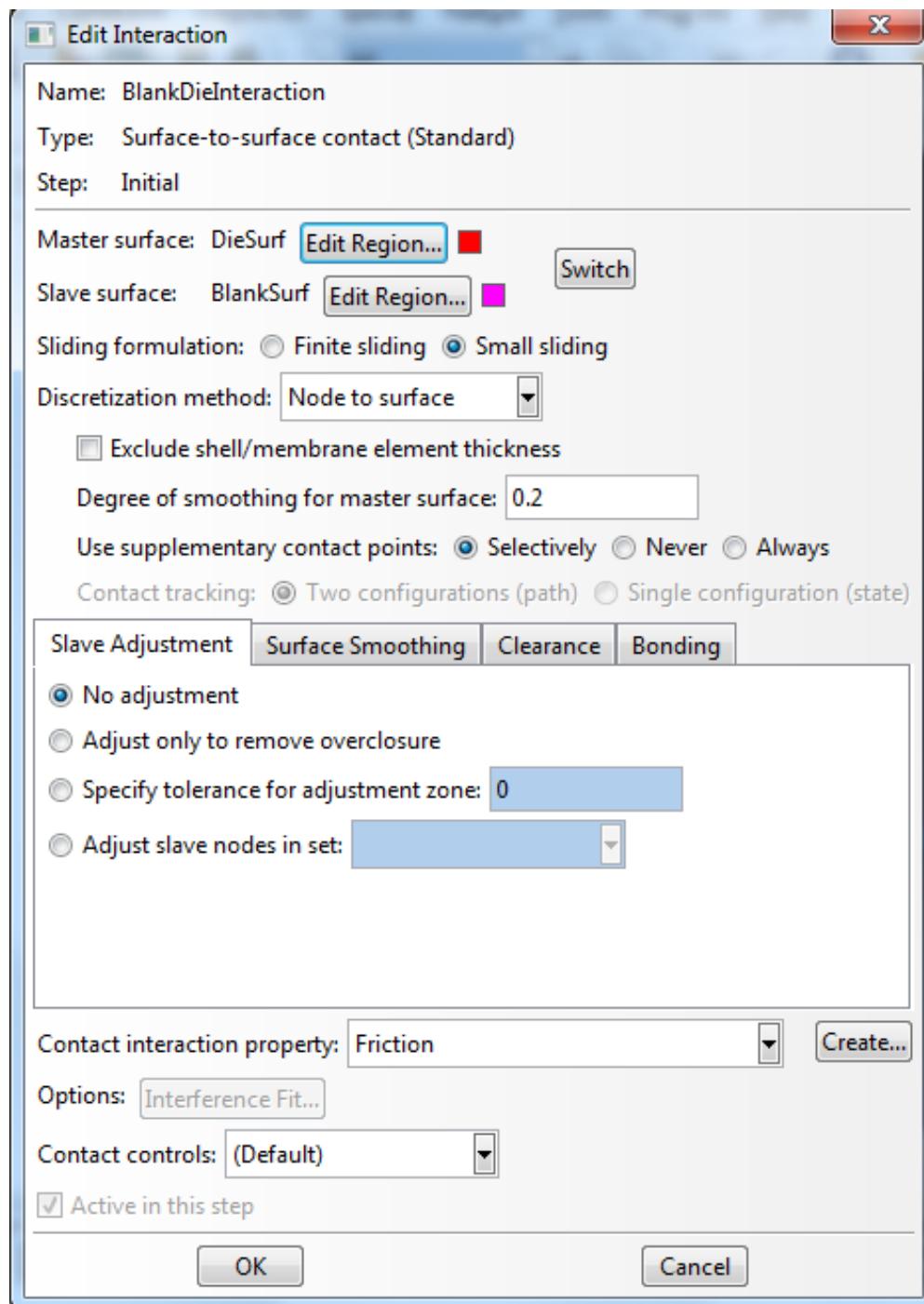


Figura 23. Opções usadas para estabelecer contato.

#### 4.6. Condições de Contorno

As condições de contorno são necessárias para manterem imóveis certas partes do modelo, que, no experimento real, estão fixas ou possuem graus de liberdade limitados.

A Fig. 24 ilustra os locais de aplicação das condições de contorno usadas no modelo (em laranja). No canto esquerdo da figura, foi aplicada uma condição de engaste, ou seja, restrição de rotação e translação nulos, tanto para o *blank* quanto para o *punção*. Esta condição de contorno garante a condição de simetria da curvatura simples, como explicando anteriormente. A outra condição, na parte inferior esquerda, se aplica ao *apoio* e impõe um movimento ao mesmo. Isto ocorre para simular a deformação aplicada ao *blank*.

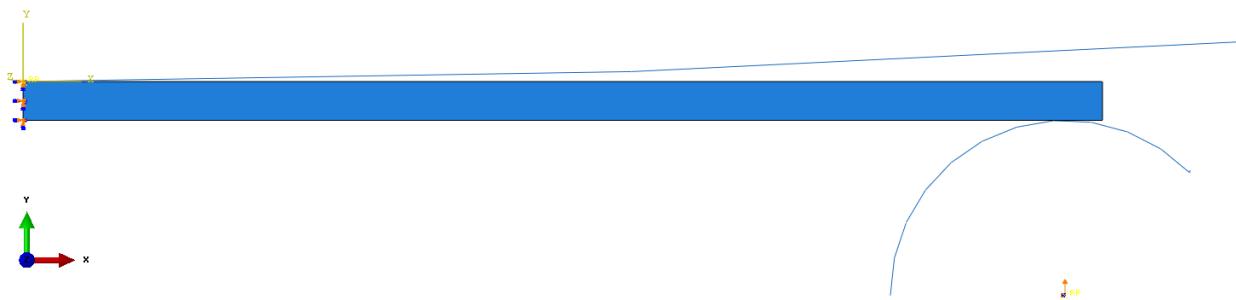


Figura 24. Condições de contorno aplicadas ao modelo.

#### 4.7. Malha

Todo corpo deformável deve ser discretizado em pequenas partes chamadas de *elementos finitos*. Cada elemento finito representa uma porção física da estrutura, e estes são unidos por *nós*, compartilhados entre eles. O conjunto de elementos finitos e nós é chamado de malha, ou, no inglês, *mesh*. A quantidade de elementos por unidade de área ou volume é a densidade da malha, que pode ser grosseira, com poucos elementos, ou refinada, com muitos elementos.

Em uma análise, o software calcula fundamentalmente o deslocamento dos nós de acordo com as leis de comportamento do material e, desta forma, ele pode obter facilmente a tensão e deformação em cada elemento. Logo, quanto mais refinada a malha, maior será o custo computacional requerido pela simulação, porém, melhor será a precisão do resultado. Notou-se que uma malha grosseira pode não apenas piorar a precisão do resultado, como também causar comportamentos totalmente estranhos à simulação.

Já que o modelo foi reduzido a uma seção da peça 3D, pôde-se aplicar uma malha bem refinada e assim obter bons resultados sem precisar de muito tempo de simulação. A malha do *blank* possui elementos com cerca de 1mm de lado, criando assim 258 elementos, como visto na Fig. 25.

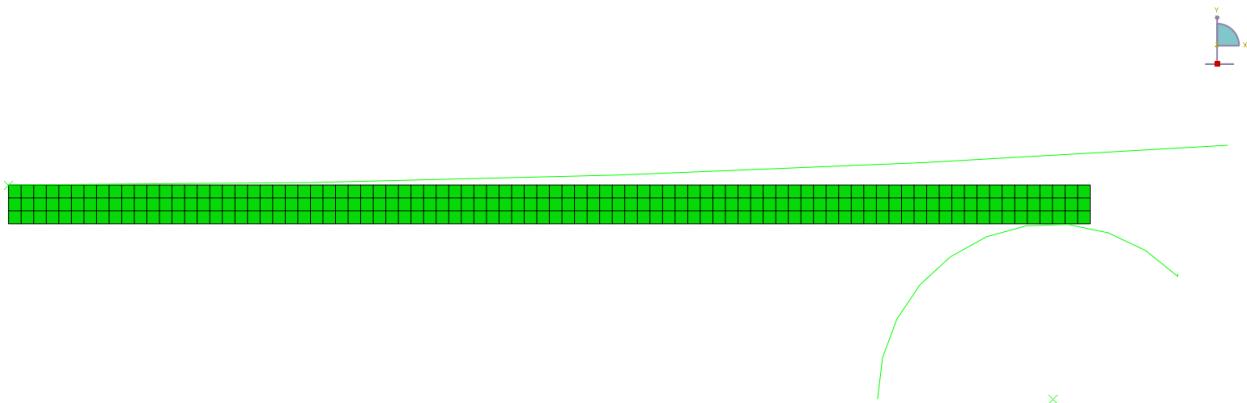


Figura 25. Detalhe de uma parte do *blank* com a malha especificada.

Na simulação, o corpo de provas (*blank*) possui 3,1mm de espessura e 86,5mm de comprimento (metade do comprimento real, vista a adoção da hipótese de eixo de simetria). Na ferramenta real, o punção que irá descer e deformar o alumínio. No modelo, por conveniência das condições de contorno, a linha rígida que representa o punção (linha na parte superior) fica fixa, e a linha inferior, que é o apoio, exerce o movimento. O punção possui um raio de 1500mm e o apoio um raio de 14mm.

O corpo de provas fica deformado por 9 horas (32400 segundos), enquanto é possível observar o decaimento das tensões. Com uma análise geométrica simples, calcula-se que o apoio deve se movimentar 2,44mm na vertical para que o corpo de provas toque no punção em todo o seu comprimento.

#### 4.8. Resultados

Nas Fig. 26 a 28 pode-se ver um resumo dos momentos mais importantes da análise: após a imposição da deformação, após o período de 9 horas e após a retirada da deformação. A análise no ABAQUS dura menos de um minuto em uma boa estação de trabalho. Nota-se que o estado de tensões é semelhante em todas elas, ou seja, os pontos mais afastados da linha neutra (tomando como exemplo uma viga) são mais tensionados que os elementos centrais.

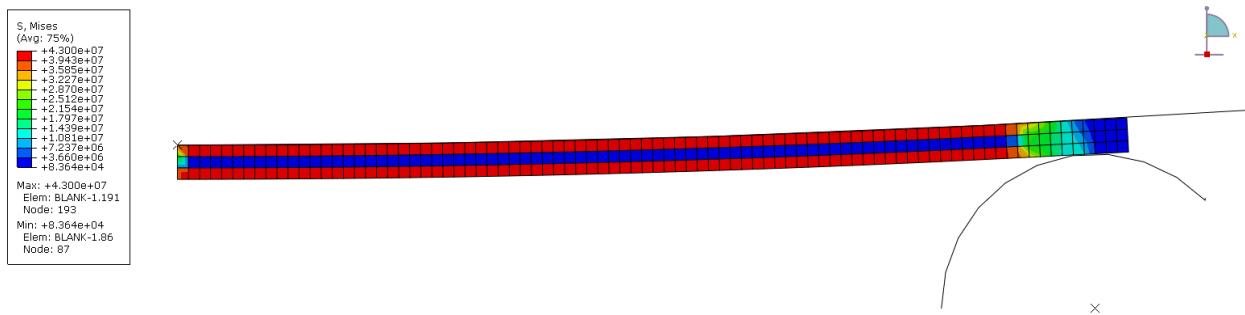


Figura 26. Estado de tensões logo após a deformação.

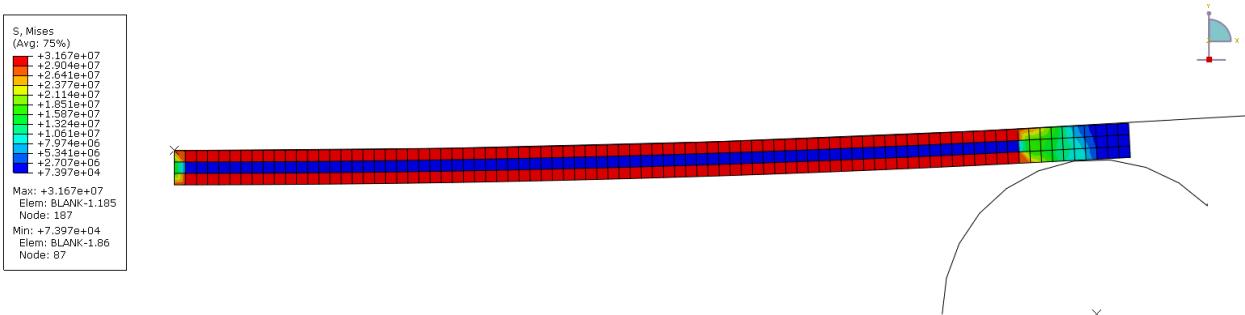


Figura 27. Estado de tensões depois do período de relaxação das tensões.

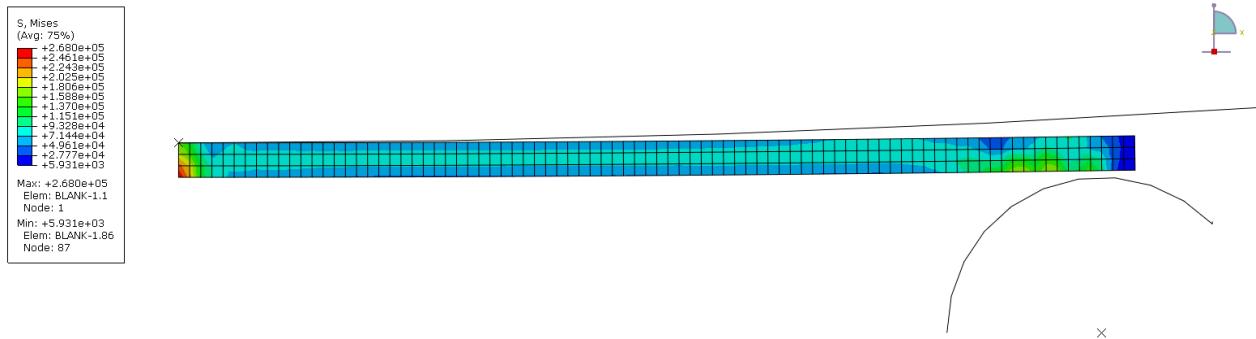


Figura 28. Estado de tensões depois de voltar o punção para a posição original.

Nota-se que não houve concentração de tensões no ponto em que o corpo de provas toca o apoio. Este efeito pode ser devido ao arredondamento do valor do deslocamento deste (2,44mm), que deu margem para evitar um "esmagamento" do material entre as duas linhas rígidas.

Segundo as figuras anteriores, a tensão máxima após impor a deformação é de cerca de 43MPa. Esta decai para cerca de 32MPa após as 9 horas de fluência. Depois do apoio voltar para a posição original, sobra uma tensão residual máxima de quase 0,3MPa e pode-se notar o incremento de deformação plástica imposta. O gráfico da Fig. 29 mostra a evolução do deslocamento do ponto inferior direito do corpo de provas. Com esta informação pôde ser calculado o retorno elástico (*springback*) de 73,8%.

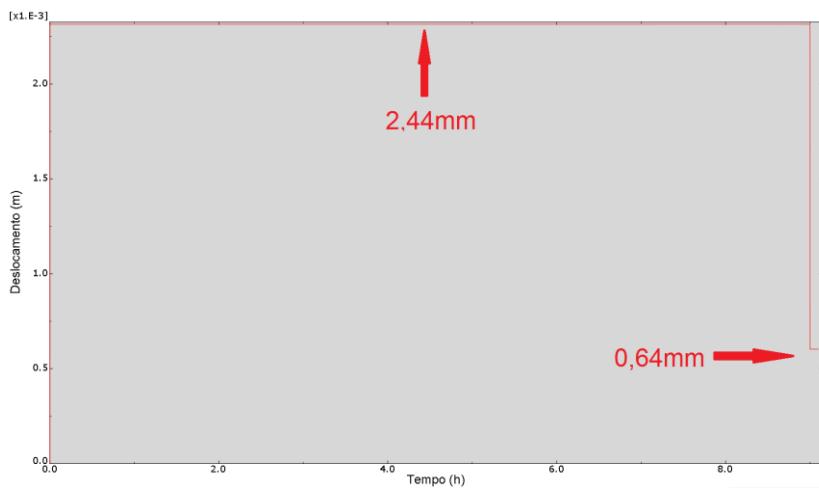


Figura 29. Evolução do deslocamento do canto inferior direito do modelo.

## 5. PROJETO DE FERRAMENTA COM CURVATURA SIMPLES PARA CONFORMAÇÃO EXPERIMENTAL

Esta parte do trabalho focou em pesquisar artigos e patentes que apresentam realizações no sentido de construir algum aparato experimental para conformação por fluência com envelhecimento em laboratório (ou em pequena escala). Foram poucos os trabalhos encontrados que seguem esta linha.

O objetivo principal é a criação de uma ferramenta que imponha sobre um corpo de provas plano, ou seja, uma chapa de alumínio, uma deformação em forma de curvatura de raio constante e em apenas uma dimensão. Ao mesmo tempo em que esta curvatura é aplicada, todo o conjunto deve estar em um ambiente com temperatura controlada de maneira que o corpo de provas apresente uma temperatura estável e homogênea. Assim, podemos estabelecer alguns requisitos principais que devem ser respeitados neste projeto:

- Ferramenta deve ser robusta o suficiente para que a sua deformação por fluência seja desprezível perto da deformação que deve ocorrer ao corpo de provas.
- O projeto não pode possuir dimensões ou massa muito grandes, já que deve ser manipulada em laboratório.
- A interferência térmica imposta ao corpo de provas deve ser a menor possível, já que a modelagem é baseada em temperatura constante.
- Mecanismo para acionar prensagem deve ser de fácil acesso e operação para que seja manipulado dentro do forno.

A seguir nas Figuras 30 e 31 são apresentados dois exemplos de ferramentas deste tipo que foram encontradas na literatura. Um resumo mais completo das diferentes propostas de ferramentas experimentais para realização experimental do processo de conformação por fluência sob envelhecimento (CAF) pode ser vista na figura 31 (LIN, 2013)

A Fig. 30 (Lin, 2007) mostra um aparato muito simples, construído a partir de barras de aço soldadas e grandes peças maciças de aço usinadas com a curvatura de conformação. A ideia foi usinar uma peça com a curvatura côncava e outra com a curvatura convexa e prensar o corpo de provas entre elas com o auxílio de grandes parafusos nas barras soldadas. Esta configuração mostra-se rígida e resistente, porém, a grande massa das peças e o contato com a totalidade do corpo de provas parece ser um obstáculo para manter a homogeneidade da temperatura.

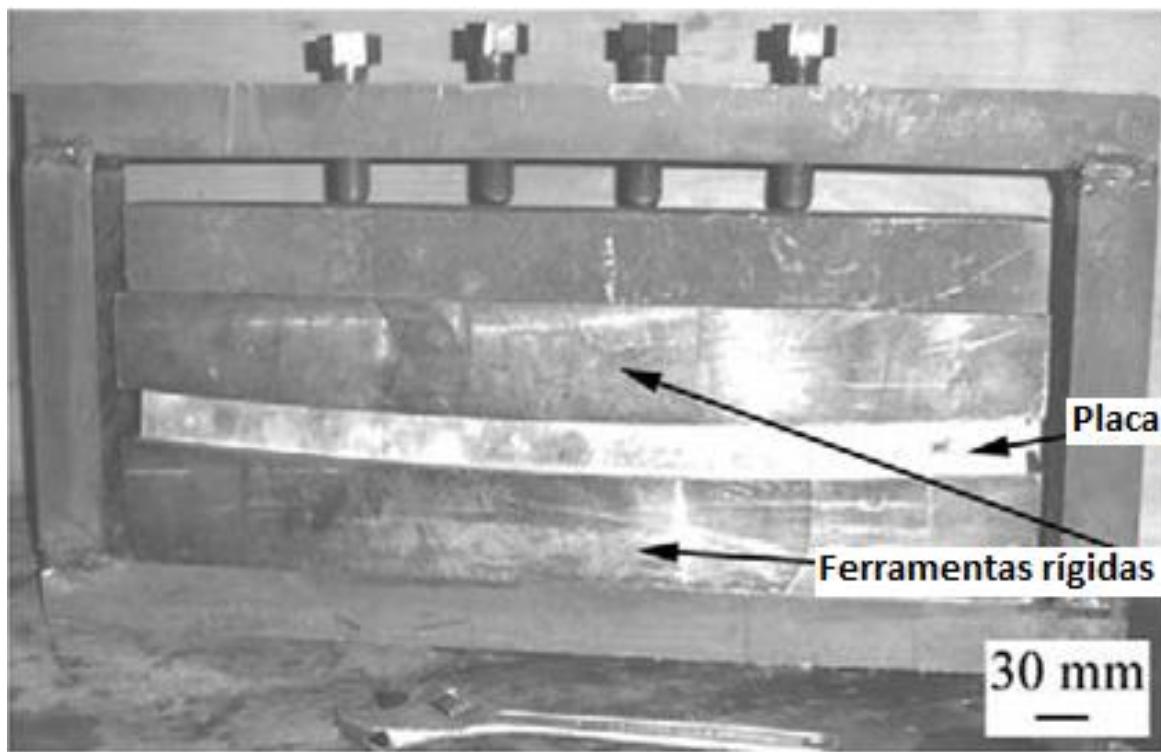


Figura 30. Proposta de ferramenta experimental para conformação CAF (Lin, 2007).

A Fig. 31 mostra uma ferramenta construída por um grupo de pesquisa iraniano com o mesmo propósito da anterior, porém, o artigo do qual ela foi retirada tem grande foco em investigação microestrutural da liga. As ideias são muito parecidas, porém, neste caso, foram usadas apenas duas peças usinadas com as curvaturas e um par de parafusos nas laterais para mantê-las pressionadas. Este caso ainda possui o problema de controle de temperatura citado.

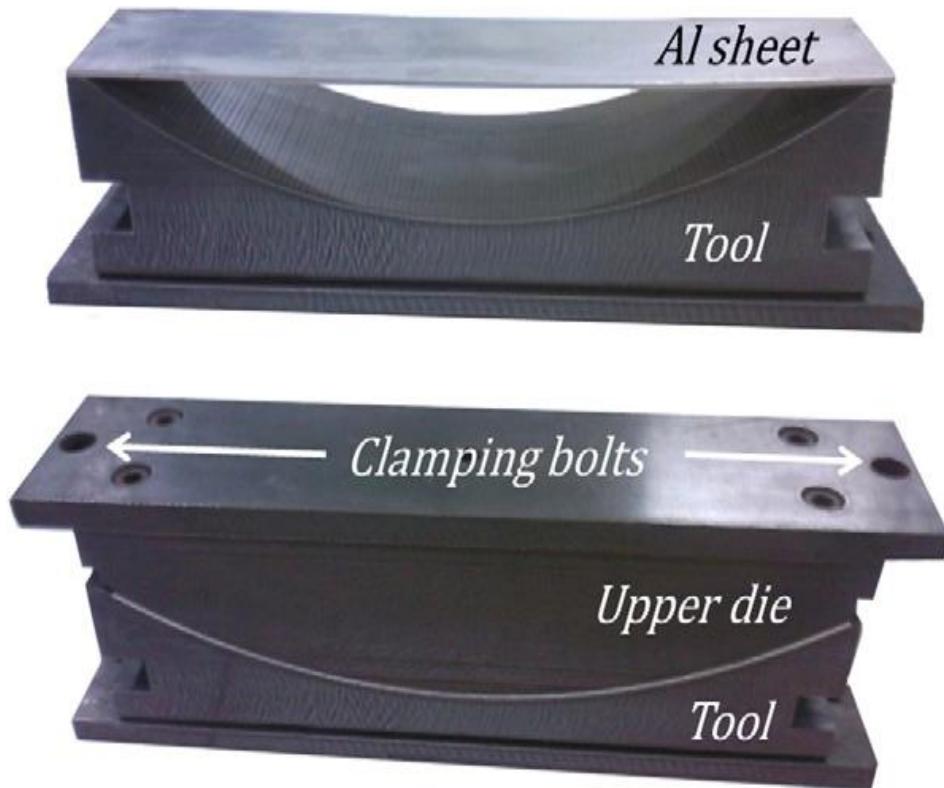
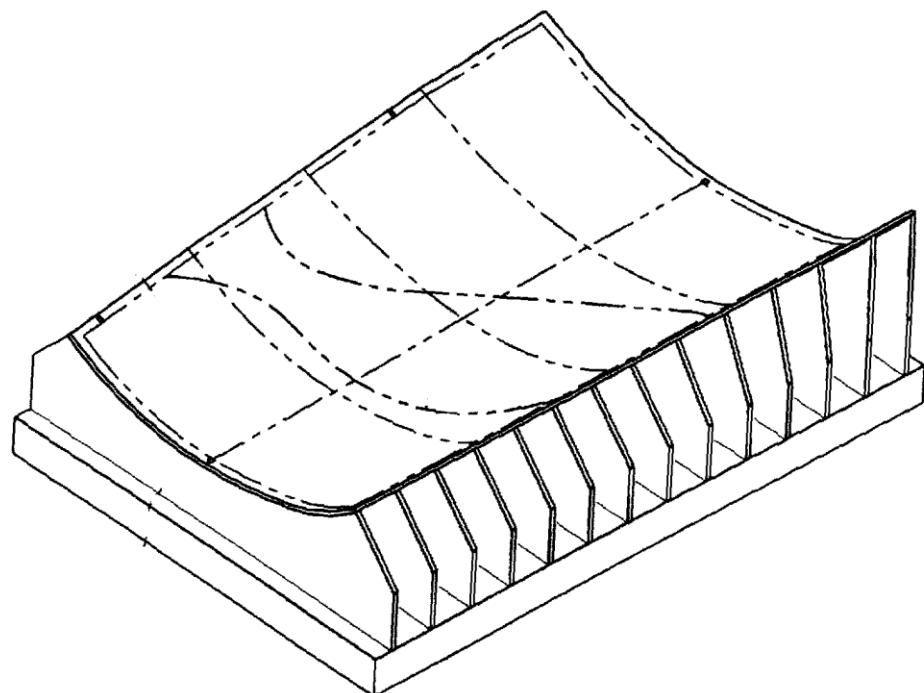


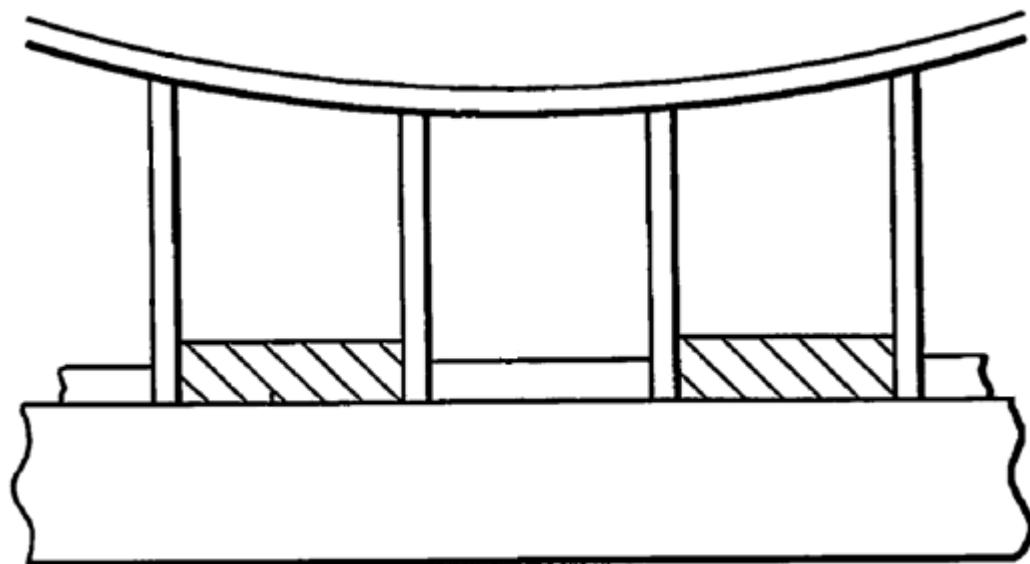
Figura 31. Ferramenta iraniana para conformação por CAF (Jeshvaghani, 2012).

Algumas outras ideias puderam ser retiradas da patente americana US8303729 (2012). Esta patente especifica técnicas construtivas para grandes ferramentas empregadas em na fabricação de peças reais, com curvaturas complexas. O conceito principal é a utilização de estruturas chamadas reforçadores (*ribs*) que servem de apoio para uma superfície de material rígido (geralmente aço inoxidável) sobre a qual a peça é conformada. Este tipo de estrutura possui reduzida capacidade térmica, logo, menor interferência térmica no corpo de provas. A Fig. 31, originalmente retirada da patente, ilustra este detalhe construtivo.

A Fig. 32 ilustra diferentes modelos de ferramentas para ensaio de curvatura simples em CAF.



(a)



(b)

Figura 32. Estrutura de reforçadores (*ribs*) para construção de ferramentais complexos  
(patente americana US8303729, 2012).

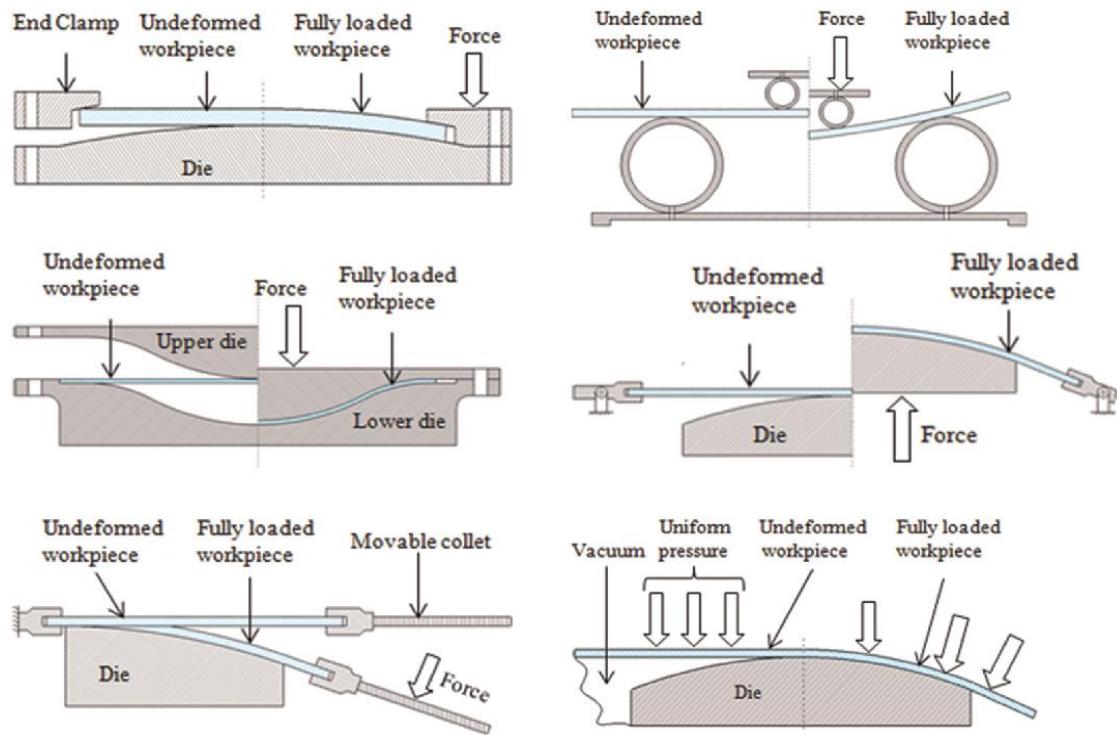


Figura 33 - Modelos de ferramentas para ensaio de curvatura simples em CAF (Yang, 2013)

Diante dos exemplos mostrados nas figuras 30, 31, 32 e 33, foi feito um esforço para poder aproveitar as maiores vantagens de cada um dos exemplos, visando as condições de fabricação disponíveis na EPUSP com uma relação custo benefício adequada especificamente a este trabalho de formatura. Uma primeira ideia obtida pode ser vista na Fig. 34, ainda sem o detalhamento mecânico. Nesta montagem procurou-se satisfazer os requisitos impostos no início e manter a robustez usando barras de aço maciças. O mecanismo responsável por impor a deformação é acionado por um fuso central de grande diâmetro (representado por um cilindro no desenho) que pode ser girado por uma pequena janela na tampa superior do forno. Dois cilindros na parte inferior, fixos à estrutura principal, formam o apoio do corpo de provas. Assim, a sua superfície inferior pode ser livremente monitorada para o controle homogêneo da temperatura. A peça mais importante, que irá impor a curvatura constante à chapa (punção, semelhante à peça superior da ferramenta da Fig. 31), exerce um movimento de translação para baixo e é pressionada pelo fuso.

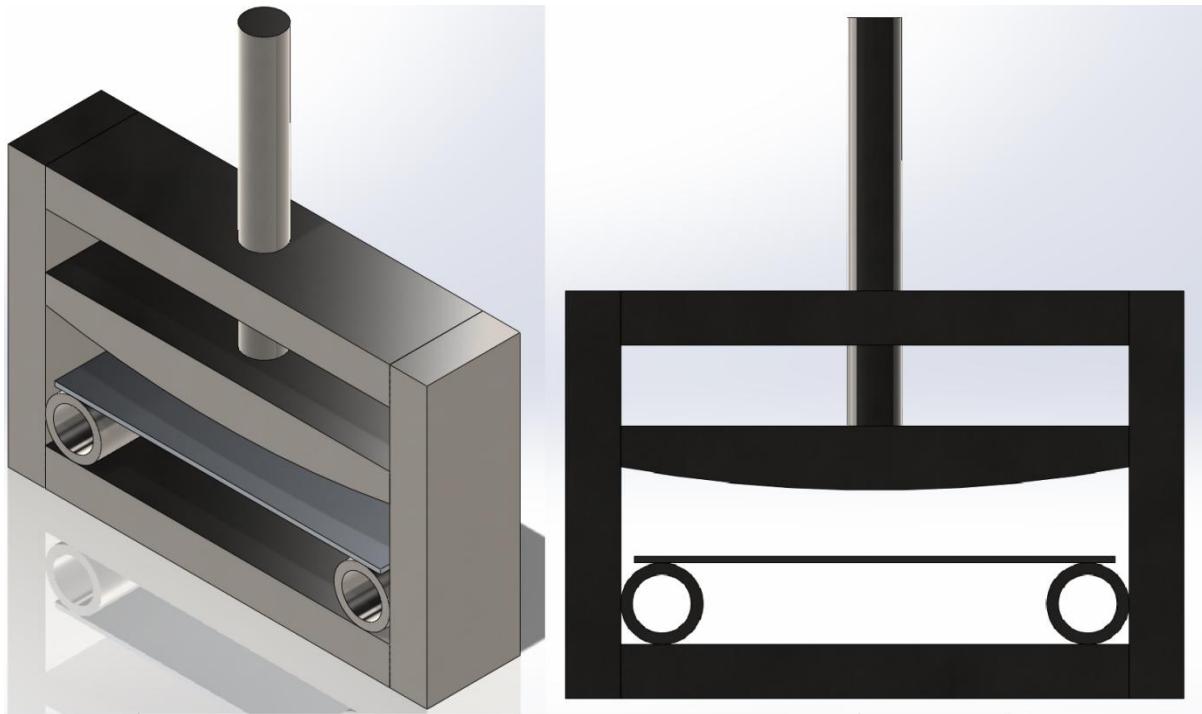


Figura 34. Primeira iteração do desenho da ferramenta.

Após discussão sobre os esforços submetidos e materiais disponíveis para construção, chegou-se a uma segunda e última configuração. As Fig. 35 e 36 ilustram a iteração final que foi posta em fabricação pela oficina. Ela foi feita em aço baixo carbono (estrutura principal) a partir de uma barra quadrada de 32mm de lado. Esta estrutura é montada com parafusos de rosca métrica DIN 13, M16X2,00. Dois parafusos hexagonais compridos, também de 16mm de diâmetro, são rosqueados na parte superior da estrutura e empurram o punção (de aço inox) contra o corpo de provas. Este está apoiado sobre dois cilindros, também de aço inox, fixos na estrutura. Com esta configuração, será possível rosquear os parafusos sem a necessidade de retirar o conjunto do forno.

Na Fig. 36 foi dado destaque à região que corresponde à parte do corpo de provas que foi simulado com Elementos Finitos.

Para operar a ferramenta, basta introduzi-la no forno, esperar a temperatura do corpo de provas e do punção se estabilizarem nos patamares desejados e aplicar o ciclo de CAF explicado na introdução, como se a descida do punção fosse a aplicação de pressão em autoclave. A Fig. 37 ilustra os principais passos tomados nos ensaios.

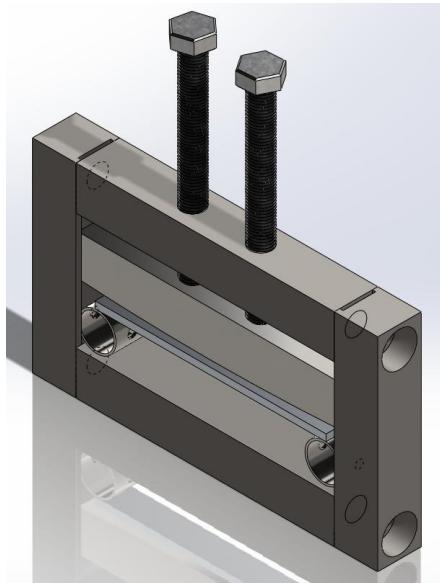


Figura 35. Vista isométrica da ferramenta para simulação experimental de CAF.

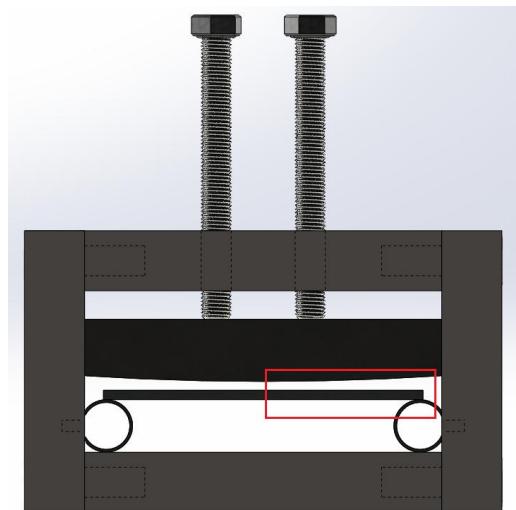


Figura 36. Vista frontal da ferramenta para simulação experimental de CAF. Em destaque, a região que é simulada no ABAQUS e usada para comparação.

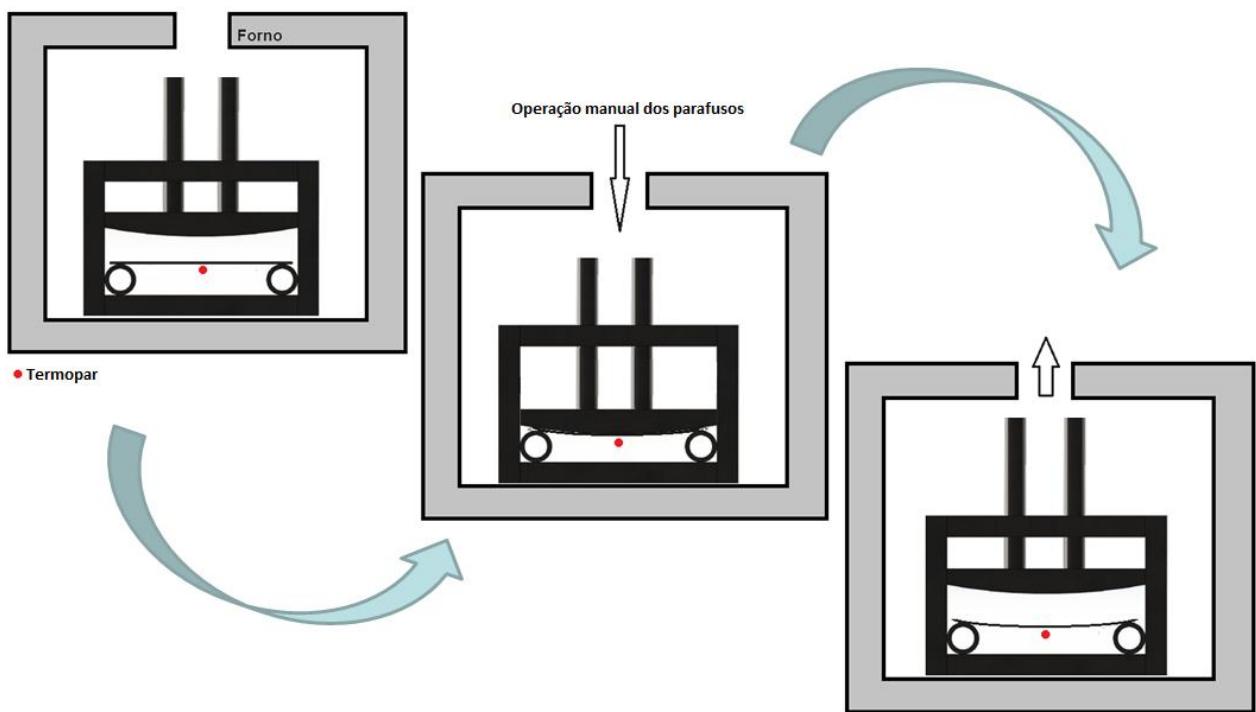


Figura 37. Passos para realização do ensaio de CAF.

### 6.1. Materiais e métodos para a fabricação do protótipo

A ferramenta foi fabricada com materiais encontrados no próprio almoxarifado da oficina da Escola Politécnica. Os únicos itens que precisaram ser comprados foram os parafusos. A Fig. 38 ilustra alguns materiais usados: um perfil quadrado de aço baixo carbono (ABNT1020) de 1,25 polegada de lado; um tubo de aço inoxidável AISI 316; uma chapa de alumínio aeronáutico AA7050 cortada em retângulos de 170mmX20mm com corte a água. Os punções, fabricados em aço inoxidável AISI 304 e com três curvaturas diferentes (1500mm, 2000mm e 2500mm), foram gentilmente cedidos por Brandão (2013).

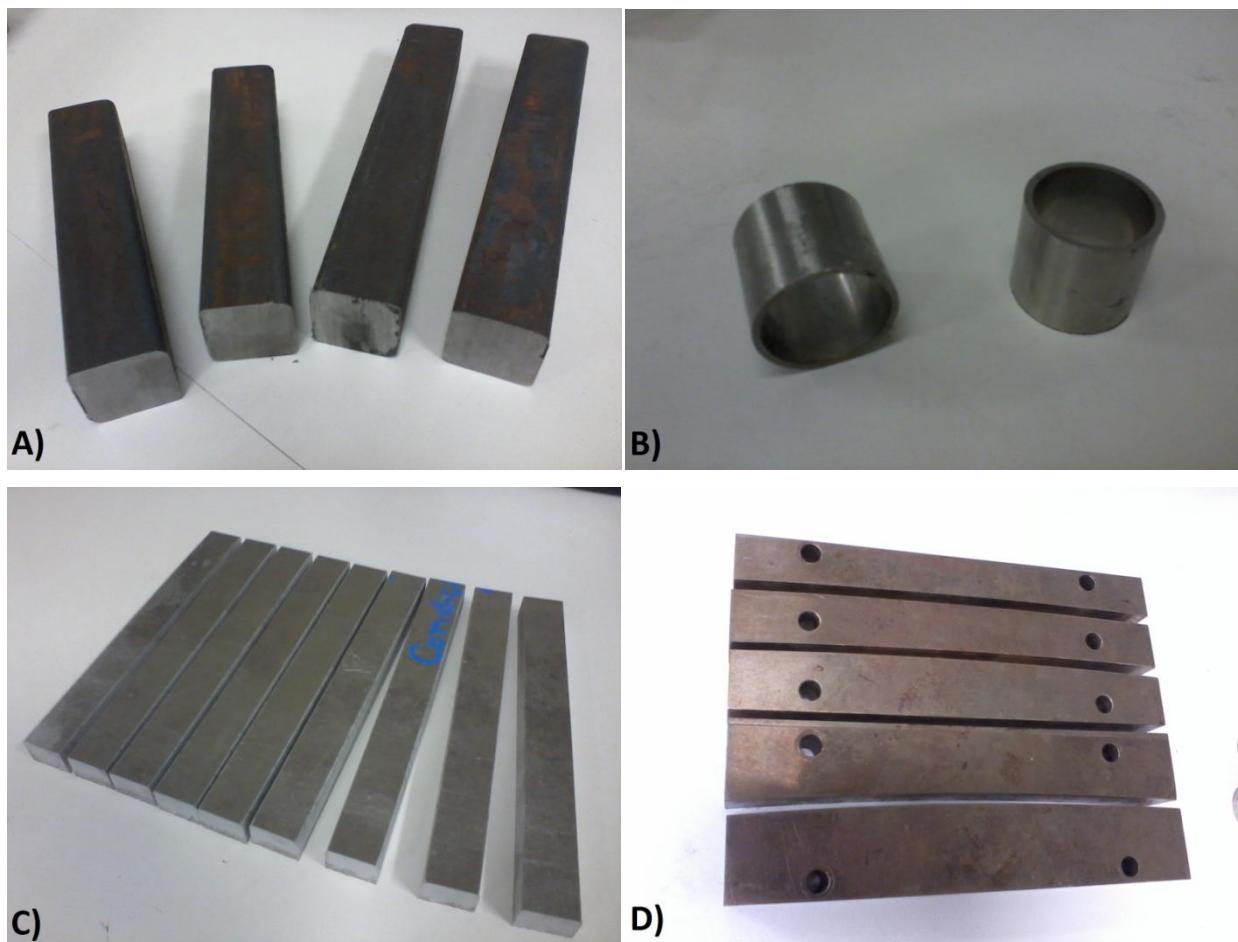


Figura 38. A) Barra quadrada de aço baixo carbono. B) Anéis de aço inox. C) Material para corpo de provas em alumínio aeronáutico. D) Punções usinados em aço inox.

O Apêndice D apresenta os desenhos de fabricação usados para a manufatura do protótipo. Tal procedimento foi realizado na oficina da Escola pelo próprio autor. A Fig. 39 ilustra um processo de fresamento dos corpos de prova com uma fresadora manual.



Figura 39. Fresamento dos corpos de prova para diminuição de espessura.

A Fig. 40 ilustra o mecanismo montado, após a fabricação de todas as peças.



Figura 40. Mecanismo de simulação experimental de CAF.

## 6.2. Análise de Esforços Mecânicos no ferramental CAF

A seguir é feita uma análise simples do esforço necessário para que seja aplicada a força necessária na chapa e seja imposta a curvatura desejada. Para efeito de simplificação, foi utilizado o conceito de viga biengastada (Fig. 41). Neste modelo, é aplicada uma força normal concentrada no meio de uma viga de seção retangular e apoiada nas suas duas extremidades, onde possui liberdade de rotação. Conhecendo o momento de inércia da seção e o módulo de elasticidade do material, pode-se calcular a deflexão obtida. No caso desta ferramenta, será feito o cálculo inverso: calcular a força necessária para uma dada deflexão.

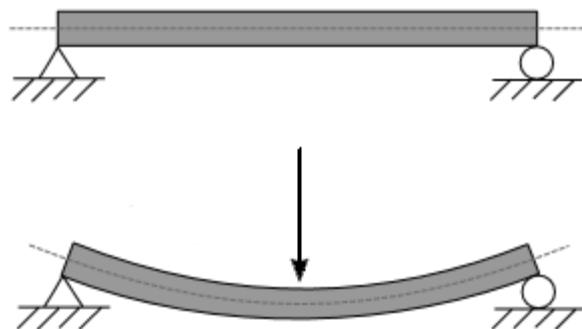


Figura 41. Modelo de viga biapoiada para cálculo de esforços.

A Eq. (20), vinda da mecânica dos sólidos, representa a deflexão sofrida pelo ponto central da viga na direção da aplicação da força concentrada.

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (20)$$

Se substituirmos nesta fórmula o momento de inércia de uma seção retangular (Eq. (21)) e isolarmos a força, obtemos a expressão da Eq. (22).

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (21)$$

$$F = \frac{\delta E 4 b h^3}{L^3} \quad (22)$$

Se escolhermos um valor de curvatura de 1500mm (de raio) e uma peça de 170x20x9mm (corpo de provas mais robusto que será testado), por Pitágoras calcula-se um valor de deflexão de aproximadamente 2.4mm. Usando o valor de E=69Gpa, que é o Módulo de Elasticidade do alumínio, conclui-se ser necessária uma força de 1966N para impor esta deformação.

Os parafusos adquiridos para a aplicação de carga (M16x2,00) são da liga 8.8, também normalizada (DIN 267). Segundo valor tabelado nesta norma, o valor máximo de torque de aperto nestes parafusos é de 210,8Nm.

Desprezando o atrito na rosca, temos que o torque necessário ao parafuso para produzir a força axial  $F$  é dado pela Eq. (23).  $D$  é o raio efetivo do parafuso e  $\alpha$  é o ângulo de hélice, dado pela Eq. (24).

$$T = \frac{D}{2} F \cdot \tan(\alpha) \quad (23)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{Passo}}{\pi D} \quad (24)$$

Os parafusos têm passo de 2mm, e, segundo a norma DIN 13, raio efetivo igual a 14,7mm. Assumindo que a carga máxima que será aplicada seja de 2kN, obtém-se um torque máximo de 0,64Nm, muito abaixo do máximo permitido. Com esta grande margem de segurança e o uso de dois parafusos asseguram que o mecanismo é robusto o suficiente para não deformar de maneira significativa sob o efeito da temperatura e tensão combinadas.

## 6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para aquecer o mecanismo e o corpo de provas a uma temperatura controlada (a mesma dos ensaios uniaxiais usados na modelagem do processo), foi utilizado um forno (Fig. 42) disponível no laboratório com controlador de temperatura. As fontes de aquecimento são resistências de fio e um termopar tipo K faz a realimentação para o controlador. Este mesmo forno é usado para experimentos com superplasticidade em titânio, procedimento que pode atingir temperaturas em torno de 900°C. Logo, este equipamento supera os requisitos deste projeto, que exige temperaturas de no máximo 200°C.



Figura 42. Forno usado para impor temperatura controlada ao experimento.

O procedimento segue o ilustrado na Fig. 37. O mecanismo, já com um corpo de provas inserido (porém, não tensionado), é colocado no forno de modo que seja fácil o monitoramento da temperatura. Foi necessário o uso de um apoio de aço para que o conjunto ficasse a uma altura que facilitasse o contato do termopar, já que este tem um tamanho limitado. A Fig. 43 mostra a posição que o mecanismo foi colocado e o termopar em contato com o corpo de provas.



Figura 43. Posição do mecanismo dentro do forno e termopar em contato direto com o corpo de provas.

Após cerca de 25 minutos, o controle de temperatura se estabiliza no patamar desejado ( $193^{\circ}\text{C}$ ) e pode ser aplicada a carga sobre a chapa. Nesta etapa, o forno é aberto e, com o auxílio de equipamento de segurança adequado, os parafusos são apertados o suficiente para que a chapa de alumínio fique com toda a sua área encostada no punção. O forno é rapidamente fechado para evitar grandes flutuações na temperatura do experimento. Notou-se que uma ocorre uma flutuação inferior a  $5^{\circ}\text{C}$  neste procedimento. Devido ao pouco tempo da perturbação, ela não interfere de forma marcante no resultado final.

Depois de aplicada a deformação, o conjunto fica 9 horas a uma temperatura constante. Neste momento, age sobre o alumínio os mecanismos de fluência e envelhecimentos citados neste trabalho (relaxamento de tensões e endurecimento da liga por precipitação). Após este período, o forno é desligado e o conjunto é retirado do forno, para que ocorra o resfriamento livre, ou seja, em temperatura ambiente. Os parafusos são desapertados para a retirada da deformação forçada. A Fig. 44 destaca o corpo de provas conformado por fluência. Nota-se que a deformação plástica muito pequena.

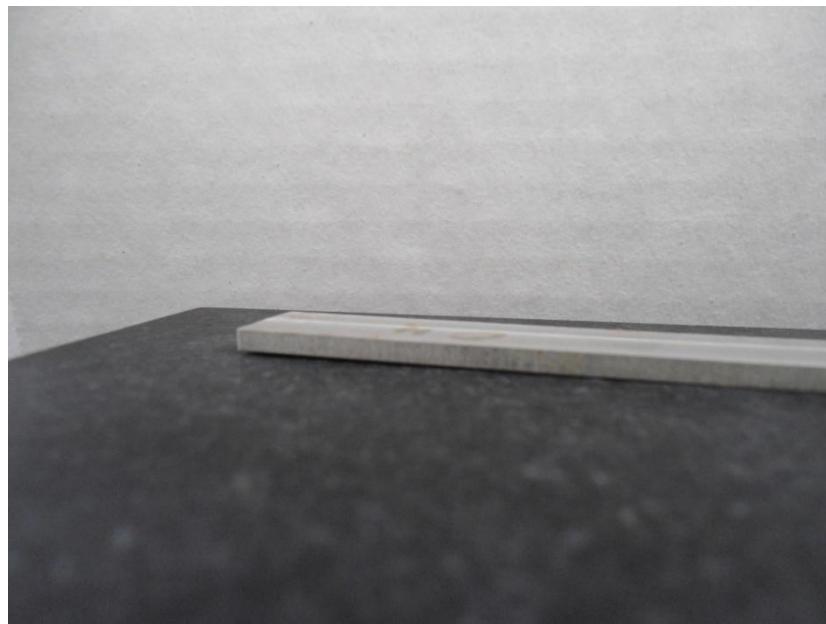


Figura 44. Corpo de provas após experimento de CAF.

### 6.1. Medida de retorno elástico no corpo de provas

Terminado o ensaio, deve-se seguir com um procedimento para medir o retorno elástico da peça. Para isto, é usada uma máquina de medir por coordenadas da marca Mitutoyo, disponível na Escola Politécnica.

Tomando a hipótese de que a deformação está simétrica, são tiradas as medidas de altura de acordo com a Fig. 45. Como a curvatura é muito suave, basta tirar a média das alturas dos pontos em contato com os apoio e comparar com a altura do ponto médio.

Assim, usando a Eq. (19) e o esquema da Fig. 16 (tomando também o deslocamento total do ponto médio para tocar no punção, como já calculado), é possível avaliar com boa precisão o retorno elástico que ocorreu no corpo de provas.



Figura 45. Regiões para medida de altura após o ensaio.

As medidas retiradas do corpo de provas testado foram 3,126mm e 3,047mm para os pontos de contato com o apoio e de 3,784mm para o ponto médio. A Eq. (25) mostra a expressão que resulta no retorno elástico da peça, onde  $S$  é o deslocamento total do ponto médio quando em contato com o punção. O valor obtido foi de 71,5%.

$$R = \frac{b - \frac{(a+c)}{2}}{S} \quad (25)$$

## 7. CONCLUSÕES

O algoritmo codificado em MATLAB para a implementação do tratamento de dados experimentais com algoritmos genéticos seguindo instruções do artigo de Li (2002) mostrou-se muito eficiente aplicado ao problema proposto, apresentando resultados dentro das expectativas.

Simulação em elementos finitos para uma peça de curvatura simples apresentou bom resultado com modelagem em feita em 2D. A peça simulada apresentou uma relaxação de tensões de 28% durante o período de envelhecimento (de 43MPa para 31MPa de tensão máxima), com uma tensão residual de menos de 0,3MPa. Para a concretização destes resultados, foi escrita uma subrotina em Fortran que descrevesse as características mecânicas da liga, munida do modelo discutido neste trabalho e dos resultados dos dados experimentais.

Foi desenhada, projetada e construída uma ferramenta para conformação por fluência em menor escala. Chegou-se em um projeto que tenta contornar ao máximo os problemas que são enfrentados para a correta aplicação de carga e controle de temperatura. Notou-se que a ferramenta possui rigidez e resistência suficientes para resistir a vários ensaios, além de que foi possível satisfazer os requisitos do projeto com uma solução de baixo custo.

Foi feito um ensaio com uma temperatura constante de 193°C, por 9 horas. O corpo de provas foi medido com uma máquina de medição por coordenadas, que indicou um retorno elástico de 71,5%, enquanto a simulação chegou a um valor de 73,8%. Isto representa um erro de 3,1%.

Houve uma proximidade satisfatória entre os resultados, já que o erro obtido foi baixo e comparável aos vistos na literatura. Mais ensaios, com punções de curvaturas diferentes e corpos de prova de espessura diferente serão realizados no futuro. Assim será possível avaliar o erro e tirar conclusões sobre a sua natureza, como dizer se é sistemático (associado a alguma etapa do procedimento) ou aleatório (ocorreu apenas neste experimento).

As duas simulações estabelecidas (numérica e experimental) constituem uma estrutura de validação de qualquer modelo de conformação por fluênciа que se deseje implementar.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABAQUS, **Manual do usuário**, versão 6.10 (2010). Hibbit, Karlsson & Sorensen
- Brandão, F. M., **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.
- Eberl F., Gardiner S., Campanile G., Surdon G., Venmans M., Prangnell P., **Ageformable panels for commercial aircraft**, International Council of the Aeronautical Sciences ICAS (2006).
- Guines D., Gavrus A., Ragneau E., **Numerical Modelling of Integrally Stiffened Structures Forming from Creep Age Forming Technique**. Int. J. Mater. Form. 2008, 1,1071–1074.
- Ho K. C., Lin J., Dean T. A., **Constitutive modeling of primary creep for age forming an aluminum alloy**, Journal of Material Processing Technology 153 - 154 (2004) 122 - 7.
- Ho KC, Lin J, Dean TA. **Modelling of springback in creep forming thick aluminium sheets**, Int J Plasticity 20(2004) 733–51.
- Holman, M. C, **Autoclave age forming large aluminum aircraft panels**, Journal of Mechanical Working Technology, v.46, n. 11, p.477-488, 1989.
- Jeshvaghani R. A., Shahverdi, H. R. Hadavi, S. M. M. **Investigation of the age hardening and operative deformation mechanism of 7075 aluminum alloy under creep forming**, Materials Science & Engineering: A, Vol. 552 (2012), pp. 172-178.
- Kowalewski Z. L., Hayhurst D. R., Dyson B. F., **Mechanism-Based Creep Constitutive Equations for an Aluminium Alloy**. J. Strain Anal. 1994, 29, 309–316.
- Levers, **Aircraft component manufacturing tool and method**: US8303729 (2012).
- Li B, Lin J, Yao X.A **Novel evolutionary algorithm for determining unified creep damage constitutive equations**. Int J MechSci44(5) (2002) 987–1002.

Lin H., Min W., Cailou C., Xiusheng J., **FEM analysis of spring-backs in age forming of aluminum alloy plates**, Chinese Journal of Aeronautics 20(2007) 564-569

Lin Y. C., Jiang Y. Q., Chen X. M., Wen D. X., Zhou H. M., **Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy**, Materials Science & Engineering: A, Vol. 588 (2013), pp. 347-356

Ribeiro, F. C.; Marinho, E. P.; Inforzato, D. J.; Costa, P. R.; Batalha, G. F. **Creep Age Forming: A Short Review of Fundaments and Applications**, J. Achieve. Mater. Manufact. Eng 43/1 (2010) 353–361.

Sallah M., Peddieson J., Jr., Foroudastan S., **A Mathematical Model of Autoclave Age Forming**, J. Mater. Process. Tech. (1991) 28, 211–219.

Spigarelli S., **Creep of Aluminum and Aluminum Alloys**, TALAT Lecture 1253, TALAT

Stouffer, D. C. **Inelastic Deformation of Metals**, First Edition, John Wiley, EUA, 1996

Watcham K., **Airbus A380 takes creep age-forming to new heights**, Materials World 12/2 (2004) 10-11

Yang H., Davies C. M., Lin J., Dear J. P., **Prediction and assessment of springback in typical creep age forming tools**, Journal of Engineering Manufacture (2013) 227: 1340

Zhan L., Lin J., Dean T. A., **A review of the development of creep age forming: experimentation, modelling and applications**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 51 (2011) 1-17.

## 9. APÊNDICE A - CÓDIGO DO ALGORITMO GENÉTICO EM MATLAB

```

global time Y

%% Parâmetros
%condições iniciais
A = 2e-7;
B = 0.06;
h = 90;
n = 0.7;
H_SAT = 0.47;

%tensões (ksi)
T1=sigma1*6.895;
T2=sigma2*6.895;
T3=sigma3*6.895;
T4=sigma4*6.895;

%Desvio Padrão para gerar população inicial
d = 0.2;

%Desvio Padrão para as mutações
sd = 1;

%critério de parada
tol=0.01;

%discretização das curvas
p=0.1;

%arquivos
F1 = xlsread('7010_1.xlsx');
F2 = xlsread('7010_2.xlsx');
F3 = xlsread('7010_3.xlsx');
F4 = xlsread('7010_4.xlsx');

%% Preparação dos dados e parâmetros iniciais

t1o = F1(:,1);
E1o = F1(:,2);
t1 = (0:p:max(F1(:,1)))';
E1 = interp1(t1o,E1o,t1);

t2o = F2(:,1);
E2o = F2(:,2);
t2 = (0:p:max(F2(:,1)))';
E2 = interp1(t2o,E2o,t2);

```

```

t3o = F3(:,1);
E3o = F3(:,2);
t3 = (0:p:max(F3(:,1)))';
E3 = interp1(t3o,E3o,t3);

t4o = F4(:,1);
E4o = F4(:,2);
t4 = (0:p:max(F4(:,1)))';
E4 = interp1(t4o,E4o,t4);

X=zeros(30,5,2);
Xc=zeros(10,5);
W=zeros(20,5,2);
Dev=ones(30,1);

X(1,:,:)= [A B h n H_SAT];

for i=2:20
    X(i,:,:)= [(A + A*normrnd(0,d)) (B + B*normrnd(0,d)) (h + h*normrnd(0,d)) (n + n*normrnd(0,d)) (H_SAT
    + H_SAT*normrnd(0,d))];%populacao inicial
end

for i=1:20
    X(i,:,:)= [1E-8 0.001 10 0.01 0.01];%desvios padroes iniciais
end

for i=1:20
    OF(1) = objective_function(t1,E1,T1,X(i,:,:)); %avaliacao da populacao inicial
    OF(2) = objective_function(t2,E2,T2,X(i,:,:));
    OF(3) = objective_function(t3,E3,T3,X(i,:,:));
    OF(4) = objective_function(t4,E4,T4,X(i,:,:));
    Dev(i) = sum(OF);
end

for i=1:20 %Ordenação dos indivíduos
j=i;
while j~=1 && Dev(j)<Dev(j-1)
aux=Dev(j);
aux2=X(j,:,:);
Dev(j)=Dev(j-1);
X(j,:,:)=X(j-1,:,:);
Dev(j-1)=aux;
X(j-1,:,:)=aux2;
j=j-1;
end
end

Devmin=min(Dev);

%% Algoritmo GA

```

```

while Devmin>tol

display(Devmin);

for m=21:30
r=normrnd(0,1);%N(0,1)
for i=1:5
if i~=2
Xc(m-20,i) = X((m-20),i,1) + X((m-20),i,2)*sd*tan((2*(rand(1)) - 1)*pi/2); %Cauchy
end
X(m,i,1) = X((m-20),i,1) + X((m-20),i,2)*normrnd(0,1); %Normal

X(m,i,2) = X((m-20),i,2)*exp(0.47*r + 0.4*normrnd(0,1)); %proximos desvios
end
end

for i=21:30
OF(1) = objective_function(t1,E1,T1,X(i,:,1)); %avaliacao das mutações pela distribuição Normal
OF(2) = objective_function(t2,E2,T2,X(i,:,1));
OF(3) = objective_function(t3,E3,T3,X(i,:,1));
OF(4) = objective_function(t4,E4,T4,X(i,:,1));
Dev(i) = sum(OF);

OF(1) = objective_function(t1,E1,T1,Xc(i-20,:)); %avaliacao das mutações pela distribuição de Cauchy
OF(2) = objective_function(t2,E2,T2,Xc(i-20,:));
OF(3) = objective_function(t3,E3,T3,Xc(i-20,:));
OF(4) = objective_function(t4,E4,T4,Xc(i-20,:));
Devc = sum(OF);

if Devc<Dev(i)
X(i,:,1) = Xc(i-20,:);
Dev(i) = Devc;
end
end

for i=1:30 %Ordenação dos indivíduos
j=i;
while j~=1 && Dev(j)<Dev(j-1)
aux=Dev(j);
aux2=X(j,:,:);
Dev(j)=Dev(j-1);
X(j,:,:)=X(j-1,:,:);
Dev(j-1)=aux;
X(j-1,:,:)=aux2;
j=j-1;
end
end
[Devmin,u]= min(Dev);
end

```

```
%% Vizualização
result=X(u,:,1);

OF(1) = objective_function(t1,E1,T1,result);
Y1 = Y;
time1 = time;
Y = 0;
time = 0;
OF(2) = objective_function(t2,E2,T2,result);
Y2 = Y;
time2 = time;
Y = 0;
time = 0;
OF(3) = objective_function(t3,E3,T3,result);
Y3 = Y;
time3 = time;
Y = 0;
time = 0;
OF(4) = objective_function(t4,E4,T4,result);
Y4 = Y;
time4 = time;
Y = 0;
time = 0;

plot(time1,Y1(:,2),[t1,E1(:,1)];
title([num2str(T1) ' , ' num2str(T2) ' , ' num2str(T3) ' and ' num2str(T4) ' MPa']);
ylabel('strain');
xlabel('time (h)');

holdon;

plot(time2,Y2(:,2),[t2,E2(:,1)];
holdon;

plot(time3,Y3(:,2),[t3,E3(:,1)];
holdon;

plot(time4,Y4(:,2),[t4,E4(:,1)];
```

## 10. APÊNDICE B - FUNÇÃO OBJETIVO EM MATLAB

```
function [OF] = objective_function(t,E,T,X)

global time Y

options = odeset('RelTol',1e-3,'AbsTol',1e-6);
[time,Y] = ode45(@(t,y)equations(y,X,T),t,[0 0],options);

OF = sum((1000*(E(:,1)-Y(:,2))).^2);

function dy = equations(y,X,T)

dy = zeros(2,1);
dy(1) = (X(1)*(sinh(X(2)*(T)*(1-y(1))))) * X(3)*(T^X(4))*(1-(y(1)/X(5)));
dy(2) = X(1)*(sinh(X(2)*(T)*(1-y(1))));
```

## 11. APÊNDICE C - SUBROTINA EM FORTRAN PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE FLUÊNCIA

```

C*****
C*** ***
C User defined strain rate dependent material ***
C Bruno Tarabola Scarpin - Escola Politécnica da USP
C*** ***
C*****
SUBROUTINE SDVINI(STATEV,COORDS,NSTATV,NCRDS,NOEL,NPT,
1 LAYER,KSPT)
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'

C
DIMENSION STATEV(NSTATV),COORDS(NCRDS)
STATEV(1)=0.0
RETURN
END

C
SUBROUTINE CREEP(DECRA,DESWA,STATEV,SERD,EC,ESW,P,QTILD,
1 TEMP,DTEMP,PREDEF,DPRED,TIME,DTIME,CMNAME,LEXIMP,LEND,
2 COORDS,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,KSTEP,KINC)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER*80 CMNAME
C
DIMENSION DECRA(5),DESWA(5),STATEV(1),PREDEF(*),DPRED(*),
1 TIME(2),COORDS(*),EC(2),ESW(2)
C
C
DOUBLE PRECISION A,B,r,n,HSAT
C
DO J=1,5
DECRA(J)=0.0
END DO

C-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
C Defining material constants
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
A =
B =
r =
n =
HSAT =
C
C State Variable (back stress)
C
IF(STATEV(1).LE.0) THEN

```

```

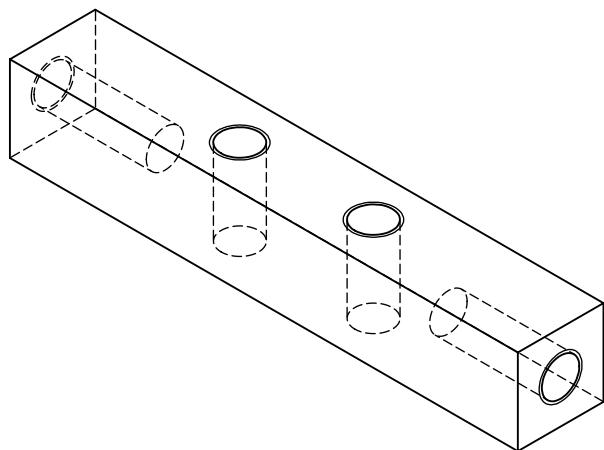
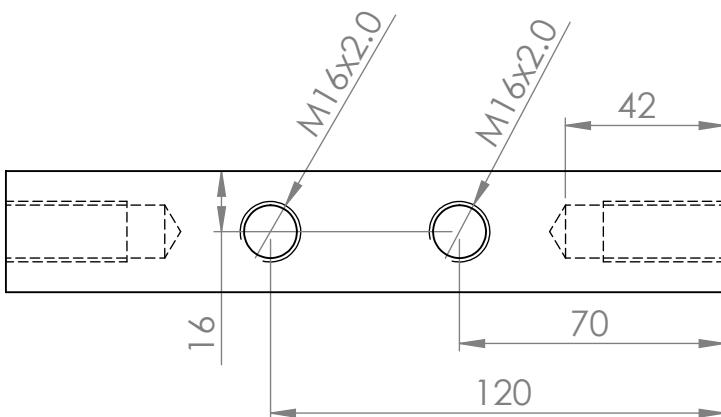
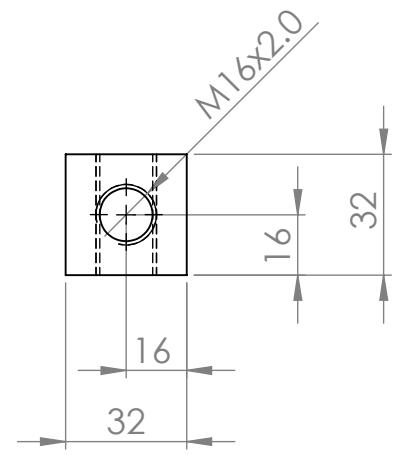
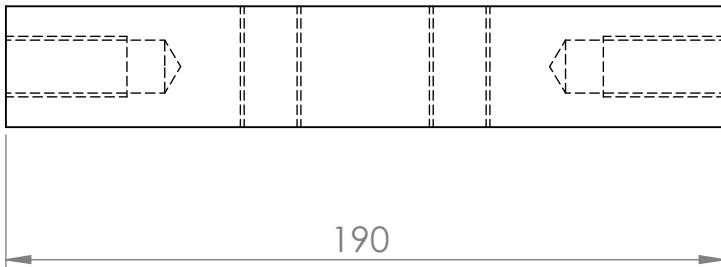
STATEV(1)=0.0
END IF
IF(STATEV(1).GE.HSAT) THEN
  STATEV(1)=HSAT
END IF
C
H = STATEV(1)
C
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
C Strain increment for implicit and explicit integration
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
C
T1=EXP(B*QTILD*(1.0-H))
T2=EXP(-B*QTILD*(1.0-H))
DECRA(1) = A*(.5*(T1-T2))*DTIME
IF(LEXIMP.EQ.1) THEN
  DECRA(5) = A*B*(1.0-H)*(5*(T1+T2))*DTIME
ENDIF
C
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
C State variable increment
C-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
C
incH = (A*(.5*(T1-T2)))*(r/(QTILD**n))*
  1 (1.0-(H/HSAT))
C
C Updating back stress
C
H = H + incH*DTIME
STATEV(1) = H
C
WRITE(*,*)'H',STATEV(1)
WRITE(*,*)'DECRA1',DECRA(1)
C
RETURN
END

```

## 12. APÊNDICE D - DESENHOS DE FABRICAÇÃO PARA FERRAMENTAL

Lista de desenhos:

- **Topo:** Componente superior da estrutura
- **Lateral:** Componente lateral da estrutura
- **Base:** Componente inferior da estrutura
- **Corpo de provas:** Elemento a ser ensaiado com diferentes espessuras
- **Apoio:** Componente cilíndrico que oferece o apoio ao corpo de provas contra o punção
- **Punção:** Punção com curvatura simples de 1500, 2000 ou 2500mm de raio



TOLERÂNCIA GERAL (SE NÃO ESPECIFICADA):  
LINEAR: +/- 0,1mm  
ANGULAR: +/- 1°

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

# Trabalho de Formatura

TÍTULO:

## Topo

PROJETISTA:

Bruno Scarpin

DATA:

15/08/2013

REVISOR:

Bruno Scarpin

DATA:

12/09/2013

FOLHA:

A4

NÚMERO DO DESENHO

F001

REVISÃO:

1

DESENHISTA:

Bruno Scarpin

DATA:

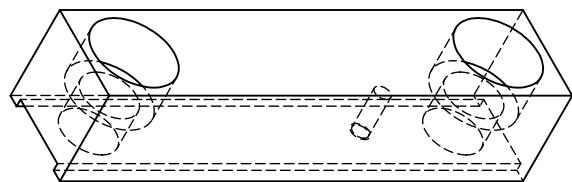
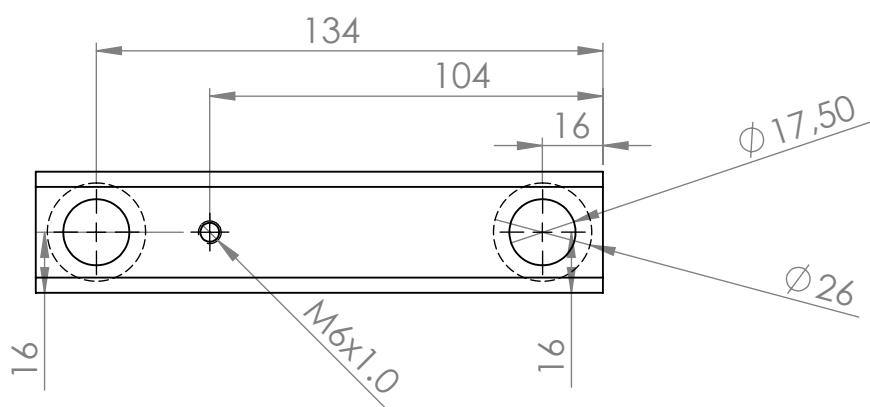
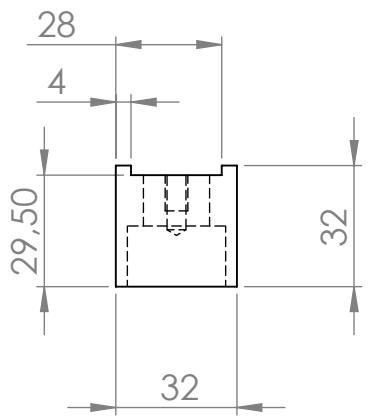
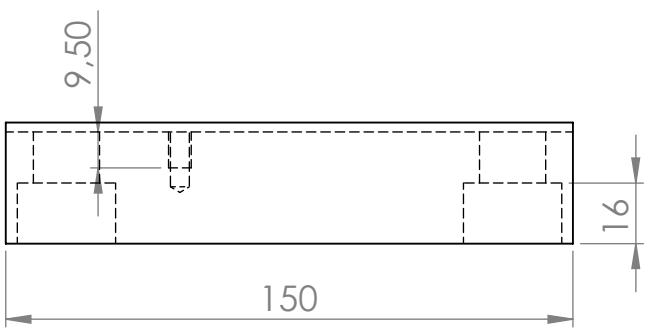
15/08/2013

ESCALA:1:2

MATERIAL:

ANSI 1020

PÁGINA 1 DE 1



TOLERÂNCIA GERAL (SE NÃO ESPECIFICADA):  
LINEAR:  $\pm 0,1\text{mm}$   
ANGULAR:  $\pm 1^\circ$

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

# Trabalho de Formatura

## Lateral

TÍTULO:

PROJETISTA:

Bruno Scarpin

DATA:

15/08/2013

REVISOR:

Bruno Scarpin

DATA:

12/09/2013

FOLHA:

A4

NÚMERO DO DESENHO

F001

REVISÃO:

1

DESENHISTA:

Bruno Scarpin

DATA:

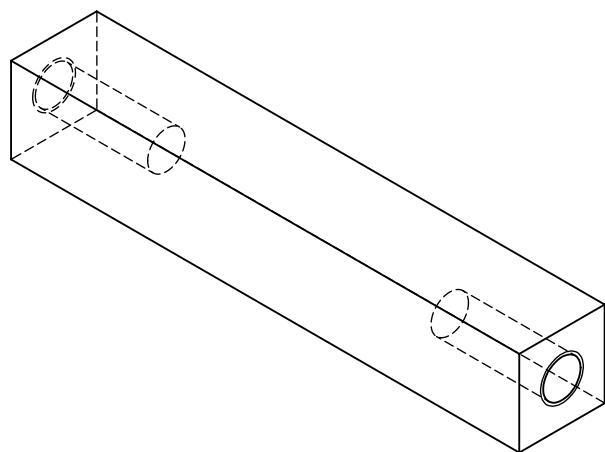
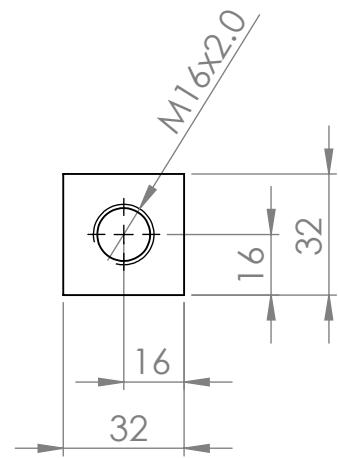
15/08/2013

ESCALA:1:2

MATERIAL:

ANSI 1020

PÁGINA 1 DE 1



TOLERÂNCIA GERAL (SE NÃO ESPECIFICADA):  
LINEAR:  $\pm 0,1\text{mm}$   
ANGULAR:  $\pm 1^\circ$

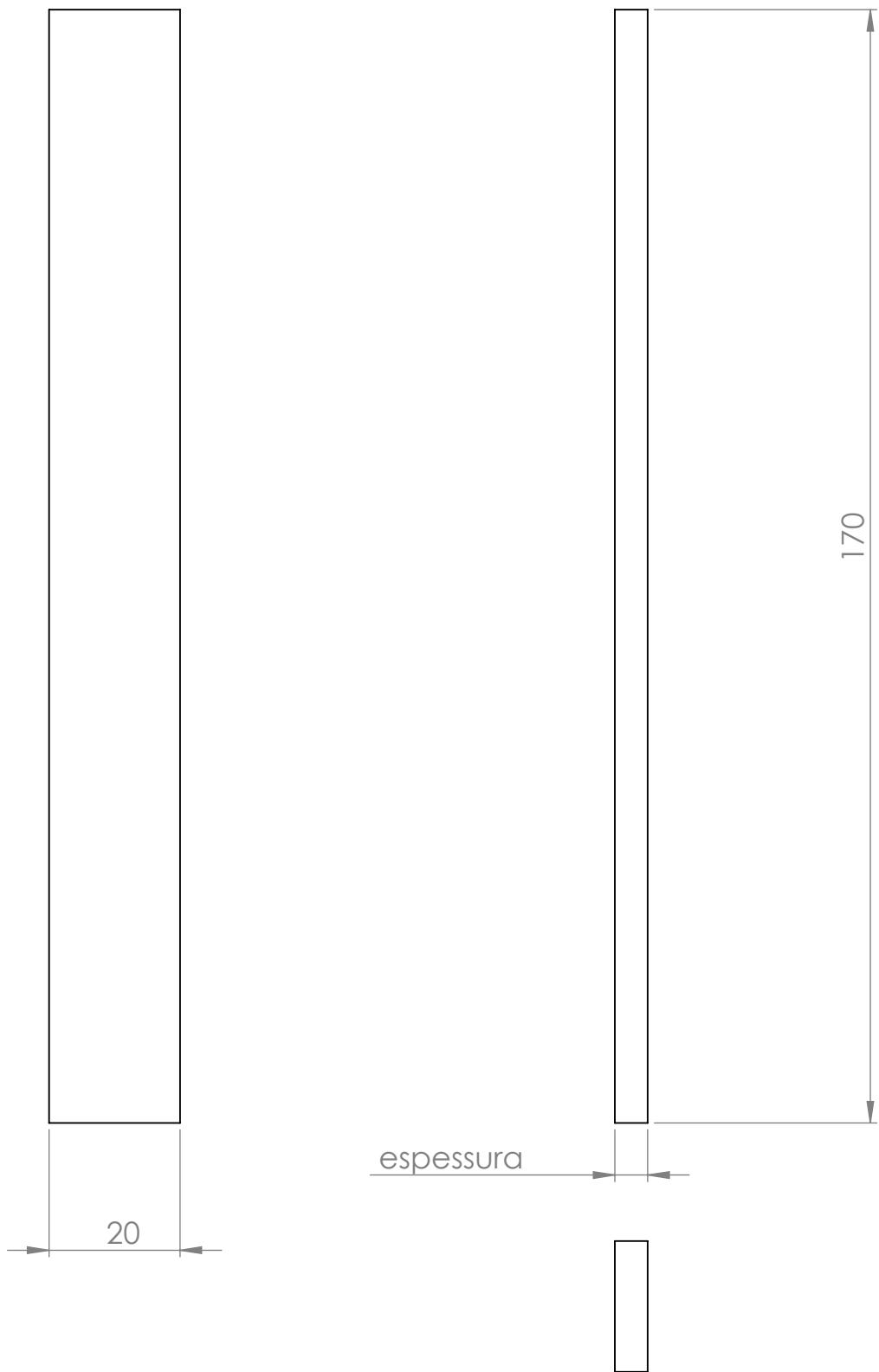
Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

# Trabalho de Formatura

TÍTULO:

Base

PROJETISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013	FOLHA: A4	NÚMERO DO DESENHO F001	REVISÃO: 1
REVISOR: Bruno Scarpin	DATA: 12/09/2013			
DESENHISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013	ESCALA:1:2	MATERIAL: ANSI 1020	PÁGINA 1 DE 1



TOLERÂNCIA GERAL (SE NÃO ESPECIFICADA):  
LINEAR:  $\pm 0,1\text{mm}$   
ANGULAR:  $\pm 1^\circ$

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

# Trabalho de Formatura

TÍTULO:

## Corpo de provas

PROJETISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013
------------------------------	---------------------

REVISÃO:  
1

REVISOR: Bruno Scarpin	DATA: 12/09/2013
---------------------------	---------------------

FOLHA: A4	NÚMERO DO DESENHO
--------------	-------------------

F001

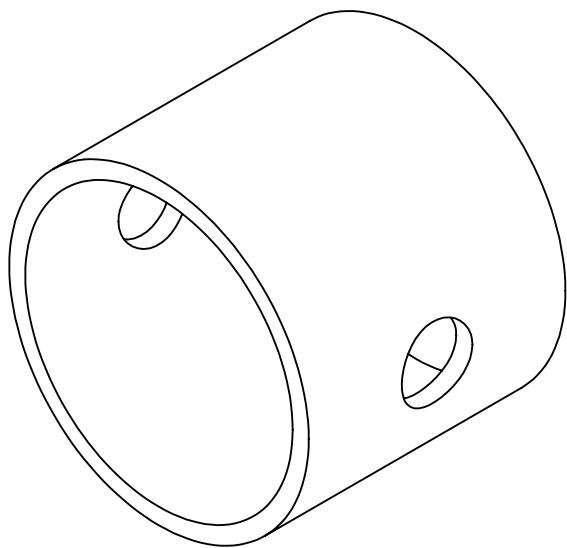
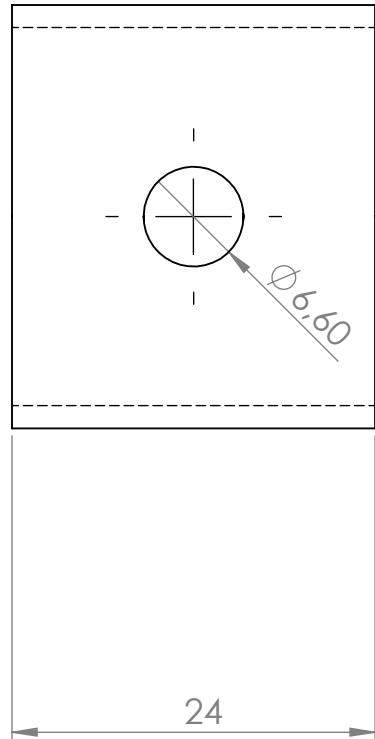
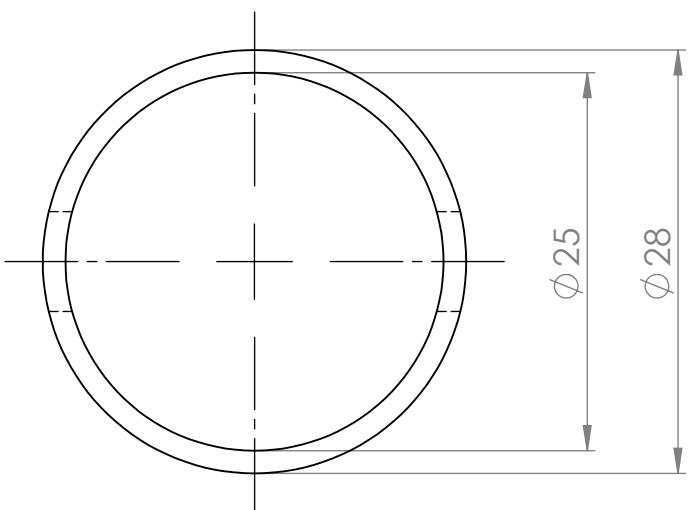
DESENHISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013
------------------------------	---------------------

ESCALA:1:1

MATERIAL:

AA7050

PÁGINA 1 DE 1



TOLERÂNCIA GERAL (SE NÃO ESPECIFICADA):  
LINEAR:  $\pm 0,1\text{mm}$   
ANGULAR:  $\pm 1^\circ$

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

# Trabalho de Formatura

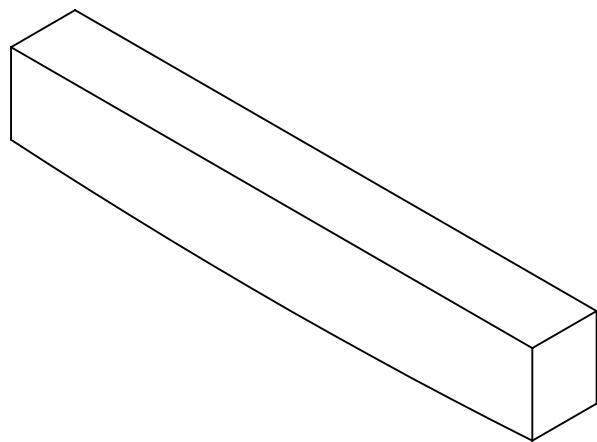
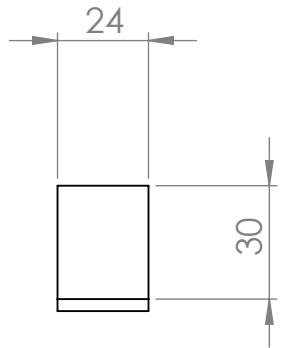
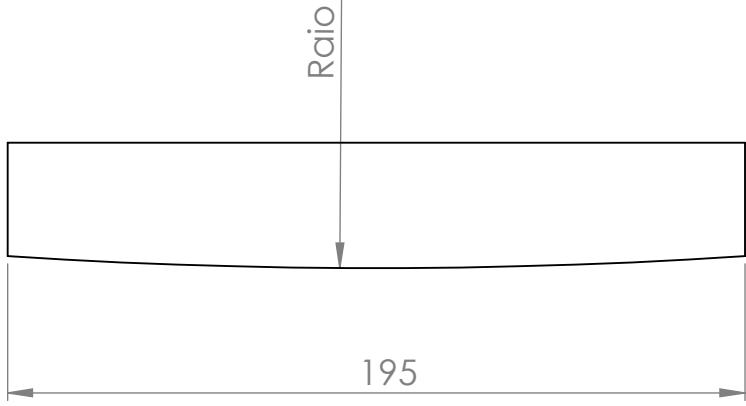
## Apoio

TÍTULO:

PROJETISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013
------------------------------	---------------------

REVISOR: Bruno Scarpin	DATA: 12/09/2013	FOLHA: A4	NÚMERO DO DESENHO
---------------------------	---------------------	--------------	-------------------

DESENHISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013	ESCALA:2:1	MATERIAL: AISI 316	REVISÃO: 1	PÁGINA 1 DE 1
------------------------------	---------------------	------------	-----------------------	---------------	---------------



TOLERÂNCIA GERAL (SE NÃO ESPECIFICADA):  
LINEAR:  $\pm 0,1\text{mm}$   
ANGULAR:  $\pm 1^\circ$

Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

# Trabalho de Formatura

TÍTULO:

## Punção

PROJETISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013	FOLHA: A4	NÚMERO DO DESENHO F001	REVISÃO: 1
REVISOR: Bruno Scarpin	DATA: 12/09/2013			
DESENHISTA: Bruno Scarpin	DATA: 15/08/2013	ESCALA:1:1	MATERIAL: AISI 316	PÁGINA 1 DE 1