

# **Forjamento de Parafusos em Multi-etapas**

**Optimização do processo através da modelação numérica por elementos finitos**

**ETMA, S.A.**

*Vasco Guerreiro Jorge*

## **Relatório do Projecto Final do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Abel Santos

Co-orientadores: Prof. César Sá e Prof. Francisco Pires

Orientador na Empresa: Engenheiro João Pedro Sousa



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2008



## RESUMO

A conformação plástica de componentes metálicos e o forjamento em particular são processos de fabrico correntemente utilizados em muitas áreas de produção cujas características principais são as suas elevadas taxas de produção e o grande aproveitamento da matéria-prima utilizada. Tradicionalmente, usava-se uma grande dose de empirismo e experiência na tomada de decisões relativamente ao projecto de componentes forjados. Contudo, a crescente complexidade dos produtos, a redução dos tempos de ciclo de desenvolvimento e a necessidade de utilizar novos materiais, têm criado novos desafios a esta indústria. Para fazer frente a estes desafios, os projectistas têm-se aproximado cada vez mais de “ferramentas” que possam facilitar a tomada de decisões, tornando-as ao mesmo tempo mais acertadas. Desta aproximação surge o conceito de produção virtual, fazendo uso da simulação numérica por elementos finitos.

A utilização deste método de simulação pretende para além de assegurar a possibilidade de execução de um determinado componente, otimizar parâmetros que permitam saber, o número de operações para conformar o componente, conhecer a capacidade da prensa a utilizar, estimar o tamanho e forma do esboço inicial e atingir os objectivos de deformação e espessura.

O projecto correspondente à tese que aqui se apresenta mostra a aplicação da simulação numérica como ferramenta de apoio ao desenvolvimento de dois novos componentes durante a fase de projecto, de modo a reduzir o período de tentativa-erro para afinação do processo e traçar uma linha de rumo para um componente sem defeitos, utilizando apenas a matéria prima necessária.

Nos componentes estudados, mostra-se que a sua realização em várias etapas é fundamental para a obtenção do componente. Partindo da realização do componente numa única etapa compreendem-se as dificuldades associadas ao seu processamento. Em consequência propõem-se e estudam-se diversas soluções, verificando-se os resultados de viabilidade para obtenção da geometria desejada, os quais sugerem novas soluções. Entende-se que este é um processo iterativo em que a optimização é possível e passa por encontrar o melhor compromisso que inclua as variáveis do processo, sem se ultrapassar a capacidade de deformação do material, assim como as forças necessárias ao seu processamento.

**Palavras-chave:** Simulação Numérica, Método dos Elementos Finitos, Forjamento, Multi-etapas, projecto de componentes e ferramentas

## **ABSTRACT**

Metal forming processes, including forging, are widely used in many manufacturing applications, its main features being well suited for mass production as well as being net shape processes.

Traditionally in this kind of processes, experience and empiricism used to be important when deciding about the design and project of components. However growing demand on complexity of products, shorter life cycles and use of new materials create new challenges to this industry. To face these challenges designers need new “tools” to help them deciding the right solutions when a new component is to be produced. The methodology which may help designers taking correct decisions include the so called virtual manufacturing and the use of numerical simulation by finite element method.

The use of numerical simulation may give answers to the feasibility of a component, the choice of process parameters, the number of steps to manufacture the component, the press to be used, the size and shape of the initial billet.

The work under this thesis shows the use of numerical simulation as an aid to design two proposed components and the corresponding manufacturing steps. For such components one shows that several manufacturing steps are needed to obtain the final component. The study begins by using a single step for its manufacturing. This first study and its results show the difficulties to process the component and therefore new proposals are defined and studied, for which the corresponding results will in turn suggest new solutions. This is an iterative procedure in which optimization is possible. One needs to find the best balance of process variables and geometry of intermediate tool geometries without overcoming the material deformation capabilities as well as maximum press force for processing.

**Keywords:** Numerical Simulation, Finite Element Method, Forging, Tool Design

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Abel Dias Santos pela sua disponibilidade e orientação ao longo destes meses, bem como por ter despertado em mim o interesse por esta área científica. Por último gostaria de agradecer por todos os conselhos que me deu.

Gostaria de agradecer ao Eng. João Pedro Sousa pela oportunidade, e sobretudo pela disponibilidade e interesse que mostrou neste projecto.

Ao Professor Doutor Francisco Pires desejo agradecer a colaboração e a disponibilidade demonstrada no apoio sistemático a nível da modelação numérica das aplicações industriais.

Ao Professor Doutor José César de Sá gostaria de agradecer por todos os comentários construtivos e pelo apoio demonstrado.

Por último, deixo uma palavra de apreço aos familiares e amigos que nunca saíram do meu lado.

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUÇÃO GERAL .....	1
1.2	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ETMA, S.A. ....	3
1.2.1	<i>Historial.....</i>	3
1.2.2	<i>A empresa actual .....</i>	3
1.2.3	<i>Abertura a novos desafios .....</i>	6
1.3	PROCESSOS DE FORJAMENTO A FRIO .....	7
1.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS .....	12
1.4.1	<i>Introdução .....</i>	12
1.4.2	<i>Formulação dos programas de elementos finitos.....</i>	15
<b>2</b>	<b>BIBLIOTECA DE COMPONENTES PARA OPTIMIZAÇÃO DE FABRICO .....</b>	<b>20</b>
2.1	PARAFUSO CABEÇA ESPECIAL M8X10,4.....	21
2.2	EIXO LATERAL DE FIXAÇÃO PARA TRAVÕES .....	22
2.3	PINO DE TERRA FRANCÊS 4,8X23.....	24
2.4	PARAFUSO DE CABEÇA CILÍNDRICA COM FENDA M4X7,3.....	25
2.5	RACCORD AKE 22 36 DE 25MM.....	26
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL A USAR: AÇO CQ15 .....</b>	<b>27</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	27
3.2	ENSAIO DE TRACÇÃO.....	29
3.2.1	<i>Procedimentos.....</i>	29
3.2.1.1	<i>Determinação do gráfico força vs deslocamento.....</i>	29
3.2.1.2	<i>Determinação da carga máxima e deformação uniforme .....</i>	31
3.2.2	<i>Resultados.....</i>	32
3.3	CURVA REAL TENSÃO VS DEFORMAÇÃO.....	33
3.3.1	<i>Cálculos efectuados.....</i>	33
3.3.1.1	<i>Cálculo de tensões e deformações convencionais .....</i>	33
3.3.1.2	<i>Tensão de rotura e deformação uniforme .....</i>	34
3.3.1.3	<i>Conversão de valores de tensão e deformação convencionais em reais .....</i>	35
3.3.1.4	<i>Cálculo dos valores de coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (k) presentes na equação objectivo <math>\sigma = k * \epsilon^n</math>.....</i>	35
3.3.1.5	<i>Determinação da curva Tensão real VS Deformação real baseada na equação <math>\sigma = k * \epsilon^n</math> de coeficientes relativos ao material ensaiado previamente: .....</i>	36
3.3.2	<i>Valores utilizados para caracterizar o material na simulação .....</i>	37
<b>4</b>	<b>APLICAÇÕES INDUSTRIAIS .....</b>	<b>39</b>
4.1	PARAFUSO CABEÇA ESPECIAL M8X10,4.....	39
4.1.1	<i>Uma etapa de realização.....</i>	39
4.1.1.1	<i>Resultados com o programa ABAQUS.....</i>	40
4.1.1.2	<i>Resultados com o programa ELFEN.....</i>	43
4.1.2	<i>Duas etapas de realização.....</i>	46
4.1.2.1	<i>Resultados com o programa ABAQUS.....</i>	46
4.1.2.2	<i>Resultados com o programa ELFEN.....</i>	48
4.1.3	<i>Quatro etapas de realização (proposta “Carbodies”).....</i>	51
4.1.3.1	<i>Resultados com o programa ABAQUS.....</i>	52
4.1.3.2	<i>Resultados com o programa ELFEN.....</i>	54
4.2	EIXO LATERAL DE FIXAÇÃO PARA TRAVÕES.....	56
4.2.1	<i>Cálculo das áreas equivalentes, para implementação no modelo axisimétrico.....</i>	56
4.2.2	<i>Uma etapa de realização.....</i>	57
4.2.2.1	<i>Resultados com o programa ABAQUS.....</i>	57
4.2.2.2	<i>Aumento do tamanho do esboço inicial e redistribuição da malha.....</i>	58
4.2.3	<i>Quatro etapas para a realização do eixo de fixação.....</i>	59
4.2.3.1	<i>Resultados com o programa ABAQUS.....</i>	60
4.2.3.2	<i>Diminuição dos deslocamentos para controlar forças de forjamento .....</i>	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>65</b>

5.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	65
5.2	TRABALHOS FUTUROS .....	66
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>68</b>
	ANEXO A – GRÁFICO OBTIDO PELO ENSAIO DE TRACÇÃO DO AÇO CQ15.....	69
	ANEXO B – DESENHO TÉCNICO DO PARAFUSO CABEÇA ESPECIAL M8x10,4 .....	70
	ANEXO C - DESENHO TÉCNICO DO EIXO DE FIXAÇÃO PARA TRAVÕES DE AUTOMÓVEL.....	71
	ANEXO D - PINO DE TERRA FRANCÊS 4,8.....	72
	ANEXO E - PARAFUSO DE CABEÇA CILÍNDRICA COM FENDA M4x7,3 .....	73
	ANEXO F - RACCORD AKE 22 36 DE 25MM.....	74
	ANEXO G – CARACTERÍSTICAS DA PRENSA CARLO SALVI, MODELO 550(CATÁLOGO CARLO SALVI).....	75
	ANEXO H – CARACTERÍSTICAS DA PRENSA MORONI MB 765(CATÁLOGO MORONI) .....	76

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da ETMA, SA .....	4
Figura 2 – Instalações da ETMA, S.A. e sua localização .....	5
Figura 3 – Organigrama da ETMA S.A.....	5
Figura 4 – Exemplos de componentes obtidos por forjamento a frio .....	7
Figura 5 – Esboço inicial, pré-formas e resultado final de uma sequência de forjamento a frio .....	8
Figura 6 – Representação de algumas operações típicas de forjamento; a) Forjamento em matriz aberta (matriz em forma de V), b) Forjamento em matriz fechada, c) Forjamento por compressão axial, d) Forjamento por intermédio de rolos, e) Forjamento rotativo e f) Forjamento orbital .....	9
Figura 7 – Exemplos de peças obtidas por encabeçamento (esquerda) e de ferramentas usadas na conformação deste tipo de componentes (direita).....	10
Figura 8 – Prensa Carlo Salvi 550, de 2 etapas .....	10
Figura 9 – Prensa Moroni MB 765, 5 etapas .....	11
Figura 10 – Sequência de etapas de forjamento de um componente, modeladas por elementos finitos [Park 2006] .....	12
Figura 11 – Organigrama de desenvolvimento de ferramentas para conformação plástica sem recorrer a métodos de simulação [Tisza 2007].....	13
Figura 12 – Organigrama de desenvolvimento de ferramentas para conformação plástica recorrendo a métodos de simulação [Tisza 2007].....	14
Figura 13 – Desenho do Parafuso Cabeça especial M8 x 10,4.....	21
Figura 14 – Desenho do Eixo Lateral de Fixação para Travões .....	23
Figura 15 – Desenho do Pino de terra francês 4,8x23 .....	24
Figura 16 – desenho do Parafuso de cabeça cilíndrica com fenda M4 x 7,3 .....	25
Figura 17 – Desenho do <i>Raccord</i> 25mm .....	26
Figura 18 – Curvas representativas de um ensaio de tracção: real e convencional .....	28
Figura 19 – Provetes utilizados nos ensaios de tracção .....	29
Figura 20 – Colocação do papel milimétrico no rolo onde será registado o gráfico Força vs Deslocamento .....	30
Figura 21 – Montagem do provete nas amarras da máquina de ensaio de tracção .....	30
Figura 22 – Transdutor de deslocamento montado no provete.....	31
Figura 23 – Mostrador que permite determinar a força máxima .....	31
Figura 24 – Gráfico Força vs deslocamento obtido pelo ensaio de tracção.....	32
Figura 25 – Gráfico log-log de Tensão real vs Deformação real.....	36
Figura 26 – Curva Tensão real vs Deformação real baseada na equação $\sigma = k * \epsilon^n$ de coeficientes relativos ao material ensaiado.....	37
Figura 27 – Curva real de tensão vs deformação utilizada no modelo de elementos finitos .....	38
Figura 28 – Ferramentas modeladas para simulação do fabrico do parafuso M8 em 1 etapa .....	40
Figura 29 – Parte da sequencia da distribuição das deformações num ensaio de uma etapa para fabrico do parafuso M8; com uma malha grosseira .....	41
Figura 30 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em uma etapa, do parafuso M8 (ABAQUS).....	42

---

Figura 31 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento do punção para conformação em uma etapa do parafuso M8 .....	43
Figura 32 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em uma etapa, do parafuso M8 (ELFEN) 3D .....	44
Figura 33 – Pormenor da formação de uma superfície côncava com a diminuição de diâmetro na zona inferior .....	45
Figura 34 - Sequência de deformação do pormenor da fenda .....	45
Figura 35 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do parafuso M8 em 2 etapas, primeira e segunda etapa respectivamente .....	46
Figura 36 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em duas etapas, do parafuso M8 (ABAQUS) .....	47
Figura 37 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento dos punções para a conformação do Parafuso M8 em duas etapas.....	48
Figura 38 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em duas etapas, do parafuso M8 (ELFEN) .....	49
Figura 39 – Representação dos contactos no último instante da conformação do parafuso M8 em 2 etapas (ELFEN) .....	50
Figura 40 – Proposta de planeamento de forjamento em 5 etapas (“Carbodies”) .....	51
Figura 41 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do parafuso M8 em 4 etapas .....	52
Figura 42 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas (“Carbodies”), do parafuso M8 (ABAQUS) .....	53
Figura 43 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento dos punções para a proposta 4 etapas.....	54
Figura 44 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas (“Carbodies”), do parafuso M8 (ELFEN) .....	55
Figura 45 – Esquema de “transformação” das secções quadradas em axissimétricas .....	56
Figura 46 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do eixo de fixação em 1 etapa.....	57
Figura 47 – Distribuição de deformações no último incremento da análise de uma etapa para a conformação do eixo de fixação .....	58
Figura 48 – Distribuição de deformações no último incremento da análise de uma etapa para o eixo de fixação, depois de aumentada a altura do esboço e redistribuída a malha .....	59
Figura 49 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do eixo de fixação em 4 etapas .....	60
Figura 50 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas do eixo de fixação, com compressão excessiva de material (ABAQUS).....	62
Figura 51 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento do punção para conformação do Eixo de Fixação em 4 etapas, com compressão excessiva de material .....	62
Figura 52 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas do eixo de fixação, com deslocamentos reduzidos (ABAQUS).....	64
Figura 53 – Gráfico da força de forjamento para conformação em 4 etapas do eixo de fixação, com os deslocamentos do punção ajustados.....	64

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das diversas formulações .....	19
Tabela 2 – Deformações plásticas uniformes convencionais .....	32
Tabela 3 – Transição dos valores retirados do gráfico do ensaio para valores convencionais de tensão e deformação.....	34
Tabela 4 – Valores de deformação plástica medidos no provete 3, cálculo da deformação média das várias secções do provete, deformação total para um valor médio de deformação plástica e conversão para valor real de deformação.....	34
Tabela 5 – Conversão de valores convencionais para valores reais .....	35
Tabela 6 – Valores da curva Tensão real vs Deformação real baseada na equação $\sigma = k * \epsilon^n$ de coeficientes relativos ao material ensaiado .....	36
Tabela 7 – Valores a serem utilizados na modelação do material para a análise de elementos finitos.....	37
Tabela 8 - Valores do raio das secções circulares(R2) e das secções originais(L1) .....	56

# 1 Introdução

## 1.1 Introdução geral

A conformação plástica de componentes metálicos e o forjamento em particular caracterizam-se por elevadas taxas de produção e grande aproveitamento da matéria-prima utilizada. Estes processos de conformação plástica são hoje correntemente utilizados em diversas áreas da produção tais como a indústria automóvel, indústria de electrodomésticos (frigoríficos, máquinas de lavar, fogões, etc.), a indústria de equipamentos domésticos e decorativos (banheiras, lava-loiças, candeeiros, recipientes, etc.), indústria eléctrica e de electrónica (elementos de interruptores, casquilhos de lâmpadas, contactos, elementos de computadores, etc.), indústria de equipamentos alimentares, indústria aeronáutica e aeroespacial, relojoeira e industrias de toda uma panóplia de pequenos elementos genéricos (parafusos, rebites, elementos de ligações, pequenas engrenagens), etc.

As tendências actuais nestas indústrias podem ser caracterizadas pela flexibilidade, utilização de novos materiais e crescente complexidade dos produtos. A forte competição entre os fabricantes e a redução dos tempos de vida útil dos produtos fazem com que os produtores tenham a necessidade de conseguir um desenvolvimento de produto muito rápido e pouco dispendioso. Paralelamente, mantém-se um nível exigência de qualidade muito elevado. Assim torna-se necessário criar condições que permitam trabalhar “rápido e bem”, protegendo a flexibilidade [Yang 2002].

Esta redução do tempo de ciclo de desenvolvimento deixou intervalos de tempo extremamente curtos para o projecto de novas ferramentas e respectiva correcção e afinação. Tipicamente, são necessários numerosos e dispendiosos ciclos de tentativa-erro nas fases de desenvolvimento, sendo o projecto de realização de componentes e respectivas ferramentas baseado na experiência prévia e no uso de fórmulas empíricas. Nesta metodologia o desenvolvimento de ferramentas tem tanto de arte como de aplicação de ciência. No caso de um novo componente, a determinação de uma configuração de ferramenta e de esboços aceitáveis pode levar a várias tentativas. Contudo, mesmo após este processo, tanto as ferramentas como os esboços podem ou não estar otimizados para a diminuição da rebarba, vazios internos ou outras irregularidades do material.

Para que os ciclos de desenvolvimento sejam possíveis é necessário recorrer ao fabrico de protótipos de ferramentas, já por si extremamente dispendiosas. Para além deste gasto directo em materiais e processos de fabrico, é também consumido muito tempo em recursos humanos e ocupação de equipamentos tanto no fabrico das ferramenta-protótipo, como na utilização da maquinaria de produção em testes de viabilidade e afinação. Estabelecendo esta situação como a verdadeira e actual torna-se importante promover uma redução significativa dos ciclos de projecto-fabrico.

Partindo deste ponto, criaram-se as condições para uma forte procura por parte dos projectistas de uma “ferramenta” que possa ajudar a tornar as decisões mais acertadas para a produção de um componente rentável e com boa qualidade. Mais do que confirmar que um dado modelo não poderá resultar em rotura ou outros defeitos, esta “ferramenta” deve poder ser usada para a optimização do processo relativamente a:

- determinação do número de operações para conformar o componente e capacidade da prensa a usar;
- estimativa do tamanho do esboço e sua forma;
- possibilidade de utilizar um material menos dispendioso para conformar com sucesso o componente;
- forma de atingir os objectivos de deformação e espessura.

Uma das “ferramentas” que permite apoiar o projecto de desenvolvimento de um componente é a simulação numérica, nomeadamente a modelação numérica pelo método dos elementos finitos.

O projecto correspondente à tese que aqui se apresenta tem entre os seus objectivos a aplicação desta “ferramenta” no processo de desenvolvimento e realização de componentes de uma empresa nacional, a ETMA, S.A. – Empresa Técnica de Metalurgia, localizada em Braga.

## **1.2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA ETMA, S.A.**

### **1.2.1 Historial**

A ETMA – Empresa Técnica de Metalurgia, SA foi fundada pelo Sr. Mário Rodrigues da Costa, a 1 de Fevereiro de 1940, com a denominação “ETM – Empresa Técnica de Metalurgia de Mário Rodrigues da Costa”, sob a forma jurídica de empresa em nome individual.

Inicialmente esta unidade industrial fabricava e reparava armas de caça, recreio e defesa. O desenvolvimento desta actividade teve como motivação, não só a tradição familiar na indústria metalomecânica, mas também a experiência profissional do fundador na produção de armas, beneficiando do facto de ocupar um nicho de mercado sem concorrência significativa.

Posteriormente, a empresa direccionou-se para a produção de calhas e acessórios para cortinados e, mais tarde, para a metalomecânica propriamente dita, nomeadamente para: torneamentos, estampagem, produção de ferramentas e tratamentos galvânicos.

A produção de parafusos é a mais recente actividade da empresa. Foi introduzida em meados da década de 70, tendo sido a terceira empresa em Portugal a fabricar este produto.

### **1.2.2 A empresa actual**

A ETMA – Empresa Técnica de Metalurgia, S.A. é uma empresa de subcontratação na área da metalomecânica. Esta empresa dedica-se à produção de peças torneadas e estampadas, assim como de parafusos.

A ETMA possui uma secção de serralharia, onde são fabricadas ferramentas progressivas (e outro tipo de ferramentas) para a estampagem a frio, corte, formação e forjamento a frio.

Esta unidade fabril tem a capacidade de oferecer aos seus clientes peças em metal exclusivas (de acordo com o desenho e características da peça do cliente). Realiza, ainda, tratamentos galvânicos, tais como: prateamento, estanhagem, cobreamento, zincagem, niquelagem (química e electrolítica) e latonagem. A empresa diversificou a sua actividade para a subcontratação em várias áreas de negócio, nomeadamente nos ramos da Industria Eléctrica e Electrónica, da Indústria Automóvel, da Construção Civil, do Mobiliário e da Indústria do Gás. O principal mercado de actuação é o nacional, embora também tenha relações comerciais com o exterior.

O valor técnico da ETMA é reconhecido por grandes empresas nacionais e internacionais, que confiam na qualidade dos produtos da ETMA para realizar





Figura 2 – Instalações da ETMA, S.A. e sua localização

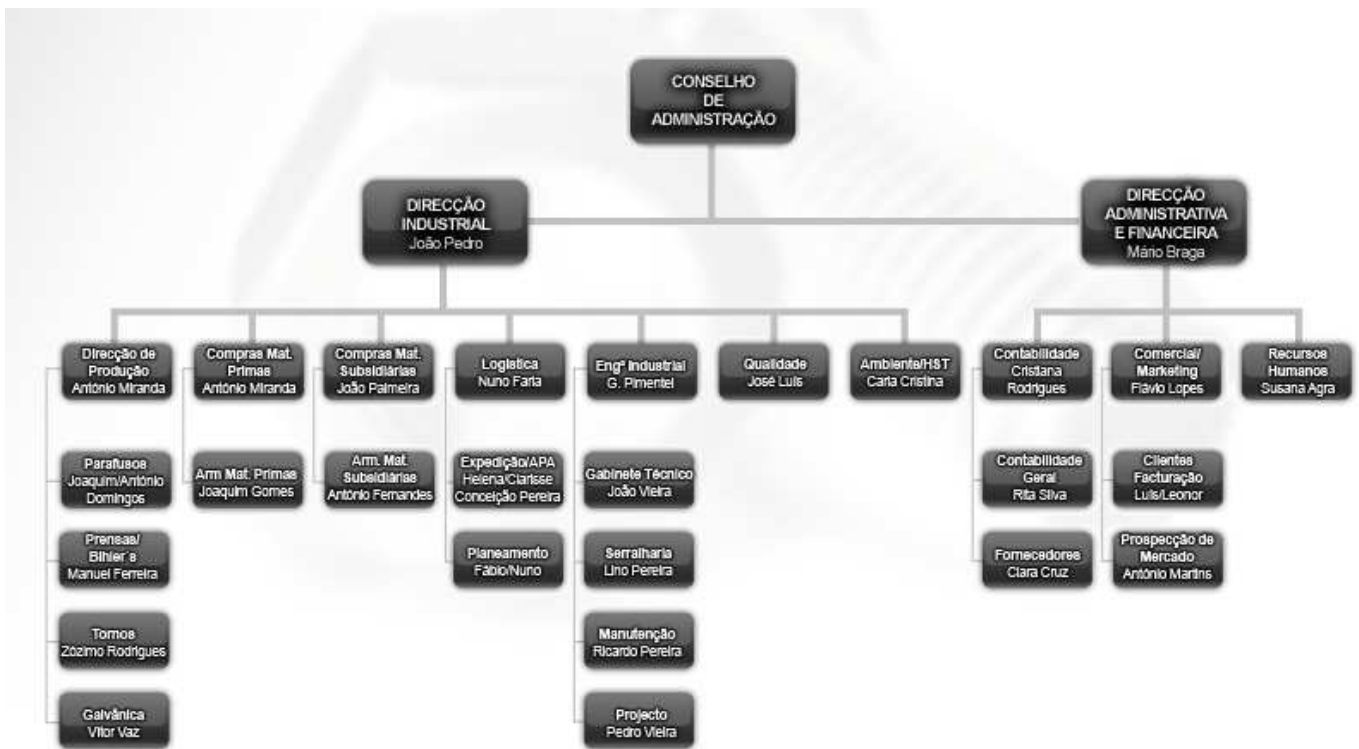


Figura 3 – Organigrama da ETMA S.A

### **1.2.3 Abertura a novos desafios**

Devido à actual globalização do mercado e à importância que as indústrias asiáticas têm adquirido no mercado dos componentes forjados mais normalizados, empresas como a ETMA caminham sobre uma fina linha entre o mercado e a falta dele. Por isso, torna-se fundamental para aumentar a competitividade, apostar na qualidade e em nichos de mercado mais especializados e particulares. Este tipo de mercado tem a sua própria dualidade entre o valor acrescentado dos componentes e os desafios de projecto e implementação.

No momento, a ETMA tem como equipamentos no sector de forjamento a frio, prensas de duas etapas. Estas prensas apresentam algumas limitações no leque de formas a que conseguem aceder. Assim, a ETMA pretende superar as limitações dos equipamentos de duas etapas e iniciar-se no desenvolvimento de componentes que exijam conformação em multi-etapas. Neste sentido, foi encomendado um equipamento com 5 estações, que permite o forjamento de geometrias até aqui sem possibilidade de serem concretizadas.

A iniciação ao fabrico de componentes que exigem conformação por multi-etapas e ao desenvolvimento das ferramentas utilizadas para o processo representam um novo desafio. Para responder a este desafio, em conjunto com a experiência adquirida nos processos de duas etapas, há necessidade de recorrer a métodos auxiliares de análise. A colaboração no âmbito desta tese tem como um dos seus objectivos mostrar que a simulação numérica pode complementar este conhecimento prévio e possibilitar um desenvolvimento de produto e ferramentas menos dispendiosos e menos demorados. Com a utilização desta “ferramenta” poderá eventualmente aumentar o interesse da ETMA no mercado das ferramentas ou possibilitar uma quase auto-suficiência no fabrico das mesmas.

Como complemento de introdução sobre a empresa ETMA faz-se referência aos clientes mais importantes no portefólio da empresa, e nestes constam:

- Schneider Electric, SA (Portugal, Espanha, Bélgica, Rep. Checa);
- GE Power Controls (Portugal, Espanha e Polónia);
- BBT Thermotechnik GMBH (Portugal, Alemanha);
- Faurecia, SA;
- Bosch automotive;
- ABB Stotz Kontakt Eléctrica, Lda.;
- Hutchinson Porto – Tubos Flex., Soc. Unipessoal, Lda.;
- Delphi Automotive Systems – Portugal, SA;
- OJD Trading APS;
- Van Den Heuvel Hydraulik Gmbh & Co;
- Dayco Ensa, S.L.;
- Actaris – Sistemas de Medição, Lda.;
- Denso.

### **1.3 PROCESSOS DE FORJAMENTO A FRIO**

O termo forjamento é utilizado para designar a família de processos tecnológicos de deformação plástica na massa, para os quais a alteração de forma é realizada por forças de compressão exercidas por martelos de queda, prensas hidráulicas, mecânicas ou de fricção [Rodrigues 2005]. Algumas das características principais deste processo de deformação são:

- as forças utilizadas para obter a forma do componente são forças essencialmente de compressão;
- a variação de dimensões bastante elevada entre a secção do esboço inicial e a secção do componente final;
- os efeitos do retorno elástico podem ser desprezados, pois não interferem de maneira significativa nas dimensões finais dos componentes.

As forças utilizadas devem ser tais que assegurem que é ultrapassado o limite de elasticidade do material. Contudo nunca devem ultrapassar o limite correspondente à sua capacidade de deformação plástica [Wright1976].

Esta tecnologia permite estabelecer um paralelo entre o fabrico de componentes com uma gama muito vasta de geometrias, dimensões e materiais metálicos, mantendo índices de produção elevados e uma qualidade de acabamento muito próxima da desejada no final do processo. É este conjunto de características e em particular as suas altas cadências que torna este tipo de processo especialmente adequado para produção de componentes em grandes séries.



**Figura 4 – Exemplos de componentes obtidos por forjamento a frio**

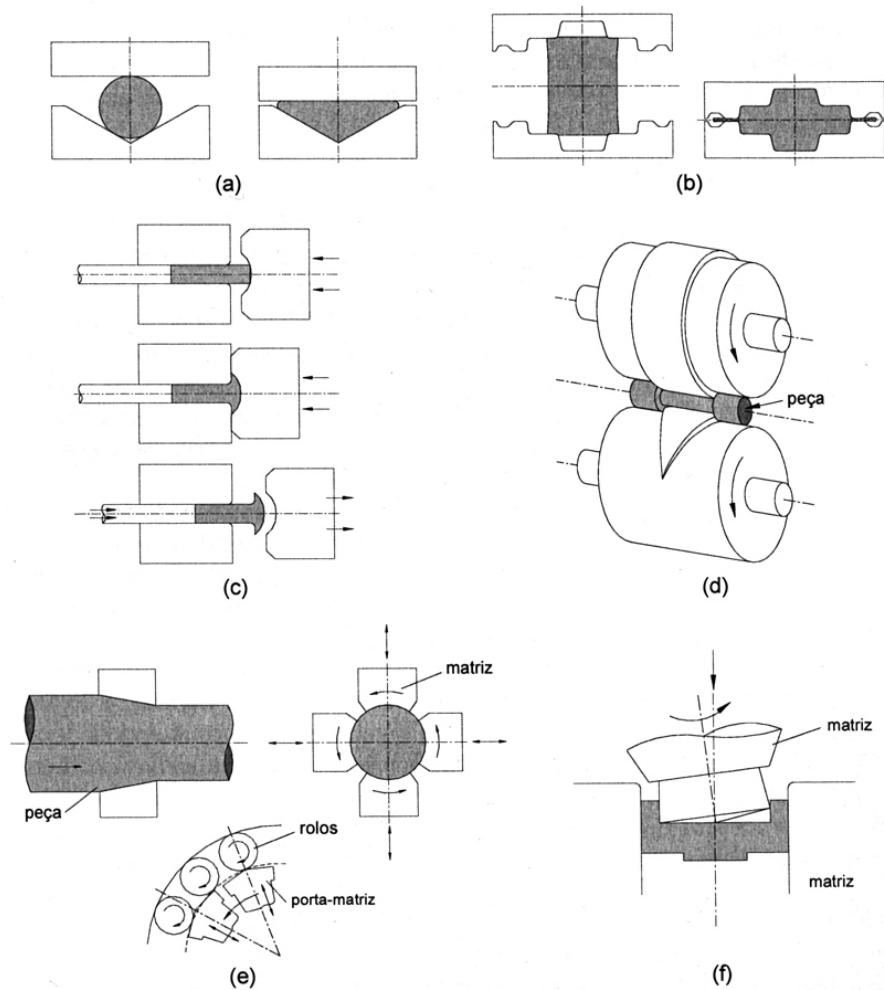
Alguns dos componentes apresentados na figura 4, devido á complexidade da sua geometria, exigem conformação em várias etapas. O semi-produto de cada uma das etapas, excepto da última, é denominado pré-forma e cada uma das pré-formas deve contribuir positivamente para que, em cada etapa, a geometria se aproxime da final. Apresenta-se na figura 5 um exemplo de sequência desde o esboço inicial até à forma final, passando pelas pré-formas necessárias à conformação do componente.



**Figura 5 – Esboço inicial, pré-formas e resultado final de uma sequência de forjamento a frio**

Os processos de forjamento podem ser classificados de acordo com a temperatura a que são realizados ou pelo tipo de ferramenta utilizada no processo [Rodrigues 2005]. Pelo primeiro método, distinguem-se três tipos de forjamento: a frio, a morno e a quente. Alternativamente a esta classificação, os processos podem ser classificados em função das ferramentas utilizadas e assim podemos dividir o processo em:

- forjamento em matriz aberta,
- forjamento em matriz fechada,
- outros tipos de forjamento (nos quais se inclui: o forjamento por compressão axial, por rolos, forjamento por ferramentas rotativas e orbitais).



**Figura 6 – Representação de algumas operações típicas de forjamento; a) Forjamento em matriz aberta (matriz em forma de V), b) Forjamento em matriz fechada, c) Forjamento por compressão axial, d) Forjamento por intermédio de rolos, e) Forjamento rotativo e f) Forjamento orbital**

Nesta tese, o esquema de forjamento abordado será o forjamento a frio. Relativamente à classificação pela ferramenta utilizada será um misto entre o forjamento por compressão axial e o forjamento em matriz fechada. Esta classificação surge em virtude de os componentes pretendidos serem bastante mais complexos do que um arame encabeçado, necessitando de uma abordagem mais próxima de um problema de forjamento em matriz fechada.

Relativamente ao equipamento usado pela empresa ETMA, apresentam-se algumas características do equipamento existente. Até ao momento do início desta tese, eram utilizadas prensas de duas etapas, com apenas uma matriz. Este processo é também conhecido por encabeçamento e as etapas são denominadas por preparação e acabamento. Utilizando estes equipamentos há complicações quando se pretendem geometrias complexas e estas não se encontram na zona de encabeçamento. Tipicamente este processo é associado ao fabrico de parafusos, pinos e componentes bastante simples que apresentam uma dimensão bastante maior que as restantes.



**Figura 7 – Exemplos de peças obtidas por encabeçamento (esquerda) e de ferramentas usadas na conformação deste tipo de componentes (direita)**

As máquinas utilizadas na empresa para este fim são do fabricante Carlo Salvi, modelo 550 e apresentam como principais características (ver Anexo G):

- Força de forjamento de 110 kN;
- Diâmetro máximo do arame de 5mm;
- Diâmetro máximo da cabeça de 10mm;



**Figura 8 – Prensa Carlo Salvi 550, de 2 etapas**

Como já foi referido anteriormente, é objectivo da empresa ETMA abordar o mercado de componentes mais complexos e neste sentido foi planeado adquirir uma prensa multi-etapas. Este equipamento é constituído por um conjunto de cinco punções e cinco matrizes, que distribuem a dificuldade de forjamento de um dado componente por um conjunto de pré-formas e eventualmente uma última operação de corte. A possibilidade de operação em várias matrizes permite o forjamento de componentes com especificações ao longo de todo o comprimento, libertando o processo das limitações do encabeçamento.

O equipamento encomendado para aquisição foi uma prensa MORONI MB 765 que apresenta como principais características as seguintes (ver Anexo H):

- força de forjamento de 550 kN;
- diâmetro máximo do arame de 8 mm.



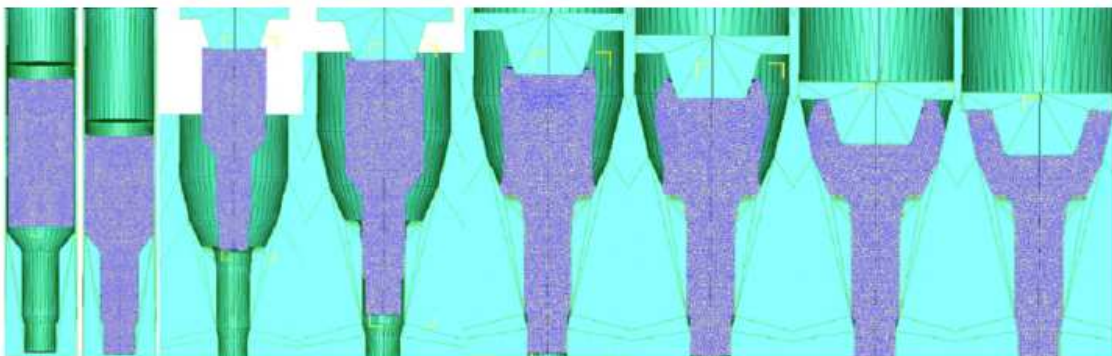
**Figura 9 – Prensa Moroni MB 765, 5 etapas**

## 1.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

### 1.4.1 Introdução

A simulação numérica de conformação plástica é um tópico de investigação já com várias décadas. O interesse nestes processos é evidente, pois permite à indústria efectuar uma validação virtual das ferramentas. Assim, parte dos testes experimentais em prensa são substituídos por ensaios virtuais, reduzindo a duração do ciclo de projecto e os custos associados. Os requisitos principais estipulados para que se considere uma aplicação de simulação rentável são os seguintes [Makinouchi 2001]:

- possibilidade de simulação de todas as etapas constituintes do processo;
- fiabilidade dos resultados numéricos na previsão de defeitos, dificuldades e comportamentos, como por exemplo distribuição de tensões e deformações;
- aplicabilidade à vasta variedade de produtos passíveis de serem obtidos por processos de conformação plástica;
- possibilidade de simulação do comportamento de diferentes materiais;
- obtenção de resultados num tempo aceitável.

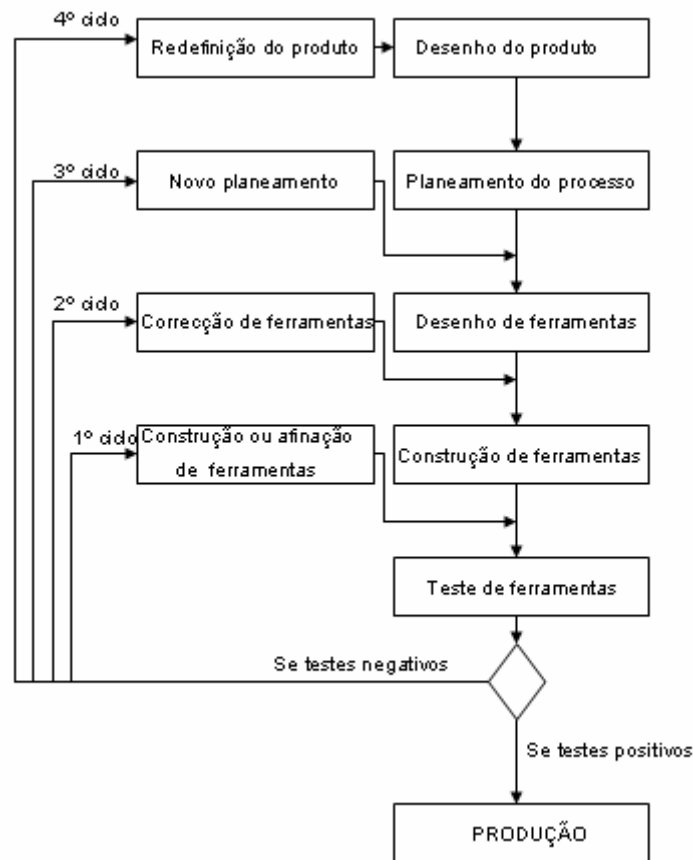


**Figura 10 – Sequência de etapas de forjamento de um componente, modeladas por elementos finitos [Park 2006]**

Contudo, ainda se pode evoluir na aproximação da simulação ao mundo experimental. Actualmente, continua a fazer sentido estudar intensivamente o comportamento mecânico dos materiais, as leis que os traduzem e otimizar o código dos programas de simulação existentes. São também bastante actuais como temas de investigação os contactos entre ferramentas e esboços e a modelação desses contactos [Teixeira2005].

Assumindo a posição de destaque que a simulação numérica merece no desenvolvimento de ferramentas para conformação plástica, podem comparar-se os métodos utilizados no projecto de ferramentas com e sem recurso à simulação.

Na figura 11 é apresentado um organigrama do esquema convencional de desenvolvimento de ferramentas sem recorrer à simulação.



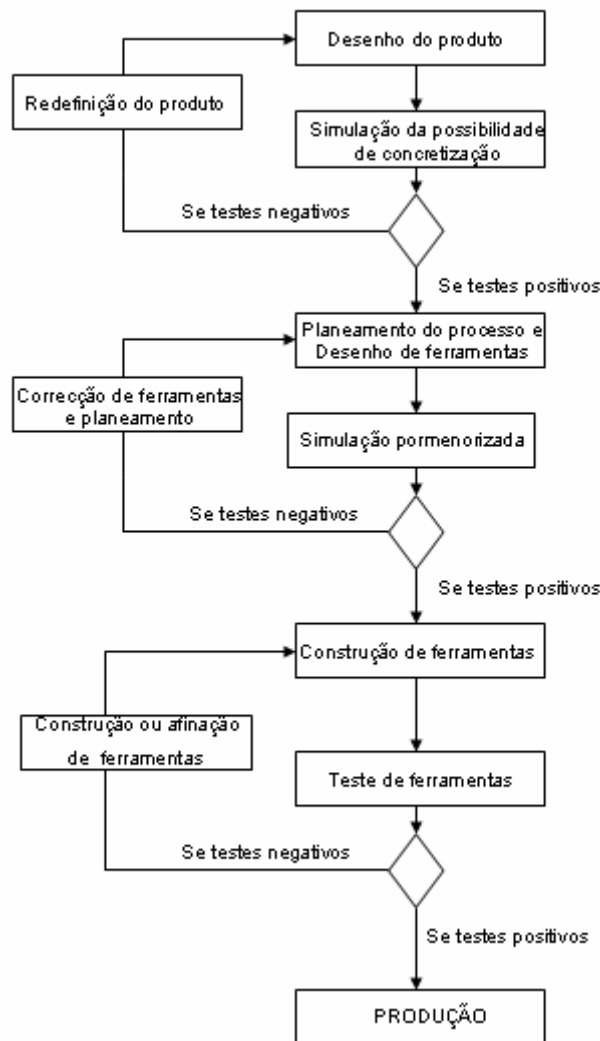
**Figura 11 – Organigrama de desenvolvimento de ferramentas para conformação plástica sem recorrer a métodos de simulação [Tisza 2007]**

Analisando a figura 11 e partindo do princípio que quanto mais se avança no sentido da produção maior é o custo do fracasso, podemos classificar este sistema como um sistema de risco bastante elevado. Esta situação pode quase ser encarada como uma arte, em que o artista só tem verdadeira consciência do produto que desenvolve no seu estágio final.

Imaginando que há uma falha no desenho do produto, far-se-ão pelo menos quatro testes de ferramentas até se voltar a analisar este desenho de produto. Esta situação deposita uma enorme carga de responsabilidade nos primeiros estágios de desenvolvimento e acarreta um custo potencial elevadíssimo.

Para evitar despesas que reduzam o retorno financeiro de um projecto pode recorrer-se à modelação numérica. Este recurso à modelação numérica permite utilizar um método de desenvolvimento com testes virtuais no final de cada etapa de desenvolvimento.

Apresenta-se na figura 12 uma proposta de esquema de desenvolvimento de ferramentas que recorrendo à simulação numérica, reduz a amplitude dos ciclos iterativos de estudo, e conseqüentemente o risco económico de cada ciclo.



**Figura 12 – Organograma de desenvolvimento de ferramentas para conformação plástica recorrendo a métodos de simulação [Tisza 2007]**

Este esquema de desenvolvimento apresenta-se muito mais “seguro” que o anterior, pois cada etapa de desenvolvimento cria uma barreira à passagem de informações erradas para a etapa seguinte. Contudo, não é impossível que um projecto passe uma destas barreiras com problemas, mas a probabilidade de um erro passar os dois degraus até ao teste experimental é bastante mais reduzida. É ainda importante referir que a simulação não substitui a experiência nem o conhecimento empírico, apenas reduz os custos de aplicação deste conhecimento e facilita o acesso a resultados virtuais. Estes resultados têm como principal vantagem o facto de serem atingidos com um investimento que representa apenas tempo de trabalho e aquisição de *software* / *hardware*.

Todas estas potencialidades reforçam a posição cada vez mais sólida da simulação no mundo do desenvolvimento de produto.

## 1.4.2 Formulação dos programas de elementos finitos

A simulação numérica de processos de deformação plástica é uma tarefa complexa. Uma das principais razões para esta complexidade é a existência de grandes não-linearidades, característica destes processos. Essas não-linearidades são devidas a três razões principais. A primeira é a não-linearidade do comportamento cinemático devido aos grandes deslocamentos, grandes rotações e grandes deformações. A segunda é a não-linearidade do comportamento constitutivo do material, devido à característica não elástica das deformações. A terceira é a não-linearidade característica das fronteiras, devido à interação (contacto e atrito) produzida entre corpos ao longo de superfícies não conhecidas "a priori" que mudam durante o processo. Todas estas dificuldades tornam a análise numérica dos processos de conformação plástica uma tarefa complexa e com grande custo computacional. Esta realidade mantém-se bastante pertinente na actualidade.

A dificuldade inerente à simulação destes processos e o tipo de resultados pretendidos tem feito com que o desenvolvimento de software aplicado a esta área tenha vindo a seguir vários caminhos e metodologias. De entre as várias possibilidades que se podem escolher para distinguir os programas de simulação, a que faz uma abordagem mais genérica parece ser a que distingue o tipo de equação de equilíbrio usada e o tipo de integração no tempo realizada [Makinouchi 1992]. Assim, três diferentes formulações possíveis se podem encontrar: formulações estáticas implícitas, formulações dinâmicas explícitas e formulações estáticas explícitas.

A comparação das 3 formulações definidas anteriormente foi objecto da análise de Makinouchi [Makinouchi 1992] e é aqui sintetizada, de seguida.

A **formulação dinâmica** usa a equação de movimento de Cauchy como base da formulação dos elementos finitos. O equilíbrio dinâmico do corpo vem na forma:

$$\frac{\partial \underline{\sigma}}{\partial \underline{x}} + \rho \cdot \underline{b} = \rho \cdot \ddot{\underline{x}} \quad (1)$$

e a formulação fraca da equação de movimento é dada por:

$$\int_V \underline{\sigma} : \delta \underline{\varepsilon} \cdot dV + \int_V \rho \cdot \ddot{\underline{x}} \cdot \delta \underline{u} \cdot dV - \int_V \rho \cdot \underline{b} \cdot \delta \underline{u} \cdot dV - \int_S \underline{f} : \delta \underline{u} \cdot dS - \int_{S_c} \underline{f}_T : \delta \underline{u}_T \cdot dS = 0 \quad (2)$$

onde

- $\underline{\sigma}$  - tensão de Cauchy
- $\underline{b}$  - forças de corpo por unidade de massa
- $\underline{f}$  - forças de superfície por unidade de área
- $\underline{f}_T$  - forças de atrito por unidade de área de contacto
- $\underline{x}$  - posição

$\rho$  - massa

$\delta \tilde{u}$  - deslocamento virtual

$\delta \tilde{u}_T$  - deslocamento virtual na superfície de contacto

$$\delta \tilde{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} \right)^T \right\}$$

( ) significa que o termo ( ) é um vector ou tensor.

A Eq.(2) pode ser escrita na forma dos elementos finitos como:

$$\underline{P} + M \cdot \ddot{\underline{u}} - \underline{F} - \underline{F}_c = 0 \quad , \quad (3)$$

onde

$$\underline{P} = \int_V B^T \cdot \underline{\sigma} \cdot dV \quad \text{é o vector das forças internas}$$

$$\underline{F} = \int_V \rho \cdot N^T \cdot \underline{b} \cdot dV + \int_S N^T \cdot \underline{f} \cdot dS \quad \text{é força de corpo + força de superfície}$$

$$\underline{F}_c = \int_{S_c} N^T \cdot \underline{f}_T \cdot dS \quad \text{é a força de contacto devida ao atrito}$$

$$M = \int_V \rho \cdot N^T \cdot N \cdot dV \quad \text{é a matriz de massa (matriz diagonal)}$$

$$\underline{u} \quad \text{é o deslocamento nodal}$$

A solução da Eq.(3) é obtida usando um esquema explícito de integração no tempo, isto é, sabendo a solução na etapa  $n$ , a solução na etapa  $n + 1$  é calculada por:

$$\frac{M}{\Delta t^2} \cdot \underline{u}_{n+1} = \underline{F}_n + \underline{F}_{Cn} - \underline{P}_n + \frac{M}{\Delta t^2} \cdot (2 \cdot \underline{u}_n - \underline{u}_{n-1}) \quad (4)$$

onde  $\Delta t$  é o incremento de tempo. Para a estabilidade da solução,  $\Delta t$  deve ser limitado dentro do incremento:

$$\Delta t = \frac{L_{cr}}{c} \quad , \quad (5)$$

$L_{cr}$  sendo o comprimento mínimo do lado de um elemento de casca

$c$  sendo a velocidade do som no material.

De modo a obter o estado de equilíbrio estático a partir do equilíbrio dinâmico, em muitos dos programas dinâmicos explícitos introduzem um termo artificial de amortecimento  $C \cdot \dot{\underline{u}}$  na Eq.(3):

$$\underline{P} + M \cdot \ddot{\underline{u}} + C \cdot \dot{\underline{u}} - \underline{F} - \underline{F}_c = 0 \quad (6)$$

No caso da **formulação estática** o termo de inércia não existe na equação de movimento de Cauchy, Eq.(1), obtendo-se portanto:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} + \rho \cdot b = 0 \quad (7)$$

Na **formulação estática implícita** a peça estará em equilíbrio na etapa  $n$  e portanto:

$$P_{\sim n} - F_{\sim n} - F_{\mathcal{C} \sim n} = 0 \quad (8)$$

Em seguida temos de encontrar o incremento de deslocamento  $\Delta u_{\sim} = x_{\sim n+1} - x_{\sim n}$ , que irá satisfazer o equilíbrio na etapa seguinte  $n + 1$

$$P_{\sim n+1} - F_{\sim n+1} - F_{\mathcal{C} \sim n+1} = 0 \quad (9)$$

De modo a encontrar a solução  $\Delta u_{\sim}$  que satisfaz a Eq.(9), a equação linearizada

$$K^i \cdot d u_{\sim}^{i+1} = R^i \quad (10)$$

é resolvida iterativamente até que o resíduo

$$R^i = P^i - F^i - F_{\mathcal{C}}^i \quad (11)$$

na iteração  $i$  se torne muito pequeno, isto é,  $|R^i| < \text{Tolerância}$ .

$K^i$ , na Eq.(10), representa a matriz de rigidez tangente para a iteração  $i$ .

No caso da **formulação estática explícita**, a forma incremental da Eq.(8),

$$\Delta P_{\sim} - \Delta F_{\sim} - \Delta F_{\mathcal{C}} = 0 \quad (12)$$

é resolvida explicitamente para o incremento de deslocamento  $\Delta u_{\sim}$  sem iteração.

Significa que a equação linear

$$K \cdot \Delta u_{\sim} = \Delta F + \Delta F_{\mathcal{C}} \quad (13)$$

fornece a solução.

$K$ , na Eq.(13), representa a matriz tangente.

De modo a manter uma relação linear durante a etapa de cálculo e manter a força residual muito pequena, é necessário:

- limitar o incremento de tensão, incremento de deformação e incremento de rotação dentro de pequenos valores;
- manter o estado de deformação (elástico ou plástico) inalterado dentro do incremento;
- manter as condições de contacto e atrito inalteradas dentro do incremento.

Cada uma destas 3 formulações tem as suas próprias virtudes e os seus pontos fracos.

Quanto à formulação dinâmica explícita, tendo como uma das características principais a utilização de uma matriz diagonal, prima pela capacidade de executar a análise de uma forma, a nível de cálculo, muito mais simplista. Esta formulação tem o seu principal revés na instabilidade e esta instabilidade depende directamente do intervalo de tempo associado a cada incremento. Assim é indispensável manter o incremento temporal em valores bastante reduzidos. Por outro lado, em problemas de conformação plástica, sendo um dos parâmetros essenciais o contacto, este valor de incremento temporal será à partida baixo. É aqui que o método explícito ganha mais adeptos, ou seja, se para um dado problema temos à partida um incremento reduzido, é preferível utilizar o sistema de cálculo que se apresente mais célere. É também importante manter algum cepticismo relativamente aos resultados de uma análise explícita, visto que as referidas matrizes diagonais são aproximações e podem de alguma forma afastar a análise da semelhança com a realidade que pretendem representar.

No caso da formulação estática implícita, o principal problema quando aplicado à simulação de conformação plástica, é como obter convergência para o ciclo iterativo, Eq.(9), perante a instabilidade permanente do contacto. De facto, durante o ciclo iterativo, o contacto varia constantemente, afectando fortemente a evolução da análise. Por isso a formulação estática implícita não pode providenciar um método de cálculo robusto para a análise da conformação plástica.

A formulação estática explícita tem duas importantes vantagens: a robustez e a correcta determinação da distribuição das tensões. A robustez é devida ao facto de na solução, a Eq.(13) ser resolvida mantendo fixas as condições fronteira dentro de cada intervalo de tempo e a mudança no contacto ser tida em conta apenas na etapa seguinte. Assim, frequentes mudanças no contacto não criam problemas de convergência. Quanto à distribuição das tensões, o equilíbrio estático Eq.(8) é sempre satisfeito se limitarmos o intervalo de tempo a valores pequenos, obtendo portanto uma determinação da distribuição das tensões correcta. Contudo existe uma desvantagem inevitável na formulação estática explícita. De modo a limitar o desequilíbrio das forças a valores pequenos é necessário reduzir o incremento de tempo, originando um maior número de etapas (maior tempo de cálculo) para a simulação[Santos 1993].

A tabela 1 resume a comparação destas três formulações relativamente aos tópicos principais e fundamentais

**Tabela 1 – Comparação das diversas formulações**

ITEM \ INTEGRAÇÃO NO TEMPO	ESTÁTICA		DINÂMICA EXPLÍCITA
	IMPLICITA	EXPLÍCITA	
EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO	Equilíbrio quasi-estático		Equilíbrio dinâmico
ESTRUTURA M.E.F.	Uso de matriz de rigidez		Uso de matrizes de massa diagonais por elemento
ESTABILIDADE DA SOLUÇÃO	Por vezes convergência não pode ser obtida	Estável	Estável
TAMANHO DA ETAPA INCREMENTAL	Grande	Pequena	Muito pequena
TEMPO CPU PARA CADA ETAPA INCREMENTAL	Longo	Médio	Curto
NO. TOTAL DAS ETAPAS INCREMENTAIS PARA A COMPLETA SIMULAÇÃO DO COMPONENTE	Algumas centenas	Alguns milhares	Algumas dezenas de milhar
RIGOR DA DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES	Rigorosa	Rigorosa	Pobre

Na tese que se apresenta será utilizada a formulação dinâmica explícita, presente em vários programas comerciais com capacidade para simular processos de conformação plástica. Os programas de elementos finitos utilizados no decurso desta tese foram o ABAQUS/Explicit e o ELFEN Explicit.

## **2 BIBLIOTECA DE COMPONENTES PARA OPTIMIZAÇÃO DE FABRICO**

A tese que aqui se apresenta tem como base de trabalho uma biblioteca de componentes que representam um grande interesse comercial para a ETMA. Contudo, estes componentes apresentam desafios de projecto e fabrico.

Neste capítulo apresentam-se os componentes que fazem parte desta biblioteca. Estes componentes serão caracterizados pelo seu desenho e por uma breve descrição que inclui pormenores como: o objectivo de utilização, o material de que serão fabricados e uma previsão das dificuldades associadas à realização do componente.

No âmbito desta tese, serão analisados dois dos componentes apresentados, nomeadamente o Parafuso de Cabeça Especial M8x10,4 e o Eixo Lateral de Fixação para Travões.

## 2.1 Parafuso Cabeça Especial M8x10,4

O Parafuso Cabeça Especial M8x10,4 é um parafuso de segurança para aplicação em componentes eléctricos da marca General Electrics. O material a utilizar é um aço de construção para deformação plástica a frio, que é comercialmente denominado “Aço cq15” (desenho técnico completo ver Anexo A).

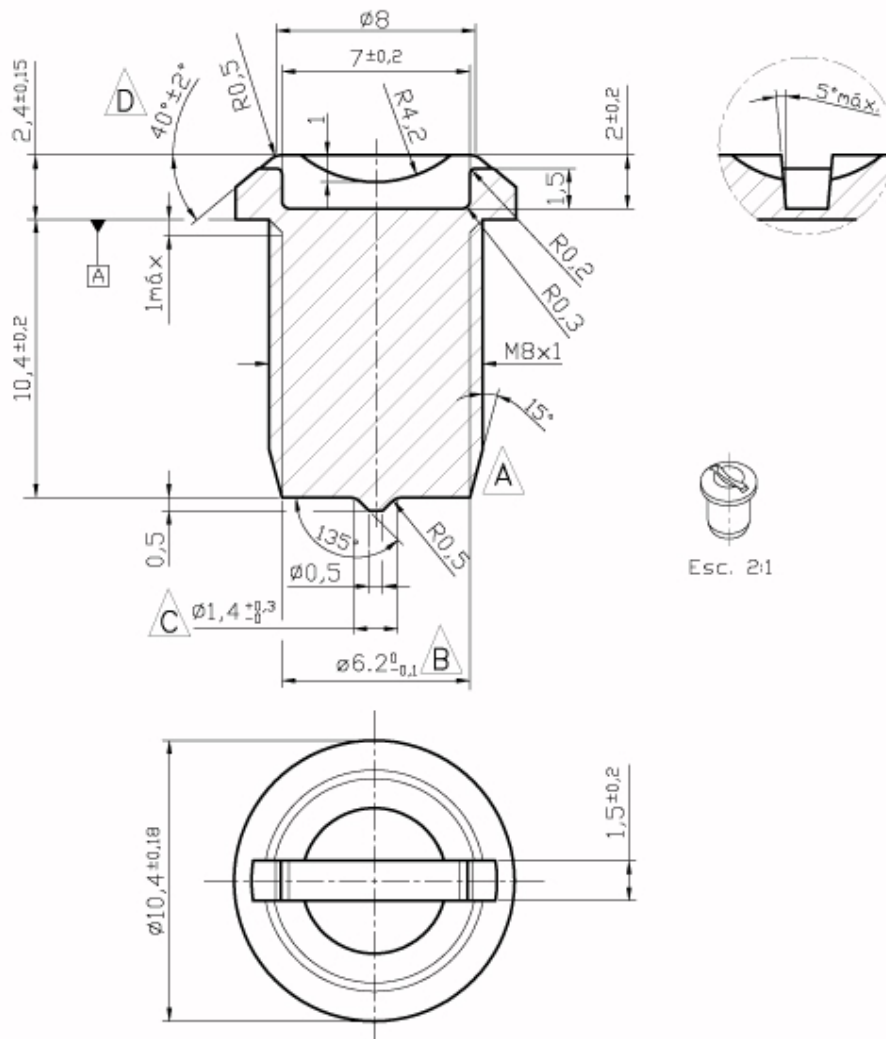


Figura 13 – Desenho do Parafuso Cabeça especial M8 x 10,4

Um dos pormenores geométricos que se destaca neste componente é sem dúvida o bico inferior e este detalhe tem uma grande importância no nível funcional do componente. O parafuso foi pensado com o intuito de comprimir uma placa de suporte contra uma outra e no intervalo entre as placas há um conjunto de fios eléctricos. Este bico assegura que se algum dos fios for atingido pelo parafuso, não será cortado, ou pelo menos, não completamente.

Este componente, anteriormente a este estudo de simulação, tinha sido abordado pela empresa numa filosofia de encabeçamento. Contudo, o pormenor do bico inferior mostrou-se difícil de obter. Nesta abordagem, a cabeça, foi considerada exequível em duas etapas, deixando o referido pormenor inferior para posterior maquinagem. Esta solução não foi aceite como mais do que temporária, já que o processo de maquinagem, por simples que seja, faz com que o processo perca muita da competitividade atingida pelos processos de conformação plástica. Assim, considera-se o bico como o maior desafio na fabricação do componente. É importante referir que no equipamento recém-adquirido se prevê que seja possível a realização deste componente e foi até encomendado, com o equipamento, o conjunto de ferramentas que realizará o parafuso. Este facto não retira importância ao projecto de simulação, uma vez que pode permitir a validação da simulação. Estando esta validada seria uma boa garantia para nova utilização da simulação noutros componentes.

## ***2.2 Eixo Lateral de Fixação para Travões***

O Eixo lateral de fixação para travões de automóvel, da marca Robert Bosch, é um componente de fixação por geometria. Para este fim, utiliza grandes variações de secção transversal e apresenta uma passagem de uma secção circular para uma secção quadrangular (desenho técnico completo ver Anexo B).

A característica mais particular deste componente é a variação de uma geometria de secção circular para uma quadrangular com os cantos arredondados. Esta característica tem uma importância funcional elevada, pois é esta geometria que impede o componente fixado no eixo de rodar sobre si próprio.

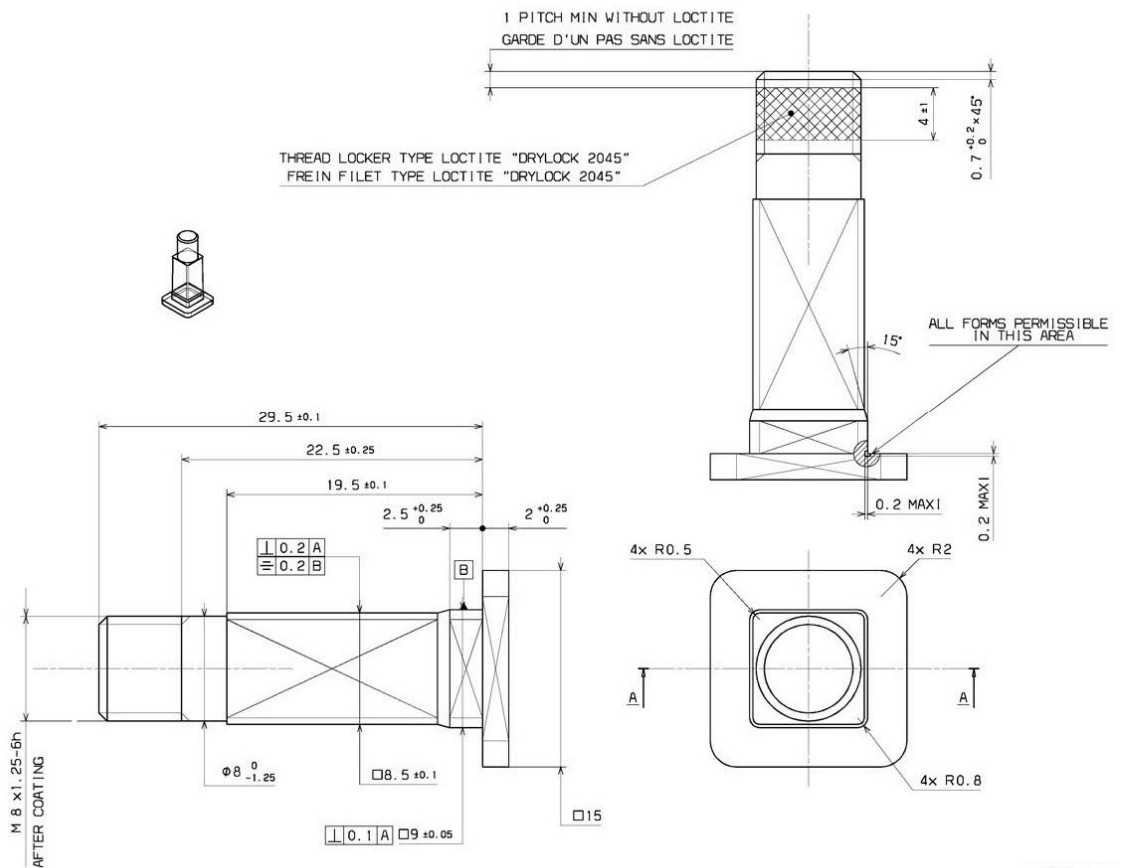


Figura 14 – Desenho do Eixo Lateral de Fixação para Travões

Relativamente ao desenvolvimento do projecto de fabricação deve referir-se que o equipamento disponível para realizar este componente tem uma limitação a nível das dimensões do esboço inicial, ou seja, o diâmetro do esboço inicial não pode ultrapassar os 8 mm. Esta peça, cujo projecto ainda não foi iniciado pela empresa, dá a entender que criará bastante dificuldade no enchimento das secções quadradas. Esta previsão de dificuldade tem a sua origem nas reduzidas dimensões dos raios de concordância das regiões de secção quadrangular quando comparadas com o comprimento do lado do mesmo quadrado. Partindo de um esboço inicial de secção circular, esta transição exige deformações muito elevadas, que despertam suspeitas quanto à possibilidade do projecto ser viável na empresa. Outra situação que deve ser levada em conta é a transição da zona circular para a zona quadrada. Quanto à escolha do material, foi sugerido pela ETMA utilizar o mesmo material do parafuso M8, Aço cq15.

### 2.3 Pino de terra francês 4,8x23

O Pino de terra francês (cliente: Alombard) é um componente que permite a ligação à terra nas tomadas da rede eléctrica francesa. Este componente é um componente de fabrico em grandes séries e com um mercado que se prevê duradouro (desenho técnico completo ver Anexo C).

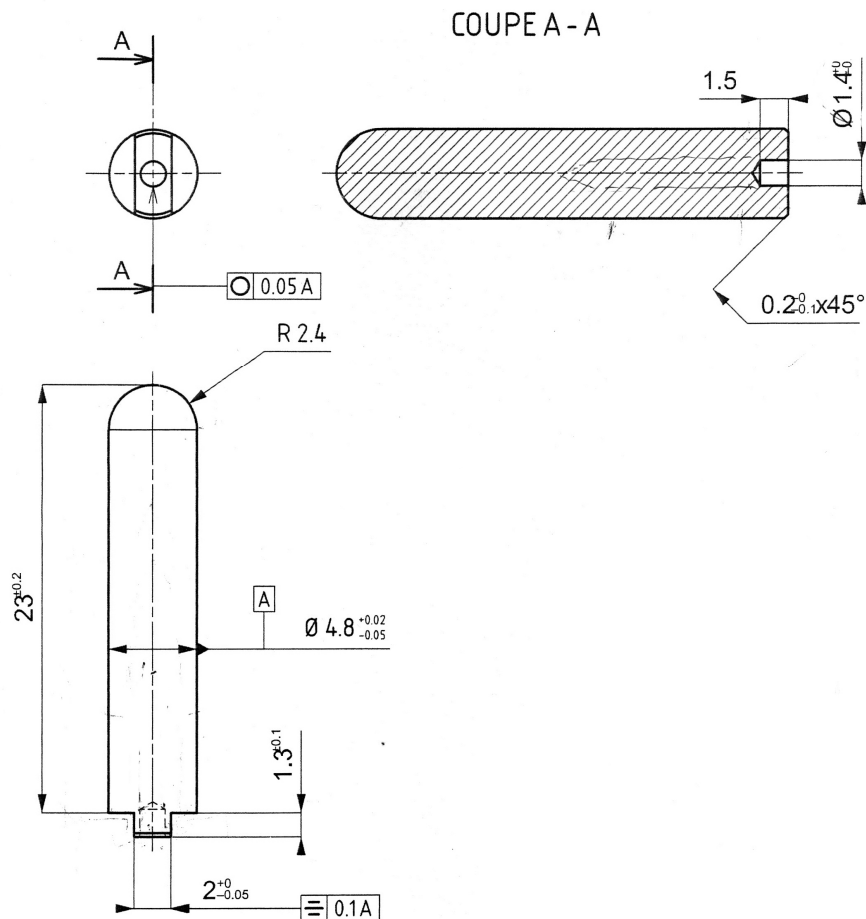


Figura 15 – Desenho do Pino de terra francês 4,8x23

Este componente é fabricado a partir de latão (CuZn40Pb3), material este que está bastante inflacionado nos mercados nacional e internacionais. Assim, em virtude das grandes quantidades de produção previstas para o componente seria bastante interessante poupar algum material em cada peça. Partindo deste pressuposto, o objectivo traçado seria não só o fabrico do componente, mas também a possibilidade de alongar o furo na parte posterior. Esta alteração faria com que o componente perdesse algum peso. É de prever alguma dificuldade nesta operação devido à distância extremamente curta que separa a face interior do furo traseiro, da parede do pormenor facejado que o suporta (0,6 mm).

## 2.4 Parafuso de cabeça cilíndrica com fenda M4x7,3

O parafuso de cabeça cilíndrica com fenda M4x7,3 é um componente utilizado em disjuntores eléctricos para aperto e regulação (desenho técnico completo ver Anexo D).

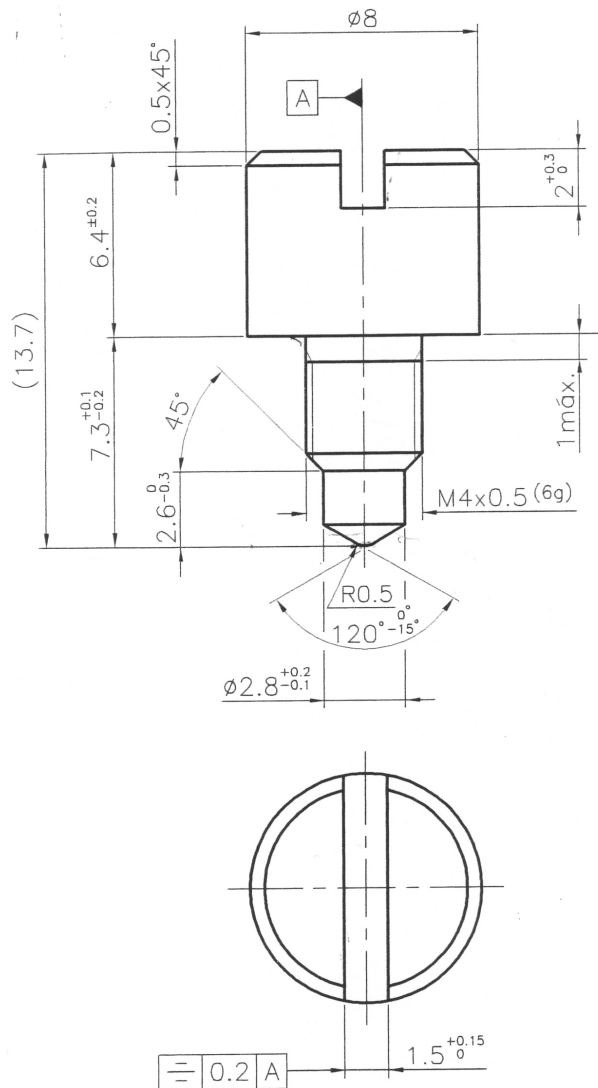


Figura 16 – desenho do Parafuso de cabeça cilíndrica com fenda M4 x 7,3

O cliente propõe que este componente seja fabricado em latão CuZn39Pb3 mas para ser obtido por forjamento, o material deveria ser substituído por um outro tipo de latão (CuZn40). Após fabrico deve ser sujeito a uma operação de acabamento superficial de cobreamento ou prateamento para aumentar a condutividade. Quanto à aplicabilidade de forjamento, a ETMA tem estudado um plano para alteração do desenho e a maior dificuldade que se apresenta é conseguir ao mesmo tempo variações de secção tão grandes e formar o bico inferior.

## 2.5 Raccord AKE 22 36 de 25mm

A última proposta de componente para optimização de fabrico é uma peça fabricada não por conformação plástica em massa, mas sim por embutidura (conformação plástica de chapa). O Raccord AKE 22 36 de 25mm é um componente idealizado para cravar nas extremidades de tubos hidráulicos e permitir a ligação de outros componentes (desenho técnico completo ver Anexo E).

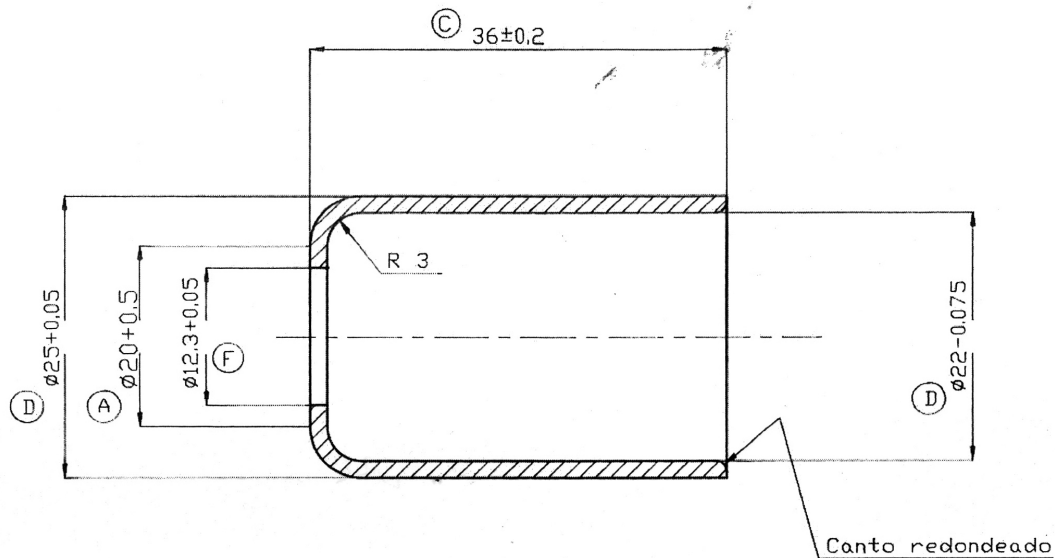


Figura 17 – Desenho do Raccord 25mm

Este componente deve ser fabricado a partir de um aço de baixo carbono. Este é um componente que a ETMA fabricaria por maquinagem, opção esta que desperdiçando boa parte do material utilizado no processo, representaria um investimento significativo. O desafio proposto é a fabricação do componente por embutidura, poupando muito material e aumentando a competitividade do produto. Este processo é considerado um desafio devido à relação dimensional entre o diâmetro do componente e a profundidade a que deve ser embutido. Num possível estudo deste componente deve ser feita para além da simulação do processo de embutidura a simulação do retorno elástico.

## **3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL A USAR: AÇO cq15**

### **3.1 Introdução**

No âmbito da simulação de processos de conformação plástica pelo método dos elementos finitos, surge a necessidade de uma caracterização mecânica do material utilizado no fabrico dos componentes. Neste caso, os componentes são parafusos fabricados a partir de arame de aço para conformação plástica a frio, cujo material tem a designação comercial cq15. A caracterização do material é um factor de importante para que seja possível estabelecer um paralelo entre a simulação numérica e a realidade experimental. Visto que o fornecedor do material não dispunha dos dados necessários, efectuou-se um ensaio de tracção partindo do material de um dos lotes utilizados na produção.

O ensaio de tracção é um dos ensaios mais universais pela facilidade de execução e standardização de procedimentos e resultados. O ensaio consiste em solicitar um provete de geometria adequada com uma força tractiva uniaxial, continuamente crescente, efectuando-se em paralelo o registo da força e do alongamento sofrido por um troço de referência do provete. Contudo, a análise convencional de um ensaio de tracção, refere todas as equações à secção inicial do provete (secção esta que varia constantemente) e não representa as características mecânicas reais do material. Esta característica do ensaio torna necessário que nesta análise haja preocupação com a curva real de tensão vs deformação. Na realidade, a área da secção transversal do provete diminui durante o ensaio, fazendo a força baixar a partir do momento em que se inicia a estrição. Este abaixamento da força, quando relacionado com a área inicial faz baixar a tensão. Na realidade, o material continua a encruar até ao momento da rotura, de modo que a tensão real aumenta. Na sequência destes factos torna-se necessário corrigir o gráfico convencional do ensaio de tracção numa curva real [Davim1992]. A correcção da curva convencional de um ensaio de tracção pode ser feita pelas expressões apresentadas na secção de cálculos.

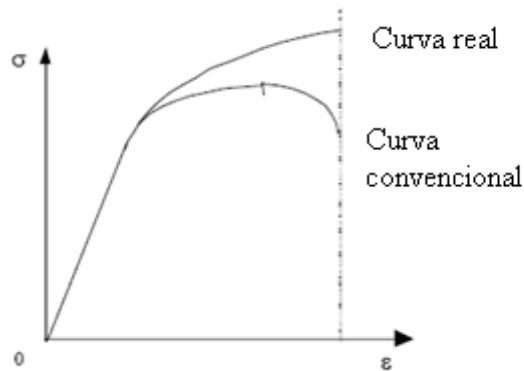


Figura 18 – Curvas representativas de um ensaio de tracção: real e convencional

Para a realização deste ensaio foram programadas pelo menos duas provas, uma delas para verificação da repetibilidade dos resultados, visto que sendo o diâmetro dos provetes bastante reduzido havia risco de escorregamento destes provetes nas mandíbulas. Faz também parte deste ensaio de tracção uma terceira fase para aferição da carga correspondente à deformação plástica uniforme, que se caracteriza por ser a deformação plástica máxima até ao início da estricção.

Os dados considerados fundamentais para a modelação do material no programa de simulação foram os seguintes:

- Tensão limite de elasticidade -  $R_{p0,2}$ ;
- Tensão de rotura –  $R_m$ ;
- Sequência de pontos da curva “Deformação real vs Tensão real”.

Para a determinação destes parâmetros, seguiu-se o procedimento descrito seguidamente:

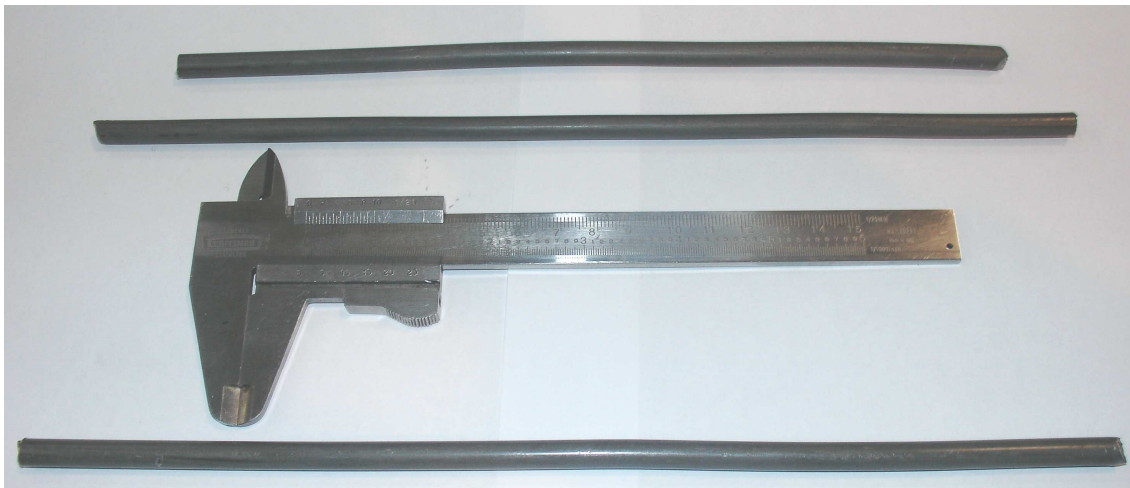
- Realização do ensaio experimental para obtenção do gráfico “Força vs deslocamento”;
- Cálculo da tensão limite de elasticidade convencional –  $R_{p0,2}$ ;
- Cálculo de tensões convencionais para várias deformações do domínio plástico;
- Determinação experimental do ponto de tensão máxima convencional e respectiva deformação plástica convencional (deformação uniforme plástica convencional);
- Transformações dos valores convencionais em valores reais;
- Criação do gráfico “Tensões reais vs Deformações reais” no formato log-log;
- Determinação dos parâmetros  $n$  (coeficiente de encruamento) e  $k$  (coeficiente de resistência) através do gráfico anterior;
- Criação de um gráfico “Tensões reais vs Deformações reais”, partindo da equação  $\sigma = k \cdot \epsilon^n$ .

Deste último gráfico serão retirados os valores que serão utilizados na definição do encruamento do material. São estes valores que permitem definir a forma como o material reage às forças a que o esboço estará sujeito durante a sua deformação plástica.

## **3.2 Ensaio de tracção**

Antes de proceder aos ensaios, foi necessário transformar as amostras cedidas pela ETMA em amostras capazes de serem sujeitas a um ensaio de tracção, visto que eram constituídas por um pedaço de arame (fornecido enrolado em bobinas) e seria necessário que os provetes fossem o mais rectos possíveis e com dimensões o mais parecidas possíveis. Assim, dividiu-se o arame em algumas secções de dimensões aproximadas e manualmente com a ajuda de um torno de mesa endireitou-se o arame.

Cada provete foi marcado com as zonas válidas de ensaio de comprimento igual a 75 mm. O transdutor de deslocamento por sua vez tem um comprimento de referência de 50 mm.



**Figura 19 – Provetes utilizados nos ensaios de tracção**

### **3.2.1 Procedimentos**

#### **3.2.1.1 Determinação do gráfico força vs deslocamento**

- Colocação do papel no rolo, onde será feito o registo gráfico.



**Figura 20 – Colocação do papel milimétrico no rolo onde será registado o gráfico Força vs Deslocamento**

- Montagem do provete nas mandíbulas da máquina de ensaio.



**Figura 21 – Montagem do provete nas amarras da máquina de ensaio de tracção**

- Montagem do transdutor de deslocamento no provete ( $L_0=50\text{mm}$ )



**Figura 22 – Transdutor de deslocamento montado no provete**

Durante o ensaio foi registada a força máxima atingida, e depois do início da estrição foi retirado o transdutor para evitar que este se danificasse no momento do colapso.

### **3.2.1.2 Determinação da carga máxima e deformação uniforme**

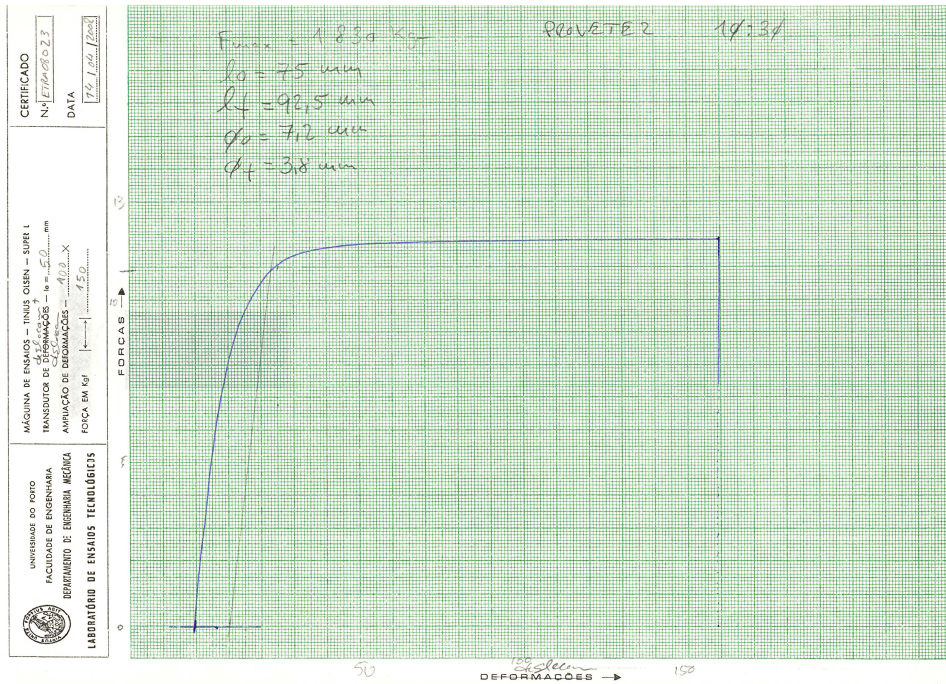
A máquina utilizada tem um mostrador que permite saber qual a força máxima aplicada durante o ensaio e qual a força aplicada no momento. Assim, visto saber-se que quando a força instantânea diminui de intensidade se passou o momento da rotura e se está no início da estrição, pára-se o ensaio e através da medição do provete podemos saber qual a deformação plástica uniforme.



**Figura 23 – Mostrador que permite determinar a força máxima**

### 3.2.2 Resultados

Os dois ensaios completos realizados apresentaram resultados muito semelhantes, pelo que só um será analisado. Apresenta-se de seguida o aspecto do gráfico, incluído no anexo 1.



**Figura 24 – Gráfico Força vs deslocamento obtido pelo ensaio de tracção**

Quanto às deformações plásticas uniformes, o resultado dimensional obtido foi o apresentado na tabela 2 e a força máxima foi considerada 1825 kgf.

**Tabela 2 – Deformações plásticas uniformes convencionais**

	Lo	Lf	deformação uniforme
	45,2	50,9	0,126
	29,1	32,7	0,124
	74,6	83,7	0,122
Não utilizada	75,0	85,2	0,136
Não utilizada	37,2	42,7	0,148
	37,0	41,7	0,127
Não utilizada	74,5	84,6	0,136
		média	0,125

### **3.3 Curva real Tensão vs Deformação**

#### **3.3.1 Cálculos efectuados**

Nesta secção foram realizados os cálculos necessários para transformar os resultados directos do ensaio de tracção numa curva de tensão real e deformação real. Os símbolos utilizados nas equações têm os seguintes significados:

- e – Deformação convencional;
- $\varepsilon$  – Deformação real;
- s – Tensão convencional;
- $\sigma$  – Tensão real;
- E – Modulo de Elasticidade;
- F – Força de tracção retirada do gráfico do ensaio;
- $A_0$  – Secção inicial do provete.

##### **3.3.1.1 Cálculo de tensões e deformações convencionais**

###### **Tensão limite de elasticidade 0,2%**

Graficamente, a 0,2% de deformação traçar uma recta paralela á da zona elástica do material, calcular a tensão convencional correspondente a esse ponto do gráfico.

###### **Deformações convencionais**

A equação utilizada para o cálculo das deformações convencionais foi a seguinte:

$$e = \text{deslocamento} / (l_0 \text{ transdutor} * \text{factor de escala})$$

Onde o factor de escala é o valor de ampliação a que está sujeito o eixo dos deslocamentos do gráfico retirado do ensaio. Neste ensaio, o valor utilizado foi de 100 vezes.

###### **Tensões convencionais**

$$s = F / A_0$$

**Tabela 3 – Transição dos valores retirados do gráfico do ensaio para valores convencionais de tensão e deformação**

Tensão e deformação plástica convencional			
Delta L	F (mm)	Def.total	Tens. (MPa)
30	11,35	0,006	418,2
40	11,7	0,008	431,0
50	11,85	0,010	436,6
60	11,9	0,012	438,4
70	11,9	0,014	438,4
80	11,9	0,016	438,4
90	11,9	0,018	438,4

### 3.3.1.2 Tensão de rotura e deformação uniforme

Do terceiro ensaio realizado pretende-se calcular a tensão convencional correspondente á força máxima aplicada durante o ensaio. Por outro lado, pretende-se determinar a deformação uniforme total do provete (elástica e plástica).

#### Deformação total correspondente ao momento da tensão de rotura

$$e_{total} = e_{plastica} + e_{elastica}$$

em que

$$e_{elastica} = S_{rotura\_convencional}/E$$

**Tabela 4 – Valores de deformação plástica medidos no provete 3, cálculo da deformação média das várias secções do provete, deformação total para um valor médio de deformação plástica e conversão para valor real de deformação**

	Lo	Lf	Deformação convencional plástica	Deformação convencional total	Deformação uniforme real
	45,2	50,9	0,126		
	29,1	32,7	0,124		
	74,6	83,7	0,122		
Não utilizada	75,0	85,2	0,136		
Não utilizada	37,2	42,7	0,148		
	37,0	41,7	0,127		
Não utilizada	74,5	84,6	0,136		
		média	0,125	0,1268	0,1194

### 3.3.1.3 Conversão de valores de tensão e deformação convencionais em reais

O valor apresentado na última coluna da tabela 4 já foi convertido de deformação convencional em deformação real. Apresentam-se seguidamente as equações utilizadas nesta conversão de deformação convencional em real e a que será utilizada na conversão da tensão convencional em real.

Equação da transformação de deformação convencional em deformação real:

$$\varepsilon = \ln(1+e)$$

Equação da transformação da tensão convencional em tensão real:

$$\sigma = s * (1+e)$$

**Tabela 5 – Conversão de valores convencionais para valores reais**

Tensão e deformação convencional		Tensão e deformação real	
Def.total	Tens. (MPa)	def.total real	tens. Real(MPa)
0,006	418,2	0,0060	420,7
0,008	431,0	0,0080	434,5
0,010	436,6	0,0100	440,9
0,012	438,4	0,0119	443,7
0,014	438,4	0,0139	444,6
0,016	438,4	0,0159	445,4
0,018	438,4	0,0178	446,3
Valores Análise uniforme		0,1194	501,8

### 3.3.1.4 Cálculo dos valores de coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (k) presentes na equação objectivo

$$\sigma = k * \varepsilon^n$$

Estes valores podem ser obtidos respectivamente pelo declive da recta e pela ordenada na origem (depois de reconvertida para a escala normal) da recta definida por um gráfico de escala logarítmica da Tensão real vs Deformação real.

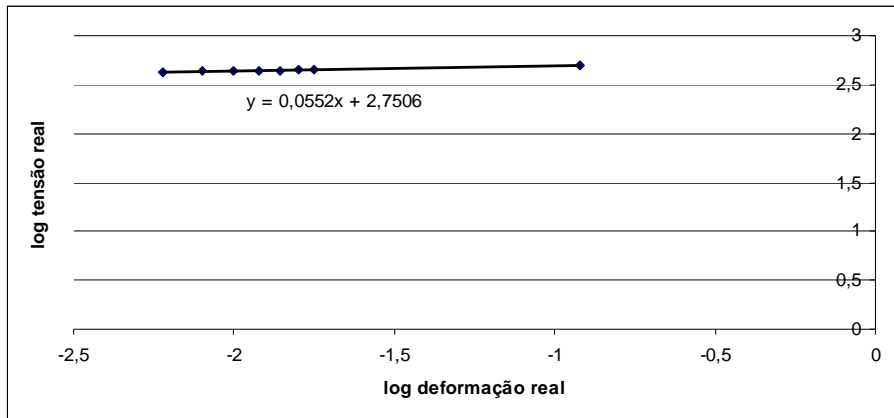


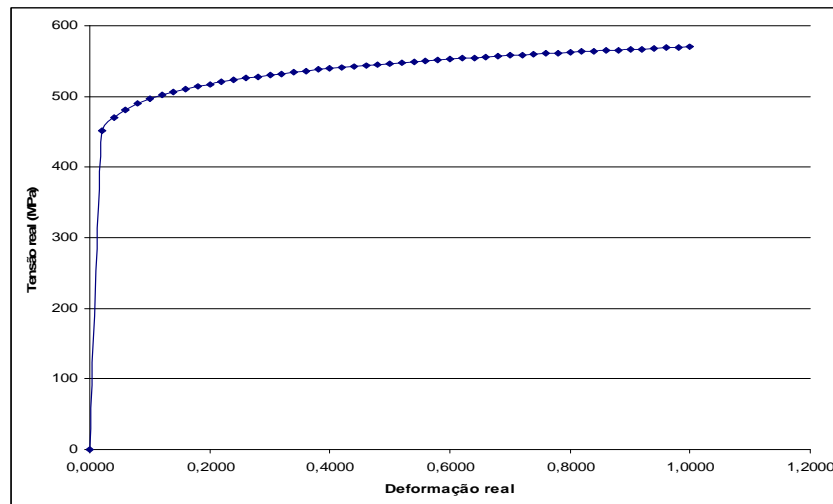
Figura 25 – Gráfico log-log de Tensão real vs Deformação real

Assim, sendo a recta descrita pela equação presente no gráfico, usam-se valores de  $n = 0.06$  e  $k = 10^{2,750} = 570$  (reconvertido para escala normal)

**3.3.1.5 Determinação da curva Tensão real VS Deformação real baseada na equação  $\sigma = k * \epsilon^n$  de coeficientes relativos ao material ensaiado previamente:**

Tabela 6 – Valores da curva Tensão real vs Deformação real baseada na equação  $\sigma = k * \epsilon^n$  de coeficientes relativos ao material ensaiado

$\epsilon$	$\sigma$ (Mpa)	$\epsilon$	$\sigma$ (Mpa)
0	397	0,52	565,72944
0,02	469,3265575	0,54	567,3932448
0,04	483,6095124	0,56	569,0120543
0,06	493,2386054	0,58	570,5886293
0,08	500,7130467	0,6	572,1254728
0,1	506,9081748	0,62	573,6248618
0,12	512,2436805	0,64	575,0888744
0,14	516,9563617	0,66	576,5194128
0,16	521,1941648	0,68	577,9182228
0,18	525,0562698	0,7	579,2869112
0,2	528,6126988	0,72	580,6269601
0,22	531,9148928	0,74	581,93974
0,24	535,0018532	0,76	583,2265208
0,26	537,903917	0,78	584,4884818
0,28	540,6451886	0,8	585,7267201
0,3	543,2451667	0,82	586,9422583
0,32	545,7198676	0,84	588,1360515
0,34	548,0826223	0,86	589,3089927
0,36	550,3446561	0,88	590,4619186
0,38	552,5155178	0,9	591,5956143
0,4	554,603404	0,92	592,7108174
0,42	556,6154076	0,94	593,8082219
0,44	558,5577111	0,96	594,8884816
0,46	560,4357393	0,98	595,9522135
0,48	562,2542804	1	597
0,5	564,0175839		



**Figura 26 – Curva Tensão real vs Deformação real baseada na equação  $\sigma = k * \epsilon^n$  de coeficientes relativos ao material ensaiado**

### **3.3.2 Valores utilizados para caracterizar o material na simulação**

Dos valores resultantes da curva Tensão real e Deformação real serão retirados alguns para caracterizar o material de modo a que este possa ser utilizado numa modelação para análise de elementos finitos. Para esta caracterização serão utilizados os valores apresentados na tabela 7.

**Tabela 7 – Valores a serem utilizados na modelação do material para a análise de elementos finitos**

Def. Real	Tensão real (Mpa)
0,0000	0
0,0200	450,7509549
0,0400	469,8924371
0,0600	481,4641231
0,0800	489,846777
0,1000	496,4492463
0,1200	501,9098634
0,1400	506,5735825
0,1600	510,6484931
0,1800	514,2700184
0,2000	517,5313412
0,3000	530,2761945
0,6000	552,7947766
1,0000	570

Fica assim definida na figura 27 a curva utilizada na caracterização do material no modelo de elementos finitos.

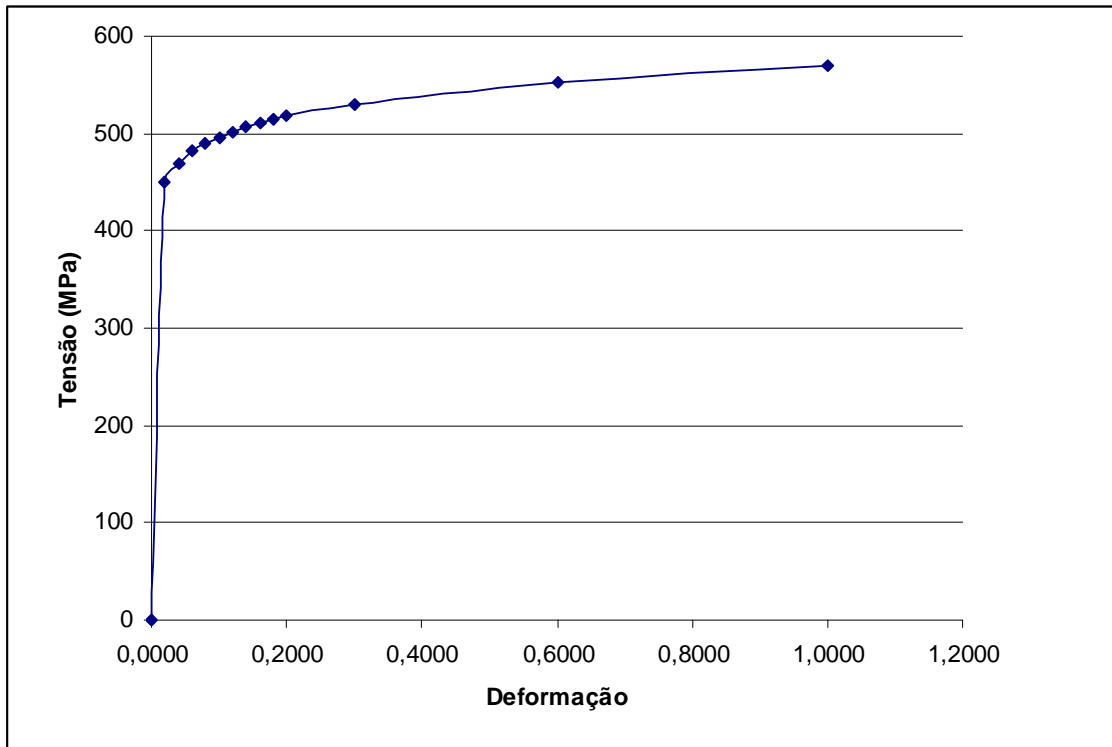


Figura 27 – Curva real de tensão vs deformação utilizada no modelo de elementos finitos

Finalmente, refere-se que nos modelos de simulação utilizados, o programa considera que para deformações superiores à definida na caracterização do material, neste caso, deformações superiores a 1, o material se comporta como um material perfeitamente plástico.

## **4 Aplicações Industriais**

O processo de desenvolvimento de ferramentas para o fabrico dos componentes estudados foi feito seguindo o esquema que recorre à simulação numérica, apresentado na figura 11, secção 1.4.1.

Para cada componente estudado foi numa primeira fase simulada a conformação numa só etapa. As principais preocupações nesta primeira abordagem foram o tamanho do esboço inicial, os deslocamentos prescritos nas ferramentas móveis e a escolha de uma malha adequada à análise. Após esta primeira análise e com base nos resultados obtidos, ensaiaram-se propostas em multi-etapas para o forjamento dos componentes.

Com base no resultado destas simulações, é necessário decidir se as ferramentas propostas devem ser construídas e experimentadas, ou se se deve procurar outra proposta que melhor satisfaça os requisitos de fabricação do componente.

Posto isto, neste capítulo serão apresentadas as simulações e os resultados das mesmas, bem como as alterações de ferramenta que estes resultados foram sugerindo.

Foram no decurso desta tese utilizados dois programas de simulação por elementos finitos, sendo estes, o ABAQUS/Explicit e o Elfen Explicit. A utilização de dois programas permite que se comparem os resultados, e notar a eventual interferência de diferentes formulações nos resultados obtidos. Assim, em alguns dos estudos apresentados neste capítulo faz-se um paralelo entre os dois programas.

### **4.1 Parafuso Cabeça Especial M8x10,4**

As diferentes análises que se apresentam de seguida dizem respeito a considerar uma ou mais etapas para realização do componente. Será dado principal destaque à forma como o material reage à formação do bico inferior e dos pormenores da cabeça especial (ver secção 2.1). Será também levada em conta a força de forjamento necessária à realização do componente.

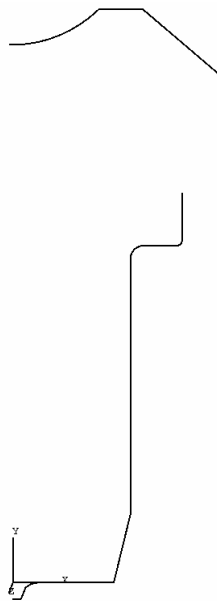
#### **4.1.1 Uma etapa de realização**

A primeira abordagem feita a este componente foi baseada na que já tinha sido feita pela empresa, isto é, uma matriz com a forma final e duas ferramentas móveis, preparador e acabador, que funcionariam como punções para a conformação da cabeça especial e forneceriam a compressão necessária à conformação dos pormenores geométricos do corpo do parafuso.

#### **4.1.1.1 Resultados com o programa ABAQUS**

O primeiro estudo numérico realizado relativamente a este problema foi um estudo em 2D, axissimétrico, no programa ABAQUS/Explicit. Neste estudo foi desprezada a formação da fenda, visto ser a única parte do componente que não se enquadra no estudo axissimétrico. Pretende-se de uma forma relativamente simples ganhar consciência dos valores de força de forjamento em causa, da forma como os problemas previstos afectam a conformação e finalmente de problemas que não foram previstos. Outro ponto bastante importante desta primeira simulação é aferir a dimensão do esboço inicial para que se obtenha um enchimento correcto dos volumes do componente.

Apresentam-se na figura 28 as ferramentas modeladas para esta simulação:



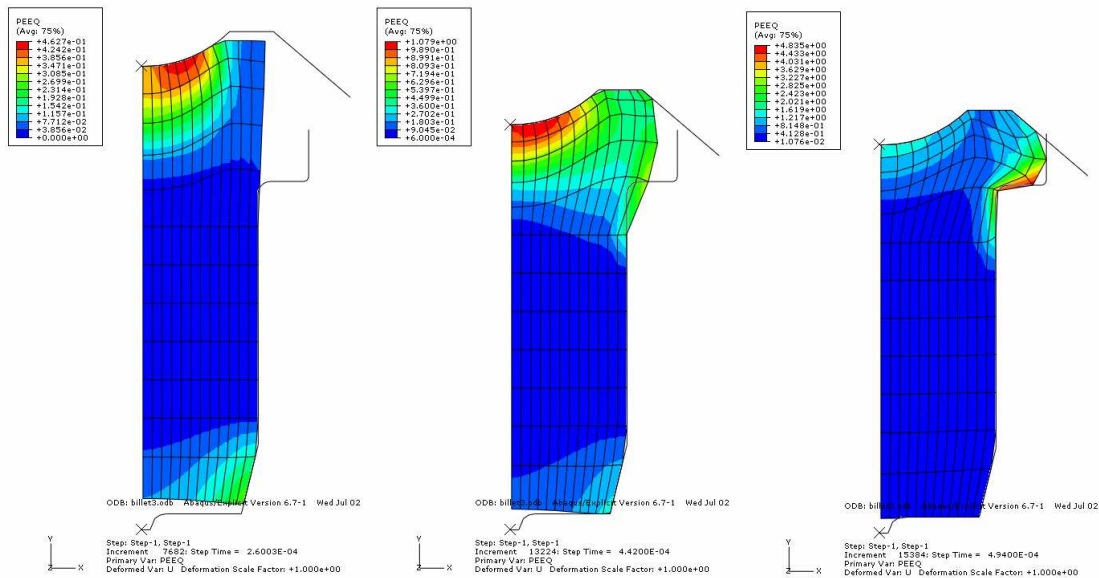
**Figura 28 – Ferramentas modeladas para simulação do fabrico do parafuso M8 em 1 etapa**

Há um conjunto de características a definir antes de apresentar o resultado da simulação. Estas características são importantes na definição de uma simulação e devem ser levadas em consideração na análise dos resultados.

Para esta simulação, o pré-processador utilizado foi o FEMAP e a análise foi realizada com ABAQUS/Explicit.

- Discretização do esboço inicial: malha adaptativa com 144 elementos do tipo CAX4R (axissimétricos) da biblioteca do Abaqus.
- Dimensões do esboço inicial: 14,4 mm.
- Velocidade das Ferramentas: 10 m/s.
- Coeficiente de atrito: 0,15.
- Ferramentas modeladas como rígidas; elementos do tipo RAX2, elementos rígidos, axissimétricos de 2 nós, da biblioteca do Abaqus
- Amplitude do movimento da ferramenta: 5,2 mm

Na figura 29 estão apresentados os resultados obtidos da análise, nomeadamente alguns *frames* com a distribuição das deformações.



**Figura 29 – Parte da sequencia da distribuição das deformações num ensaio de uma etapa para fabrico do parafuso M8; com uma malha grosseira**

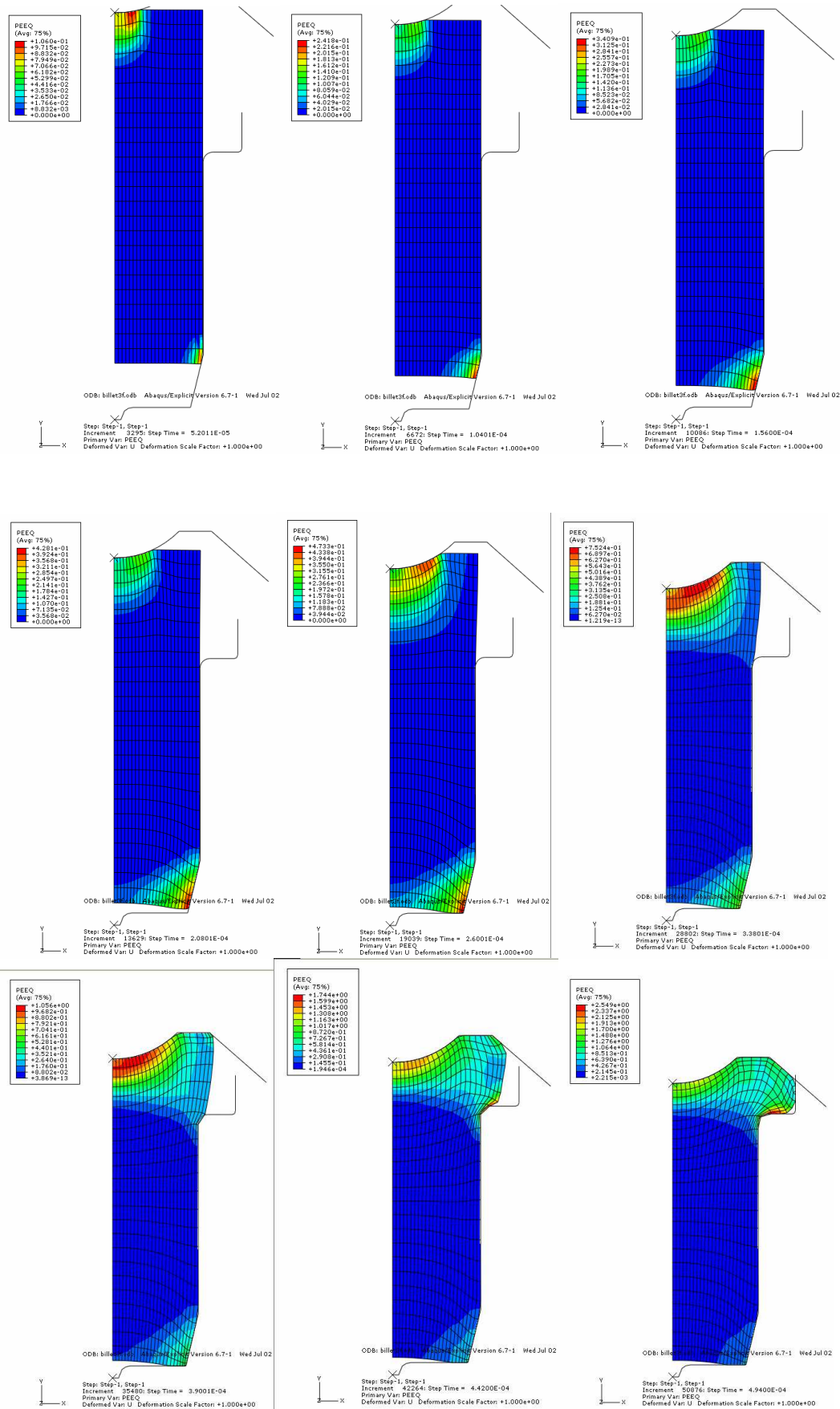
Da figura 29, apesar da malha ser bastante grosseira, nota-se a dificuldade associada à formação do bico inferior. Para além disso, para um preenchimento que não é satisfatório, a força de forjamento correspondente situa-se na casa dos 300 kN. Esta força quando comparada com a capacidade das prensas existentes na ETMA para este tipo de aplicação (2 etapas), excede-a em quase 3 vezes.

### **Refinamento da malha**

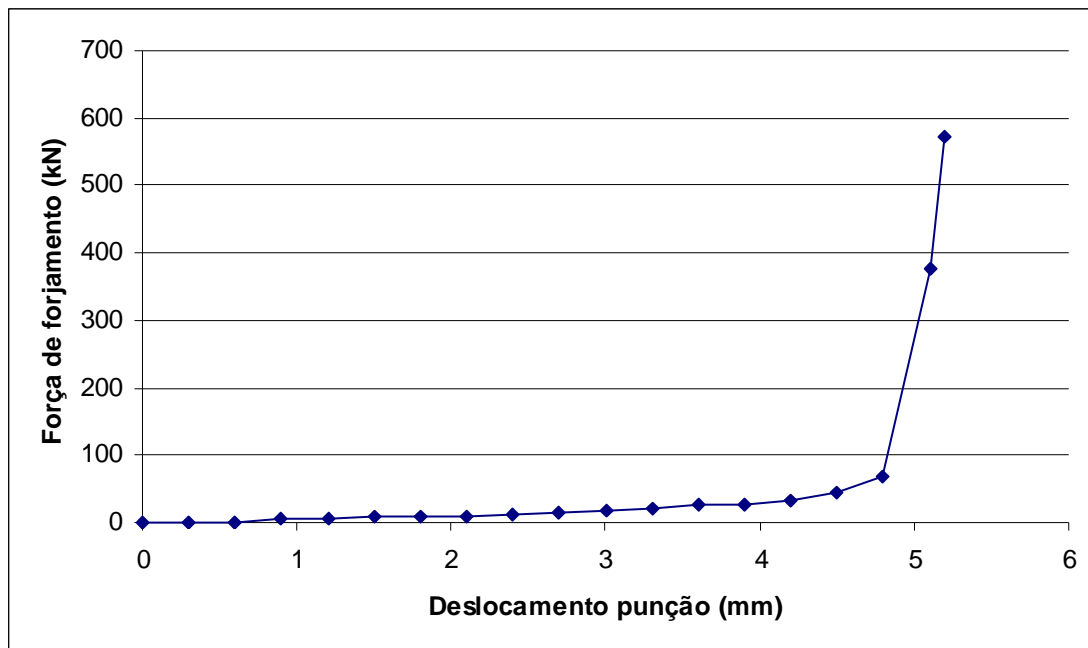
Por uma questão de comparação e afinação da simulação, repetiu-se a simulação anterior com uma malha bastante mais refinada. Com esta malha o esboço inicial passa a ser discretizado por 576 elementos.

Desta análise mais fina do problema, os resultados obtidos estão apresentados na figura 30:

## Forjamento de Parafusos em Multi-etapas Otimização do processo através da modelação numérica por elementos finitos



**Figura 30 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em uma etapa, do parafuso M8 (ABAQUS)**



**Figura 31 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento do punção para conformação em uma etapa do parafuso M8**

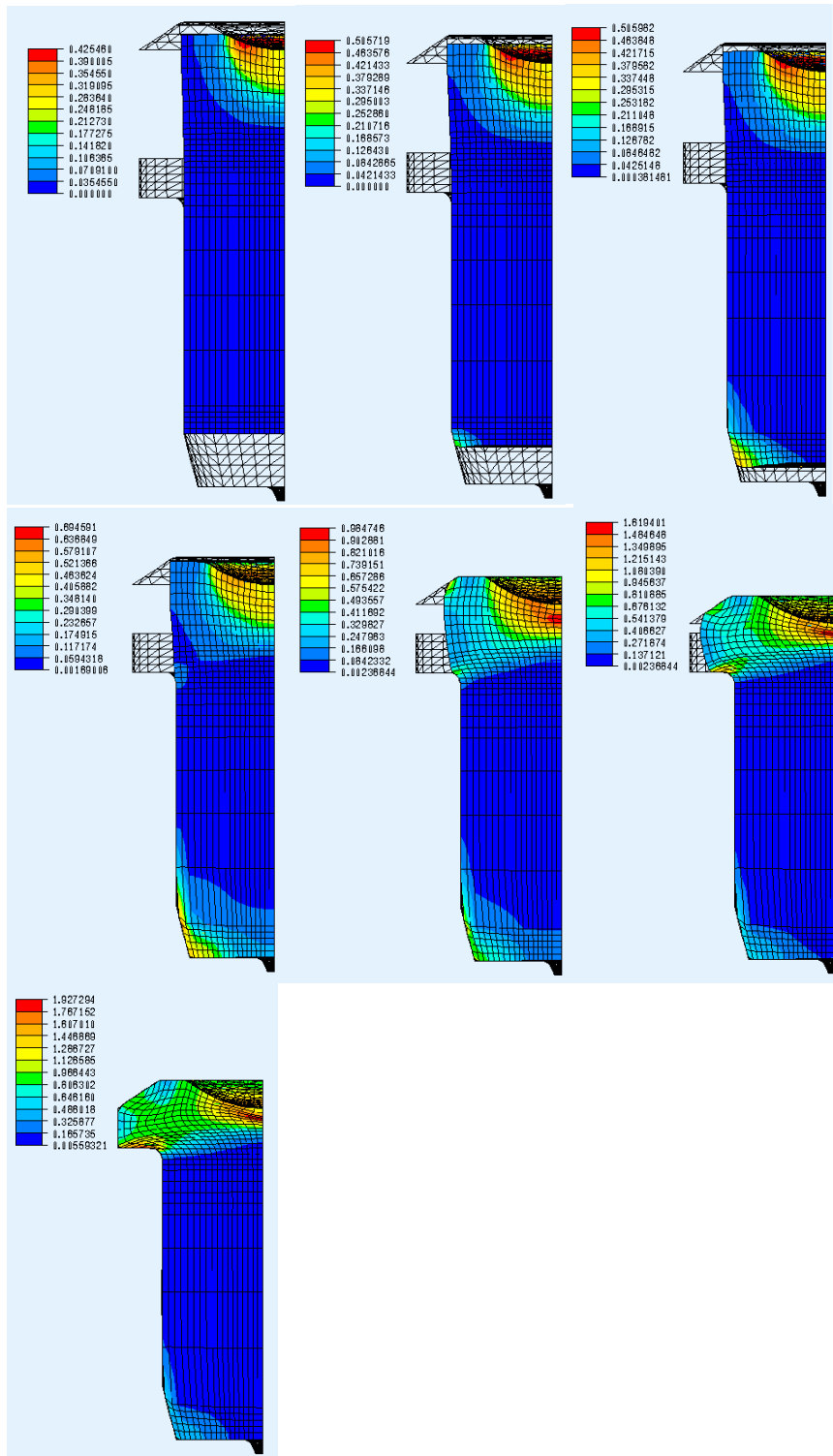
Baseado nas figuras 30 e 31, pode dizer-se que a diminuição da secção na parte inferior do componente dificulta que a base do mesmo fique plana. Esta característica torna ainda mais difícil a formação do bico inferior, e segundo a figura 31, a força necessária para a formação do pormenor seria claramente superior a 500kN.

A quantidade de material utilizada, apesar de ter sido calculada através de um programa de modelação 3D, não aparenta estar correcta. Contudo, este facto pode ser explicado por não ter sido incluída a formação da fenda.

#### **4.1.1.2 Resultados com o programa ELFEN**

Fez-se em paralelo uma simulação do mesmo problema usando o programa ELFEN Explícito. Nesta modelação fez-se uma abordagem tridimensional do problema, apesar disso, não foi incluída a fenda. As características físicas representadas no problema são muito semelhantes às da modelação feita para o ABAQUS, à excepção da velocidade do punção que foi considerada de 1m/s. A malha utilizada para o esboço foi uma malha estruturada, não adaptativa, com elementos estruturados de 8 nós e distribuídos de forma a que o esboço estivesse mais discretizado nas zonas de contacto. As ferramentas foram definidas como elementos de casca rígidos e o coeficiente de atrito é 0,15.

Apresentam-se na figura 32 alguns *frames* da distribuição das deformações ao longo do ensaio:



**Figura 32 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em uma etapa, do parafuso M8 (ELFEN) 3D**

Da análise da figura 32 pode ver-se que, de encontro aos resultados obtidos pela análise feita em ABAQUS, a obtenção do bico inferior é de facto um problema. Para além disso verifica-se que a diminuição de diâmetro a que o componente é sujeito na parte inferior, faz com que se forme uma forma côncava na base do componente. A formação deste pormenor aumenta ainda o esforço necessário à formação do bico. Na figura 33 pode ver-se em mais pormenor a forma como este fenómeno acontece.

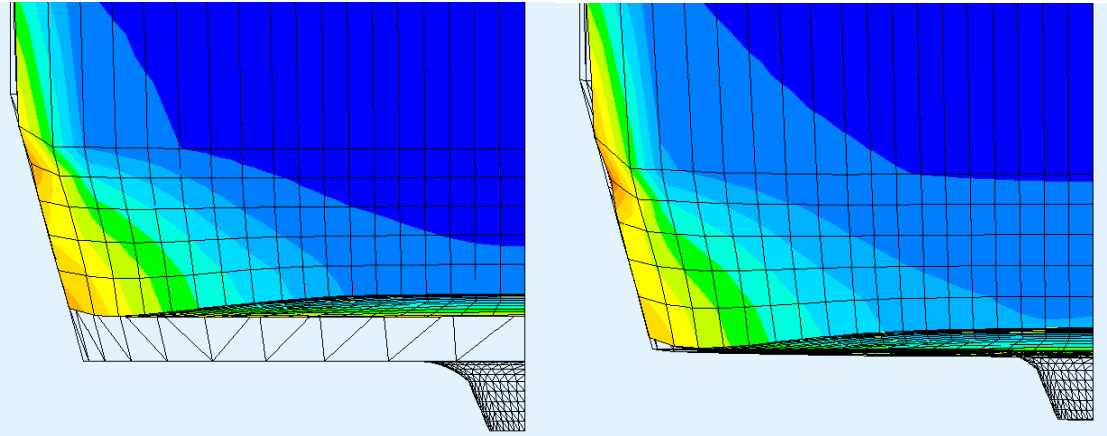


Figura 33 – Pormenor da formação de uma superfície côncava com a diminuição de diâmetro na zona inferior

Para além deste estudo, foi também realizada uma simulação com recurso a malha adaptativa que permite ver a formação da fenda. Apresenta-se na figura 34 parte da sequência de deformação relativa a esta simulação. Para simplificar a leitura da figura, as ferramentas não estão representadas.

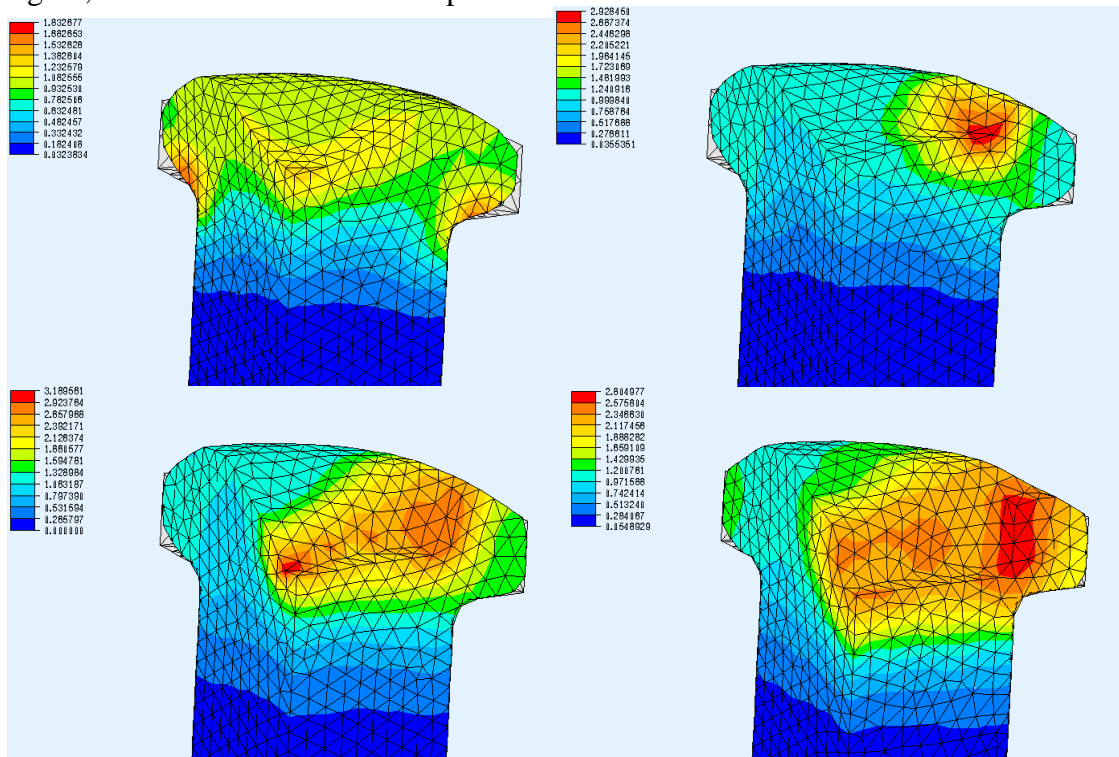
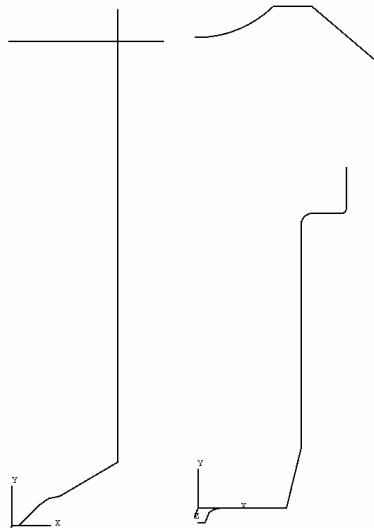


Figura 34 - Sequência de deformação do pormenor da fenda

### **4.1.2 Duas etapas de realização**

Na sequência dos resultados da abordagem anterior, faz sentido tentar diluir o esforço de deformação por várias etapas. Sabendo que haverá brevemente a possibilidade de aumentar a capacidade do processo para mais do que uma matriz, fez-se um ensaio que comporta duas matrizes e dois punções. Pretende-se com este ensaio tentar preparar o bico inferior na primeira etapa e deixar para a segunda a formação da cabeça e a planificação da restante parte inferior do componente.

Da discussão dos resultados obtidos da simulação em uma etapa, foi possível compreender os desafios de fabricação e propor uma sugestão para realizar o componente em duas etapas. Na figura 35 apresenta-se a proposta de ferramentas para a conformação em duas etapas



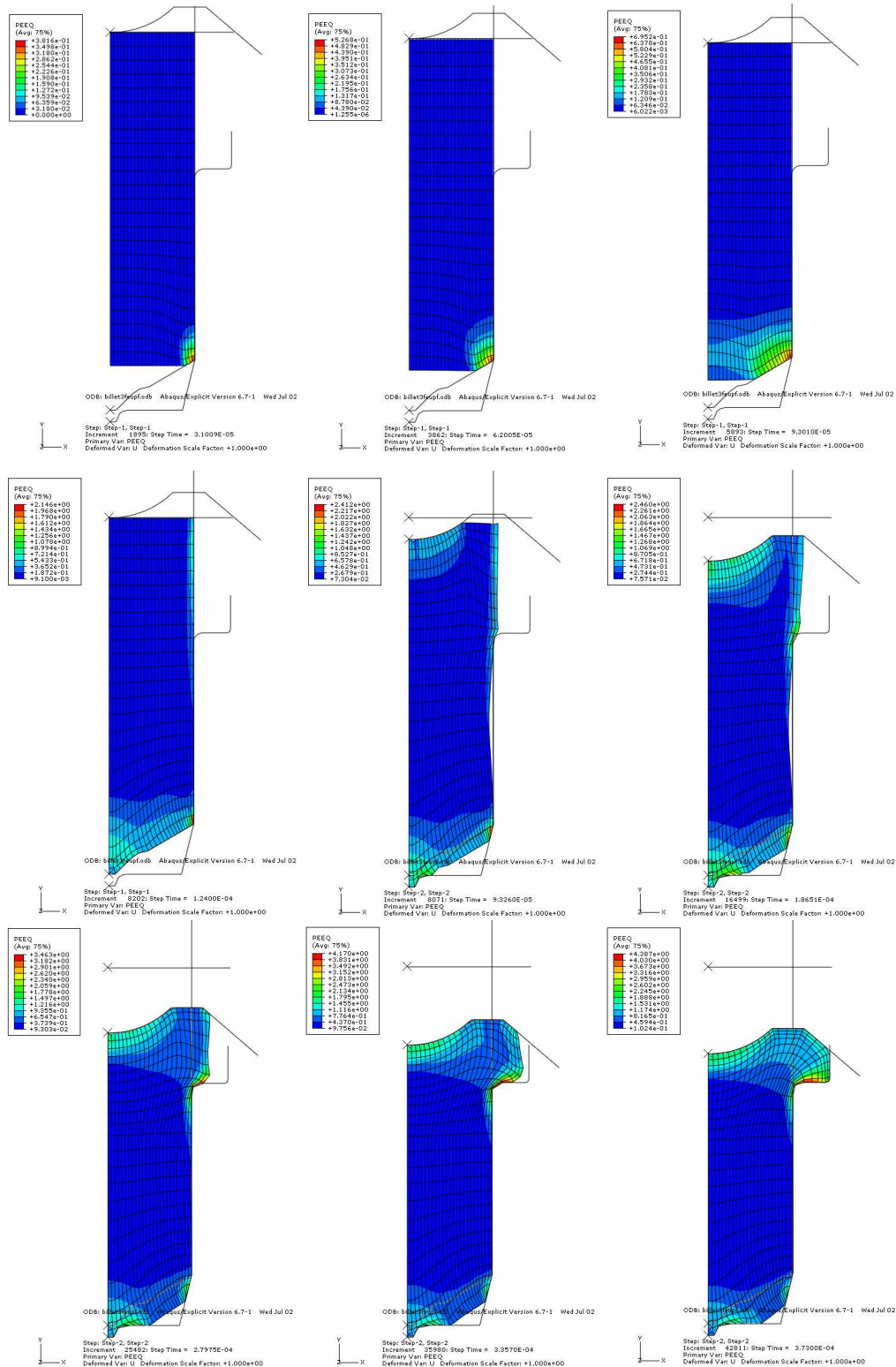
**Figura 35 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do parafuso M8 em 2 etapas, primeira e segunda etapa respectivamente**

Com o avançar do processo, aumenta o grau de exigência para com os resultados. Este estudo em duas etapas, se nos referirmos à figura 11 da secção 1.4, apresenta-se como uma simulação pormenorizada, isto é, no caso da simulação se mostrar favorável à proposta, pode ser interessante passar à fabricação de uma ferramenta-protótipo para ensaiar experimentalmente as ferramentas desenvolvidas.

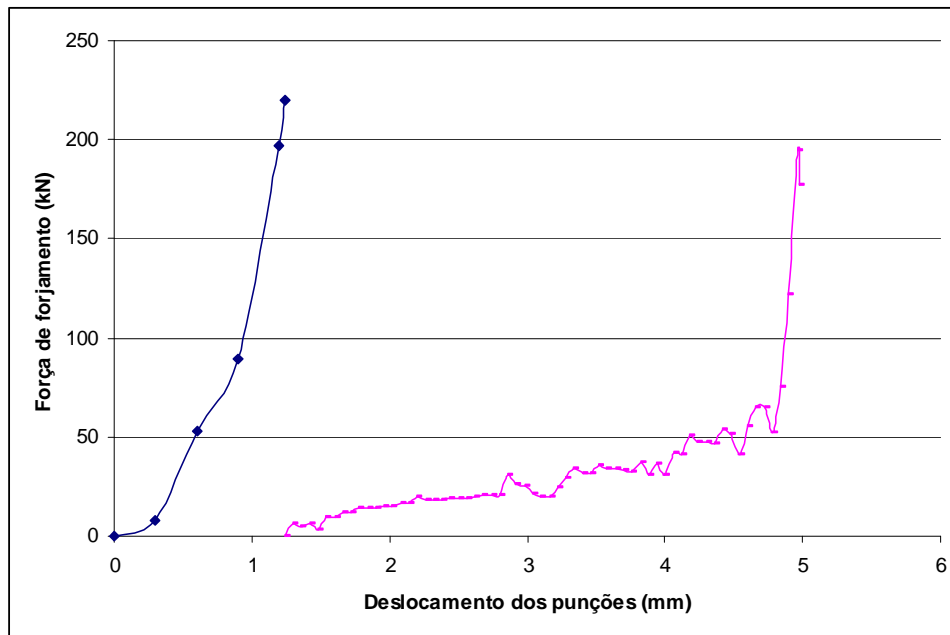
#### **4.1.2.1 Resultados com o programa ABAQUS**

Este estudo foi realizado com o software ABAQUS/Explicit, mantendo algumas das características do anterior, nomeadamente, a malha mais refinada, o coeficiente de atrito e a velocidade das ferramentas. A diferença principal será a mudança da geometria das ferramentas e a amplitude do movimento dos punções. O movimento das ferramentas passa a ser definido por: Punção 1 – 1,24 mm e Punção 2 – 3,73 mm

Estão assim definidas as condições de partida que permitirão a análise dos resultados obtidos. Apresentam-se na figura 36 alguns *frames* da evolução correspondente ao processo, e na figura 37 o gráfico da força de forjamento ao longo do deslocamento dos punções.



**Figura 36 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em duas etapas, do parafuso M8 (ABAQUS)**



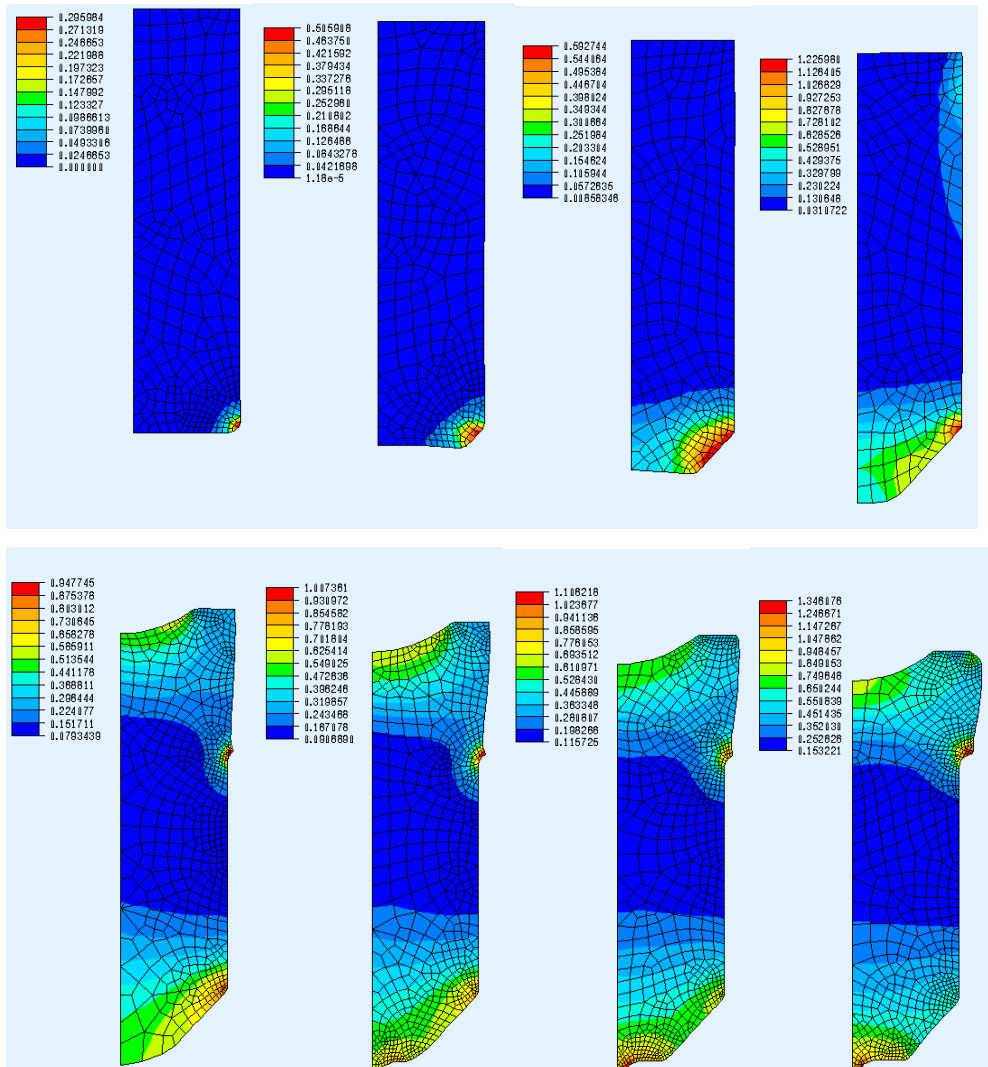
**Figura 37 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento dos punções para a conformação do Parafuso M8 em duas etapas.**

Partindo da figura 36, não se exclui a possibilidade de existir viabilidade na conformação do bico na primeira etapa. Contudo, na segunda etapa, surgem algumas complicações na planificação da restante zona inferior. Por outro lado, o gráfico da figura 37 atinge valores de força de forjamento elevados. Se se somarem os valores máximos das duas etapas atinge-se um valor da ordem dos 450 kN, valor este que não corresponde ainda a um completo preenchimento da matriz. Com base neste facto, e na forma como cresce a curva da força de forjamento, prevê-se que a força que seria necessária para a completa conformação do componente seria superior à capacidade do equipamento.

#### **4.1.2.2 Resultados com o programa ELFEN**

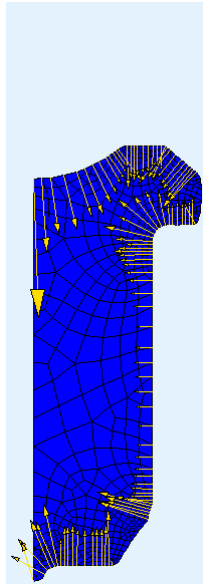
Novamente, fez-se em paralelo a simulação de uma solução muito parecida usando o ELFEN Explicit. Nesta modelação fez-se uma abordagem 2D do problema e não foi incluída a fenda. As características físicas representadas no problema são muito semelhantes às da modelação feita para o ABAQUS, à excepção da velocidade do punção que foi considerada de 1m/s. A malha utilizada para o esboço foi uma malha de elementos de quatro nós, não estruturada e adaptativa. As ferramentas foram definidas com elementos rígidos de dois nós.

Apresentam-se na figura 38 alguns *frames* da distribuição das deformações ao longo do ensaio:



**Figura 38 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em duas etapas, do parafuso M8 (ELFEN)**

Na figura 38, não é possível ver as ferramentas, contudo, na figura 39 pode ver-se o último instante do processo, com vectores que representam os contactos entre as ferramentas e o esboço.



**Figura 39 – Representação dos contactos no último instante da conformação do parafuso M8 em 2 etapas (ELFEN)**

Da figura 39 podemos ver que tal como na simulação em ABAQUS, em duas etapas, não se consegue preencher completamente a parte inferior da matriz. Assim, Pode dizer-se que esta proposta não tem viabilidade suficiente para merecer um ensaio experimental.

### 4.1.3 Quatro etapas de realização (proposta “Carbodies”)

Durante o curso do projecto, foi facilitado o acesso ao projecto das ferramentas adquiridas a um fabricante especializado (“Carbodies”). O fabricante das ferramentas garante a viabilidade desta solução, contudo, é academicamente interessante fazer a simulação desta proposta. O interesse desta simulação passa também por perceber de que maneira reage o material às geometrias escolhidas por este fabricante, uma vez que estas são bastante diferentes das opções do modelo proposto anteriormente (duas etapas). Assim, na figura 40 apresenta-se a proposta da “Carbodies”:

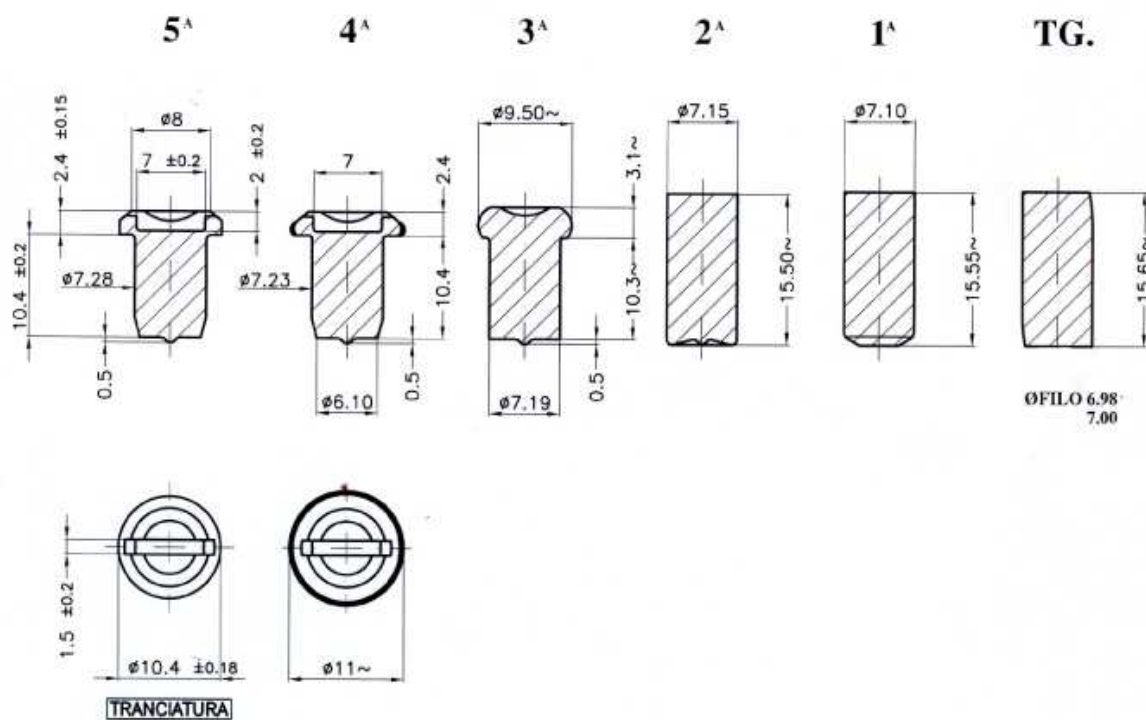
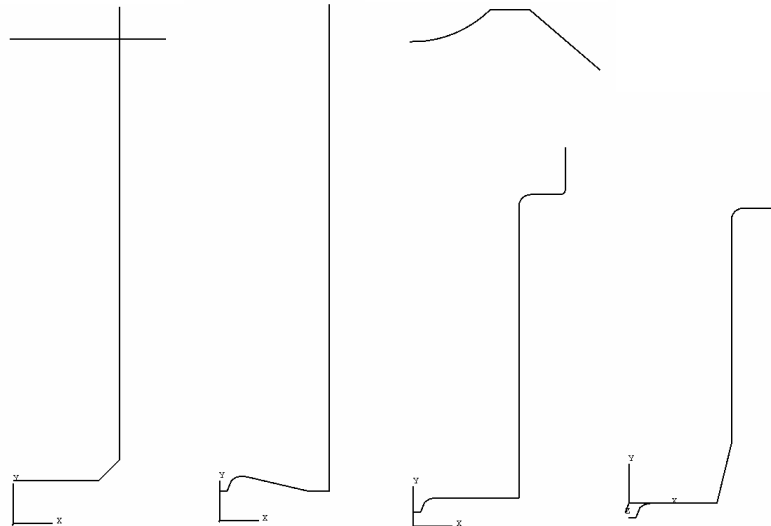


Figura 40 – Proposta de planeamento de forjamento em 5 etapas (“Carbodies”)

Nesta solução é utilizada uma das cinco estações da máquina para o corte do excesso de material na cabeça, contudo na simulação esta etapa será negligenciada e serão apenas utilizadas 4 das estações. As ferramentas utilizadas na simulação são as representadas na figura 41.



**Figura 41 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do parafuso M8 em 4 etapas**

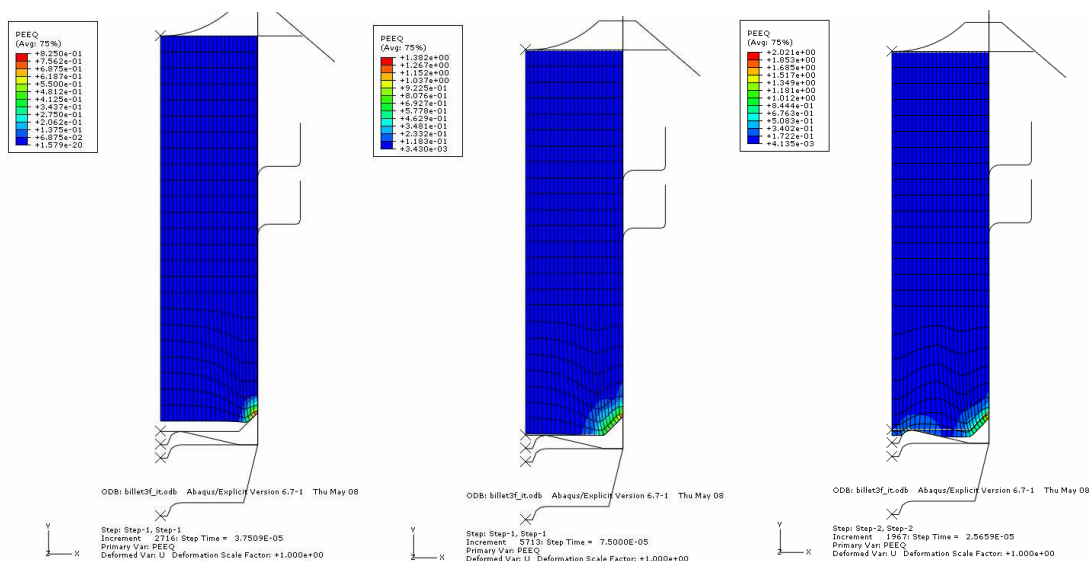
### 4.1.3.1 Resultados com o programa ABAQUS

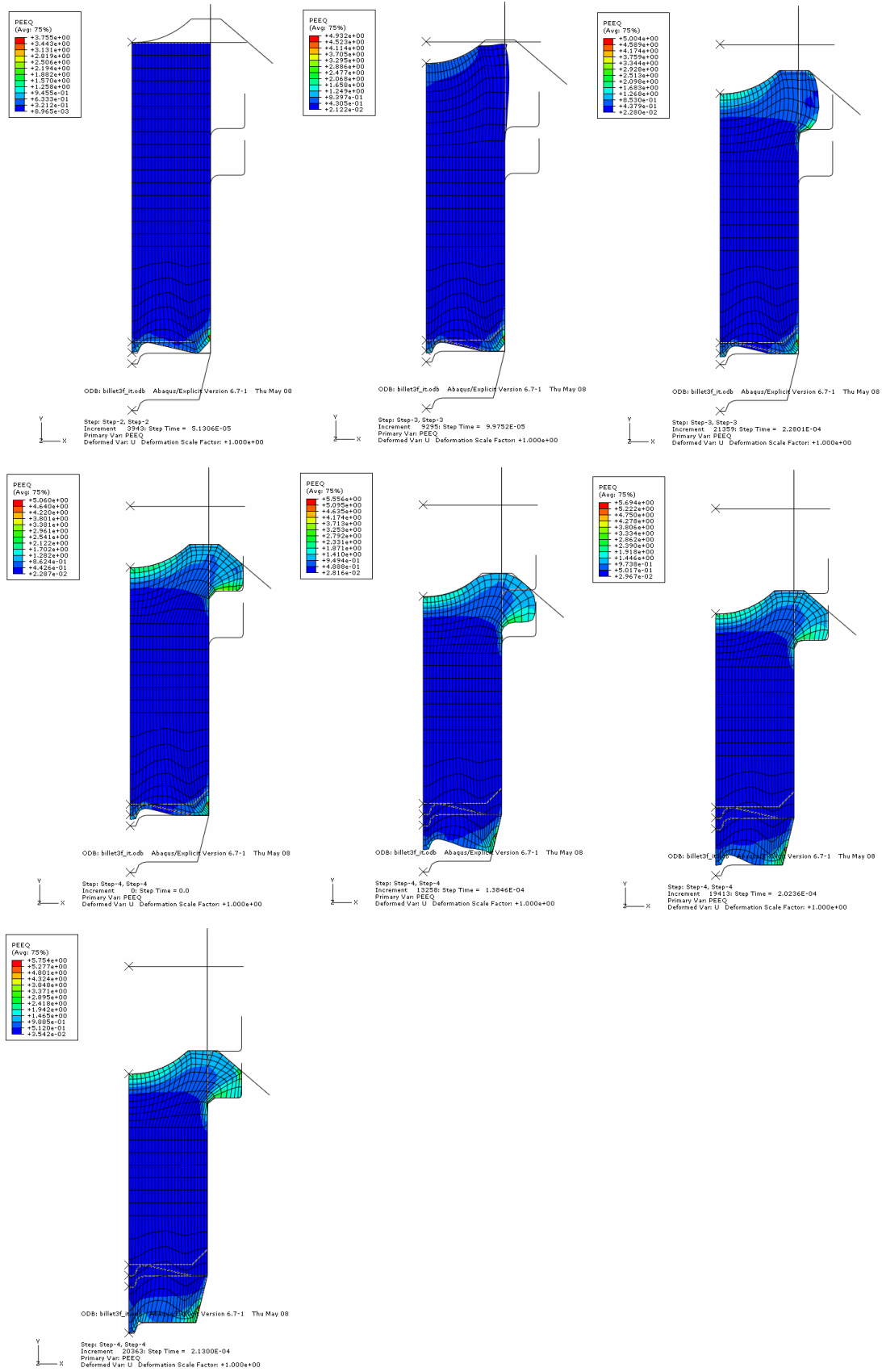
Para o estudo desta opção multi-etapas, fez-se uma simulação que permita o acesso a resultados de uma maneira relativamente célere, por esta razão, optou-se novamente por um estudo axissimétrico. Assim, tudo é aproveitado do modelo anterior, à excepção das ferramentas. É novamente negligenciado o pormenor da fenda.

As amplitudes do movimento das ferramentas utilizadas neste modelo são:

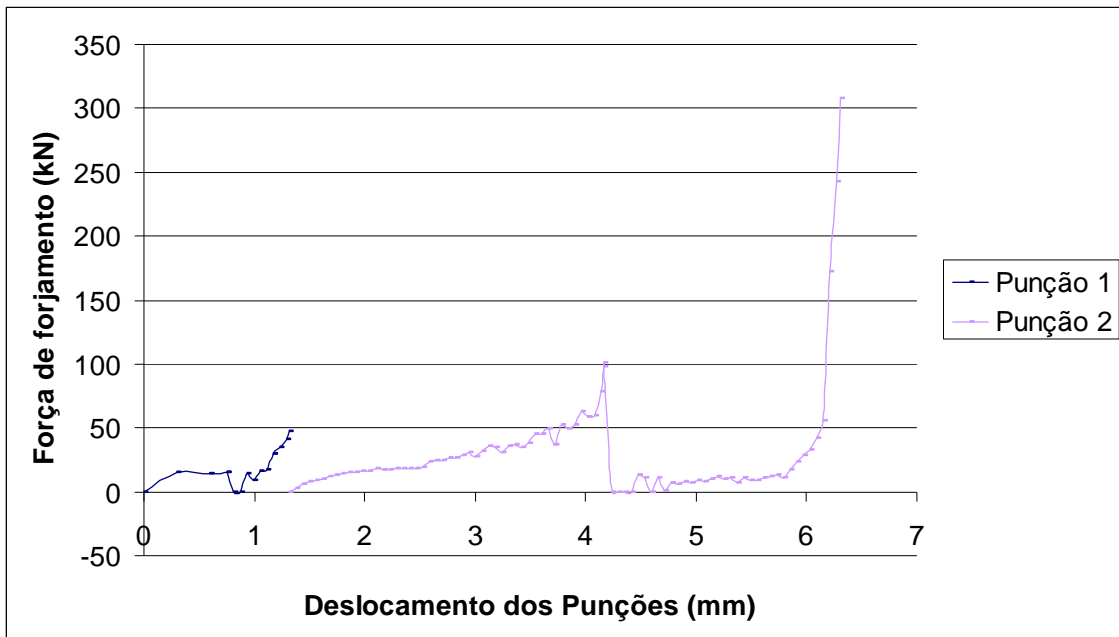
- Punção 1: Etapa1 – 0,75 mm e Etapa 2 – 0,57 mm,
- Punção 2: Etapa 3 – 2,85 mm e Etapa 4 – 2,13 mm

Apresentado que está o problema, mantém-se a estrutura da análise e apresentam-se nas figuras 42 e 43 os resultados de distribuição de deformações, paralelamente com o gráfico de força de forjamento.





**Figura 42 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas (“Carbodies”), do parafuso M8 (ABAQUS)**



**Figura 43 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento dos punções para a proposta 4 etapas**

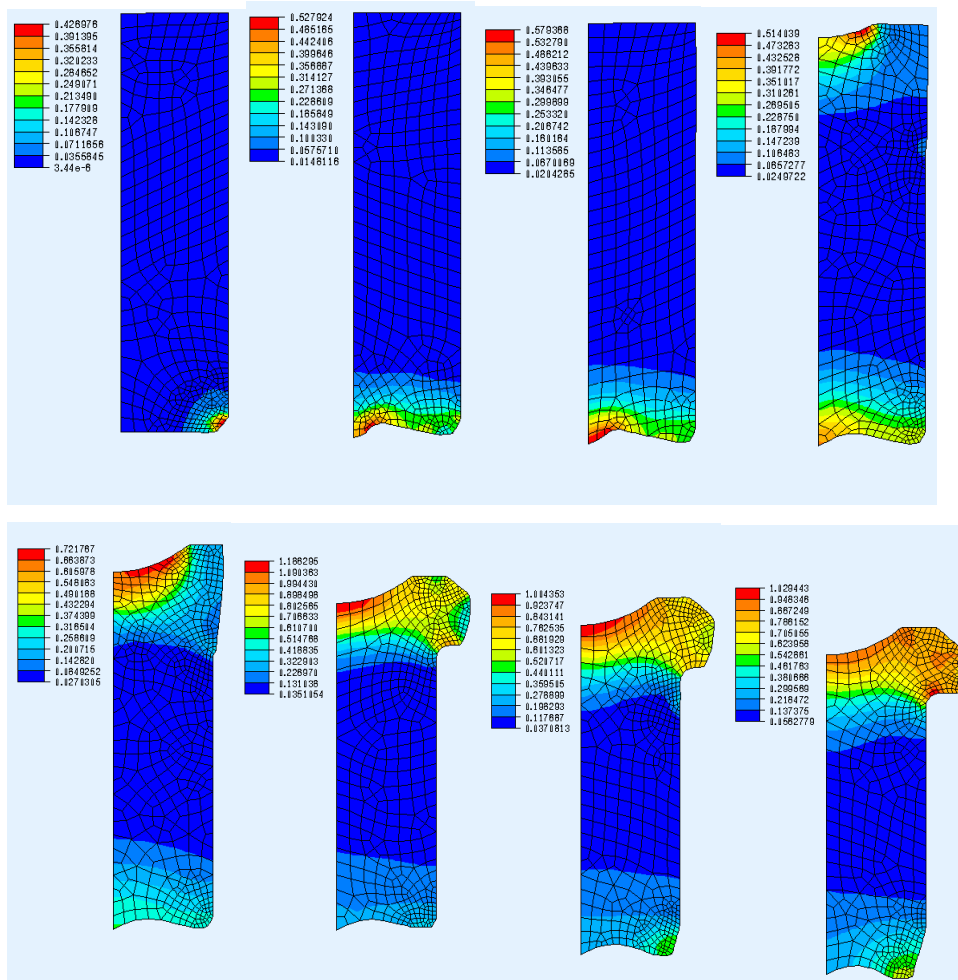
Da análise das figuras 42 e 43, pode dizer-se que é bastante provável que esta solução seja viável. Se se somarem os valores das forças de forjamento máximas em cada etapa, obtém-se um valor que se situa entre os 450 e os 500 kN; estando estes valores abaixo dos 550 kN de capacidade máxima do equipamento. A nível do preenchimento da geometria, parece haver uma ligeira dificuldade na fase final, em planificar a parte inferior, contudo, é possível que este pormenor seja corrigido com a inclusão da fenda e com o aumento de material do esboço inicial que permita a operação de corte final. Outra característica relativa à forma como o material flui na matriz que parece relevante é a facilidade com que se forma o bico inferior na segunda etapa. Há também que referir que na solução proposta pela “Carbodies”, a quarta etapa funciona como uma matriz aberta e a quinta como operação de corte. No modelo simulado, em particular na quarta etapa, há uma compressão do material. Esta compressão, ao aumentar acentuadamente a força de forjamento na última etapa, pode afastar ligeiramente esta etapa de simulação da realidade.

#### **4.1.3.2 Resultados com o programa ELFEN**

Em paralelo foi realizada uma simulação do mesmo problema com o programa ELFEN Explícito. Nesta modelação fez-se uma abordagem axissimétrica do problema e não foi incluída a fenda. As características físicas representadas no problema são muito semelhantes às da modelação feita para o ABAQUS, à excepção da velocidade do punção que foi considerada de 1m/s. A malha utilizada para o esboço foi uma malha não

estruturada, adaptativa, com elementos de quatro nós. As ferramentas foram definidas com elementos rígidos de dois nós.

Na figura 44 apresenta-se a sequência de distribuições de deformação ao longo do processo de quatro etapas.



**Figura 44 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas (“Carbodies”), do parafuso M8 (ELFEN)**

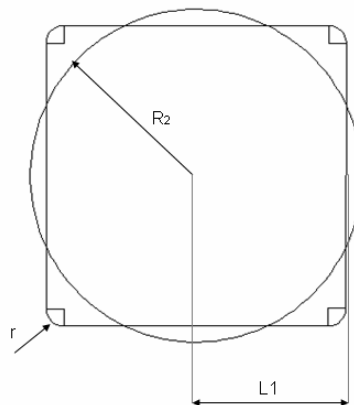
Na figura 44 vê-se um resultado que deveria ser compatível com o apresentado na figura 42, contudo isto não acontece. Na figura 42, há na parte inferior do componente uma perda de definição da geometria. Esta perda suspeita-se que esteja relacionada com o tipo de malha adaptativa utilizada e por isso não serão considerados os resultados obtidos. Contudo, é reiterada a influência negativa que tem a diminuição do diâmetro da parte inferior na formação do bico.

## **4.2 Eixo lateral de fixação para travões**

Para a análise da formabilidade deste componente, as principais preocupações serão a verificação da capacidade do material se deformar com uma movimentação de volumes bastante grande, ou seja, sofrer grandes variações na secção. Em paralelo, nunca será descurada a força de forjamento.

### **4.2.1 Cálculo das áreas equivalentes, para implementação no modelo axissimétrico**

O eixo lateral de fixação é um componente que se caracteriza por não ser axissimétrico (ver secção 2.2). Contudo, fez-se uma abordagem axissimétrica a um problema, que se pretende “equivalente”. Para obter a geometria de ferramentas utilizada nesta modelação, foram calculadas áreas das secções quadradas, e posteriormente foram determinados os raios correspondentes a círculos com a mesma área. Assim, o volume correspondente do componente será o mesmo.



**Figura 45 – Esquema de “transformação” das secções quadradas em axissimétricas**

Na figura 45 pode ver-se o esquema utilizado para “transformar” as secções quadradas em circulares. Assim, podem ser substituídos os valores de L1 pelos valores de um R2 que representam o raio “equivalente”

**Tabela 8 - Valores do raio das secções circulares(R2) e das secções originais(L1)**

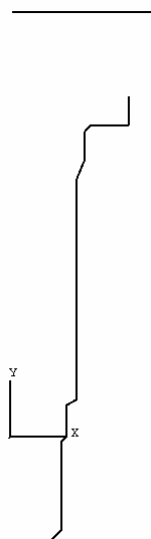
L1	R2
4,25 mm	4,7 mm
4,5 mm	5,28mm
7,5mm	8,4 mm

## 4.2.2 Uma etapa de realização

- Apesar de se saber à partida que será necessário recorrer a multi-etapas, optou-se por seguir o procedimento apresentado na figura 11, secção 1.4 e fazer uma primeira simulação numa só etapa. Espera-se com esta simulação aferir o tamanho inicial do esboço, bem como desenvolver o primeiro contacto com a malha a utilizar.

O modelo axissimétrico criado na tentativa de emular a simulação em 3D, como foi referido na secção 4.2.1, foi construído com base na semelhança de volumes. É possível que esta simulação não seja completamente equivalente à simulação tridimensional, contudo, a relativa simplicidade com que se implementa justifica-a.

Na figura 46 representam-se as ferramentas geradas com base no cálculo anterior.



**Figura 46 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do eixo de fixação em 1 etapa**

### 4.2.2.1 Resultados com o programa ABAQUS

Esta simulação foi realizada com recurso ao programa ABAQUS/Explicit. O esboço inicial, com 45mm de altura e 8mm de diâmetro, foi discretizado com 576 elementos do tipo CAX4R (axissimétricos) da biblioteca do Abaqus.

A ferramenta foi animada de uma velocidade de 10 m/s, para um deslocamento de 8mm e o coeficiente de atrito foi estabelecido em 0,15. As ferramentas foram modeladas como rígidas, recorrendo a elementos do tipo RAX2, elementos rígidos, axissimétricos de 2 nós, da biblioteca do Abaqus.

Desta primeira abordagem, tem-se como resultados de interesse a relação entre o tamanho do esboço inicial e o preenchimento da geometria, bem como a distribuição da malha no componente.

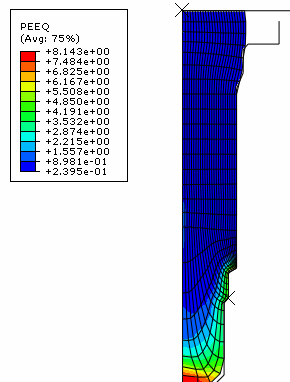
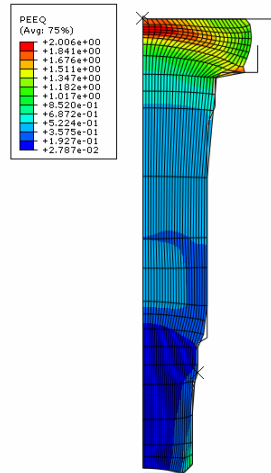


Figura 47 – Distribuição de deformações no último incremento da análise de uma etapa para a conformação do eixo de fixação

Como se vê na figura 47, o esboço não tem tamanho suficiente para preencher completamente a geometria da matriz. Quanto à malha, vê-se que há excesso de elementos em zonas que apresentam pouca deformação, e falta deles em zonas onde a deformação é maior. O passo seguinte é o aumento da quantidade de material envolvido no processo e a redistribuição da malha de forma a concentrá-la nas zonas de maior deformação.

#### 4.2.2.2 Aumento do tamanho do esboço inicial e redistribuição da malha

Nesta fase, com base no resultado anterior e na limitação da prensa a nível da alimentação, diâmetro máximo do arame de 8 mm, optou-se por aumentar o volume de material variando apenas a altura. A variação proposta foi de 45 para 54mm. Ao aumentar a altura do esboço, mantendo o número de elementos, torna-se ainda mais importante a redistribuí-los. Assim, procura-se que estes estejam mais concentrados nas zonas de grandes deformações e nas zonas sujeitas a contactos mais complexos. Na figura 48 pode ver-se o resultado da simulação deste modelo.

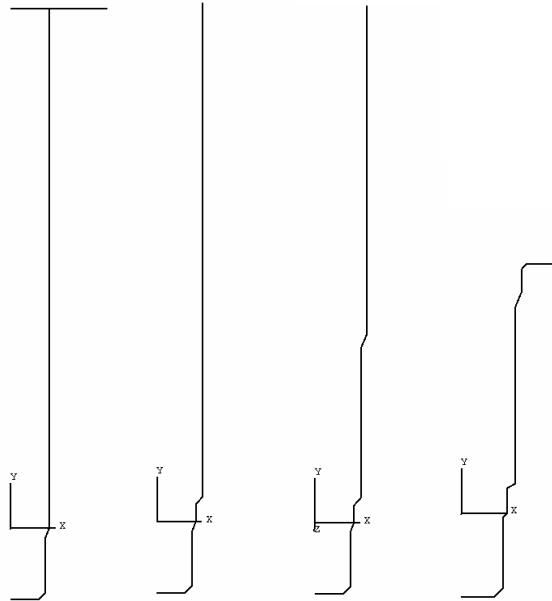


**Figura 48 – Distribuição de deformações no último incremento da análise de uma etapa para o eixo de fixação, depois de aumentada a altura do esboço e redistribuída a malha**

Na figura 48 mostra-se que mesmo utilizando uma malha redistribuída, há bastantes pormenores geométricos nas ferramentas que não são devidamente analisados. Contudo, denotam-se desde já dificuldades no preenchimento de algumas partes da geometria. Estas dificuldades sugerem uma abordagem em multi-etapas, que seguindo um preenchimento escalonado das várias secções, deve conduzir o material a um comportamento mais próximo do desejado. Assim, desta análise preliminar, podemos retirar um valor para a altura do esboço e partir para uma discretização mais fina do mesmo.

### **4.2.3 Quatro etapas para a realização do eixo de fixação**

Para esta proposta de multi-etapas, optou-se por tentar conformar o componente em 4 etapas, deixando a quinta etapa possível para apara de excesso de material na parte superior. Assim, e porque o componente apresenta 4 secções bem definidas, definiu-se como objectivo, o preenchimento de uma secção em cada etapa. Esta proposta visa garantir o preenchimento correcto de cada secção na etapa correspondente. Para isso, cada matriz será igual à da etapa anterior, com liberdade para o material escoar para a secção seguinte Na figura 49 são apresentadas as ferramentas propostas para esta abordagem em quatro etapas.



**Figura 49 – Ferramentas modeladas para a simulação do fabrico do eixo de fixação em 4 etapas**

#### **4.2.3.1 Resultados com o programa ABAQUS**

Para esta análise axissimétrica foi utilizado o programa ABAQUS/Explicit.

O esboço de 54mm de altura foi discretizado com 2304 elementos do tipo CAX4R (axissimétricos) da biblioteca do Abaqus. A velocidade de deslocamento da ferramenta utilizada foi de 10 m/s e o coeficiente de atrito de 0.05. As ferramentas foram modeladas com elementos do tipo RAX2, elementos rígidos, axissimétricos de 2 nós, da biblioteca do Abaqus e as etapas foram divididas nos seguintes intervalos de deslocamento:

- Punção 1: etapa1 – 7,5 mm e etapa 2 – 9,52 mm,
- Punção 2: etapa 3 – 6,4 mm e etapa 4 – 4,8 mm.

Nas figuras 50 e 51 apresentam-se respectivamente, a sequência de distribuição de deformações do componente e o gráfico de força de forjamento ao longo do processo.

# Forjamento de Parafusos em Multi-etapas

## Otimização do processo através da modelação numérica por elementos finitos

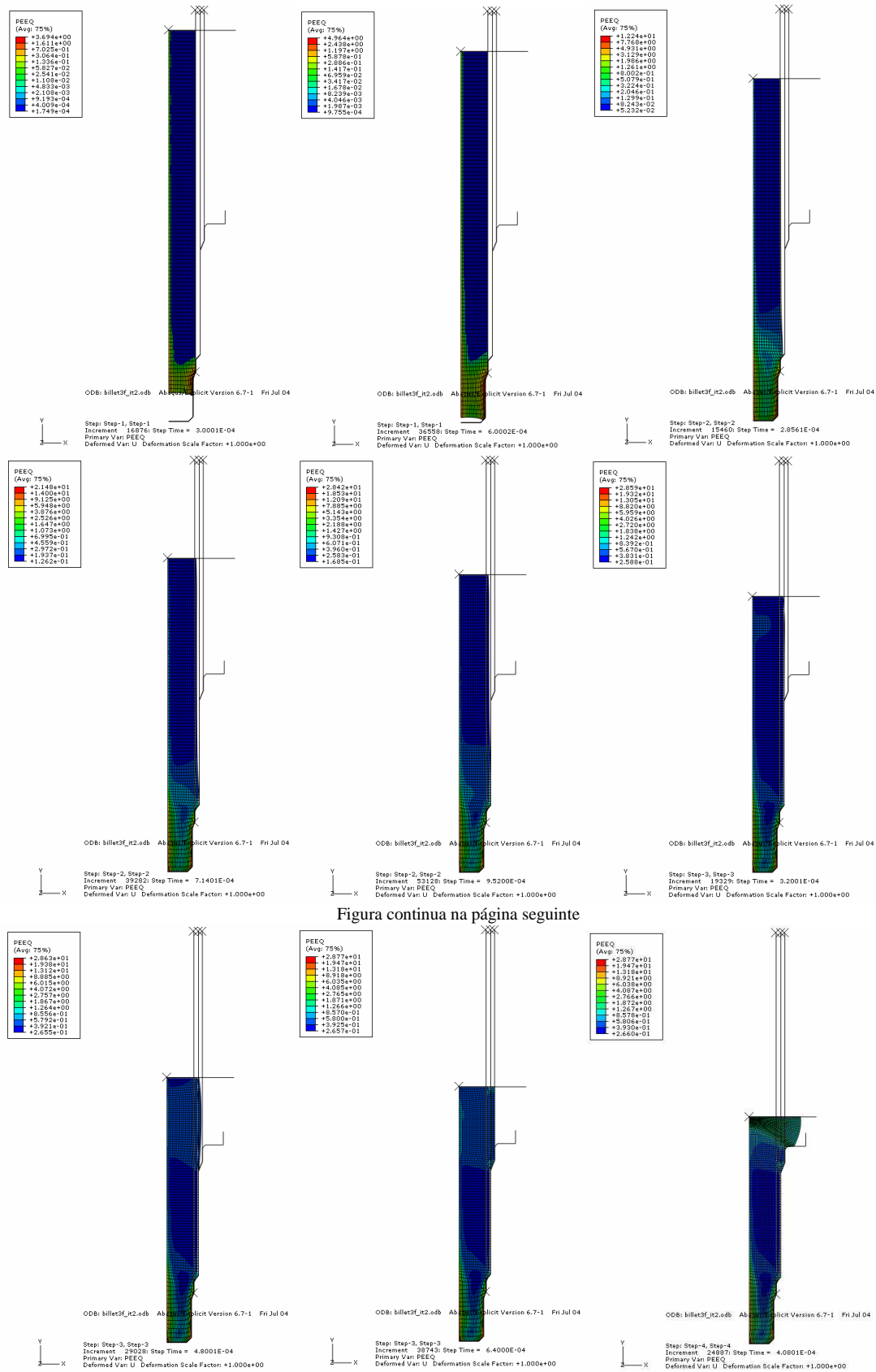
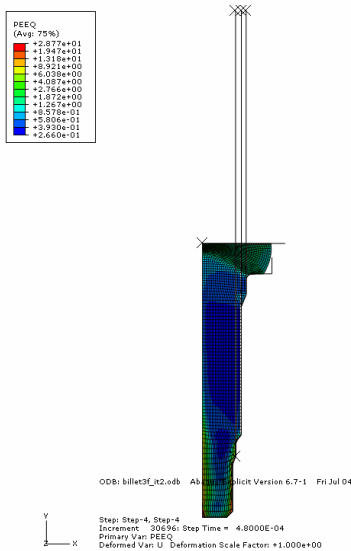
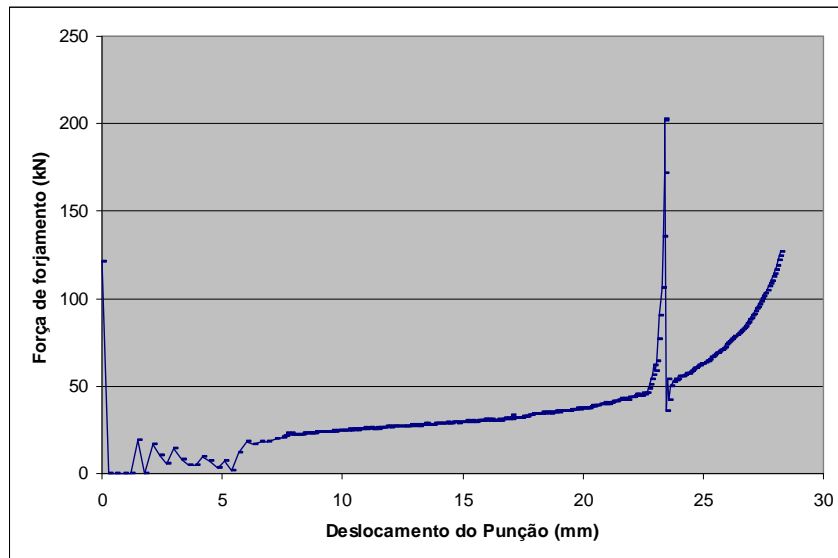


Figura continua na página seguinte



**Figura 50 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas do eixo de fixação, com compressão excessiva de material (ABAQUS)**



**Figura 51 – Gráfico de Força de forjamento vs Deslocamento do punção para conformação do Eixo de Fixação em 4 etapas, com compressão excessiva de material**

Da análise da figura 50 pode deprender-se que estas etapas são favoráveis à conformação do componente. Contudo, quando se observa a figura 51 nota-se que, no final da terceira etapa, há um pico na força de forjamento. Este pico mostra que se está a comprimir demasiado o material. Este resultado sugere para o seguinte estudo uma ligeira diminuição do curso das ferramentas.

### 4.2.3.2 Diminuição dos deslocamentos para controlar forças de forjamento

Nesta análise são mantidas todas as características da anterior, à excepção dos deslocamentos da ferramenta. Estes deslocamentos foram ligeiramente reduzidos em especial na etapa 3. Assim, o esquema de deslocamentos utilizado foi o seguinte:

- Punção 1: etapa1 – 7,5 mm e etapa 2 – 9,5 mm,
- Punção 2: etapa 3 – 6,2 mm e etapa 4 – 5 mm.

Apresentam-se nas figuras 52 e 53 a sequência de deformação do componente e o gráfico de força de forjamento por deslocamento da ferramenta

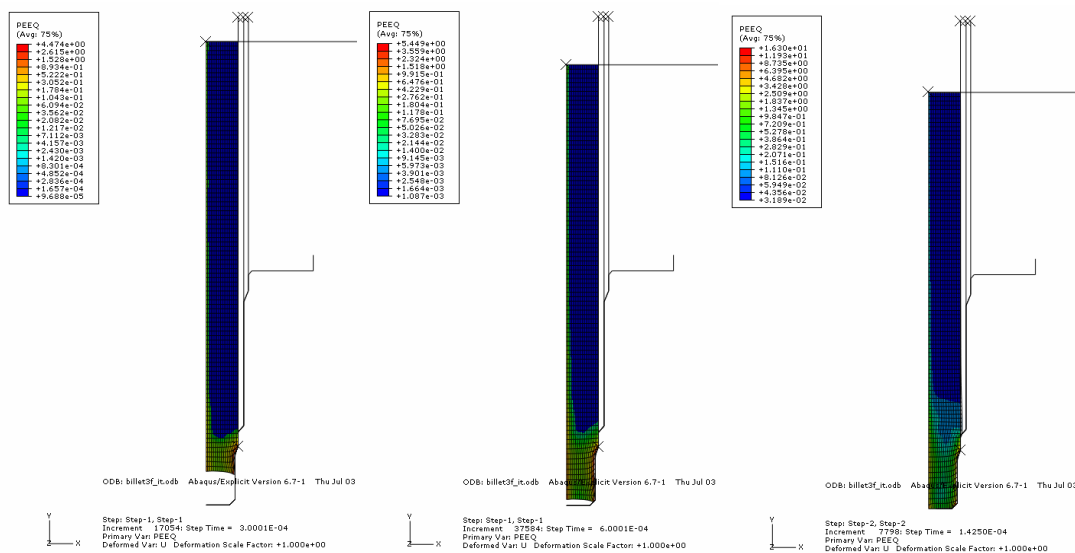
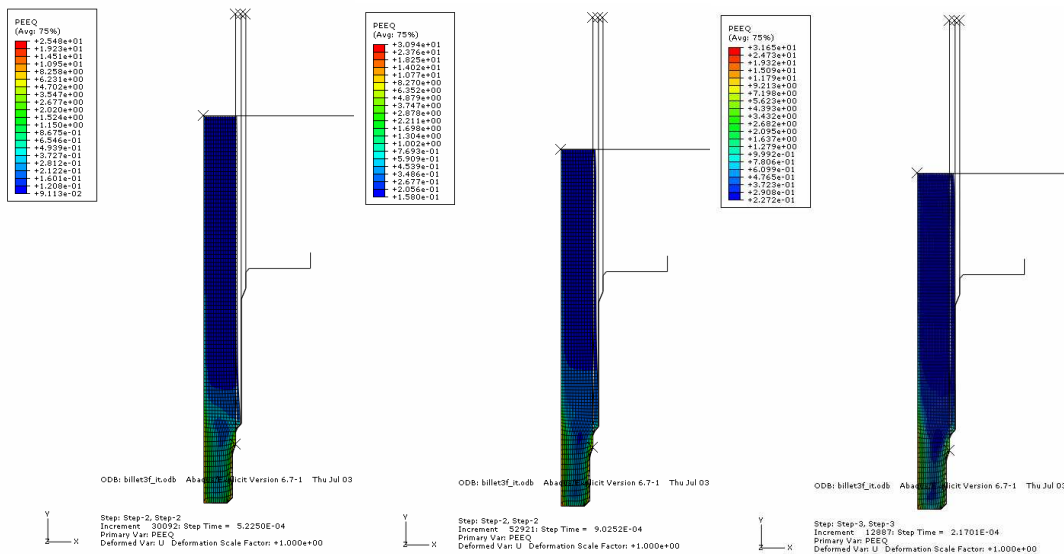
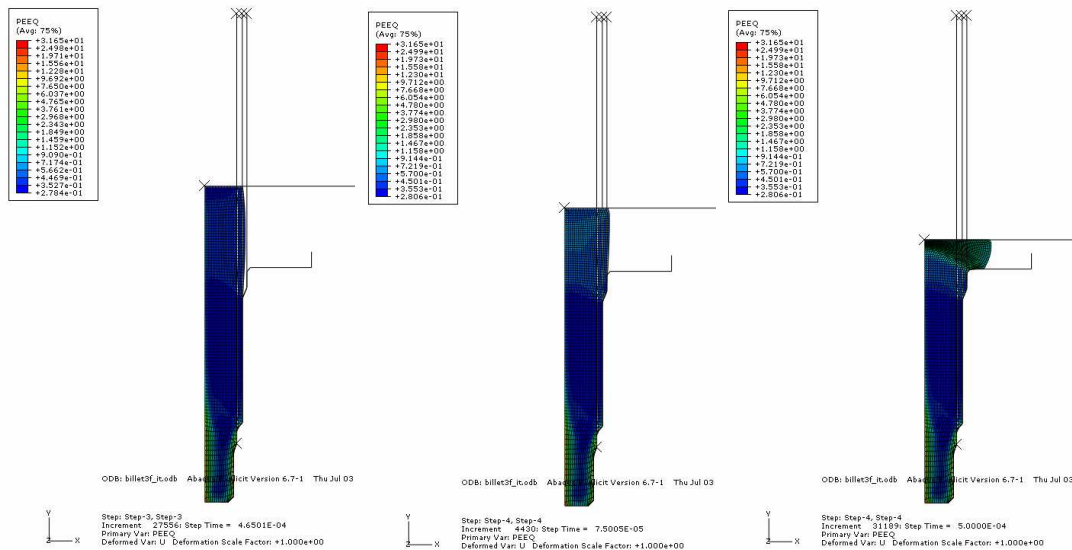
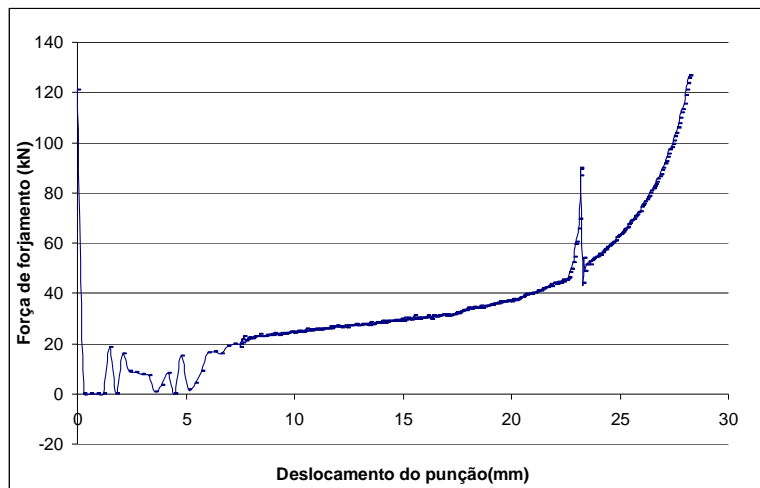


Figura continua na página seguinte





**Figura 52 – Sequência da distribuição de deformações ao longo do processo de conformação em quatro etapas do eixo de fixação, com deslocamentos reduzidos (ABAQUS)**



**Figura 53 – Gráfico da força de forjamento para conformação em 4 etapas do eixo de fixação, com os deslocamentos do punção ajustados.**

Na Figura 52 pode ver-se que a capacidade de preenchimento da geometria não é afectada por esta variação do deslocamento do punção. Isto significa, que com um esforço menor é possível atingir a mesma deformação. Esta redução no esforço mostra-se no gráfico da figura 53, com uma redução no valor máximo da força de forjamento da etapa 3 de 200 para 90kN.

Finalmente, da análise dos resultados provenientes do modelo axissimétrico, prevê-se que seja possível obter este componente. Por outro lado, a transformação do problema 3D num problema axissimétrico não está validada e por isso este estudo justificaria uma abordagem 3D para comparação. Se essa comparação fosse positiva, seria uma motivação para a utilização deste processo de simulação mais simples em casos futuros.

## **5 Conclusões e propostas de trabalhos futuros**

### **5.1 Conclusões gerais**

Os trabalhos realizados no âmbito desta tese desenvolveram-se na área da aplicação de métodos de simulação numérica a problemas industriais de forjamento. Estes trabalhos pretendem destacar que a simulação numérica de conformação plástica quando conjugada com a experiência dos projectistas pode representar ganhos significativos a nível do tempo de desenvolvimento de novos componentes e suas ferramentas, bem como redução de gastos directos em ferramentas-protótipo e experiências de fabrico.

Foram realizadas simulações relativas ao forjamento de dois componentes, um parafuso e um eixo de fixação. Com estas aplicações tentou demonstrar-se que a simulação numérica pode dar um contributo importante a nível da previsão do comportamento do material, das dimensões do esboço inicial, do número de etapas necessárias para a conformação do componente e das forças envolvidas no processo. Na fase de projecto estas informações podem ser de grande importância, uma vez que a correcção de erros antes da realização de ferramentas pode representar uma redução de custos bastante elevada.

Nesta tese ficou patente que para fabricar componentes por forjamento com geometrias complexas é preciso recorrer a soluções multi-etapas. Mais do que isso, mostrou-se que definir as diversas etapas é uma tarefa complexa, que requer por parte dos projectistas experiência e a existência de meios auxiliares de análise.

Quanto às aplicações industriais analisadas, pode dizer-se que a solução de duas etapas proposta para o componente “parafuso M8”, a usar no equipamento adquirido, não permitiria fabricar o componente. A proposta de quatro etapas da empresa “Carbodies”, por sua vez, apresentou resultados numéricos que indicam a possibilidade de realização do componente e sugerem a solução óptima para a sua realização.

Relativamente ao componente “eixo de fixação”, os resultados obtidos com modelação axissimétrica sugerem a possibilidade de realização com sucesso do componente também em quatro etapas. No entanto, estudos adicionais devem ser realizados com modelação tridimensional em virtude da sua geometria específica.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Relativamente à modelação numérica de processos de conformação plástica aplicada ao desenvolvimento de componentes industriais e em particular às aplicações no âmbito desta tese algumas das sugestões para trabalhos futuros são:

- realização de modelações tridimensionais;  
as modelações realizadas nesta tese foram, por razões de eficiência e rapidez de resultados, maioritariamente bidimensionais; contudo seria importante estudar o processo de conformação destes componentes utilizando uma modelação tridimensional; esta modelação seria a forma mais adequada de estudar a conformação de componentes não axissimétricos, bem como de pormenores geométricos que apresentem esta mesma característica; para além do interesse na obtenção desses resultados, seria também importante compará-los com os resultados dos estudos bidimensionais;
- estudo dos componentes propostos não analisados;  
a biblioteca de componentes propostos nesta tese é constituída por cinco componentes, dos quais apenas dois foram estudados; seria importante no seguimento do projecto, analisar os restantes componentes; teria também algum interesse tentar encontrar pontos comuns no desenvolvimento dos projecto, de forma a tentar criar uma metodologia organizada de desenvolvimento;
- realização da validação experimental;  
a validação experimental dos resultados obtidos por modelação numérica é essencial para que se crie uma plataforma de desenvolvimento de produtos e ferramentas com base na simulação. Tendo em conta que durante este trabalho não foi possível fazer esta validação, é fundamental fazê-lo no futuro.
- estudo de sensibilidade a variáveis numéricas;  
na simulação de um processo de fabrico, há necessariamente variáveis numéricas, definidas pelo utilizador; a variação do valor destas variáveis pode provocar resultados diferentes; há todo o interesse em que tendo como referência os resultados experimentais se verifiquem os valores obtidos numericamente e se façam estudos de sensibilidade a parâmetros numéricos como a velocidade das ferramentas usada na análise (em virtude de uso de programa explícito), o refinamento e uso de malha adaptativa e ainda os valores usados para o coeficiente de atrito, por exemplo.

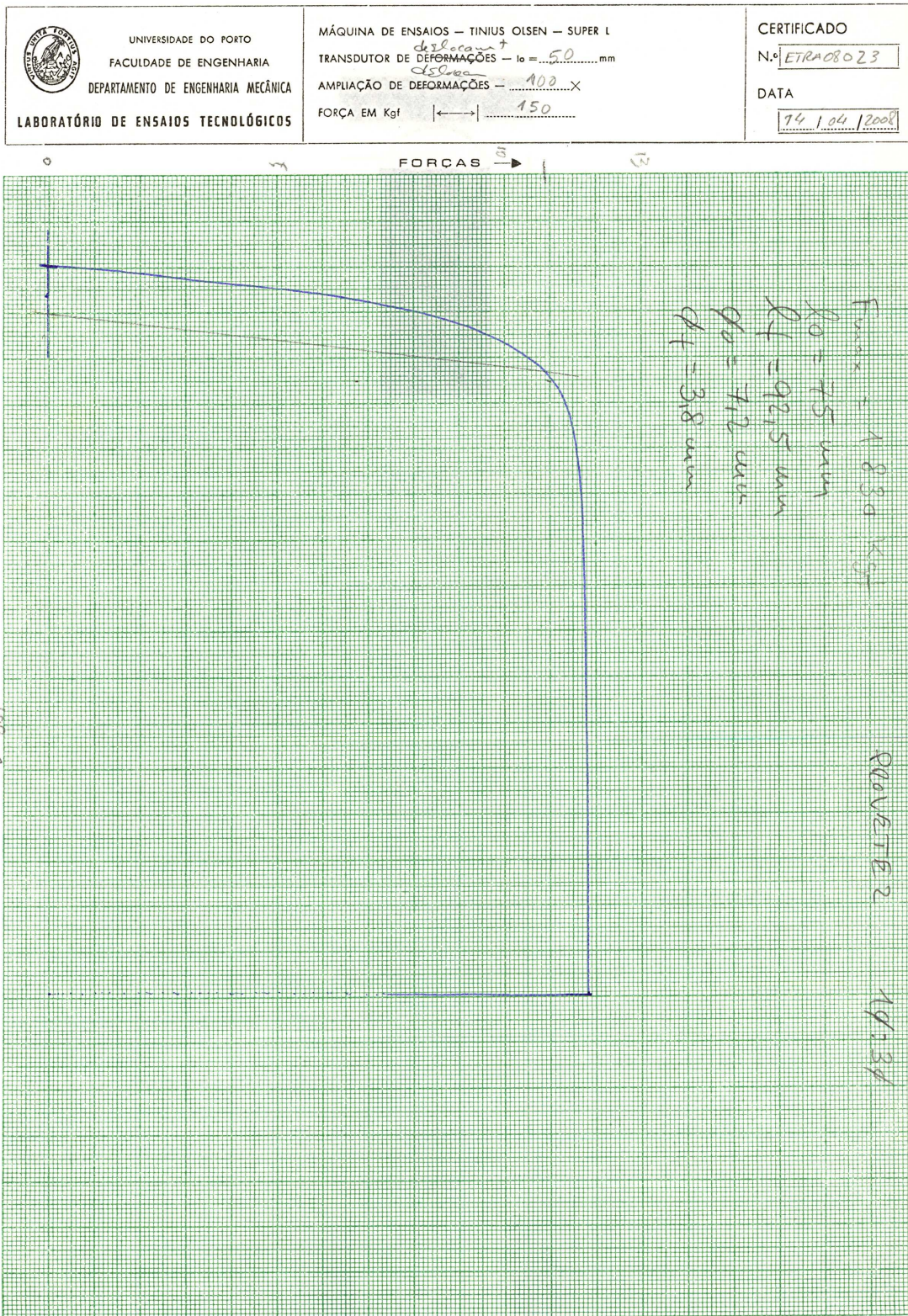
;

## 6 Referências

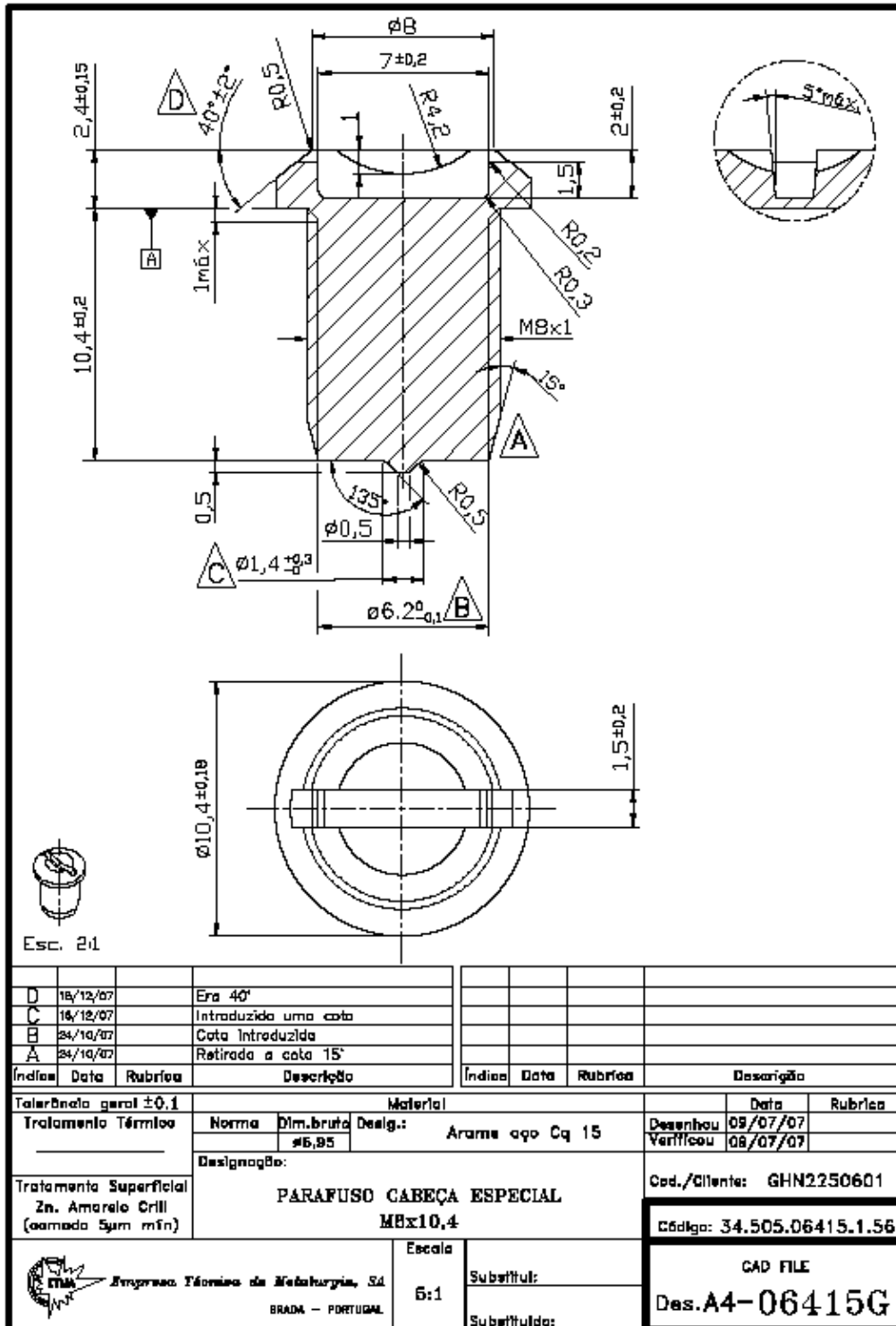
- [Yang 2002] D.Y. Yang, D.G Ahn, C.H. Lee, C.H. Park, T.J. Kim, “Integration of CAD/CAM/CAE/RP for the development of metal forming process”, *Journal of Materials Processing Technology* 125-126, pp. 26-24, 2002
- [Rodrigues 2005] Rodrigues, Jorge, and Paulo Martins. *Tecnologia Mecânica - Vol.2*. Lisboa: Escolar editora, 2005.
- [Wright1976] Wright, R. Thomas, & Jensen, Thomas R. (1976) *Manufacturing – Material Processing, Management, Careers*, Illinois: The Goodheart-Willcox Company, Inc. pp 43-52.
- [Makinouchi 2001] A. Makinouchi, “Recent developments in sheet metal forming simulation”, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, Mori (ed.), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 2651 822 6, pp. 3-10, 2001
- [Park 2006] K.S. Park, Chester J. VanTyne, Y.H. Moon, “Process analysis of multistage forging by using finite element method”, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188, 586–590, 2007
- [Teixeira 2005].Pedro M. Cardoso Teixeira, “‘Benchmarks’ experimentais e modelação numérica por elementos finitos de processos de conformação plástica”, *Dissertação de mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2005
- [Tisza 2007] Miklós Tisza, Zsolt Lukács and Gaszton G. Gál, “Integrated process simulation and die design in sheet metal forming” *International Deep-drawing Research Group*, 2007
- [Makinouchi 1992] "Static-explicit time integration scheme in elasto-plastic finite element method to simulate sheet metal forming processes"- *Computational mechanics* 92 - theory and application, Conference Proceedings, December 17-22,1992, Hong Kong
- [Davim1992] Davim, J., and A. Magalhães. *Ensaio Mecânicos E Tecnológicos*. Aveiro: Estante Editora, 1992
- [Santos 1993] Abel Dias dos Santos, “Tool descriptions and contact strategies in static explicit FEM for simulation of 3-D sheet metal forming processes”, *Ph.D. Thesis, Materials fabrication laboratory – Riken Institute, Saitama, Japan*, 1993
- [Schuler 1998] Schuler, GmbH. *Metal Forming Handbook*. Berlin: Springer, 1998.
- [Rockfield 2005] Rockfield Software limited, *ELFEN Explicit user manual, version 3.8*, 2005
- [ABAQUS] *ABAQUS Explicit user manual, version 6.7*

## **Anexos**

## Anexo A – Gráfico obtido pelo ensaio de tracção do aço cq15



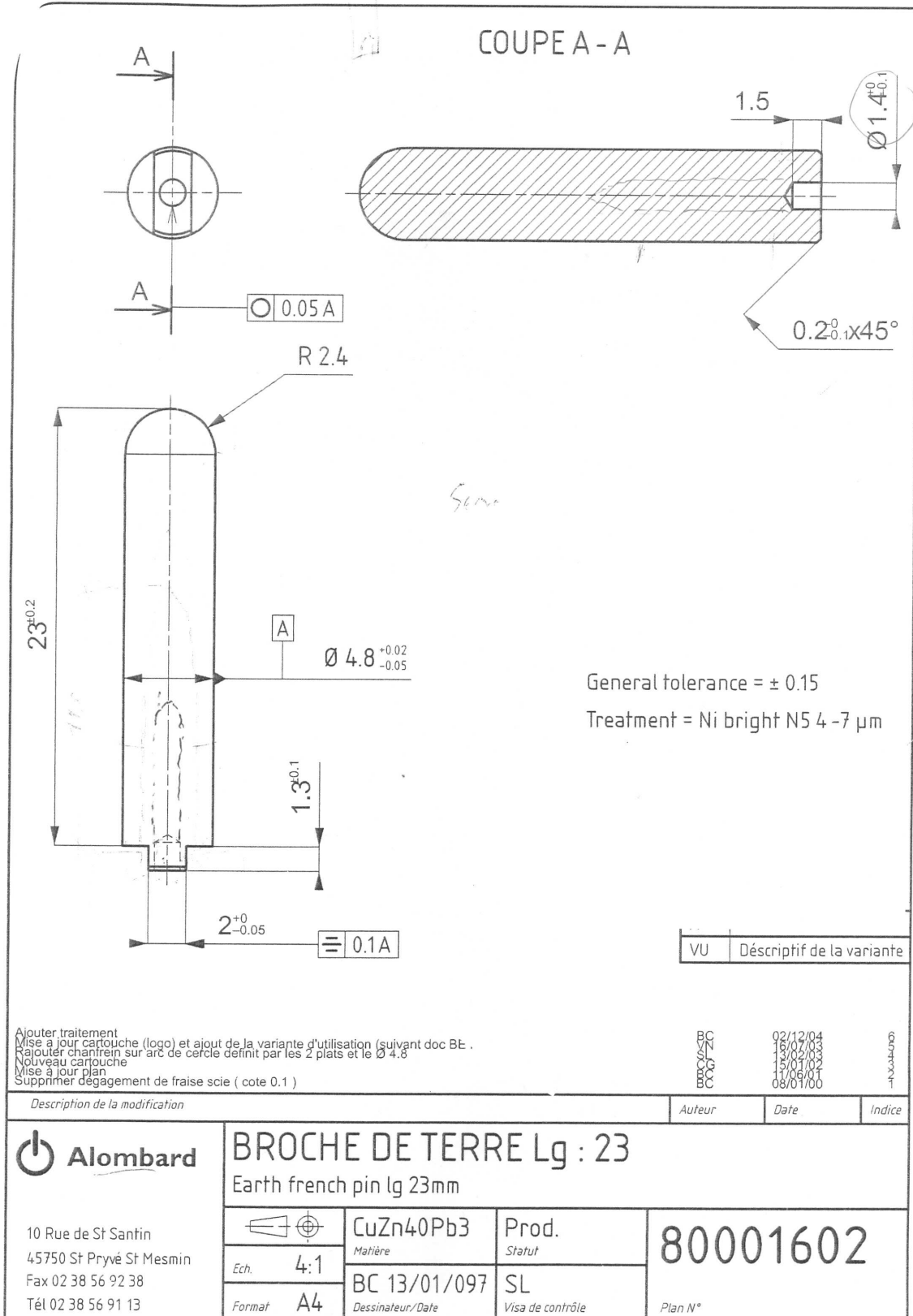
## Anexo B – Desenho técnico do Parafuso Cabeça Especial M8x10,4



MOD. 009/01.2



## Anexo D - Pino de terra francês 4,8x23







## **Anexo G – Características da prensa Carlo Salvi, modelo 550(catálogo Carlo Salvi)**



Número de matrizes	1
Número de punções	2
Mín e Máx Diámetro arame	2-5 mm
Máx Comprimento de haste	50 mm
Máx Comprimento de corte	65 mm
Diámetro máx de cabeça	10 mm
Velocidade máx	500 pçs/min
Máx Tonelagem de corte	1.500 daN
Máx Tonelagem de estampagem	11.000 daN
Peso da máquina	4.500 kg
Curso extração lado punção	8 mm
Máx tonelgam extração lado punção	550 daN
Potência instalada	6 Kw
Dimensões	3.000x1.500x2.000 h mm

### *EQUIPAMENTO STANDARD*

- Segurança com bloqueio de ar
- Sistema de accionamento com duas mãos
- Controle de velocidade com frequência variável
- Alimentação pneumática do arame
- Corte de alimentação do ar automática
- Unidades de deslocamento e corte de came positiva
- Dois jogos de endereçador de arame, um horizontal e um vertical
- Sistema de lubrificação duplo com filtro e recuperação do lubrificante
- Compartimento para pino de expulsão
- Preparada para equipamento de monitorização na alimentação
- Abafador de ruídos
- Lâmpadas na área de ferramentas

### *OPCIONAIS DISPONÍVEIS SOBRE REQUISIÇÃO*

- Pino extractor só na segunda punção
- Pinos extractores na primeira e segunda punção
- Detector de alimentação para arame curto
- Troca rápida na expulsão dos comes
- Sistema de segurança na alimentação do arame contra rupturas
- Troca no fim do fio de arame
- Tanque de recuperação de óleo
- Tanque de ar comprimido

## Anexo H – Características da prensa MORONI MB 765 (catálogo Moroni)



### MB 765

One station for wire feeding  
 One station for wire shearing  
 Five deformation units  
 One unit of four transfer stations

#### Production characteristics

	MB 764	MB 765
Dies	n. 4	n. 5
Pressure force at 13° from dead center	KN 550	KN 550
Power of main motor	kW 18,5	kW 22
Rotation Speed max ÷ min with constant torque	n. 260÷150	n. 230÷150
	<b>Optional</b> n. 190÷120	n. 190÷120
Max cut-off diameter for material: N/mm <sup>2</sup>	400 mm 9,8 500 mm 8,3 700 mm 7,3	400 mm 9,8 500 mm 8,3 700 mm 7,3
Max Length of blank	mm. 80	mm. 80
Min Length under head	mm. 10	mm. 10
	<b>Optional</b> mm. 5	mm. 5
Max Length Under Head	mm. 60	mm. 60
Ejection from dies	mm. min. 8 max. 67	mm. min. 8 max. 67
	<b>Optional</b> mm. min. 4 max. 58	mm. min. 4 max. 58
Positive ejection from punches	mm. 20	mm. 20
Admitted diameter with open fingers during transfer unit return phase	mm. 18	mm. 18

#### Tools Dimensions

	MB 764	MB 765
Dies diameter	mm. 50	mm. 50
	<b>Optional</b> mm. 55	mm. 55
Length of dies	mm. 80	mm. 80
Diameter of stationary punches	mm. 45	mm. 45
Diameter of moving punches	mm. 38	mm. 38
Punches length	mm. 76	mm. 76
Diameter of shearing bushes	mm. 40 ÷ 30	mm. 40 ÷ 30

