

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

**“UMA CONTRIBUIÇÃO AO FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA DE EIXOS
VAZADOS”**

GIANPAULO ALVES MEDEIROS

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

“UMA CONTRIBUIÇÃO AO FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA DE EIXOS VAZADOS”

GIANPAULO ALVES MEDEIROS
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button
Unicamp

Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Junior
PPGEM / UFRGS

Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito
UFRGS

Prof. Dr. Telmo Antônio Strohecker
Coordenador do PPGEM

“O futuro é forjado com a força dos homens de coragem.” Paulo Cesar Medeiros

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus nosso Senhor e minha família.

Ao Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer pela confiança e orientação nesta dissertação de mestrado.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenado pelo Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer, pela disponibilização da infraestrutura que utilizei durante a execução deste projeto.

Ao Dr. Eng^o Alberto Guerreiro Moreira de Brito e ao Prof. Dr. Eng^o Alexandre Rocha, pela paciência e auxílio nas dúvidas que surgiram ao longo deste período de estudos.

A Universidade Técnica de Aachen (*RWTH Aachen University*) pela parceria no projeto BRAGECRIM 023/12. Em especial ao Prof. Dr.-Ing Gehard Hirt, ao Dipl. Math David Schäfer e ao Me. Eng. Mauricio Santaella.

Aos colegas Diego Simões de Lima, Vinicius Martins, Luiz Folle, Alex Bueno, Harold Luna, Patrick Bonaldi, Maiquel Pfungstag, Alexsandro Moraes, Tomaz Fantin, Uilian Boff, Christiane Rosado, Daiana Margutti, Carla Sousa, Paulo Boesch, Angela Selau, Diego Lovatel, Moritz Muhr e Marcelo Pieta, Marco A. Villanova e Luis Eduardo Pinow Ribas.

Aos revisores do trabalho Engs. Tiago de Sá Gomes e Tiago Colombo.

As empresas Aços Favorit Distribuidora Ltda, e Villares Metals S.A..

Ao CNPq pela bolsa de mestrado que me financiou neste período. A CAPES que financiou o projeto BRAGECRIM 023/12 e minha missão de estudo na Alemanha.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho analisa as etapas de fabricação, por Forjamento em Matriz Aberta, de um eixo vazado em aço ABNT 4140 (~DIN número 1.7225, grau 42CrMo4), com auxílio da simulação numérica computacional utilizando o *software* PEP/LARSTRAN. Com base nos resultados de simulação obtidos foram feitas alterações no modelo e adaptações nas simulações numéricas, visando a obtenção de um processo confiável. A estratégia final desenvolvida por simulação se tratou de um forjamento de todo o perímetro do diâmetro externo da pré-forma e subsequente avanço longitudinal do ferramental para repetir o mesmo ciclo de forjamento. Esta estratégia de forjamento foi utilizada para realizar um forjamento de um eixo piloto, no qual ocorreu o forjamento do eixo a 1200 °C, a uma velocidade de 80 mm/s, com recalque de 20 mm por batida. O resultado obtido foi um eixo com alongamento $\Delta l = 77\%$ sem deformação significativa do diâmetro interno. Os resultados obtidos estão relativamente de acordo com a simulação numérica computacional.

ABSTRACT

This paper analyzes hot forging steps of a hollow shaft by the open die forging process. The study was aided by numerical simulation using the software PEP/LARSTRAN. The material used was a steel ABNT 4140 (~DIN number 1.7225, grade 42CrMo4). The proposed process was simulated and optimized sequentially. That means several changes in the numerical model and simulation in order to obtain a feasible process. The final strategy developed by simulation was forge initially the entire perimeter of the preform with its outer diameter and subsequently forward longitudinally with the same tools to repeat the complete forging cycle. The tool set was a flat upper die and a V-profile lower die. A pilot shaft was forged to test the final forging strategy developed by simulation. The physical experiment was carried out with the workpiece at 1200 °C. The tool speed was 80 mm/s and the stroke was 20 mm per blow. It was obtained 77% final elongation of the part without significant deformation of internal diameter. The experimental results are in relatively good agreement with the numerical simulations.

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1 – Eixo forjado para aerogeradores. Cortesia: Villares Metals S.A.....	16
Figura 2 – Fluxograma das simulações computacionais e do experimento físico.	19
Figura 3 - Forjamento em Matriz Aberta de eixos de grande dimensão	20
Figura 4 – Eixos maciços semiacabados	21
Figura 5 - Relações geométricas em matriz aberta	23
Figura 6 - (a) Curvas de escoamento a 1.000°C e 1.100°C; (b) Curvas de escoamento a 900°C	25
Figura 7 - Eixo forjado, usinado e trepanado para aplicação em aerogerador.....	29
Figura 8 - Metodologia de desenvolvimento de projetos assistidos por simulação numérica.....	33
Figura 9 - Menu CHEF do PEP.	35
Figura 10 - Esquema do forjamento de eixo em matriz aberta.....	36
Figura 11 - Modelagem de peça em 2D	37
Figura 12 - Modelo 3D gerado em estrutura de arame que constitui a malha gerada automaticamente: em detalhe elementos 2D sobressalentes.	38
Figura 13 - Peça e Malha representada como um sólido: em verde elementos 2D sobressalentes.	38
Figura 14 - Malha gerada automaticamente pela revolução: vista isométrica superior e frontal.	39
Figura 15 - Malha após otimização na vista isométrica e frontal.....	39
Figura 16 - Passo a passo do procedimento de construção da ferramenta de recalque.	40
Figura 17 - Modelo 3D da ferramenta construída, vista isométrica.	40
Figura 18 - Três passos da construção do mandril em vista isométrica.....	40
Figura 19 - Modelo montado e posicionado pronto para a simulação: em vista isométrica e lateral esquerda.	41
Figura 20 – Modelo 3D.....	41
Figura 21 - Modelo 3D do mandril.....	43
Figura 22 - Modelo construído.....	43
Figura 23 - Ciclo de forjamento proposto pra a fabricação de um eixo vazado.....	44

Figura 24 - a) Modelo sem adaptações; b) Modelo com fixadores de nós (indicados pela seta).....	45
Figura 25 - a) Modelo com placa de contenção de fluxo de material (<i>plate</i>); b) Modelo com mandril com batente (vista frontal).....	45
Figura 26 - Dados de programa utilizados na simulação computacional II.	46
Figura 27 - a) Modelo com placa; b) modelo com nós fixados.	48
Figura 28 - Ciclo de forjamento adotado.	48
Figura 29 - Posições de medição na peça na vista frontal.	49
Figura 30 - Posição inicial de forjamento: a) matrizes planas; b) matriz inferior em V.	50
Figura 31 - Montagem do modelo em vista isométrica e lateral.	51
Figura 32 - Eixo vazado piloto (1:5).....	52
Figura 33 - Dimensões iniciais da peça.....	52
Figura 34 - Posicionamento da peça dentro do forno.....	53
Figura 35 - Resultados da simulação com malha em vista isométrica.....	54
Figura 36 - Resultado da simulação de deformação equivalente sem a malha: vista isométrica e frontal.....	54
Figura 37 - Deformação plástica no modelo real: erro na simulação ocasionado por deslizamento.	55
Figura 38 - Deformação plástica no modelo com batente: vista da parte posterior; b) detalhe do deslocamento da peça.....	56
Figura 39 - Deformação plástica no modelo com fixadores de nós: a) vista da parte posterior; b) vista lateral evidenciando o sobressalto de material.	56
Figura 40 - Deformação plástica no modelo com mandril com batente: geometria incoerente.....	57
Figura 41 - Peça simulada modelo com placa de contenção, $\Delta h= 3$ mm.....	58
Figura 42 - Peça simulada com nós fixadores, $\Delta h= 3$ mm.	59
Figura 43 - Peça simulada modelo com placa de contenção, $\Delta h= 7,4$ mm.....	59
Figura 44 - Peça simulada com nós fixadores, $\Delta h= 7,4$ mm.....	60
Figura 45 - Peça simulada modelo com placa de contenção, $\Delta h= 10$ mm.....	60
Figura 46 - Peça simulada com nós fixadores, $\Delta h= 10$ mm.	61
Figura 47 - Posições de medição na peça na vista frontal.	61
Figura 48 - Resultados de deformação equivalente para $\Delta h = 4$ mm: a) para modelo de matrizes planas; b) modelo com matriz inferior em “V”.	64

Figura 49 - Resultados de deformação equivalente para $\Delta h = 4 \text{ mm}$: a) para modelo de matrizes planas; b) modelo com matriz inferior em "V".	64
Figura 50 - Deslocamento no modelo de matrizes planas após primeiro recalque: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z.	65
Figura 51 - Deslocamento no modelo de matriz inferior em V após primeiro recalque: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z.	65
Figura 52 - Peça após ciclo completo de forjamento em torno do eixo: a) vista isométrica; b) vista frontal.	66
Figura 53 - Peça após ciclo completo de forjamento em torno do eixo: a) vista isométrica; b) vista frontal.	67
Figura 54 - Último recalque do primeiro ciclo de forjamento.	68
Figura 55 - Posicionamento para início do segundo ciclo de forjamento.	68
Figura 56 - Último passe do segundo ciclo de forjamento.	69
Figura 57 - Último passe do terceiro ciclo de forjamento.	69
Figura 58 - Último passe do quarto ciclo de forjamento.	69
Figura 59 - Resultado final do experimento.	70
Figura 60 - Croqui das dimensões finais obtidas após o forjamento experimental.	70

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 1 - Forjabilidade das ligas metálicas	27
Tabela 2 - Classes de aço-ferramenta e suas aplicações específicas.....	30
Tabela 3 – Composição química do aço 42CrMo4 (%)	31
Tabela 4 - Coeficiente de expansão térmica do aço ABNT 4140 para diversas faixas de temperatura	31
Tabela 5 - Condutividade térmica do Aço ABNT 4140 para algumas temperaturas .	31
Tabela 6 - Calor específico do aço ABNT 4140 para algumas faixas de temperatura	32
Tabela 7 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional I.	42
Tabela 8 - Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional I.....	42
Tabela 9 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional II.	46
Tabela 10 – Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional II.	47
Tabela 11 - Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional III.....	48
Tabela 12 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional IV.....	50
Tabela 13 - Parâmetros de simulação processo utilizados na simulação computacional IV.....	50
Tabela 14 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional V.....	51
Tabela 15 - Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional V.	51
Tabela 16 - Parâmetros do forjamento em escala do eixo.	53
Tabela 17 - Medidas das peças frontalmente em mm.....	62
Tabela 18 - Medidas das peças na base em mm.....	62
Tabela 19 - Aspectos de deformação em mm.....	63
Tabela 20 - Deslocamento em mm	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Ad = área de contato matriz/peça (mm^2)

b = largura (mm)

b_0 = largura inicial da geratriz (mm)

b_1 = largura da barra após deformação (mm)

D_0 = diâmetro externo inicial (mm)

D_f = diâmetro externo final (mm)

d_0 = diâmetro interno inicial (mm)

d_f = diâmetro interno final (mm)

F = força (N)

h = altura (mm)

h_i = altura instantânea (mm)

l = comprimento (mm)

l_0 = comprimento inicial (mm)

l_f = comprimento final (mm)

k_f = tensão de escoamento do material (MPa)

k_w = resistência a deformação (MPa)

p = peso (quilograma)

R = raio da ferramenta (mm)

S = fator de alargamento (-)

S_b = comprimento de recalque (mm)

S_{b1} = alargamento final (mm)

T_1 = espessura no sentido vertical (mm)

T_2 = espessura no sentido horizontal (mm)

T_r = trabalho de conformação (N.mm)

V = volume (mm^3)

V_f = velocidade da ferramenta (mm/s)

V_t = velocidade radial (mm/s)

γ = grau de redução de altura (-)

Δh = redução da altura em (mm)

Δl = alongamento (mm)

ε = deformação relativa (-)

λ = condutividade térmica (W/(mK))

μ = coeficiente de atrito (-)

φ = deformação verdadeira (-)

$\dot{\varphi}$ = velocidade de deformação (s^{-1})

\varnothing = diâmetro (mm)

ρ = densidade (g/mm^3)

ϑ = temperatura ($^{\circ}C$)

LISTA DE ABREVIATURAS

1D = uma dimensão

2D = duas dimensões

3D = três dimensões

ABNT= Associação Brasileira de Normas Técnicas

DIN = *Deutsches Institut für Normung*

eq. = equação

e.g. = do latim *exempli gratia*

GS = General Switches

FEM = *Finite element method*

FMA = Forjamento em Matriz Aberta

PEP = *Programmers Environment for Pre-/Postprocessing*

TIMS = duração de um incremento de cálculo

TSTEP = número de incrementos de cálculo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA.....	20
2.1.1 Aspectos sobre cálculos de força no forjamento.....	21
2.1.2 Parâmetros do Forjamento em Matriz Aberta	21
2.1.3 Considerações sobre as deformações	24
2.1.4 Curvas de escoamento.....	25
2.2 FORJABILIDADE	26
2.2.1 Efeito da Temperatura na Forjabilidade	27
2.2.2 Acabamento Superficial e Precisão Dimensional em Produtos Forjados	28
2.3 CONSIDERAÇÃO SOBRE O PROCESSO DE FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA APLICADO A EIXOS	28
2.4 MATRIZES PARA O PROCESSO DE FORJAMENTO	29
2.5 CARACTERÍSTICAS DO AÇO BAIXA LIGA ABNT 4140.....	31
2.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	32
2.6.1 Simulação numérica utilizando o software PEP.....	34
2.6.2 LARSTRAN/Shape	35
3.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL I: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM UMA MATRIZ PLANA E UM MANDRIL RETO APOIADO	36
3.1.1 Modelagem do forjamento de um eixo vazado com uma matriz plana e um mandril reto apoiado no PEP.....	36
a) Construção da peça	37
b) Construção de ferramentas	39
c) Montagem das ferramentas e da peça em conjunto	41
3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL II: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM DUAS MATRIZES PLANAS E UM MANDRIL CÔNICO	42
a) Construção de ferramentas: mandril cônico.....	43
b) Montagem do conjunto das ferramentas e da peça	44
c) Programação	46
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL III: AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM MODELOS DE NÓS E PLACA DE CONTENÇÃO.....	47
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL IV: ANÁLISE DOS MODELOS COM MATRIZES PLANAS E MATRIZ INFERIOR EM “V”	49
3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL V: ANÁLISE DE FORJAMENTO COM MATRIZES EM “V” NA ESCALA DO EXPERIMENTO FÍSICO	50
3.6 EXPERIMENTO FÍSICO: FORJAMENTO DE UM EIXO PILOTO.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54

4.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL I: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM UMA MATRIZ PLANA E UM MANDRIL RETO APOIADO	54
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL II: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM 2 MATRIZES PLANAS E UM MANDRIL CÔNICO	55
4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL III: AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM MODELOS DE NÓS E PLACA DE CONTENÇÃO	57
4.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL V: PROPOSTA DE FORJAMENTO COM MATRIZ INFERIOR EM “V”	66
4.6 EXPERIMENTO FÍSICO: FORJAMENTO DE UM EIXO PILOTO	67
5 CONCLUSÕES	71
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia não poluente e proveniente de fontes renováveis tem crescido muito nos últimos anos. Entre as fontes de energia limpa, destaca-se a energia eólica. Atualmente, é possível gerar cerca de 7 Mega-Watts ,em um único aerogerador com um impacto ambiental relativamente baixo. A potência é gerada quando a força do vento, atuando sobre as pás de um gigantesco catavento produz um momento que faz girar um rotor acoplado a um eixo. Esse eixo transmite movimento do rotor até o gerador elétrico, que fazendo girar os imãs acoplados ao mesmo, produz corrente elétrica nas bobinas do estator. Entretanto, a velocidade do rotor é limitada por restrições de velocidade na ponta da pá, sendo muito inferiores às velocidades de trabalho de geradores. A solução de engenharia, comumente utilizada para adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada do gerador, é a utilização de uma caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador. Estas características de projetos produzem uma demanda de peças como: eixos, mancais, acoplamentos e engrenagens, de pequeno, médio e grande porte. As peças utilizadas, nestes sistemas mecânicos, são responsáveis por grande parte do peso total do aerogerador e por si, fatores críticos de projeto. Quanto maior a potência que a instalação deve produzir, maiores e mais pesados serão seus componentes (CRESESB, 2008). A figura 1 mostra um eixo forjado, aplicado em aerogeradores, pela Villares Metals S.A.

O tamanho e o peso dos componentes precisam ser considerados em qualquer tipo de instalação por questões de engenharia civil, logística e eficiência. Eles são, entretanto, especialmente críticos em instalações eólicas porque as torres onde são instalados geradores eólicos de alta potência chegam facilmente a 150 m de altura ou mais. Esta configuração do sistema de geração, somada ao uso de geradores com potências cada vez maiores, tornam necessária a redução de peso com aumento da durabilidade dos componentes do aerogerador. Uma das maneiras de se conseguir a redução de peso sem a perda na resistência é a utilização de materiais de alta resistência. Fica então, uma lacuna a ser preenchida no desenvolvimento de processos de fabricação para a obtenção de peças cada vez mais leves e resistentes, aplicáveis a sistemas mecânicos de geração de energia elétrica.



Figura 1 – Eixo forjado para aerogeradores. Cortesia: Villares Metals S.A.

A obtenção de eixos vazados sem perda de resistência, e com aumento da confiabilidade é proposta pelo projeto de cooperação Brasil-Alemanha (Bragecrim) “*Bulk metal formed parts for power plants*”, que tem parte da pesquisa desenvolvida descrita nesta dissertação. A proposta do projeto é o desenvolvimento de uma rota fabricação de um eixo vazado pelo processo de forjamento a quente. O processo é desenvolvido com auxílio da simulação numérica computacional, inclusive para previsão de microestrutura, a fim de garantir a melhoria das propriedades mecânicas do eixo. A aplicabilidade do forjamento, como processo de obtenção de eixos vazados se justifica; pois o forjamento melhora a qualidade dos metais, ou seja, a deformação plástica confere ao metal, propriedades mecânicas superiores aos demais processos de fabricação de uma peça, até então conhecidos, como fundição e usinagem por exemplo. Além disso, proporciona grande aproveitamento de matéria-prima, homogeneização da microestrutura, eliminação de porosidade e fibramento favorável às propriedades mecânicas. O aproveitamento de matéria prima é extremamente relevante, quando do uso de materiais de alta resistência que tem um custo relativamente alto. A homogeneização da microestrutura e eliminação da porosidade permite ainda, o aumento da vida útil em fadiga da peça, refletindo na

confiabilidade dos sistemas de geração de energia onde são aplicadas (RUSINOFF,1959; SCHAEFFER, 2006).

O forjamento em matriz aberta (FMA), que é um tipo de forjamento e foco deste trabalho, é aplicado tanto na fabricação de tarugos e barras para indústria metalmeccânica, como para produção de produtos semiacabados como eixos, mancais e anéis, sobretudo de grande porte. A utilização do Forjamento em Matriz Aberta é indicada para peças robustas, como grandes eixos, impossíveis de serem fabricados em matriz fechada. Estas peças têm aplicação em usinas geradoras de energia e aerogeradores, por exemplo.

As aplicações do FMA evidenciam a importância econômica para o Brasil do Forjamento em Matriz Aberta. Além disso, avanço tecnológico nesta área de interesse estratégico para o país. O Forjamento em Matriz Aberta de um eixo vazado em aço baixa liga DIN número 1.7225, grau 42CrMo4, idealizado nesta dissertação, surge como proposta para redução de massa de sistemas de transmissão de movimento, aplicáveis a aerogeradores. O projeto de dissertação se propõe analisar as particularidades do processo e assim, propor uma rota de operações para a fabricação otimizada de um eixo vazado capaz de atender a redução de massa como fator indispensável. A análise do processo forjamento proposto é feita através da simulação numérica com a utilização do sistema PEP/LARSTRAN.

A principal contribuição deste estudo é a determinação de uma rota de fabricação otimizada, utilizada na continuidade dos estudos referentes ao projeto Bragecrim, assim como, sua utilização na sistemática de produção, em modo piloto, pelas indústrias de forjamento de eixos. O processo de forjamento proposto foi desenvolvido sequencialmente. Inicialmente é feita a análise da simulação computacional, referente ao forjamento de um eixo, utilizando-se apenas uma matriz e um mandril apoiado. A partir da análise da primeira simulação computacional são propostos quatro modelos com diferentes adaptações, os quais são simulados computacionalmente. Os modelos, com melhores resultados, são então, selecionados, readaptados e resimulados, até a obtenção de um processo virtualmente confiável. O processo final desenvolvido tem sua aplicação prática avaliada no forjamento de um eixo piloto em escala reduzida, com aproximadamente 150 kg. O eixo piloto, objeto do estudo, é apresentado no capítulo 3: item 3.6. A figura 2, mostra um fluxograma onde as simulações computacionais aparecem na

sequência em que foram realizadas e o experimento físico como última etapa do trabalho.

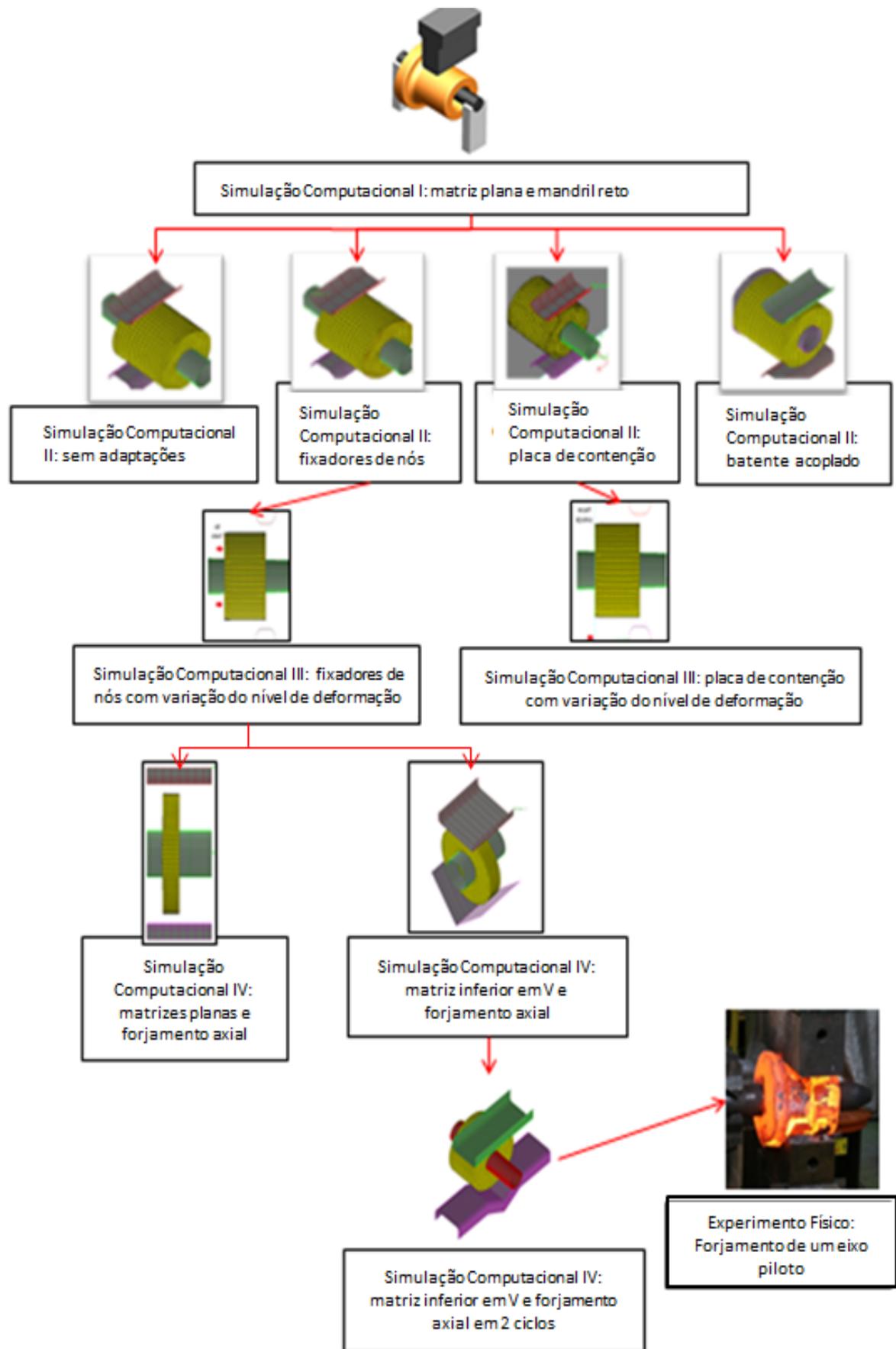


Figura 2 – Fluxograma das simulações computacionais e do experimento físico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA

O forjamento é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo conferir forma ao metal através da aplicação de força. Partem-se de geometrias simples e maciças, como: blocos, barras ou pré-formas fundidas, que ao sofrerem deformação plástica adquirem propriedades mecânicas superiores aos demais processos de fabricação de uma peça, como fundição e usinagem, por exemplo. Além disso, proporciona grande aproveitamento de matéria-prima, microestrutura homogênea e sem porosidade, e fibramento favorável às propriedades mecânicas (LANGE, 1985; SCHAEFFER, 2006). Na figura 3 pode ser visto um exemplo de forjamento em larga escala.



Figura 3 - Forjamento em Matriz Aberta de eixos de grande dimensão (SIEMPELKAMP, 2012).

O Forjamento em Matriz Aberta é um tipo de processo caracterizado pela compressão de uma massa metálica por uma matriz superior e uma inferior, deformando-se de maneira livre. Utilizando-se de matrizes planas ou geometricamente simples, o processo é aplicável para produção de peças de grande porte, como eixos para navios, barras e blocos; utilizadas na indústria metalmeccânica ou na preparação de forma para posterior processamento (SCHAEFFER, 2006).

2.1.1 Aspectos sobre cálculos de força no forjamento

Tem-se no cálculo da força de forjamento, a principal ferramenta da indústria para especificação de processo. Entretanto, a análise que envolve a fabricação de uma peça requer a observação de alguns aspectos básicos, pré-definidos ou não pelo engenheiro. Independentemente do tipo de forjamento abordado é imprescindível o conhecimento da tensão de escoamento do material, da temperatura de trabalho e da deformação verdadeira; sejam estes cálculos simplificados como, por exemplo, no Forjamento em Matriz Aberta, ou mais complexos ,como no forjamento em matriz fechada.

Determinar a prensa mais adequada ao trabalho, avaliar a energia que será empregada em uma operação, garantir que uma peça possa ser fabricada, e projetar o ferramental são apenas algumas aplicações destes cálculos.

2.1.2 Parâmetros do Forjamento em Matriz Aberta

A fabricação de diversas peças de grandes dimensões somente é possível por Forjamento em Matriz Aberta, como por exemplo, eixos e engrenagens para aerogeradores de grande porte, que hoje chegam a 7 MW de potência (PTF, 2007). A figura 4 mostra eixos forjados de grande porte semi-acabados.



Figura 4 – Eixos maciços semiacabados (TRADECITY, 2010).

O avanço, em termos de capacidade, neste tipo de aplicação, requer a criação de máquinas eficientes, através da melhoria das propriedades mecânicas dos componentes (SCHAEFFER, 2006). O alcance destes requisitos passa inevitavelmente pelo estudo da influência dos parâmetros de processo sobre as propriedades dos materiais.

Um dos principais parâmetros de Forjamento em Matriz Aberta é a força de forjamento (F), que é função da área de contato matriz/peça (Ad) e da resistência à deformação (k_w) (SCHAEFFER, 2006). A força (F) pode ser calculada por:

$$F = Ad \cdot k_w \quad \text{Equação 1}$$

A área de contato Ad é expressa pela equação 2, onde S_b é a largura de contato matriz-peça (mordida ou avanço) e b_0 é a largura inicial da geratriz, que pode ser visualizada na figura 6.

$$Ad = s_b \cdot b_0 \quad (\text{para seções retangulares}) \quad \text{Equação 2}$$

$$Ad = s_b \cdot d_0 \quad (\text{para seções circulares})$$

A resistência à deformação (k_w) é calculada de forma diferenciada por diferentes pesquisadores: *Sbroschew* (equação 3), *Siebel* (equação 4), *Geleji* (equação 5).

$$\text{Conforme Sbroschew: } k_w = k_f \cdot \left(1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{s_b}{h_1}\right) \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{Conforme Siebel: } k_w = k_f \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot s_b}{2 \cdot h_1} \cdot \frac{h_1}{4 \cdot d_0}\right) \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{Conforme Geleji: } k_w = k_f \cdot \left(1 - \frac{\mu \cdot s_b}{2 \cdot h_1}\right) \quad \text{Equação 5}$$

Onde μ é o coeficiente de atrito do par matriz/peça ($\sim 0,3$ para aços).

A tensão de escoamento k_f , que é obtida experimentalmente através de ensaios de torção, tração ou compressão, é função da deformação ϕ , da velocidade de deformação $\dot{\phi}$ e da temperatura ϑ (LANGE, 1985). A deformação verdadeira ou

logarítmica φ é calculada em função da altura h , da largura b e do comprimento l da barra, respectivamente por:

$$\varphi_h = \ln \cdot \frac{h_1}{h_0} \quad \text{Equação 6}$$

$$\varphi_b = \ln \cdot \frac{b_1}{b_0}$$

$$\varphi_l = \ln \cdot \frac{l_1}{l_0}$$

A velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) expressa por:

$$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h_i} \quad (\text{s}^{-1}) \quad \text{Equação 7}$$

Onde V_f é a velocidade da ferramenta e h_i a altura instantânea. A descrição detalhada de cada parâmetro de cálculo é dada na figura 5.

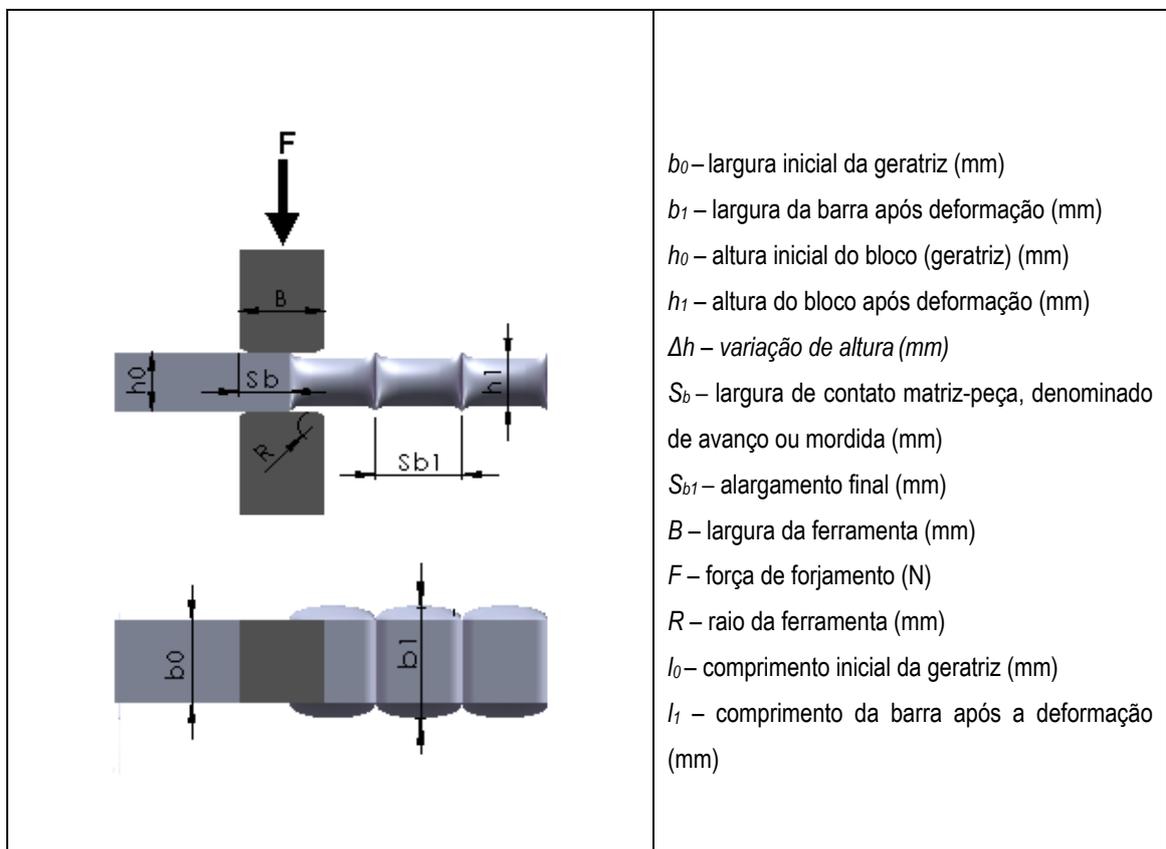


Figura 5 - Relações geométricas em matriz aberta (adaptado de SCHAEFFER, 2006).

2.1.3 Considerações sobre as deformações

Aplicando-se a Lei da Constância de Volume, define-se que a soma das deformações verdadeiras é igual a zero:

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0 \quad \text{Equação 8}$$

Comumente na indústria é de interesse, o conhecimento do alargamento na espessura e do alongamento no comprimento de uma barra após uma etapa de forjamento. A largura final (b_1) pode ser calculado por:

$$b_1 = b_0 \cdot \gamma^s \quad \text{Equação 9}$$

Da mesma forma o alargamento final Sb_1 é dado por:

$$Sb_1 = b_0 \cdot \gamma^{(1-s)} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

S é o fator de alargamento;

γ é o grau de redução em altura.

O fator de alargamento (S) é dado por:

$$S = \frac{S_b}{S_b + b_0} \quad \text{Equação 11}$$

O grau de redução de altura (γ) é dado por:

$$\gamma = \frac{h_0}{h_1} \quad \text{Equação 12}$$

A largura de contato matriz/peça (S_b) é estabelecida pelo limite de capacidade de força da prensa. Para produtos não acabados recomenda-se o uso de valores de S_b/b entre 0,4 e 0,6 (SCHAEFFER, 2006).

O trabalho ou a energia pode ser calculado em função do volume (V) pela seguinte equação (SCHAEFFER, 2006):

$$T_r = k_f \cdot V \cdot \left[\ln \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{\mu \cdot V}{4 \cdot b_0} \cdot \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) + \frac{b_0}{8 \cdot V} \cdot (h_1^2 - h_0^2) \right] \quad \text{Equação 13}$$

2.1.4 Curvas de escoamento

A tensão de escoamento (k_f) é aquela aplicada a um corpo para que ocorra a deformação plástica (SCHAEFFER, 1992). A resistência à deformação, o atrito na interface peça/matriz e a geometria do sistema são os que exercem influência direta nas tensões durante a deformação. O método de cálculo sempre levará em conta, a resistência ao escoamento do material, sejam estas tensões, simplificadas ou sofisticadas. A resistência ao escoamento é descrita relacionando um grau de deformação a uma tensão correspondente, o que nos leva a construção de uma curva, através de ensaios mecânicos, sendo estes os de tração, compressão e torção (LANGE, 1985; SCHAEFFER, 1992; ALVES, 1993;). A figura 6 apresenta curvas de escoamento geradas a partir de um ensaio mecânico a quente de um aço ABNT 4140. Na figura 6a) pode ser vistas curvas de escoamento obtidas a 1000 e 1100 °C. A figura 6b) mostra a diferença entre resultados obtidos pelos testes de compressão e torção.

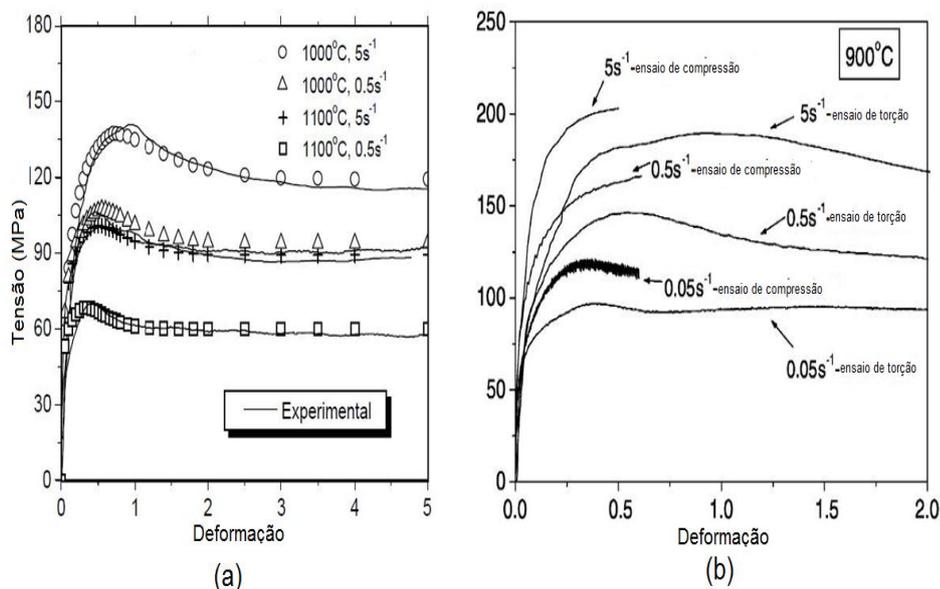


Figura 6 - (a) Curvas de escoamento a 1.000°C e 1.100°C; (b) Curvas de escoamento a 900°C (KIM et al, 2003).

Em especial no forjamento, é de interesse, o levantamento de curvas de escoamento a quente. Nestas condições, não se pode desprezar, a variação da

resistência à deformação com a velocidade de deformação ($\dot{\phi}$). É necessário, para a aquisição dos dados que gerarão a curva de escoamento a quente, o uso de um equipamento com algumas particularidades, das quais se pode citar o controle da variação da velocidade de ferramenta e controle de temperatura (ALVES, 1993).

Um significativo número de pesquisadores no mundo tem tentado desenvolver equações constitutivas dos metais que representem o comportamento da tensão de escoamento, sugerindo modelos baseados em dados experimentais. Na obtenção de equações constitucionais tem destaque os trabalhos de Hensel e Spitel, Misaka e Shida (KIM et Al, 2003; CBCM, 2007).

Além dos aspectos matemáticos envolvidos no ensaio, existem aspectos técnicos que não podem ser negligenciados. Uma vez que se tenha um corpo de prova cilíndrico é necessária atenção a alguns detalhes específicos para este ensaio. Para evitar que o corpo de prova saia do estado uniaxial de tensões é necessário que se tenha paralelismo entre as duas faces do corpo de prova que estarão em contato direto com a ferramenta (BRITO, 1993).

2.2 FORJABILIDADE

Define-se forjabilidade, como a capacidade de se conformar um material sem o aparecimento de trincas ou defeitos originados neste processo. A falha durante a conformação pode se originar de duas fontes: do material sob conformação ou do tipo de conformação que está sendo imposta. Quando a falha é devida ao material; este, geralmente, apresenta propriedades mecânicas ou uma estrutura interna inadequada para o tipo de conformação. No caso da falha oriunda do processo, os pontos externos do material, especialmente suas arestas, recebem maiores níveis de carregamento mecânico (HOSFORD et al., 2007).

Uma classificação decrescente pôde ser elaborada, determinando a forjabilidade de vários materiais metálicos é vista na tabela 1 (ASM , 1992).

Alguns fatores têm influência sobre a forjabilidade de um metal. Em maior escala está a temperatura, acompanhada pela velocidade de deformação, grau de deformação, características físico-químicas do material e condições tribológicas do sistema (LIMA, 2007).

Tabela 1 - Forjabilidade das ligas metálicas (ASM , 1992).

LIGAS DE MAIOR FORJABILIDADE

Ligas de Alumínio
Ligas de Magnésio
Ligas de Cobre
Aços Carbono e Baixa Liga
Aços Inoxidáveis Martensíticos
Aços Maraging
Aços Inoxidáveis Austeníticos
Ligas de Níquel
Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação
Ligas de Titânio
Superligas Ferrosas
Superligas de Cobalto
Ligas de Nióbio
Ligas de Tântalo
Ligas de Molibdênio
Superligas de Níquel
Ligas de Tungstênio
Ligas de Berílio

LIGAS DE MENOR FORJABILIDADE

2.2.1 Efeito da Temperatura na Forjabilidade

A temperatura da peça ou do tarugo a ser conformado é, provavelmente, a mais complexa e importante variável do processo de forjamento. Tem grande influência na resistência à deformação do material a ser forjado e conseqüentemente sobre a força e energia de conformação.

Altas temperaturas, aplicadas no forjamento a quente, tendem a diminuir a força de forjamento e a formação e propagação de trincas. Em contrapartida, ocorrem a formação de carepa e dificuldade de controle dimensional.

Baixas temperaturas, aplicadas no forjamento a frio, favorecem o controle dimensional e o acabamento de superfície, entretanto requerem maior força e diminuem a forjabilidade do material (DOUGLAS et al., 2000).

2.2.2 Acabamento Superficial e Precisão Dimensional em Produtos Forjados

A obtenção de bom acabamento superficial e precisão dimensional são extremamente difíceis, no Forjamento em Matriz Aberta, principalmente no processo a quente. As limitações do processo não permitem a fabricação de produtos acabados com tolerâncias pequenas, sendo necessária alguma operação subsequente, como usinagem por exemplo.

2.3 CONSIDERAÇÕES DO PROCESSO DE FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA APLICADO A EIXOS

No Forjamento em Matriz Aberta ou forjamento livre, como também é conhecido, o material é comprimido por meio de uma matriz superior e outra inferior escoando de maneira livre sem que ocorra obstrução ao fluxo de material. Na verdade, este princípio tem se mantido desde a antiguidade, quando foram desenvolvidos os primitivos processos de conformação, presentes em diversas civilizações (MULLER, 2010).

O Forjamento em Matriz Aberta é aplicado na indústria, na fabricação de grandes eixos ou tarugos normalmente acima de 200 mm de diâmetro. Isto é feito de forma progressiva, ou seja, incremental, partindo-se de uma pré-forma fundida, basicamente cônica, que tem seu diâmetro reduzido em função do aumento do comprimento. Em um projeto de eixos forjados em matriz aberta é necessário especificar o sobremetal, que é material sobressalente a dimensão final da peça, para que se possa usiná-lo posteriormente e assim obter um eixo com as tolerâncias dimensionais inerentes a sua aplicação. A figura 7 mostra um eixo após processo de usinagem e trepanação.

No forjamento progressivo de eixos, as matrizes devem ter uma configuração tal que permitam o maior fluxo de material na direção longitudinal do eixo de simetria

da pré-forma, o que classicamente é obtido, aplicando-se raios nos cantos e ângulos na face da ferramenta. De forma semelhante, procede-se a fabricação de eixos vazados, entretanto, parte-se de uma pré-forma de um cilindro vazado. Faz-se o forjamento a quente com a inserção de um mandril no furo, para evitar o fechamento do mesmo.



Figura 7 - Eixo forjado, usinado e trepanado para aplicação em aerogerador. Cortesia: Villares Metals S.A..

2.4 MATRIZES PARA O PROCESSO DE FORJAMENTO

O material utilizado para a construção de matrizes de forjamento é conhecido como Aço-Ferramenta. Nesta classe está uma grande variedade de aços ao carbono e aços-liga, que tem dureza diferenciada, resistência a abrasão e ou resistência à deformação em altas temperaturas.

Conforme a aplicação, o aço pode contemplar uma ou mais destas características, em maior ou menor grau. Como, na conformação mecânica, existe uma série de processos diferentes. Há, por consequência, aços-ferramentas mais adequados a cada aplicação. A tabela 2 mostra a classe de aços, específica para cada aplicação (OBERG et al., 2004).

Tabela 2 - Classes de aço-ferramenta e suas aplicações específicas (OBERG et al., 2004).

Classes de aço-ferramenta AISI SAE		
Propriedade	Classe	Característica significativa
Endurecível à água	W	
Trabalho a frio	O	Endurecível a óleo
	A	Endurecível ao ar
	D	Alto Carbono; Alto Cromo
Resistente ao choque	S	
Alta velocidade	T	A base de Tungstênio
	M	A base de Molibdênio
Trabalho a quente	H	H1-H19: a base de Cromo H20-H39: a base de Tungstênio H40-H59: a base de Molibdênio
Moldes para plástico	P	
Especiais	L	Baixa liga
	F	Carbono/Tungstênio

A família de aços-ferramentas H foi desenvolvida para permitir resistência e dureza durante a exposição a altas temperaturas. A série H1 a H19 é caracterizada pelo teor de cromo a 5 %. A série H20 a H39 pelo teor de tungstênio de 9 % a 18 % e teor de cromo de 3 a 4 %, e a série H40 a H59 pela presença de molibdênio. Dentro da família H, o H13 é comumente utilizado para forjamento a quente nas

indústrias brasileiras devido ao menor custo. Sua composição química permite suportar temperatura, pressão, abrasão e ciclos térmicos associados ao trabalho a quente; incluindo operações de injeção de plásticos, fundição, forjamento e extrusão. O baixo percentual de carbono (0.4 %) promove tenacidade; o médio percentual de cromo (5 %) fornece boa resistência mecânica a altas temperaturas. O silício, no teor de 1 % reduz a oxidação a altas temperaturas; e pequenas quantidades de molibdênio e vanádio (1 %), que formam carbeto estáveis, melhoram a dureza a altas temperaturas (MCHUGH, 2009).

2.5 CARACTERÍSTICAS DO AÇO BAIXA LIGA ABNT 4140

O aço ABNT 4140 ou DIN número 1.7225, grau 42CrMo4 é um aço baixa liga de boa resistência mecânica, média temperabilidade, média usinabilidade e baixa soldabilidade. Possui aplicação na fabricação de engrenagens, eixos e pinos e virabrequins, pois combina resistência mecânica com tenacidade (HOLZAPFEL,1998). A tabela 3 traz a composição química do aço 42CrMo4. As tabelas 4,5 e 6 mostram dados térmicos do aço ABNT 4140.

Tabela 3 – Composição química do aço 42CrMo4 (%)

Aço	C	Si	Mn	Cr	Mo	S
42CrMo4	0,42	0,25	0,75	1,10	0,22	<0,035

Tabela 4 - Coeficiente de expansão térmica do aço ABNT 4140 para diversas faixas de temperatura (METAS HANDBOOK, 1988).

Coeficiente de Expansão Térmica Linear Médio ($\mu\text{m}/\text{m.K}$)				
20-200 ($^{\circ}\text{C}$)	20-200 ($^{\circ}\text{C}$)	20-400 ($^{\circ}\text{C}$)	20-500 ($^{\circ}\text{C}$)	20-600 ($^{\circ}\text{C}$)
12,3	12,7	13,7	...	14,5

Tabela 5 - Condutividade térmica do Aço ABNT 4140 para algumas temperaturas (METAS HANDBOOK, 1988).

Condutividade Térmica ($\text{W}/\text{m.k}$)							
0 ($^{\circ}\text{C}$)	100 ($^{\circ}\text{C}$)	200 ($^{\circ}\text{C}$)	300 ($^{\circ}\text{C}$)	400 ($^{\circ}\text{C}$)	500 ($^{\circ}\text{C}$)	600 ($^{\circ}\text{C}$)	700 ($^{\circ}\text{C}$)
...	42,7	42,3	...	37,7	...	33,1	...

Tabela 6 - Calor específico do aço ABNT 4140 para algumas faixas de temperatura (METAS HANDBOOK, 1988).

Calor Específico (cal/(g.°C))									
50-100 (°C)	150-200 (°C)	200-250 (°C)	250-300 (°C)	300-350 (°C)	350-400 (°C)	450-500 (°C)	550-600 (°C)	650-700 (°C)	700-750 (°C)
...	473	515

2.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

O modelo de produção, atualmente adotado na indústria brasileira, favorece uma produção em massa quase totalmente automatizada; na qual, o produto é fabricado através de uma série de manipulações por maquinários, resultando em um processo produtivo pouco flexível.

Este modelo é amplamente aplicado em forjarias de grande porte, onde grandes investimentos em tecnologia de fabricação são justificados pela demanda de peças. As enormes cifras envolvidas nestas operações, exercem pressão para a diminuição de tempos de desenvolvimento e implantação de processo, de análise e solução de possíveis falhas, incluindo a melhoria contínua.

Para atender grande parte desta demanda da indústria, a simulação numérica pode ser uma útil e eficaz ferramenta e ter um impacto muito positivo sob o processo produtivo. Entretanto, para realizar a simulação numérica, além de dominar os softwares, deve-se conhecer o processo de produção profundamente.

Durante o estudo do processo, os questionamentos e hipóteses que se apresentam podem ser virtualmente testados, sem interferir no processo funcional. O processo pode ser desenvolvido, modificado e otimizado (e.g. aumento de produção e/ou redução de custos) sem que uma máquina sequer seja alocada para isso. Em um ambiente virtual, o tempo de desenvolvimento pode ser menor e o produto que entra em produção requer menos aferição e ajustes de processo (DEVLOO, 2005).

Produto fabricado por operações de forjamento tem aplicações de alto desempenho e tem alto valor agregado. A simulação numérica utilizando elementos finitos (FEM) pode ajudar a assegurar a alta qualidade do produto eliminando-se a prática da tentativa e erro. Os processos podem ser desenvolvidos e reproduzidos num ambiente virtual, evitando-se o emprego de excessivos testes físicos. Atualmente o FEM atinge resultados precisos para vários processos e é uma

ferramenta consolidada na indústria; especialmente no forjamento em matriz fechada. Entretanto para processos em matriz aberta, como forjamento incremental e laminação de anéis, a aplicação na indústria é ainda é muito restrita (TACK, et al.1994, HIRT et al., 2007; GROCHE et al., 2007).

O desenvolvimento de projetos de forjamento utilizando simulações numéricas envolve uma sistemática bastante convencional, como pode ser visto na figura 8. Inicialmente a partir do desenho da peça a ser obtida é concebido o ferramental em CAD. Com a entrada dos parâmetros de processo e dados de material num software de simulação numérica computacional, o processo pode ser então simulado. Os resultados a serem avaliados são diversos: força de forjamento, o fluxo do material, deformações, etc. (HARTLEY et al, 2006).

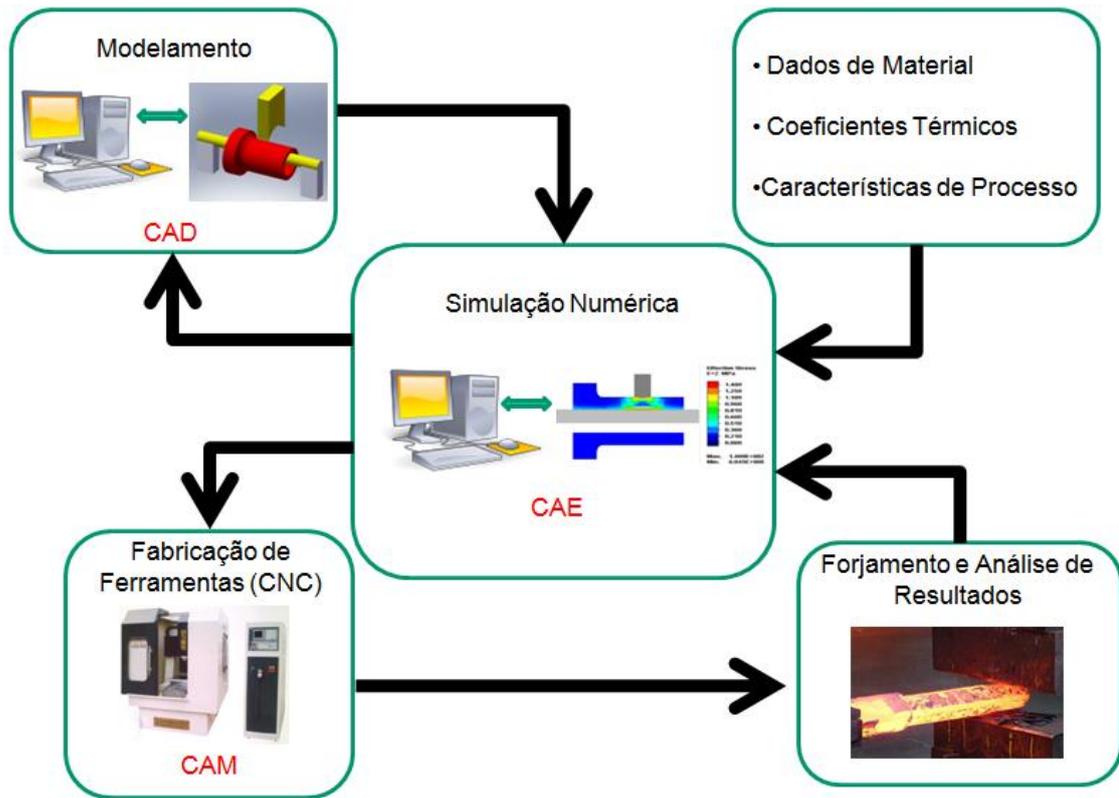


Figura 8 - Metodologia de desenvolvimento de projetos assistidos por simulação numérica.

As alterações necessárias são feitas e o processo é novamente simulado até que os resultados obtidos sejam satisfatórios e o ferramental possa ser fabricado. Por conseguinte, pode ser feito um forjamento em escala reduzida ou realizado o forjamento preliminar da peça em tamanho real, onde pequenos ajustes podem ser feitos através da comparação de resultados com a simulação (SCHÄFER, 2010).

2.6.1 Simulação numérica utilizando o software PEP

Para processamento computacional, existe certa variedade de softwares disponíveis. O PEP (*Programmers Environment for Pre-/Postprocessing*) é um programa onde é possível modelar o conjunto: matrizes e peça, além de permitir programação do processo de conformação segundo parâmetros específicos. Os cálculos referentes à simulação numérica são executados pelo programa Larstran/Shape e posteriormente importados para o PEP onde são gerados elementos gráficos que permitem a análise dos resultados.

O desenvolvimento do programa PEP foi iniciado em 1992, no *Institute of Metal Forming* da Universidade Técnica de Aachen na Alemanha. O PEP é aplicável para a preparação e processamento de modelos 2D e 3D, segundo o método de elementos finitos. Para aplicação de malhas de elementos finitos, o programa permite as seguintes opções: QuadGridMesh, QuadTreeMesh, QuadPaveMesh, HexGridMesh.

O banco de dados de material gerencia parâmetros térmicos, modelos para curvas de escoamento, sendo tabelas ou funções como Hensel, A. & Spittel, T., (I, II, III), Ludwik (processo a frio) condições de contorno para combinações de materiais e os modelos de materiais necessários para a simulação da microestrutura.

O menu *CHEF* é utilizado para controlar a simulação, definindo parâmetros e possibilitando entrada de valores para estes. Ao se iniciar o PEP, todos os valores de entrada são carregados com valores padrão. Os valores marcados com GS significam General Switches e são aplicados preliminarmente ao solver LARSTRAN. O preenchimento de valores geralmente depende algoritmo selecionado.

Para definir as opções de parâmetro é necessário primeiro selecionar o algoritmo. Isto determina o tipo de simulação a ser usada e seleciona a lei de material a ser utilizado para a simulação (FRANZKE et al, 2009). O menu de seleção é mostrado na figura 9. O Software permite ainda a seleção de outros algoritmos, como o térmico e termomecânico, elástico e elastoplástico e simulação de microestrutura.

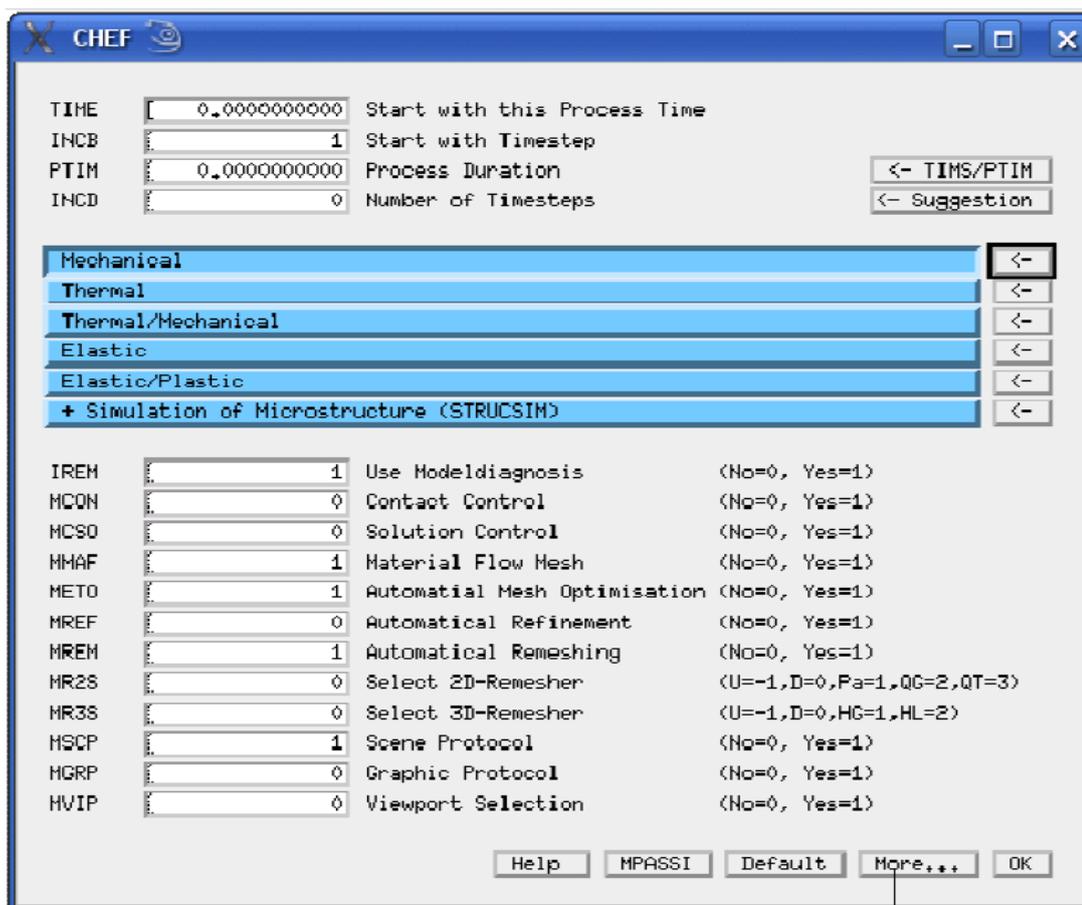


Figura 9 - Menu CHEF do PEP.

A transmissão de dados entre outros sistemas (PATRAN neutral 2.5, I-DEAS Universal, STL, BDF,...) pode ser feita com auxílio de módulos de importação/exportação. Cálculos com utilizando sistemas de elementos finitos LARSTRAN e LS-DYNA podem ser iniciados diretamente no PEP (FRANZKE et al, 2009).

2.6.2 LARSTRAN/Shape

O solver LARSTRAN/Shape está sendo desenvolvido, há muitos anos, em cooperação entre o Ingenieurgesellschaft LASSO mbH e o IBF. O foco tem sido o desenvolvimento de módulos para forjamento e validação do sistema para processos de conformação. Com a utilização do solver LARSTRAN, é possível, o cálculo de problemas mecânicos, térmicos e termomecânicamente acoplados e problemas de conformação elastoplástico em 2D e 3D. O sistema permite ainda o remalhamento automático para processos com grandes deformações.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS COMPUTACIONAIS E FÍSICOS

3.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL I: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM UMA MATRIZ PLANA E UM MANDRIL RETO APOIADO

O forjamento de eixos vazados parte da ideia de se forjar uma pré-forma previamente vazada. Entretanto, para manter o diâmetro interno ou até mesmo aumentá-lo durante o forjamento é necessário utilizar um mandril. A maneira mais simples de se forjar, com a utilização de um mandril, é aplicando força através de uma ferramenta plana superior, como mostrado na figura 10. Nesta concepção inicial, a deformação ocorre semelhantemente ao conhecido forjamento de anéis.

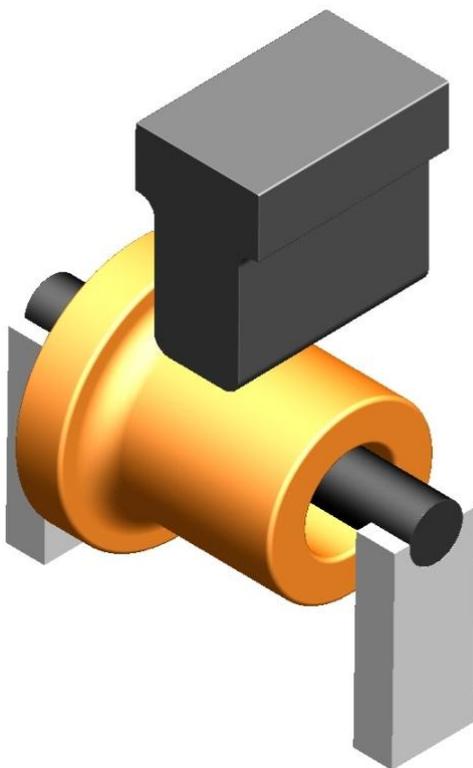


Figura 10 - Esquema do forjamento de eixo em matriz aberta.

3.1.1 Modelagem do forjamento de um eixo vazado com uma matriz plana e um mandril reto apoiado no PEP

A importação de modelos CAD para o programa PEP é muitas vezes problemática pelos numerosos erros que podem vir a ocorrer. Na modelagem de

conjuntos, quando possível, é mais confiável desenhar e montar os modelos no próprio ambiente PEP. A atenção à modelagem em PEP é importante, pois na concepção do modelo é que se determina o nível de complexidade da simulação. Conseqüentemente, quanto será exigido em termos de processamento do computador. Isto reflete diretamente, no tempo necessário, para concluir a simulação, podendo variar de poucos minutos a vários dias.

O início da modelagem se dá pelo desenho de pontos 1D, chamados de nós de origem, que unidos, formaram um objeto em 2D. Estes objetos 2D são então remalhados e depois revolucionados ou extrudados. Por esta razão, a modelagem em PEP exige do usuário, uma abordagem da construção de modelos, diferente da utilizada nos programas CAD convencionais. Para se evitar possíveis erros de remalhamento, é aconselhável iniciar o projeto com a construção da peça.

a) Construção da peça

A peça em questão é um cilindro vazado de $\varnothing 40 \times 20$ mm com diâmetro interno de 20 mm. O desenho 2D feito no PEP dará origem a uma peça cilíndrica oca, por isso é desenhada com deslocamento no eixo x para posterior revolução. Após o término de desenho 2D e é criada uma malha com tamanho de aresta de 2 mm (figura 11). O tamanho de aresta é determinado por experimentos de simulação preliminares. Uma malha refinada ao passo que melhora a fidelidade dos resultados à realidade, também aumenta muito o tempo de simulação. O tamanho de aresta escolhido deve ser tão pequeno quanto possível sem que gere erros de simulação.

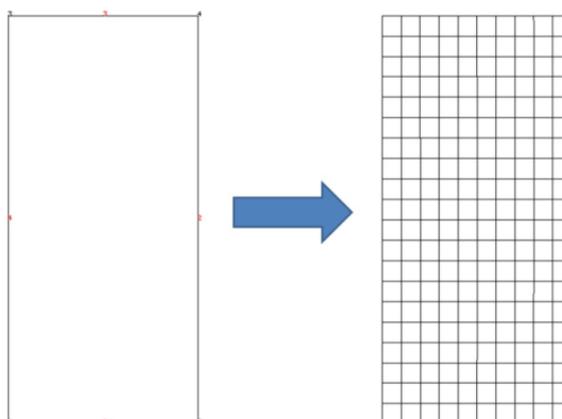


Figura 11 - Modelagem de peça em 2D

A revolução é feita, posteriormente, com 36 divisões; criando o objeto 3D remalhado. O número de divisões é escolhido de maneira a deixar a malha com elementos com aproximadamente o mesmo tamanho.

Após o remalhamento 3D, elementos 1D e 2D permanecem na peça e precisam ser apagados, como mostra a figura 12. A figura 13 mostra a peça como um sólido e a linha verde adverte sobre a presença de elementos 1D e 2D.

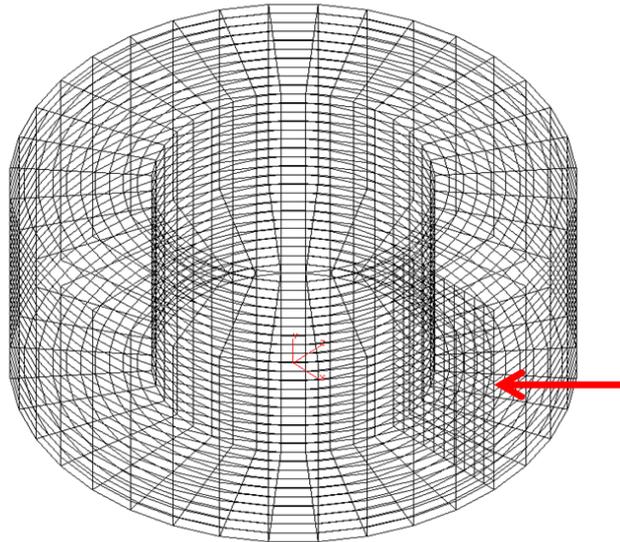


Figura 12 - Modelo 3D gerado em estrutura de arame que constitui a malha gerada automaticamente: em detalhe elementos 2D sobressalentes.

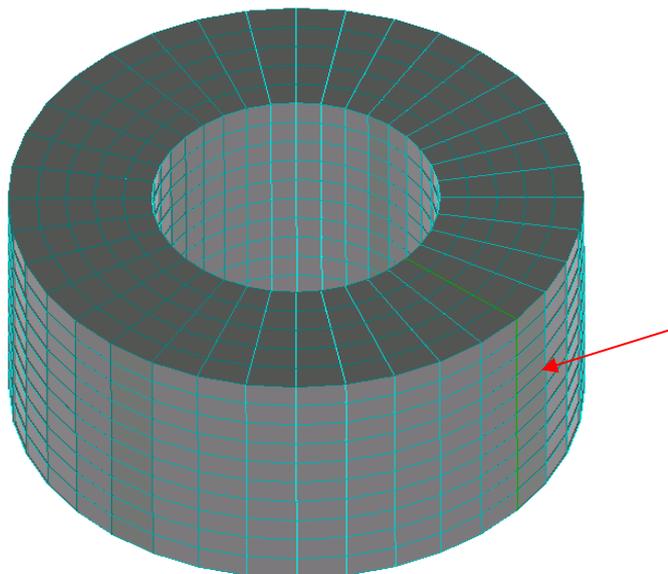


Figura 13 - Peça e Malha representada como um sólido: em verde elementos 2D sobressalentes.

Após a remoção dos elementos sobressalentes é feita a otimização que elimina elementos duplos e diminui o número de elementos presentes na malha.

Como pode ser visto na figura 14, há uma diferença no tamanho dos elementos mais internos em relação aos mais externos criados automaticamente pela revolução. A peça é então novamente remalhada no modo *Hexagrid* com tamanho de aresta elemento de 2 mm e novamente é feita otimização *Bandwidth*, o que resulta em uma malha muito mais homogênea como pode ser visto na figura 15.

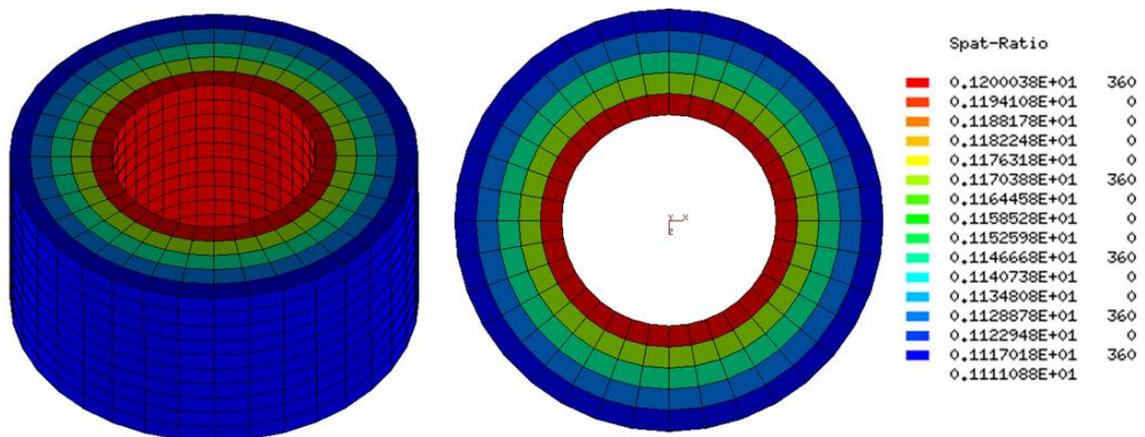


Figura 14 - Malha gerada automaticamente pela revolução: vista isométrica superior e frontal.

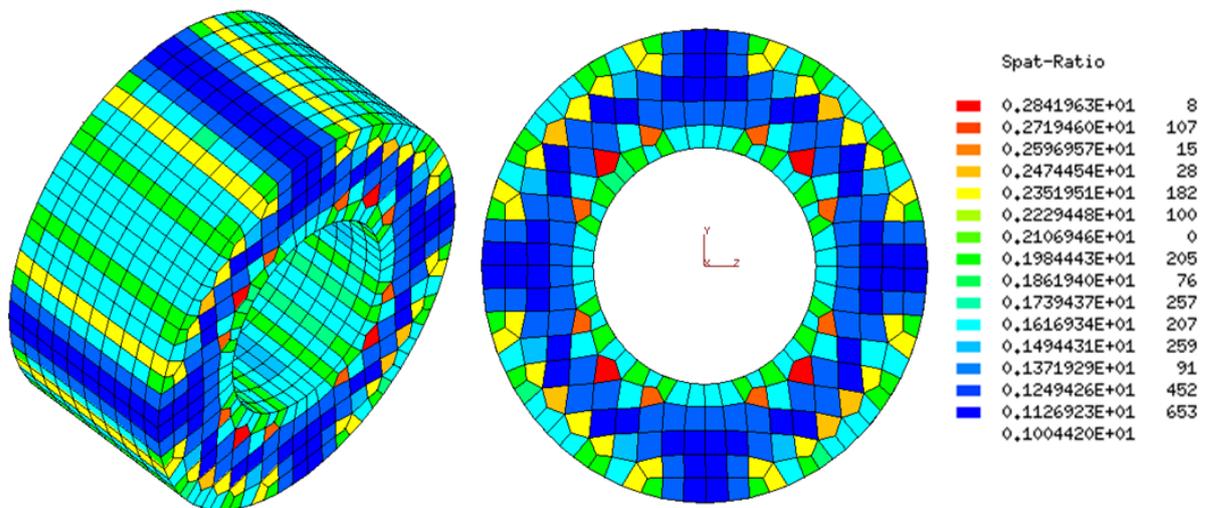


Figura 15 - Malha após otimização na vista isométrica e frontal

b) Construção de ferramentas

A construção de ferramentas específicas é feita analogamente a modelagem de peças. Inicialmente é construído um elemento 2D com 26 mm de comprimento; feito a quebra de cantos com 8 mm de raio. Posteriormente este elemento é extrudado formando uma ferramenta 3D em “casca”. O raio é feito com objetivo de maximizar o escoamento na direção axial. O procedimento é ilustrado pela figura 16.

A ferramenta, como um elemento sólido ,e sua malha em verde pode ser vista com mais detalhes na figura 17.

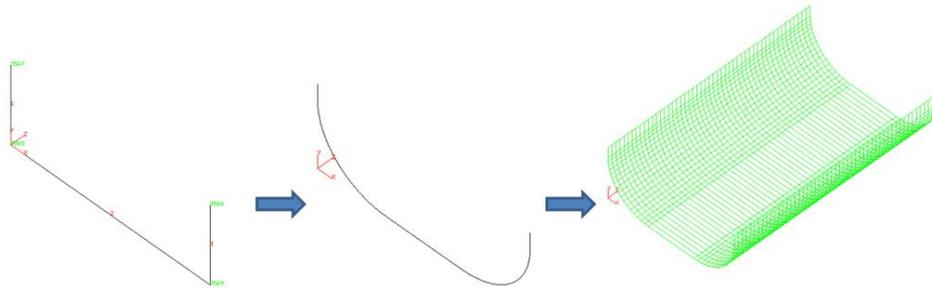


Figura 16 - Passo a passo do procedimento de construção da ferramenta de recalque.

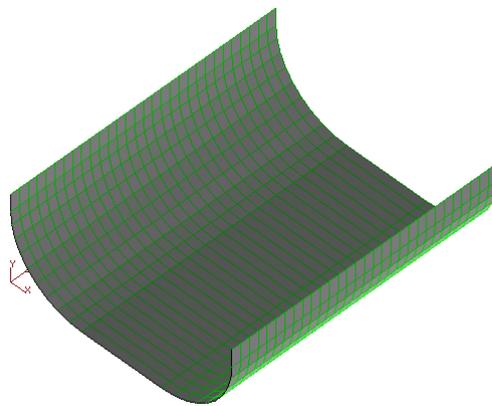


Figura 17 - Modelo 3D da ferramenta construída, vista isométrica.

O mandril é construído similarmente à ferramenta de recalque. Inicialmente é construída uma linha pela união de dois pontos. Esta linha é dividida em 5 elementos 2D, que são posteriormente revolucionados. A divisão em vários elementos é feita para aumentar o número de pontos de contato com a peça. Cinco divisões é o mínimo aplicável para este modelo (figura 18).

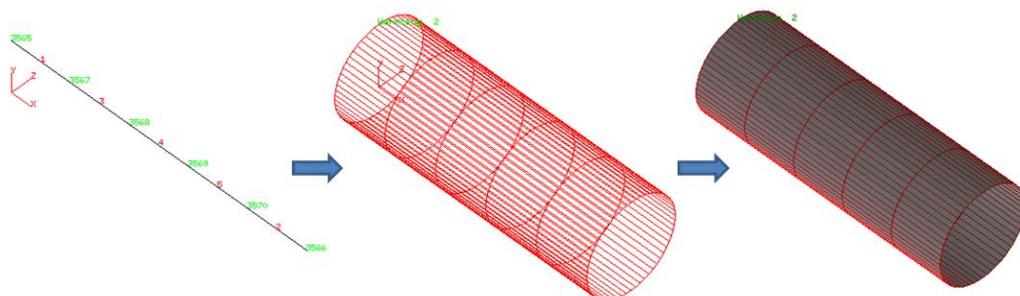


Figura 18 - Três passos da construção do mandril em vista isométrica.

c) Montagem das ferramentas e da peça em conjunto

A montagem é feita somente através de movimentos de translação e rotação das peças. Ambas as ferramentas são posicionadas por contato, utilizando-se de um recurso específico do programa PEP. Este tipo de montagem minimiza a probabilidade de erros de contato durante a simulação e evita cálculos desnecessários provenientes de movimentação de ferramentas sem contato com a peça. A montagem, com as malhas, pode ser vista na figura 19. O modelo sem as malhas pode ser visto na figura 20.

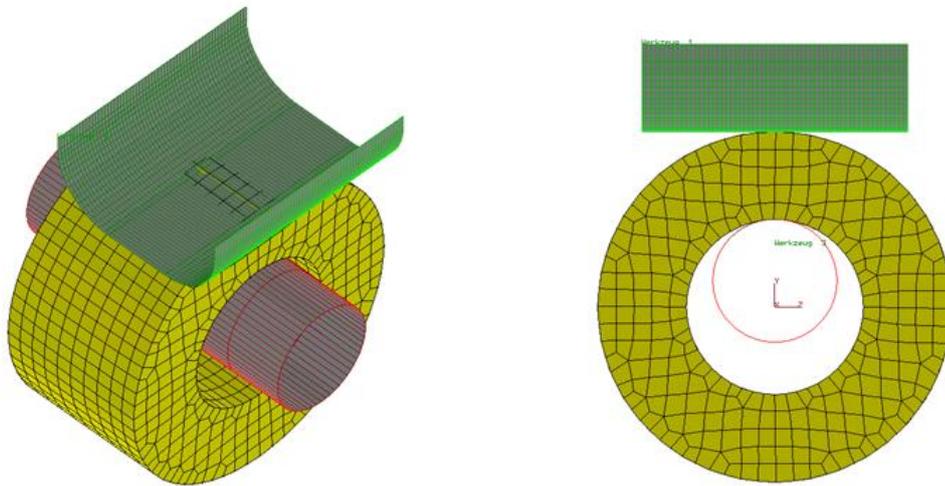


Figura 19 - Modelo montado e posicionado pronto para a simulação: em vista isométrica e lateral esquerda.

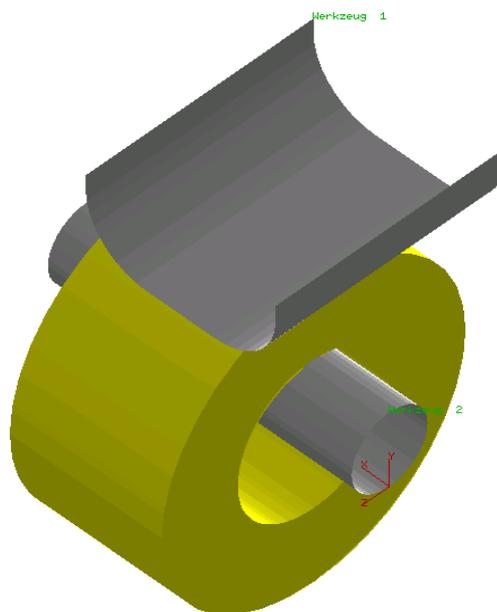


Figura 20 – Modelo 3D.

d) Programação

Por se tratar de apenas um recalque, a programação é relativamente simples. A programação é feita pelo *menu* CHEF e os parâmetros adotados são relacionados na tabela 7. Os parâmetros de simulação podem ser visto na tabela 8.

Sendo determinados todos os parâmetros de processo, inclusive dados de material e coeficientes térmicos (provenientes do banco de dados do programa), é necessário exportar o arquivo para a plataforma LARSTRAN. A simulação pode ser efetivada se abrindo um terminal de comando, onde também é feita a escolha do algoritmo a ser processado.

Tabela 7 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional I.

Material	Temperatura da peça (°C)	Temperatura das ferramentas (°C)	Velocidade (mm/s)	Coeficiente de Atrito (-)	Coeficiente de transferência de calor (W/K.m ²)	Coeficiente de Radiação Térmica (-)
42CrMo4	1200	100	20	0,3	0,04	0,9

Tabela 8 - Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional I.

Tamanho de Elemento (mm)	<i>Remesh</i>	Recalque (mm)	TIMS	<i>Time Steps</i>	Algoritmo
2	Hexagrid	~2,5	0,0012	100	Mecânico

3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL II: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM DUAS MATRIZES PLANAS E UM MANDRIL CÔNICO

O conjunto analisado é composto por duas matrizes (superior e inferior), um mandril cônico e uma pré-forma. A peça é feita em escala reduzida de 1:4, para economizar tempo de simulação. O modelo é uma alternativa ao processo desenvolvido na simulação computacional I. A modelagem adotada segue a mesma sistemática; entretanto, é utilizado um mandril cônico com 1° de conicidade, montado com pouca folga no interior da pré-forma.

a) Construção de ferramentas: mandril cônico

O mandril é construído similarmente às ferramentas de recalque, mas por se tratar de uma ferramenta cônica, a maneira mais fácil de construí-la é desenhar uma linha tangente ao maior e menor raio da ferramenta. A figura 21 mostra o mandril pronto. A figura 22 mostra o modelo montado.

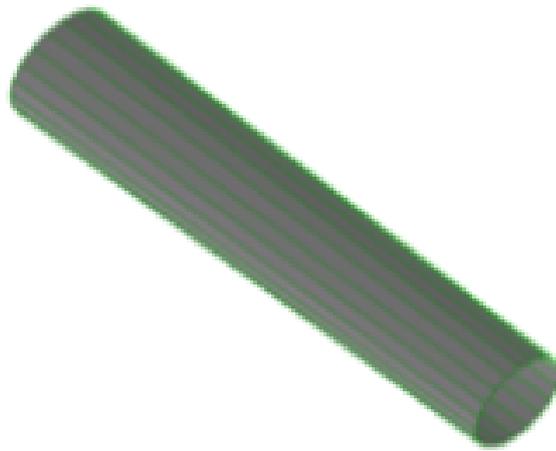


Figura 21 - Modelo 3D do mandril.

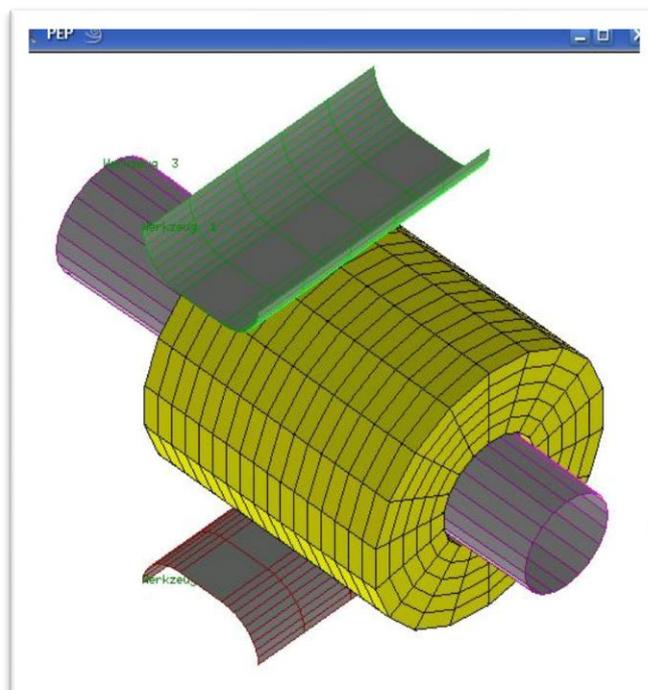


Figura 22 - Modelo construído.

b) Montagem do conjunto das ferramentas e da peça

A montagem analisada tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de forjamento, conforme figura 23.

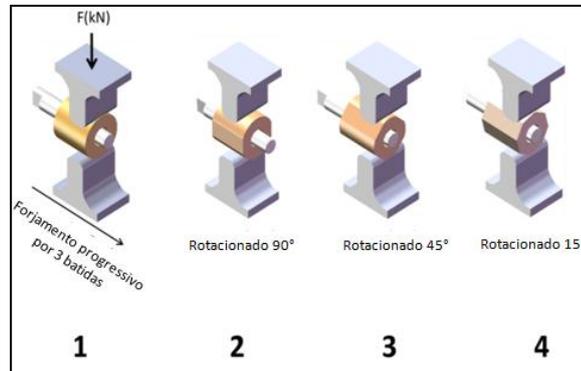


Figura 23 - Ciclo de forjamento proposto pra a fabricação de um eixo vazado.

A simulação numérica pode apresentar resultados muito divergentes da realidade, dependendo do processo de modelagem e simulação. Muitas vezes, quando se faz a reprodução fidedigna do modelo real não é possível encontrar soluções matemáticas coerentes. A busca da sistemática ideal do forjamento de eixos vazados para o programa LARSTRAN passa pela avaliação de diferentes soluções de modelagem. Neste caso específico, observou-se em experimentos preliminares que a peça tende a deslizar pelo mandril mesmo após pequenos carregamentos impostos pela ferramenta. Para corrigir este problema foram testadas diferentes adaptações nos modelos. Estas foram simuladas utilizando um algoritmo somente mecânico, porque é o algoritmo que permite simulações mais rápidas e consequentemente avaliações rápidas, pertinentes a um primeiro estágio de estudo. Foi simulado para critério de avaliação somente os ciclos 1 e 2 (figura 23), considerando o dispêndio de tempo necessário para a simulação dos vários ciclos de forjamento. As soluções predefinidas para avaliar os problemas de deslizamento foram 3, mais a montagem que reproduz um modelo sem adaptações, que servirá de comparativo. Os modelos simulados podem ser vistos nas figuras 24 e 25. Estas soluções de montagem buscam impedir o deslizamento da peça no mandril e são simuladas com os mesmos parâmetros vistos na tabela 9. As soluções propostas foram:

1-Reprodução do modelo sem adaptações (para comparação)

2-Utilização de fixadores de nós de elementos finitos

3-Utilização de uma placa de contenção de fluxo de material (*plate*)

4-Utilização de mandril com batente

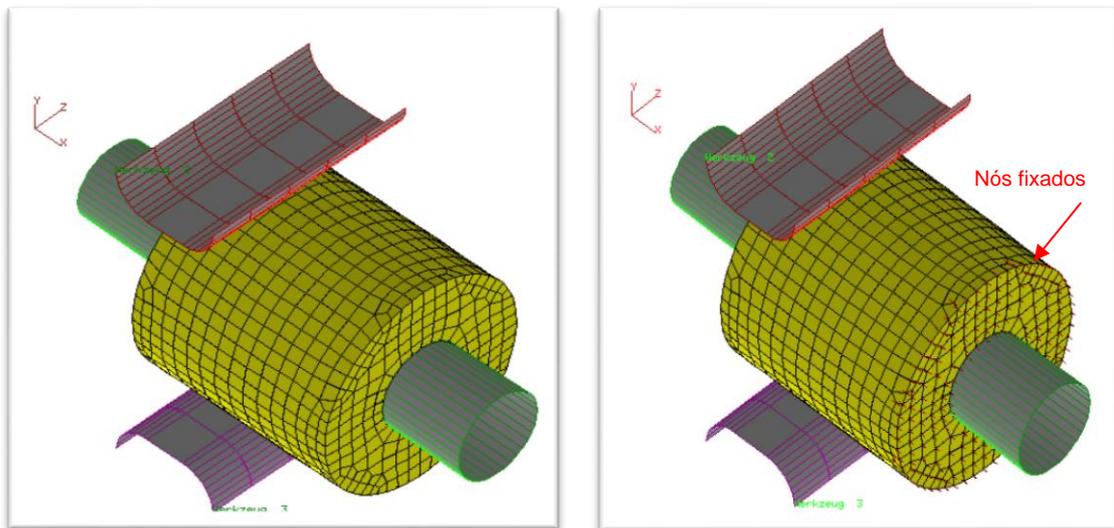


Figura 24 - a) Modelo sem adaptações; b) Modelo com fixadores de nós (indicados pela seta).

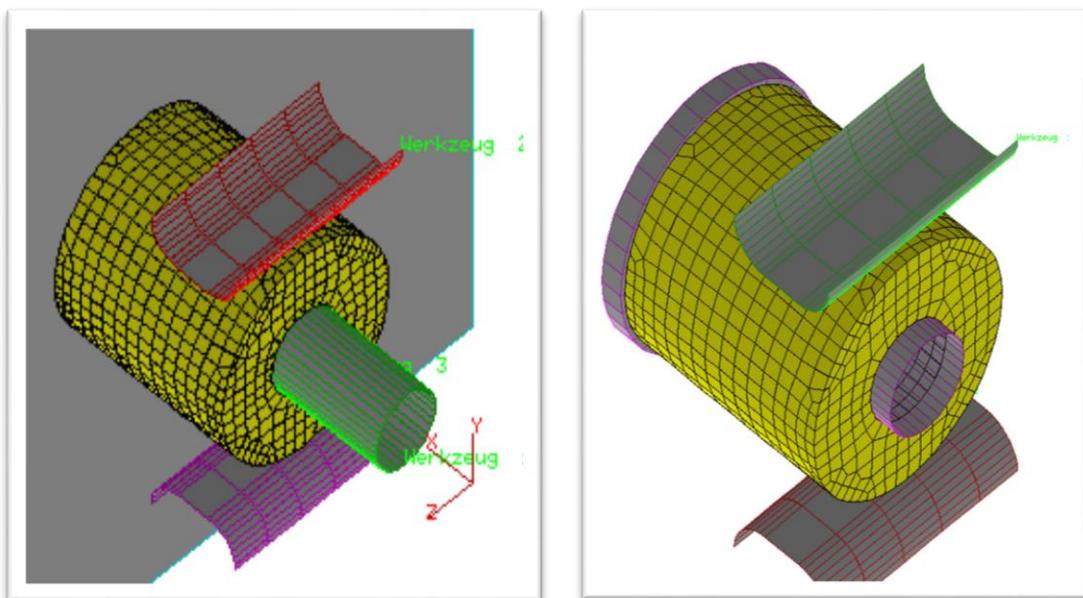


Figura 25 - a) Modelo com placa de contenção de fluxo de material (*plate*); b) Modelo com mandril com batente (vista frontal)

Tabela 9 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional II.

Temperatura da peça (°C)	Temperatura das ferramentas (°C)	Coefficiente de radiação térmica (-)	Coefficiente de transferência de Calor (W/K.m²)	Material	Velocidade (mm/s)	Coefficiente de Atrito (-)
1200	100	0,9	0,04	42CrMo4	20	0,3

c) Programação

A programação é feita pelo *menu* CHEF do PEP, os parâmetros escolhidos foram o TIMS = 0,035 e TSTEP= 120. O algoritmo escolhido foi o *Mechanical*. O controle é feito pelo *menu Model Program/Edit* onde são especificados os movimentos das ferramentas e as sub-rotinas que iram direcionar o processo de forjamento (figura 26).

Step	T	C	CP							
1	-20	2	MOVTIM	-,20000000E+00	-,20000000E+02	-,20000000E+02	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
2	-20	2	MOVABS	,15000000E+02	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
3	-60	2	ROTABS	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,10000000E+01	,00000000E+00	,00000000E+00	,90000000E+02
4	-60	2	MOVABS	-,40000000E+02	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
5	-20	3	MOVTIM	-,20000000E+02	-,20000000E+02	-,20000000E+02	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
6	-20	3	MOVABS	,15000000E+02	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
7	-60	3	ROTABS	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,10000000E+01	,00000000E+00	,00000000E+00	,90000000E+02
8	-60	3	MOVABS	-,40000000E+02	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
9	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
10	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
11	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
12	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
13	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
14	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
15	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
16	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
17	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
18	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
19	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00
20	0	0		,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00	,00000000E+00

Figura 26 - Dados de programa utilizados na simulação computacional II.

O Comando MOVTIM estabelece que a ferramenta deva retornar a posição inicial após 20 steps.

O Comando MOVABS determina quanto a ferramenta irá se movimentar na posição inicial.

O Comando ROTABS significa que a peça deve rotacionar, segundo um ângulo específico após 60 *steps*, ou seja, após 3 recalques a ferramenta irá rotacionar e se posicionar conforme posição inicial informada. Então é preciso um comando para que a ferramenta volte a posição de entrada após os 3 recalques, é o comando 4 visto na figura 26 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Verifica-se a correção da programação através do *menu Control*, que permite verificar a movimentação das ferramentas através de uma animação gráfica. A tabela 10 mostra os parâmetros de simulação.

Tabela 10 – Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional II.

Tamanho de Elemento (mm)	<i>Remesh</i>	Recalque (mm)	TIMS	<i>Time Steps</i>	Algoritmo
2	Hexagrid	5	120	0,035	Mecânico

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL III: AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM MODELOS DE NÓS E PLACA DE CONTENÇÃO

Os modelos selecionados para a simulação III foram: placa de contenção e o que utiliza nós fixados. A Simulação computacional III envolve o aumento do número de golpes progressivos e aumento da deformação, em relação a simulação computacional II. Foram testados nestes dois modelos, com 3 Δh diferentes: 3, 7,4 e 10 mm, que representam 6%, 15%, 20% de redução em relação ao diâmetro externo inicial.

A figura 27, mostra os dois conjuntos de modelos a serem simulados na posição inicial de forjamento: figura 27a) o modelo de placa de contenção e figura 27b) modelo com nós fixados. Estas concepções são as mesmas da simulação II; entretanto, sofreram deslocamento da posição inicial das matrizes para esquerda, afastando-se da peça. A mordida ou avanço S_b na sequência de forjamento também é reduzida para garantir o não aparecimento de deformações irregulares.

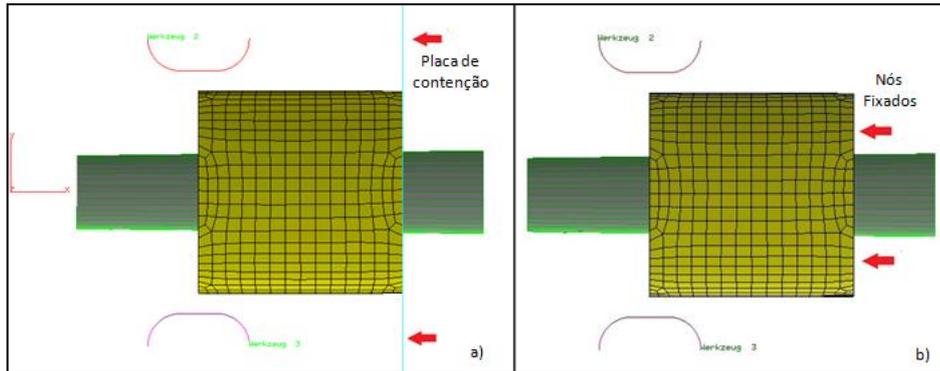


Figura 27 - a) Modelo com placa; b) modelo com nós fixados.

Neste experimento, houve algumas modificações nos parâmetros de processo e na estratégia de forjar. O ciclo de forjamento foi aumentado em um estágio, que é a rotação da peça em 45 graus, como pode ser visto na figura 28. O forjamento progressivo se realizou através de 5 golpes por subciclo. A tabela 11 mostra os parâmetros de simulações.

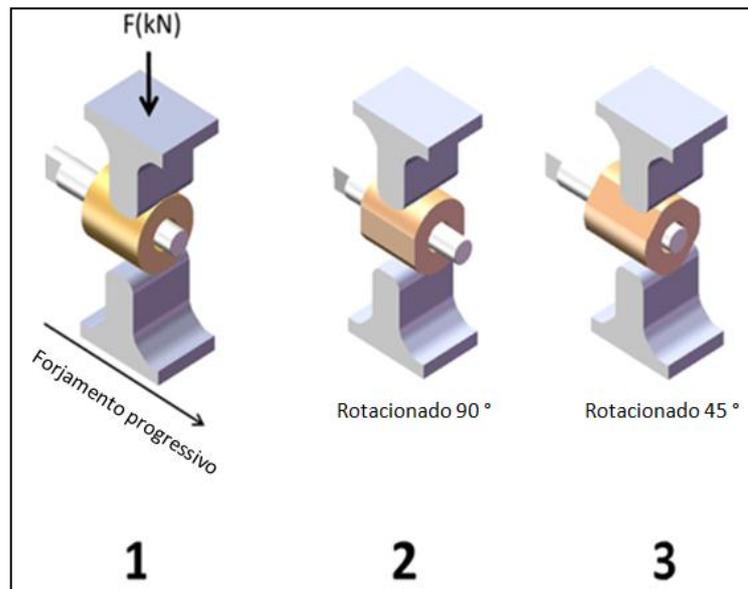


Figura 28 - Ciclo de forjamento adotado.

Tabela 11 - Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional III.

Material	Temperatura da peça (°C)	Temperatura das ferramentas (°C)	Velocidade (mm/s)	Coefficiente de atrito (-)	Coefficiente de transferência de calor (W/K.m ²)	Coefficiente de radiação térmica (-)
42CrMo4	1200	100	20	0,3	0,04	0,9

A avaliação pós-processo envolve análise visual dos elementos gráficos gerados após forjamento e a medição desses elementos gráficos, com uma metodologia específica mostrada na figura 29. Estas medidas são usadas para verificar e comparar dados de deformação, como: alongamento redução do diâmetro externo, aumento do diâmetro interno e redução de espessura. As medições são feitas em todos os modelos simulados.

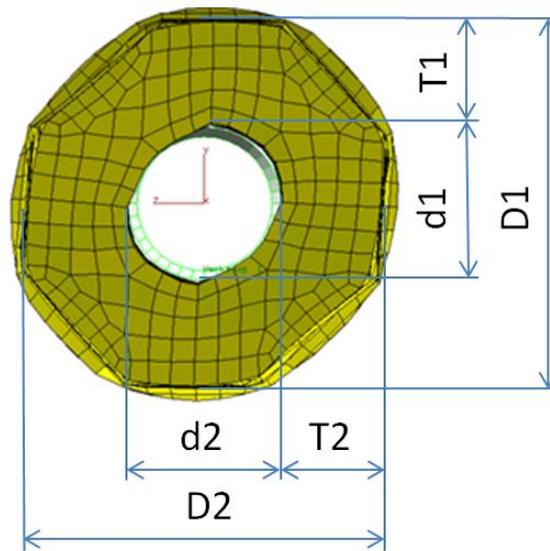


Figura 29 - Posições de medição na peça na vista frontal.

3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL IV: ANÁLISE DOS MODELOS COM MATRIZES PLANAS E MATRIZ INFERIOR EM “V”

A simulação IV tem como foco, avaliar a existência de diferença entre a utilização de uma matriz inferior em “V” em relação a uma matriz inferior plana. A matriz em V, com ângulo de 120°, são aplicados com o objetivo de inibir a rotação e distribuir a pressão de contato da matriz inferior em dois pontos.

A figura 30 mostra a montagem de modelos na posição inicial de forjamento. Na concepção adotada é utilizado o recurso de simetria de peça. Este recurso permite simular apenas metade da peça, conseqüentemente reduzindo o tempo de simulação.

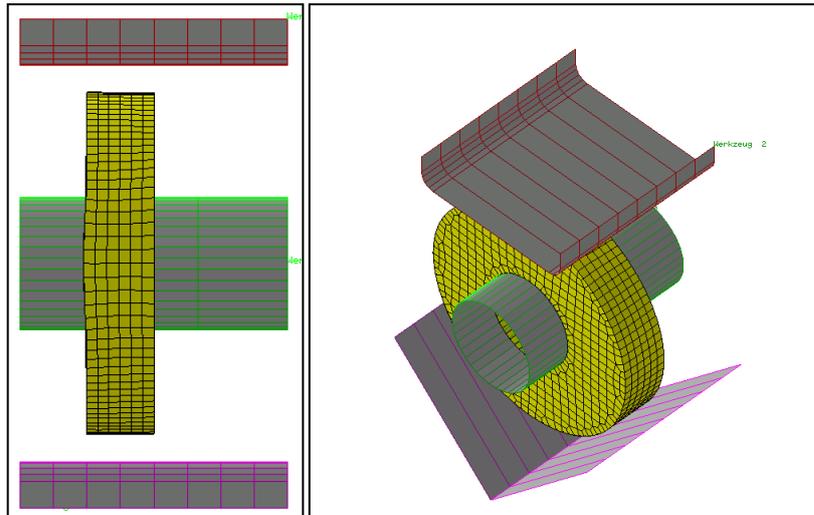


Figura 30 - Posição inicial de forjamento: a) matrizes planas; b) matriz inferior em V.

Os parâmetros do processo utilizados podem ser vistos na tabela 12. A tabela 13 mostra os parâmetros de simulação.

Tabela 12 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional IV.

Material	Temperatura da peça (°C)	Temperatura das ferramentas (°C)	Velocidade (mm/s)	Coefficiente de atrito (-)	Coefficiente de transferência de calor (W/K.m ²)	Coefficiente de radiação térmica (-)
42CrMo4	1200	100	20	0,3	0,04	0,9

Tabela 13 - Parâmetros de simulação processo utilizados na simulação computacional IV.

Tamanho de elemento (mm)	Remesh	Recalque (mm)	TIMS	Time Steps
2	Hexagrid	2	0,02	35

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL V: ANÁLISE DE FORJAMENTO COM MATRIZES EM “V” NA ESCALA DO EXPERIMENTO FÍSICO

Nesta simulação numérica computacional a estratégia de forjamento é mudada com objetivo de melhorar a distribuição da deformação. Ao invés das ferramentas avançarem na direção do eixo após cada recalque, são rotacionadas após cada recalque. As ferramentas são rotacionadas até completarem uma volta completa no perímetro da peça. O ângulo de rotação utilizado é de 24°. Este ângulo é resultado de uma otimização feita no IBF através de um programa de computador específico. O número de recalques resultantes é 15. Após 15 recalques as ferramentas avançam 20 mm e repetem o ciclo. A montagem pode ser vista na figura 31. A tabela 14 e 15 mostram os parâmetros de processo e de simulação. Apesar da prensa hidráulica ter a velocidade de 80 mm/s as simulações foram feitas a 20 mm/s porque tem influência direta no número de iterações que o programa realiza nos cálculos de conformação.

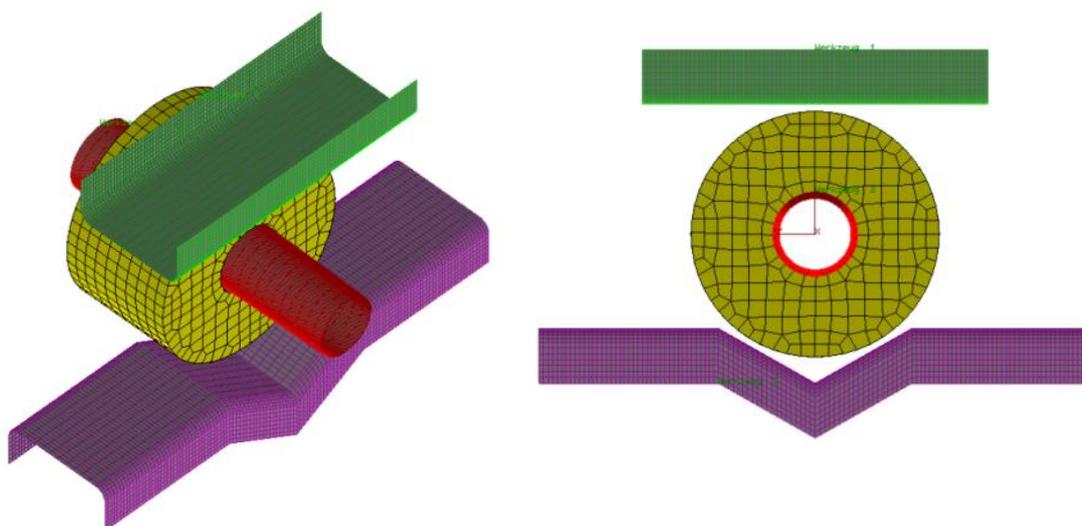


Figura 31 - Montagem do modelo em vista isométrica e lateral.

Tabela 14 - Parâmetros de processo utilizados na simulação computacional V.

Material	Temperatura da peça (°C)	Temperatura das ferramentas (°C)	Velocidade (mm/s)	Coefficiente de atrito (-)	Coefficiente de transferência de calor (W/K.m ²)	Coefficiente de radiação térmica (-)
42CrMo4	1200	100	20	0,3	0,04	0,9

Tabela 15 - Parâmetros de simulação utilizados na simulação computacional V.

Tamanho de elemento (mm)	Remesh	Curso (mm)	TIMS	Time Steps
2	Hexagrid	20	0,02	35

3.6 EXPERIMENTO FÍSICO: FORJAMENTO DE UM EIXO PILOTO

Baseado nos resultados obtidos na simulação computacional V, foi desenvolvida a rota de forjamento do eixo piloto de aproximadamente 150 kg, como pode ser vista na figura 32. O eixo é forjado a partir de uma pré-forma com furo central usinado. As dimensões iniciais, características e os parâmetros adotados podem ser vistos na tabela 15. O forjamento ocorreu com auxílio de uma prensa hidráulica de 6,7 MN e com o auxílio de um braço mecânico. O braço mecânico possui uma garra onde é fixado o mandril. A peça é colocada em um forno mufla e é aquecida até a temperatura de 1200 °C ficando dentro deste por 1 hora. A figura 33 mostra as dimensões iniciais da peça. A figura 34 mostra o posicionamento da peça no forno, feito com auxílio do braço mecânico.

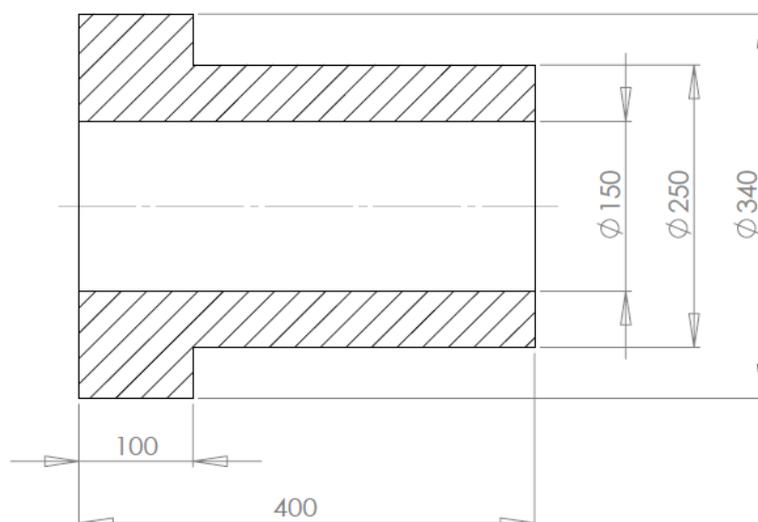


Figura 32 - Eixo vazado piloto (1:5).

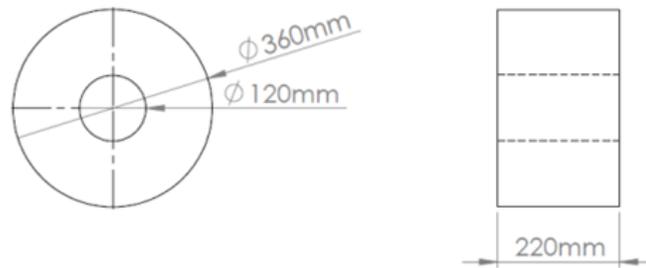


Figura 33 - Dimensões iniciais da peça



Figura 34 - Posicionamento da peça dentro do forno.

O eixo é forjado em quatro ciclos de forjamento sofrendo reaquecimento após o 3º ciclo.

Tabela 16 - Parâmetros do forjamento em escala do eixo.

Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Comprimento (mm)	Temperatura (°C)	Velocidade de ferramenta (mm/s)	Ciclos	Recalque (mm)
360	120	220	1200	80	4	20

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL I: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM UMA MATRIZ PLANA E UM MANDRIL RETO APOIADO

Como pode ser visto nas figuras 35 e 36, apesar do recalque ser pequeno, a peça apresenta um nível de deformação maior na parte onde tem contato com o mandril. De certa maneira, o mandril penetra na peça causando uma maior deformação equivalente nos elementos desta região. Esta penetração cria uma “mordida” e aumenta a superfície do diâmetro interno. No caso de um ciclo repetitivo onde a peça seria girada e recalçada varias vezes, isto irá influir em um grande aumento do diâmetro interno e pouco alongamento na direção longitudinal.

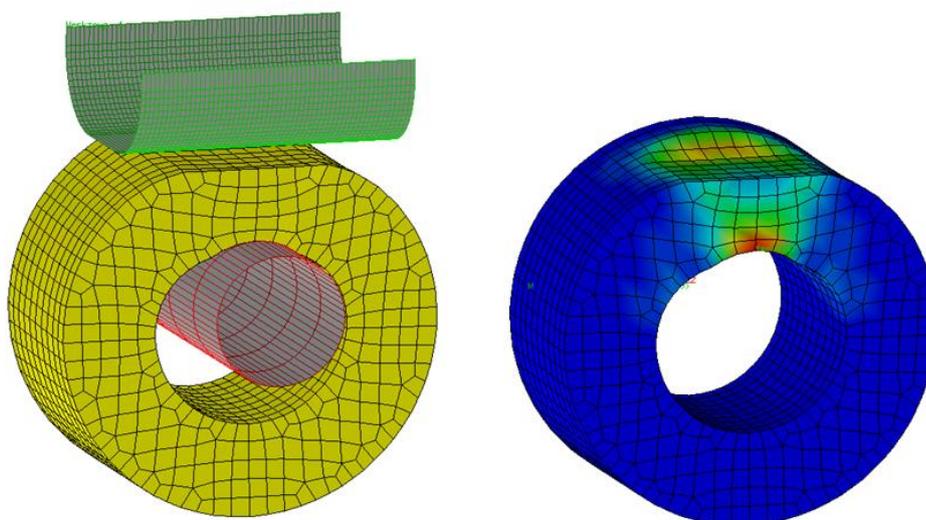


Figura 35 - Resultados da simulação com malha em vista isométrica

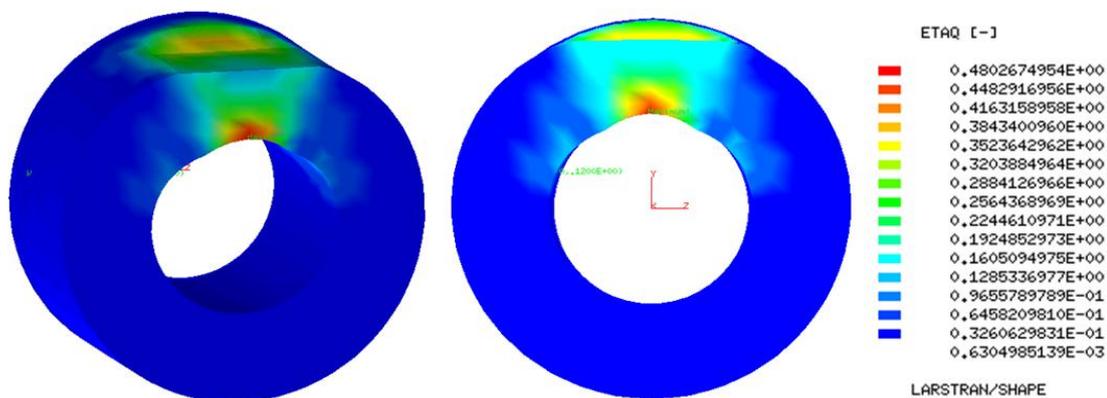


Figura 36 - Resultado da simulação de deformação equivalente sem a malha: vista isométrica e frontal.

O alongamento máximo da peça não pode ser atingido com este tipo de montagem. Torna-se claro que a estratégia de forjar com somente uma matriz e um mandril não produzirá o resultado desejado, caso se aplique um ciclo completo. Pelo que se observa na simulação, o mandril com folga confere grande deformação na parte interna da peça, levando ao alongamento do diâmetro interno, mas em compensação a um baixo alongamento.

4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL II: FORJAMENTO DE UM EIXO VAZADO COM DUAS MATRIZES PLANAS E UM MANDRIL CÔNICO

Como pode ser visto na figura 37, no local indicado pela seta, ocorre deformação. Isto significa que a peça deslizou no mandril, que é cônico com diâmetro da base maior que o furo. Ou seja, neste modelo a ferramenta atua no sentido oposto a base do mandril, mas a peça não deforma como esperado, porque ocorre o deslizamento.

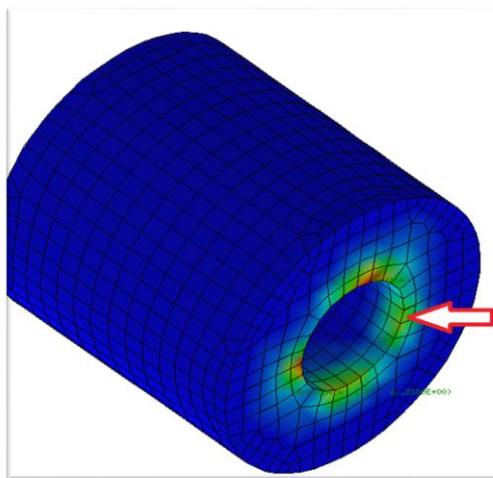


Figura 37 - Deformação plástica no modelo real: erro na simulação ocasionado por deslizamento.

A figura 38 mostra os resultados gráficos de deformação plástica para o modelo com placa de retenção (*plate*). (Nota-se que a peça apenas deslizou alguns milímetros na última batida do primeiro passe, como mostra a figura 38b) na região indicada pela seta, quando o volume deformado foi forçado contra o batente.

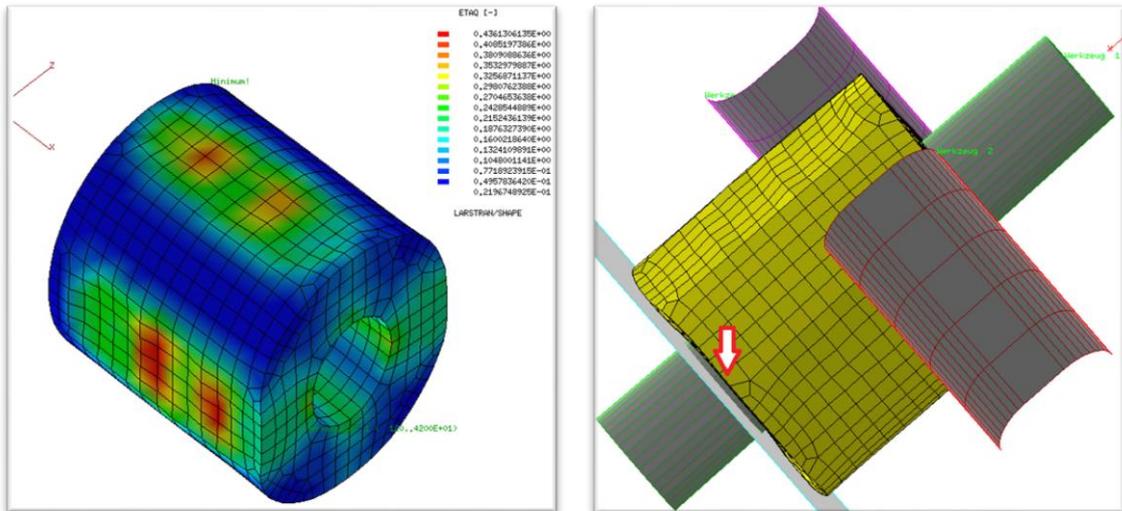


Figura 38 - Deformação plástica no modelo com batente: a) vista da parte posterior; b) detalhe do deslocamento da peça.

A figura 39 mostra os resultados para o modelo com fixadores de nós. A superfície, cujos nós foram fixados, é indicada pela seta na figura 39a). A vista lateral da peça evidencia que não houve deslocamento de nós na direção axial (longitudinal), entretanto um pequeno sobressalto na região mais próxima aos nós fixados induz ao entendimento de que houve deslocamento de material na direção radial. O fluxo ao se deparar com uma barreira, que são os nós fixados na direção axial, encontra a solução de se deslocar radialmente.

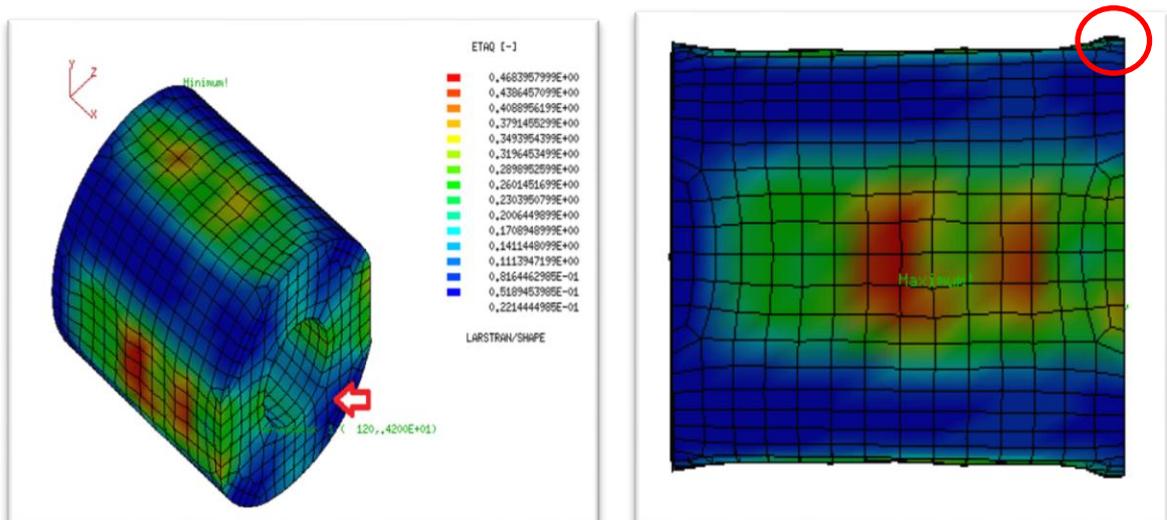


Figura 39 - Deformação plástica no modelo com fixadores de nós: a) vista da parte posterior; b) vista lateral evidenciando o sobressalto de material.

A figura 40 mostra o resultado para o modelo com mandril com batente. O elemento gráfico obtido, apenas evidencia um erro ocorrido durante o processo de simulação.

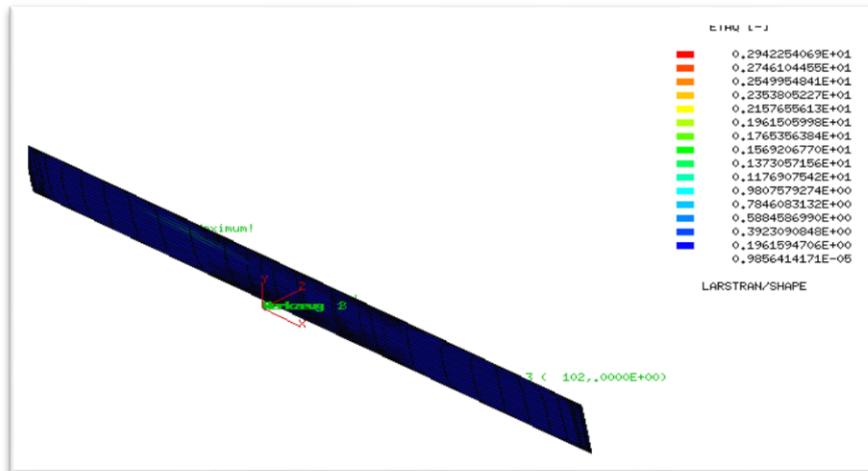


Figura 40 - Deformação plástica no modelo com mandril com batente: geometria incoerente.

A utilização de soluções de montagem pode ser avaliada segundo quatro modelos de forjamento. No modelo que se representou a condição sem adaptações não foi possível concluir a simulação com êxito porque a peça desliza axialmente quando a ferramenta de recalque entra em contato. No caso do modelo com mandril com batente, ocorre um erro similar que faz a peça extrapolar o mandril.

Os modelos com placa de contenção (*plate*) e com fixadores de nós apresentaram bons resultados. Nesta primeira etapa, não foram avaliados alongamento e alargamento, pois se tratam de experimentos para avaliação da sistemática do processo. As simulações foram realizadas com parâmetros conservadores, por exemplo: o recalque reduzido, números de recalques reduzidos, distância grande entre recalque (avanço grande), número de passes reduzidos e o algoritmo mecânico.

4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL III: AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM MODELOS DE NÓS E PLACA DE CONTENÇÃO

As figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46, mostram os resultados gráficos dos experimentos de simulação. A avaliação visual de peças que foram forjadas com 3 mm de deformação ($\Delta h = 3$ mm), não apresenta distorção do diâmetro interno. Essas

peças também mostram uma tendência de rotação, como pode ser visto nas figuras 38 e 39, na vista frontal. A tensão equivalente, comparando o modelo com placa e modelo com fixadores de nós, pode ser considerado igual.

A figura 40 e figura 41 mostram os resultados das simulações gráficas para forjados com 7,4 de deformação ($\Delta h = 7,4$ mm) para os modelos com placa de contenção e nós fixadores respectivamente. Como pode ser visto na Figura 43 a), apesar de uma deformação irregular no diâmetro interno, a peça mostra ainda uma tendência de rotação. Como mostrado na figura 41c), a extremidade da parte mais frontal demonstrou menor deformação do que o resto da peça. Isto ocorreu provavelmente porque a posição inicial das ferramentas é fixa ao contrário da peça que aumenta de tamanho e assim por consequencia a sua extremidade.

A peça forjada com fixadores de nós (figura 41a)) apresenta uma deformação muito irregular no diâmetro interno, provavelmente ocasionadas por movimentos de rotação da peça durante o processo de forjamento. A figura 42 e figura 43 mostram os resultados gráficos das simulações de forjamento com 10 mm de deformação ($\Delta h = 10$ mm) para os modelos com placa de contenção e fixadores de nós. Os resultados para ambas as simulações, mostram rotação da peça e distorção do diâmetro interno.

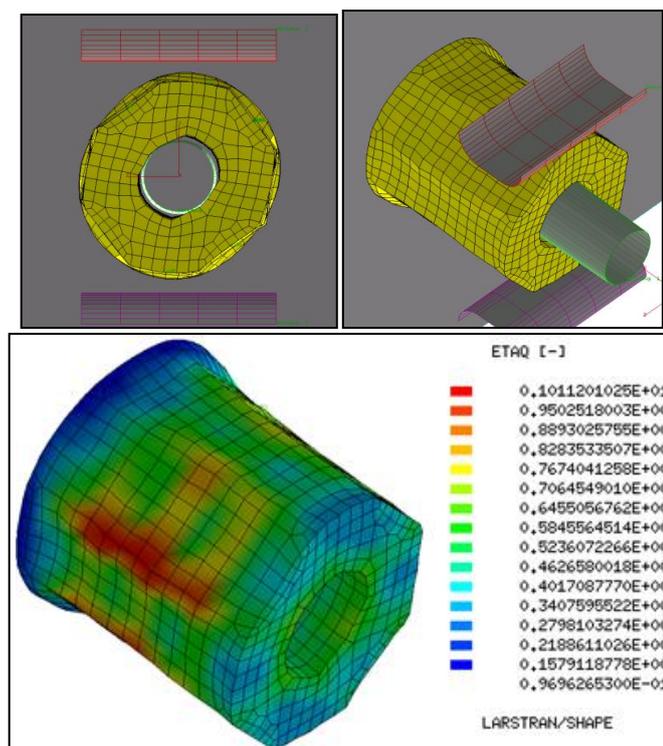


Figura 41 - Peça simulada modelo com placa de contenção, $\Delta h = 3$ mm.

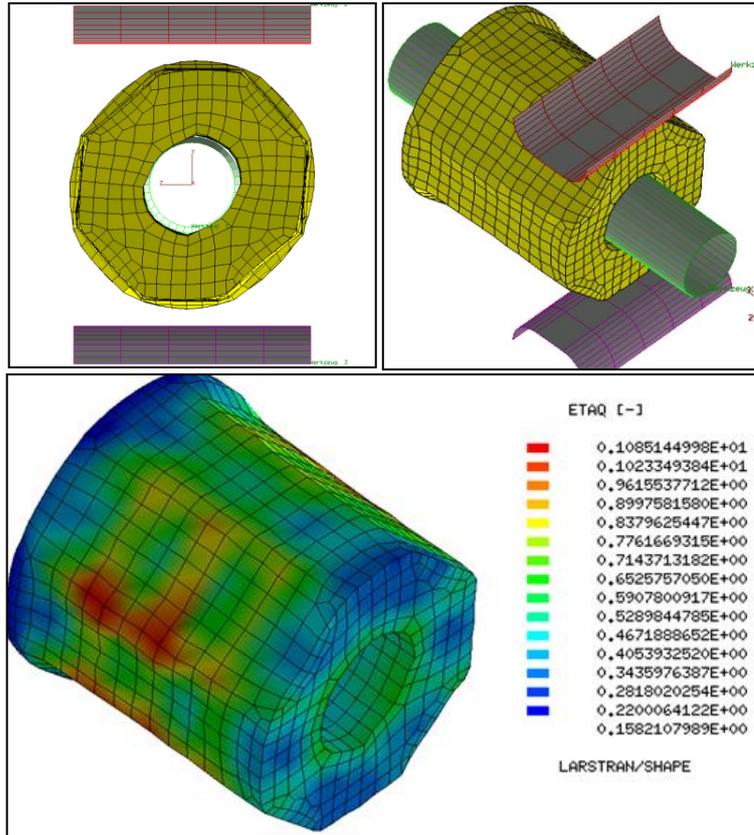


Figura 42 - Peça simulada com nós fixadores, $\Delta h = 3$ mm.

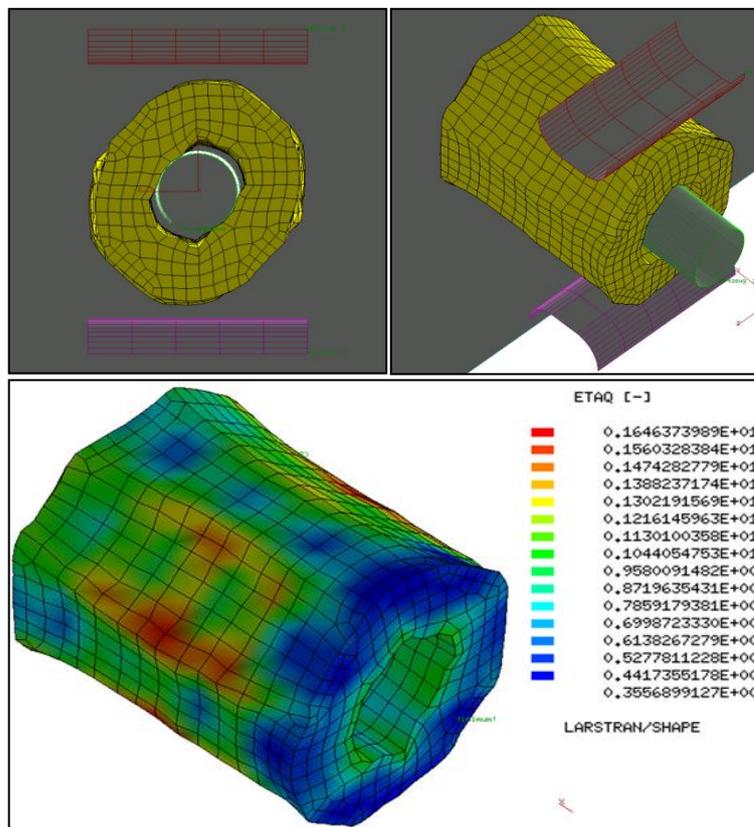


Figura 43 - Peça simulada modelo com placa de contenção, $\Delta h = 7,4$ mm.

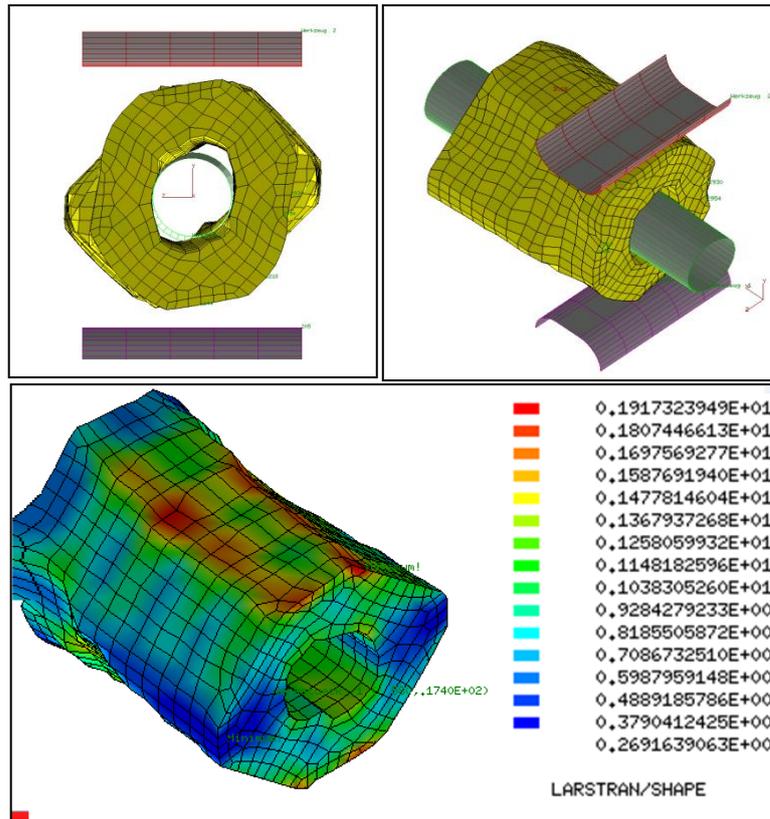


Figura 44 - Peça simulada com nós fixadores, $\Delta h = 7,4$ mm

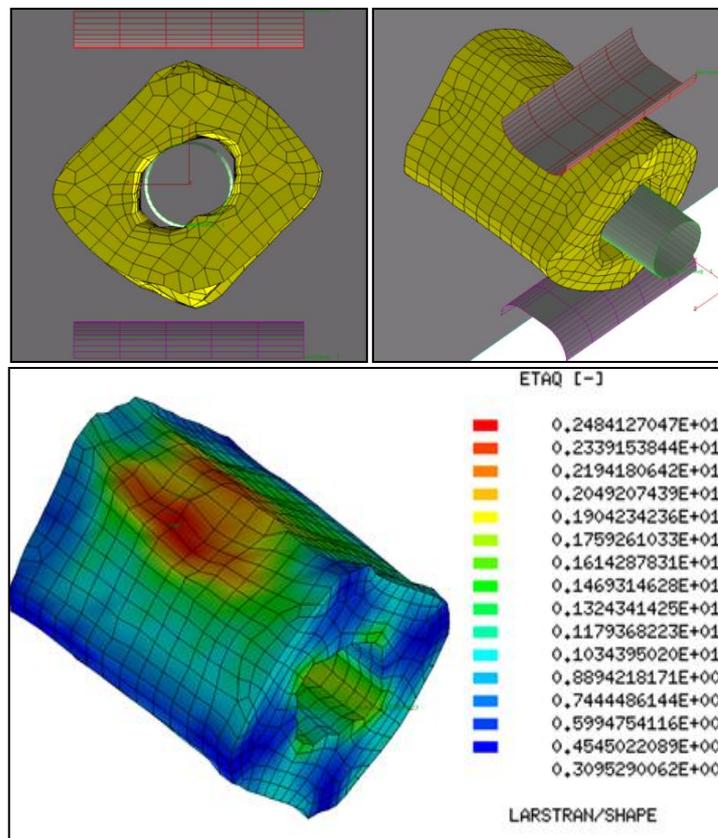


Figura 45 - Peça simulada modelo com placa de contenção, $\Delta h = 10$ mm

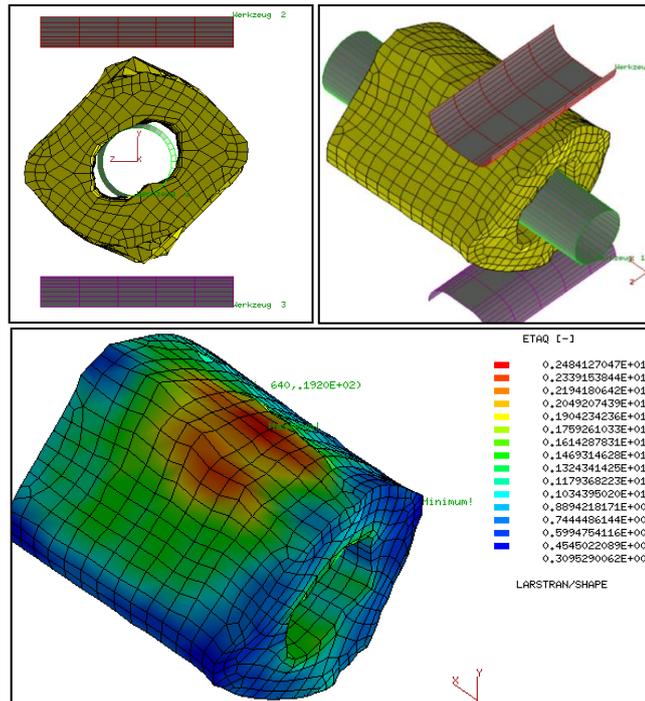


Figura 46 - Peça simulada com nós fixadores, $\Delta h = 10$ mm.

A tabela 17 apresenta as medições de peças para frente da peça e a tabela 18 mostra medições da base. Os pontos de medição são dados na figura 47. A tabela 19 mostra os aspectos de deformação, como resultado da conformação de metal, onde L_{max} é o comprimento máximo e ΔL é o comprimento final menos o comprimento inicial.

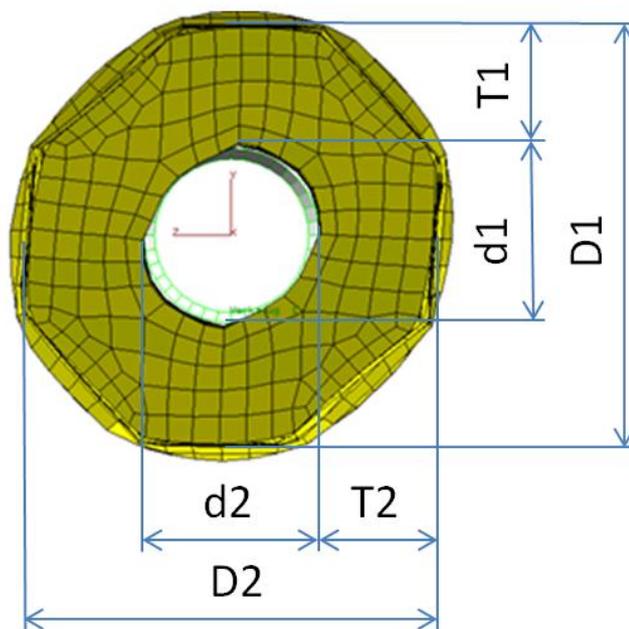


Figura 47 - Posições de medição na peça na vista frontal.

Tabela 17 - Medidas das peças frontalmente em mm.

Peça	D ext. Front		D int. Front		Espessura Frontal	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>d1</i>	<i>d2</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>
Contenção ($\Delta h=3$)	49,4	47	24,7	21,8	14,5	14,8
Contenção ($\Delta h=7,4$)	25,3	52,2	24,9	18,51	13,4	12,01
Contenção ($\Delta h=10$)	53,7	57,8	28	19,2	10,8	17,6
Fixadores ($\Delta h=3$)	48,6	46,7	23,6	21	15,2	13
Fixadores ($\Delta h=7,4$)	50,5	44,2	22,8	19	12,2	12,6
Fixadores 10 ($\Delta h=10$)	45,7	58	22	24	12,8	17

Tabela 18 - Medidas das peças na base em mm.

Peça	D ext. Base		D int. Base		Espessura da Base	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>d1</i>	<i>d2</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>
Contenção 3	53,6	51,4	34,8	21	13,7	13
Contenção 7,4	44,2	50,5	19,8	27	13,2	15,5
Contenção 10	48,7	58	25	20	12	16,8
Fixadores 3	51	52	23,5	21,78	14,4	14,7
Fixadores 7,4	48,5	53	22,8	24,8	13	17
Fixadores 10	54	58	22	19,5	17,6	14,4

Tabela 19 - Aspectos de deformação em mm.

Peça	L max.	ΔL	Alongamento ε (%)	Redução de espessura Frontal.	Redução de espessura da Base
Contenção 3	55,4	5,4	10,8	0,4	1,7
Contenção 7,4	58,7	8,7	17,4	2,3	0,7
Contenção 10	66	16	32	0,8	0,6
Fixadores 3	54	4	8	0,9	0,4
Fixadores 7,4	57,6	7,6	15,2	2,6	0,0
Fixadores 10	62	12	24	0,1	-1,0

Como pode ser visto na quarta coluna da tabela 18, o modelo com placa de contenção apresenta melhores resultados para o alongamento percentual do que o modelo de fixadores de nós. Os resultados para $\Delta h = 10$ mm, em destaque em cinza, evidenciam que a deformação foi irregular.

O forjamento de eixos vazados usando pequenos incrementos exibiu os melhores resultados gráficos. Para $\Delta h = 7,4$ mm os resultados gráficos foram substancialmente bons, embora tenha ocorrido pequena rotação da peça. Para $\Delta h = 10$ mm os resultados gráficos falham pela rotação excessiva da peça e penetração de material no interior da ferramenta. Problemas que ocorrem provavelmente por causa do posicionamento fixo da ferramenta, sem considerar a nova geometria obtida pelo passe anterior.

Para as geometrias medidas, a solução com placa apresenta melhores resultados do que nós fixadores, com 8,7 mm de alongamento (17%), bem como a pequenos incrementos. Os valores encontrados pelo $\Delta h = 10$ mm não podem ser usados para uma boa comparação, mas podem mostrar o alongamento possível a ser alcançado.

4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL IV: ANÁLISE DOS MODELOS COM MATRIZES PLANAS E COM MATRIZ INFERIOR EM “V”

A figura 48 mostra os resultados da deformação equivalente (ETAQ) para o primeiro recalque no modelo de matrizes planas e para o modelo de matriz inferior em "V". As peças estão no modo de simetria (espessura = 20mm). Como pode ser visto, para o modelo de matriz inferior em "V" a deformação no seu diâmetro interno é menor do que no modelo com matrizes planas. Isto sugere que as deformações serão menos irregulares no diâmetro interno. O problema de rotação da peça é resolvido neste modelo, pois a matriz em “V” oferece apoio à peça, travando possível rotação.

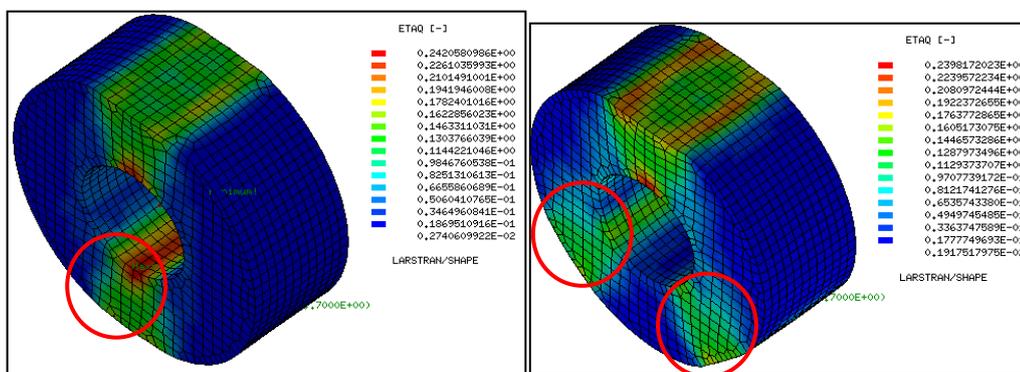


Figura 48 - Resultados de deformação equivalente para $\Delta h = 4$ mm: a) para modelo de matrizes planas; b) modelo com matriz inferior em “V”.

A figura 49 mostra os resultados da deformação equivalente para o segundo recalque. A condição de menor deformação no diâmetro interno permanece e os valores para deformação equivalente são mais homogêneos e menores.

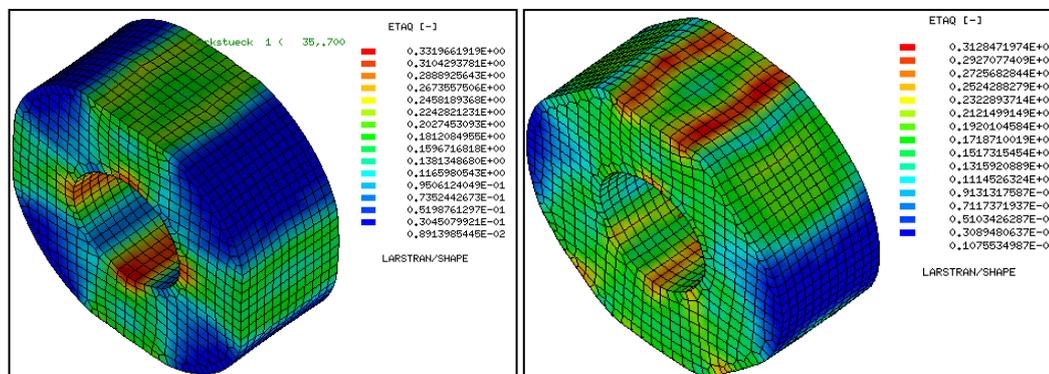


Figura 49 - Resultados de deformação equivalente para $\Delta h = 4$ mm: a) para modelo de matrizes planas; b) modelo com matriz inferior em “V”.

Para comparar os deslocamentos e o alongamento, foi utilizada a função D no *fringe plot menu*. Esta função permite encontrar os valores máximos e mínimos de deslocamento em um eixo específico. Os resultados para cada eixo, para matrizes planas e em “V”, são mostrados nas figuras 50 e 51. Os resultados numéricos podem ser vistos na tabela 20.

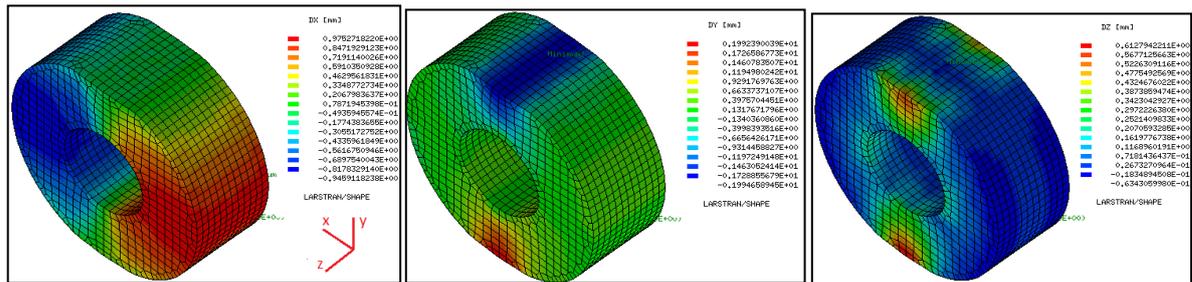


Figura 50 - Deslocamento no modelo de matrizes planas após primeiro recalque: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z.

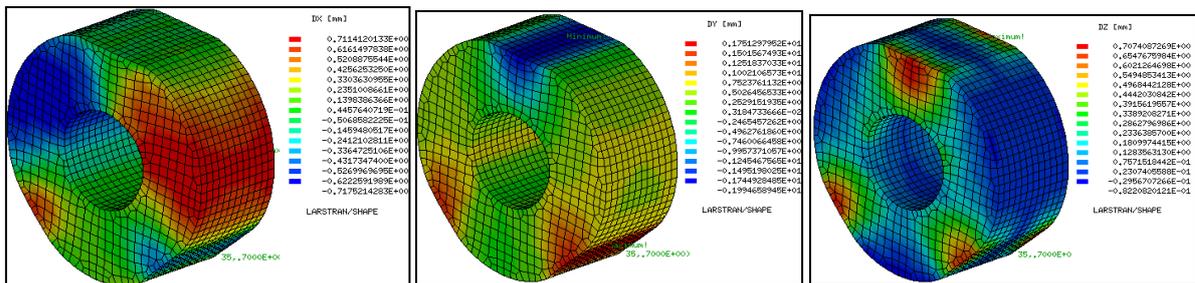


Figura 51 - Deslocamento no modelo de matriz inferior em V após primeiro recalque: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z.

Tabela 20 - Deslocamento em mm

	Dz	Dy	Dx	Alongamento %
modelo de matrizes planas 1 recalque	0,612	2	0,97	2,448
modelo de matrizes planas 2 recalques	0,64	2,8	0,14	2,56
matriz inferior em V 1 recalque	0,7	0,2	0,72	2,8
matriz inferior em V 2 recalques	0,96	2	0,77	3,84

Como demonstrado, a aplicação de pequenos recalques para o forjamento de eixos pode ser adequada, considerando os resultados de deformação nas simulações numéricas. Entretanto há outros parâmetros a serem considerados, como tempo forjamento e perda de temperatura, por exemplo. A otimização destes

parâmetros só pode ser feita quando um processo de fabricação estável é estabelecido através da simulação numérica computacional. As análises locais, feitas nos modelos desenvolvidos e simulados no PEP/Larstran, são úteis para compreender o conhecimento sobre a funcionalidade do programa e para a otimização do processo otimizado de forjamento de eixos vazados entretando devem ser utilizados com cautela.

A análise dos resultados mostra que o modelo com matriz inferior em “V” teve melhores resultados para o alongamento e também para a preservação da geometria circular interna. Neste caso, o principal problema observado foi que a maior parte da deformação é perto da superfície. Isso significa menos deformação (alongamento) perto do diâmetro interno, o que cria uma diferença de alongamento. Ou seja, os elementos mais externos alongam mais, segundo as simulações.

4.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL V: PROPOSTA DE FORJAMENTO COM MATRIZ INFERIOR EM “V”

A figura 52 mostra o resultado de deformação equivalente para o primeiro passe completo com uma largura de contato matriz/peça S_b de 40 mm. As regiões em vermelho representam maior deformação equivalente.

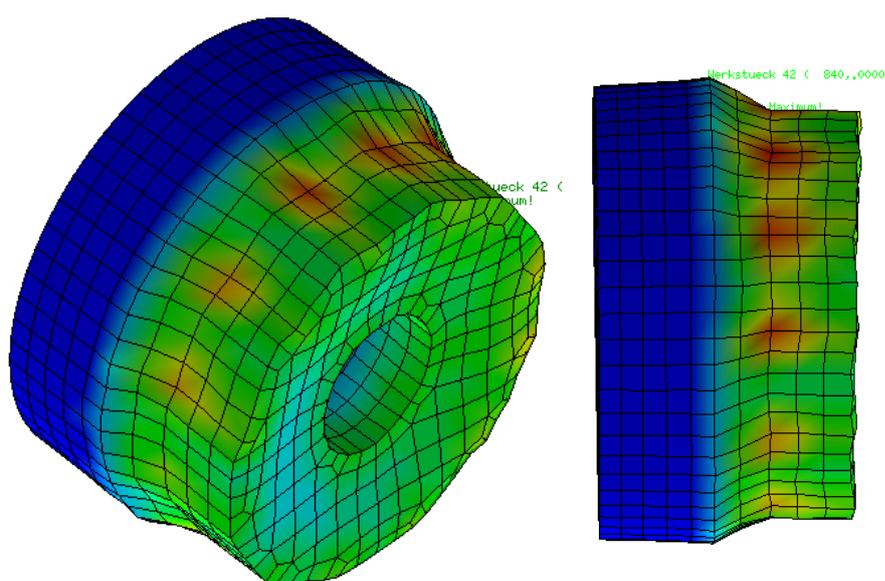


Figura 52 - Peça após ciclo completo de forjamento em torno do eixo: a) vista isométrica; b) vista frontal.

A figura 53 mostra os resultados gráficos de deformação equivalente para o segundo passe que tem um avanço de posição de 20 mm em relação ao primeiro passe.

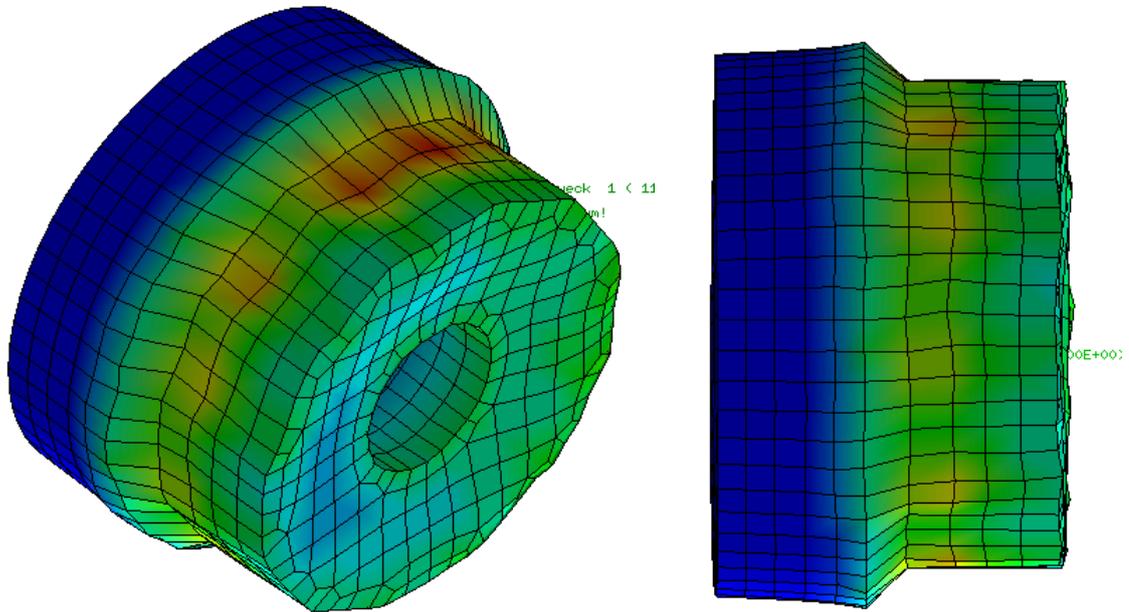


Figura 53 - Peça após ciclo completo de forjamento em torno do eixo: a) vista isométrica; b) vista frontal.

Os resultados podem ser considerados satisfatórios, pois ocorre pouca deformação do diâmetro interno e pouca rotação da peça. Estes resultados apresentados, diante todas as simulações anteriormente feitas, mostram que é possível o forjamento em escala, aplicando inclusive mais ciclos de forjamentos não simulados. Ou seja, a aplicação de mais passes de forjamento na peça mostra uma tendência de comportamento favorável.

4.6 EXPERIMENTO FÍSICO: FORJAMENTO DE UM EIXO PILOTO

O processo de forjamento de um eixo piloto é demonstrado nas figuras 54, 55 e 57. A figura 54 mostra a peça sendo forjada no último passe do primeiro ciclo de forjamento. A figura 55 mostra a peça posicionada para início do segundo passe. A ferramenta foi avançada mais que o previsto na simulação computacional V devido ao escorregamento na direção da garra. Esta solução foi adotada para que a peça após conformada “agarrasse” no mandril evitando escorregamento.

A figura 56 mostra o último passe do segundo ciclo. A figura 57 mostra o último passe do terceiro ciclo de forjamento. Após este ciclo, a peça voltou para o forno por 1 hora devido à perda térmica durante o processo. Depois de reaquecida a peça volta a ser forjada no quarto ciclo, como mostra a figura 58. A figura 59 mostra a peça logo após o forjamento ainda sofrendo o resfriamento ao ar.

A figura 60 mostra um croqui que representa as dimensões aproximadas da peça obtida, onde pode ser visualizada forma geométrica final da peça. O diâmetro interno na parte oposta a flange praticamente se manteve, enquanto na parte do flange o diâmetro sofre um alargamento de 30 mm no diâmetro nominal. O comprimento final da peça foi 390 mm o que representa 77% de alongamento em relação ao comprimento inicial de 220 mm. Apesar da manipulação por *joysticks* de um braço mecânico gerar alguma imprecisão no posicionamento, ela não interfere na rota de fabricação estabelecida. As dimensões obtidas podem ser consideradas satisfatórias, correspondendo parcialmente à rota de fabricação adotada, conforme simulação computacional V.



Figura 54 - Último recalque do primeiro ciclo de forjamento.



Figura 55 - Posicionamento para início do segundo ciclo de forjamento.



Figura 56 - Último passe do segundo ciclo de forjamento.



Figura 57 - Último passe do terceiro ciclo de forjamento.



Figura 58 - Último passe do quarto ciclo de forjamento.



Figura 59 - Resultado final do experimento.

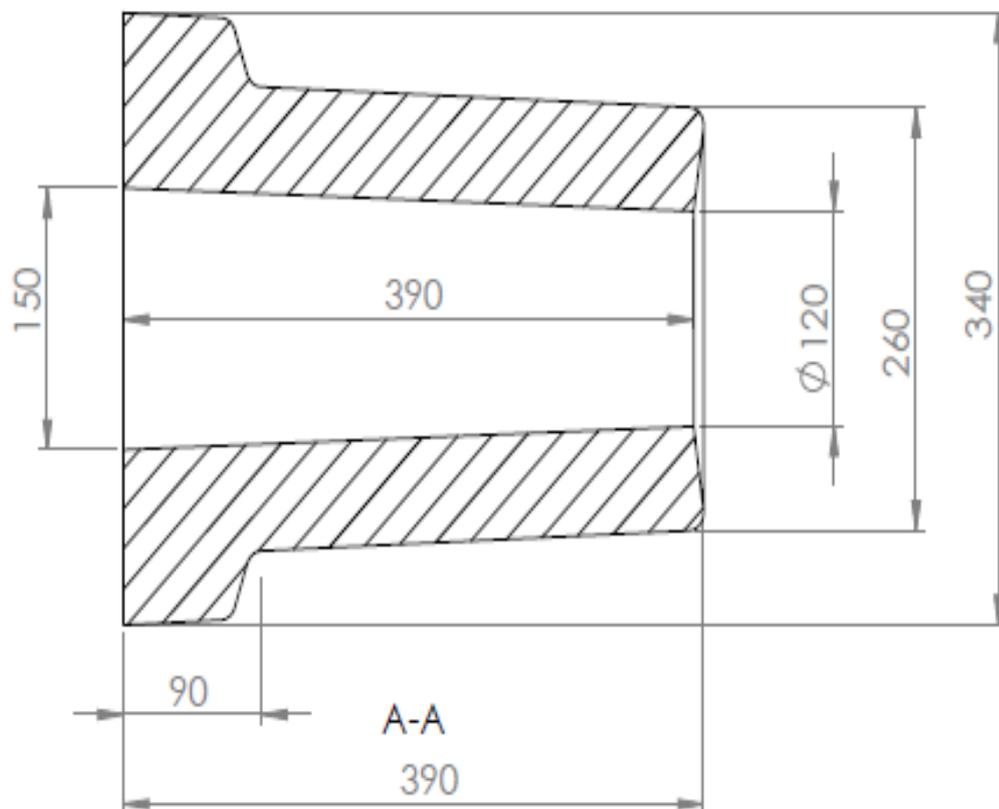


Figura 60 - Croqui das dimensões finais obtidas após o forjamento experimental.

5 CONCLUSÕES

O modelo utilizado na simulação computacional I, com mandril apoiado e uma matriz reta não apresentou resultados satisfatórios porque ocorreu maior deformação relativa no diâmetro interno do que no diâmetro externo da peça. Para a solução deste problema foram propostos quatro modelos que foram analisados na simulação computacional II. Na simulação computacional III, foi observado, apesar do alongamento obtido, alto nível de deformação irregular no diâmetro interno do eixo e movimentos de rotação da peça. A solução com matriz “V” apresentou melhores resultados em relação ao modelo com duas matrizes planas. Esta solução foi selecionada para o desenvolvimento da estratégia final de forjamento, realizada na simulação computacional V. A estratégia final considerada satisfatória para o forjamento de um eixo piloto, obtendo-se um alongamento $\Delta l = 77\%$, sem deformação significativa do diâmetro interno. Comparando-se os resultados da simulação computacional V com o experimento físico observa-se a concordância nos resultados referentes às deformações no diâmetro externo e da manutenção do diâmetro interno sem grandes deformações.

Apesar da necessidade de várias adaptações para obtenção de resultados confiáveis com programa PEP/LARSTRAN e de alguma dificuldade na sua utilização é possível aplicá-lo para o desenvolvimento e otimização de processos de Forjamento em Matriz Aberta de eixos vazados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as possibilidades que surgem, ao se estudar o forjamento de eixos vazados, pode-se destacar algumas para trabalhos futuros. São possibilidades de estudo relevantes:

- Otimização do processo através de simulações com a utilização de algoritmos termomecanicamente acoplados. Simulações deste tipo podem prever o resfriamento da peça e desenvolver uma rota de fabricação mais exata. Esta rota pode conter os ciclos de aquecimento da peça, determinando o tempo global de fabricação.
- Simulação das mudanças microestruturais durante o processo de forjamento a quente, com objetivo de determinar as propriedades finais da peça forjada.
- Simulação de diferentes rotas de fabricação envolvendo a aplicação de matrizes com diferentes geometrias.
- Avaliação das propriedades mecânicas do eixo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.. **Conformação de metais – fundamentos e aplicações**. São Carlos/SP: EESC-USP, 1999, 350p.

ALVES, M. L.. **Modelação numérica e análise experimental de operações de forjamento**. Lisboa: IST/UTL, 2004. Tese (Doutorado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2004. Cito In: BRITO, A. M. G.; SOARES, S. R.; SCHAEFFER, L.. *Curvas de escoamento: métodos de obtenção e aplicação*. Anais do XIII Seminário Nacional de Forjamento. Porto Alegre, 1993, pg. 148-182.

ASTM A370. **Standard test methods and definition for mechanical testing of steel products**. EUA: American Society for Testing and Materials, 1997.

BRITO, A. M. G.; SOARES, SOLANGE R.; SCHAEFFER, L.. **Curvas de Escoamento: Métodos de obtenção e aplicação**. Anais do XIII Seminário Nacional de Forjamento. Porto Alegre, 1993, pg. 148-182.

BRITO, A.M.G.; JÚNIOR, A.L.L.; GEIER, M.; SCHAEFFER, L.. **Influência dos Dados de Entrada nos Resultados de Análises de Processos de Conformação Mecânica através do Método de Elementos Finitos**. Anais da VII Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre, 2003, pg. 191-192.

CBCM - Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica – CBCM. *Curvas de escoamento – aço SAE 4140*. <http://www.ufrgs.br/ldtm/>, 2007. Cito In: LIMA, D. R. S.; **Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço AISI 8640 destinado à produção de brocas de perfuração**. 2007. 79 f. Dissertação de Mestrado. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Tutorial de Energia Eólica**. Disponível em:<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=201>. Acesso em fevereiro de 2012.

DEVLOO, P. R. B.. **Simulação Numérica: A Linguagem da Ciência**, v. 4, maio de 2005. Disponível em: http://www.multiciencia.unicamp.br/artigos_04/a_06_.pdf, acesso em outubro de 2011.

DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D.. **Guidelines for precision hot forging with applications**. *Journal of Materials Processing Technology, USA*, pg. 182-188. 2000.

FRANZKE, M.; GRUBER, B.; BARTON, G.; BEDIR, E.. **PEP: User's manual for version 3.73**. ACUT. Germany, Aachen, 2009.

GROCHE, P; FRITSCH, D.; TEKKAYA, A. E.; ALLWOOD, J. M.; HIRT, G. NEUGEBAUER, R.. **Incremental Bulk Metal Forming**. *Journal of Processing Materials technology, Elsevier, Annals of the CIRP Vol. 56, 2/2007*.

HARTLEY, P.; PILLINGER, I.. **Numerical simulation of the forging process**. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. V. 195, ed. 48–49, pg. 6676–6690, 2006

HIRT, G.; KOPP, R.; HOFMANN, O.; FRANZKE M.; BARTON, G. **Implementing a high accuracy Multi-Mesh Method for incremental Bulk Metal Forming**. *Anais do CIRP-Manufacturing Technology*, V. 56, 1 ed., 2007, pg. 313-316.

HOLZAPFEL, H.; SCHULZE, V.; VOEHRINGER, O; MACHERAUC, E. **Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures**. *Materials Science and Engineering A248*, pg. 9–18, 1998.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M.. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**. 3^a ed., Cambridge: Ed. Prentice-Hall, 2007, pg. 330.

KIM, S. I.; LEE, Y.; BYON, S. M.; **Study on constitutive relation of AISI 4140 steel subject to large strain at elevated temperatures**. *Journal of Processing, Materials Technology, Elsevier*, 140 ed., pg 84-89, 2003.

KOPP, R. **Some current development trends in metal-forming technology.** *Journal of Materials Processing Technology*, V 60, 1–4 ed., pg 1–9, 1996.

LANGE, K.; **Handbook of metal forming.** Ed McGraw-Hill, USA, 1985.

LIMA, D R. S..**Desenvolvimento de Tecnologia de Forjamento de Aço AISI 8640 Destinado à Produção de Brocas de Perfuração.** Dissertação de Mestrado. PPGEM – UFRGS, 2007.

MCHUGH, K.M.; LIN, Y.; ZHOU, Y.; LAVERNIA, E.J. **Influence of cooling rate on phase formation in spray-formed H13 tool steel.** *Materials Science and Engineering*: V. 477, 1-2 ed., pg 50-57, 25 March 2008.

METALS HANDBOOK, **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.** V. 1, 9 ed., 1988.

MULLER, A. **Introdução histórica aos processos de forjaria e cutelaria e estudo de caso do RGSUL.** In: Conferência Internacional de Forjamento, 14, 2010, Porto Alegre. *Anais...Porto Alegre, 2010.*

OBERG, E.; JONES, F.D.; MCCAULEY, C.J.; HEALD, R, M.. **Machinery's Handbook.** 27^a ed.. Ed. Industrial Press, 2004.

RUSINOFF, S.E.. **Forging and Forming Metals.** 2^a ed., Ed. American Technical Society. Chicago, 1959.

SCHÄFER, D.; FRANZKE, M.; HIRT, G.. **Bulk Metal Formed Parts for Power Plants.** In: 30^o Senafor / Conferência Internacional de Forjamento,15, 2010, Porto Alegre. *Anais...Porto Alegre, 2010.* pg. 81-92.

SCHAEFFER, L.; **Curvas de escoamento como parâmetro fundamental para a simulação ao processo de forjamento.** Anais do XII Seminário Nacional de Forjamento. Porto Alegre, 1992. pg. 167-177.

SCHAEFFER, L.; BRITO, A. M. G. **Simulação Computacional dos Processos de conformação**. Revista Metalurgia & Materiais – V. 59, N.º: 539, pg. 712-713, 2003.

SCHAEFFER, L.. **Forjamento: Introdução ao processo**. 2ª edição, Porto Alegre: Ed. Imprensa Livre, 2006.

SIEMPELKAMP, **Open die forging presses**. Disponível em: <http://www.siempelkamp.com/Open-die-forging-presses.570.0.html>. Acesso: fevereiro de 2012.

SOFUOGLU, H.; RASTY,. **Flow Behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes**. *Tribology International*, V. 33, 8 ed., pg. 523–529, Ago. 2000.

TRADECITY, Disponível em: <http://www.traderscity.com>, acesso em 2010.

TACK, L . H .; SCHNEIDERS, R.; DEBYE , J; KOPP, R.; OBERSCHELP, W. **Two- and three-dimensional remeshing, mesh refinement and application to simulation of micromechanical processes**. *Computational Materials Science*. Ed. Elsevier, pg. 241-246, 1994.
