



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Ao Sr. Eng.º A. Barata de Rocha, coordenador do CETECOP - Unidade das Tecnologias de Conformação Plástica, por ter concedido, que o estágio se realize-se.

Simulação numérica de processos de conformação plástica e verificação experimental

Relatório de estágio



Graça Ricardo Sobral

Orientadores

621(047.3)
LEM 2000
SOBg

UP/DEMEGI

ocha, INEGI

Leça do Balio, 2001



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



Mais Educação



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



Instituto de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial

Abel D. Santos deseja agradecer a possibilidade da realização do estágio, a orientação, disponibilidade e apoio do mesmo, e ainda a confiança depositada nas suas capacidades de trabalho.

Ao Sr. Eng.º A. Barata da Rocha, coordenador do CETECOP – Unidade das Tecnologias de Conformação Plástica, por ter concedido, que o estágio se realizasse.

Simulação numérica de processos de conformação plástica e verificação experimental

Relatório de estágio



Graça Ricardo Sobral

Orientadores

Eng.º Abel Santos, FEUP/DEMEGI

Eng.º A. Barata da Rocha, INEGI

Leça do Balio, 2001



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



prodep III
Mais Educação

Simulação numérica de processos de conformação plástica

verificação experimental

Relatório de estágio



(Foto Ricardo Sobral)

621 (0473) / LEH 2000 / 508^{ag}

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca M
Nº 61088
CDU
Data 23/01/2007

Orientadores
Eng.º Abel Santos, msc
Eng.º A. Barata da Rocha, msc

Agradecimentos

Ao Sr. Eng.º Abel D. Santos desejo agradecer a possibilidade da realização do estágio, bem como a orientação, disponibilidade e apoio do mesmo, e ainda a confiança depositada nas minhas capacidades de trabalho.

Ao Sr. Eng.º A. Barata da Rocha, coordenador do CETECOP – Unidade das Tecnologias de Conformação Plástica, por ter concedido, que o estágio se realiza-se.

3	Forjamento das ligas de alumínio	
3.1	Introdução	3.1
3.2	As ligas de alumínio	3.2
3.3	Parâmetros intervenientes no forjamento	3.3
3.3.1	Efeito da temperatura	3.4
3.3.2	Efeito da temperatura na matriz	3.5
3.3.3	Controlo da temperatura	3.5
3.4	Métodos de forjamento	3.6
3.4.1	Forjamento em matriz aberta	3.6
3.4.2	Forjamento em matriz fechada	3.7
3.5	Matrizes	3.8
3.6	Lubrificação	3.9
3.7	Acabamentos	3.9
4	Aplicações experimentais e numéricas	
4.1	Caracterização do material usado	4.1
4.2	Forjamento de um componente para bicicleta	4.1
4.2.1	Trabalho numérico	4.3
A)	Modelação numérica	4.3
A.1)	Condições frontais	4.3
B)	Discretização numérica	4.4
B.1)	Ferramenta	4.4
B.2)	Esboço	4.4
C)	Contacto	4.5
D)	Resultados numéricos	4.5
D.1)	Esboço com as dimensões $D=25\text{mm}$ e $D_1=50\text{mm}$	4.5
D.2)	Esboço com as dimensões $D=30\text{mm}$ e $D_1=45\text{mm}$	4.6

Índice

Agradecimentos

1	Introdução	1.1
2	Sumário e objectivos	2.1
3	Forjamento das ligas de alumínio	3.1
3.1	Introdução	3.1
3.2	As ligas de alumínio	3.2
3.3	Parâmetros intervenientes no forjamento	3.3
3.3.1	Efeito da temperatura	3.4
3.3.2	Efeito da temperatura na matriz	3.5
3.3.3	Controlo da temperatura	3.5
3.4	Métodos de forjamento	3.6
3.4.1	Forjamento em matriz aberta	3.6
3.4.2	Forjamento em matriz fechada	3.7
3.5	Matrizes	3.8
3.6	Lubrificação	3.9
3.7	Acabamentos	3.9
4	Aplicações experimentais e numéricas	4.1
4.1	Caracterização do material usado	4.1
4.2	Forjamento de um componente para bicicleta	4.3
4.2.1	Trabalho numérico	4.3
A)	Modelação numérica	4.3
A.1)	Condições fronteira	4.3
B)	Discretização numérica	4.4
B.1)	Ferramenta	4.4
B.2)	Esboço	4.4
C)	Contacto	4.5
D)	Resultados numéricos	4.5
D.1)	Esboço com as dimensões $D=25\text{mm}$ e $D_e=50\text{mm}$	4.5
D.2)	Esboço com as dimensões $D=30\text{mm}$ e $D_e=45\text{mm}$	4.6

1 Introdução	D.3) Esboço com as dimensões $D=32\text{mm}$ e $D_e=45\text{mm}$	4.6
	D.3.1) Forjamento a frio	4.8
	E) Comparação dos resultados obtidos à temperatura ambiente com os obtidos à temperatura de 440°C	4.9
4.2.1 Trabalho experimental		4.10
	A) Projecto e fabrico de matrizes	4.10
	A.1) Definição do sistema de aquecimento com controlo da temperatura	4.10
	A.2) Maquinagem dos componentes das matrizes	4.10
	B) Equipamento	4.11
	C) Resultados	4.11
5 Conclusões		5.1
Anexos		
	Anexo 1 – Coeficientes de Expansão térmica de algumas ligas de Alumínio e de Ferro	
	Anexo 2 – Ficheiro de entrada de dados do Abaqus/Explicit	
Bibliografia		

1 Introdução

O estágio realizou-se no INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, localizado em Leça do Balio, na unidade CETECOP. O INEGI é um Instituto de Inovação e Transferência de Tecnologia, constituindo a interface de ligação entre o Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DEMEGI) e o meio empresarial.

A actividade do CETECOP (Unidade das Tecnologias de Conformação Plástica), assenta numa intervenção forte nas áreas do Corte dos Metais em Chapa, da Embutidura, da Caracterização Mecânica dos Materiais, da Simulação Numérica dos Processos de Conformação e na Concepção de Novas Ferramentas e Processos Avançados de Fabrico. O CETECOP tem por objectivos fundamentais o apoio técnico e tecnológico às empresas, a transferência tecnológica, a melhoria de qualidade de produtos e processos industriais, a divulgação técnica e científica, a realização e dinamização de trabalhos de investigação e desenvolvimento, visando a inovação e progresso do sector e a formação de recursos humanos.

2.1 Trabalho desenvolvido

As nível numérico o trabalho desenvolvido consistiu no desenvolvimento do modelo computacional e na realização da simulação numérica.

As nível experimental o trabalho desenvolvido consistiu na definição do esboço, estudo técnico do esboço, projeto e fabrico da ferramenta, montagem e afinação da matriz, estudo técnico da matriz e ensaio de forjamento da peça.

2 Sumário e objectivos

O objectivo principal deste trabalho consiste na obtenção por simulação numérica de resultados relativos ao forjamento de uma peça em liga de alumínio.

Para atingir os objectivos propostos, o trabalho realizado pode dividir-se em duas partes. Assim, numa primeira fase, o trabalho consistiu basicamente na realização de uma pesquisa bibliográfica sobre o forjamento das ligas de alumínio. Na segunda fase a actividade desenvolveu-se em duas vertentes: a simulação numérica com recurso ao método dos elementos finitos e a experimentação/validação com recurso ao modelo real.

O exemplo aqui apresentado faz parte de um projecto comum, entre o INEGI e uma empresa de componentes para bicicletas, a "Iberica", que tinha por objectivo aprofundar o conhecimento do processo de forjamento de ligas de alumínio, assim como demonstrar as capacidades da simulação numérica na fase de projecto de um novo componente. A forma final da peça foi modelada em SolidWorks, tendo sido fornecida a modelação da ferramenta correspondente. Trabalhos anteriores, realizados no CETECOP, facultaram dados sobre o diâmetro do esboço a utilizar, bem como revelaram a necessidade de se proceder ao encabeçamento do esboço antes da operação de forjamento.

2.1 Trabalho desenvolvido

Ao nível numérico o trabalho desenvolvido consistiu no desenvolvimento do modelo computacional e na realização da simulação numérica.

Ao nível experimental o trabalho desenvolvido consistiu na definição do esboço, estudo térmico do esboço, projecto e fabrico da ferramenta, montagem e afinação da matriz, estudo térmico da matriz e ensaio de forjamento da peça.

3 Forjamento das ligas de alumínio

3.1 Introdução

Os processos tecnológicos de conformação dos metais por deformação plástica têm constituído um domínio de investigação extremamente activo nas últimas décadas. De entre eles, o forjamento apresenta como principal característica a obtenção de peças finais com boas propriedades mecânicas. As dificuldades de dominar esta tecnologia podem-se justificar com a influência de alguns factores essenciais, que determinam que o forjamento de ligas de alumínio seja mais complexo do que o forjamento de outros materiais.

Entre os factores que condicionam a utilização das ligas de alumínio no processo de forjamento pode-se dar especial ênfase aos seguintes:

- falta de flexibilidade das ligas de alumínio no que respeita a variações de temperatura, facto este relacionado com as pequenas diferenças entre a temperatura de forjamento e as de início de fusão, ou de solidus, o que exige um controle de temperaturas;
- falta de sensibilidade visual para o controlo das temperaturas normais de forjamento, as quais não podem, como acontece com os aços e com os latões, ser controladas visualmente pela cor do metal;
- inadequação dos processos de aquecimento tipicamente usados para os aços e para os latões (aquecimento a gás sem controlo de temperaturas) ao controlo apertado de temperaturas exigido pelas ligas de alumínio;
- complexidade real da globalidade do processo, que não só envolve o problema metalúrgico como o problema do forjamento em si, não esquecendo que, para a maior parte dos casos, se torna inevitável o conhecimento e domínio da tecnologia dos tratamentos térmicos de endurecimento estrutural (homogeneização seguida de envelhecimento natural e/ou artificial) que inevitavelmente as ligas de alumínio com aplicabilidade requerem.

As formas das peças de alumínio obtidas por forjamento são idênticas às que se podem obter com o forjamento de aços. Contudo, para uma dada forma, a pressão de forjamento varia ao longo de uma larga gama de valores, dependendo, principalmente da composição química da liga e da temperatura de forjamento.

O domínio da tecnologia de forjamento das ligas de alumínio, passa obrigatoriamente pelo conhecimento da influência dos diferentes parâmetros, como a influência da temperatura, tanto dos esboços como das matrizes, as forças de forjamento, as considerações de projecto de construção mecânica de peças e matrizes.

3.2 As ligas de alumínio

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre e o segundo mais usado em todo o mundo. Mas só a partir dos finais do século XIX começou a ser utilizado em aplicações de engenharia. O atraso da sua utilização deve-se à sua grande afinidade com o oxigénio que tornava impraticável a redução dos seus óxidos. Foram as suas características únicas, tais como o baixo peso, resistência à corrosão, maquinabilidade, formabilidade e o seu aspecto atractivo que contribuíram para o aumento da produção em todo o mundo.

Propriedades físicas

A propriedade física mais relevante do alumínio é o seu baixo peso específico (entre 2640 e 2850 Kg/m³). O seu ponto de fusão encontra-se entre os 500 e os 650°C. Apresenta uma excelente condutividade eléctrica e uma elevada condutividade térmica, factor importante no forjamento. É também não ferromagnético e não tóxico.

Propriedades mecânicas

As principais propriedades mecânicas do alumínio são: tensão de cedência de 30 a 505 MPa; tensão de ruptura de 70 a 570 MPa; tensão limite de fadiga de 20 a 160 MPa; módulo de elasticidade de 69 a 74 GPa.

Ligas de alumínio

As ligas de alumínio dividem-se em duas categorias principais: ligas para fundição; ligas para conformação plástica.

Ao alumínio puro é adicionado uma série de elementos de liga que melhoram as suas propriedades. Os elementos de liga mais utilizados são o Cu, Mn, Si, Mg e o Zn, podendo constituir até cerca de 10% do peso da liga.

A “Aluminium Association” [7] desenvolveu um sistema de classificação das várias ligas. Neste sistema usam-se nomenclaturas diferentes para fundição e para forjamento sendo neste último caso de quatro dígitos, sendo a distinção da seguinte forma:

- Série 1000 – alumínio comercialmente puro;
- Série 2000 – principal elemento de liga o Cu;
- Série 3000 – principal elemento de liga o Mn;
- Série 4000 – principal elemento de liga o Si;
- Série 5000 – principal elemento de liga o Mg;
- Série 6000 – principais elementos de liga o Mg e o Si;
- Série 7000 – principal elemento de liga o Zn;
- Série 8000 – principal elemento de liga o Li.

Para além desta classificação é ainda feita a distinção entre ligas sensíveis a tratamentos térmicos (STT) e as ligas insensíveis aos tratamentos térmicos (ITT). As ligas STT são as 2000, 6000 e 7000, as ITT são as 1000, 3000, 4000 e a 5000.

3.3 Parâmetros intervenientes no forjamento

Na figura 3.1, pode-se observar um esquema onde se analisam os parâmetros intervenientes no processo de forjamento, e sua interligação, alguns destes parâmetros irão ser objecto de estudo neste relatório.

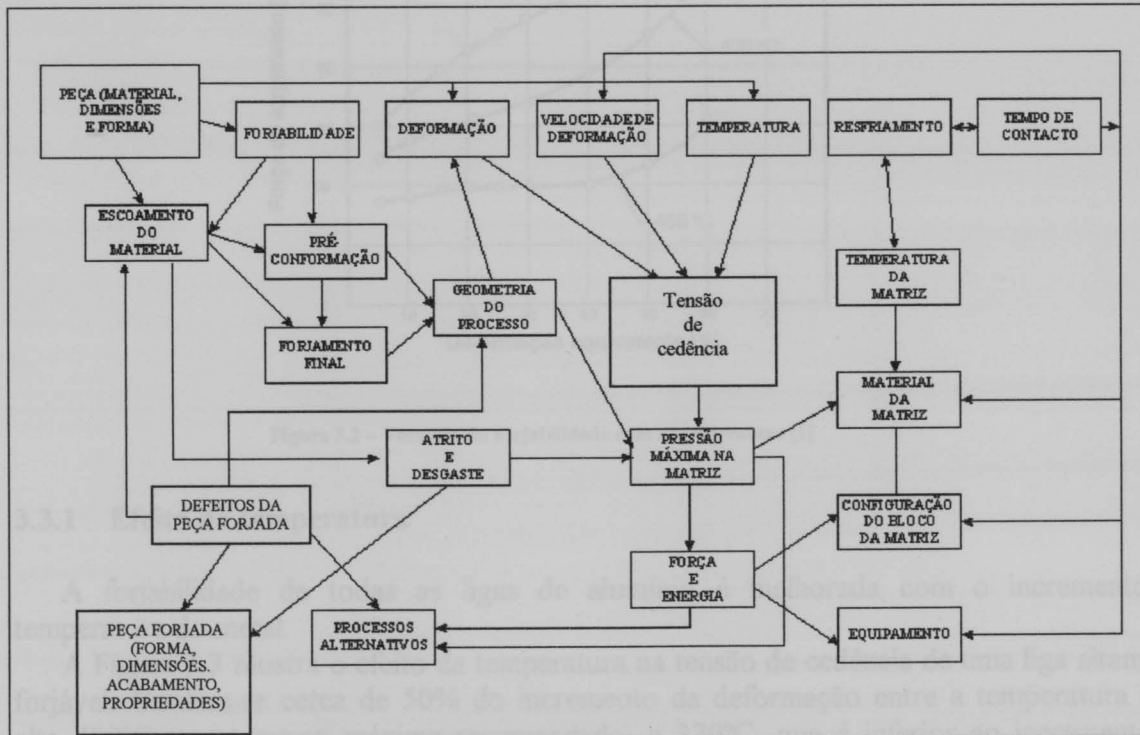


Figura 3.1– Interligação dos parâmetros intervenientes no forjamento

Forjabilidade

O conceito de forjabilidade traduz a facilidade com que se conforma um material por forjamento, sem que ocorra fractura. O principal parâmetro que condiciona a forjabilidade de uma liga é a temperatura.

A Figura 3.2 mostra como a variação da forjabilidade com a temperatura para a liga Al6061 é acentuada, pelo que uma diminuição da temperatura de 480°C para 400°C se traduz num aumento da força de forjamento de 130KN para 250KN. Este facto é a principal razão para que o forjamento de uma dada liga de alumínio seja feito numa estreita banda de temperaturas (principalmente para ligas de alta resistência). Na prática, o forjamento inicia-se com a peça a uma temperatura próxima do limite superior da gama; o trabalho continua até que a peça esteja pronta ou que o material esteja frio demais para continuar a ser forjado. A não ser que haja necessidade de operações intermédias que recorram a várias matrizes, as ligas de alumínio raramente são reaquecidas para posteriores forjamentos.

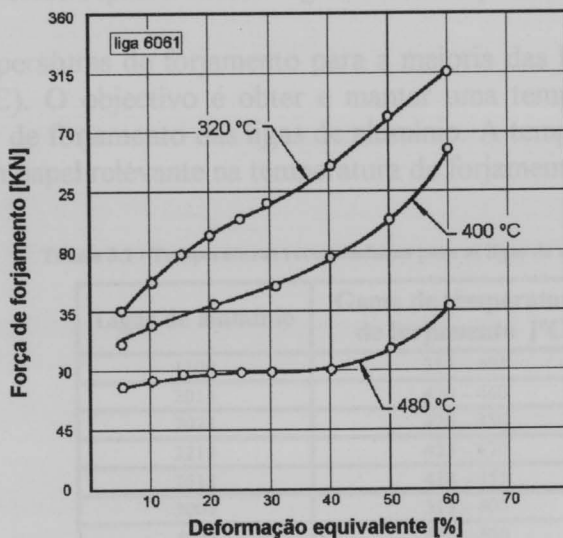


Figura 3.2 – Variação da forjabilidade com a temperatura [1]

3.3.1 Efeito da temperatura

A forjabilidade de todas as ligas de alumínio é melhorada com o incremento de temperatura do metal.

A Figura 3.3 mostra o efeito da temperatura na tensão de cedência de uma liga altamente forjável. Verifica-se cerca de 50% do incremento da deformação entre a temperatura mais alta 480°C (temperatura máxima recomendada) e 370°C, que é inferior ao incremento da deformação obtido para a temperatura mínima 260°C (temperatura mínima recomendada). Para as ligas que apresentam maiores dificuldades no processo de forjamento, a alteração da tensão de cedência com a temperatura é ainda maior, sendo esta uma das razões para que o forjamento das ligas de alumínio seja realizado numa faixa relativamente estreita de temperaturas.

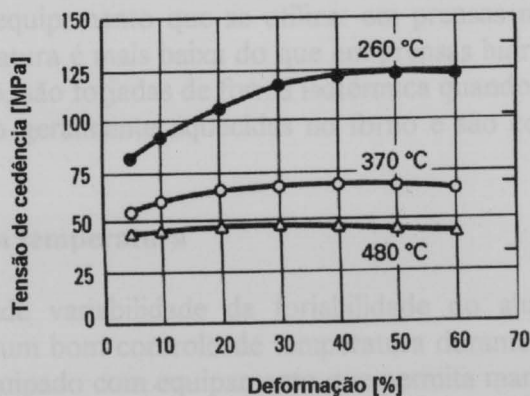


Figura 3.3 – Efeito da temperatura na tensão de cedência [2]

Na Tabela 3.1, estão representadas as gamas de temperaturas de forjamento de algumas ligas de alumínio.

A faixa de temperaturas de forjamento para a maioria das ligas é relativamente apertada (geralmente $< 55^{\circ}\text{C}$). O objectivo é obter e manter uma temperatura apropriada no metal durante o processo de forjamento das ligas de alumínio. A temperatura do molde e a taxa de deformação têm um papel relevante na temperatura de forjamento.

Tabela 3.1 - Temperaturas recomendadas para as ligas de alumínio [2]

Ligas de alumínio	Gama de temperaturas de forjamento [$^{\circ}\text{C}$]
1100	315 – 405
2014	420 – 460
2025	420 – 450
2219	425 – 470
2618	410 – 455
3003	315 – 405
4032	415 – 460
5083	405 – 460
6061	430 – 480
7010	370 – 440
7039	380 – 440
7049	360 – 440
7050	360 – 440
7075	380 – 440
7079	405 – 455

3.3.2 Efeito da temperatura na matriz

No forjamento de ligas de alumínio, as matrizes usadas devem ser aquecidas de forma a facilitar o processo de forjamento. Portanto, a temperatura das matrizes é outro parâmetro que influencia a optimização do processo de forjamento nos alumínios.

As temperaturas usadas nas matrizes para prensas hidráulicas excedem as dos processos considerados de maior rapidez de deformação como martelos e prensas mecânicas.

A temperatura a que as matrizes são aquecidas depende da liga a ser forjada, da severidade da deformação, da sofisticação do *design* da peça a forjar, mas depende principalmente do equipamento que se utiliza: em prensas mecânicas, onde o forjamento é rápido, esta temperatura é mais baixa do que em prensas hidráulicas, cuja acção é mais lenta. As ligas de alumínio, são forjadas de forma isotérmica quando se usam prensas hidráulicas.

As matrizes são geralmente aquecidas no forno e são colocadas na prensa no início da série de ensaios.

3.3.3 Controlo da temperatura

Devido à grande variabilidade da forjabilidade do alumínio com a temperatura, há necessidade de ter um bom controlo de temperatura durante o aquecimento dos esboços. O forno deve estar equipado com equipamento que permita manter a temperatura num intervalo de $\pm 12^{\circ}\text{C}$. A temperatura dos esboços aquecidos deve ser verificada imediatamente antes de serem colocados na prensa. Como já foi referido, é desejável que esta temperatura esteja próxima do limite superior da “gama de forjabilidade” quando se inicia o forjamento.

A temperatura dos esboços pode ser verificada através da utilização de um pirómetro de contacto ou por um sistema de infravermelhos com duplo comprimento de onda. Este sistema foi incorporado com sucesso no sistema de automatização de verificação de temperatura usado no forjamento de ligas de alumínio de grande volume, fornecendo melhorias significativas no controlo da temperatura e na repetibilidade do processo.

O tempo de aquecimento para as ligas de alumínio depende da espessura da secção do perfil e das capacidades do forno. Contudo, devido ao aumento da condutividade térmica das ligas de alumínio, o pré-aquecimento necessário é mais curto do que o necessário para outros metais.

O tempo de estágio à temperatura máxima do forno não é, no caso dos alumínio, crítico. Assim, tempos longos não trazem vantagens nem inconvenientes (excepto no caso de ligas com alto teor em magnésio em que são prejudiciais).

3.4 Métodos de forjamento

Para forjar ligas de alumínio são utilizados vários métodos, nomeadamente, forjamento em matriz aberta, matriz fechada, com matrizes rotativas, forjamento laminar, forjamento de repuxo, forjamento de mandril e enrolamento de anéis e extrusão. A selecção do método de forjamento mais adequado para dar as formas de forjamento é baseado na forma de forjamento desejada, na sofisticação do *design* da forma pretendida e dos custos. Para obter a forma desejada, vários métodos podem ser usados em sequência. Os métodos de forjamento mais utilizados são descritos a seguir.

3.4.1 Forjamento em matriz aberta

O forjamento em matriz aberta é habitualmente utilizado quando:

- a peça é demasiado grande para ser obtida numa matriz fechada;
- proporciona a obtenção de melhores características mecânicas do que o fabrico da peça por arranque de apara;
- o reduzido número de peças, não justifica o fabrico de matrizes fechadas;
- o prazo de entrega é apertado demais para permitir o fabrico de matrizes fechadas.

O tamanho das peças fabricáveis por este processo está limitado apenas pela potência disponível para o aquecimento e pela capacidade de manuseamento. Assim, podem obter-se peças desde veios de transmissão para aplicações navais (com dezenas de metros de comprimento) a outras com poucas dezenas de milímetros.

A destreza do operador condiciona a complexidade das formas que se podem obter, assim como a repetibilidade do processo; formas muito complexas raramente são obtidas por forjamento em matriz aberta, pois isto implicaria um tempo de fabrico demasiadamente longo.

O forjamento em matriz aberta, pode constituir a primeira operação na obtenção de peças que serão finalizadas em matrizes fechadas.

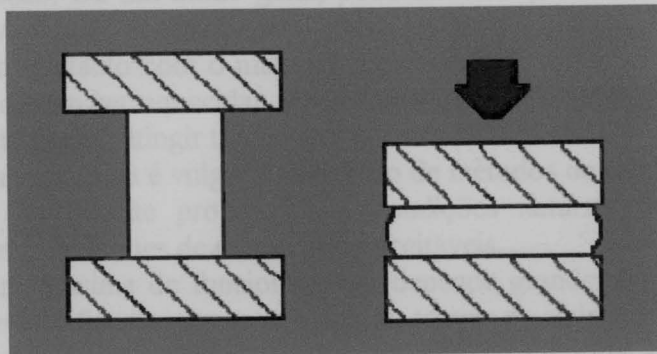


Figura 3.4 – Forjamento em matriz aberta

3.4.2 Forjamento em matriz fechada

O forjamento em matriz fechada consiste na conformação a quente de um metal, no interior da cavidade formada por duas matrizes. O esboço, que é geralmente cortado de uma barra quadrada ou redonda, tem um comprimento que corresponde ao volume necessário para o total preenchimento da cavidade mais uma tolerância para rebarba.

As matrizes são geralmente projectadas de modo a permitir a obtenção de peças sem necessidade de posteriores operações de maquinagem, contudo, quando a quantidade de peças e os custos de maquinagem são baixos, pode recorrer-se ao forjamento em matriz fechada para se obter uma aproximação da forma da peça, que posteriormente é maquinada.

Também se utilizam matrizes fechadas como modo de obter uma aproximação da forma da peça (pré-forma), quando o forjamento a partir de barra ou varão não garante um preenchimento completo da cavidade da matriz. Neste caso, a primeira operação, com matrizes pouco detalhadas, permite uma adequada distribuição do material; na operação final dá-se o enchimento completo da matriz e as perdas de material em rebarba são mínimas. Este processo apresenta ainda como vantagens um reduzido desgaste das matrizes de acabamento e a possibilidade de se controlarem com maior rigor a direcção de escoamento do material e as propriedades mecânicas da peça.

O número de peças que justifica o fabrico de matrizes com as quais se obtenham formas finais, varia consideravelmente com o tamanho e a forma das peças a obter. No caso destas matrizes, o forjamento é mais dispendioso e as pressões em jogo são maiores; o maior custo da operação é na maioria dos casos compensado pela diminuição dos custos de maquinagem.

Quanto aos materiais a processar, devem satisfazer duas condições:

- a tensão à qual se dá a cedência do material deve ser baixa, para que as pressões exercidas nas matrizes sejam suportáveis;
- a sua forjabilidade deve permitir deformação suficiente para a obtenção da peça.

O material a forjar condiciona não só o forjamento em si, mas também todos os detalhes do processo. Seja qual for o metal, tanto a forjabilidade quanto a tensão à qual ele se escoam dependem das características metalúrgicas, da temperatura e das velocidades de deformação impostas pelo forjamento.

De igual modo, também a forma das peças é um factor condicionante do forjamento: peças com nervuras ou formas esbeltas são mais difíceis de obter, pois a sua forma maximiza

os efeitos da fricção. De um modo geral, pode dizer-se que há uma relação directa entre a razão “superfície/volume” de uma peça e a dificuldade com que ela se forja.

Ao entrar em contacto com o material aquecido, as matrizes, se estiverem frias, podem fissurar. Assim, devem ser aquecidas a pelo menos 120 °C antes de se iniciar o forjamento (preferencialmente devem atingir temperaturas entre 205 e 315 °C).

Durante o trabalho, não é vulgar a utilização de métodos de arrefecimento das matrizes, a sua massa e o lubrificante proporcionam condições naturais de escoamento de calor, mantendo-as dentro de limites de temperatura aceitáveis.

A temperatura máxima de funcionamento depende grandemente do material da matriz, da quantidade de lubrificante que se utiliza e do tempo de ciclo, em situação alguma se deve permitir que a matriz (ou parte dela) atinja temperaturas superiores à da têmpera.

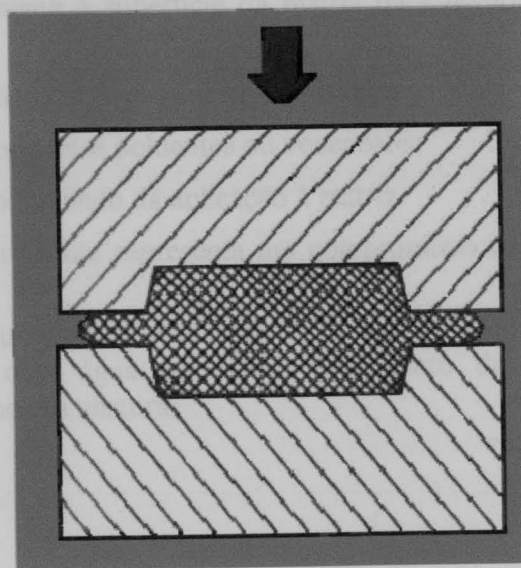


Figura 3.5 – Forjamento em matriz fechada

3.5 Matrizes

O forjamento de alumínios exige a utilização de matrizes especialmente projectadas para este fim. Isto verifica-se, em grande parte, por três razões:

- usam-se geralmente duas etapas no forjamento (obtenção de uma pré-forma seguida do forjamento final);
- as tolerâncias relativas à contracção do material são maiores que para o aço (ver coeficientes de expansão térmica – Anexo 1);
- o controlo de temperatura de matrizes para forjamento de alumínios é crítico, assim, têm de ser contempladas, ainda durante o projecto, as localizações do equipamento de aquecimento e controlo da temperatura.

O acabamento superficial das matrizes para forjamento de alumínios é mais crítico do que em matrizes para forjamento de aço, para se obter um acabamento superficial das peças aceitável, as cavidades devem ser bem polidas.

3.6 Lubrificação

No forjamento, a fricção influencia o escoamento do material, a distribuição da pressão, a força e a energia necessárias. Para além das funções de lubrificação, devem também ser tidos em consideração os efeitos de arrefecimento da matriz e de transferência de calor do material da peça para a matriz.

O lubrificante deve:

- reduzir o atrito entre as matrizes e a peça, de modo a diminuir a pressão necessária, encher a cavidade e controlar o escoamento do material;
- evitar o contacto físico do material com as matrizes, prevenindo a ocorrência de microsoldaduras que danificariam as superfícies;
- molhar uniformemente a superfície da matriz para homogeneizar o escoamento do material;
- ser não abrasivo, não corrosivo e livre de resíduos;
- ser isento de componentes poluentes ou venenosos;
- não produzir fumo aquando da aplicação à matriz.
- A escolha do lubrificante representa um compromisso entre os vários pontos acima referidos.

Quando se forjam alumínio, as matrizes são sempre lubrificadas. Podem pulverizar-se com grafite misturada com água ou, se o escoamento de material é condicionante, adicionando-se sabão à mesma mistura.

3.7 Acabamentos

A rebarba das peças obtidas é geralmente cortada a frio. O método de remoção da rebarba depende do tamanho e do número de peças, a rebarba de peças grandes é geralmente serrada, a de peças pequenas, com estrutura que pode ser reticular, pode ser removida por puncionamento.

As peças devem ser limpas logo que possível, para remover lubrificante e óxidos. A limpeza consiste em dois banhos, um numa solução básica, outro numa solução ácida, intervalados com lavagens em água quente.

O acabamento superficial após a limpeza é geralmente bom, embora possa variar de uma zona da peça para outra (especialmente em peças que sofrem grandes deformações).

4 Aplicações experimentais e numéricas

4.1 Caracterização do material usado

Para a liga de alumínio a ensaiar, ou a analisar numericamente, foi necessário determinar, a partir das características mecânicas a temperatura de forjamento. O comportamento mecânico do material foi simulado através da Lei de Swift. A utilização desta Lei que estabelece a relação entre a tensão σ e a deformação plástica ϵ do material implica apenas a determinação do coeficiente de encruamento n e do coeficiente de resistência K . O encruamento do material foi considerado isotrópico. Em todas as simulações o material foi também considerado como isotrópico

O material utilizado foi uma liga de alumínio da série 6000, à temperatura ambiente e à temperatura de forjamento, cujo comportamento foi modelado através da relação entre a tensão real, σ , e a deformação logarítmica, ϵ , dada pela equação (4.1).

$$\sigma = K (\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (4.1)$$

com $K=100$ MPa, $\epsilon_0=0.003$, $n=0.25$ à temperatura de 440°C e $K=600$ MPa, $\epsilon_0=0.003$, $n=0.06$, à temperatura ambiente. No domínio elástico foram usados o módulo de Young $E=70\text{GPa}$ e o coeficiente de Poisson $\nu=0,33$. A densidade do material é de 2700Kg/m^3 .

4.2 Forjamento de um componente para bicicleta

Pretende-se simular a obtenção por forjamento (a quente) de uma liga de alumínio, de um espigão para bicicleta. Na Figura 4.1 está ilustrado o modelo sólido, ou seja a forma final, proposto e desenvolvido, obtido por tecnologias de prototipagem rápida LOM (Laminated Object Manufacturing) no INEGI.

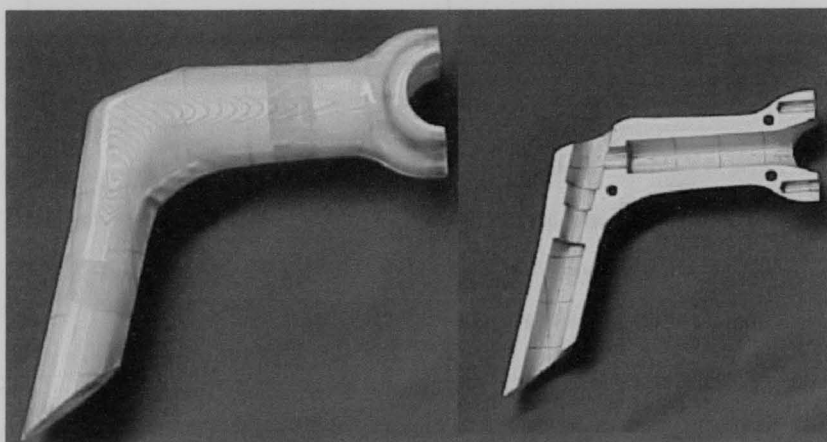


Figura 4.1 – Modelo sólido do espigão seleccionado

Na Figura 4.2 é apresentada a forma final da peça modelada em SolidWorks e os planos de corte das secções mostradas na Figura 4.3. As secções da peça são zonas críticas, uma vez que a descontinuidade provocada por uma mudança abrupta de secção conduz a dificuldades no escoamento do material, criando zonas com falta de material. O modelo apresenta um *design* mais “suave”, com as variações de secção mais bem conseguidas.

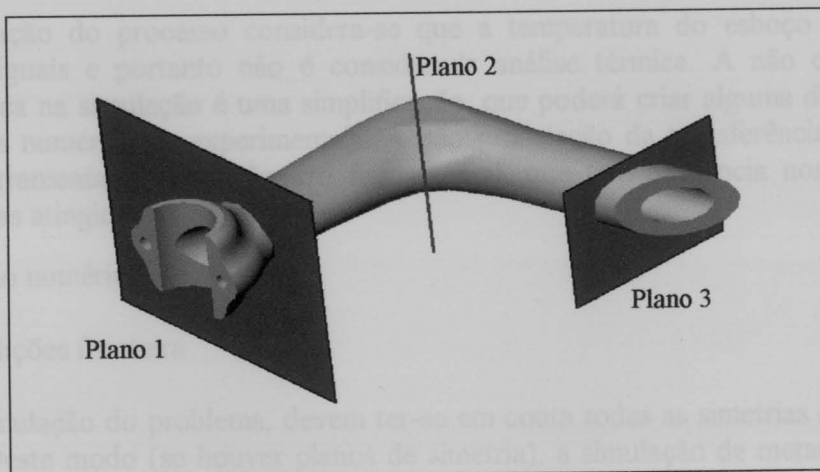


Figura 4.2 – Planos de corte das secções

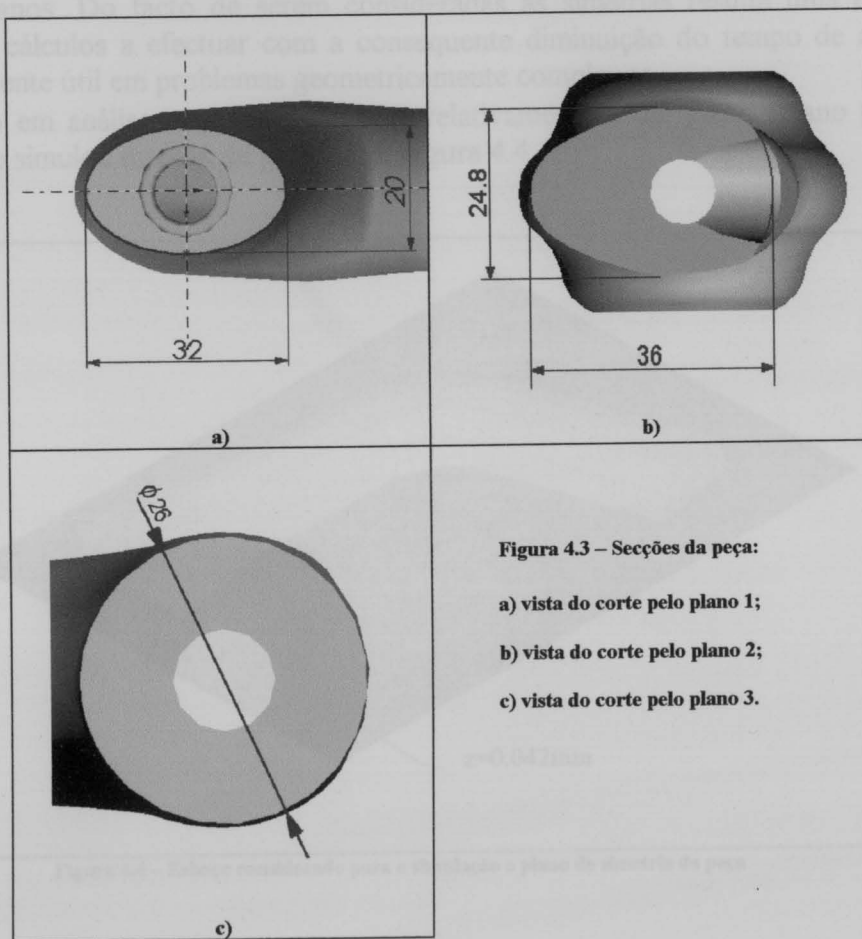


Figura 4.3 – Secções da peça:

- a) vista do corte pelo plano 1;
- b) vista do corte pelo plano 2;
- c) vista do corte pelo plano 3.

A modelação numérica deste exemplo pretende definir as zonas críticas de forjamento da peça e propor a dimensão e geometria do esboço para a realização da mesma.

4.2.1 Trabalho numérico

Na simulação do processo considera-se que a temperatura do esboço e das matrizes usadas são iguais e portanto não é considerada análise térmica. A não consideração de análise térmica na simulação é uma simplificação, que poderá criar alguma divergência entre os resultados numéricos e experimentais. A não modelação da transferência de calor entre esboço e ferramenta é um parâmetro fundamental, que tem influência nos resultados, ao nível de forças atingido.

A) Modelação numérica

A.1) Condições fronteira

Para a simulação do problema, devem ter-se em conta todas as simetrias que a geometria apresente. Deste modo (se houver planos de simetria), a simulação de metade da geometria (relativamente a cada um dos planos) fornece resultados suficientes, uma vez que todos os graus de liberdade apresentarão variações que serão também simétricas relativamente aos mesmos planos. Do facto de serem consideradas as simetrias resulta uma diminuição do volume de cálculos a efectuar com a consequente diminuição do tempo de análise. Isto é particularmente útil em problemas geometricamente complexos.

No caso em análise, a peça é simétrica relativamente a um plano (plano β , $z=0,042$) e assim, só se simulou metade da geometria, Figura 4.4.

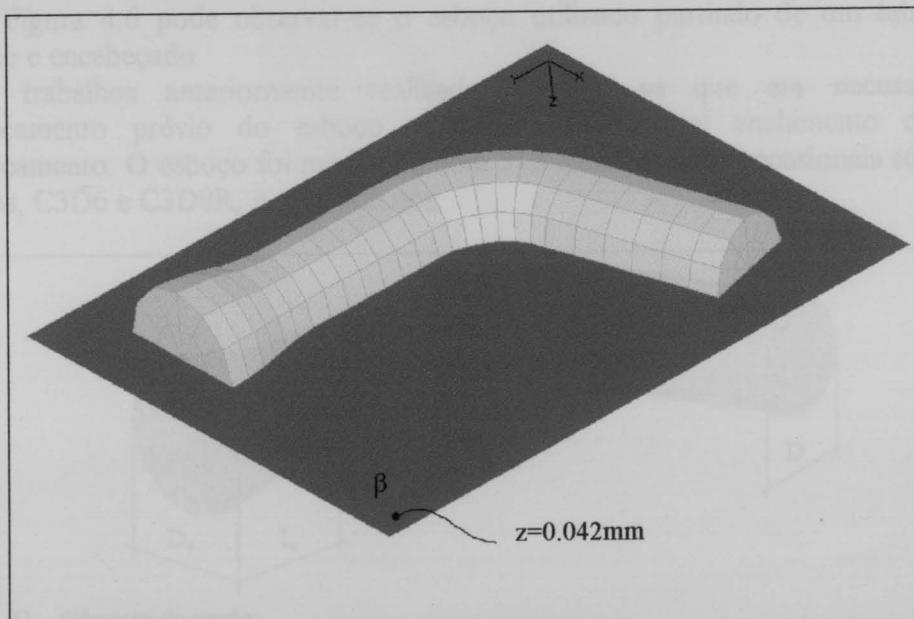


Figura 4.4 – Esboço considerado para a simulação e plano de simetria da peça

B) Discretização numérica

B.1) Ferramenta

A ferramenta foi modelada com 2338 elementos de casca, R3D3, da biblioteca do Abaqus e com 1239 nós e sofre um deslocamento segundo o eixo zz comprimindo o esboço no seu interior.

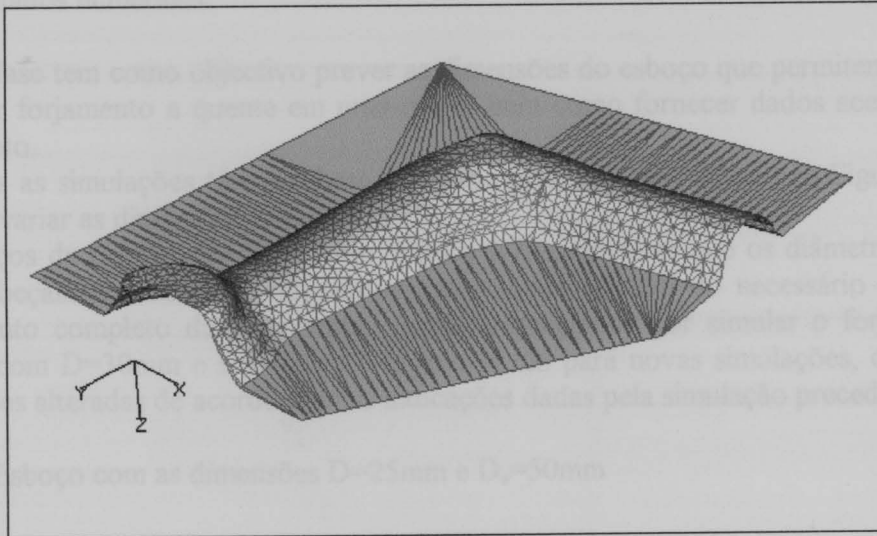


Figura 4.5 – Modelo da ferramenta

B.2) Esboço

Na Figura 4.6 pode observar-se o esboço utilizado partindo de um esboço cilíndrico dobrado e encabeçado.

Em trabalhos anteriormente realizados concluiu-se que era necessário fazer o encabeçamento prévio do esboço para garantir o total enchimento da secção de encabeçamento. O esboço foi modelado com 312 elementos tridimensionais sólidos de seis e oito nós, C3D6 e C3D8R, e com 405 nós.

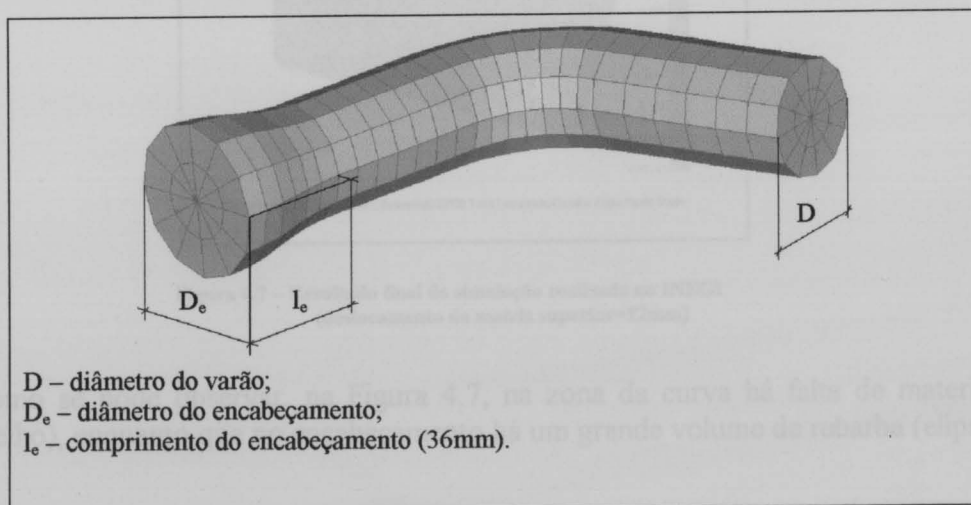


Figura 4.6 – Forma geral do esboço e dimensões relevantes

C) Contacto

O tipo de contacto entre as ferramentas e o esboço, é definido no Abaqus/Explicit, como o modelo de atrito clássico isotrópico de Coulomb, sendo apenas necessário definir o coeficiente de atrito μ .

A velocidade utilizada para a descida da matriz superior foi de $v=10\text{m/s}$, que no total tem de descer 12mm.

D) Resultados numéricos

Esta fase tem como objectivo prever as dimensões do esboço que permitem a obtenção da peça por forjamento a quente em uma etapa, bem como fornecer dados acerca da força de forjamento.

Todas as simulações têm por base o esboço genérico apresentado na Figura 4.4, ao qual fizemos variar as dimensões D e D_e .

Esboços de $D=25\text{mm}$ e $D_e=50\text{mm}$, Figura 4.7, mostraram que os diâmetros do esboço e do encabeçamento ficavam, respectivamente, aquém e além do necessário para garantir o enchimento completo da ferramenta. Assim, começámos por simular o forjamento de um esboço com $D=30\text{mm}$ e $D_e=40\text{mm}$ e seguimos daí para novas simulações, com esboços de dimensões alteradas de acordo com as indicações dadas pela simulação precedente.

D.1) Esboço com as dimensões $D=25\text{mm}$ e $D_e=50\text{mm}$

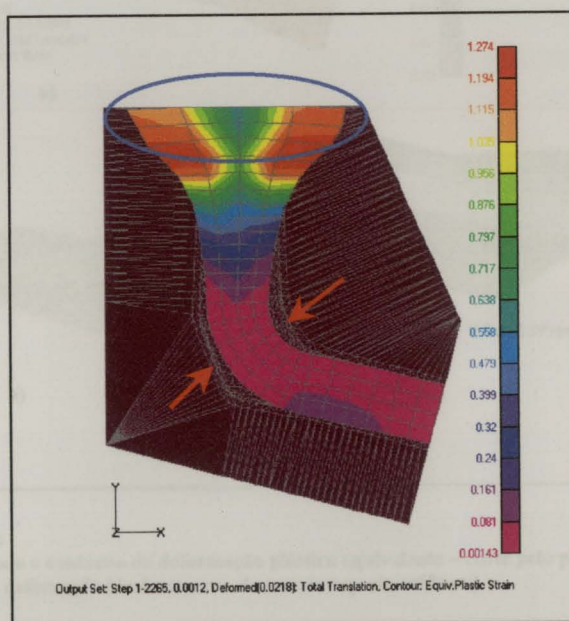


Figura 4.7 – Resultado final da simulação realizada no INEGI (deslocamento da matriz superior=12mm)

Como se pode observar, na Figura 4.7, na zona da curva há falta de material (setas a vermelho), enquanto que no encabeçamento há um grande volume de rebarba (elipse azul).

D.2) Esboço com as dimensões $D=30\text{mm}$ e $D_e=40\text{mm}$

Da simulação anterior conclui-se que é necessário aumentar o diâmetro D , de forma a que haja enchimento total da ferramenta na curva. Também se conclui da necessidade de diminuir o diâmetro D_e .

As dimensões consideradas para o esboço foram $D=30\text{mm}$ e $D_e=40\text{mm}$ e os resultados da simulação são apresentados na figura seguinte. Neste caso existe falta de material na zona do encabeçamento (elipse azul).

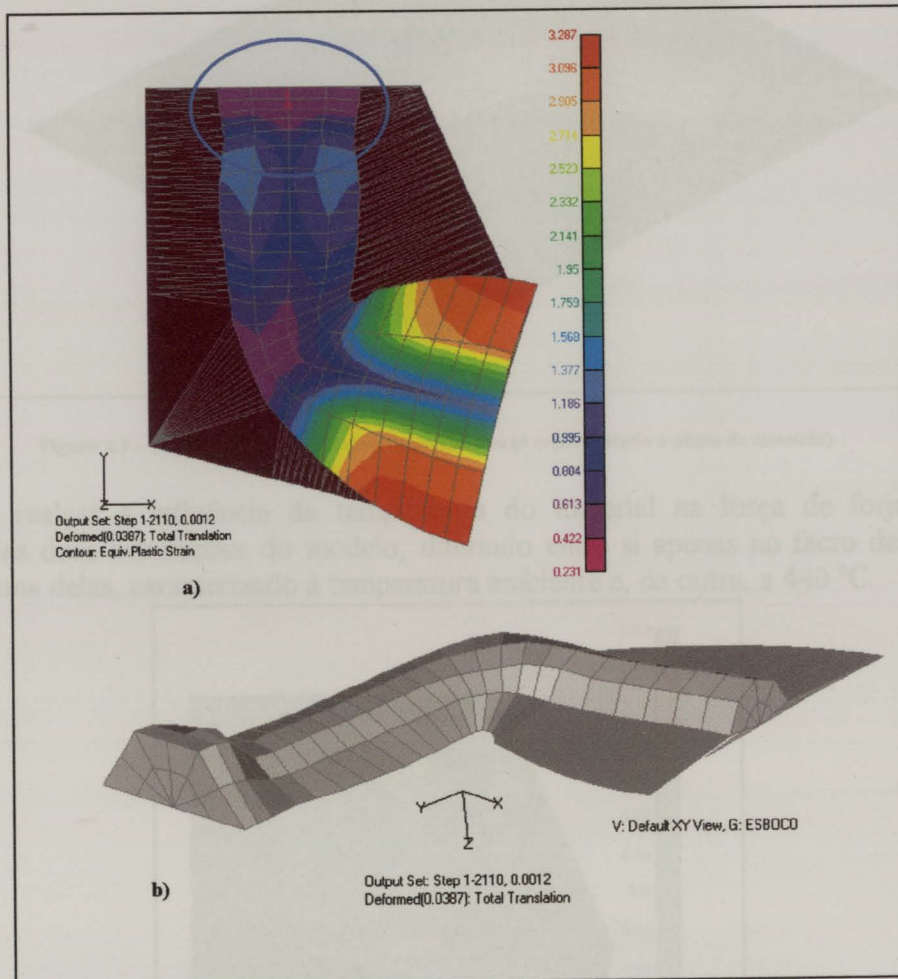


Figura 4.8:

- a) deformada e contorno da deformação plástica equivalente – corte pelo plano de simetria
 b) vista da deformada (deslocamento da matriz superior=12mm)

D.3) Esboço com as dimensões $D=32\text{mm}$ e $D_e=45\text{mm}$

Visto que com o esboço considerado no ponto anterior a secção do encabeçamento não é totalmente preenchida, aumentámos o diâmetro D_e para 45mm.

Optou-se também por aumentar o diâmetro de 30mm para 32mm, uma vez que a nível experimental estarem disponíveis esboços com este diâmetro.

Como os resultados destas simulações se destinam a ser comparados com os resultados experimentais, decidiu-se proceder ao refinamento da malha como modo de obter resultados mais precisos, Figura 4.9.

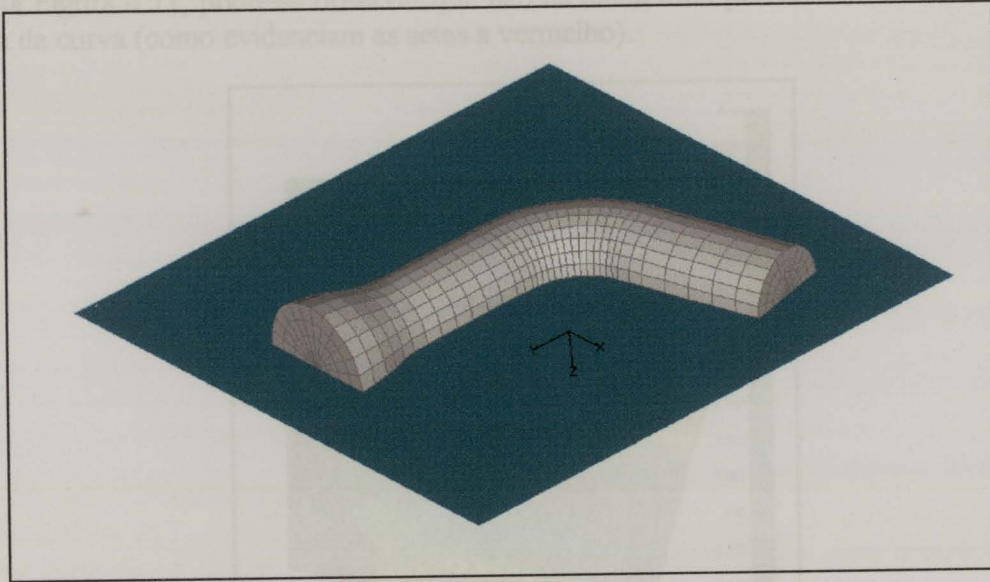


Figura 4.9 – Malha refinada utilizada nas simulações (é representado o plano de simetria)

Para realçar a influência da temperatura do material na força de forjamento, foram realizadas duas simulações do modelo, diferindo entre si apenas no facto de o material ter sido, numa delas, caracterizado à temperatura ambiente e, na outra, a 440 °C.

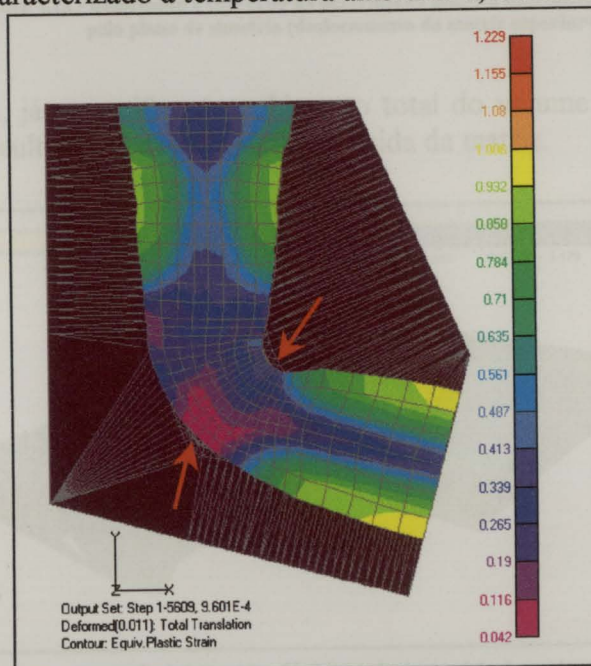


Figura 4.10 - Deformada e contorno da deformação plástica equivalente – corte pelo plano de simetria (deslocamento da matriz=9.6mm)

D.3.1) Forjamento a frio (esboço à temperatura ambiente)

Na Figura 4.10 podemos observar um estado intermédio da conformação, para 9,6mm da descida da ferramenta.

Na Figura 4.11, pode-se observar que não há ainda total preenchimento da ferramenta na zona da curva (como evidenciam as setas a vermelho).

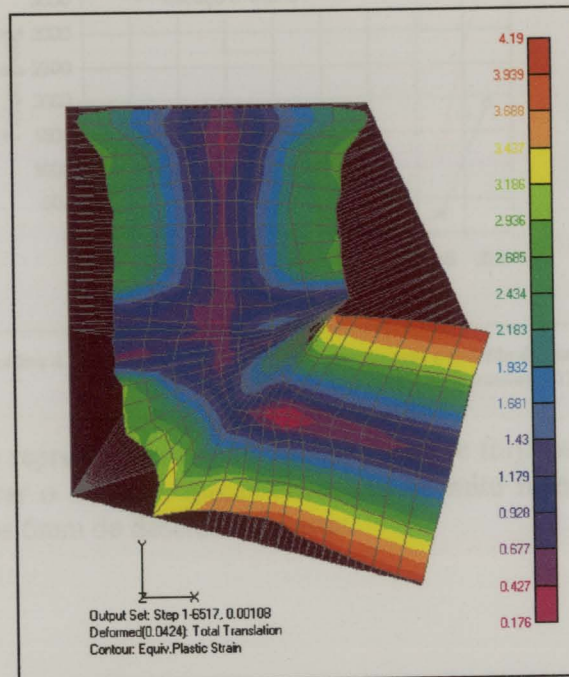


Figura 4.11 - deformada e contorno da deformação plástica equivalente – corte pelo plano de simetria (deslocamento da matriz superior=10.8mm)

Na Figura 4.12, já se verifica o enchimento total do volume interior da ferramenta. São apresentados os resultados para 10.8mm de descida da matriz.

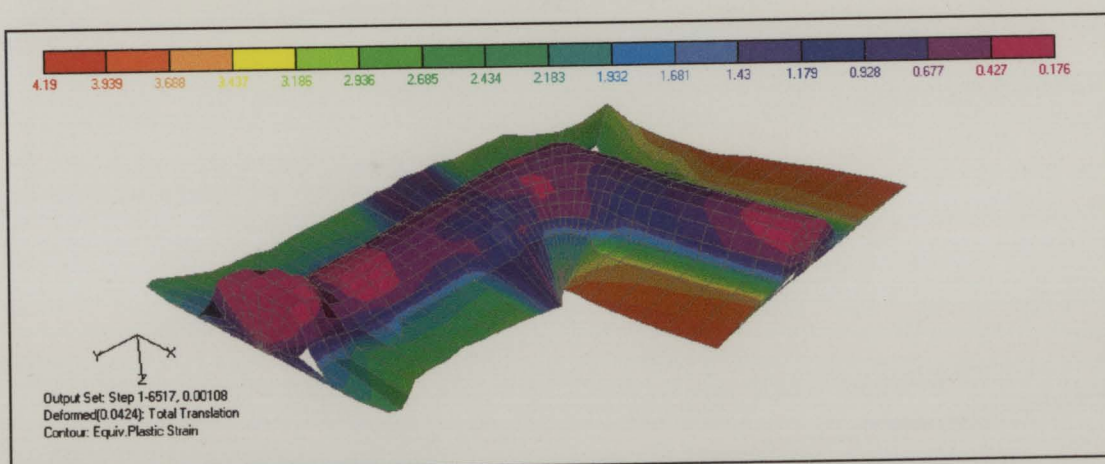


Figura 4.12 – deformada e contorno da deformação plástica equivalente vista da parte superior (deslocamento da matriz superior=10.8mm)

Realizou-se uma nova simulação agora considerando o esboço à temperatura de 440°C.

E) Comparação dos resultados obtidos à temperatura ambiente com os obtidos à temperatura de 440°C

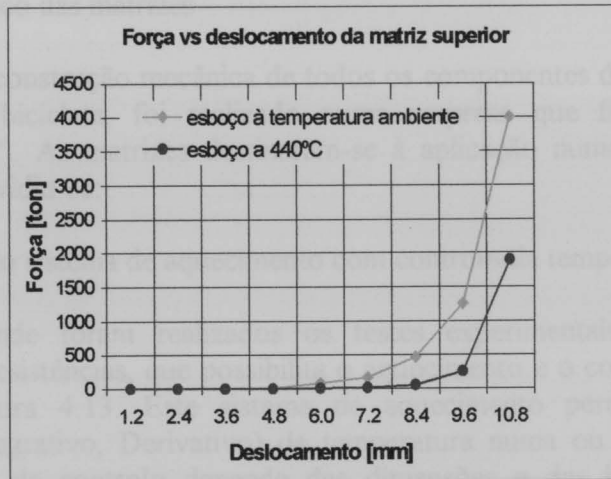


Gráfico 4.1 - Variação da força de forjamento com a descida da matriz (foi desprezado o valor da força para deslocamento=12mm)

No Gráfico 4.1, é representada a evolução da força de forjamento para as duas situações. Como seria de esperar o nível de forças envolvido é muito menor para o esboço a 440 °C sobretudo a partir dos 6mm de descida da matriz.

4.2.2 Trabalho experimental

A) Projecto e fabrico das matrizes

O projecto de construção mecânica de todos os componentes das matrizes para obtenção do espigão para bicicleta, foi realizado numa empresa que fabrica componentes para bicicletas, "Iberica". As matrizes destinaram-se à aplicação numa prensa de 400ton. Esta fase do projecto dividiu-se:

A.1) Definição do sistema de aquecimento com controlo da temperatura

A empresa onde foram realizados os testes experimentais possui um sistema de aquecimento por resistências, que possibilita o aquecimento e o controlo de temperatura das matrizes, ver Figura 4.13. Este sistema de aquecimento permite um controlo P.I.D. (Proporcional, Integrativo, Derivativo) da temperatura numa ou mais zonas da matriz. O número de zonas de controlo depende das dimensões e das heterogeneidades térmicas esperadas na matriz.

A.2) Maquinagem dos componentes da matriz

A matriz foi maquinada por electro-erosão com a utilização dos electrodos produzidos para o efeito pelo INEGI.

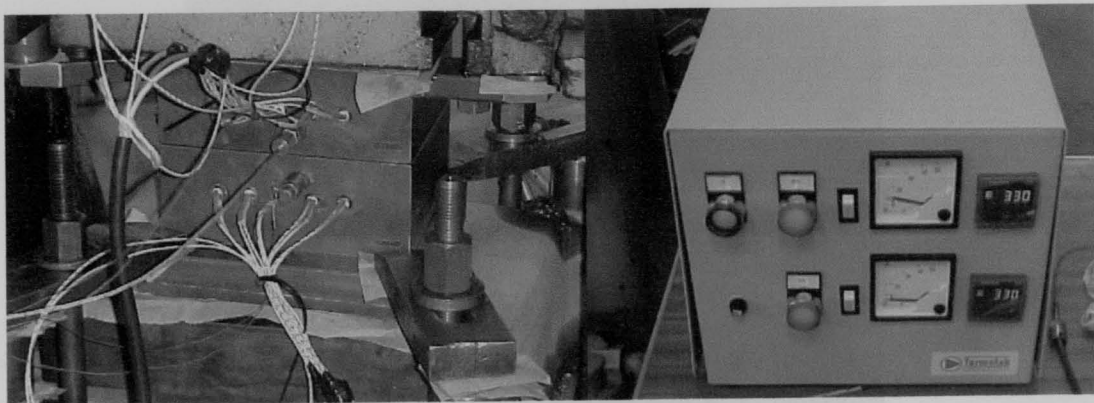


Figura 4.13 – Sistema de aquecimento com controlo de temperatura

C) Resultados experimentais

Os primeiros coboços, Figura 4.15, foram obtidos a partir de semi-produtos de secção circular que sofreram uma operação de dobragem e uma operação de ensabamento de modo a controlar localmente o diâmetro do coboço.

B) Equipamento

Na Figura 4.14 encontra-se ilustrado a prensa e a matriz usadas para o forjamento do novo modelo de espigão de bicicleta.

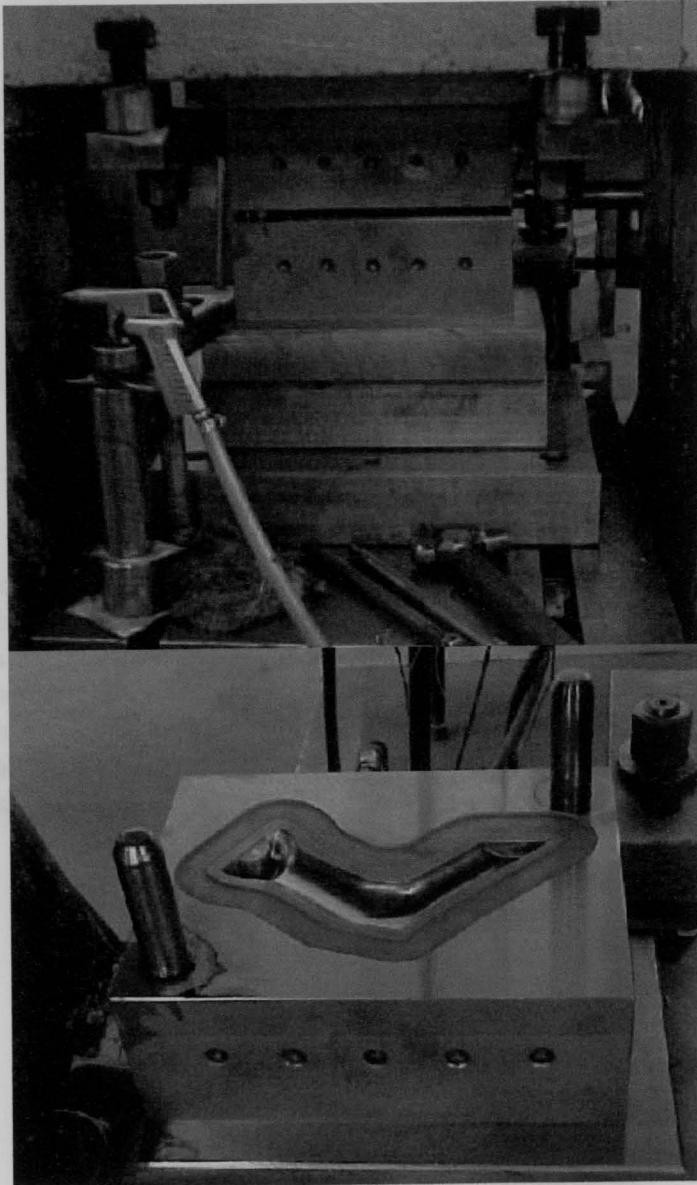


Figura 4.14 – Ferramentas para forjamento do espigão de guiador

C) Resultados experimentais

Os primeiros esboços, Figura 4.15, foram obtidos a partir de semi-produtos de secção circular que sofrem uma operação de dobragem e uma operação de encabeçamento de modo a aumentar localmente o diâmetro do esboço.

Nestes primeiros ensaios e tendo como base de partida os resultados da simulação fez-se variar os seguintes parâmetros do sistema:

- dimensão e forma dos esboços;
- temperatura da matriz;
- espessura da rebarba.

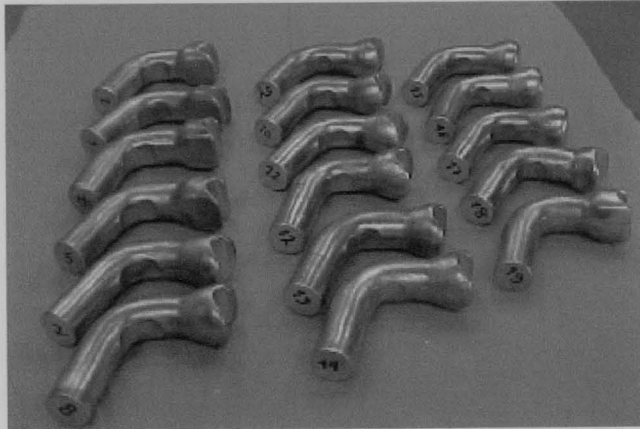


Figura 4.15 – Esboços utilizados na produção do espigão de guiador

Como indicado pela simulação numérica a utilização de esboços com diâmetro de 25mm não permite obter a peça sem defeitos de enchimento, Figura 4.16. Observam-se duas zonas críticas, a zona da curva e o topo. A solução passa por aumentar o diâmetro D do esboço, de 25mm, claramente insuficiente, para os 32mm, cujos resultados obtidos numericamente fazem prever a obtenção de um componente são. Para ultrapassar a falta de enchimento no topo do esboço será necessário aumentar o diâmetro para os 45mm apontados pela simulação, e assim conseguir o preenchimento dessa zona.

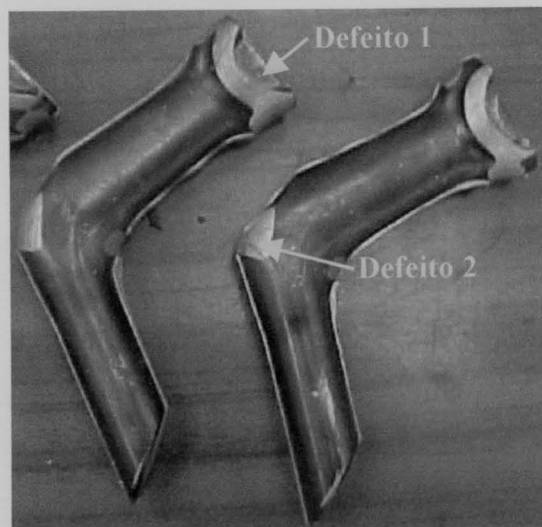


Figura 4.17 – Esboço obtido na primeira etapa de forjamento

Na Figura 4.17 mostra-se um componente obtido com este esboço (diâmetro 32mm e encabeçamento), que já não apresenta os defeitos de enchimento.

A utilização de um diâmetro de 32mm, permite obter esta peça com uma economia de 20% da matéria prima.



Figura 4.17 – Espigão forjado sem defeitos de enchimento

5 Conclusões

O trabalho realizado no âmbito deste estágio desenvolveu-se fundamentalmente em duas partes: pesquisa bibliográfica sobre o forjamento de ligas de alumínio e simulação numérica de casos experimentais. As conclusões mais relevantes a retirar dentro de cada uma destas partes são:

Na pesquisa bibliográfica:

- a caracterização do comportamento mecânico do alumínio permite justificar a influência de alguns factores essenciais, que determinam que o forjamento de ligas de alumínio seja mais complexo do que o forjamento de outros materiais;
- o efeito da temperatura nas ligas que apresentam maiores dificuldades no processo de forjamento, a alteração da tensão de cedência com a temperatura é ainda maior, sendo esta uma das razões para que o forjamento das ligas de alumínio seja realizado numa faixa relativamente estreita de temperaturas.
- o efeito da temperatura na matriz é um parâmetro que influencia a optimização do processo de forjamento nos alumínios. As matrizes usadas devem ser aquecidas de forma a facilitar o processo de forjamento;
- o controlo da temperatura é necessário devido à grande variabilidade da forjabilidade do alumínio com a temperatura.

Na simulação numérica:

- o recurso à simulação numérica por elementos finitos permite obter informações preciosas durante as fases de projecto, possibilitando corrigir erros e limitando deste modo, os custos finais das peças forjadas;
- a simulação numérica do componente para bicicleta permitiu ao nível da geometria da peça a detecção de defeitos de enchimento, principalmente na zona da curva e no encabeçamento;
- a simulação destes forjamentos faz prever forças de forjamento e deformações demasiado elevadas, o que indica que o diâmetro de 32mm produz esboços com excesso de material;
- os resultados obtidos com a modelação numérica apresentam valores próximos dos resultados obtidos experimentalmente, quanto às deformações obtidas e valores de forças.

Anexo I

Coeficientes de Expansão térmica de algumas ligas de Alumínio e de Ferro

Tabela 1 - coeficientes de expansão térmica de algumas ligas de Alumínio [4]

Liga	Temperatura (°C)	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)
Alumínio (99,99%)	20 a 100	23,8
Ligas de Alumínio		
EL - Ni20 + 1180	20 a 100	21,8
5011 + 2014		23,0
2024		22,8
7075		21,1
7050		21,2
6061		19,1
6061 - 6063 + 3052		23,8
3003		16,1
3003		21,4
3003		23,9
4047		23,9
5052		23,7
5083		23,9
6061 + 6063		23,4
6061 + 6063	23,8	
2024	23,8	
7075 + 7178	23,8	

Anexos

Tabela 2 - coeficientes de expansão térmica de algumas ligas de Ferro [4]

Liga	Temperatura (°C)	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)
Ferro (casto)	20	11,7
Ligas de Ferro		
0,05% C	20 a 100	11,7
0,25% C		11,7
0,40% C		11,3
0,55% C		11,0
1,05% C		10,8
1,20% C		10,1
15 Mn - 1,2 C	20	10,0
15 Cr - 0,35 C	10,0	
12 Cr - 0,4 Mn - 0,09 C	20 a 100	9,5
12 Cr - 0,4 Mn - 0,06 C		10,3
18 W - 1 Cr - 1 V	0 a 100	11,2
Ferro Fundido cinzento		10,5

Anexo 1

Coeficientes de Expansão térmica de algumas ligas de Alumínio e de Ferro

Tabela 1 - coeficientes de expansão térmica de algumas ligas de Alumínio [4]

Liga	Temperatura [°C]	Coeficiente de expansão térmica [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	
Alumínio (99.996%)	20 a 100	23.6	
Ligas de Alumínio			
EC, 1060 e 1100	20 a 100	23.6	
2011 e 2014		23.0	
2024		22.8	
2218		22.3	
3003		23.2	
4032		19.4	
5005, 5050 e 5052		23.8	
5056		24.1	
5083		23.4	
5086		-60 a 300	23.9
5154		20 a 100	23.9
5357			23.7
5456			23.9
6061 e 6063			23.4
6101 e 6151	23.0		
7075	23.2		
7079 e 7178	23.4		

Tabela 2 – coeficientes de expansão térmica de alguns aços, ferros fundidos e ligas de ferro [4]

	Temperatura [°C]	Coeficiente de expansão térmica [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
Ferro (puro)	20	11.7
Ligas de Ferro		
0.06% C	20 a 100	11.7
0.22% C		11.7
0.40% C		11.3
0.56% C		11.0
1.08% C		10.8
1.45% C		10.1
13 Mn – 1.2 C	20	18.0
13 Cr – 0.35 C	20 a 100	10.0
12.3 Cr – 0.4 Ni – 0.09 C		9.8
17.7 Cr – 9.6 Ni – 0.06 C		16.5
18 W – 4 Cr – 1 V	0 a 100	11.2
Ferro Fundido cinzento		10.5

Anexo 2

Ficheiro de entrada de dados no ABAQUS/EXPLICIT

```

*****
** Written by : FEMAP
** Version   : 5.00
** From Model : c:\users\The_Fly\forjamento\...
** Date: 21-03-2000
**
** Unidades:Newtons, metros
** *****
**
**HEADING
Forjamento com a ferramenta a utilizar el. triangulares ,1 etapa
**
**RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL=10
**
**Definição dos "NODE SETS" e respectivos ficheiros de dados
**NODE, NSET=nesboco, INPUT=forj.in0
**NODE, NSET=nmat_s, INPUT=forj.in1
**NODE, NSET=nlimit2, INPUT=forj.in2
**NODE, NSET=nlimit3, INPUT=forj.in3
**
**Definição dos "ELEMENT SETS" e respectivos ficheiros de dados
**ELEMENT, TYPE=C3D8R, ELSET=esboco, INPUT=forj.ie0
**ELEMENT, TYPE=R3D3, ELSET=matr_sup, INPUT=forj.ie1
**ELEMENT, TYPE=R3D3, ELSET=limit2, INPUT=forj.ie2
**ELEMENT, TYPE=R3D3, ELSET=limit3, INPUT=forj.ie3
**
** Nós pertencentes ao plano de simetria z=0.042
**NSET, NSET=face_z
29,44,45,46,47,48,49,50,51,52
53,54,55,56,57,58,73,88,89,90
91,92,93,94,95,96,97,98,99,100
101,102,103,104,105,110,113,114,119,120
**
**RIGID BODY, ELSET=matr_sup, REF NODE=19999
**RIGID BODY, ELSET=limit2, REF NODE=29999
**RIGID BODY, ELSET=limit3, REF NODE=39999
**
** FEMAP Property 2 : 3D
**SOLID SECTION, ELSET=esboco, MATERIAL=aluminio
**MATERIAL, NAME=aluminio
**
** Massa volúmica
**DENSITY
2700
**
** Módulo de Young e coeficiente de Poisson
**ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
69.7E9, .33
**
** Comportamento plástico a 440°C
**PLASTIC
0.23E8, 0.00

```

```
0.84E8, 0.5
1.00E8, 1
1.11E8, 1.5
**
** Restrições cinemáticas
*BOUNDARY
**
** Matriz - só translação em z
19999, 1,2
19999, 4,6
**
** Planos de retenção - fixos
29999, 1,6
39999, 1,6
**
** Simetria
face_z, ZSYMM
**
** Load Step 1 -----
**Deslocamento da matriz superior
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, .0012
**
** tempo de .0012 s. para v=10m/s segundo zz
*BOUNDARY, TYPE=VELOCITY
19999, 3, 3, 10
**
** Definição das superfícies e dos contactos
*SURFACE DEFINITION, NAME=smatr_s
matr_sup, SNEG
*SURFACE DEFINITION, NAME=slimit2
limit2, SPOS
*SURFACE DEFINITION, NAME=slimit3
limit3, SPOS
*SURFACE DEFINITION, NAME=sesboco
esboco,
*CONTACT PAIR, INTERACTION=cmatr_s
sesboco, smatr_s
*CONTACT PAIR, INTERACTION=climit2
sesboco, slimit2
*CONTACT PAIR, INTERACTION=climit3
sesboco, slimit3
**
**+ Atrito entre matriz e esboço
*SURFACE INTERACTION, NAME=cmatr_s
*FRICTION
0.5
*SURFACE INTERACTION, NAME=climit2
*SURFACE INTERACTION, NAME=climit3
**
*FILE OUTPUT, NUM=10, TIMEMARKS=NO
*NODE FILE, NSET=nesboco
RF
U
**HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL=.6E-4
*NODE HISTORY, NSET=nmat_s
```

U3,RF3

*EL FILE, ELSET=esboco

MISES, PEEQ

**

*END STEP

[1] Metals Handbook, Desk Edition, ASM.

[2] Metals Handbook, Volume 5, ASM.

[3] Metals Handbook, Volume 1 - Properties and Selection of Metals, ASM.

[4] ABAQUS/Explicit - Example Problems Manual (Version 5.5), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.

[5] ABAQUS/Post - Example Problems Manual (Version 5.5), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.

[6] Santos, Abel D., Duarte, J.F., Reis, Ana, Rocha, A.B., Neto, Rui, Paiva, Ricardo, Fractamento de Ligas de Alumínio: Trabalho Experimental e Simulação Numérica por Elementos Finitos, VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional.

[7] Aluminum: Properties and physical metallurgy, ASM.



Bibliografia

- [1] Metals Handbook, Desk Edition, ASM.
- [2] Metals Handbook, Volume 5, ASM.
- [3] Metals Handbook, Volume1 - Properties and Selection of Metals, ASM.
- [4] ABAQUS/Explicit – Example Problems Manual (Version 5.5), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- [5] ABAQUS/Post – Example Problems Manual (Version 5.5), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- [6] Santos, Abel D., Duarte, J.F., Reis, Ana, Rocha, A.B., Neto, Rui, Paiva, Ricardo, Forjamento de Ligas de Alumínio: Trabalho Experimental e Simulação Numérica por Elementos Finitos, VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional.
- [7] Aluminium: Properties and physical metallurgy, ASM.





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000088316