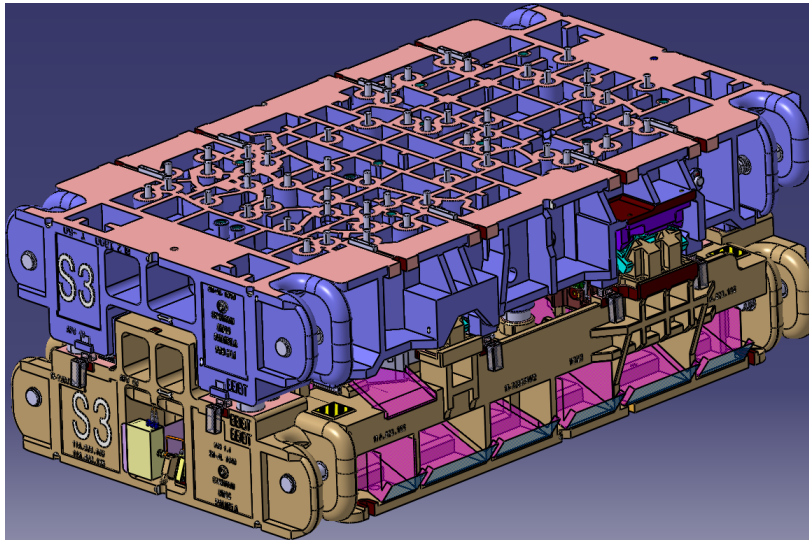


RICARDO JOSÉ  
PEREIRA  
GONÇALVES

**VALIDAÇÃO DE PROJETOS  
USANDO ANÁLISE POR  
ELEMENTOS FINITOS DO CATIA V5**



Relatório de Dissertação do Mestrado em Engenharia  
de Produção

**ORIENTADORES**

Doutor Aníbal Jorge de Jesus Valido

Doutor Paulo Jorge Pires Moita

fevereiro de 2021

RICARDO JOSÉ  
PEREIRA  
GONÇALVES

**VALIDAÇÃO DE PROJETOS  
USANDO ANÁLISE POR  
ELEMENTOS FINITOS DO CATIA V5**

**JÚRI**

*Presidente:* Doutor José Filipe Castanheira  
Pereira Antunes Simões, Instituto Superior Técnico

*Orientador:* Doutor Aníbal Jorge de Jesus Valido,  
Instituto Superior Técnico

*Vogal:* Doutor Ricardo António Lamberto Duarte  
Cláudio, Instituto Superior Técnico

fevereiro de 2021

# Resumo

O método dos elementos finitos é uma das técnicas numéricas mais usadas para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em estruturas. Ainda há a noção de que esta técnica numérica é pouco acessível, requerendo uma grande especialização e consequente investimento na formação dos utilizadores, para ser usada corretamente.

De modo a tornar o uso desta técnica mais acessível, tem sido feito um grande investimento por parte das empresas criadoras destes softwares no que diz respeito à interface com o utilizador e à integração das ferramentas de análise com os softwares de design paramétricos.

Neste documento fez-se uma pesquisa sobre o estado da arte da tecnologia dos elementos finitos e sobre a sua aplicação à indústria de ferramentaria. Fez-se um estudo de dois casos dentro da empresa VW Autoeuropa relacionados com a análise estrutural de duas ferramentas de estampagem e retiraram-se as respetivas conclusões relativas a esses mesmos casos. É feita uma comparação crítica entre os valores obtidos das ferramentas não conformes, e os valores obtidos das ferramentas conformes, com o intuito de compreender o funcionamento e a capacidade do módulo FMD.

**Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos; Indústria da ferramentaria; Tensões; Deslocamentos.**

# Abstract

Finite elements method is one of the most used numerical techniques to calculate displacements, deformations, and tensions on structures. There is still the idea that this technique isn't easily accessible since it requires major specialization and therefore major investment on the formation of users, to be used correctly.

In order to make this technique more accessible, there has been made a major investment by companies that created this software with regards to the user interface and the integration of analysis tools with the parametric design software.

This document contains the state of art regarding finite elements method technology and its applications to the tooling industry. Two study cases have been made inside the company VW Autoeuropa related to two stamping dies and its conclusions are here collected and demonstrated. The results obtained from both non-complaint stamping dies are compared with the results obtained from the complaint stamping dies, with the objective to understand the mechanics and the ability of FMD module.

**Keywords: Finite Elements Method; Tool makers industry; Tensors; Displacements.**

# Agradecimentos

Ao Professor Doutor Aníbal Valido (ESTS/IPS), pela acompanhamento proporcionado durante o todo o percurso, mostrando-se sempre disponível para ajudar e apoiar quando necessário.

Ao Professor Doutor Paulo Moita (ESTS/IPS) pela disponibilidade demonstrada durante as revisões da dissertação

Aos meus amigos e colegas de curso que sem eles a experiência não teria sido a mesma, mantendo a positividade e o espírito de equipa sempre acessos, mesmo nos tempos mais difíceis.

À minha família, pelo apoio incansável e confiança demonstrada em mim e por me fazerem ver aquilo que realmente importa na vida, mesmo nas alturas mais complicadas.

Ao meu irmão Alexandre Gonçalves, pela motivação e determinação que passa aos que o rodeiam.

À minha mãe Teresa Pereira, que sempre acreditou em mim e me deu forças para continuar, mesmo quando não o merecia.

Finalmente, à minha namorada Catarina Pereira, pelo apoio, pela paciência, pelas horas de estudo passadas em conjunto, pelos bons e maus momentos, mas acima de tudo pela capacidade incrível de me fazer acreditar em mim próprio.

# Índice

Resumo .....	iii
Abstract .....	iv
Agradecimentos .....	v
Índice .....	vi
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Siglas e Acrónimos .....	xi
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Âmbito e Objetivo do trabalho .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Estrutura da Dissertação .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. O Método dos Elementos Finitos .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Pesquisa Bibliográfica .....</b>	<b>7</b>
1.4.1. <i>Pinos de Esforço .....</i>	<i>7</i>
1.4.2. <i>Forjamento.....</i>	<i>8</i>
1.4.3. <i>Extrusão.....</i>	<i>10</i>
1.4.4. <i>Extrusão combinada com Forjamento.....</i>	<i>13</i>
1.4.5. <i>Elementos Finitos aplicados ao processo de laminação .....</i>	<i>14</i>
1.4.6. <i>Processo de Conformação superplástica de uma chapa de liga Ti-6Al-4V... ..</i>	<i>15</i>
1.4.7. <i>Processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio.....</i>	<i>17</i>
1.4.8. <i>Análise hiper elástica realizada com utilização de elementos finitos poligonais .....</i>	<i>19</i>
<b>Capítulo 2 - Enquadramento UNCC.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. A Unidade de Negócios Cunhos e Cortantes da VW AutoEuropa .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Construção de uma Ferramenta de Estampagem .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3. Ferramenta de Estampagem .....</b>	<b>25</b>
2.3.1. <i>Estrutura .....</i>	<i>28</i>
2.3.2. <i>Mecanismo .....</i>	<i>29</i>
2.3.3. <i>Processos de fabrico .....</i>	<i>30</i>
<b>Capítulo 3 - .....</b>	<b>31</b>
<b>Casos de estudo realizados na empresa .....</b>	<b>31</b>

<b>3.1. Estudo dos esforços provocados pelos cilindros pneumáticos .....</b>	<b>31</b>
3.1.1. Carregamento, Condições de Fronteira e Tipos de Forças.....	33
3.1.2. Resultados Obtidos: Tensões.....	35
3.1.3. Resultados Obtidos: Deslocamentos.....	37
3.1.4. Resultados Obtidos: Deformada.....	39
3.1.5. Resultados Obtidos: Tensões principais.....	41
<b>3.2. Estudo da força provocada pelo peso próprio da ferramenta .....</b>	<b>44</b>
3.2.1. Carregamento, Condições de Fronteira e Tipos de Forças.....	45
<b>Capítulo 4 - .....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusões e propostas de trabalhos futuros .....</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>51</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 – Ferramenta de Estampagem (Fonte – VW AutoEuropa) .....	1
Figura 2 – Ferramenta inferior (Fonte – VW AutoEuropa).....	2
Figura 3 – Ferramenta Superior (Fonte – VW AutoEuropa) .....	2
Figura 4 – Análise de tensões (Fonte – VW AutoEuropa).....	3
Figura 5 – Linha temporal do Método dos Elementos Finitos .....	5
Figura 6 – Comparação de Resultados (à esquerda secção da ferramenta sem pino de esforço, à direita secção da ferramenta com pino de esforço) (Fonte: Koç e Arslan, 2003).....	8
Figura 7 – Etapas de forjamento (Fonte: Soranansri et al, 2017).....	8
Figura 8 – Resultados da análise realizado pelo método dos elementos finitos (Fonte: Soranansri et al, 2017).....	9
Figura 9 – Temperatura na matriz no final do primeiro golpe de forjamento – mín 199°C, máx 669°C (Fonte: D’Addona e Antonelli, 2018).....	10
Figura 10 – Vida útil devido à deformação plástica em função do número de ciclos repetidos consecutivos (Fonte: D’Addona e Antonelli, 2018).....	10
Figura 11 – Tubo MPE usado em automóveis (Fonte: Fang, et al, 2020).....	11
Figura 12 – Modelo de elementos finitos dos três orifícios de extrusão (Fonte: Fang, et al, 2020).....	11

Figura 13 – Matriz original (esquerda); matriz otimizada (direita) (Fonte: Fang, et al, 2020). .....	12
Figura 14 – Matriz sem cavidade (esquerda), matriz com cavidade (direita) (Fonte: Das et al, 2014). .....	12
Figura 15 – Distribuição da extensão efetiva num dos casos considerados (Fonte: Das et al, 2014). .....	13
Figura 16 – Processo de extrusão combinado com forjamento (Fonte: Nayak e Sahoo, 2019). .....	13
Figura 17 – Adaptadores de chave de caixa (Fonte: Nayak e Sahoo, 2019). .....	14
Figura 18 – Zonas de distorção e zonas mortas (Fonte: Nayak e Sahoo, 2019). ..	14
Figura 19 – Modelo por elementos finitos (Fonte: Azizoğlu et al, 2017). .....	15
Figura 20 – Força de separação – rolos elásticos vs rolos rígidos (Fonte: Azizoğlu, et al, 2017). .....	15
Figura 21 – Diferentes estágios do processo de conformação (Fonte: Balasubramanian et al, 2013). .....	16
Figura 22 – Modelo dos elementos finitos (Abaqus) (Fonte: Balasubramanian et al, 2013). .....	16
Figura 23 – Processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio (Fonte: Boutenel et al, 2018). .....	17
Figura 24 – Processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio sem recurso a mandril (Fonte: Boutenel et al, 2018). .....	17
Figura 25 – Malha de elementos finitos usada na simulação do processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio com recurso a mandril (Fonte: Boutenel et al, 2018). .....	18
Figura 26 – Influência do ângulo de entrada na matriz na força de estiramento (Fonte: Boutenel 2018). .....	18
Figura 27 – Influência da espessura relativa (relação entre o raio exterior e a espessura) na deformação do tubo (Fonte: Boutenel et al, 2018). ..	19
Figura 28 – Discretizações de uma placa com um furo central usando elementos triangulares e poligonais sujeita à tração (Fonte: Rajagopal et al, 2018). .....	19
Figura 29 – Discretizações e deformadas de uma placa em L usando elementos triangulares e elementos poligonais (Fonte: Rajagopal et al, 2018). .....	20
Figura 30 – Análise de uma placa quadrada sujeita a compressão devida a um	



deslocamento prescrito na face superior (Fonte: Rajagopal et al, 2018).....	20
Figura 31 – Departamentos e Equipas dentro da UNCC (Fonte VW AutoEuropa)	23
Figura 32 – Deformação dos materiais (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”)..	26
Figura 33 – Operação de Embutissagem (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”) .....	27
Figura 34 – Operação de Corte (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”) .....	27
Figura 35 – Operação de Dobragem (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”) .....	28
Figura 36 – Posição de Trabalho (Fonte – VW AutoEuropa) .....	29
Figura 37 – Posição de Descanso (Fonte – VW AutoEuropa) .....	29
Figura 38 – Ferramenta em estudo (Fonte – Construção própria) .....	31
Figura 39 – Vista inferior da ferramenta (Fonte – Construção própria) .....	32
Figura 40 – Cor azul - Prensa; Cor verde – Base de Fundição; Cor cinzento – Cilindros (Fonte – Construção própria) .....	32
Figura 41 – Forças (Fonte – Construção Própria) .....	33
Figura 42 – Apoios (Fonte – Construção Própria) .....	33
Figura 43 – Propriedades da Matriz (Fonte – Construção Própria).....	34
Figura 44 – Faces onde foram aplicadas as forças (Fonte – Construção própria)	34
Figura 45 – Von Misses para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) .	35
Figura 46– Von Misses para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) ..	35
Figura 47 – Von Misses para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria) .....	36
Figura 48 – Von Misses para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria) .....	36
Figura 49 – Deslocamentos para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) .....	37
Figura 50 – Deslocamentos para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) .....	37
Figura 51 – Deslocamentos para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria) .....	38
Figura 52 – Deslocamentos para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria) .....	38

Figura 53 – Deformada para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) ..	39
Figura 54 – Deformada para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) ..	39
Figura 55 – Deformada para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)	40
Figura 56 – Deformada para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)	40
Figura 57 – Tensor para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) .....	41
Figura 58 – Tensor para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria) .....	41
Figura 59 – Tensor para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria) .....	42
Figura 60 – Tensor para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria) .....	42
Figura 61 – Ferramenta Progressiva (Fonte – Construção Própria).....	44
Figura 62 – Apoios (Fonte – Construção Própria) .....	45
Figura 63 – Força distribuída (Fonte – Construção Própria) .....	46
Figura 64 – Propriedades do Cabeçote de Fundição (Fonte – Construção Própria) .....	46
Figura 65 – Von Misses (Fonte – Construção Própria).....	47
Figura 66 – Deslocamentos (Fonte – Construção Própria) .....	47
Figura 67 – Deformada (Fonte – Construção Própria).....	48
Figura 68 – Tensor (Fonte – Construção Própria) .....	48

# Lista de Siglas e Acrónimos

MEF Método dos Elementos Finitos

UNCC Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes

CAD Computer Aided Design

MPE Tubo Multiorifícios



# Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo faz-se a introdução ao tema desta dissertação com a descrição do seu âmbito e do seu objetivo. Apresenta-se de seguida a estrutura do documento e finalmente é feita uma revisão bibliográfica sobre a utilização da análise por elementos finitos em vários processos.

## 1.1. Âmbito e Objetivo do trabalho

O presente trabalho de dissertação foi proposto no âmbito da unidade curricular de Projeto Final III, que faz parte do plano curricular do curso de Mestrado em Engenharia de Produção da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal.

A Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes (UNCC) da empresa Volkswagen Autoeuropa contempla um departamento de CAD onde estão inseridas equipas, *Die Designers*, responsáveis pelo desenho das ferramentas de estampagem. Estas equipas recebem o projeto e executam os desenhos de fabrico das ferramentas recorrendo ao software CATIA V5. Nas figuras 1-3 apresentam-se alguns exemplos de ferramentas.

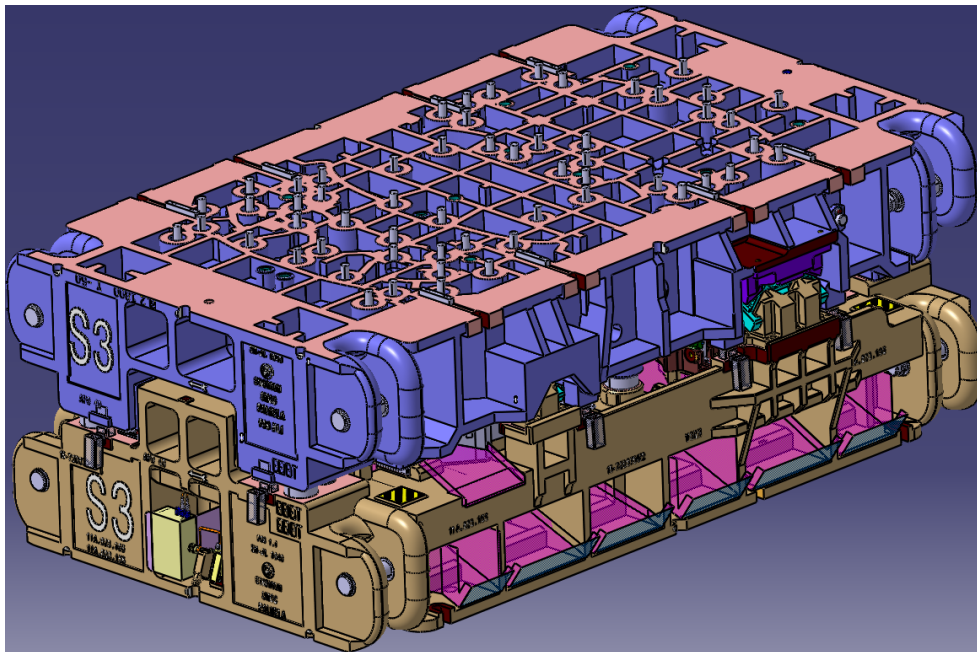


Figura 1 – Ferramenta de Estampagem (Fonte – VW AutoEuropa)

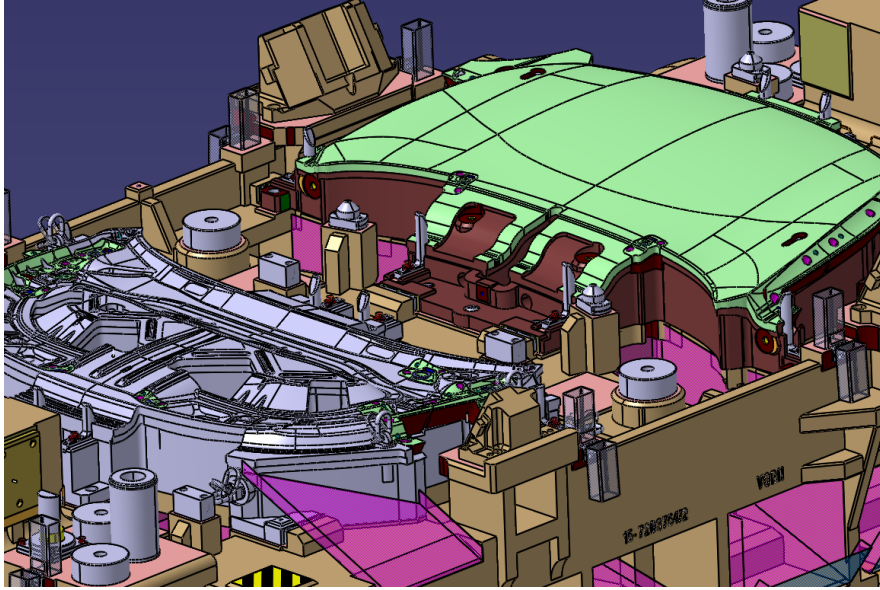


Figura 2 – Ferramenta inferior (Fonte – VW AutoEuropa)

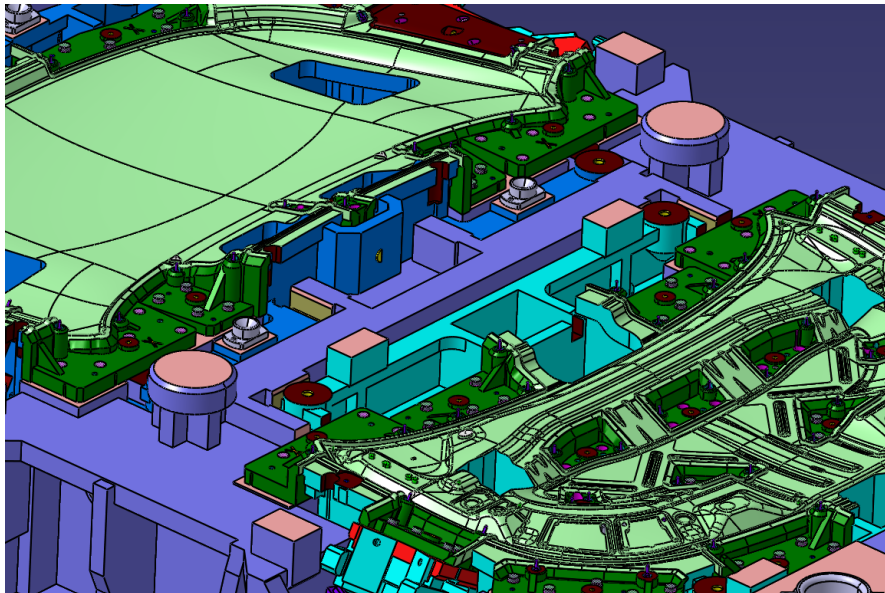


Figura 3 – Ferramenta Superior (Fonte – VW AutoEuropa)

Como se pode verificar, estas ferramentas são constituídas por centenas de componentes, os quais entram em contacto e, conseqüentemente exercem forças entre si, durante o funcionamento da ferramenta. Os esforços resultantes destas forças, provocam tensões e deformações nos diferentes componentes, que até então, não eram alvo de qualquer estudo ou análise.

Deste modo identificou-se uma oportunidade de utilização/implementação de um módulo do CATIA V5 denominado “FMD – Finite Model Design”, com o objetivo de fazer a análise da resistência (análise estrutural) da ferramenta aos esforços a que está sujeita durante o seu funcionamento. O módulo é responsável pela geração avançada de malhas.

Este módulo do CATIA V5 utiliza o algoritmo de *Elfini*, que é um software de análise pelo método dos elementos finitos. A figura 4 apresenta um exemplo de análise de tensões num

componente estrutural

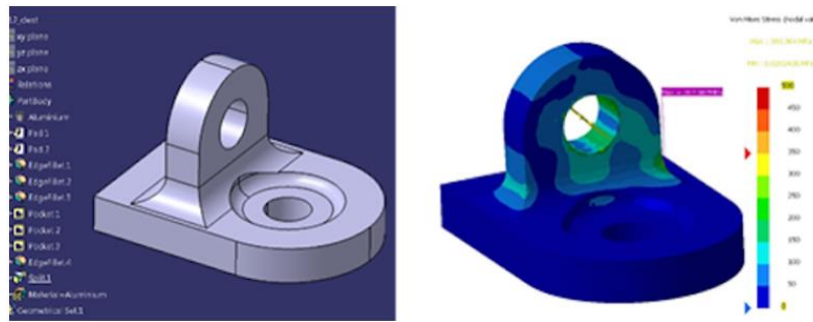


Figura 4 – Análise de tensões (Fonte – VW AutoEuropa)

Assim, o principal objetivo deste trabalho é fazer a análise estrutural das ferramentas através da utilização do método dos elementos finitos, durante a fase do projeto, de modo a identificar possíveis pontos críticos e não conformidades ao nível da sua resistência estrutural.

Os resultados obtidos foram apresentados na empresa, tendo-se evidenciado os problemas que foram resolvidos, bem como a contribuição desta metodologia para o trabalho das equipas de desenho de ferramentas

## 1.2. Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 faz-se a introdução ao tema da dissertação com a descrição do seu âmbito e dos seus objetivos. Apresenta-se a estrutura do documento e uma compilação de referências bibliográficas relevantes para o tema do Método dos Elementos Finitos e a sua aplicação em vários processos.

No capítulo 2 apresenta-se a unidade de negócio cunhos e cortantes da VW AutoEuropa, onde foi desenvolvido este trabalho. É feito o enquadramento do leitor com aquilo que são as atividades diárias nesta unidade da empresa, de maneira a esclarecer a necessidade e o impacto da implementação do módulo nos seus processos produtivos.

O capítulo 3 desenvolve as atividades que foram levadas a cabo dentro da empresa, o que compreende a definição dos problemas apresentados ao autor bem como as soluções avançadas pela equipa.

No capítulo 4 apresentam-se as conclusões do trabalho, bem como propostas de trabalhos futuros. É também feita uma abordagem autocrítica ao trabalho que foi desenvolvido.

### 1.3. O Método dos Elementos Finitos

Apresenta-se de seguida um resumo da história do Método dos Elementos Finitos desde a sua criação até às aplicações do dia a dia. A conceção do método remonta ao fim do século 17, início do século 18 com Leibniz em 1697 com o primeiro esboço de uma forma triangular elementar aplicado a funções de cálculo variacional. Schellbach em 1851 procedeu a estudos analíticos dessas funções, juntamente com Rayleigh em 1877. O estudo de elementos finitos foi sempre usado como uma ferramenta para resolver problemas matemáticos existentes na altura ou para complementar teorias de matemáticos anteriores, tal como a teoria do prato de Kirchoff que se baseia num modelo matemático de duas dimensões que é usado para determinar os esforços e deformações em pratos finos sujeitos a forças e momentos, à qual Ritz, em 1909, propôs um método variacional com base em elementos finitos. Mais tarde, o engenheiro Galerkin em 1915, publicou o seu artigo sobre o método dos elementos finitos para a elasticidade linear contínua, no entanto Ritz e Galerkin basearam-se ambos em tentativa-erro para obter os seus resultados. Courant em 1943 foi o primeiro a introduzir elementos finitos triangulares e retangulares para resolver o problema de torção de St. Venant de duas dimensões de uma barra prismática.



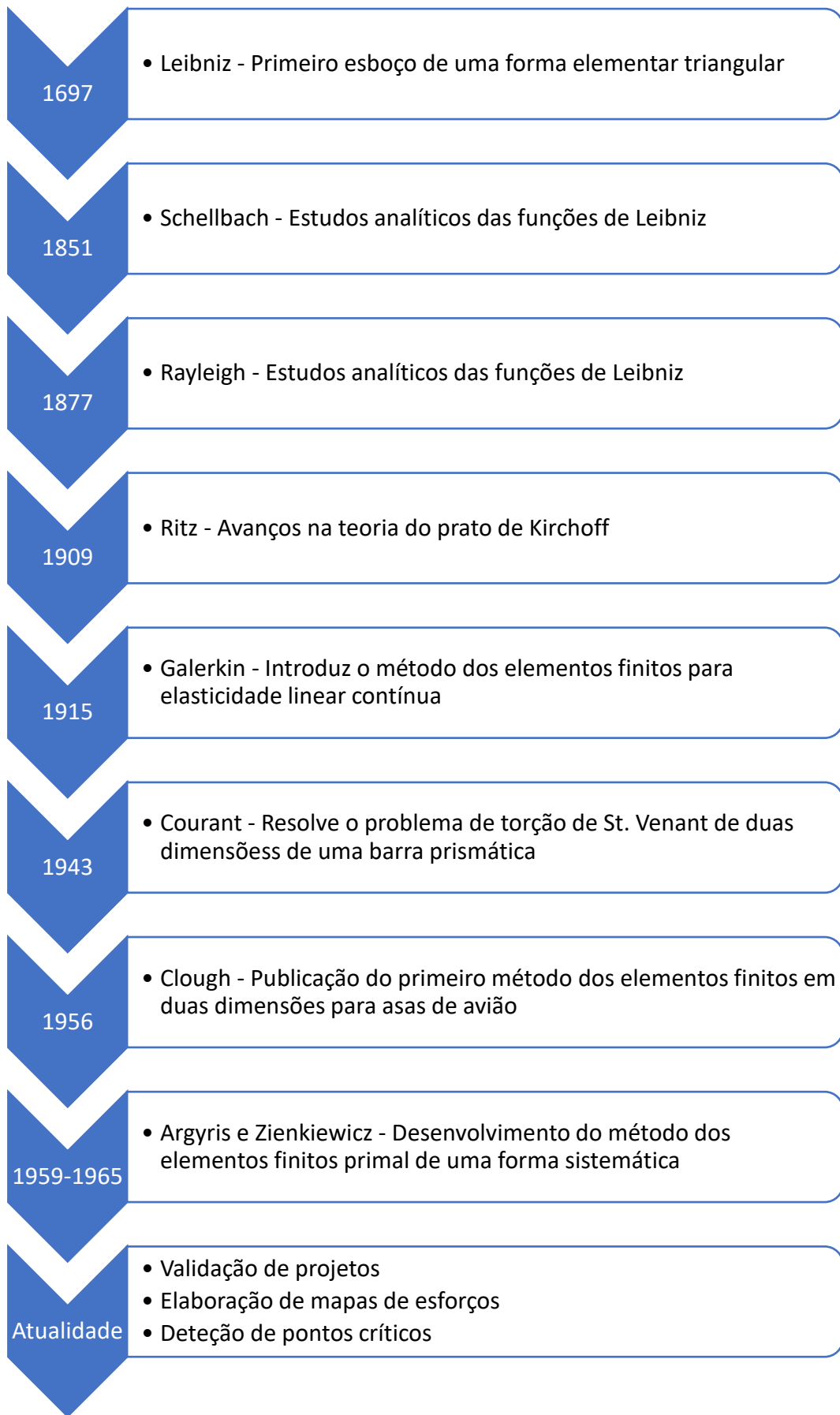


Figura 5 – Linha temporal do Método dos Elementos Finitos

Depois veio Clough e a sua equipa em 1956 com a publicação do primeiro método dos elementos finitos em duas dimensões para asas de avião. É de reforçar também a importância das escolas de Wilson, Melosh e Taylor que promoverem em Berkley a nova disciplina de “Engenharia Computacional”. Argyris e Zienkiewicz desde 1959 em Estugarda e desde 1965 em Swansea respetivamente, juntamente com Irons, desenvolveram o método dos elementos finitos de uma forma sistemática, através de classes hierárquicas de elementos finitos com diferentes topologias e com técnicas de abordagem para a mecânica dos sólidos e dos fluidos-

Graças ao estudo destes matemáticos e engenheiros é possível hoje em dia aceder a programas de computador capazes de resolver problemas mecânicos aplicados a peças reais do dia-a-dia, que permitem prever computacionalmente dados importantes relativos ao comportamento dessas peças e à sua resistência mecânica, nomeadamente, pontos de rutura e pontos críticos, mas também auxiliam no mapeamento de zonas de tensões, desde a tensão mínima à tensão máxima, criando ainda uma previsão da deformada.

O método dos elementos finitos disponibiliza diretamente deslocamentos dos pontos constituintes de cada nó de cada elemento. É com estes dados que, através de cálculos e simulações numéricas, são obtidos os valores das tensões, extensões e pontos críticos.

## 1.4. Pesquisa Bibliográfica

São inúmeras as referências bibliográficas ao método dos elementos finitos, as quais podem ser encontradas em várias obras que podem ser consideradas clássicas ou fundamentais, tais como, os livros de Zienkiewicz (1971), Hinton e Owen (1980), Crisfield (1986), Zienkiewicz e Taylor (1989), Bathe (1996), Cook e coautores (2002), entre outros. Neste subcapítulo apresenta-se uma pesquisa bibliográfica de artigos científicos previamente selecionados, no âmbito do método dos elementos finitos e a sua utilização em vários processos, onde se pretende transmitir as ideias principais dos mesmos, identificando o tema e as respetivas conclusões.

### 1.4.1. Pinos de Esforço

O aumento da vida de uma ferramenta de estampagem representa um dos maiores desafios que as ferramentarias da indústria automóvel enfrentam nos dias de hoje. A vida de uma ferramenta pode ser brevemente definida pelo número de peças conformes que esta consegue produzir com os mesmos componentes. Existem vários modos de falha que podem surgir ao nível do desgaste, fadiga mecânica, fadiga térmica ou deformação plástica. Os fatores que contribuem para estes modos de falha são a temperatura da ferramenta, as propriedades mecânicas do material que compõem a ferramenta, o acabamento superficial da ferramenta, o tipo de equipamento usado ou a carga usada durante o funcionamento. Com o objetivo de a vida útil das ferramentas de estampagem são implementados pinos de esforço (*stress pins*) na sua construção. De um modo geral, os pinos são colocados na ferramenta inferior e servem para ajudar a absorver o impacto da ferramenta superior. Os trabalhos de Koç e Arslan (2003) e Killmann e Merklein (2021) são exemplos de aplicação do método dos elementos finitos à análise estrutural de ferramentas com pinos de esforço. Em ambos, a conclusão a que chegaram é que a utilização de pinos de esforço reduz o desgaste da ferramenta, aumenta a sua resistência à fadiga, contribuindo deste modo para o aumento da sua vida útil.

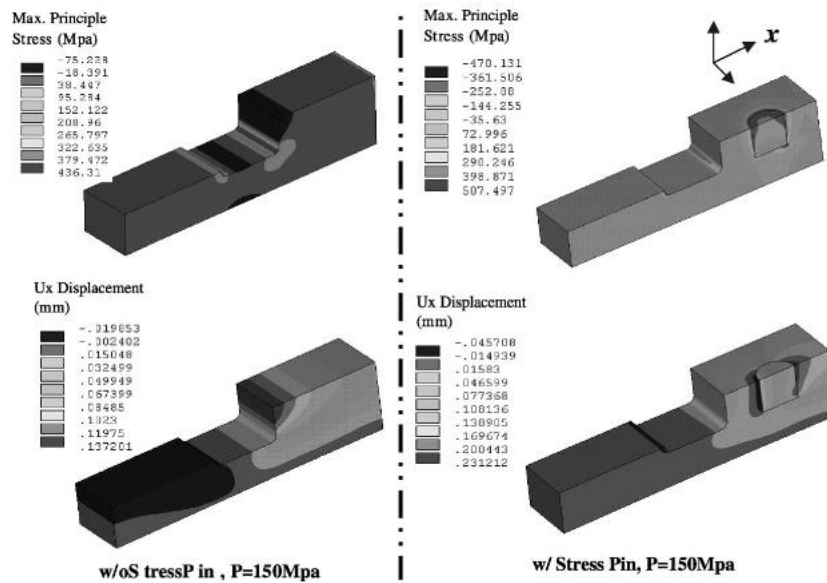


Figura 6 – Comparação de Resultados (à esquerda secção da ferramenta sem pino de esforço, à direita secção da ferramenta com pino de esforço) (Fonte: Koç e Arslan, 2003).

### 1.4.2. Forjamento

No processo de forjamento, a vida útil da ferramenta é um dos fatores mais importantes, afetos ao custo de produção. Soranansri et al (2019) apresentam um novo desenho da parte superior da ferramenta de forjamento que resulta num aumento considerável da vida da ferramenta durante o processo de forjamento de uma engrenagem cônica. O processo é constituído por duas operações: a pré-forma e o acabamento. A figura 7 representa as etapas de forjamento.

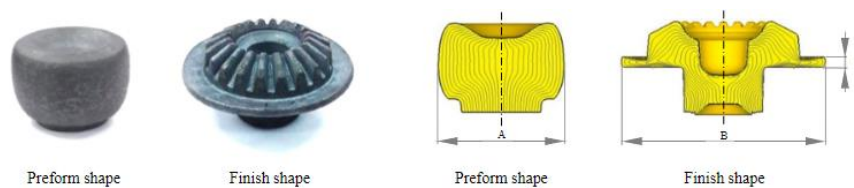


Figura 7 – Etapas de forjamento (Fonte: Soranansri et al, 2017).

Verificou-se que na etapa final da operação, a parte superior da ferramenta fraturava nos pequenos chanfros devido à fadiga mecânica. De maneira a eliminar o problema a parte superior da ferramenta foi redesenhada, tendo sido analisada através do método dos elementos finitos.

O novo projeto foi testado na prática, tendo-se verificado um aumento de 17 vezes da vida útil do equipamento, comparativamente ao anterior projeto. Na figura 8 estão representados os resultados da análise de tensões da ferramenta no projeto inicial e no novo projeto. No projeto final verificou-se uma redução de tensões de 48,7% na zona onde ocorria a fratura, relativamente

ao projeto original.

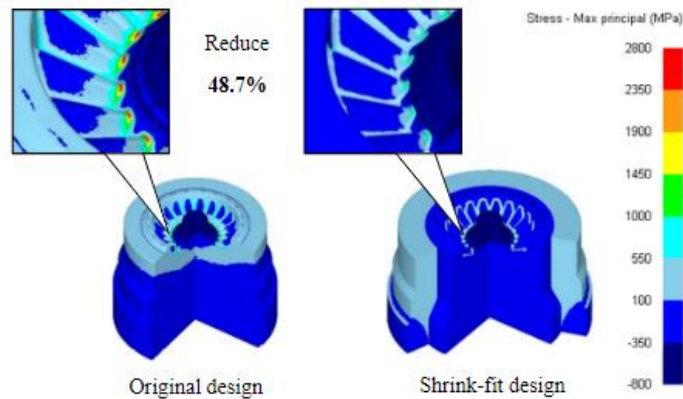


Figura 8 – Resultados da análise realizado pelo método dos elementos finitos (Fonte: Soranansri et al, 2017).

Um outra aplicação do método dos elementos finitos é a análise do escoamento do material em processos de forjamento a quente, para identificar potenciais defeitos. Estas análises consideram normalmente modelos isotérmicos uma vez que a velocidade da prensa é elevada.

Sae-Eaw et al (2017) analisaram, utilizando o método dos elementos finitos, o escoamento do material num processo de forjamento a quente para a produção de juntas universais. Neste estudo não foi considerada a condição de temperatura constante. De modo a tornar o modelo fiável, foram determinados coeficientes de transferência de calor adequados para cada etapa do processo. Do estudo concluiu-se que a transferência de calor durante as etapas de conformação afetou o escoamento do material e o modelo de simulação não isotérmica considerado, tendo sido possível identificar um defeito de folga insuficiente no início do processo.

Estimar a vida útil de uma ferramenta de forjamento a quente pode ser desafiante, no sentido em que é difícil identificar e quantificar todos os fatores envolvidos no processo de desgaste das ferramentas. Contudo, uma estimativa fidedigna da vida útil de uma ferramenta em fase de design de produto pode ser uma informação crucial para os vendedores e compradores deste produto, reduzindo os custos associados à manutenção corretiva e executando uma manutenção preventiva eficiente.

A estimativa da vida útil da matriz em processos de forjamento a quente depende de vários fatores, principalmente do desgaste e da deformação plástica induzida por efeitos térmicos (têmpera). D'Addona e Antonelli (2018) simularam numericamente utilizando o método dos elementos finitos, uma sequência de trabalho realista de forjamento repetido de uma peça de geometria simétrica da peça.

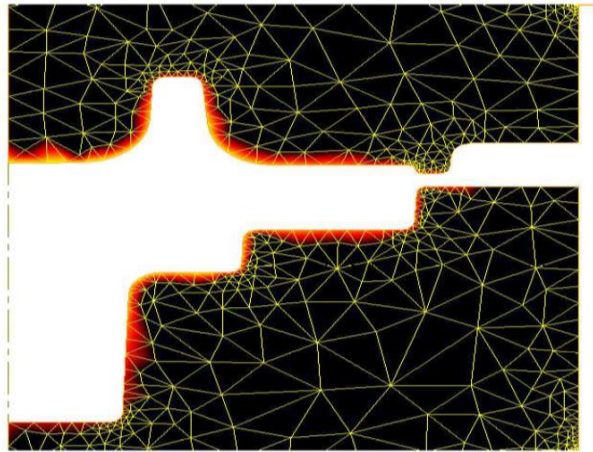


Figura 9 – Temperatura na matriz no final do primeiro golpe de forjamento – mín 199°C, máx 669°C (Fonte: D’Addona e Antonelli, 2018).

Os resultados obtidos demonstraram uma enorme variância entre valores de tempo de vida das ferramentas. Verificou-se ainda que é possível prever a vida da matriz usando a temperatura equivalente do primeiro golpe.

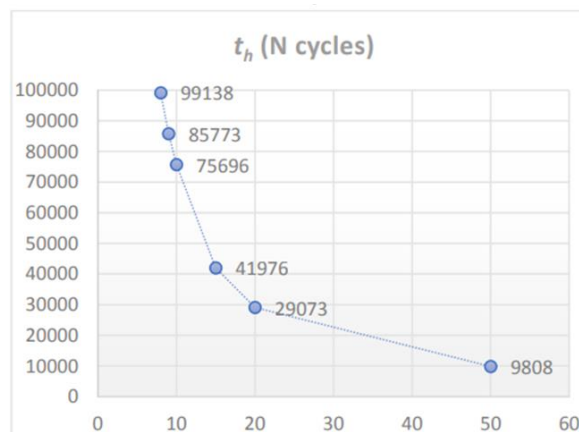


Figura 10 – Vida útil devido à deformação plástica em função do número de ciclos repetidos consecutivos (Fonte: D’Addona e Antonelli, 2018).

### 1.4.3. Extrusão

O projeto da matriz desempenha um papel crítico na produção de perfis de liga de alumínio, influenciando diretamente a qualidade dos produtos finais e a sua vida útil. Fang et al (2020) apresentam o projeto e a otimização de uma matriz para um processo de extrusão de um tubo multiorifícios (MPE) plano de parede fina (ver figura 11) recorrendo a simulações numéricas pelo método dos elementos finitos. Este tipo de tubos tem uma grande utilização na indústria automóvel.

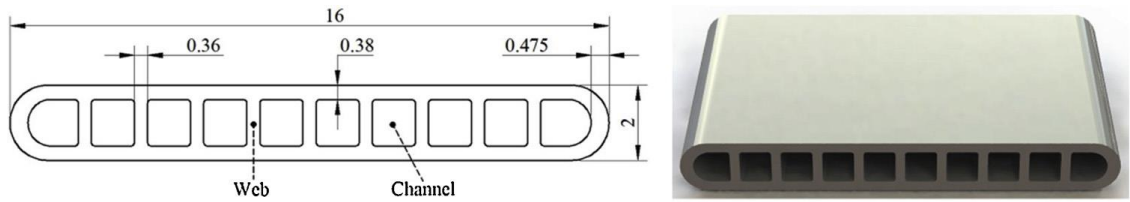


Figura 11 – Tubo MPE usado em automóveis (Fonte: Fang, et al, 2020).

Foram detetados defeitos nos tubos os quais foram associados ao projeto inicial da matriz. Através das simulações numéricas foi possível verificar que com a matriz original o tubo extrudido tinha uma distribuição de velocidade não uniforme ao longo da sua secção transversal e que dobrava para fora ao sair do orifício da matriz.

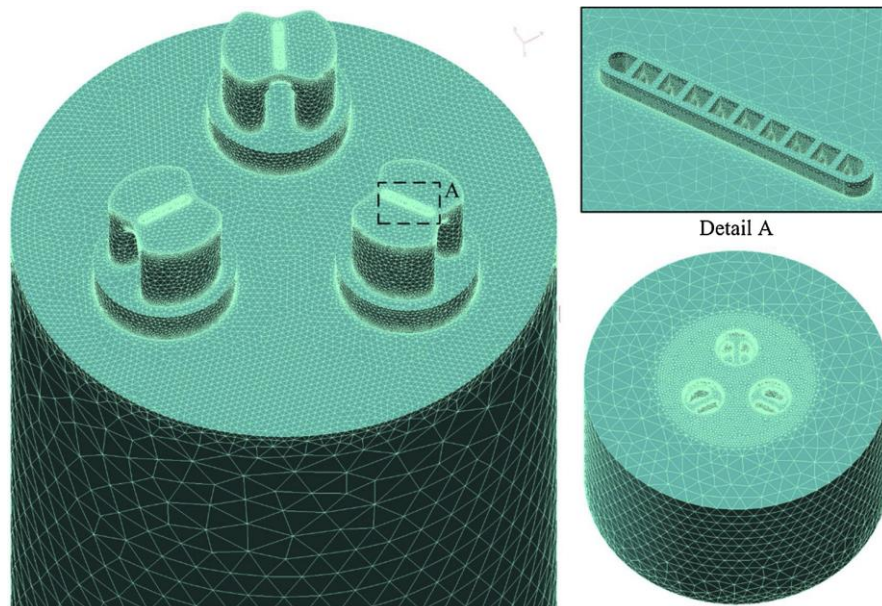


Figura 12 – Modelo de elementos finitos dos três orifícios de extrusão (Fonte: Fang, et al, 2020).

Um outro problema prendia-se com os elevados valores de concentração de tensões na matriz, o que causava a sua fissuração e consequente diminuição da vida útil. De modo a resolver estes problemas, foi proposto o redesenho da matriz e simular numericamente os seus processos de extrusão. Com base nas simulações efetuadas confirmou-se que a matriz otimizada exhibe melhor desempenho do que a original quer em termos de redução da tensão máxima na matriz (ver figura 13), quer no que diz respeito à diminuição da distorção dos produtos finais. Estes valores foram confirmados através de resultados experimentais de extrusão que indicaram que com a matriz otimizada, não só se obtinha um tubo de melhor qualidade, como a vida útil da matriz aumentava.

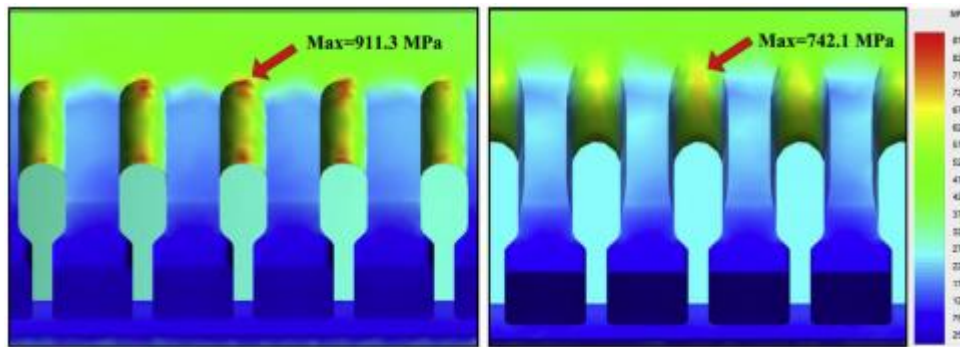


Figura 13 – Matriz original (esquerda); matriz otimizada (direita) (Fonte: Fang, et al, 2020).

Um outro exemplo da utilização do método dos elementos finitos na análise de um processo de extrusão é o apresentado por Ratnakar et al (2014) no qual o método dos elementos finitos é utilizado para estudar o efeito da posição dos furos na matriz, da inclusão de cavidades na matriz (die pockets) e da velocidade de extrusão, na força de extrusão e no comprimento do produto extrudido.

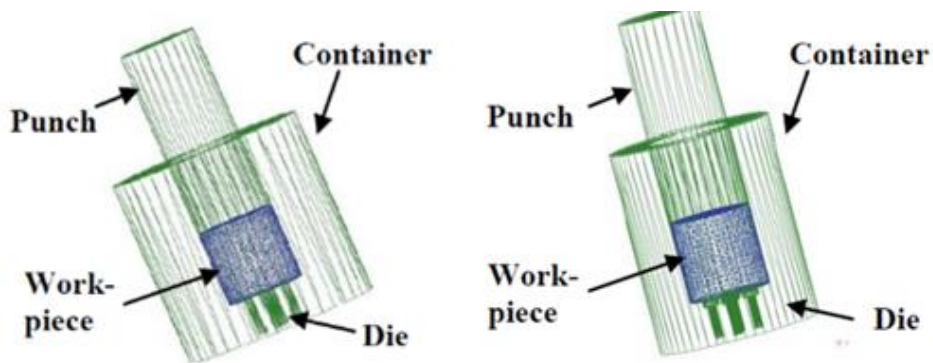


Figura 14 – Matriz sem cavidade (esquerda), matriz com cavidade (direita) (Fonte: Das et al, 2014).

Os autores verificaram que a força de extrusão aumenta com o aumento da velocidade de extrusão, mas que a inclusão das cavidades ajudava a reduzir a força de extrusão. Foi também possível verificar que a extensão efetiva depende dos parâmetros referidos anteriormente e que o comprimento do produto extrudido é mais uniforme quando são incluídas as cavidades na matriz. Concluíram também que a seleção de parâmetros do processo é baseada na qualidade exigida para o produto final.



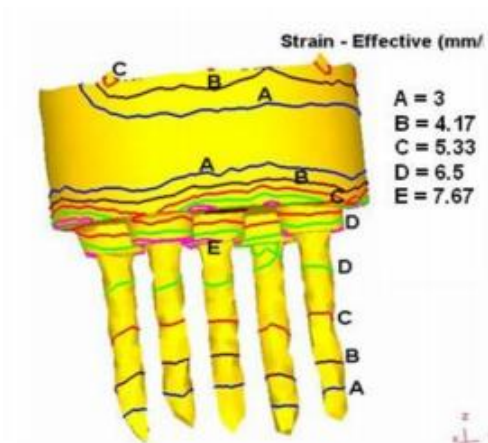


Figura 15 – Distribuição da extensão efetiva num dos casos considerados (Fonte: Das et al, 2014).

#### 1.4.4. Extrusão combinada com Forjamento

O processo combinado de extrusão-forjamento (figura 16) é utilizado para a produção de peças com geometria complexa que, usando outros processos de fabricação, como por exemplo, fundição seguida de maquinação.

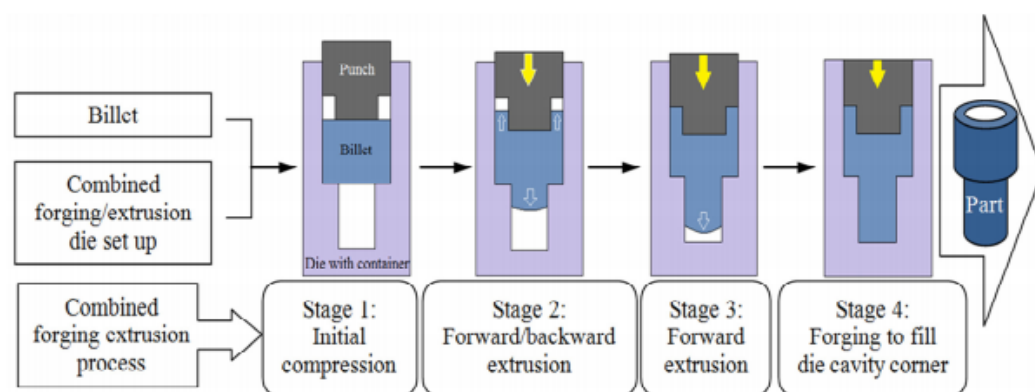


Figura 16 – Processo de extrusão combinado com forjamento (Fonte: Nayak e Sahoo, 2019).

No trabalho de Nayak e Sahoo (2019) este processo é utilizado para a produção de adaptadores de chave de caixa, representados na figura 17.

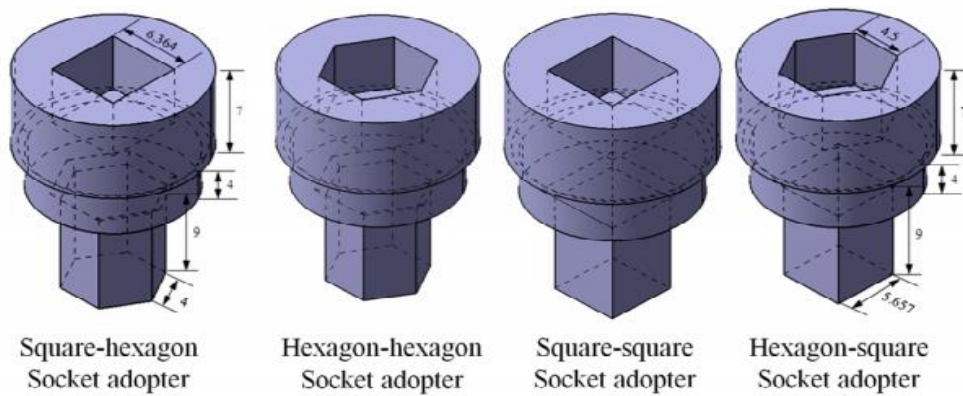


Figura 17 – Adaptadores de chave de caixa (Fonte: Nayak e Sahoo, 2019).

O método dos elementos finitos foi utilizado como ferramenta numérica para analisar o fluxo de material durante a produção. A figura 18 apresenta um dos padrões estudados, onde é possível identificar regiões de distorção e zonas mortas.

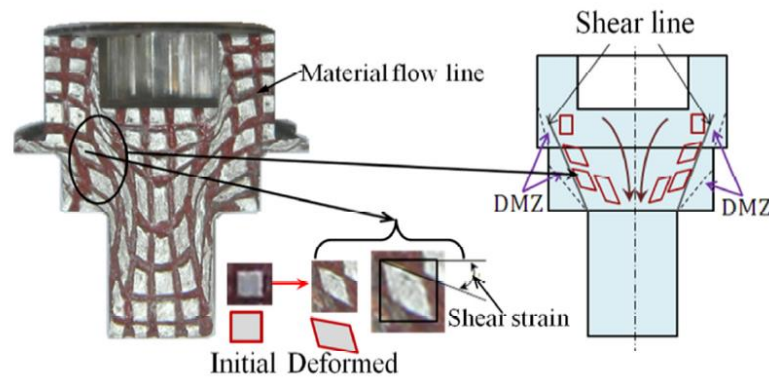


Figura 18 – Zonas de distorção e zonas mortas (Fonte: Nayak e Sahoo, 2019).

Foram considerados vários cenários, para os quais foi calculado o valor da força a exercer no punção em função do curso do mesmo. Verificou-se que alterações introduzidas na matriz ou no punção conduziam a uma alteração no fluxo do material e no valor da força necessária para a extrusão. Com base nos resultados numéricos foi possível chegar a um projeto ótimo para a matriz e para o punção, capaz de produzir o mesmo componente, com uma menor força.

#### 1.4.5. Elementos Finitos aplicados ao processo de laminação

Um outro exemplo de utilização do método dos elementos finitos é o apresentado no trabalho de Azizoğlu et al (2017) no qual um modelo de elementos finitos é aplicado à laminação a frio de tubos com matrizes de rolos elásticos, para estudar a influência da deformação do rolo matriz no fluxo do material, na região de contacto e nas dimensões dos tubos produzidos.

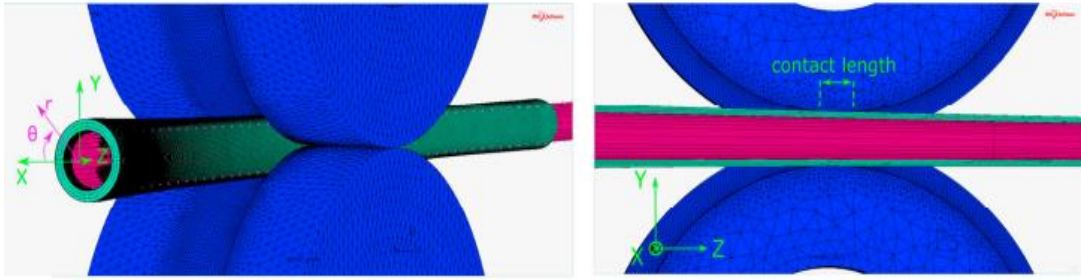


Figura 19 – Modelo por elementos finitos (Fonte: Azizoğlu et al, 2017).

O estudo permitiu concluir que considerar a deformação elástica da matriz do rolo influencia fortemente, quer a redução da espessura da parede do tubo obtido, quer a força de separação do rolo. Por outro lado, o modelo proposto demonstrou uma boa adequação às condições de contacto.

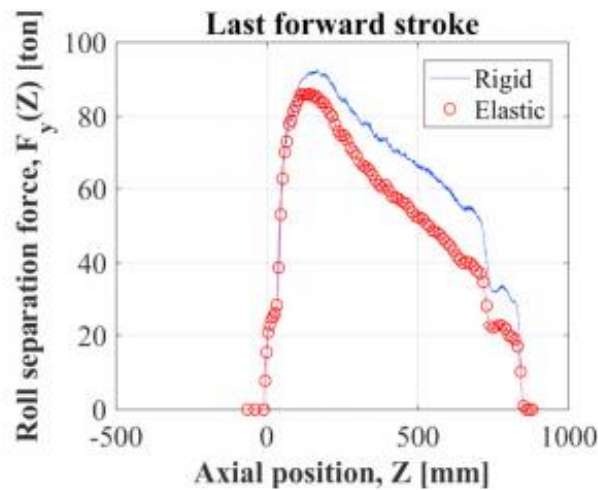


Figura 20 – Força de separação – rolos elásticos vs rolos rígidos (Fonte: Azizoğlu, et al, 2017).

#### 1.4.6. Processo de Conformação superplástica de uma chapa de liga Ti-6Al-4V

A conformação superplástica é um processo muito utilizado na produção de componentes para automóveis e para aeronaves. A liga Ti-6Al-4V é um material que se adequa à produção de peças com formas complexas usando métodos de conformação superplástica. Estes processos são complicados de analisar do ponto de vista numérico já que envolvem grandes extensões, grandes deformações e não linearidades nos materiais. Balasubramanian et al (2013) apresentam uma análise pelo método dos elementos finitos de um processo de conformação superplástica por gás pressurizado, de uma chapa de liga Ti-6Al-4V usando uma matriz retangular escalonada.

A figura 21 mostra os diferentes estágios de um processo de conformação por sopro numa matriz retangular escalonada.

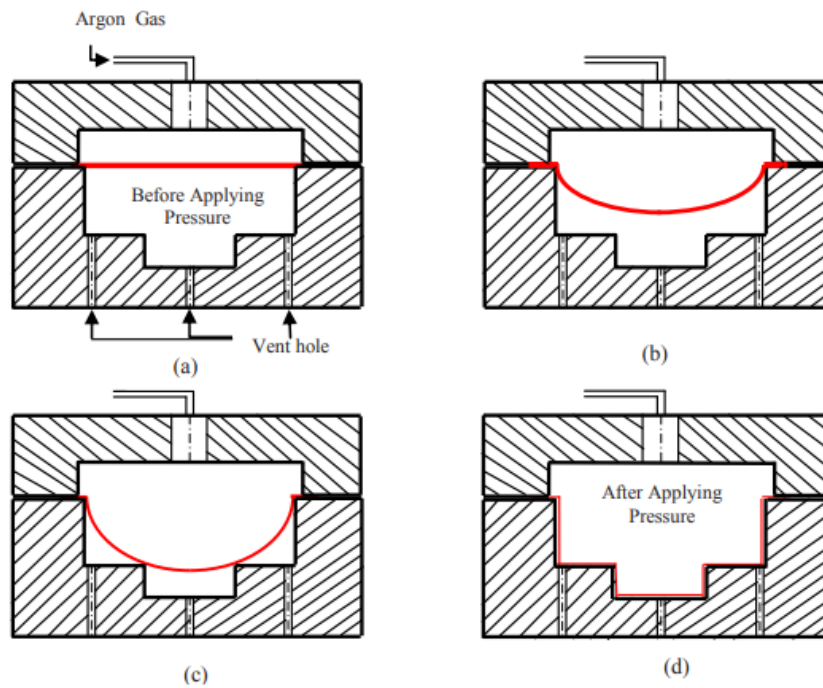


Figura 21 – Diferentes estágios do processo de conformação (Fonte: Balasubramanian et al, 2013).

Na figura 22 está representado o modelo por elementos finitos (Abaqus) utilizado. Foram analisados entre outros parâmetros, o valor ótimo da pressão e o coeficiente de atrito.

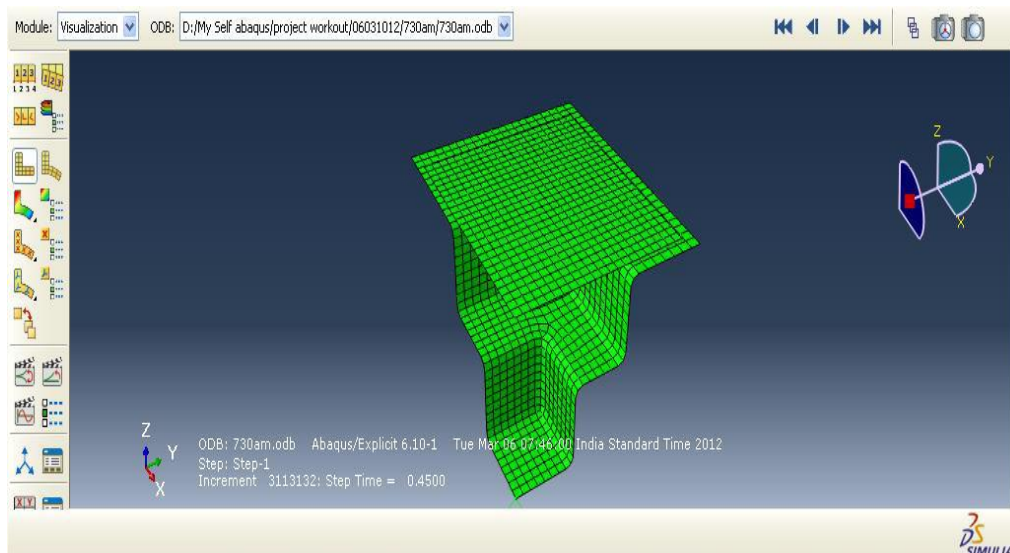


Figura 22 – Modelo dos elementos finitos (Abaqus) (Fonte: Balasubramanian et al, 2013).

### 1.4.7. Processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio

O processo de diminuição do diâmetro de tubos de aço a frio recorre a uma matriz por onde o tubo é forçado a passar. Este processo pode recorrer a uma garra que está acoplada a um mandril que por sua vez se encontra no interior do tubo. A dimensão do mandril é a mesma que o diâmetro do tubo, depois de concluído o processo, ver figura 23.

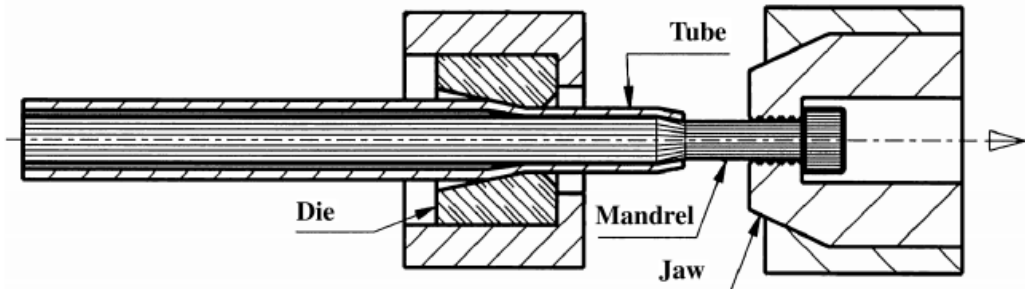


Figura 23 – Processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio (Fonte: Boutenel et al, 2018).

O mesmo processo pode ser efetuado sem o recurso ao mandril, não sendo neste caso totalmente garantido o diâmetro interior do tubo, mas eliminando a necessidade de uma última operação na extremidade do tubo para remover o mandril.

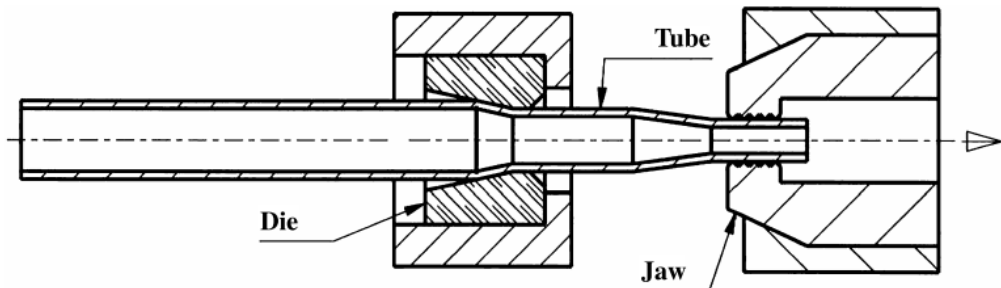


Figura 24 – Processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio sem recurso a mandril (Fonte: Boutenel et al, 2018).

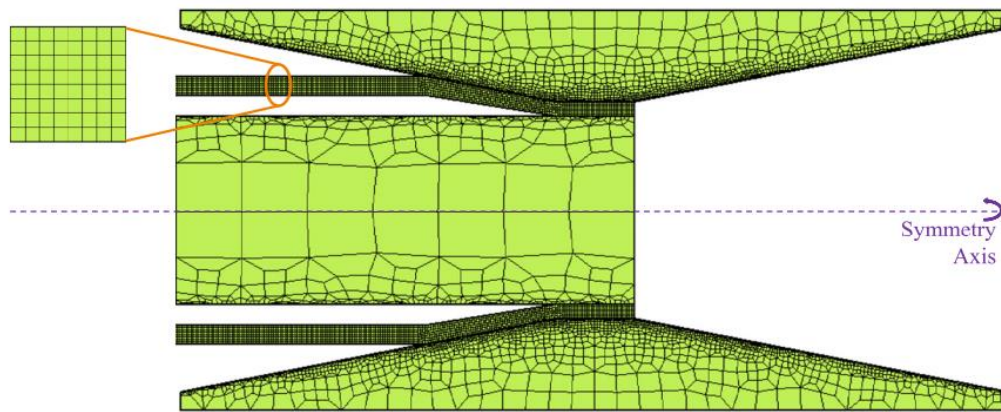


Figura 25 – Malha de elementos finitos usada na simulação do processo de redução do diâmetro de tubos de aço a frio com recurso a mandril (Fonte: Boutenel et al, 2018).

Em Boutenel et al (2018) é apresentado um estudo numérico, com recurso ao método dos elementos finitos, que prevê as dimensões finais do tubo produzido pelos processos previamente descritos. Este estudo, validado por comparação com ensaios experimentais, tem por objetivo investigar a influência do ângulo de entrada da matriz na força de estiramento (ver figura 26), bem como a influência da espessura relativa (relação entre a espessura inicial e o raio exterior inicial) na deformação do tubo (ver figura 27). Neste último caso, verifica-se que a espessura final aumenta ou diminui consoante a espessura relativa seja inferior ou superior a 40%, respetivamente.

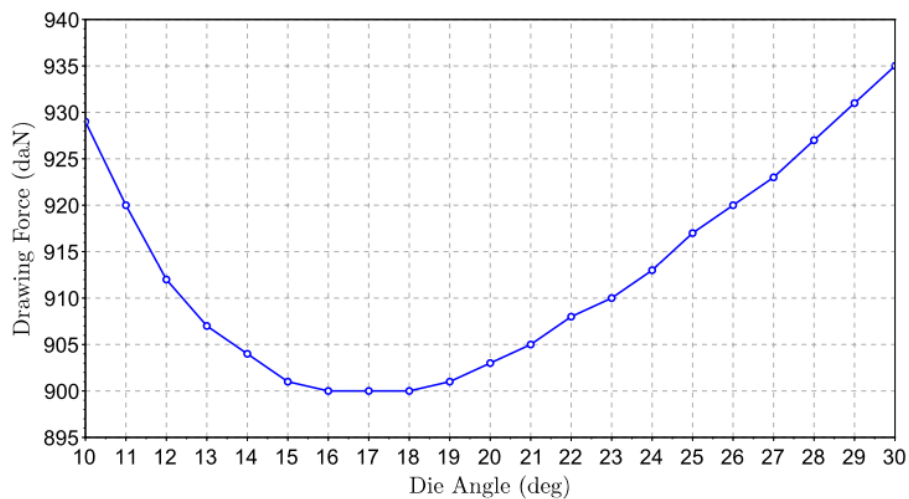


Figura 26 – Influência do ângulo de entrada na matriz na força de estiramento (Fonte: Boutenel 2018).

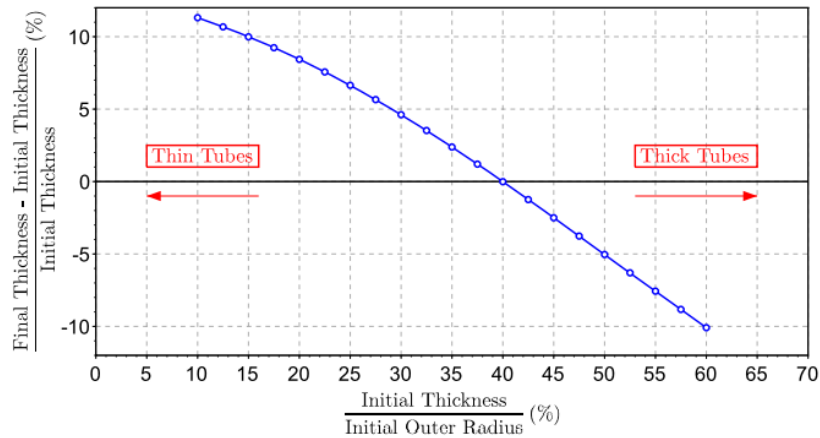


Figura 27 – Influência da espessura relativa (relação entre o raio exterior e a espessura) na deformação do tubo (Fonte: Boutenel et al, 2018).

#### 1.4.8. Análise h per elástica realizada com utiliza o de elementos finitos poligonais

Em Rajagopal et al (2018) são efetuados estudos em condi es de h per elasticidade (situa es em que estão presentes em simultâneo não linearidades materiais e geométricas), tendo-se usado elementos finitos poligonais, com mais de 3 lados.

São apresentados exemplos numéricos e comparados os resultados obtidos com análises feitas usando discretiza es baseadas em elementos triangulares, concluindo-se que os elementos poligonais oferecem uma maior flexibilidade na gera o da malha de elementos finitos, obtendo-se resultados comparáveis aos obtidos com elementos triangulares.

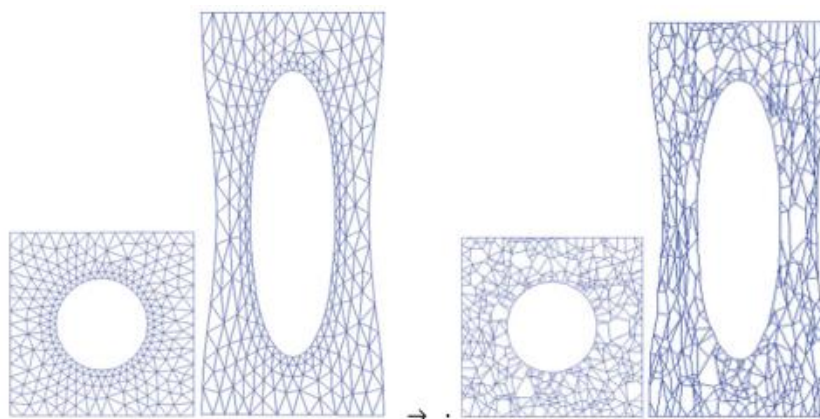


Figura 28 – Discretiza es de uma placa com um furo central usando elementos triangulares e poligonais sujeita   traço (Fonte: Rajagopal et al, 2018).

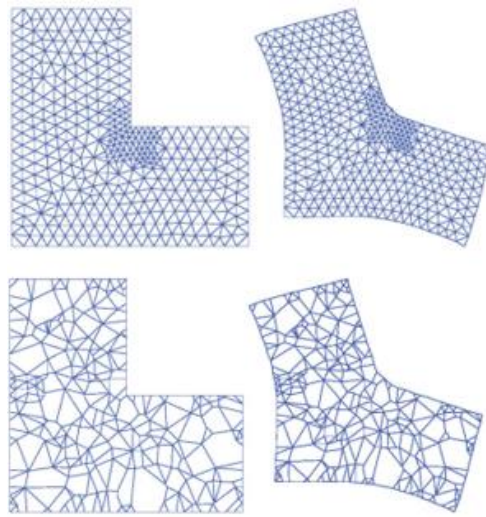


Figura 29 – Discretizações e deformadas de uma placa em L usando elementos triangulares e elementos poligonais (Fonte: Rajagopal et al, 2018).

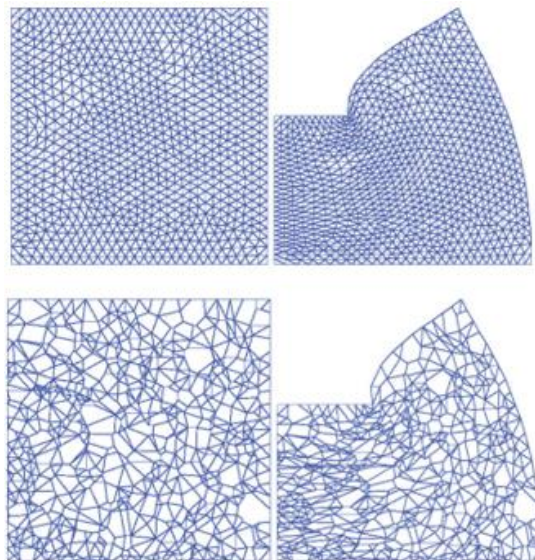


Figura 30 – Análise de uma placa quadrada sujeita a compressão devida a um deslocamento prescrito na face superior (Fonte: Rajagopal et al, 2018).



# Capítulo 2 - Enquadramento UNCC

Neste capítulo aborda-se o funcionamento da Unidade de Cunhos e Cortantes da VW AutoEuropa, indicando os processos produtivos presentes na unidade, bem como o departamento em que foi implementado o módulo Finite Model Design (FMD). Encontra-se também uma descrição do processo de estampagem, bem como da própria ferramenta de estampagem.

Ainda neste capítulo é feito o enquadramento teórico das atividades desenvolvidas na empresa, comparando com aquilo que foi lecionado nas unidades curriculares da licenciatura e do mestrado.

Unidades curriculares como Tecnologia Mecânica I, II e III e Elementos de Máquinas I e II e Mecânica dos Sólidos e Computacional incidiram nos sistemas de pneumática, ferramentas de estampagem e método dos elementos finitos com as quais o estudante teve maior contacto. A prática com o *software* CATIA V5 nos vários momentos de avaliação durante o percurso académico, representou um papel fundamental face às atividades desenvolvidas pelo mesmo.

## 2.1. A Unidade de Negócios Cunhos e Cortantes da VW AutoEuropa

A unidade de negócios de cunhos e cortantes (UNCC), exporta principalmente para a fábrica mãe em Wolfsburg, mas também para países como China, México, Espanha e Brasil.

Esta Unidade difere da área de produção da VW AutoEuropa, sobretudo no que toca à cadência de produção, visto que na linha de produção se realiza uma produção em massa, praticamente automatizada e composta por muitas operações simples, enquanto que, na UNCC se realiza uma produção complexa, individualizada e com várias etapas.

“Produzir peças estampadas e ferramentas, procurando exceder as expectativas dos nossos clientes internos e externos”. Esta é a missão que move os colaboradores que operam dentro da secção de prensas da VW AutoEuropa, onde o objetivo se baseia na produção e construção de ferramentas estampagem

Os projetos demoram em média 24 meses desde o início da conceção do *design* até à saída do produto final para o cliente, sendo o core business a produção de capôs e guarda-lamas.

Neste caso, o cliente da empresa não é o consumidor final que compra o carro, mas sim as fábricas espalhadas pelo mundo que os produzem.

Com equipas de qualidade, segurança e ambiente, a UNCC apresenta um registo de toleranciamento rígido cumprindo os requisitos associados às normas ISO 9001, VDA 6.4 e TUV

RHEINLAND.

Na figura 31 apresenta-se um esquema que ilustra a organização da unidade de negócios de cunhos e cortantes, nomeadamente, os seus departamentos e equipas.

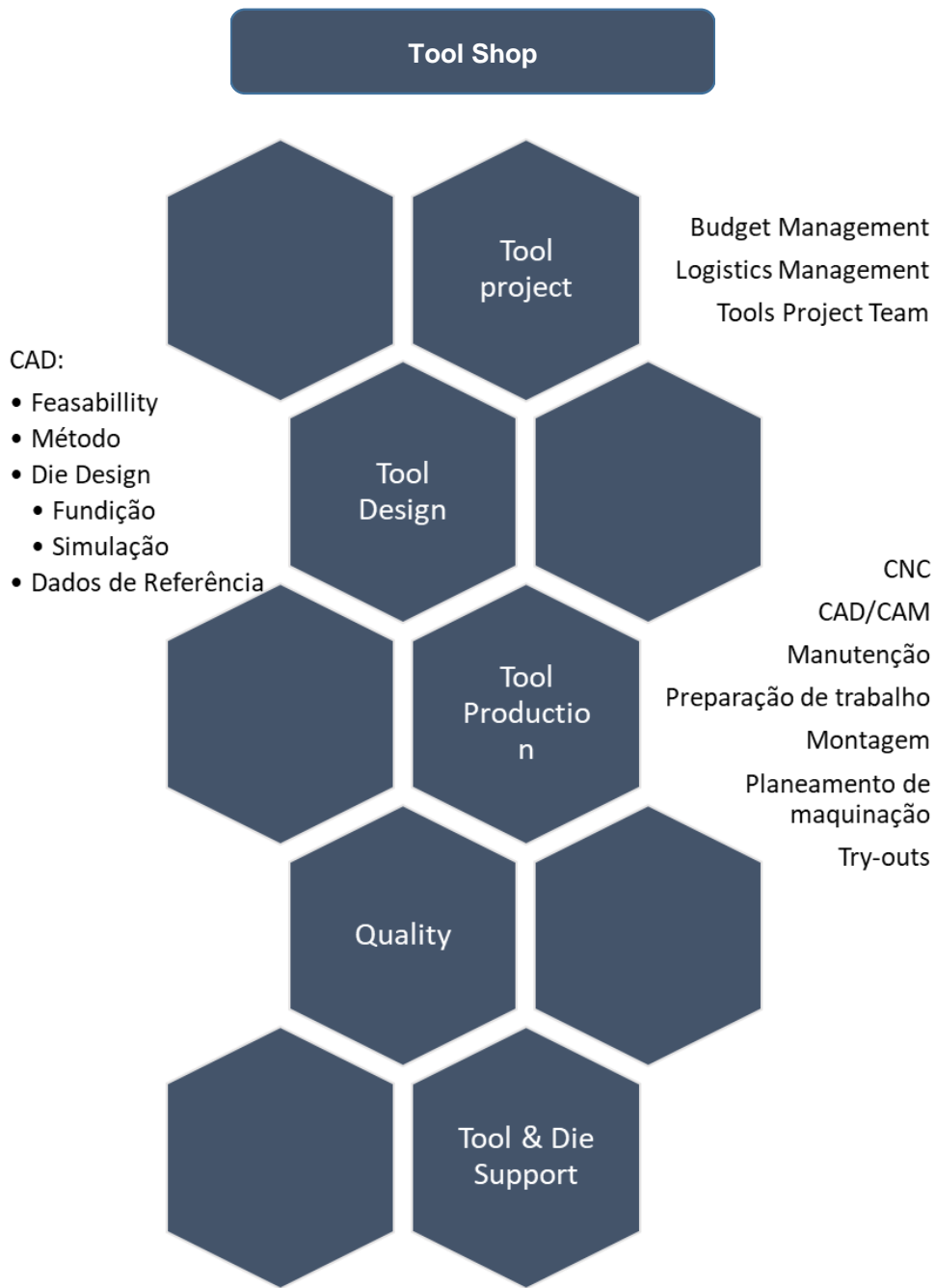


Figura 31 – Departamentos e Equipas dentro da UNCC (Fonte VW AutoEuropa)

## 2.2. Construção de uma Ferramenta de Estampagem

Tendo em conta que a função desempenhada pelo estudante andou em torno do desenvolvimento de ferramentas estampagem, o departamento de CAD será explicado em detalhe:

As funções do estudante incidiram diretamente nos trabalhos desenvolvidos pela equipa de die design e indiretamente sobre as restantes equipas de método, feasibility e dados de referência.

O procedimento efetuado dentro da unidade de negócios de cunhos e cortantes da VW AutoEuropa para a conceção de ferramentas de estampagem envolve a coordenação e o trabalho em simultâneo de todos os departamentos e equipas da UNCC, partindo da primeira fase de aceitação de projeto por parte do departamento de Tool Project, realizando a orçamentação, o planeamento logístico e a orientação das equipas nas secções de Budget Management, Logistics Management e Tools Project Team, respetivamente. Este departamento atua transversalmente ao decorrer das atividades para fazer face às constantes alterações do mesmo.

De seguida, o projeto entra na secção de CAD do departamento de Tools Design onde é recebido pela equipa de método que tem como função, em primeira instância, de testar a exequibilidade do design da peça apresentado pela fábrica-mãe, através do software CATIA V5 e AutoForm. Por vezes, ao surgirem dificuldades em termos de exequibilidade do projeto a fábrica-mãe é notificada e posteriormente à troca fluente de informação, alcança-se um design exequível.

A partir deste ponto, o projeto volta para a equipa de Método que procede à determinação da quantidade de operações de embutissagem, corte, dobragem e calibrações, bem como, de funções dentro dessas operações, através do software CATIA V5 e AutoForm.

Após esta etapa, a equipa de Die Design cria toda a estrutura da ferramenta em torno daquilo que será a peça final. Aqui inclui-se envio do desenho na etapa de modelos para empresas externas onde será produzido através de modelos de esferovite, o desenho e posicionamento das cams e são indicadas quais as faces que devem ser maquinadas, através do software CATIA V5. Nesta fase, as ferramentas são simuladas com o objetivo de detetar colisões ou interferências dentro da ferramenta, através do software Press Sim.

Procede-se agora à definição de compensações de espessura pela equipa de dados de referência, de forma a garantir que haja pressão nas zonas de trabalho da chapa durante a produção. Tratam também da preparação dos ficheiros para posterior leitura para a equipa de CAM, através do software Tébis.

Daqui o projeto segue para o departamento de Tool Production, onde as equipas de Planeamento de maquinação e Preparação de Trabalho definem as etapas de serviço, baseando-se na forma mais eficiente de ocupar as máquinas de CNC atendendo à capacidade produtiva, velocidade e restrições de cada uma.

Após esclarecida a metodologia, a equipa de CAM, realiza a conversão da linguagem de código, de modo a ser lida pelas máquinas.

Prosseguindo, o ficheiro chega à equipa de CNC que recebe o ficheiro, coloca os dados nas máquinas de CNC e produz as peças a partir de um bruto de material. Começam a ser produzidas fisicamente os primeiros componentes da ferramenta.

A estrutura exterior da ferramenta, as peças maquinadas em CNC e outros elementos de compra são depois assemblados na bancada de montagem e aqui são feitas alterações na ferramenta consideradas necessárias e os acabamentos finais.

Após aprovação da ferramenta para o próximo passo, iniciam-se os testes de funcionamento pela equipa de Try-out verificando, também, se existem colisões ou interferências entre os componentes da ferramenta. Finalmente, é feito o transporte da ferramenta para as instalações do cliente, onde são efetuados os testes de Home-Line Try-out finais, de forma a avaliar efeitos na prensa de velocidade de deformação e velocidade de produção.

O departamento de Tool Production conta com a equipa de Manutenção durante os processos que envolvam máquinas, ferramentas ou instrumentos suscetíveis de manutenção periódica.

Os departamentos de Quality e Tool & Die Support atuam paralelamente com os outros departamentos e com as outras equipas, durante todos os processos de conceção, garantindo a qualidade dos componentes e, por sua vez, do produto final, e apoiando no planeamento, design e fabrico das ferramentas.

As ferramentas de estampagem permitem efetuar as quatro operações básicas de embutissagem, corte, dobragem e calibração que dão origem à geometria final da peça. No entanto, para realizar todas as operações e para chegar a um produto final, devem ser feitas várias ferramentas, dependendo do componente em causa. Para construir um capô são necessárias normalmente 4 ou 5 ferramentas de estampagem e para construir um guarda lamas são necessárias normalmente 6 ferramentas de estampagem.

Um produto final implica a utilização de várias operações de serviço denominadas na UNCC por OP10, OP20, OP30, OP40, OP50, OP60 e OP70, dependendo da operação de que se trata. Cada uma pretende atingir objetivos específicos. Por exemplo na OP20 é realizada a embutissagem inicial que permite dar a geometria final, sendo, por isso, uma das operações mais complexa em todas as ferramentas de estampagem. A cada operação de serviço existente no produto final corresponde uma ferramenta diferente. Portanto, cada peça passa pelo processo todo. Em suma, cada produto final exige despender imensos recursos financeiros e humanos e exige também uma carga considerável de tempo, daí um produto final demorar aproximadamente 24 meses até ser concluído.

As ferramentas de estampagem trazem, portanto, custos inerentes de desenvolvimento significativamente elevados, envolvendo diversas e numerosas equipas de técnicos e especialistas, bem como, maquinação, tratamento e compra de toneladas de material.

## **2.3. Ferramenta de Estampagem**

Os materiais metálicos usados nos processos aqui descritos possuem características de

rigidez em que é possível distinguir uma zona de deformação elástica, em que a deformação é diretamente proporcional ao carregamento aplicado, e onde o material tem a capacidade de, retirado o carregamento retomar a sua forma e dimensões iniciais, e uma outra zona, de deformação plástica, onde a deformação é permanente e onde a linearidade entre o carregamento e a deformação já não se verifica.

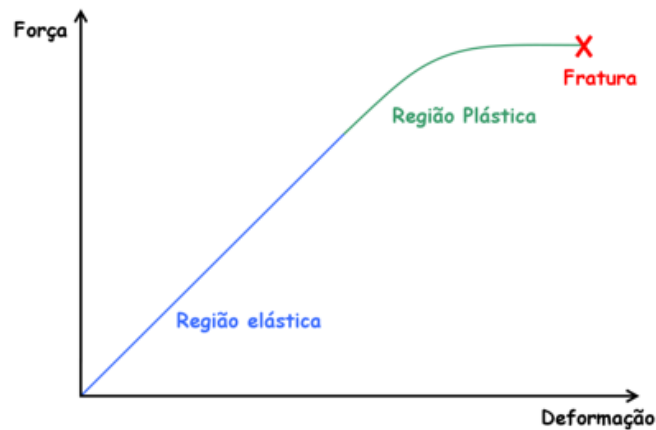


Figura 32 – Deformação dos materiais (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”)

As ferramentas de estampagem são um instrumento que é utilizado num processo de fabrico denominada deformação plástica onde são provocadas, portanto, deformações que ultrapassam o estado elástico e atingem o estado plástico do material.

Este tipo de deformação é feito a frio, na maioria dos casos, pois o trabalho a quente traz desvantagens associadas ao elevado consumo energético, ao fraco controlo dimensional e à formação de camadas superficiais de óxidos nas peças. Para além de que, processos conduzidos a frio trazem ainda vantagens associadas a aumentos de resistência mecânica e da dureza do material da peça e como se trabalha em chapas (baixa espessura) de material, acaba por ser o processo mais indicado. No entanto, trabalhar a frio e em espessuras finas implica uma maior propensão para o aparecimento e desenvolvimento de fissuras, consequência pela qual as equipas de CAD e CAD/CAM se responsabilizam e garantem a fiabilidade e exequibilidade do projeto.

As ferramentas de estampagem permitem efetuar as quatro operações básicas de embutissagem, corte, dobragem e calibração que dão origem à geometria final da peça.

A embutissagem é a operação que pretende dar forma à chapa, deformando-a tanto quanto seja necessário para que o material se mantenha com essa forma, ultrapassando a zona elástica de deformação, como se pretende demonstrar na figura 33.

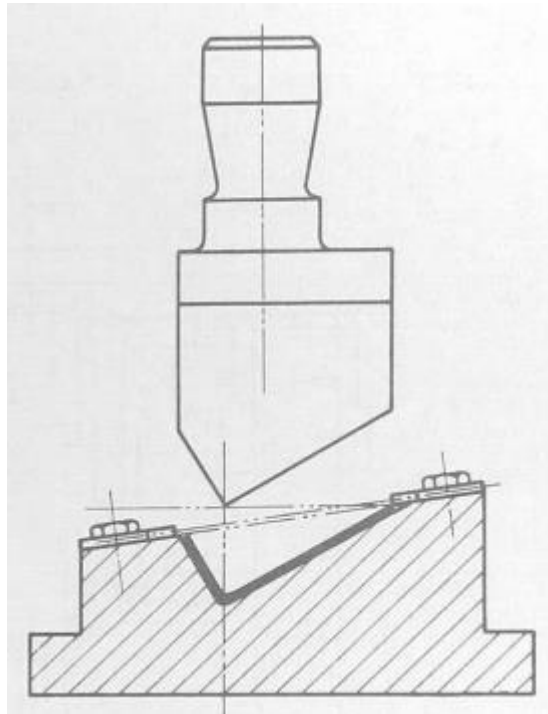


Figura 33 – Operação de Embutissagem (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”)

Relativamente às operações de corte, estas podem ser divididas em 5 fases distintas onde na 1ª fase o pisador entra em contacto com chapa, sobre a matriz. Na 2ª fase dá-se a deformação plástica da chapa devido à ação do punção. Atingindo, na 3ª fase, a tensão de rutura do material suporta, ou seja, o ponto de rutura onde há a separação total do material da chapa. Na 4ª fase do processo é feita a separação da sucata e finalmente na 5ª fase é feita a extração dessa mesma sucata. De acordo com a figura 34,

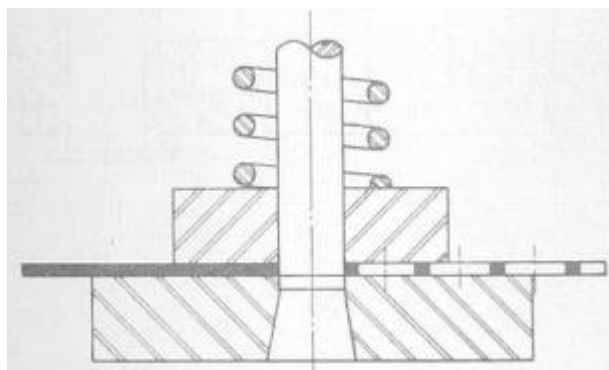


Figura 34 – Operação de Corte (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”)

A dobragem/calibração trata-se de um processo simples onde, neste caso, a chapa é quinada a 90º, proporcionando, por exemplo, a possibilidade de criar encaixes nas peças, geralmente utilizada no perfil exterior da peça, tal como demonstra a figura 35.

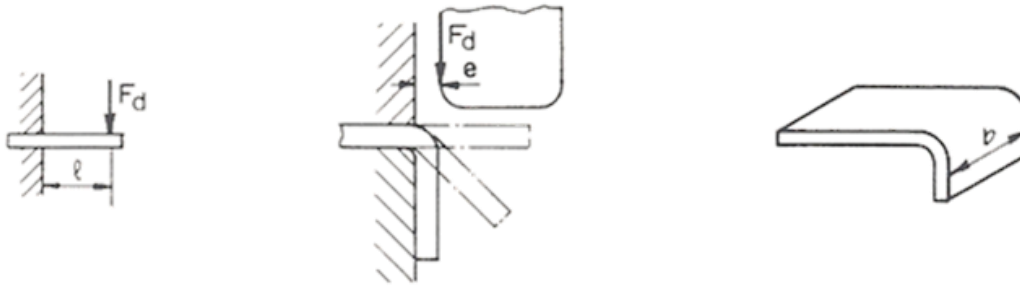


Figura 35 – Operação de Dobragem (Fonte: ESTAMPOS I Escola “Pro-Tec”)

As ferramentas de estampagem são acopladas a prensas hidráulicas ou mecânicas industriais que ao serem acionadas permitem a embutissagem da chapa de material colocada entre a matriz e o punção.

### 2.3.1. Estrutura

Uma ferramenta de estampagem é constituída pela seguinte listagem de componentes:

- ✓ Punção ou *Stempel*
- ✓ Matriz ou *Matrize*
- ✓ Base de fundição ou *Unterteil Guss*
- ✓ Cabeçote de fundição ou *Oberteil Guss*;
- ✓ Pisador ou *Niederhalter*;

Nota: Quando se trata de uma operação de corte ou dobra a matriz é substituída por um Prato ou *Schneidaufsatz* e o punção por elementos semelhantes de menores dimensões.



### 2.3.2. Mecanismo

De uma forma simplificada, o funcionamento de uma ferramenta de estampagem resume-se à aplicação de uma força sobre a chapa, força essa resultante do movimento descendente do punção sobre a matriz, situada na zona inferior da ferramenta, dando assim forma à chapa, tal como é ilustrado nas figuras 36 e 37. No entanto, a Volkswagen trabalha com um conceito diferente. onde é a matriz que se desloca em relação ao punção que por sua vez, está fixo na base.

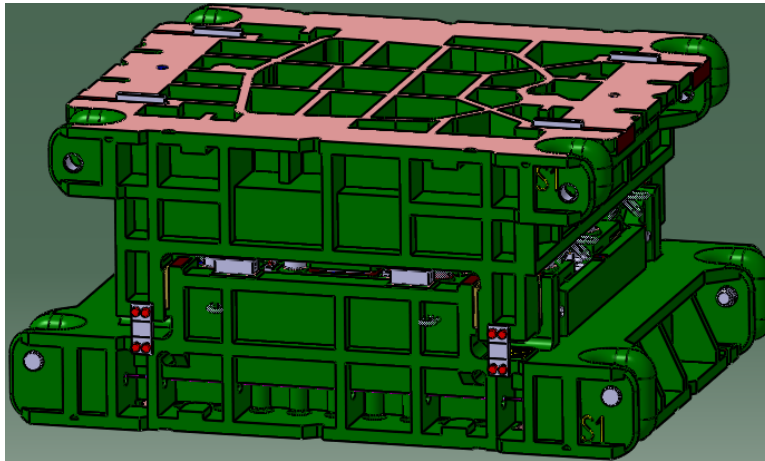


Figura 36 – Posição de Trabalho (Fonte – VW AutoEuropa)

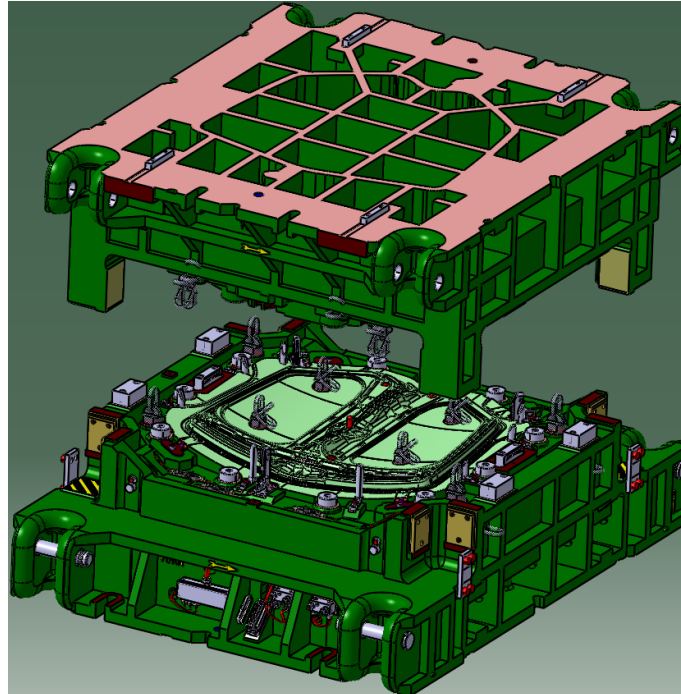


Figura 37 – Posição de Descanso (Fonte – VW AutoEuropa)

### 2.3.3. *Processos de fabrico*

Durante a construção de uma ferramenta de estampagem, os seus componentes são submetidos a maquinações e a tratamentos térmicos que reforçam as suas propriedades mecânicas de forma a atingir os seus objetivos com o máximo de qualidade possível.

Os processos de fabrico mais comuns associados à construção de ferramentas de estampagem, são os seguintes:

- Modelos de esferovite;
  - Maquina-se o molde de esferovite
  - Reforça-se o esferovite com tintas especiais
  - Comprime-se a areia refrataria
  - Vazamento do aço fundido
  - Arrefecimento do molde
  - Testa-se o provete à resistência
  - Maquinação
  - Pintura final

# Capítulo 3 -

## Casos de estudo realizados na empresa

### 3.1. Estudo dos esforços provocados pelos cilindros pneumáticos

Antes de dar início ao seguinte capítulo é de referir que a empresa, por motivos de confidencialidade, não permitiu que o estudante colocasse quaisquer tipo de dados ou fotos relacionadas com a ferramenta em causa, pelo que a ferramenta que se segue foi desenhada pelo estudante e serve apenas como representação daquilo que foi feito dentro da empresa.

Verificaram-se fraturas na ferramenta durante o Try-out, tendo sido essa a motivação para abrir uma não-conformidade de modo a apurar as causas desta situação.

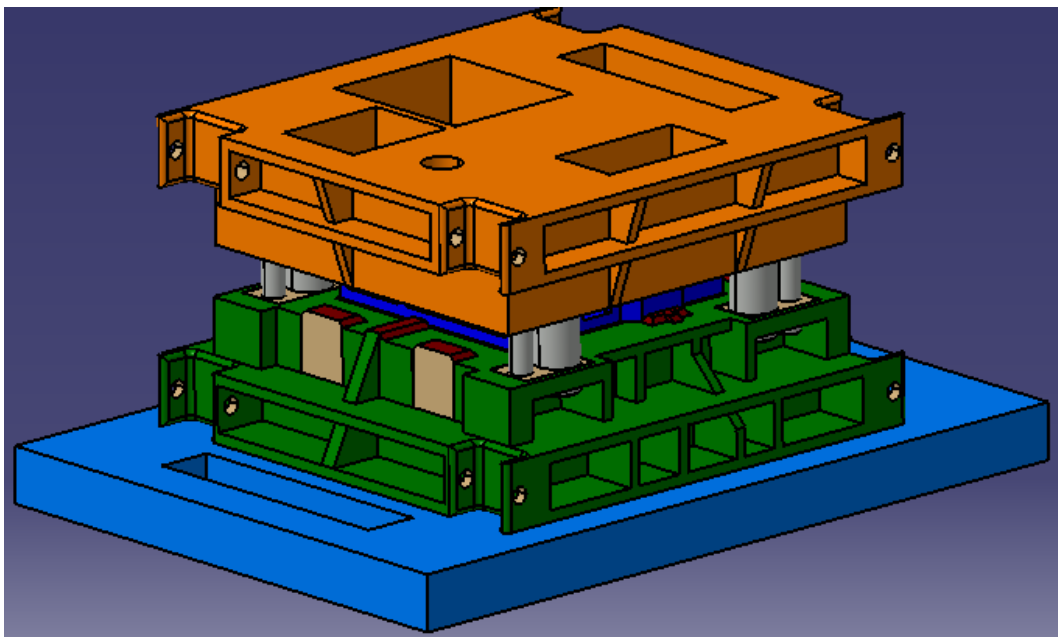


Figura 38 – Ferramenta em estudo (Fonte – Construção própria)

As ferramentas de estampagem, na sua grande maioria, recorrem à força realizada por cilindros pneumáticos para recolher a matriz à sua posição de descanso. Neste caso, a base dos cilindros não possuía espessura suficiente para suportar a força realizada pelos mesmos. O que acontece na grande maioria dos casos é que esta espessura acaba por ser irrelevante visto que a base da ferramenta está sempre apoiada pela parte inferior da prensa. No entanto, a prensa que foi utilizada para produzir as peças tem a particularidade de haver zonas específicas que não apoiam a ferramenta. A imagem seguinte ilustra as zonas onde a ferramenta acabou por fraturar, que coincidem com as zonas que não estão apoiadas pela prensa.

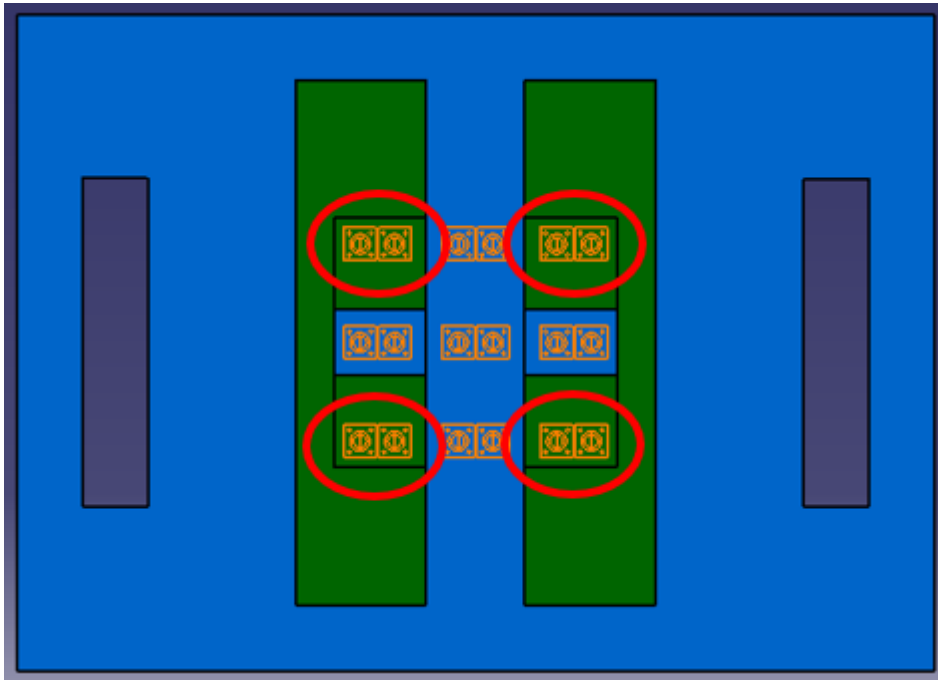


Figura 39 – Vista inferior da ferramenta (Fonte – Construção própria)

Como se pode verificar, nas zonas assinaladas existem cilindros, que não estão apoiados pela prensa. Isto significa que se a espessura da base dos cilindros da ferramenta for demasiado baixa, esta não irá aguentar a força provocada pelos cilindros e irá fraturar, tendo sido essa a situação na empresa.

A ferramenta acabou por fraturar nessas zonas. As figuras seguintes ilustram a parte inferior da prensa, onde assenta a base de fundição, a localização dos cilindros, bem como as zonas de fratura:

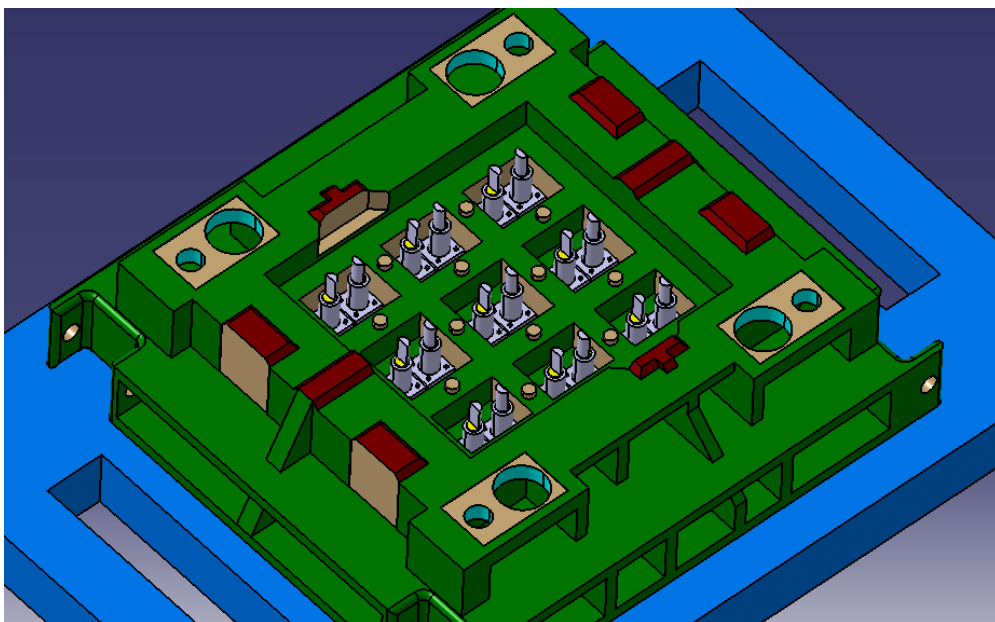


Figura 40 – Cor azul - Prensa; Cor verde – Base de Fundição; Cor cinzento – Cilindros (Fonte – Construção própria)

### 3.1.1. Carregamento, Condições de Fronteira e Tipos de Forças

Os resultados foram obtidos através da análise em elementos finitos com recurso ao elemento do tipo tetraédrico com 4 nós

Neste cenário as condições de fronteira foram impostas na ferramenta de forma a simular o comportamento da mesma quando acoplada à prensa, isto significa que foram colocados apoios fixos nas faces laterais de forma impedir o deslocamento e rotação da mesma. As forças de carregamento distribuído foram aplicadas nas faces onde o sistema pneumático está situado.

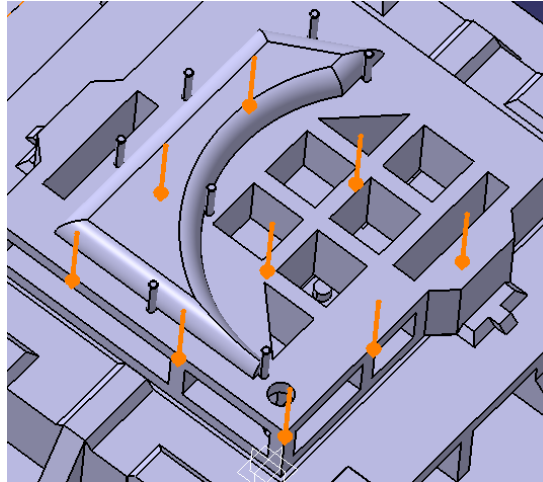


Figura 41 – Forças (Fonte – Construção Própria)

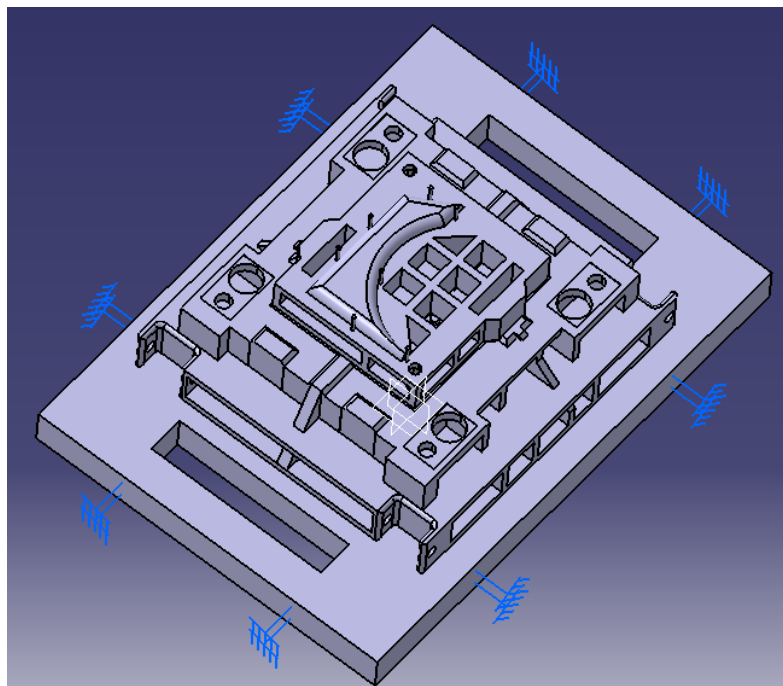


Figura 42 – Apoios (Fonte – Construção Própria)

A equipa que ficou encarregue pela correção da não conformidade, começou por determinar a força exata aplicada pelos cilindros na ferramenta. Chegou-se à conclusão que a única força

aplicada pelos cilindros na ferramenta deriva do peso da matriz. A massa da matriz é de 13161 kg, a que corresponde um peso de 129077 N.

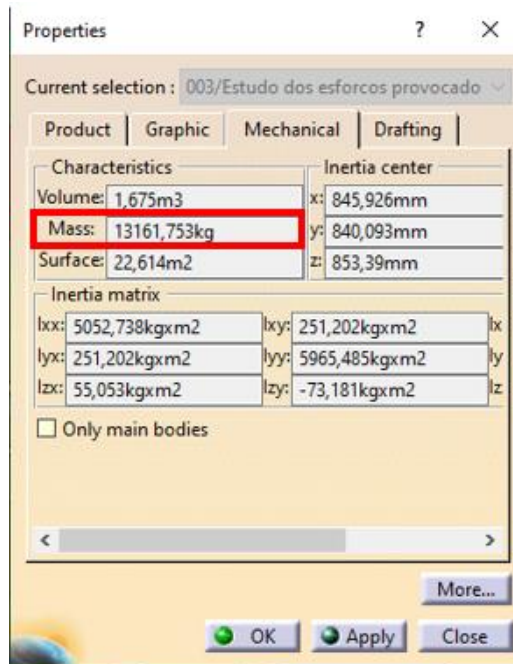


Figura 43 – Propriedades da Matriz (Fonte – Construção Própria)

Aplicando a força gravítica de  $F = 129\ 077\ \text{N}$  nas faces que servem de superfície de apoio dos cilindros, foram obtidos os seguintes resultados:



Figura 44 – Faces onde foram aplicadas as forças (Fonte – Construção própria)

### 3.1.2. Resultados Obtidos: Tensões

#### *Espessura de 10mm*

Como se pode verificar pelas figuras seguintes, a ferramenta com espessura de 10mm sofre tensões máximas na ordem dos  $2,71 \times 10^6 Pa$ .

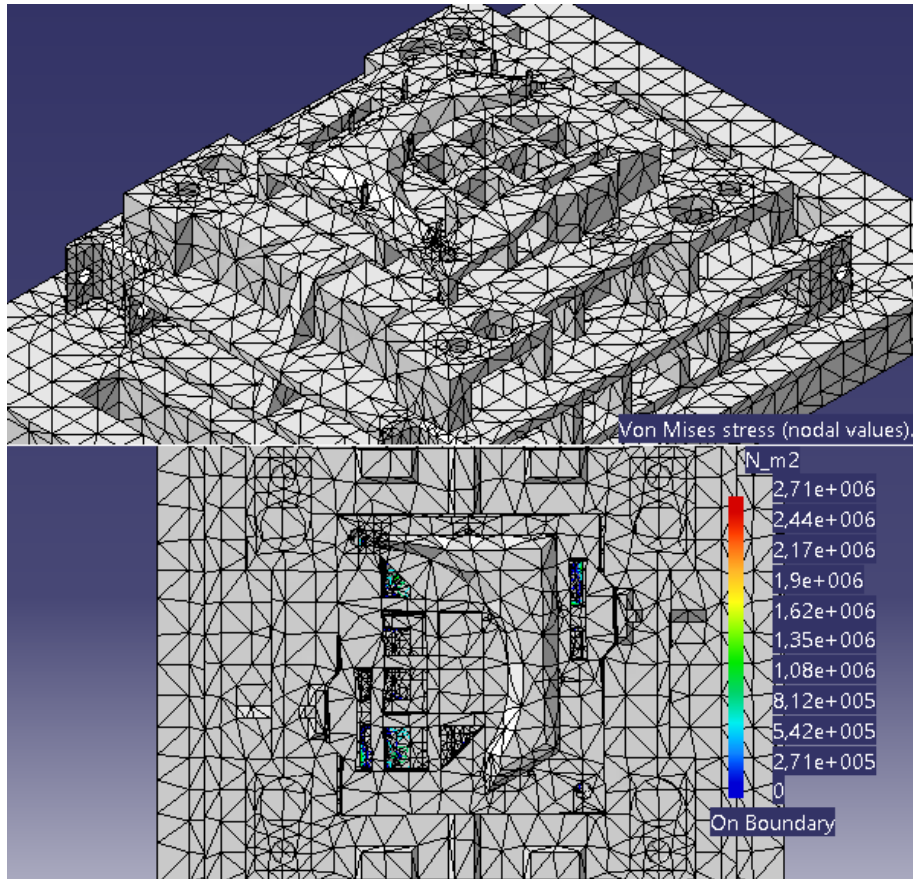


Figura 45 – Von Misses para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

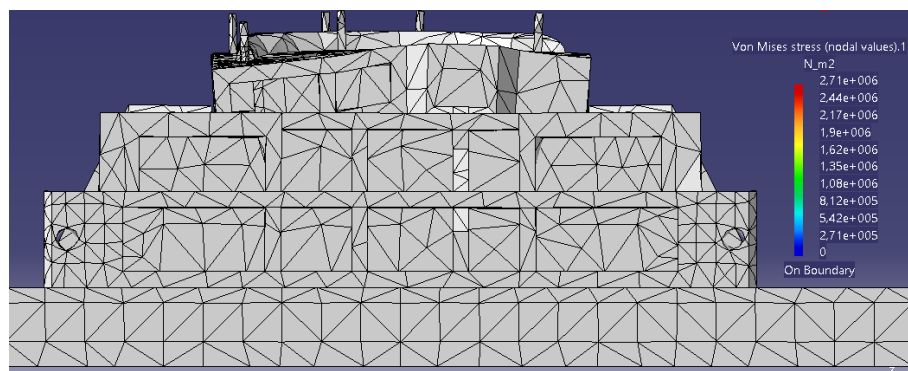


Figura 46– Von Misses para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

### *Espessura de 100mm*

Como se pode verificar pelas figuras seguintes, a ferramenta com espessura de 100mm sofre tensões máximas na ordem dos  $4,76 \times 10^5 Pa$ .

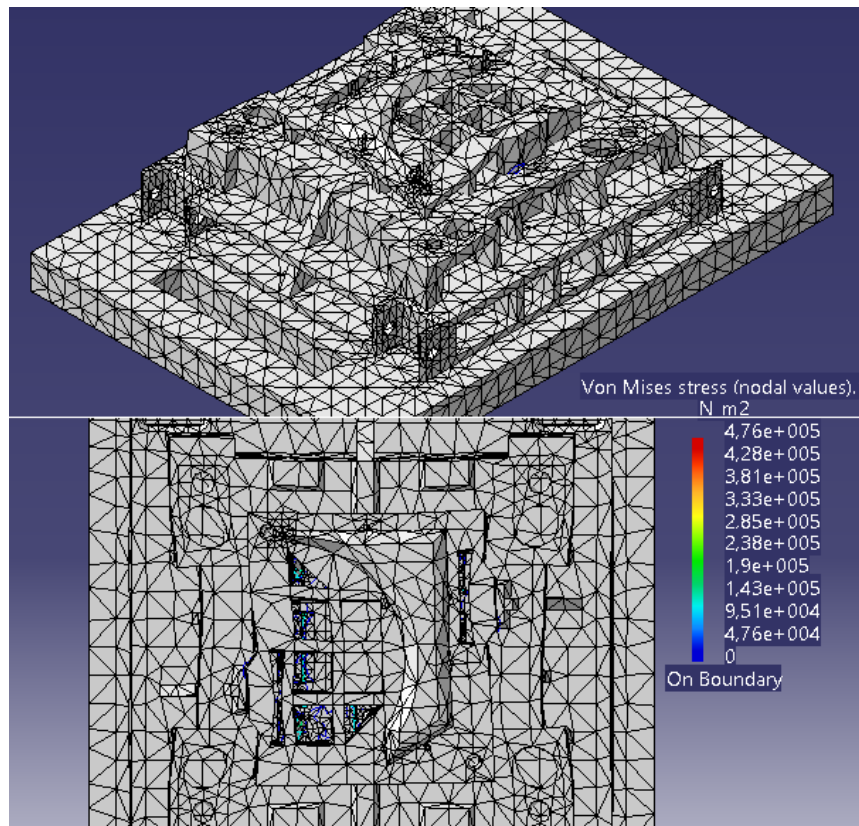


Figura 47 – Von Misses para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

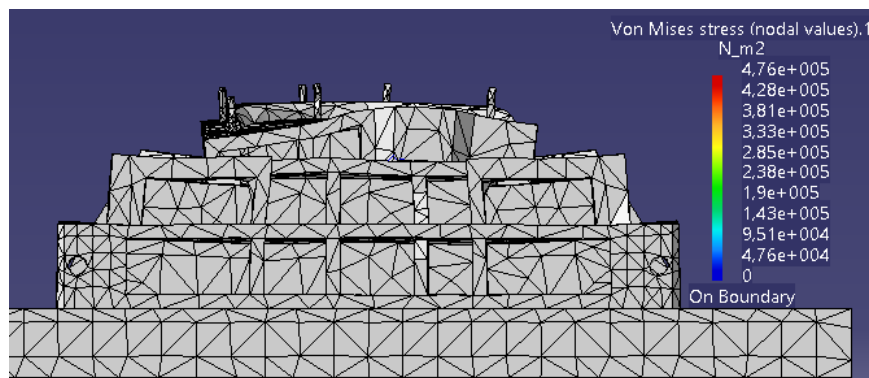


Figura 48 – Von Misses para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

Daqui pode-se concluir que o aumento da espessura da base dos cilindros da ferramenta, acaba por afetar significativamente a resistência da mesma, visto que consegue agora suportar cargas 10 vezes superiores



### 3.1.3. Resultados Obtidos: Deslocamentos

#### *Espessura de 10mm*

Como se pode verificar pelas figuras seguintes, a ferramenta com espessura de 10mm sofre deslocamentos máximos na ordem dos 0.0047mm.

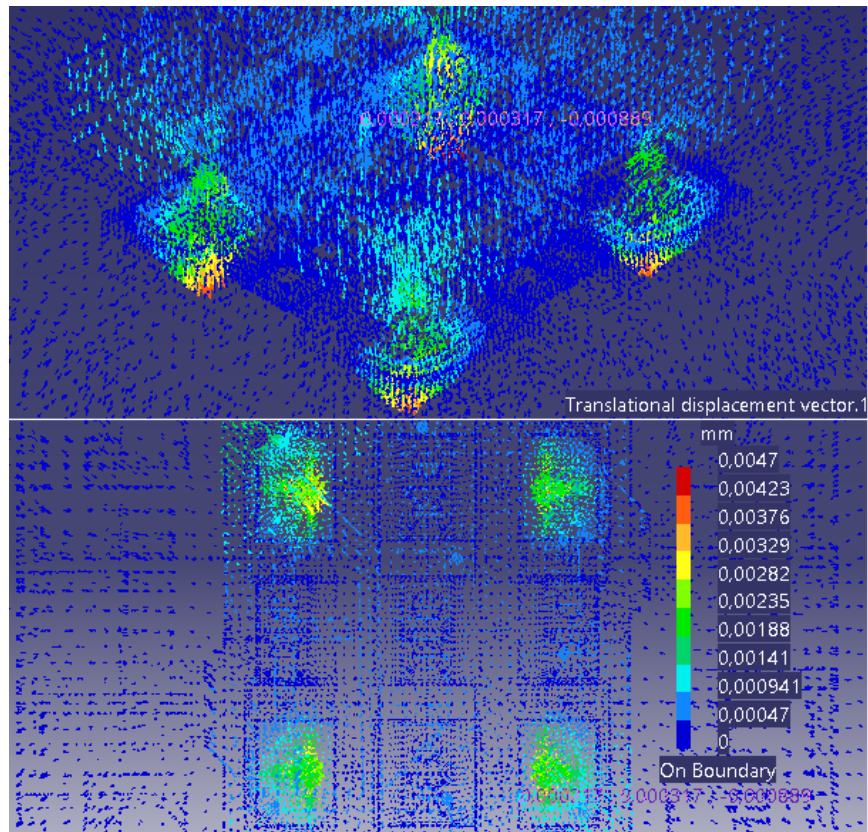


Figura 49 – Deslocamentos para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

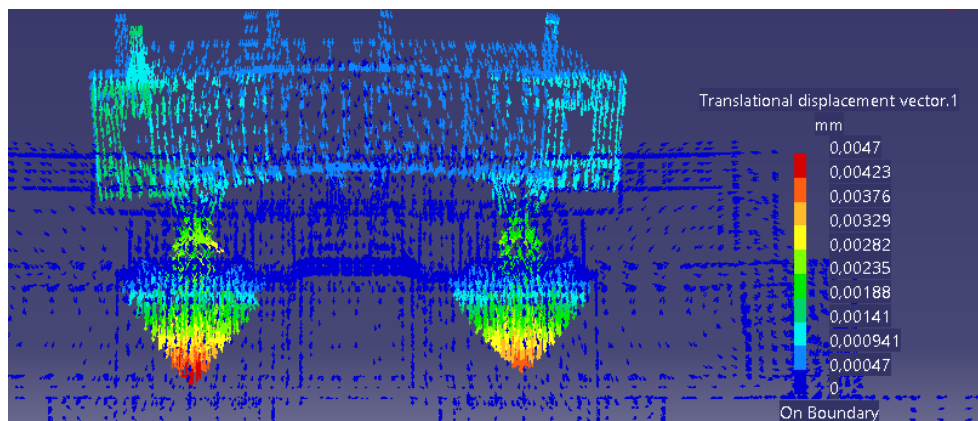


Figura 50 – Deslocamentos para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

### *Espessura de 100mm*

Como se pode verificar pelas figuras seguintes, a ferramenta com espessura de 100mm sofre deslocamentos máximos na ordem dos 0.000693mm.

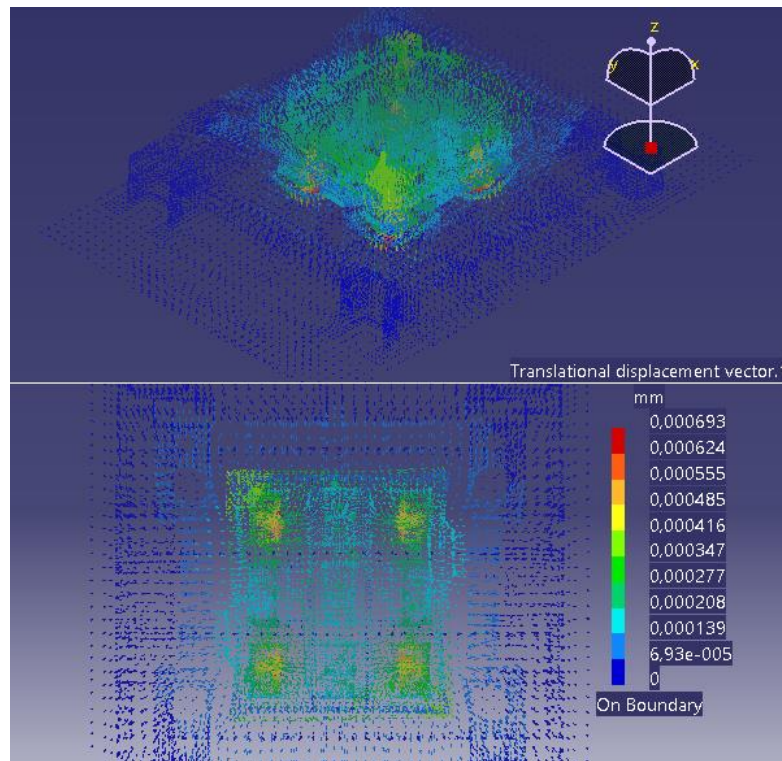


Figura 51 – Deslocamentos para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

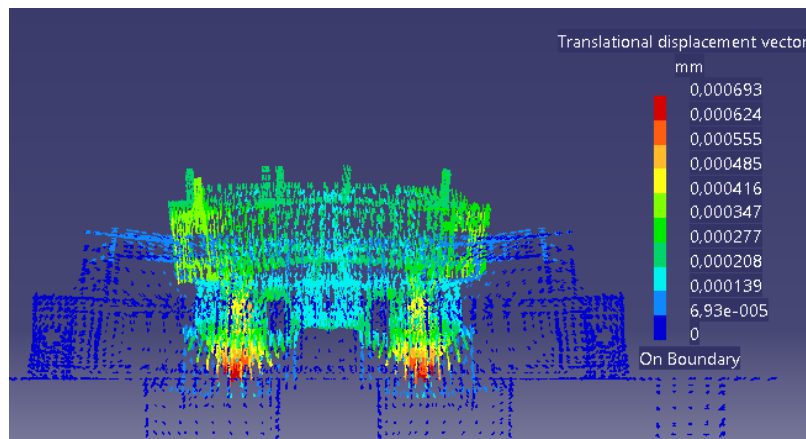


Figura 52 – Deslocamentos para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

Daqui conclui-se que a ferramenta com a espessura de 100mm acaba por sofrer deslocamentos praticamente desprezáveis, reforçando imenso a estrutura da ferramenta.

### 3.1.4. Resultados Obtidos: Deformada

*Espessura de 10mm*

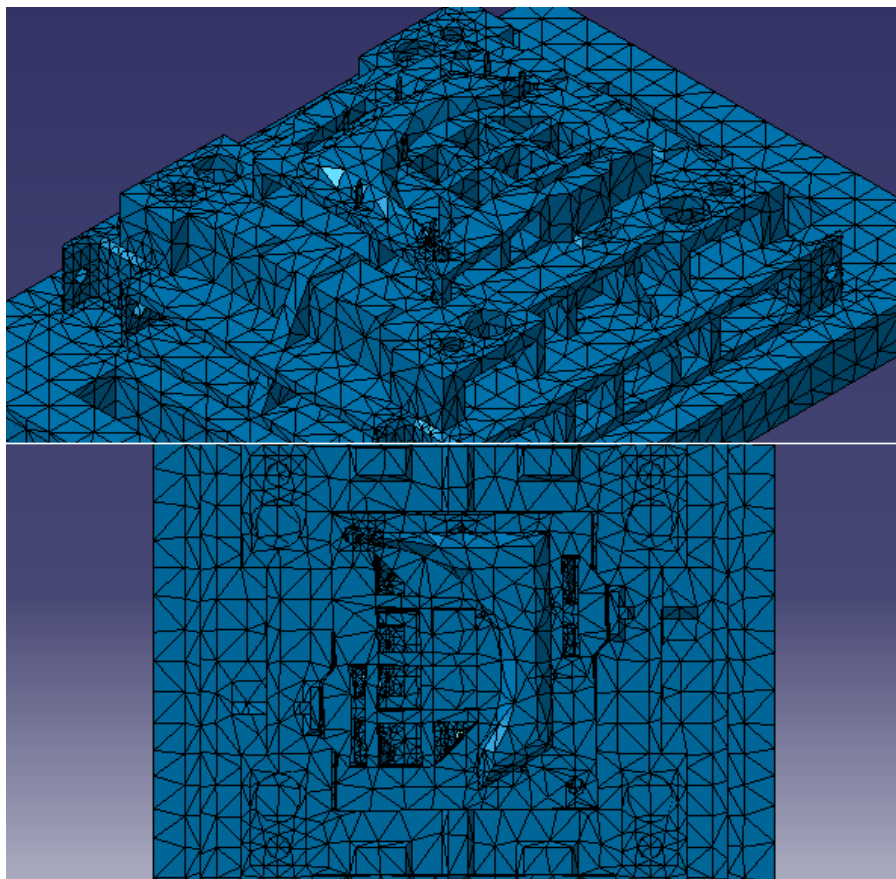


Figura 53 – Deformada para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

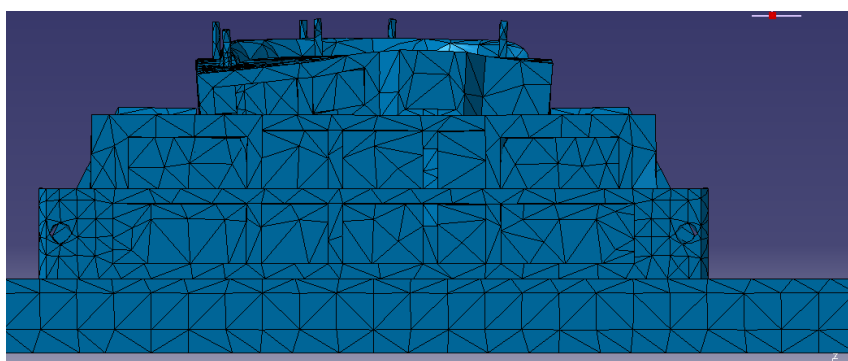


Figura 54 – Deformada para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

*Espessura de 100mm*

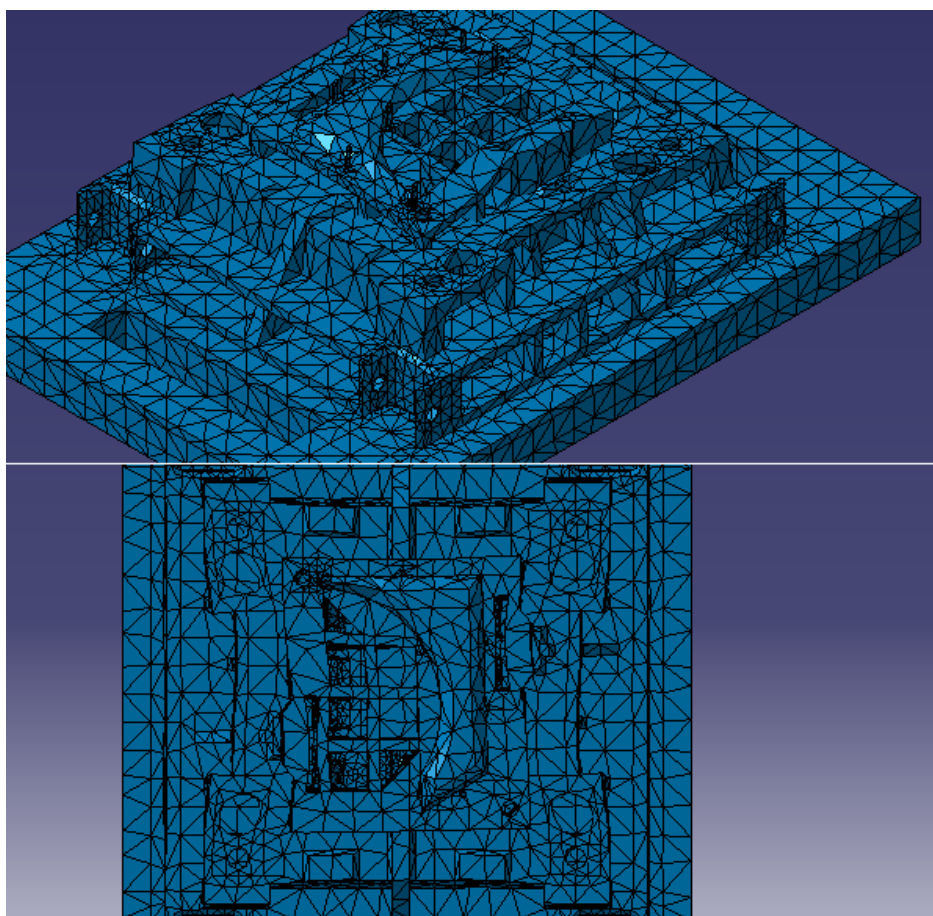


Figura 55 – Deformada para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

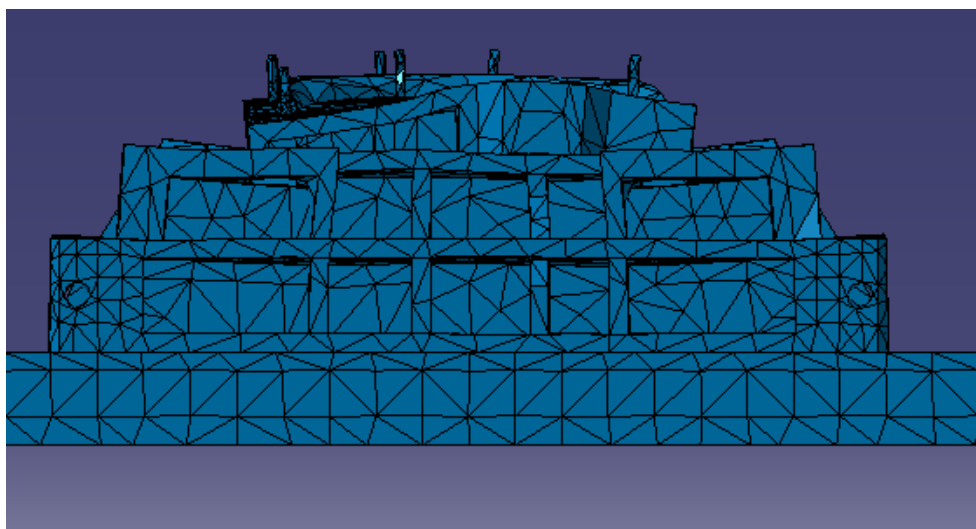


Figura 56 – Deformada para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

### 3.1.5. Resultados Obtidos: Tensões principais

Espessura de 10mm

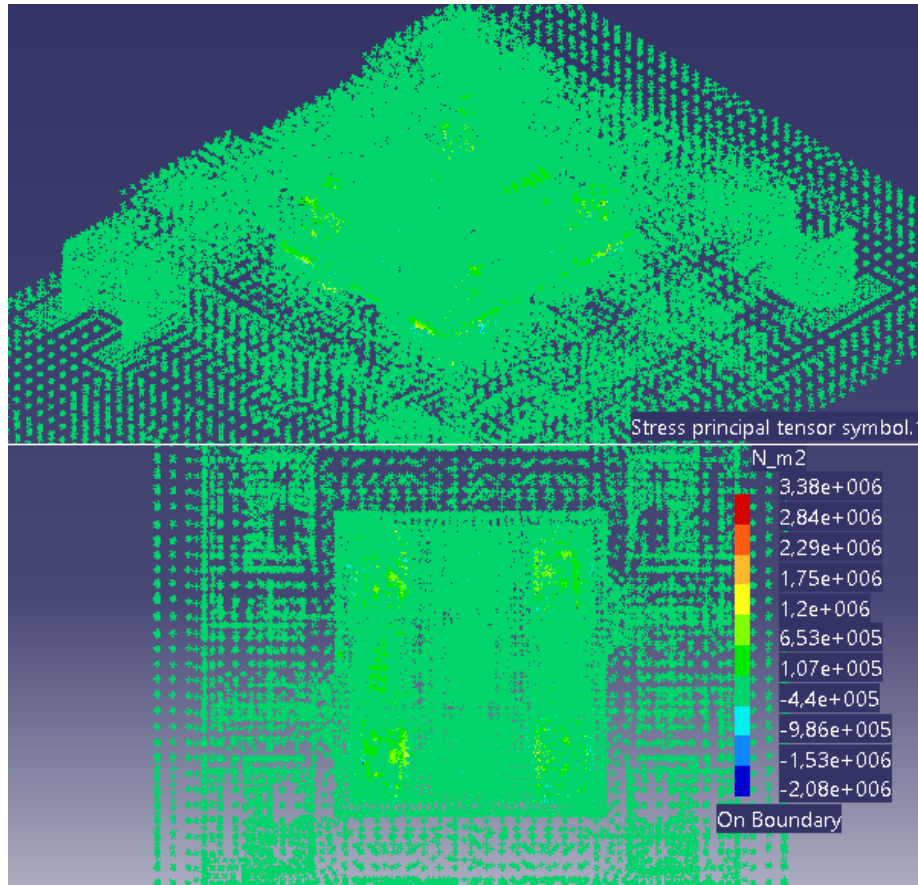


Figura 57 – Tensor para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

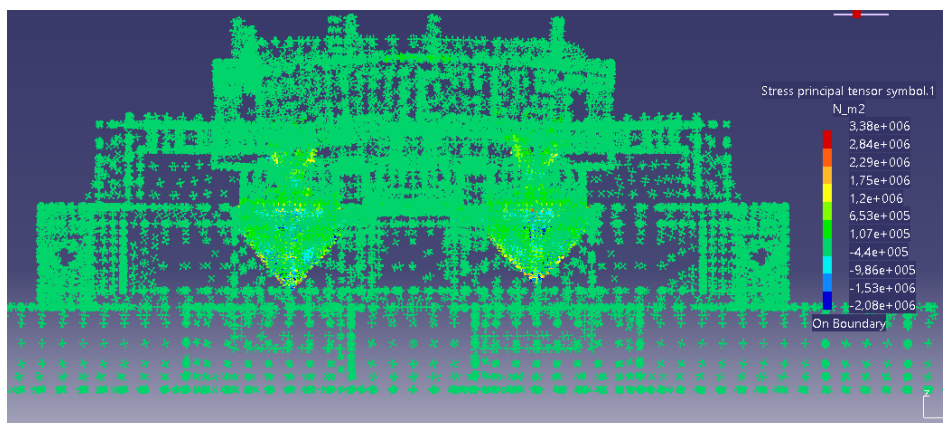


Figura 58 – Tensor para espessura de 10mm (Fonte – Construção própria)

*Espessura de 100mm*

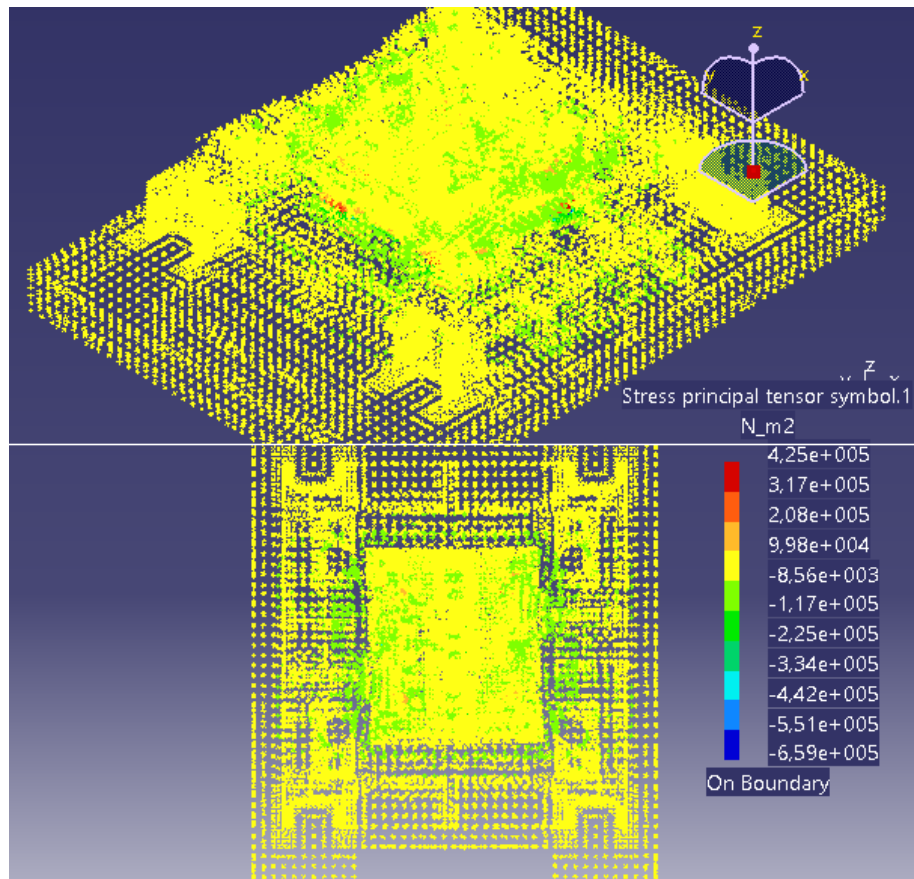


Figura 59 – Tensor para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

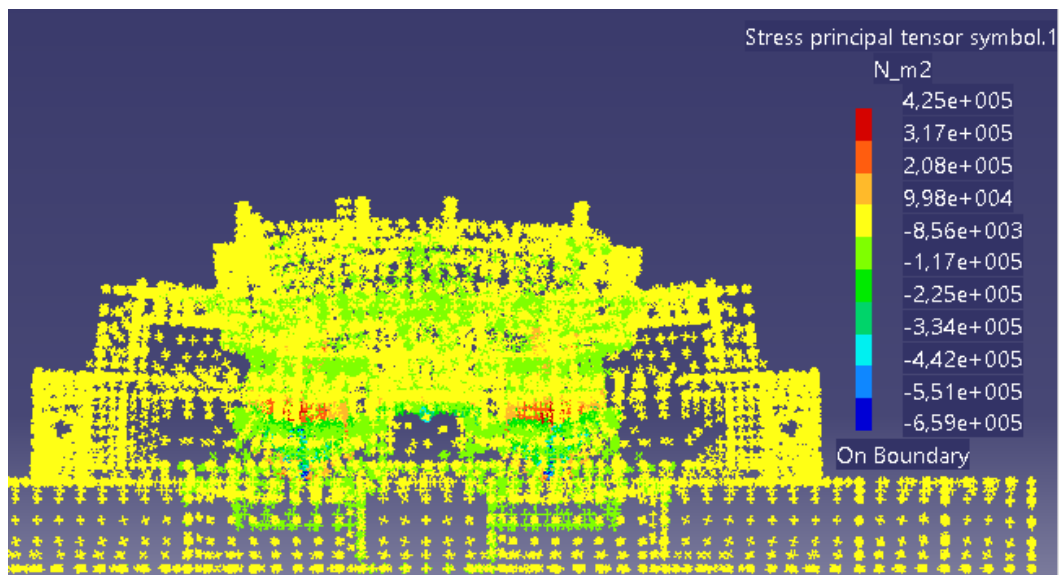


Figura 60 – Tensor para espessura de 100mm (Fonte – Construção própria)

As figuras anteriores ilustram o estudo que foi feito dentro da empresa. A equipa conseguiu através do módulo fazer comparações de estruturas de forma a seleccionar a ferramenta mais resistente pelo mínimo preço possível. Teve-se em consideração uma malha ultrafina de forma a obter resultados mais aproximados da realidade. Os resultados aqui demonstrados servem apenas como ilustração visto que a ferramenta em questão foi desenvolvida pelo estudante e não se trata da ferramenta da empresa. Daí os resultados poderem ser um pouco atípicos. No entanto, conseguem-se tirar conclusões pertinentes acerca do módulo, visto que graças às análises desenvolvidas foi possível identificar os problemas da ferramenta fraturada e corrigi-los de acordo com os objetivos pretendidos.

Neste caso a variável em causa foi a espessura das bases do sistema pneumático da base de fundição, no entanto, dentro da empresa, a equipa teve em conta os tipos de materiais, geometrias da estrutura da ferramenta, posições dos elementos constituintes da ferramenta, alterações de medidas estruturais e até formas completamente diferentes de produzir a peça em questão. As análises são executadas num computador próprio que ficava ligado dias inteiros a simular soluções possíveis. Daí a única variável, neste caso, ter sido a espessura das bases do sistema pneumático da base de fundição.

## 3.2. Estudo da força provocada pelo peso próprio da ferramenta

Dadas as dimensões e peso das ferramentas produzidas na Unidade de cunhos e cortantes da Autoeuropa, acontecem por vezes situações em que, durante a montagem das ferramentas, o cabeçote de fundição não encaixa corretamente com a base de fundição. Isto deve-se ao facto dos cilindros da ferramenta abrirem quando esta é elevada. O módulo proposto permite calcular exatamente qual seria o deslocamento da ferramenta antes desta ser montada o que permitiria prever o seu comportamento e fazer alterações ao projeto em conformidade com essa informação.

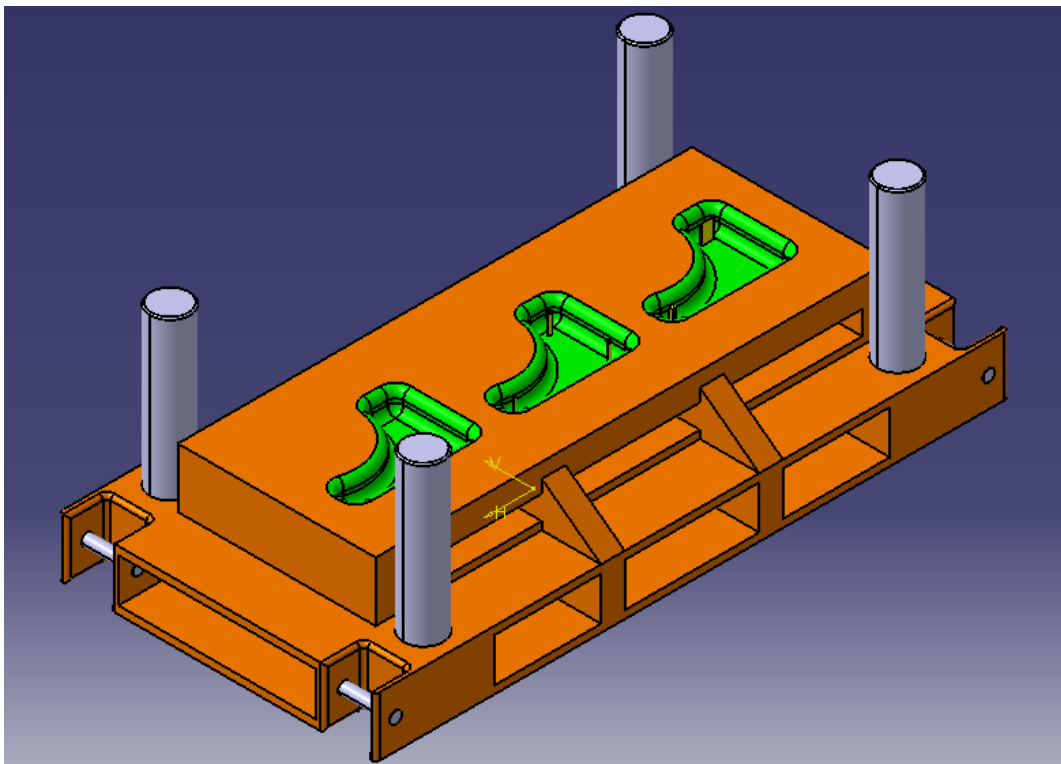


Figura 61 – Ferramenta Progressiva (Fonte – Construção Própria)

Esta situação acontece principalmente em ferramentas progressivas. São o tipo de ferramenta capaz de executar todas as operações de trabalho de uma peça. Todas as peças necessitam de pelo menos 5 operações de estampagem para serem concluídas. As ferramentas progressivas incorporam todas as operações de estampagem numa única ferramenta o que acaba por trazer bastantes benefícios no que toca à quantidade de material utilizado, espaço útil ocupado pela ferramenta e maior eficiência dentro do processo.

No entanto este tipo de ferramentas normalmente necessita de especial atenção devido às suas dimensões inerentemente superiores. Em alguns casos, o comprimento e a altura dos cilindros são tão grandes que o peso próprio da ferramenta, estando esta apoiada em quatro pontos, acaba por a deformar o que poderá dificultar o processo de Try-out de ferramenta, visto



que o cabeçote de fundição pode não encaixar com a base de fundição.

### 3.2.1. Carregamento, Condições de Fronteira e Tipos de Forças

Os resultados foram obtidos através da análise em elementos finitos com recurso ao elemento do tipo tetraédrico com 4 nós.

Neste cenário as condições de fronteira foram impostas na ferramenta de forma a simular o comportamento da mesma quando acoplada à prensa, isto significa que foram colocados apoios fixos nas faces laterais de forma impedir o deslocamento e rotação da mesma. As forças de carregamento distribuído foram aplicadas na face superior de forma a simular o peso próprio.

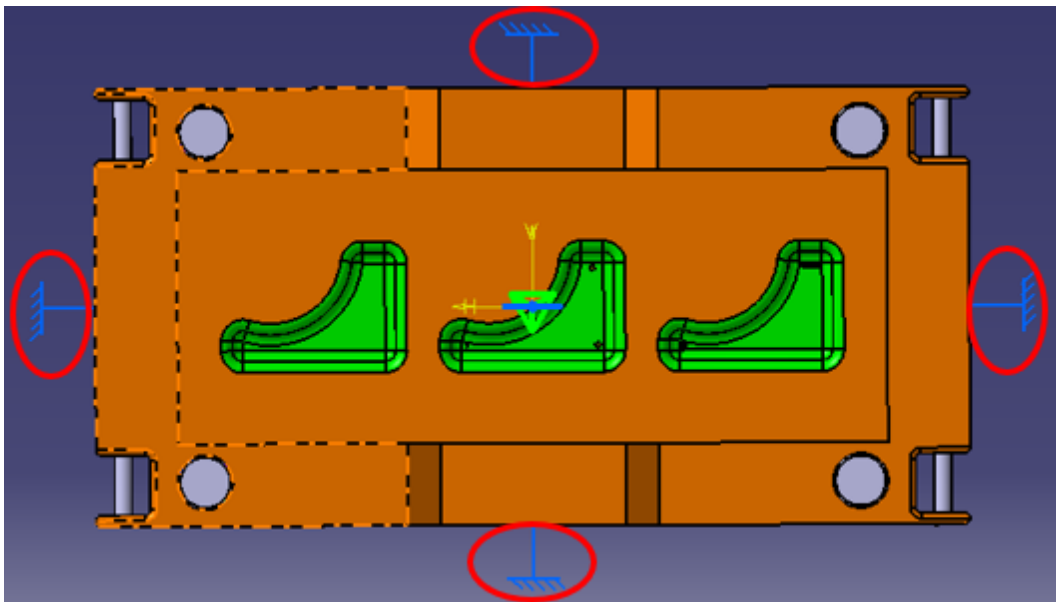


Figura 62 – Apoios (Fonte – Construção Própria)

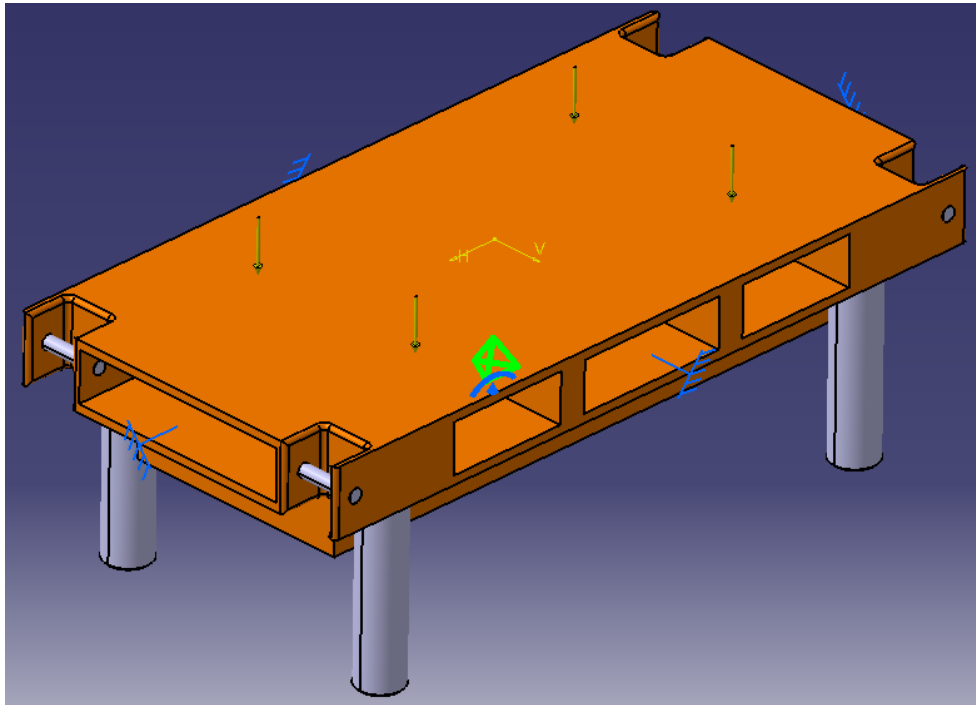


Figura 63 – Força distribuída (Fonte – Construção Própria)

Sabendo que a massa do cabeçote é de 187036 kg irá exercer um peso de 1834265 N.

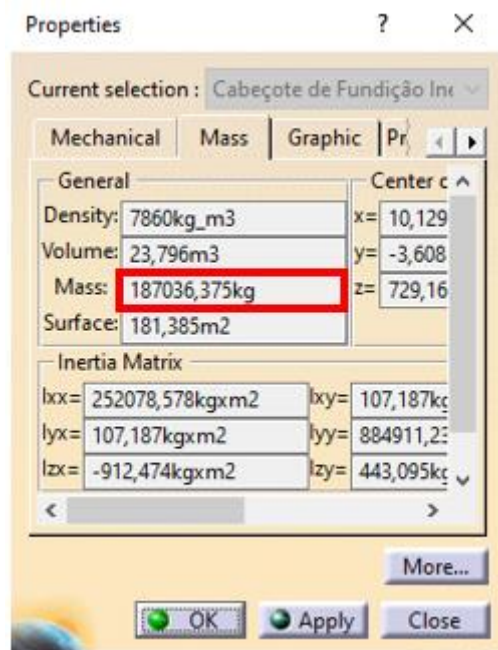


Figura 64 – Propriedades do Cabeçote de Fundição (Fonte – Construção Própria)

Aplicando a força gravítica de  $F = 1\ 834\ 265\ \text{N}$  nas faces seguintes foram obtidos os seguintes resultados:

As seguintes imagens ilustram isso mesmo.

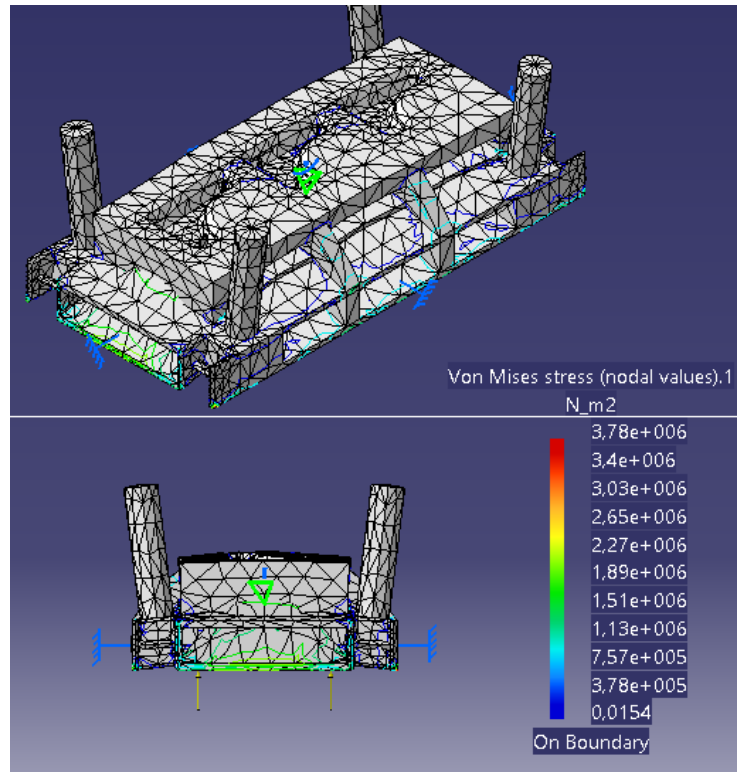


Figura 65 – Von Misses (Fonte – Construção Própria)

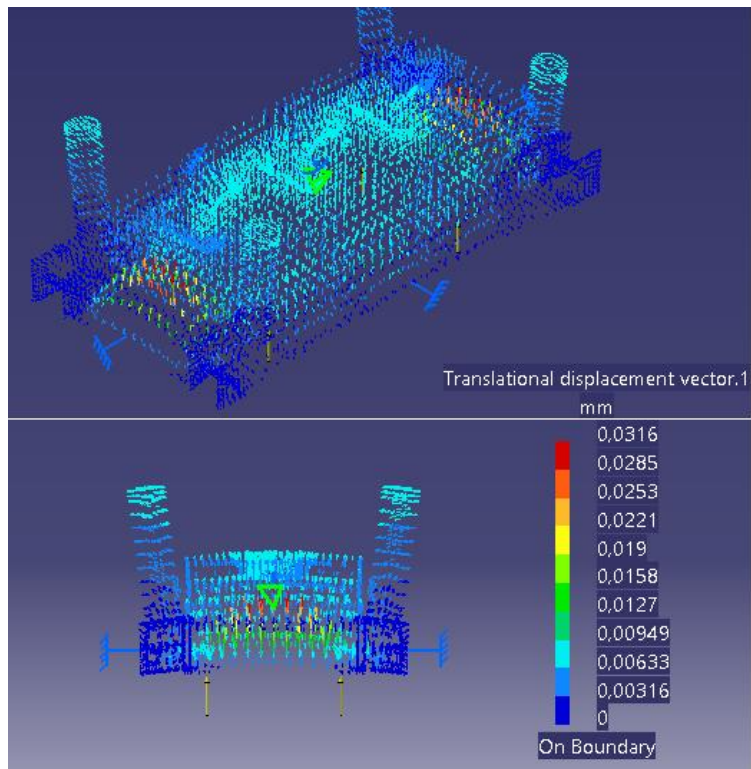


Figura 66 – Deslocamentos (Fonte – Construção Própria)

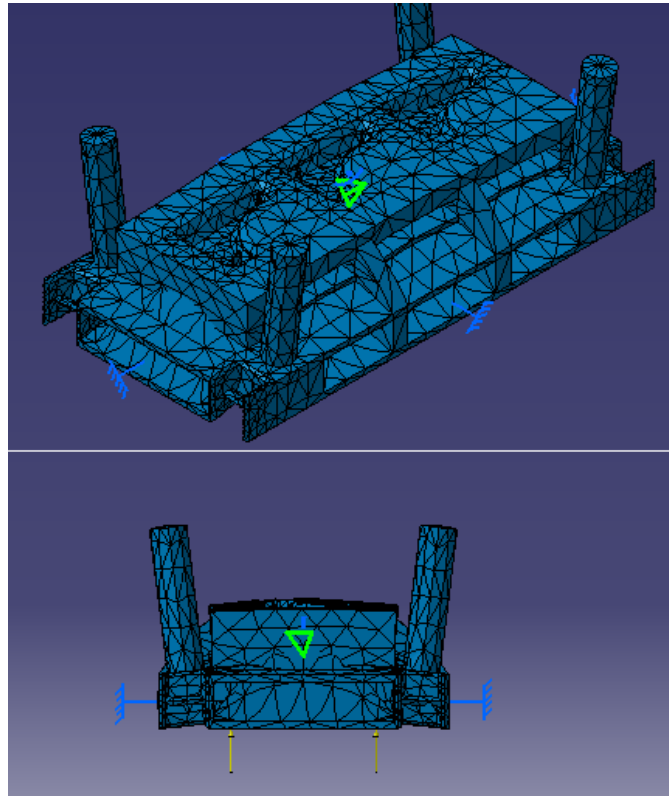


Figura 67 – Deformada (Fonte – Construção Própria)

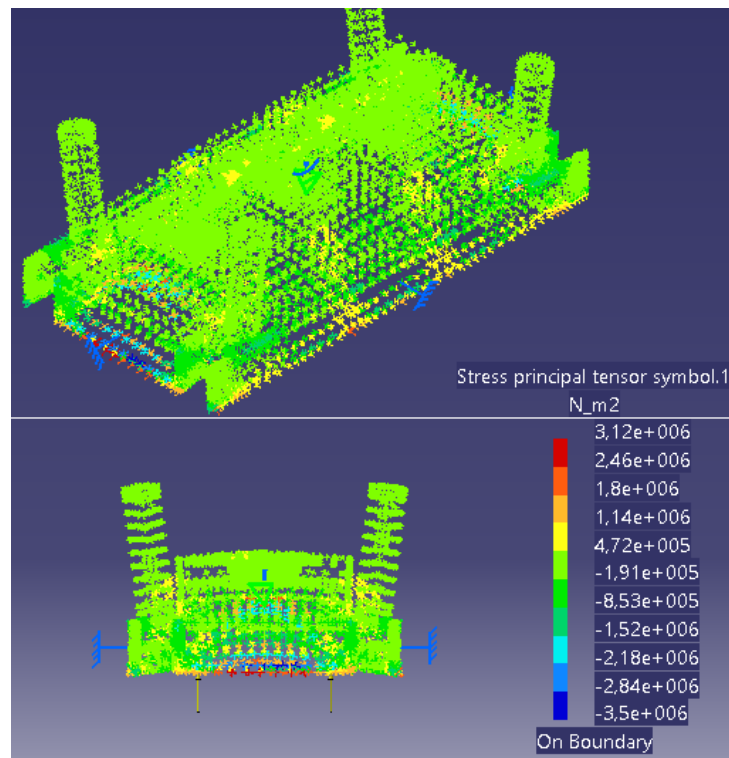


Figura 68 – Tensor (Fonte – Construção Própria)

Como se pode verificar, o módulo pode ser utilizado nas mais variadas situações especiais, evitando perdas de tempo e dinheiro em montagem de ferramentas nas prensas e reparações.

Mais uma vez, não foi possível ao estudante partilhar neste documento a ferramenta da empresa, pelo que a ferramenta aqui demonstrada foi desenhada pelo estudante. Daí os resultados poderem não ser tão conclusivos. No entanto, verificam-se as deformações esperadas numa ferramenta deste tipo apoiada em quatro pontos e afetada pela força gravítica.

# Capítulo 4 -

## Conclusões e propostas de trabalhos futuros

Neste capítulo estão representadas as conclusões obtidas da pesquisa efetuada, bem como propostas de estudos futuros.

Do capítulo 1 da revisão bibliográfica conclui-se que atualmente existem muitos problemas na indústria que podem ser resolvidos com recurso ao método dos elementos finitos, pelo que este método constitui uma ferramenta de cálculo de grande potencial, permitindo resultados fidedignos e confiáveis. Apesar disto, a implementação destes métodos de cálculo em empresas continua mal apreciada pelo facto de ainda se considerar este método dispendiosos em termos de tempo, dinheiro e formação de mão de obra especializada na área.

Daí ser o objetivo desta dissertação a demonstração de que atualmente, graças à tecnologia e programas existentes, a aplicação do método dos elementos finitos a problemas reais da indústria pode ser feita de uma forma rápida e com benefícios económicos evidentes, proporcionando uma solução integrada no ambiente de trabalho de fácil acesso com resultados fiáveis. Pode-se concluir também que o projeto desenvolvido na empresa durante o ano de estágio, permitiu à mesma uma redução significativa dos custos relacionados com a reparação de ferramentas, visto que o módulo agora implementado permite facilmente a deteção de não conformidades na ferramenta de estampagem.

Todo o tipo de dúvidas por parte da equipa de Die Design relacionadas com o comportamento da ferramenta podem ser esclarecidas com recurso ao módulo, facilitando o desenho e finalmente o fabrico da mesma.

Do capítulo 3 conclui-se que, apesar dos casos apresentados serem apenas representativos, é de referir que se torna possível efetuar uma análise comparativa crítica entre os valores obtidos, de forma a elucidar para os cálculos e os processos que foram desenvolvidos durante o trabalho na empresa.

É de concluir ainda que este documento apresenta todo o processo produtivo envolvido na atividade do estudante durante o tempo em que esteve na empresa, definindo com clareza onde e como é que o módulo foi implementado, bem como as áreas afetas à utilização do mesmo.

# Bibliografia

Azizoğlu, Y., Gärdback, M., Sjöberg, B., Lindgren, L. (2017). Finite Element Analysis of cold pilgering using elastic roll dies. *Procedia Engineering* 207, 2370–2375.

Balasubramanian, M., Ramanathan, K., Senthil Kumar, V.S. (2013). Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Alloy in a Stepped Rectangular Die. *International Conference On DESIGN AND MANUFACTURING, IConDM 2013. Procedia Engineering* 64, 1209 – 1218.

Bathe, K.J. (1996). *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Nova Jérσία, Estados Unidos da América.

Boutenel, F., Delhomme, M., Velay, V., Boman, R. (2018). Finite Element Modelling of Cold Drawing for High-Precision Tubes. *Comptes Rendus Mécanique, Volume 346, 8*, 665-677.

Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., Witt, R.J. (2002). *Concepts and applications of Finite Element Analysis*, 4ª edição, John Wiley & Sons, Nova Iorque, Estados Unidos da América.

Crisfield, M.A. (1986). *Finite Elements and Solution Procedures for Structural Analysis – Linear Analysis*, Vol. 1, Pineridge Press, Swansea, Reino Unido.

D’Addona, D.M. & Antonelli, D. (2018). Neural Network Multiobjective Optimization of Hot Forging. *Procedia CIRP*, 67, 498-503.

Das, R., Sarmah, A., Lakshmi, D.V.N., Sood, A. (2014). A Finite Element Analysis on the Effect of Location of holes, Die pockets and Extrusion Speed in Multi-hole Extrusion Process. *12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCMM 2014, Procedia Engineering* 97, 1247-1253.

Fang, W., Tang, D., Wang, H., Lia, D. Peng, Y. (2020). Optimization of die design for thin-walled flat multi-port tube with the aid of finite element simulation. *Journal of Materials Processing Tech.* 277, 116418.

Hinton, E., Owen, D.R.J. (1980). *An Introduction to Finite Element Computations*, Pineridge Press, Swansea, Reino Unido.

Killmann, M., Merklein, M. (2021). Analysis of stress pins for the local prestressing of cold forging tools. *Prod. Eng. Res. Devel.* 15, 119–131.

Koç, M., Arslan, M.A. (2003). Design and finite element analysis of innovative tooling elements (stress pins) to prolong die life and improve dimensional tolerances in precision forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 142, Issue 3, 773-785.

Nayak, K.C., Sahoo, S.K. (2019) Experimental and Finite Element Analysis of Closed-die Combined Extrusion-forging process: Development of Socket Adopter. *Materials Today: Proceedings* 18, 3482–3491.

Rajagopal, A., Kraus, M., Steinmann, P. (2018). Hyperelastic analysis based on a polygonal finite element method. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 25, 11, 930–942.

Sae-Eaw, N., Sukpat, M., Aue-u-Lan, Y. (2017). Investigation of Thermal Effect on Hot Forging Process of Yoke Flange by Finite Element Modeling. *KEM 728*, 54–59.

Soranansri, P., Yanil, S, Sirivedin, K. (2019). Finite Element Modeling of Shrink-Fit Design for Improvement of Die-Service Life in Hot Forging Process of a Bevel Gear, *Materials Today Proceedings*, 17, 1711-1719.

Zienkiewicz, O.C. (1971). *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, Londres, Reino Unido.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (1989). *The Finite Element Method - Basic Formulation and Linear Problems*, Vol. 1, McGraw-Hill, Berkshire, Reino Unido.