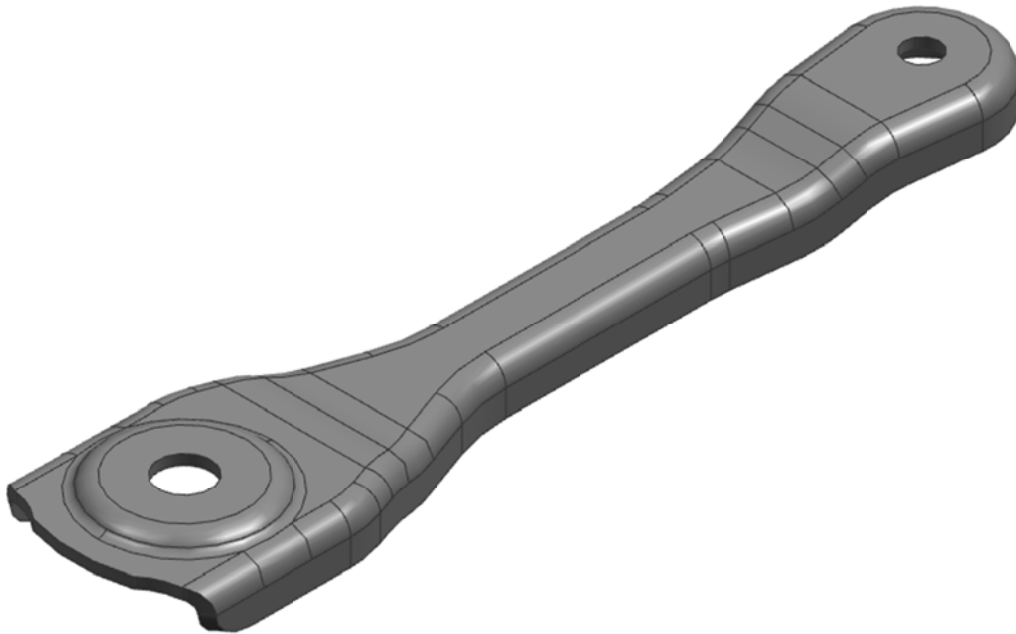




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Otimização do processo de projeto de uma ferramenta progressiva para a estampagem de componentes metálicos**

**DIOGO FILIPE NEVES MORGADO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof. Doutor Joaquim Infante Barbosa  
Mestre Tiago Alexandre Narciso da Silva

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Prof. Doutora Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia  
Prof. Doutor Joaquim Infante Barbosa

**Dezembro de 2013**

Página em branco



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

# **Otimização do processo de projeto de uma ferramenta progressiva para a estampagem de componentes metálicos**

**DIOGO FILIPE NEVES MORGADO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof. Doutor Joaquim Infante Barbosa  
Mestre Tiago Alexandre Narciso da Silva

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Prof. Doutora Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia  
Prof. Doutor Joaquim Infante Barbosa

**Dezembro de 2013**

Página em branco

## **Dedicatória**

Pai, Mãe, Tânia,  
e a toda a gente que  
positiva ou negativamente  
faz parte da minha vida,  
Obrigado...

Página em branco

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que colaboraram comigo profissionalmente e direta ou indiretamente tornaram este trabalho final de mestrado possível: Marco Veras (Pelo apoio durante o curso, a viagem foi longa...), Fanica (Por me ter ensinado a diferença entre um desenhador e um projetista, obrigado mestre), Carlos Aires (Por me ter ensinado a mexer em NX, e pela disciplina e metodologia de projeto), Tiago Figueiredo (Pelo apoio nas noitadas da TRW, a tua dedicação é uma inspiração para mim), Filipe Diogo (Obrigado pelas boleias para o trabalho, ☺), Tiago Martinho (Obrigado pela bibliografia), Mário Antunes e Pedro Costa (Eu cumpri a minha promessa, faltam vocês: “venha a bola!”), Nuno Silva (Obrigado pela dica sobre o tema da tese), a todas as pessoas que em algum momento colaboraram comigo.

Ao meu orientador, Prof. Joaquim Infante Barbosa e ao meu coorientador, Prof. Tiago Silva (pelo apoio durante a elaboração deste trabalho final de mestrado), e a todos os professores do ISEL (pela “bagagem” em termos de formação).

A todos, obrigado.

Página em branco

## Resumo

A área do projeto de ferramentas para a estampagem de elementos metálicos, “*tooling*”, continua a ser um dos grandes pilares de toda a indústria automóvel. A crescente necessidade das empresas em aumentar a produtividade, reduzir os tempos de resposta assim como os custos associados a cada projeto, tem colocado uma pressão crescente sobre os gabinetes de projeto.

Em parceria com uma empresa de projeto e fabrico de ferramentas, foram comparadas duas metodologias distintas de abordagem ao processo do projeto de ferramentas. Uma mais conservadora o método “tradicional”, que utiliza vários *softwares*, e outra integrando todo o projeto na ferramenta “*Progressive Die Wizard*” do *software* NX8 da Siemens, o método “otimizado”.

Este trabalho final de mestrado tem como objetivo analisar o potencial existente na utilização da ferramenta “*Progressive Die Wizard*” no projeto de ferramentas de estampagem metálica.

Os resultados obtidos apontam claramente para ganhos ao nível do *lead-time*, redução de erros e uniformização dos projetos.

## Palavras-chave

- Projeto de ferramentas de estampagem
- Progressive Die Wizard
- NX8

Página em branco

## **Abstract**

The project of metal stamping tools, "tooling", continues to be one of the great pillars of the entire automotive industry. The growing need of companies to increase productivity, reduce response times as well as the costs associated with each project, has put increasing pressure on tooling project departments.

In partnership with a company of design and manufacture of metal stamping tools, two distinct methodologies were compared to approach to the design process. A more conservative way the "traditional" method, using various softwares, and an "optimized" method using only the "Progressive Die Wizard" feature from NX8 software from Siemens.

This study aims to analyze the existing potential in the use of the "Progressive Die Wizard" feature in the design of metal stamping tools.

The results obtained show gains in reducing lead-time, and reducing errors, along with the standardization of the design process.

## **Keywords**

- Metal stamping tools
- Progressive Die Wizard
- NX8
- Tooling

Página em branco

## Glossário/Nomenclatura/Lista de Símbolos

$A_{MP}$	-	Aproveitamento de matéria-prima
$b$	-	Comprimento de dobragem/estampagem
$C$	-	Constante de encruamento
$F_C$	-	Força principal de corte
$F_D$	-	Força de dobragem
$F_{EB}$	-	Força de estampagem (bossa cilíndrica)
$F_{ED}$	-	Força do encostador de dobragem
$F_{EEB}$	-	Força do encostador de estampagem (bossa cilíndrica)
$F_{EU}$	-	Força de estampagem (em “U”)
$F_{EXT}$	-	Força de extração
$h$	-	Espessura de chapa
$j$	-	Folga entre o cunho e a matriz
$k_D$	-	Fator corretivo
$k_U$	-	Fator corretivo
$l$	-	Largura de banda
$MP_{final}$	-	Matéria-prima final
$MP_{inicial}$	-	Matéria-prima inicial
$p$	-	Passo da ferramenta
$p_c$	-	Perímetro de corte
PDW	-	Progressive Die Wizard
$p_e$	-	Perímetro de estampagem
$Q_f$	-	Fator corretivo de estampagem
$r_c$	-	Raio de canto do cunho
$r_{cm}$	-	Raio de canto da matriz
RFQ	-	Request For Quotation
$\lambda$	-	Folga de corte
$\sigma_R$	-	Tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial
$\tau_R$	-	Tensão de rotura ao corte

Página em branco

# Índice

Capítulo 1 .....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Motivações .....	2
1.4 Organização do documento .....	3
Capítulo 2 .....	5
2.1 Objeto de estudo .....	5
2.2 Caso de estudo – “ <i>Tooling</i> ” .....	6
2.3 Modelo de negócio .....	7
2.4 Enquadramento.....	8
Capítulo 3 .....	9
3.1 Cunhos e cortantes – Conceitos-chave .....	9
3.2. Operações básicas.....	9
3.2.1 Corte .....	9
3.2.2 Dobragem .....	12
3.2.3 Estampagem .....	13
3.2.4 Calibração.....	14
3.3 Conceitos particulares .....	14
3.3.1 Enformabilidade .....	15
3.3.2 Recuperação elástica.....	18
3.4 Determinação de variáveis do processo.....	19
3.4.1 Folga de corte .....	19
3.4.2 Força principal de corte .....	19
3.4.2.1 Força de extração.....	20

3.4.3 Força de dobragem .....	20
3.4.3.1 Força do encostador de dobragem.....	21
3.4.4 Força de estampagem .....	21
3.4.4.1 Força de estampagem (Bossa cilíndrica).....	21
3.4.4.2 Força do encostador de estampagem (Bossa cilíndrica).....	23
3.4.4.3 Força de estampagem (Em “U”).....	23
3.4.5 Força de calibração .....	23
3.5 Tipos de ferramentas .....	24
3.5.1 Ferramentas progressivas .....	24
3.5.2 Ferramentas <i>transfer</i> .....	27
Capítulo 4 .....	29
4.1 Método “tradicional” de projeto.....	29
4.2 Preparação inicial .....	29
4.3 Elaboração da banda.....	29
4.3.1 Cálculo do planificado.....	30
4.3.1.1 Cálculo do planificado em SolidWorks 2012.....	30
4.3.1.2 Cálculo do planificado em CATIA V5.....	33
4.3.2 Desenho dos cortantes .....	35
4.3.3 Definição da banda .....	35
4.4 Cálculos .....	36
4.5 Projeto da ferramenta.....	38
Capítulo 5 .....	39
5.1 Método “otimizado” de projeto .....	39
5.2 Preparação inicial .....	39
5.3 Elaboração da banda.....	39

5.3.1 Cálculo do planificado.....	39
5.3.2 Desenho dos cortantes .....	42
5.3.3 Definição da banda .....	43
5.4 Cálculos .....	44
5.5 Projeto da ferramenta.....	45
5.5.1 Elementos estruturais.....	45
5.5.2 Elementos funcionais.....	46
5.5.2.1 Operações de Corte.....	46
5.5.2.2 Operações de Estampagem/Calibração .....	48
5.5.2.3 Operação de dobragem .....	49
5.5.3 Elementos periféricos .....	51
Capítulo 6 .....	53
6.1 Comparação .....	53
6.2 Elaboração do planificado .....	53
6.3 Elaboração da banda.....	55
6.4 Elaboração do projeto da ferramenta.....	57
Capítulo 7 .....	59
7.1 Concretização .....	59
Capítulo 8 .....	63
8.1 Conclusões.....	63
Bibliografia.....	67
Anexo A – Características teóricas do aço S420MC.....	69
Anexo B – Características reais do aço S420MC.....	70
Anexo C – Cálculos parciais das forças (Método “tradicional”).....	71
Anexo D – Cálculos parciais das forças (Método “otimizado”) .....	72

Página em branco

## Índice de Figuras

Figura 1 – Objeto de estudo.....	5
Figura 2 – Fluxograma do modelo de negócio “ <i>Tooling</i> ”.....	7
Figura 3 – Diferentes fases das operações de corte (adaptação de [5]).....	10
Figura 4 – Funcionamento dos encostadores (adaptação de [5]).....	11
Figura 5 – Diferentes fases das operações de dobragem (adaptação de [5]).....	12
Figura 6 – Representação dos elementos de estampagem (adaptação de [5]).....	13
Figura 7 – Diferentes geometrias de provetes utilizados no ensaio de Nakajima [8]. ...	15
Figura 8 – Diagrama limite de enformabilidade (adaptação de [6]).....	16
Figura 9 – Representação de aplicação de caneluras (adaptação de [5]).....	17
Figura 10 – Recuperação elástica ou efeito de mola (adaptação de [9]).	18
Figura 11 – Estampagem de bossa cilíndrica (adaptação de [5]).	22
Figura 12 – Exemplo de ferramenta progressiva.....	26
Figura 13 – Exemplo de ferramenta transfer.....	28
Figura 14 – Peça final após importação para o <i>software</i> SolidWorks 2012.....	31
Figura 15 – Conversão da superfície superior para sheet metal.....	31
Figura 16 – Recriação da aba após planificação.....	32
Figura 17 – Planificado completo.....	32
Figura 18 – Importação da geometria utilizada em SolidWorks para o CATIA V5.....	33
Figura 19 – Recriação da aba presente na peça inicial.....	34
Figura 20 – Planificação final da peça.....	34
Figura 21 – Definição da banda pelo método “tradicional”.....	35
Figura 22 – Matéria-prima necessária para executar a peça (6974 mm <sup>2</sup> ). .....	37
Figura 23 – Projeto da ferramenta final pelo método “tradicional”.....	38

Figura 24 – Região a planificar. ....	40
Figura 25 – Região objetivo para onde deverá ser feita a planificação. ....	41
Figura 26 – Malha utilizada no cálculo do planificado (0.4 mm). ....	41
Figura 27 – Planificado final. ....	42
Figura 28 – Aproveitamento de matéria-prima, 46.6%. ....	43
Figura 29 – Definição da banda pelo método otimizado. ....	44
Figura 30 – Definição dos elementos estruturais. ....	45
Figura 31 – Projeto após execução da estrutura. ....	46
Figura 32 – Introdução de elementos normalizados para operações de corte. ....	47
Figura 33 – Introdução dos restantes punções de corte. ....	47
Figura 34 – Introdução das matrizes de corte. ....	48
Figura 35 – Introdução dos cunhos e dos encostadores. ....	49
Figura 36 – Introdução das matrizes de estampar. ....	49
Figura 37 – Introdução da matriz de dobra. ....	50
Figura 38 – Introdução do punção de dobra. ....	50
Figura 39 – Introdução dos elementos normalizados. ....	51
Figura 40 – Comparação das geometrias utilizadas para o cálculo dos planificados. ....	53
Figura 41 – Comparação das geometrias utilizadas para o cálculo dos planificados (detalhe). ....	54
Figura 42 – Comparação dos planificados obtidos. ....	55
Figura 43 – Aspeto da ferramenta após montagem. ....	59
Figura 44 – Aspeto da ferramenta em prensa. ....	60
Figura 45 – Aspeto da ferramenta em prensa. ....	60
Figura 46 – Peça final. ....	61
Figura 47 – Peça final. ....	61

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Cálculos pelo método “tradicional” .....	36
Tabela 2 – Cálculos através do PDW .....	44
Tabela 3 – Comparativo .....	64

Página em branco

# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

A automatização do processo de projeto de uma ferramenta de estampar é uma temática que tem sido discutida na comunidade científica nos últimos anos. Em 2009, M. Ghatrehnaby e B. Arezoo propuseram um sistema automatizado de elaboração de bandas para ferramentas progressivas [1]. Neste texto, os autores identificaram duas fases muito importantes no processo de elaboração de uma banda o “*Nesting*” e o “*Piloting*”. Consistindo o “*Nesting*” na disposição do planificado das peças na banda, e o “*Piloting*” na disposição dos pilotos à volta desses planificados. Neste texto é apresentado um software com um algoritmo de modo a permitir a otimização da distribuição dos planificados na chapa, minimizar o material desperdiçado e garantindo um guiamento da banda ao longo da ferramenta através da distribuição dos pilotos.

W. Zhang, S. Tor e G. Britton desenvolveram um algoritmo de reconhecimento semelhante ao anterior presente na peça final de modo a planejar a sequenciação das operações ao longo da banda automatizando o “*Nesting*” e o “*Piloting*”. Adicionalmente, estes autores apresentaram as vantagens da implementação de um sistema de inteligência artificial assente em “*knowledge sources*” (bases de dados, de parâmetros de estampagem empíricos), que permitiriam ao algoritmo efetuar as decisões corretas durante o processo de projeto de uma ferramenta [2].

Em 2011, S. Kumar e R. Singh desenvolveram o “*knowledge-base system*” cujo conceito original é semelhante ao conceito apresentado pelos autores W. Zhang, S. Tor e G. Britton, encontrando-se agora esta base de dados agrupada em 27 módulos de modo a fornecer ferramentas de automatização do processo de projeto de uma ferramenta progressiva [3].

A metodologia apresentada neste Trabalho Final de Mestrado (TFM) será uma modernização da metodologia de projeto de ferramentas clássica, tendo como objetivo aproximar os conceitos utilizados hoje em dia na indústria com o estado da arte do projeto automatizado.

## 1.2 Objetivos

Pretende-se no decorrer da elaboração deste TFM, efetuar uma análise comparativa entre o projeto de uma ferramenta de estampagem metálica pelo método “tradicional” e o projeto da mesma ferramenta através de um método que designaremos como “otimizado”. Esta abordagem ao projeto recorrerá à ferramenta de projeto paramétrico “*Progressive Die Wizard*”, um módulo específico para o projeto de ferramentas de estampagem do *software* NX8 da Siemens. A fim de quantificar as vantagens e desvantagens que cada um destes métodos oferece, será realizado o projeto de uma determinada ferramenta de estampagem metálica em simultâneo utilizando ambas as metodologias. O projeto pelo método “tradicional” será elaborado na empresa Manuel da Conceição Graça, Lda.<sup>1</sup>, sendo que o projeto pelo método “otimizado” será elaborado exclusivamente para este TFM.

Após a concretização destes dois processos de projeto distintos, será possível comparar ambas as abordagens, permitindo ainda quantificar mais-valias do ponto de vista de redução de *lead-times*, e diminuição de oportunidades de erro por parte do projetista. Com a construção da ferramenta na empresa Manuel da Conceição Graça, Lda., durante o decorrer da elaboração deste TFM, será também possível validar os planos gerados pelos *softwares* utilizados.

## 1.3 Motivações

O domínio de ferramentas paramétricas de projeto mecânico concede às empresas uma vantagem competitiva que hoje em dia é cada vez mais essencial para permitir a continuidade e o crescimento das mesmas. Deste modo uma das grandes motivações para a elaboração deste TFM, consiste no estudo do método de funcionamento destes *softwares* permitindo deste modo trazer este conhecimento para as empresas de hoje em dia, contribuindo ativamente para o aumento da competitividade das mesmas. Outra das motivações para a elaboração deste TFM consiste no facto de não existir nenhuma empresa do ramo do fabrico de ferramentas “*Tooling*” da península Ibérica, que domine/aplique este *software*, permitindo deste modo à empresa com a qual este TFM

---

<sup>1</sup> A empresa Manuel Da Conceição Graça, Lda. é uma empresa portuguesa com mais de 30 anos, ligada ao ramo dos cunhos e cortantes, [www.mcg.pt](http://www.mcg.pt).

foi elaborado em conjunto (Manuel da Conceição Graça, Lda.) tornar-se na primeira empresa a fazê-lo.

## **1.4 Organização do documento**

No que diz respeito à organização deste documento, o mesmo inicia-se com dois capítulos, um introdutório, e um capítulo onde é feito o enquadramento deste TFM.

Seguindo-se um capítulo mais pormenorizado, onde são definidos os conceitos-chave necessários para a compreensão da temática exposta neste trabalho, de modo a facilitar a compreensão de determinada terminologia específica da área dos cunhos e cortantes.

Os dois métodos de abordagem ao processo de projeto de uma ferramenta de estampagem metálica serão analisados em capítulos distintos, com estruturas internas idênticas, de modo a facilitar a leitura e a comparação entre ambos.

Segue-se um capítulo de conclusões onde será efetuada a comparação entre os dois métodos, e um capítulo final onde será analisada a concretização da ferramenta projetada.

Página em branco

## Capítulo 2

### 2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo do presente TFM será uma peça metálica (ver Figura 1), constituinte de um banco automóvel que será executado no material S420MC cujas propriedades mecânicas teóricas se encontram presentes no Anexo A. No Anexo B encontra-se o relatório dos ensaios de tração a que o material em questão foi submetido no laboratório de qualidade da empresa Manuel da Conceição Graça, Lda<sup>2</sup>.



**Figura 1 – Objeto de estudo.**

---

<sup>2</sup> No decorrer deste TFM adotaremos os valores teóricos, uma vez que apesar de existirem algumas variações entre os valores teóricos e os valores efetivamente medidos nas chapas adquiridas segundo esta norma de material, estas variações são desprezáveis.

## 2.2 Caso de estudo – “Tooling”

A subcontratação (*procurement*) de ferramentas de estampagem metálica tornou-se numa atividade global, e com a recente entrada no mercado de produtores *low cost* provenientes de países da europa de leste e da ásia tem tornado este mercado cada vez mais competitivo [4].

Com a instalação da crise económica um pouco por toda a europa e américa do norte, os construtores automóveis generalistas deparam-se com o fenómeno da redução de vendas, uma vez que o ambiente de pessimismo económico leva os consumidores destas regiões a retraírem-se nos seus hábitos de consumo. Esta quebra nas vendas de automóveis novos coloca os construtores numa situação complicada, na medida em que se vêm forçados a baixar cada vez mais os preços dos automóveis na esperança de irem ao encontro das expectativas dos clientes. Nesta busca de redução de preços existem duas medidas que afetam diretamente a área de negócio das ferramentas de estampagem: a primeira medida é o aumento do ciclo de vida dos produtos (automóveis), que através do atraso no lançamento de novos modelos permite reduzir os custos associados à produção dos mesmos, rentabilizando os investimentos já feitos (linhas de montagem, ferramentas de estampagem, entre outros); a segunda medida consiste na redução dos gastos com os arranques de novos produtos, nomeadamente a mobilização de linhas de montagem para países ditos *low cost* (tendo como objetivo beneficiar de preços de mão-de-obra inferiores, assim como menores obrigações ao nível da saúde, segurança e obrigações sociais), em simultâneo com a redução dos *lead-times* de projeto/arranque de produção (lógica *just-in-time*). Esta realidade começa também a fazer-se sentir no negócio das ferramentas de estampagem, com a entrada no mercado de fabricantes de ferramentas de estampagem com sedes nos já referidos países *low cost* [4]. Este cenário deixa os fabricantes de ferramentas de estampagem portugueses numa posição delicada relativamente ao futuro, na medida em que se torna imperativo a necessidade de novos métodos para rentabilizarem o seu negócio mantendo a sempre necessária qualidade e competitividade.



equilíbrio entre a rapidez na resposta, e a clara demonstração de capacidades técnicas para a realização do projeto em questão.

Após análise, por parte do cliente, dos vários orçamentos e das várias bandas recebidas, o cliente efetuará a adjudicação do trabalho a um desses fornecedores, exigindo de seguida um estudo aprofundado da estratégia que o fornecedor irá utilizar para executar a ferramenta, e em última análise as operações que irá utilizar para executar as peças finais.

O cliente negociará de seguida com o fornecedor qual a melhor maneira para a elaboração da ferramenta. Quando ambos estiverem em sintonia, quanto à melhor estratégia a adotar relativamente à elaboração da ferramenta, o fornecedor irá então projetar a ferramenta tendo como base a banda final. Findo este período de projeto da ferramenta, a mesma é lançada em produção sendo posteriormente montada, estando então pronta para a próxima fase, a fase dos ensaios (*Tryouts*). A fase de ensaios é uma das fases mais importantes, uma vez que com os primeiros ensaios surgem sempre algumas alterações que são necessárias introduzir no projeto (problemas funcionais da ferramenta, problemas na maquinação de elementos da ferramenta, etc.).

Finalizando o período de ensaios, a ferramenta é aprovada pelo cliente e dada como apta para entrar em produção série.

## **2.4 Enquadramento**

Deste modo, a área de atuação deste TFM no modelo de negócio aqui descrito concentra-se na agilização da criação dos documentos necessários a todo este processo, (a elaboração da banda para orçamento, a elaboração da banda a final e a elaboração do projeto da ferramenta), permitindo assim diminuir os prazos, minimizar os erros e em última análise os custos associados.

De modo a tornar mais fácil a compreensão das diferenças entre os métodos que serão expostos neste TFM, torna-se necessário proceder ao esclarecimento de alguns conceitos-chave e terminologia utilizada antes de se avançar para a análise de cada método, sendo este esclarecimento feito no capítulo seguinte.

## Capítulo 3

### 3.1 Cunhos e cortantes – Conceitos-chave

No presente capítulo definiremos alguns conceitos chave para a compreensão do tema exposto, assim como definiremos alguma linguagem específica do meio do projeto dos cunhos e cortantes.

### 3.2. Operações básicas

Por definição, a estampagem é um processo de conformação mecânica que através de um conjunto de operações transforma chapas planas, sob a forma de tiras retangulares ou rolos de chapa, em peças metálicas com contornos e formas pré-definidos, tipicamente o produto final. Estas operações são submetidas às chapas recorrendo a uma prensa mecânica ou hidráulica, que através de uma ferramenta, progressiva ou *transfer*, aplicará, de forma sequencial, as operações pré-definidas à chapa de modo a produzir a peça final.

Apresentaremos de seguida as diferentes operações básicas a que a chapa pode ser submetida durante um processo de conformação mecânica, podendo estas operações serem aplicadas separada ou simultaneamente à chapa em cada estação da ferramenta.

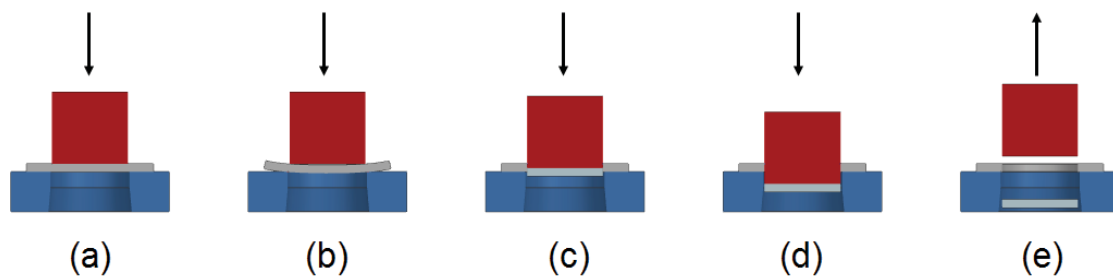
#### 3.2.1 Corte

As operações de corte consistem na remoção de material presente no formato inicial, desnecessário à produção da peça final. Estas remoções podem ser feitas ao longo do contorno exterior da peça, assim como no interior dos contornos da mesma, sob a forma de furos, rasgos, entre outros.

As operações de corte são tipicamente efetuadas *a priori* das operações de dobragem e estampagem, quando a chapa ainda se encontra plana. No entanto, em certos casos específicos, pode ser vantajoso conferir primeiro alguma forma à peça final e efetuar certas operações de corte posteriormente, de modo a garantir uma maior estabilidade do processo produtivo e evitar deformações dos contornos de determinados cortes, furos ou rasgos por operações de deformação mecânica posteriores.

Mais em pormenor, as operações de corte são executadas por dois componentes principais, o punção de corte e a matriz de corte, sendo que em casos particulares poderão existir também o encostador<sup>3</sup> e um ou vários extratores para o retraço<sup>4</sup>. Entre a aresta de corte do punção e a da matriz existirá uma folga que definiremos como folga de corte.

Este tipo de operações pode ser dividido em 5 fases distintas, sendo que na primeira fase o punção comprime a chapa, que se encontra sobre a matriz (Figura 3 (a) e (b)). No instante seguinte existe uma deformação plástica da chapa devido à ação do punção e à existência da folga de corte (Figura 3 (c)). Quando esta deformação atinge o limite de rotura do material, dá-se a separação completa através de um arrombamento (Figura 3 (d)). A operação de corte finaliza-se com a separação do retraço relativamente ao punção e a extração do punção do interior da chapa (Figura 3 (e)) [5].

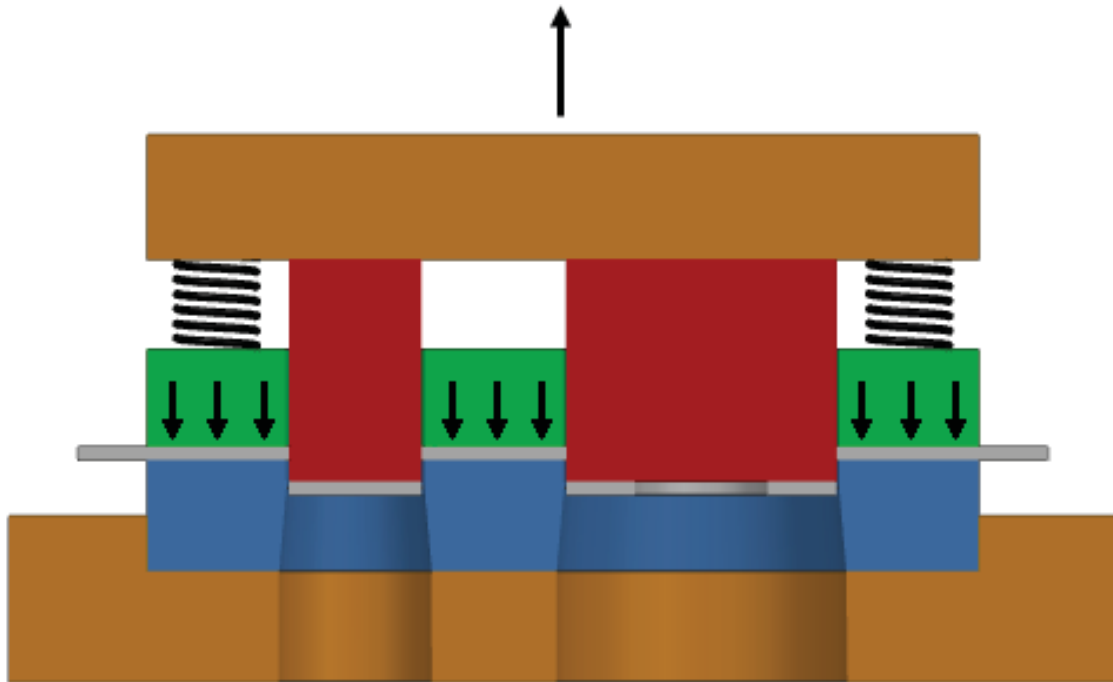


**Figura 3 – Diferentes fases das operações de corte (adaptação de [5]).**

A existência de um encostador neste tipo de operações tem como objetivo a obtenção de um corte, furo, rasgo, etc., sem que no processo se deformem as regiões circundantes (Figura 3 (b)), assim como permitir a extração do punção do interior da chapa depois de consumado o corte (Figura 3 (e)). Para o efeito o encostador deverá pressionar a chapa antes do punção entrar em contacto com a chapa, e deverá deixar de estar em contacto com a mesma depois do punção já não se encontrar dentro da chapa. O funcionamento destes encostadores é conseguido com recurso a sistemas elásticos, elastómeros ou molas a gás, por exemplo [5] (ver Figura 4).

<sup>3</sup> Os encostadores utilizados nas operações de corte são também conhecidos no meio dos cunhos e cortantes como pisas.

<sup>4</sup> O retraço consiste no pedaço de chapa que após a operação de corte é descartado.



**Figura 4 – Funcionamento dos encostadores (adaptação de [5]).**

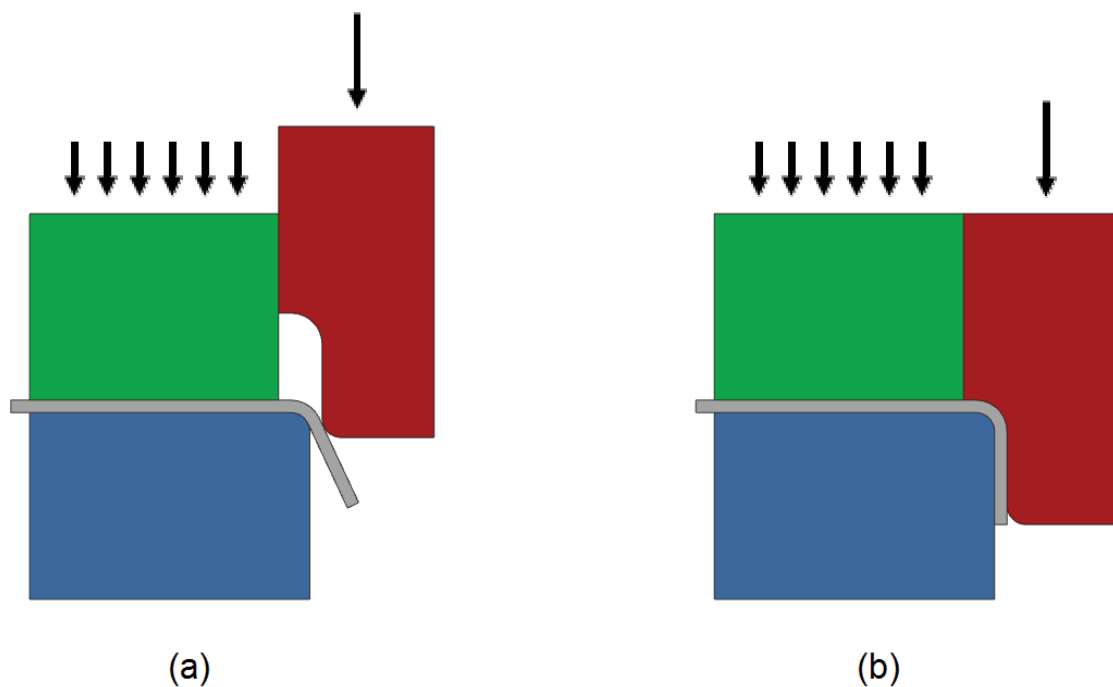
A utilização de extratores para os retraços tem como objetivo a separação destes relativamente aos punções no final da operação de corte.

Devido aos esforços a que as ferramentas de estampagem metálica estão sujeitas existem sempre grandes cuidados com a correta lubrificação de todos os elementos intervenientes neste processo. No entanto, o efeito benéfico destas lubrificações acarreta efeitos secundários que devem ser contrariados. Nomeadamente nas operações de corte, esta lubrificação torna-se desvantajosa na medida em que os retraços de menor dimensão, e por consequência menor peso, poderão aderir ao punção no final de uma operação de corte. Esta adesão poderá ter efeitos catastróficos uma vez que o retraço ao permanecer na ponta do punção poderá levar à danificação do mesmo na operação de corte subsequente, ou danificar as arestas de corte da matriz. De referir também que no ambiente competitivo, em que a produção dos componentes metálicos para a indústria automóvel é efetuada, as cadências de produção exigidas às ferramentas são elevadas, de modo a conseguirem equiparar-se com as produções anuais contratadas, pelo que estas pequenas falhas representam, não só um custo direto de reparação dos componentes danificados da ferramenta, de modo a repor as suas condições produtivas,

como também um custo indireto, muito superior, por poder colocar em risco todo o planeamento de produção de uma unidade fabril, com todas as penalizações inerentes ao incumprimento dos contratos assinados.

### 3.2.2 Dobragem

As operações de dobragem consistem na dobragem de abas, patilhas ou similares através de uma operação de sujeição mecânica muito semelhante à quinagem. Neste tipo de operações o punção ou cunho de dobra sujeitará a chapa a dobrar sobre o raio de canto da matriz da matriz de dobra, sendo que entre ambos deverá figurar uma folga que no limite será o valor da espessura da chapa (ver Figura 5).



**Figura 5 – Diferentes fases das operações de dobragem (adaptação de [5]).**

Este tipo de operações carece da utilização de um encostador de modo a que quando o punção inicia a dobragem da chapa (Figura 5 (a)), o momento resultante não deforme a região circundante da zona a dobrar. A utilização de um encostador garante também que o posicionamento da dobra, impedindo que a peça a dobrar se mova durante a operação de dobragem.

### 3.2.3 Estampagem

As operações de estampagem permitem conferir formas complexas às chapas a estampar. Neste tipo de operações, o punção ou cunho de estampar terá a forma positiva, e a matriz de estampar a forma negativa, sendo que entre ambos existirá uma folga que no limite será a espessura da chapa (ver Figura 6).

O encostador<sup>5</sup> é um elemento que tem como principal função controlar o escoamento da chapa durante a operação de estampagem, enquanto a mesma se encontra a adquirir a forma presente no conjunto cunho/matriz de estampar. O controlo deste escoamento é realizado através da aplicação de pressão sobre a chapa criando assim o atrito necessário para contrariar o referido escoamento [5].

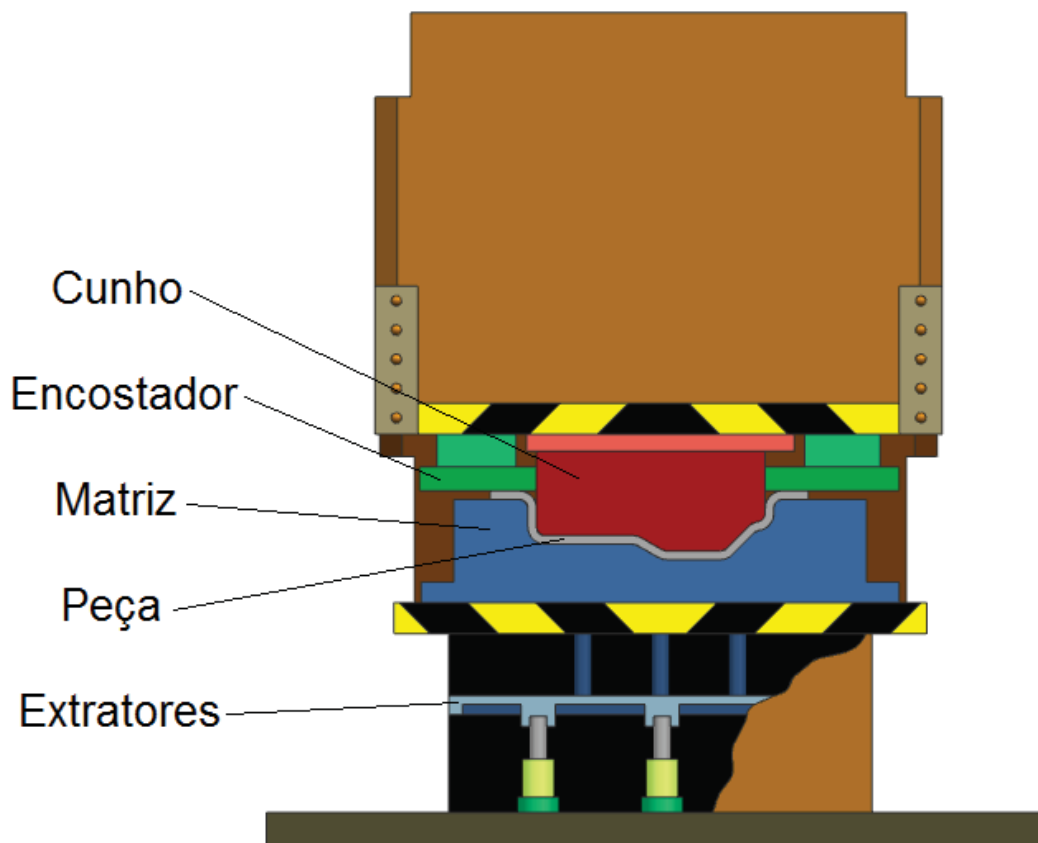


Figura 6 – Representação dos elementos de estampagem (adaptação de [5]).

---

<sup>5</sup> Os encostadores utilizados nas operações de estampagem são também conhecidos no meio dos cunhos e cortantes como “cerra-chapas”.

Devido à complexidade acrescida deste tipo de operações, a sequenciação dos acontecimentos deverá ser a seguinte:

1. A chapa é colocada sobre a matriz,
2. O encostador começa a exercer a sua ação sobre a chapa,
3. O cunho inicia a conformação da chapa forçando-a a deslizar entre o encostador e a matriz,
4. Ao terminar a conformação da chapa entre o cunho e a matriz termina também a operação de estampagem.

Seguidamente será necessário extrair a peça do interior do cunho ou do interior da matriz dependendo da forma concedida à peça, a mesma terá maior tendência para aderir a um ou outro após esta operação. A extração é consumada pela atuação dos extratores que expulsarão mecanicamente a peça estampada.

Dependendo do grau de complexidade, este tipo de operações pode/deve ser submetido a uma análise de exequibilidade quanto à enformabilidade, recorrendo ao diagrama limite de enformabilidade (ver seção 3.3.1), assim deve ser acautelada a possibilidade do aparecimento de efeitos de recuperação elástica (ver seção 3.3.2).

### **3.2.4 Calibração**

O último tipo de operações existente em processos de estampagem metálica é a calibração. Estas operações consistem na recomformação de uma peça previamente estampada, e têm como objetivo a afinação de certos pontos importantes da geometria da peça final, tais como planos de assentamento com exigências dimensionais elevadas, que possam não ter ficado corretamente conformados nas operações de estampagem.

Este tipo de operação permite também atenuar os efeitos de recuperação elástica (ver seção 3.3.2), que normalmente se podem observar nas operações de estampagem.

## **3.3 Conceitos particulares**

Os processos de conformação mecânica de chapas metálicas possuem alguns acontecimentos que afetam o normal funcionamento dos mesmos, adicionando um grau extra de complexidade às operações de estampagem profunda.

Definiremos de seguida os conceitos particulares de enformabilidade e de recuperação elástica.

### 3.3.1 Enformabilidade

O conceito de enformabilidade relaciona o nível máximo de deformação que um determinado material consegue suportar sem que ocorra: o aparecimento de fissuras, reduções de espessuras, estiramentos ou enrugamentos [6]. Este conceito assenta na Teoria da Elasticidade (Robert Hooke - 1678), que caracteriza a relação existente entre as tensões e as deformações que existe nos materiais durante um carregamento [7].

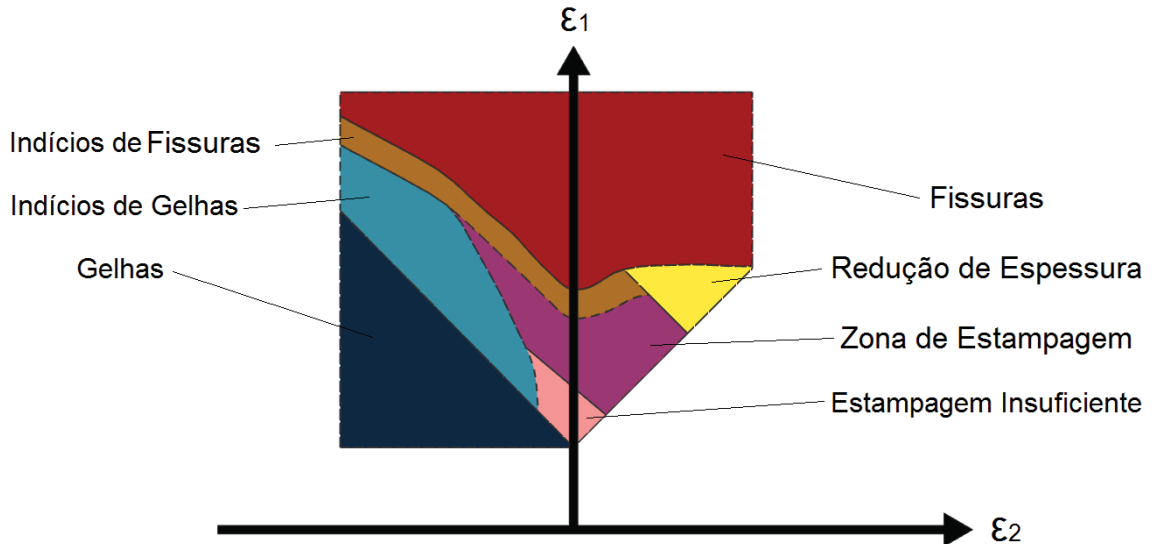
De modo a poder prever o comportamento do material durante a deformação é necessário proceder à determinação da curva limite de enformabilidade, através de uma sucessão de ensaios destrutivos de deformação metálica com provetes de diferentes geometrias (ver Figura 7).



**Figura 7 – Diferentes geometrias de provetes utilizados no ensaio de Nakajima [8].**

O ensaio de Nakajima consiste na deformação dos referidos provetes até à rotura dos mesmos de modo a conseguir traçar a curva limite de enformabilidade, que relaciona as extensões principais resultantes do estado de tensões a que os provetes estão sujeitos com a resistência do material. Esta curva serve posteriormente para traçar o diagrama

limite de enformabilidade (ver Figura 8), que permite caracterizar melhor o comportamento do material durante a sua sollicitação [8].



**Figura 8 – Diagrama limite de enformabilidade (adaptação de [6]).**

O diagrama limite de enformabilidade encontra-se organizado em diferentes áreas correspondentes a diferentes combinações de deformações principais:

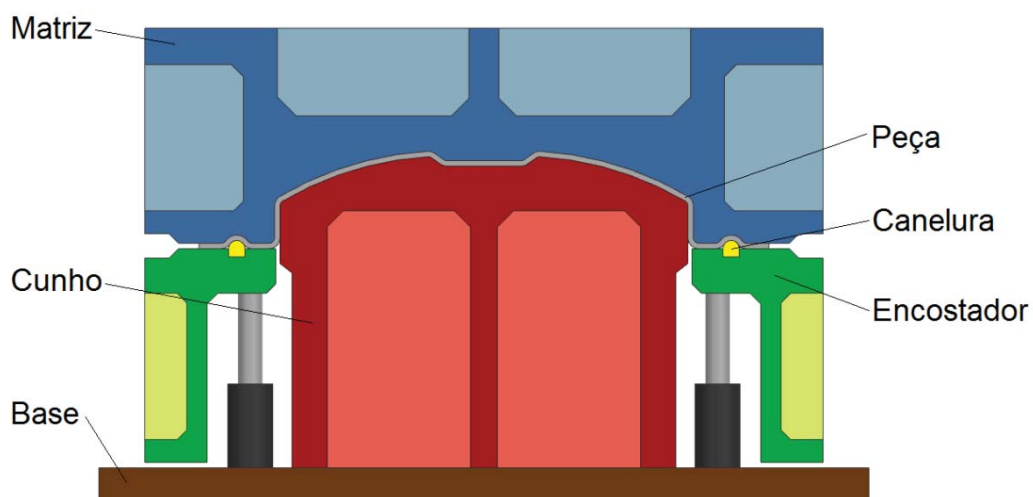
- Fissuras – Área onde as deformações sofridas são superiores à deformação máxima suportada pelo material.
- Indícios de Fissuras – Área onde as deformações sofridas podem ainda levar ao aparecimento de fissuras ocasionalmente.
- Redução de Espessura – Área onde as deformações sofridas causam estiramentos localizados no material, resultando numa acentuada redução de espessura.
- Gelhas – Área onde as deformações sofridas causam gelhas ou enrugamentos.
- Indícios de Gelhas<sup>6</sup> – Área onde as deformações sofridas podem ainda levar ao aparecimento de gelhas ocasionalmente.

---

<sup>6</sup> Os enrugamentos resultantes de um processo de estampagem imperfeito são também conhecidos no meio dos cunhos e cortantes como “gelhas”.

- Estampagem Insuficiente – Área onde as deformações sofridas não permitem a correta conformação à nova geometria por parte do material sujeitado, podendo ocorrer recuperação elástica.
- Zona de estampagem – Área onde as deformações sofridas permitem a correta conformação à nova geometria por parte do material sujeitado.

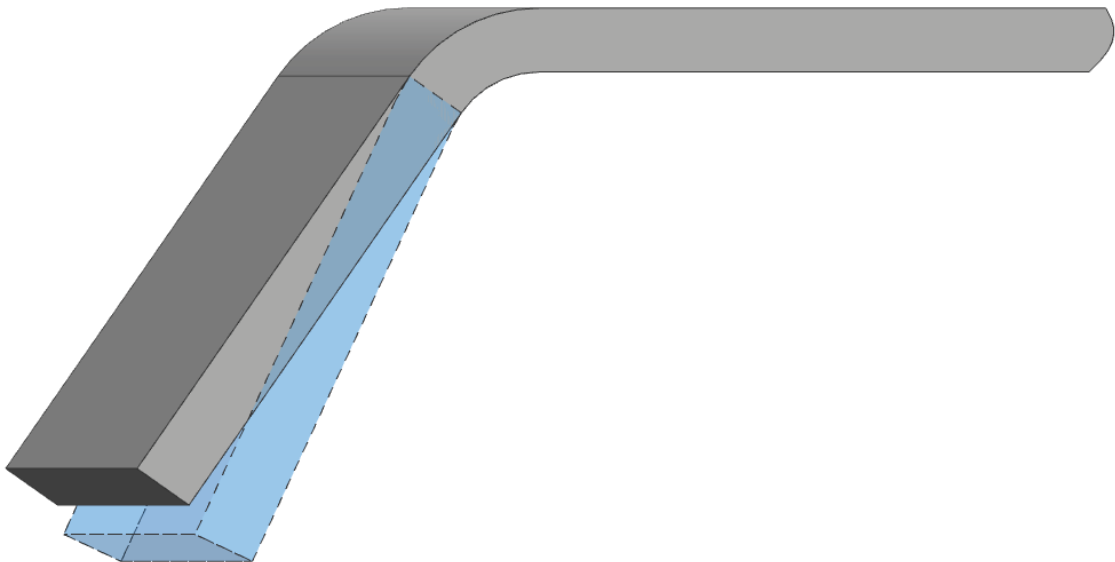
Na seção 3.2.3 foi descrito o funcionamento de encostador de estampagem ou “cerra-chapas”, caso este não possua a força adequada, existirá um escoamento excessivo de material resultando no enrugamento da chapa nas regiões circundantes à estampagem. Por outro lado, caso o encostador possua força excessiva, a chapa não conseguirá correr para o interior do conjunto cunho/matriz sendo então obrigada a reduzir a sua espessura durante a estampagem, podendo esta redução, no limite, resultar na fissuração da chapa. Deste modo a situação ideal será aquela em que o encostador permite o escoamento de chapa suficiente, de modo a evitar as fissurações/reduções de espessura, sem que para isso permita o aparecimento de enrugamentos da chapa. Este equilíbrio é muitas vezes difícil de se obter, devido à complexidade das estampagens e à variação das necessidades de força no encostador ao longo do perímetro de estampagem. Nos casos em que seja vantajoso, pode recorrer-se à aplicação de caneluras (ver Figura 9), pequenas saliências com a forma de meias-canas, em locais específicos de modo a colocar maiores dificuldades ao corrimento da chapa [5].



**Figura 9 – Representação de aplicação de caneluras (adaptação de [5]).**

### 3.3.2 Recuperação elástica

O conceito de recuperação elástica resulta na diferença geométrica entre a peça final no seu estado de sujeição mecânica, dentro da ferramenta, e a sua forma no estado livre, após conformação (ver Figura 12). Esta recuperação deve-se à distribuição não uniforme de pressão ao longo da espessura da chapa assim como às características elasto-plásticas do material. Durante uma dobragem/estampagem a região interior a essa dobragem/estampagem é comprimida, enquanto a região exterior é tracionada. Tipicamente, os materiais possuem valores de resistência à compressão superiores aos valores de resistência à tração, o que no limite, permite que durante uma dobragem/estampagem a região exterior tenha atingido o limite de deformação plástica, enquanto, a região interior ainda se encontra no regime elástico. Esta situação gera distorções geométricas na peça dobrada/estampada uma que a região interior que ainda se encontra no regime elástico irá ter uma tendência de regressar ao seu estado não deformado. Esta situação é potenciada caso o material a dobrar/estampar já possua tensões residuais internas provenientes do seu processo de fabrico (rolos de chapa laminados a quente ou a frio) [9 - 12].



**Figura 10 – Recuperação elástica ou efeito de mola (adaptação de [9]).**

Este efeito é influenciado por um conjunto considerável de variáveis tais como, o atrito entre o punção ou cunho e a matriz de dobrar ou estampar, as forças utilizadas para prender a chapa (encostador), as geometrias do conjunto cunho/matriz (raios, profundidade de estampagem, complexidade de estampagem), as propriedades mecânicas da chapa e a espessura da mesma [5, 10, 11].

### **3.4 Determinação de variáveis do processo**

Nesta seção abordaremos algumas metodologias para a determinação de algumas variáveis importantes para o processo, assim como para o cálculo de algumas forças envolvidas no projeto de ferramentas de estampagem metálica.

#### **3.4.1 Folga de corte**

Um dos parâmetros mais importantes no projeto de uma ferramenta de estampagem metálica é a determinação da folga de corte ( $\lambda$ ). Este valor é tipicamente uma percentagem da espessura da chapa a cortar ( $h$ ), e as percentagens variam em função do tipo de material a cortar. Para o material do objeto de estudo deste TFM os valores de folga de corte variam entre os 6% e os 8% [12]. Na elaboração deste TFM adotaremos o valor médio, 7%.

$$\lambda = 0.07 \cdot h \quad (2.1)$$

#### **3.4.2 Força principal de corte**

O valor da força principal de corte ( $F_C$ ) é bastante importante em termos de dimensionamento de uma ferramenta durante a sua fase de projeto.

Como foi descrito na seção 3.2.1., o corte processa-se pela ação das tensões de corte na zona da folga de corte, e a força máxima de corte será proporcional à tensão de rotura ao corte ( $\tau_R$ ). Este valor de tensão de rotura ao corte consiste numa proporção da tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial ( $\sigma_R$ ) de modo a contemplar o efeito de encruamento do material durante o corte. Tipicamente o valor desta proporção para aços varia entre 0.7 e 0.8 sendo que na elaboração deste TFM adotar-se-á o valor de 0.75 para a constante de encruamento ( $C$ ) [5]. Para além deste valor o cálculo da força principal de

corte é função de variáveis tais como o perímetro de corte ( $p_c$ ) e a espessura do material a cortar ( $h$ ):

$$F_C = C \cdot \sigma_R \cdot p_c \cdot h \quad (2.2)$$

### 3.4.2.1 Força de extração

A força de extração ( $F_{EXT}$ ) consiste na força necessária para extrair o punção do interior da chapa após ter sido efetuado o corte e o seu cálculo é função de variáveis, tais como a folga de corte ( $\lambda$ ), o desgaste do punção, o desgaste da matriz, a utilização ou não de lubrificante, a espessura do material ( $h$ ), etc. Deste modo o cálculo da força de extração expressa-se empiricamente por uma percentagem da força principal de corte, em função da espessura de material a cortar. No caso deste TFM, (espessura de 2 mm), os valores de força de extração variam entre os 8% e os 10% da força principal de corte [5], pelo que iremos adotar o valor de 10%.

$$F_{EXT} = 0.10 \cdot F_C \quad (2.3)$$

### 3.4.3 Força de dobragem

A força de dobragem ( $F_D$ ) consiste na força necessária para efetuar a dobra de uma aba, ou patilha por um processo de quinagem simples. O seu cálculo depende das seguintes variáveis: tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial ( $\sigma_R$ ), fator corretivo ( $k_D$ ) que pode variar entre 1.5 e 2 (pelo que por questões empíricas optaremos por utilizar o valor de 2 para este TFM), do comprimento da dobragem ( $b$ ) da patilha ou aba a dobrar, da espessura do material ( $h$ ), do raio do canto do cunho ( $r_c$ ), do raio de canto da matriz ( $r_{cm}$ ) e da folga entre o cunho e a matriz ( $j$ ). A formulação aqui apresentada para este cálculo leva em consideração o encruamento do material, assim como a rotação que a força que origina o momento vai tendo ao longo deste processo [5].

$$F_D = \frac{k_D \cdot \sigma_R \cdot b \cdot h^2}{4 \cdot (r_c + j + r_{cm})} \quad (2.4)$$

### 3.4.3.1 Força do encostador de dobragem

A força do encostador de dobragem ( $F_{ED}$ ) consiste na força que deverá ser exercida sobre a chapa, de modo a que durante a operação de dobragem esta não se deforme com o esforço de dobragem.

Uma vez que neste processo não existe corrimento de chapa, o dimensionamento desta força não corre o risco de ser excessivo, uma vez que retirando a variável económica da equação, não existe nenhuma contrapartida para a colocação de demasiada força no encostador de dobragem. Deste modo para efeitos de cálculo para este TFM admitiremos metade do valor da força de dobragem ( $F_D$ ).

$$F_{ED} = 0.50 \cdot F_D \quad (2.5)$$

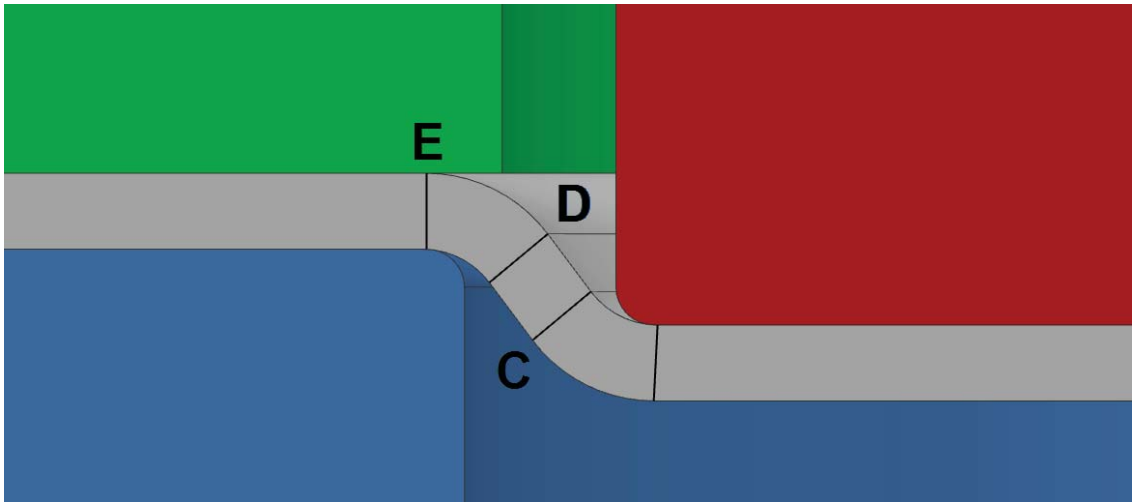
### 3.4.4 Força de estampagem

O cálculo da força de estampagem depende de diversas variáveis, sendo algumas destas de difícil determinação. No decorrer deste TFM, definiremos dois tipos distintos de cálculos de forças de estampagem, para diferentes componentes do objeto de estudo deste trabalho: a força de estampagem necessária para estampar a bossa cilíndrica presente na parte superior da peça e a força de estampagem do perfil longitudinal do objeto de estudo (em forma de “U”).

#### 3.4.4.1 Força de estampagem (Bossa cilíndrica)

A força máxima na operação de estampagem de uma bossa cilíndrica ( $F_{EB}$ ), obtém-se através da relação entre a tensão radial ( $(\sigma_r)_D$ ) na região do raio de canto da matriz (Figura 11 – Ponto D), do perímetro de estampagem ( $2\pi r_m$ ) e a espessura da chapa ( $h$ ):

$$F_{EB} = (\sigma_r)_D \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot h \quad (2.6)$$



**Figura 11 – Estampagem de bossa cilíndrica (adaptação de [5]).**

Onde a tensão radial  $((\sigma_r)_D)$  será função, da tensão radial devido ao corrimento da chapa para o interior do conjunto cunho/matriz  $((\sigma_r)_{cor})$ , do incremento de tensão radial devido à dobragem instantânea no ponto E  $((\Delta\sigma_r)_E)$ , do incremento de tensão radial devido à dobragem instantânea no ponto D  $((\Delta\sigma_r)_D)$  e do incremento de tensão radial devido ao atrito no interface chapa/matriz  $((\Delta\sigma_r)_{atrito})$ :

$$(\sigma_r)_D = (\sigma_r)_{cor} + (\Delta\sigma_r)_E + (\Delta\sigma_r)_D + (\Delta\sigma_r)_{atrito} \quad (2.7)$$

Todavia, algumas destas variáveis nem sempre são de fácil obtenção, e para tornar o cálculo da força máxima de estampagem de uma bossa cilíndrica  $(F_{EB})$  mais expedito, consideraremos a formulação definida por W.P. Romanowski [13]. As variáveis envolvidas são, o perímetro de estampagem  $(p_e)$ , a espessura da chapa  $(h)$ , a tensão de ruptura do ensaio de tração uniaxial  $(\sigma_R)$ , e um fator corretivo de estampagem  $(Q_f)$ . O fator corretivo de estampagem é uma constante determinada empiricamente e que varia entre 0.4 e 1, pelo que no decorrer deste trabalho admitiremos o valor de 0.4:

$$F_{EB} = Q_f \cdot p_e \cdot h \cdot \sigma_R \quad (2.8)$$

### 3.4.4.2 Força do encostador de estampagem (Bossa cilíndrica)

O cálculo da força do encostador de estampagem para esta operação em particular ( $F_{EEB}$ ) é maioritariamente assente em conhecimentos empíricos, pelo que definiremos este valor como sendo 20% do valor da força de estampagem da bossa cilíndrica.

$$F_{EEB} = 0.20 \cdot F_{EB} \quad (2.9)$$

### 3.4.4.3 Força de estampagem (Em “U”)

A força de estampagem em “U” ( $F_{EU}$ ) consiste na força necessária para conformar o perfil longitudinal do objeto de estudo, este cálculo tem como variáveis, a tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial ( $\sigma_R$ ), o fator corretivo ( $k_U$ ) que pode variar entre 0.4 e 1 (neste TFM utilizaremos o valor de 1 para este fator), o comprimento do U a estampar ( $b$ ), a espessura do material ( $h$ ), o raio do canto do cunho ( $r_c$ ), o raio de canto da matriz ( $r_{cm}$ ) e a folga entre o cunho e a matriz ( $j$ ) [5].

$$F_{EU} = \frac{k_U \cdot \sigma_R \cdot b \cdot h^2}{(r_c + j + r_{cm})} \quad (2.10)$$

Uma vez que a estação na ferramenta que executará esta operação não possui um encostador, não será efetuado o cálculo do mesmo.

### 3.4.5 Força de calibração

Teoricamente, se as operações de estampagem precedentes tivessem sido perfeitas, isto é, se conseguissem conformar completamente a peça à sua forma final, os esforços exercidos nas operações de calibração seriam nulos. No entanto, as estampagens nunca são perfeitas devido a folgas existentes nas ferramentas, nas prensas, devido ao desgaste dos elementos de estampar, assim como existem sempre alguns efeitos de recuperação elástica. Tendo todos estes fatores em conta podemos concluir que o esforço exercido numa operação de calibração também não será nulo. No entanto, é prática comum não

se apurar o valor desta variável, uma vez que o valor que se poderia daqui apurar seria desprezável relativamente às restantes forças em jogo.

### **3.5 Tipos de ferramentas**

No que toca a conceitos de elaboração de ferramentas de estampagem metálica, existem dois tipos distintos, as ferramentas progressivas e as ferramentas *transfer*.

Comparativamente, as ferramentas *transfer* perfilam-se com o estado-da-arte no que toca a ferramentas de estampagem, possuem as melhores taxas de aproveitamento de matéria-prima e permitem uma maior complexidade às peças estampadas. Por outro lado, as ferramentas progressivas representam uma solução menos complexa, mais barata, e muito mais comum, tendo em conta a complexidade extra dos sistemas de *transfer*, de notar que em Portugal não existem muitas prensas preparadas para este tipo de ferramentas.

#### **3.5.1 Ferramentas progressivas**

Uma ferramenta progressiva é um tipo de ferramenta de estampagem que tem como objetivo a transformação de matéria-prima, tipicamente um rolo de chapa, em componentes metálicos através das operações de estampagem descritas anteriormente.

A produção de peças metálicas estampadas através destes tipos de ferramentas carece tipicamente dos seguintes componentes:

- A ferramenta progressiva, com todos os elementos necessários à elaboração das várias operações requeridas para a obtenção das peças finais;
- Uma prensa onde a ferramenta irá trabalhar, tipicamente uma prensa mecânica de alta cadência de modo a rentabilizar a produção das referidas peças finais;
- Um alimentador de chapa automático, que terá como função desenrolar o rolo de chapa com a matéria-prima a estampar, endireitando a mesma de modo a que esta possa avançar no interior da ferramenta;
- Por último, um dispersor automático de óleo de modo a facilitar o funcionamento da ferramenta, evitando aquecimentos e gripagens.

A correta sincronização de todos estes componentes durante o funcionamento da ferramenta é essencial para a obtenção das referidas peças finais.

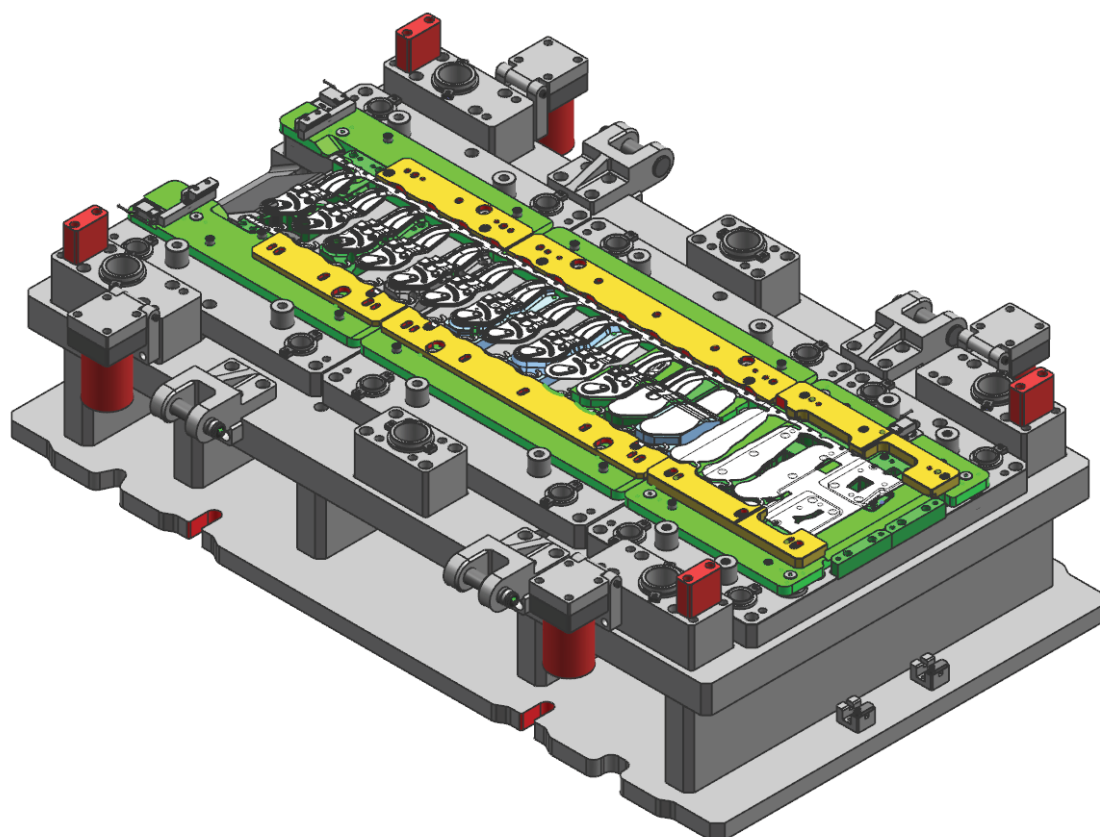
Debruçando agora a nossa análise sobre o funcionamento da ferramenta progressiva, esta deverá possuir todos os elementos necessários à correta conformação da matéria-prima desde o seu estado inicial, plano, até à forma e contornos finais da peça.

A classificação deste tipo de ferramentas como progressivas deve-se ao facto de existir uma sequência de alterações progressivas à matéria-prima à medida que a chapa vai percorrendo as diferentes estações da ferramenta, onde vão sendo executadas na matéria-prima as várias operações necessárias. A distância entre estas estações é constante e define-se como sendo o passo da ferramenta. À medida que a matéria-prima vai percorrendo as várias estações vai-se formando uma tira de matéria-prima que se encontra parcialmente modificada, sendo que apenas na última estação da ferramenta é que a peça final é separada desta tira, que a partir de agora definiremos como sendo a banda da ferramenta (ver Figura 12).

Tendo estes conceitos definidos podemos caracterizar o funcionamento de uma ferramenta progressiva como tendo a seguinte sequência:

1. A banda avança dentro da ferramenta uma distância equivalente ao valor do passo da ferramenta, por ação do alimentador automático;
2. O cabeçote da prensa desce até ao seu ponto morto inferior, permitindo assim à ferramenta executar as várias operações existentes nas várias estações que neste instante possuam matéria-prima em posição de ser processada;
3. O cabeçote da prensa regressa ao ponto morto superior;
4. O alimentador faz com que a banda avance novamente um passo;
5. O ciclo repete-se de novo.

Após o ponto inicial da banda percorrer pela primeira vez todas as estações da ferramenta, obtém-se uma peça final, ou mais, caso a ferramenta tenha sido projetada de modo a produzir mais do que uma peça por pancada, leia-se curso completo da prensa.



**Figura 12 – Exemplo de ferramenta progressiva.**

### 3.5.2 Ferramentas *transfer*

As ferramentas do tipo *transfer* são ferramentas em que o processo através do qual as peças finais são produzidas não carece de uma ligação física entre as várias operações, em vez disso as peças são estampadas a partir de um formato pré-cortado que consiste na quantidade mínima, ou algo próximo, de chapa necessária para a produção das peças.

As várias operações destas ferramentas encontram-se dispostas sequencialmente na ferramenta tal como nas ferramentas progressivas, separadas entre si por uma distância certa, o passo da ferramenta, no entanto a progressão da chapa no interior da ferramenta é conseguida à custa de um sistema automatizado, que por intermédio de uma calha estrutural e um conjunto de garras, de acionamento pneumático, que movimentam os formatos ao longo das várias operações da ferramenta. Esta atuação de movimentação de formatos ao longo da ferramenta é sincronizada com o funcionamento da prensa, de modo a que se consiga reduzir os tempos mortos e a assim rentabilizar o funcionamento da mesma.

O funcionamento de uma ferramenta *transfer* consiste na seguinte sequência:

1. Os formatos são colocados num dispensador de formatos<sup>7</sup>;
2. Os formatos são colocados na primeira operação da ferramenta através de um braço robotizado do tipo *pick-and-place*;
3. O cabeçote da prensa desce até ao seu ponto morto inferior, permitindo assim à ferramenta executar as várias operações existentes nas várias estações que neste instante possuam matéria-prima em posição de ser processada;
4. O cabeçote da prensa regressa ao ponto morto superior;
5. Durante a ascensão do cabeçote o sistema de *transfer* faz com que a peça presente na primeira operação da ferramenta seja transferida para a segunda operação e assim sucessivamente;
6. O braço robotizado do tipo *pick-and-place*, coloca novamente um formato na primeira operação da ferramenta;

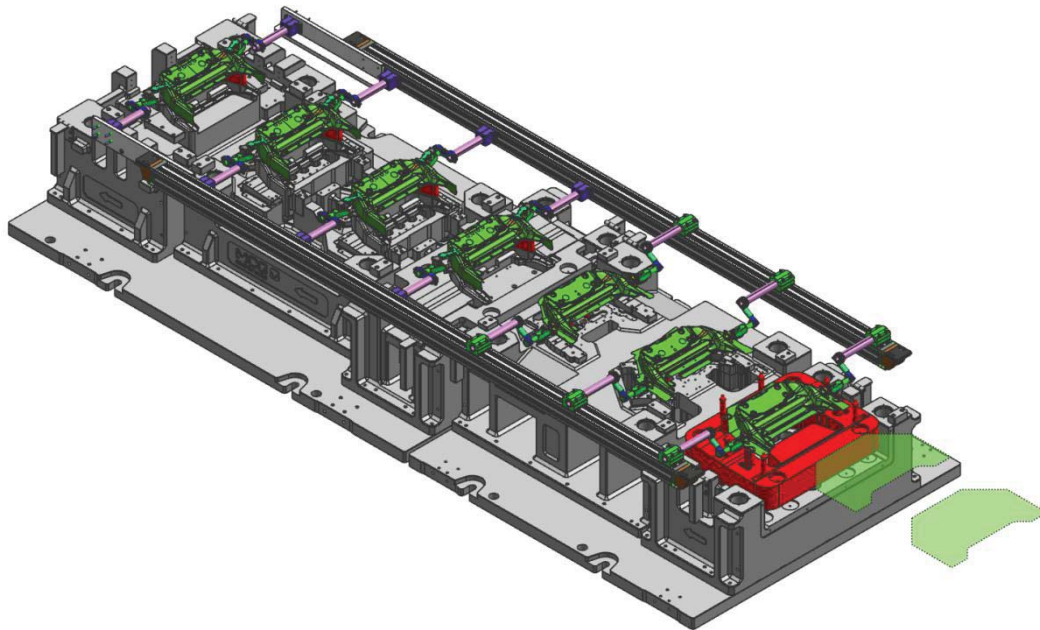
---

<sup>7</sup> Neste tipo de ferramentas a matéria-prima não se encontra armazenada num rolo de chapa, mas antes num dispensador de formatos pré-cortados, este dispensador possui um sistema de compensação de modo a que os mesmos sejam sempre disponibilizados para serem transferidos para o início da ferramenta, na mesma posição em X, Y e Z [12].

## 7. O ciclo repete-se de novo.

Este tipo de ferramentas surgiu da necessidade de produzir peças com geometrias cada vez mais complexas (ao deixar de possuir uma ligação física entre as diversas operações torna-se possível a colocação de punções, cunhos, matrizes e restantes componentes inerentes ao processo de estampagem em locais que numa ferramenta progressiva seriam impossíveis), e também da necessidade crescente de reduzir o consumo de matéria-prima (as ferramentas *transfer* possuem tipicamente valores de aproveitamento de matéria-prima superiores devido a dispensarem a ligação física entre operações).

Na Figura 13, encontra-se representada a parte inferior de uma ferramenta *transfer*, onde é possível observar a calha estrutural que se encontra sincronizada com o funcionamento do cabeçote da prensa, e as pinças de acionamento pneumático que irão segurar nas peças durante a transferência entre operações.



**Figura 13 – Exemplo de ferramenta transfer.**

## Capítulo 4

### 4.1 Método “tradicional” de projeto

O projeto de ferramentas progressivas para estampagem de elementos metálicos é uma tarefa altamente especializada que requer, por parte do projetista, alguns anos de experiência. O desenvolvimento de bandas, o projeto de elementos de estampagem e de corte, a seleção de elementos normalizados<sup>8</sup> [14], são as principais atividades que o projetista de ferramentas tem que executar, sendo estas atividades bastante manuais, repetitivas e muito suscetíveis a erros [15].

### 4.2 Preparação inicial

Hoje em dia no arranque de qualquer projeto de uma ferramenta de estampagem metálica é necessário reunir sempre alguma informação, nomeadamente, o desenho da peça final (2D e 3D), caderno de encargos segundo o qual a ferramenta deverá ser projetada (documento que conterà normas e diretrizes a respeitar para a elaboração da ferramenta), informação relativa às prensas onde a ferramenta irá normalmente trabalhar (é prática comum na indústria automóvel o projeto de uma ferramentas de estampar ser feito para uma prensa principal onde a ferramenta irá trabalhar durante a maior parte do tempo e uma prensa alternativa onde a ferramenta poderá trabalhar em situações de emergência), assim como os dados de orçamentação relativamente aos consumos de chapa (largura de banda ( $l$ ) e passo da ferramenta ( $p$ )).

### 4.3 Elaboração da banda

Para a elaboração da banda é essencial tomar conhecimento dos valores de largura de banda e passo que foram orçamentados de modo a que o projetista possa se possível otimizar esses valores no decorrer da elaboração do projeto da ferramenta. Este é um ponto muito importante para o cliente final, assim como para o fornecedor que irá

---

<sup>8</sup> Por elementos normalizados deverá entender-se as colunas de guiamento e respetivos casquilhos, molas a gás, punções redondos ou oblongos, entre outros, que possuem normas específicas de construção e que podem ser adquiridos como acessórios de compra. Durante a elaboração deste TFM e por uma questão de simplicidade foi utilizado o catálogo de elementos normalizados da Fibro (<http://www.fibro.de>), mas existem outros fornecedores destes produtos no mercado.

explorar a ferramenta de futuro, na medida em que estes dois valores ditam, em conjunto com outros fatores dependentes do ambiente industrial onde as peças irão ser produzidas (o preço de prensa/hora e o preço mão-de-obra/hora), o preço unitário de cada peça que será produzida por esta ferramenta. Deste modo existe sempre um esforço no sentido de manter estes custos o mais baixos possível, sem que no entanto, a ferramenta se torne inexecutável, e o processo de produção das peças se torne instável.

No caso de estudo deste TFM os valores de largura de banda a utilizar serão 219 mm e o passo será 62 mm. Com estes dados o projetista começa por calcular o planificado a partir do qual a peça será estampada. Hoje em dia é prática comum recorrer a *softwares* que recorram ao método dos elementos finitos para este cálculo, uma vez que o cálculo manual através de cálculos de desenrolamento de chapa e o desenho de seções planificadas em papel é um processo demorado, suscetível a erros e improdutivo, tendo em conta as possibilidades de simulação que existem hoje em dia.

### **4.3.1 Cálculo do planificado**

De modo a enriquecer este TFM, efetuou-se o cálculo deste planificado recorrendo a dois *softwares* distintos (SolidWorks 2012 e CATIA V5) a fim de comparar os resultados obtidos entre ambos assim como do planificado obtido pelo método “otimizado” (NX8).

#### **4.3.1.1 Cálculo do planificado em SolidWorks 2012**

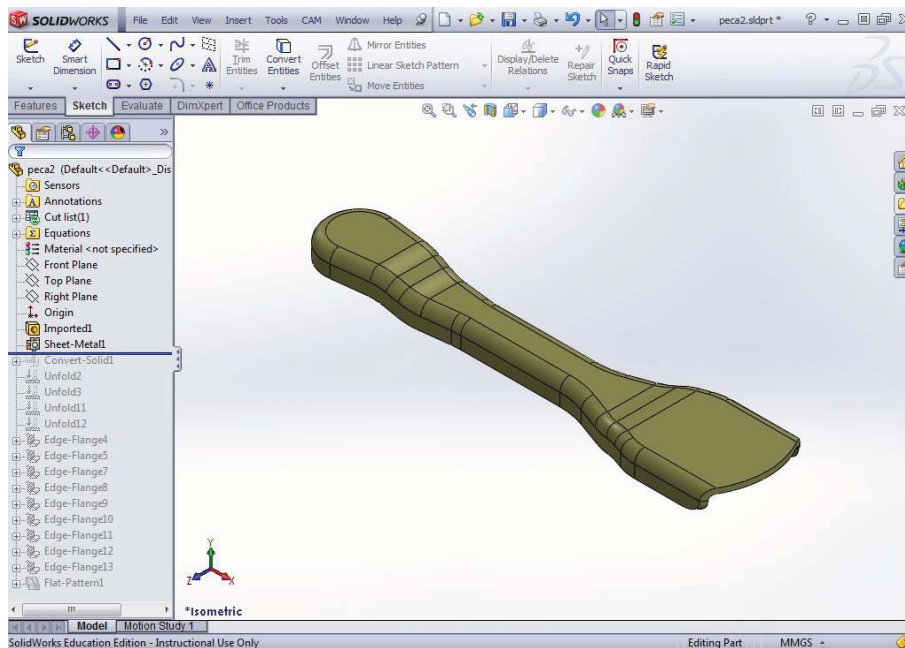
Começou-se por importar a peça final para o SolidWorks 2012 (ver Figura 14).

Uma vez que a bossa cilíndrica não foi considerada para o cálculo do planificado no método “otimizado”, procedeu-se à preparação da peça final antes da importação para o *software* tendo sido removidos os furos e a referida bossa cilíndrica a fim de evitar erros.

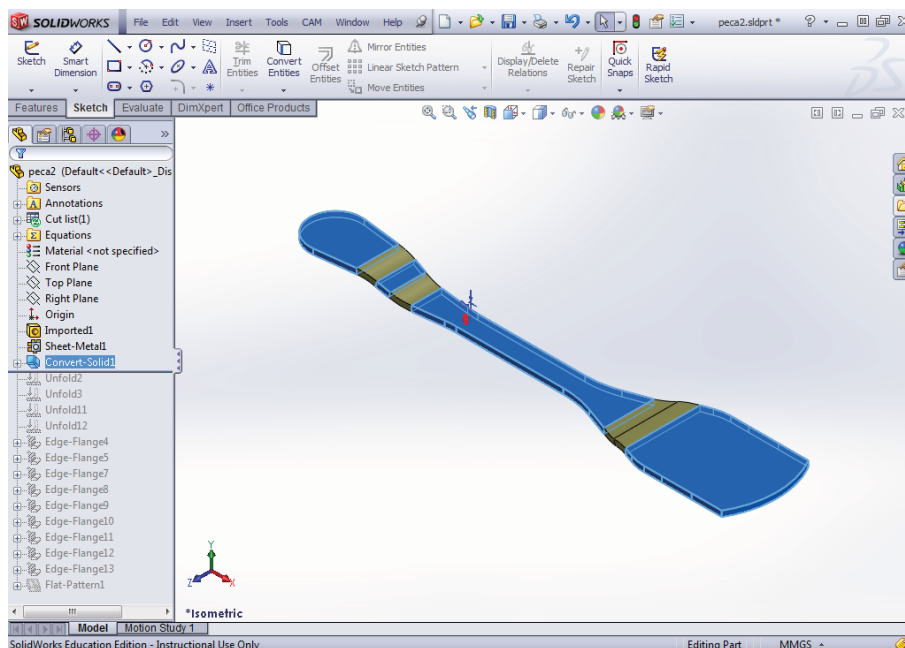
De seguida com a funcionalidade “*Convert to Sheet Metal*” efetuou-se a conversão da superfície superior para a classificação *sheet metal* de modo a permitir ao *software* efetuar a planificação da mesma (ver Figura 15).

Uma vez que a peça possui uma aba de comprimento constante (9 mm), e raio interior de 2 mm, procedeu-se à planificação da superfície superior, de modo a puder

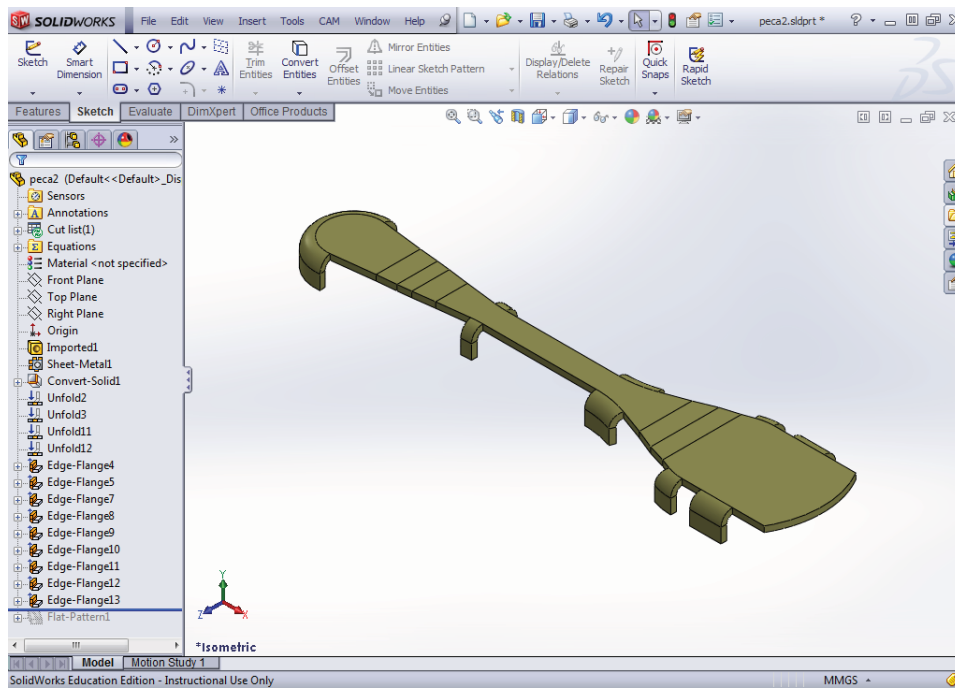
posteriormente recriar a aba existente na peça inicial, utilizando a funcionalidade “*Edge Flange*” (ver Figura 16). Durante este processo tornaram-se evidentes algumas das limitações deste *software* para este tipo de trabalho específico, uma vez que devido à existência de uma dupla curvatura na superfície superior da peça, não foi possível a recriação do perímetro completo da aba. Deste modo apenas foi possível a recriação parcial do perímetro da aba.



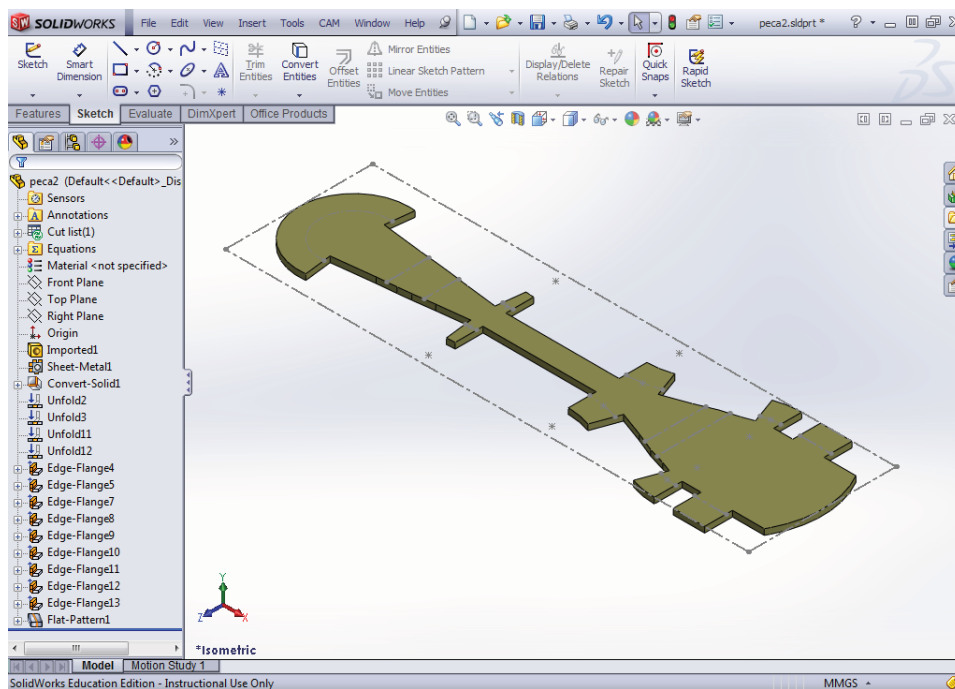
**Figura 14 – Peça final após importação para o *software* SolidWorks 2012.**



**Figura 15 – Conversão da superfície superior para sheet metal.**



**Figura 16 – Recriação da aba após planificação.**



**Figura 17 – Planificado completo.**

Tendo a aba parcial recriada em SolidWorks procedemos ao cálculo do planificado parcial da peça através da funcionalidade “Flat-Pattern” (ver Figura 17).

Uma vez que o planificado obtido consiste numa aproximação à peça final, seria de seguida necessário proceder à união das várias abas entre si, de modo a poder obter um planificado final completo.

#### 4.3.1.2 Cálculo do planificado em CATIA V5

A fim de se obter uma segunda iteração no planificado, optou-se por importar a geometria utilizada para calcular o planificado no SolidWorks 2012 para o CATIA V5 (ver Figura 18). Aproveitando as capacidades superiores de modelação do CATIA V5 procedeu-se à recriação da aba completa existente na peça inicial, utilizando os mesmos parâmetros (comprimento 9 mm, raio interior 2 mm), recorrendo à funcionalidade “Flange” (ver Figura 19). De seguida procedeu-se à planificação da peça recorrendo à funcionalidade “Flatten” (ver Figura 20).

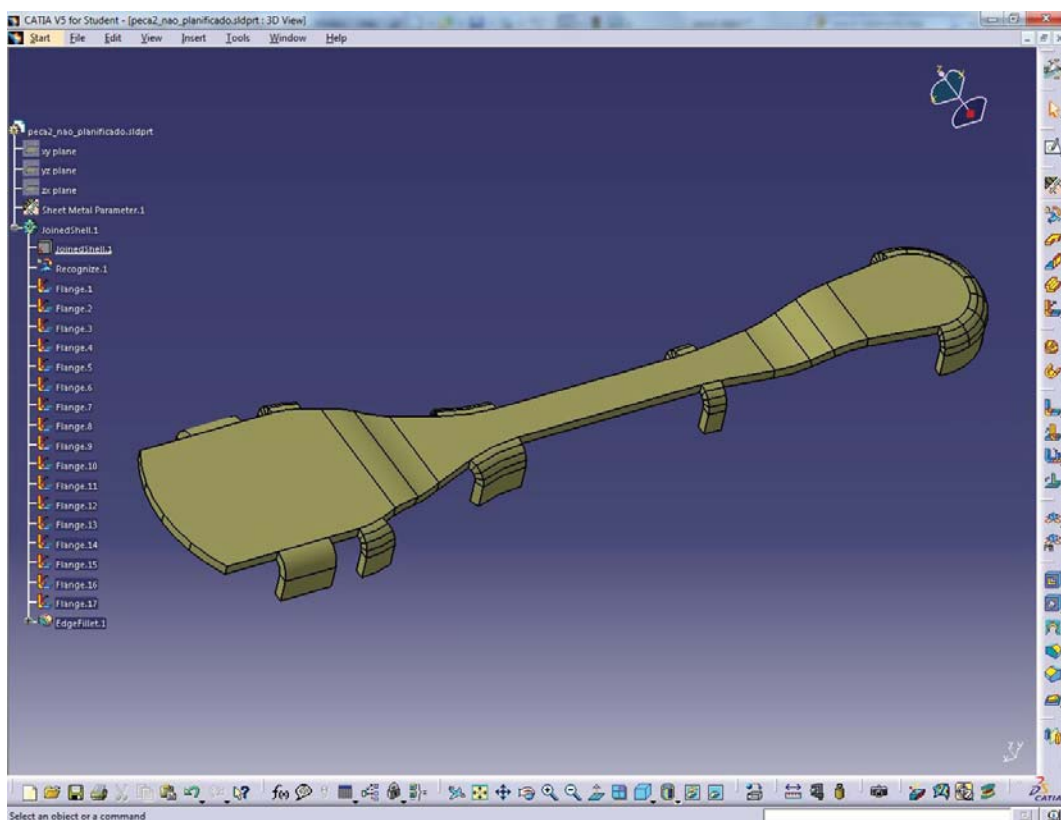
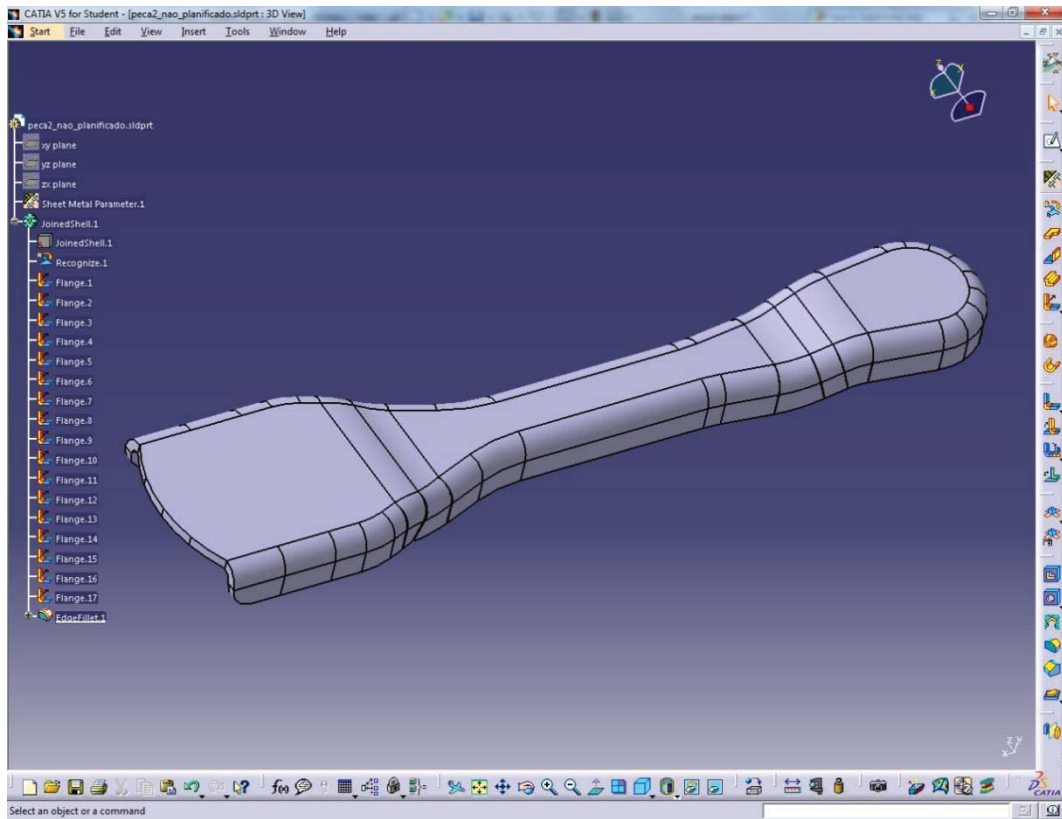
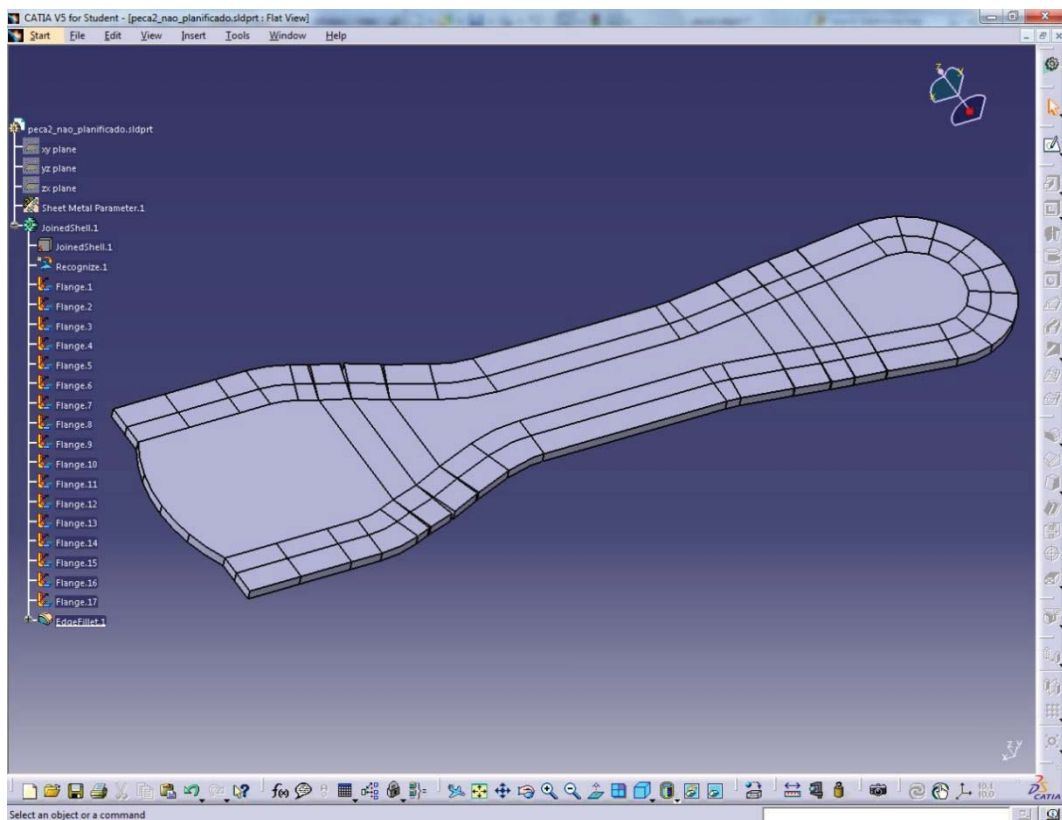


Figura 18 – Importação da geometria utilizada em SolidWorks para o CATIA V5.



**Figura 19 – Recriação da aba presente na peça inicial.**



**Figura 20 – Planificação final da peça.**

### 4.3.2 Desenho dos cortantes

Tendo o planificado definido, o projetista teria que importar a geometria gerada por um destes *softwares* para a plataforma de desenho onde o projeto final iria ser feito (neste caso NX8), ou não, caso o projeto fosse para ser executado em SolidWorks ou CATIA.

Após esta importação, o projetista desenha em torno desta geometria a forma que os cortantes terão que ter, de modo a que efetuem os necessários cortes no mínimo número de passos possível sem que para isso se sacrifique a robustez dos mesmos. Este processo é um processo iterativo e bastante repetitivo, na medida em que vão sendo experimentados vários desenhos de cortantes em várias disposições ao longo da banda, até que se encontre uma solução satisfatória.

### 4.3.3 Definição da banda

De seguida o projetista desenha as várias fases intermédias que a peça irá sofrer ao longo das várias operações da ferramenta. A sequenciação dos cortantes desenhados anteriormente assim como das várias operações de estampagem e/ou dobragem deve ser então concretizada no ficheiro da banda, desenhando deste modo o projetista todo este arranjo através de várias iterações até que se encontre a configuração ideal.

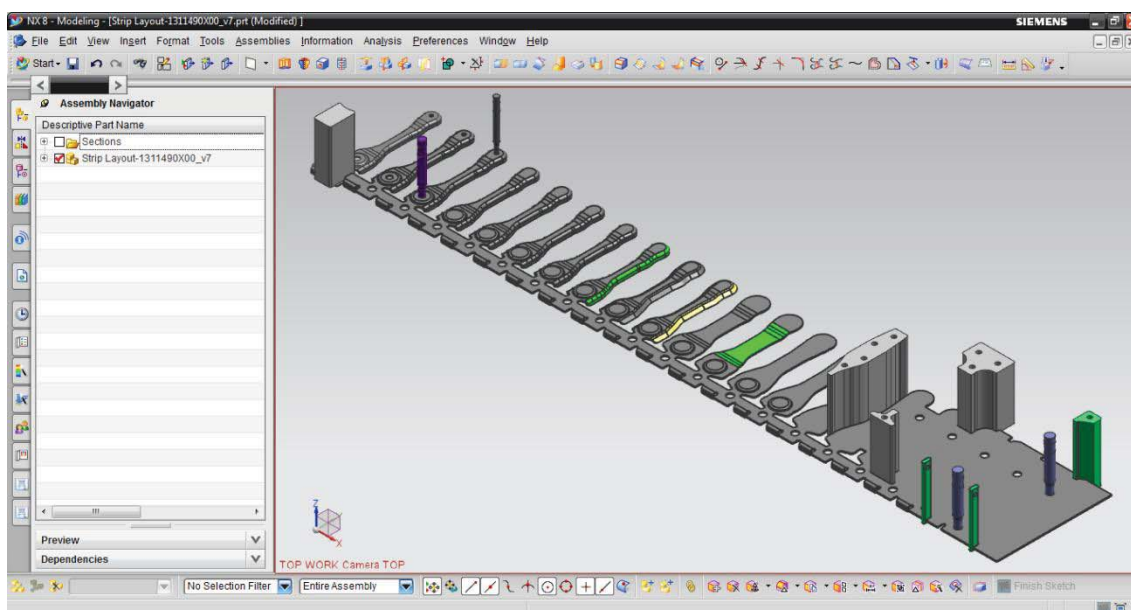


Figura 21 – Definição da banda pelo método “tradicional”.

No caso de estudo particular deste TFM, a banda final ficou com 20 estações e com o arranjo presente na Figura 21, sendo possível observar as várias alterações que a matéria-prima vai sofrendo ao longo das 20 estações da ferramenta, estando também representados os punções que executaram as operações de corte na ferramenta.

## 4.4 Cálculos

Para a realização dos cálculos o projetista recorre às expressões presentes na seção 3.4 obtendo deste modo os esforços de cada estação da ferramenta. Os cálculos das forças parciais de cada estação calculadas pelo método “tradicional” encontram-se no Anexo C. De seguida apresentam-se os cálculos agrupados por tipo de operações assim como o somatório final.

**Tabela 1 – Cálculos pelo método “tradicional”**

<b>Operação</b>	<b>Força Principal</b>	<b>Força Encostador</b>
<b>Corte</b>	473416 N (47343 Kgf)	47343 N (4736 Kgf)
<b>Dobragem</b>	44640 N (4464 Kgf)	22320 N (2232 Kgf)
<b>Estampagem</b>	30601 N (3061 Kgf)	5701 N (571 Kgf)
<b>TOTAIS</b>	548657 N (54868 Kgf)	75364 N (7539 Kgf)

Para a obtenção dos valores de aproveitamento de material o projetista deverá de seguida proceder à comparação entre a área de matéria-prima correspondente a um passo da ferramenta ( $MP_{inicial}$ ):

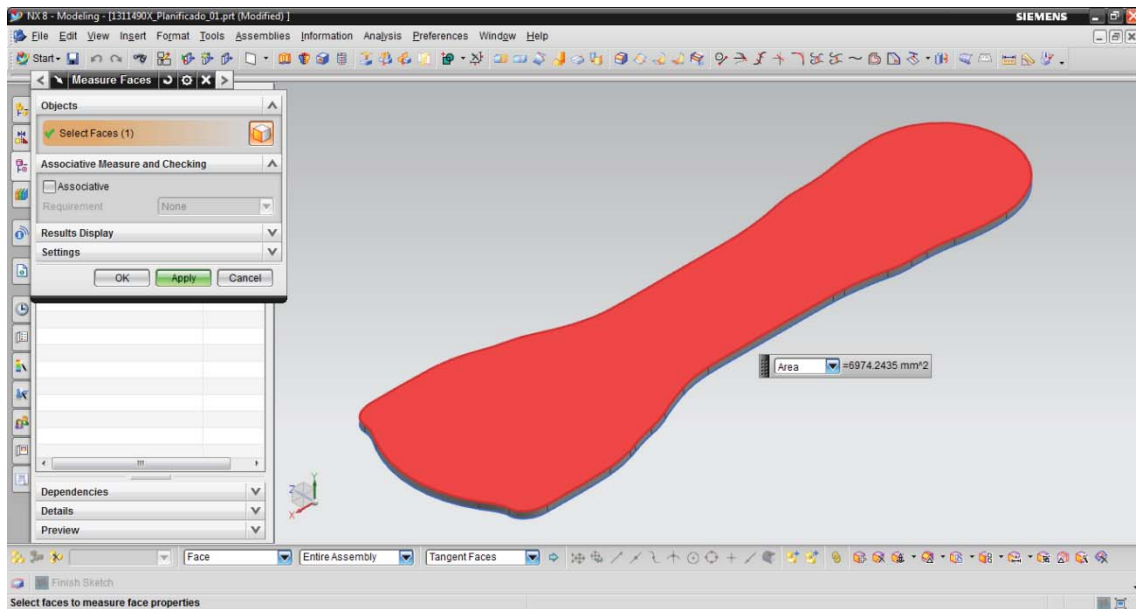
$$MP_{inicial} = l \cdot p = 219 \cdot 62 = 13578 \text{ mm}^2 \quad (4.1)$$

Com a matéria-prima necessária para executar a peça ( $MP_{final}$ ), este valor pode ser retirado do *software* (ver Figura 22):

$$MP_{final} = 6974 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

Calculando de seguida o aproveitamento de matéria-prima ( $A_{MP}$ ):

$$A_{MP} = \frac{MP_{inicial} - MP_{final}}{MP_{inicial}} \cdot 100 = \frac{13578 - 6974}{13578} \cdot 100 \simeq 48.7\% \quad (4.3)$$

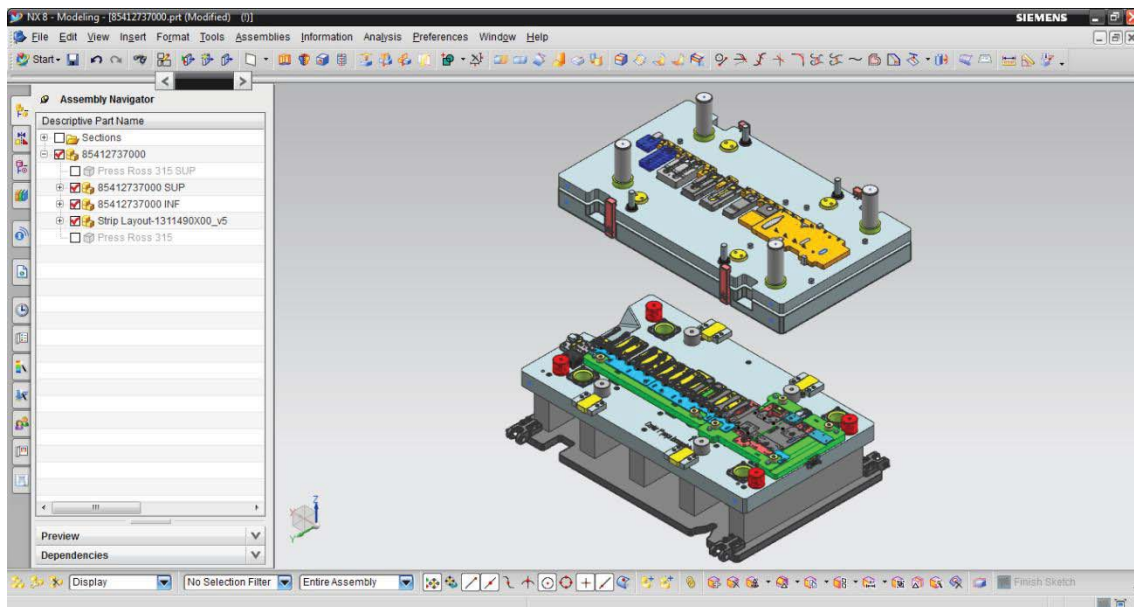


**Figura 22 – Matéria-prima necessária para executar a peça (6974 mm<sup>2</sup>).**

## 4.5 Projeto da ferramenta

Tendo a banda definida, o projetista começaria a desenhar a ferramenta manualmente peça por peça começando tipicamente pelos elementos funcionais<sup>9</sup>, e pelos elementos periféricos<sup>10</sup>, ficando os elementos estruturais<sup>11</sup> para o final. A ordem com que estes elementos são desenhados é irrelevante, uma vez que não existe nenhum fio condutor do processo de projeto, ficando deste modo a cargo do projetista a decisão da ordem com que estes elementos são desenhados.

Na Figura 23 temos uma vista geral do projeto final efetuado por este método, elaborado na empresa Manuel da Conceição Graça, Lda.



**Figura 23 – Projeto da ferramenta final pelo método “tradicional”.**

---

<sup>9</sup> Os elementos funcionais consistem nos elementos que realizarão trabalho na ferramenta nomeadamente punções e matrizes de corte, cunhos e matrizes de estampagem, punção e matriz de dobragem.

<sup>10</sup> Os elementos periféricos consistem em todos os elementos cuja presença na ferramenta é indispensável, no entanto não contribuem diretamente para a produção da peça final.

<sup>11</sup> Os elementos estruturais servem de suporte para a montagem dos elementos que atuarão diretamente na chapa, neste caso, sub-base, calços, base, porta-pisas e teto.

# Capítulo 5

## 5.1 Método “otimizado” de projeto

Neste capítulo abordaremos o método de projeto “otimizado” recorrendo exclusivamente à ferramenta paramétrica de projeto mecânico “*Progressive Die Wizard*”, que se encontra no *software* NX8 da Siemens.

## 5.2 Preparação inicial

Este método inicia-se com a tarefa de atualizar as bibliotecas de materiais, de modo a que todos os cálculos executados neste programa sejam válidos. Deste modo procedeu-se à introdução das propriedades mecânicas do material S420MC (Anexo A), na base de dados do programa, assim como dos vários catálogos de elementos normalizados que iremos utilizar no decorrer deste projeto (por exemplo colunas, casquilhos, entre outros).

## 5.3 Elaboração da banda

De seguida iniciou-se a tarefa de elaboração da banda, tarefa esta que tal como foi apresentado na Figura 2, poderia ser uma banda para orçamento, ou uma banda final para aprovação do processo de estampagem das peças.

### 5.3.1 Cálculo do planificado

Desta forma a primeira atividade a executar de modo a atingir este objetivo consiste na planificação do produto final de modo a obter-se um contorno plano que servirá de base à elaboração dos cortes iniciais na ferramenta. A execução desta tarefa carece da utilização de simulação através do método dos elementos finitos de modo a poder prever a quantidade de material que será necessário para executar o produto final.

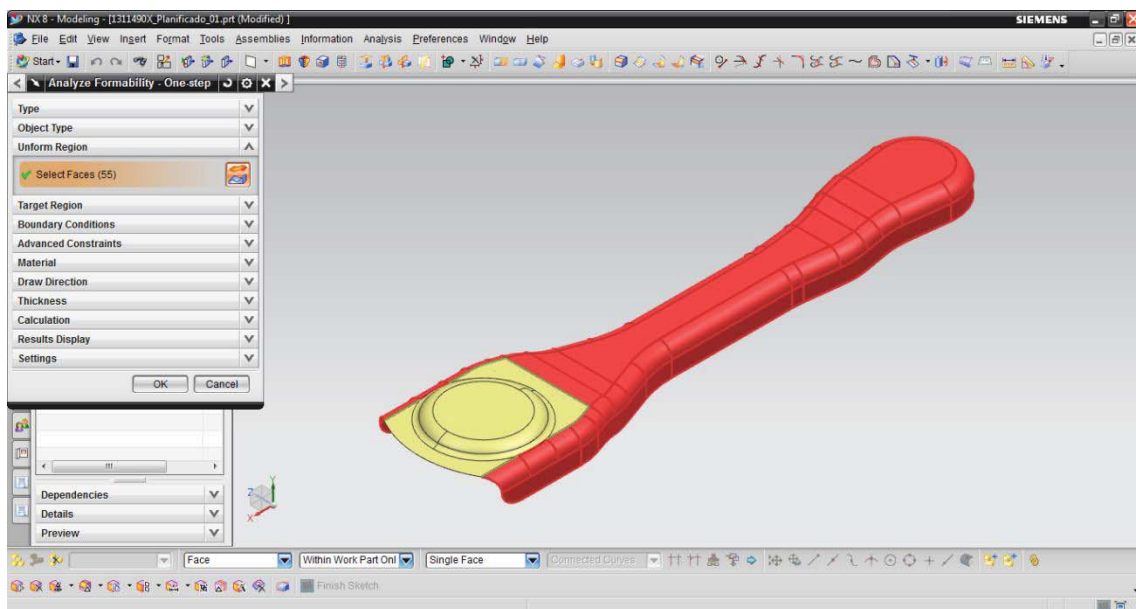
Partindo do desenho do produto final, procedeu-se à remoção dos furos, de modo a que estes não influenciem negativamente esta simulação.

De seguida extraiu-se a superfície exterior da peça, e com a ferramenta “*One Step Formability*” procedeu-se à planificação dessa mesma superfície, sendo necessário para o efeito a introdução das regiões a planificar (ver Figura 24), e o plano para onde estas

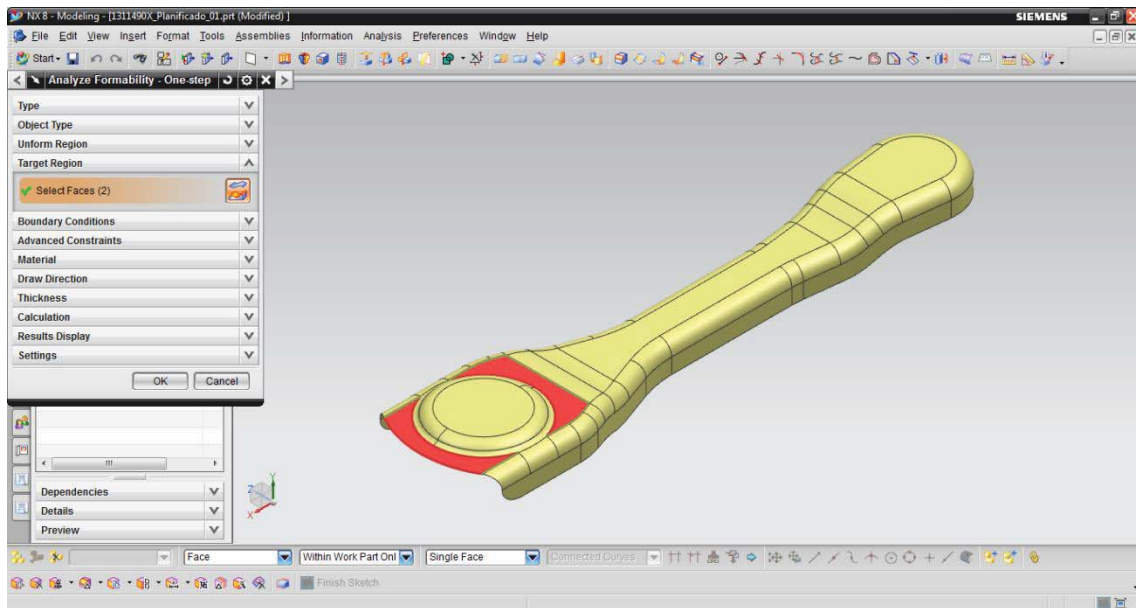
zonas devem ser planificadas (ver Figura 25). Este plano para onde deverá ser efetuada a planificação define-se como sendo o “espelho das matrizes de corte”, ou seja o plano onde irão ser executados os cortes iniciais e por onde será transportada a peça na banda.

Como pode ser visto na Figura 24, foi excluída da região a planificar a bossa cilíndrica, esta decisão deveu-se à baixa profundidade de estampagem da mesma, (2.5 mm), pelo que de modo a não introduzir mais variáveis na realização do cálculo a mesma foi deixada de fora desta planificação. A malha para execução do cálculo deste planificado foi uma malha composta por elementos triangulares com um tamanho médio de 0.4 mm (ver Figura 26).

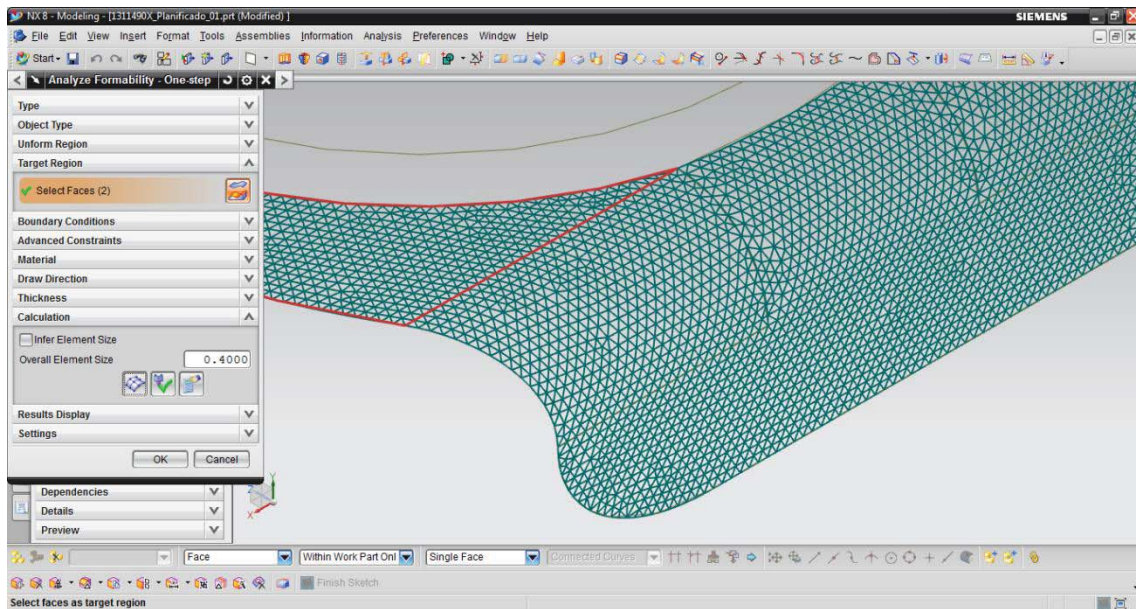
Após a obtenção do planificado presente na Figura 27, foi necessário proceder à simplificação deste contorno, uma vez que o *software* ao calcular o mesmo recorreu a contornos complexo compostos por curvas de segundo e terceiro grau (*splines*). Esta simplificação está comprovada por experimentação anterior que será benéfica no decorrer do projeto, uma vez que este contorno servirá de base à elaboração de todo o projeto, a simplificação deste tornará o mesmo mais “leve” do ponto de vista computacional, assim como evitará erros de modelação 3D no futuro.



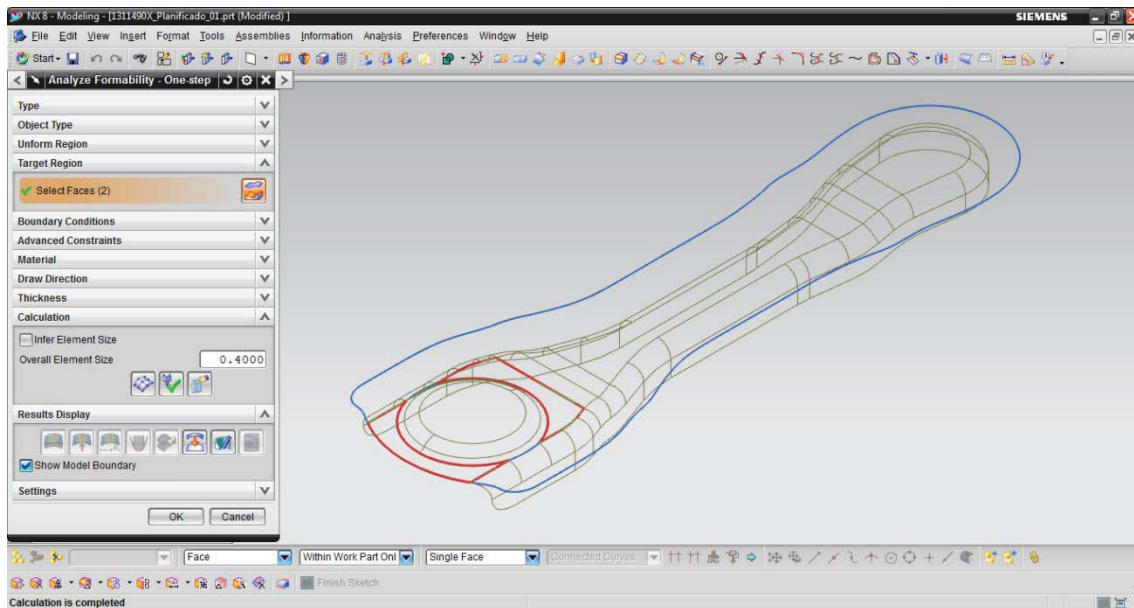
**Figura 24 – Região a planificar.**



**Figura 25 – Região objetivo para onde deverá ser feita a planificação.**



**Figura 26 – Malha utilizada no cálculo do planificado (0.4 mm).**

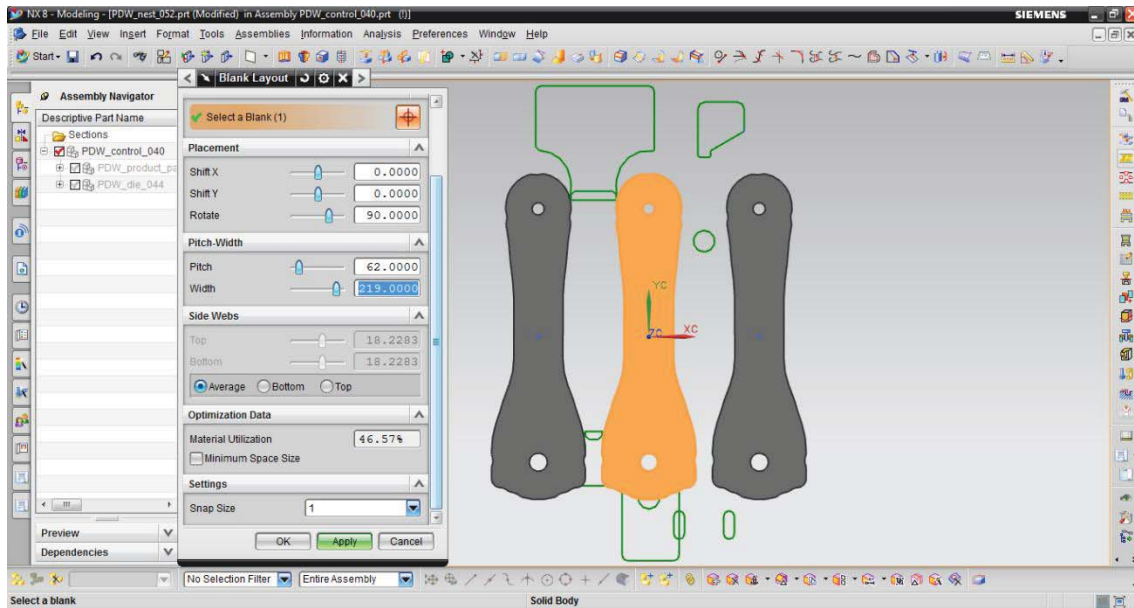


**Figura 27 – Planificado final.**

### **5.3.2 Desenho dos cortantes**

Tendo então o formato numa versão melhorada, a atividade seguinte consiste no desenho dos cortantes a utilizar para os cortes iniciais. Desta forma transpôs-se as geometrias que haviam sido desenvolvidas para a elaboração desta atividade no método “tradicional” de projeto para este ficheiro e importou-se para o *software* utilizando a funcionalidade “*Blank Generator*”. Seguidamente introduziu-se no projeto os valores de largura de banda (219 mm) e de passo (62 mm) recorrendo à funcionalidade “*Blank Layout*”, que permitiu também afinar a posição do planificado relativamente à banda.

De imediato o *software* aponta-nos um valor de aproveitamento de material, 46.6% (ver Figura 28).



**Figura 28 – Aproveitamento de matéria-prima, 46.6%.**

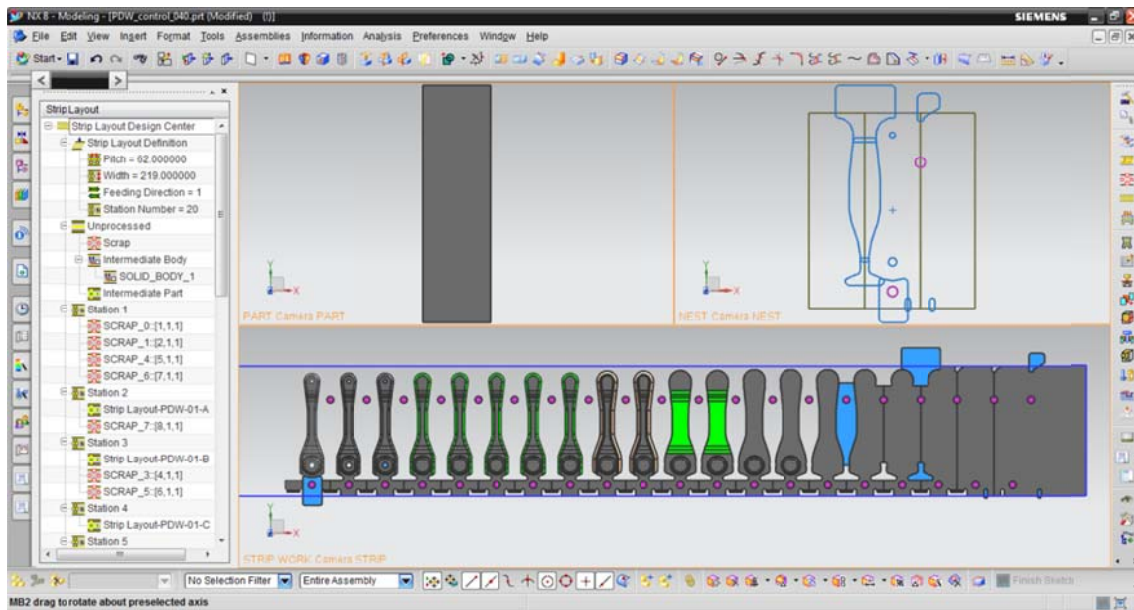
De seguida com a funcionalidade “*Scrap Design*” e com as geometrias de corte que já tinham sido previamente preparadas para o efeito, definiram-se os punções.

### **5.3.3 Definição da banda**

A última atividade para completar a tarefa de elaboração da banda consiste na definição da mesma, e no arranjo das várias operações recorrendo à funcionalidade “*Strip Layout*”.

Foram utilizados novamente os mesmos valores que os utilizados no método de projeto “tradicional”, ou seja 20 estações, e a alimentação no sentido da direita para a esquerda. Depois de introduzidas estas variáveis no programa, podemos então distribuir as operações de corte pelas várias operações da ferramenta de um modo interativo (*drag-and-drop*).

Para a conclusão desta atividade é necessária a preparação dos estágios intermédios de estampagem, no entanto esta preparação não é exclusiva deste método sendo também necessária no método “tradicional” (ver Figura 29).



**Figura 29 – Definição da banda pelo método otimizado.**

## 5.4 Cálculos

Tendo a banda definida, avançou-se para a tarefa de calcular as forças que se encontram envolvidas em todo este processo. Recorrendo à funcionalidade “*Force Calculation*” definimos as operações de corte e estampagem, de modo a que o *software* proceda ao cálculo das forças parciais e totais de cada estação, os resultados parciais destes cálculos encontram-se no Anexo D.

De seguida apresentam-se os cálculos agrupados por tipo de operações assim como o somatório final. Estes cálculos foram maioritariamente obtidos recorrendo às expressões presentes na seção 3.4, com exceção de algumas variáveis e formas de cálculo para as quais o *software* não permite customização.

**Tabela 2 – Cálculos através do PDW**

<b>Operação</b>	<b>Força Principal</b>	<b>Força Encostador</b>
<b>Corte</b>	482686 N (49220 Kgf)	48269 N (4922 Kgf)
<b>Dobragem</b>	51573 N (5259 Kgf)	25786 N (2629 Kgf)
<b>Estampagem</b>	30039 N (3063 Kgf)	4181 N (426 Kgf)
<b>TOTAIS</b>	564297 N (57543 Kgf)	82803 N (8444 Kgf)

## 5.5 Projeto da ferramenta

Utilizando a banda, que havia sido elaborada anteriormente, começou-se a entrar na tarefa de elaboração do projeto da ferramenta.

### 5.5.1 Elementos estruturais

A primeira atividade desta tarefa é a definição dos elementos estruturais da ferramenta. Deste modo procedeu-se à definição das espessuras que seriam utilizadas em cada elemento assim como as quantidades e afastamentos dos mesmos. Esta definição executou-se com recurso a folhas de cálculo que se encontram incorporadas no *software* PDW (ver Figura 30), que após preenchidas geram os elementos presentes na Figura 31.

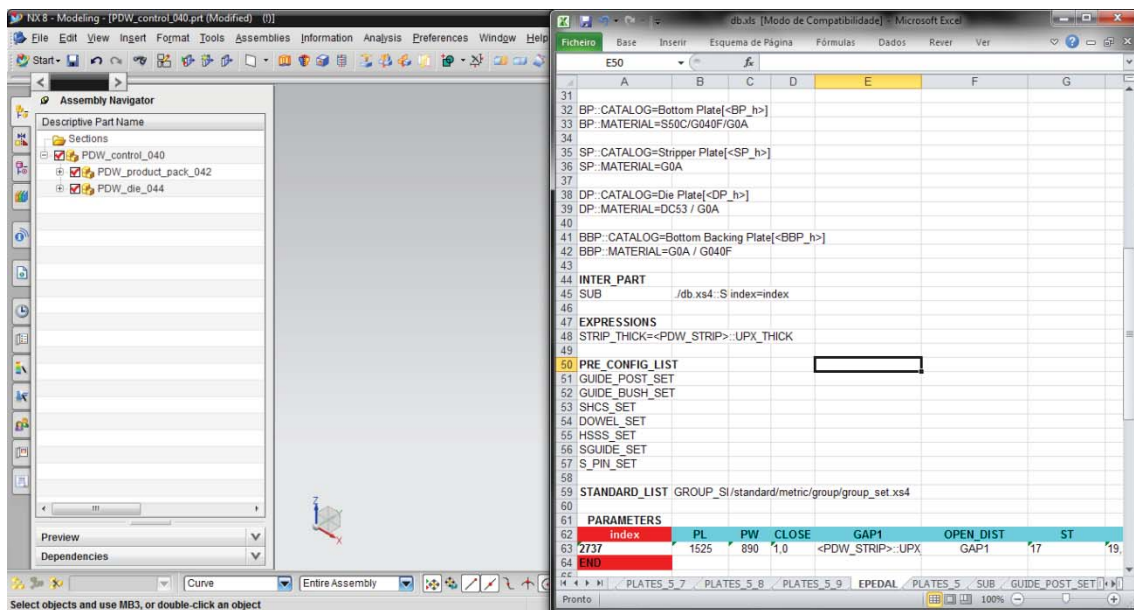
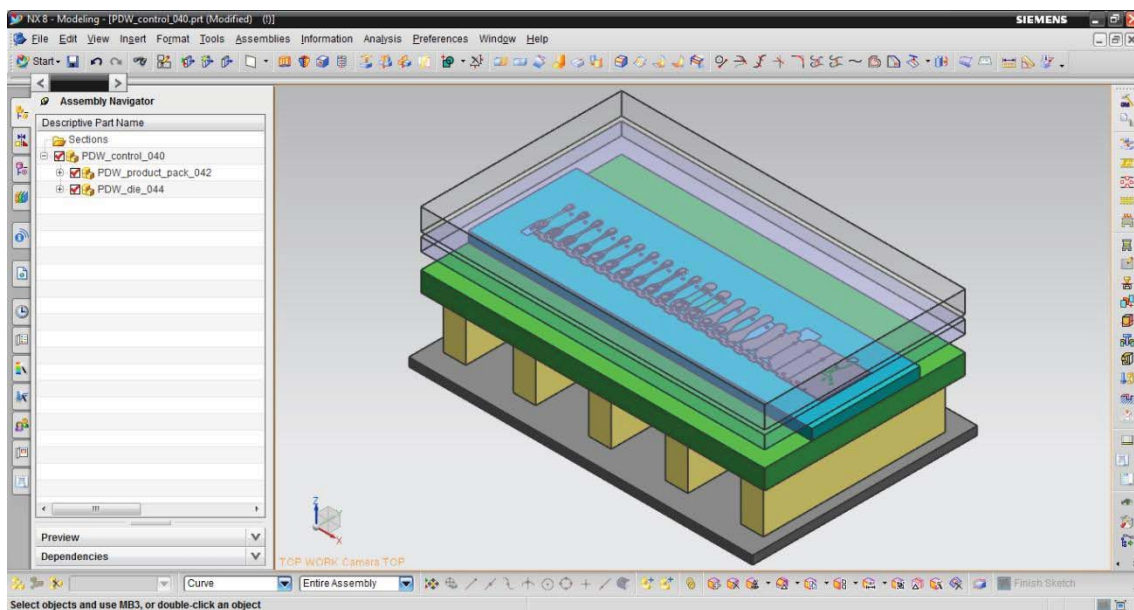


Figura 30 – Definição dos elementos estruturais.



**Figura 31 – Projeto após execução da estrutura.**

## **5.5.2 Elementos funcionais**

A segunda atividade desta tarefa consiste na definição dos elementos funcionais da ferramenta. Esta definição foi dividida em três grupos principais, as operações de corte, as operações de estampagem/calibração e as operações de dobragem.

### **5.5.2.1 Operações de Corte**

Na atividade seguinte, definiu-se os cortantes que serão utilizados no projeto, começando pelos elementos normalizados, punções, porta-punções e matrizes. A introdução destes é conseguida recorrendo às bibliotecas presentes na funcionalidade “*Standard Part Management*” (ver Figura 32) [14].

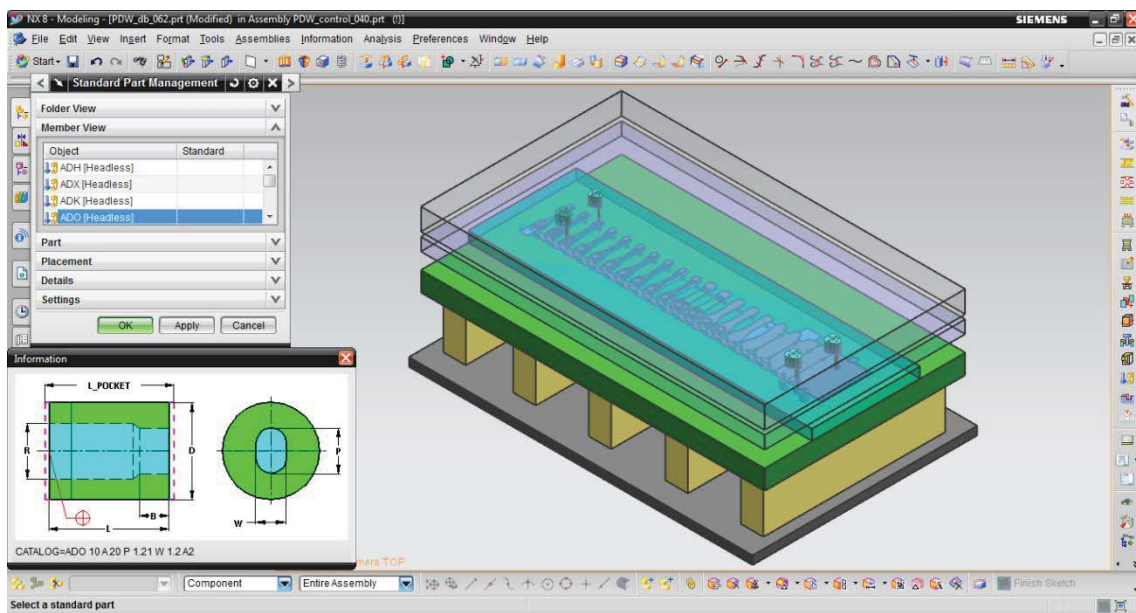


Figura 32 – Introdução de elementos normalizados para operações de corte.

De seguida recorrendo à funcionalidade “*Piercing Insert Design*”, definiram-se os punções de corte não normalizados que serão utilizados neste projeto (ver Figura 33).

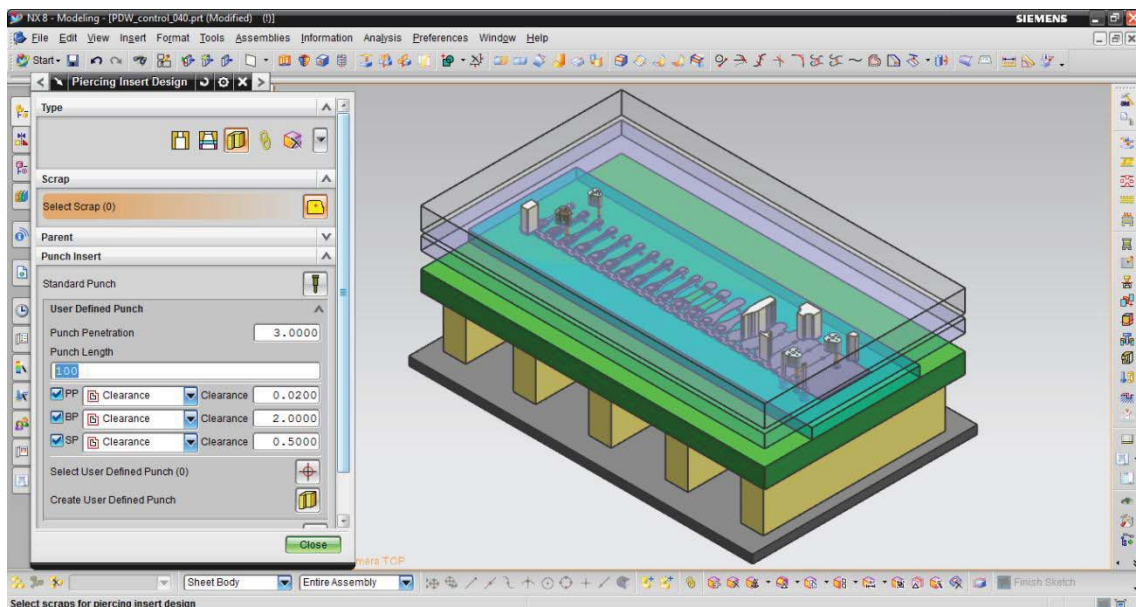
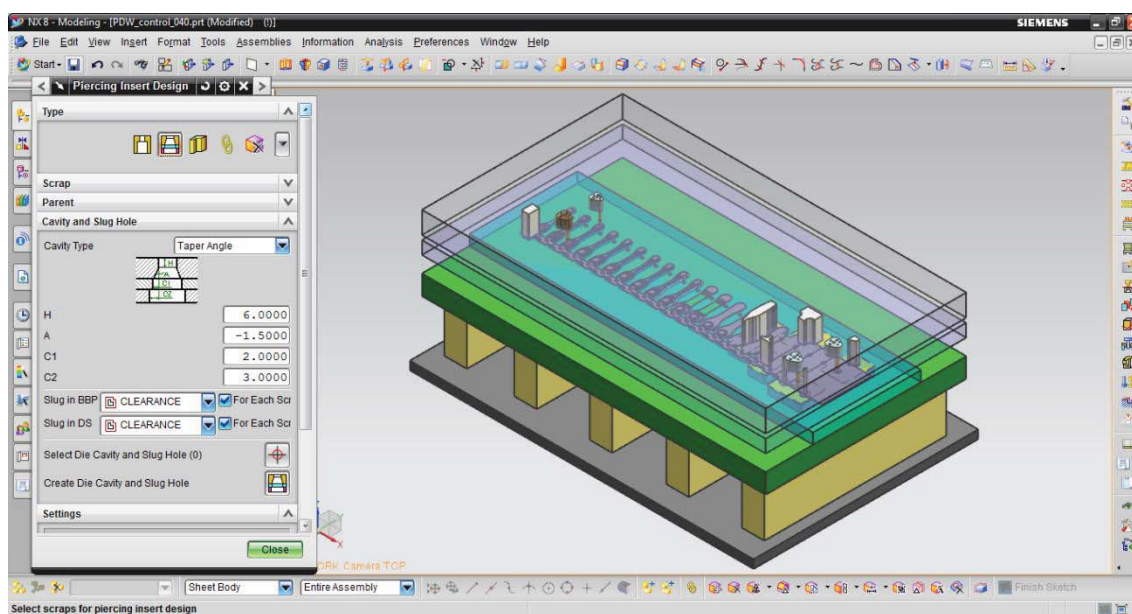


Figura 33 – Introdução dos restantes punções de corte.

Seguiu-se a definição das matrizes de corte recorrendo novamente à funcionalidade “*Piercing Insert Design*” (ver Figura 34). Neste ponto tornou-se evidente que alguns pontos neste projeto teriam que ser finalizados com recurso aos métodos “tradicionais”, nomeadamente na definição da última matriz de corte, a de separação, devido a esta não possuir um perfil de corte fechado ao redor do punção de corte.



**Figura 34 – Introdução das matrizes de corte.**

### **5.5.2.2 Operações de Estampagem/Calibração**

Nesta atividade, definiram-se os elementos de estampagem e/ou calibração que possuem formas complexas. Recorrendo à funcionalidade “*Forming Insert Design*” começou-se por extrair as superfícies da banda que seriam utilizadas nesta atividade, tendo sido necessário em algumas superfícies proceder a ligeiros ajustes de modo a que as mesmas podem ser utilizadas. De seguida gerou-se os cunhos e matrizes de estampar e os encostadores das várias operações de corte e calibração que restavam na ferramenta (ver Figura 25 e Figura 26).

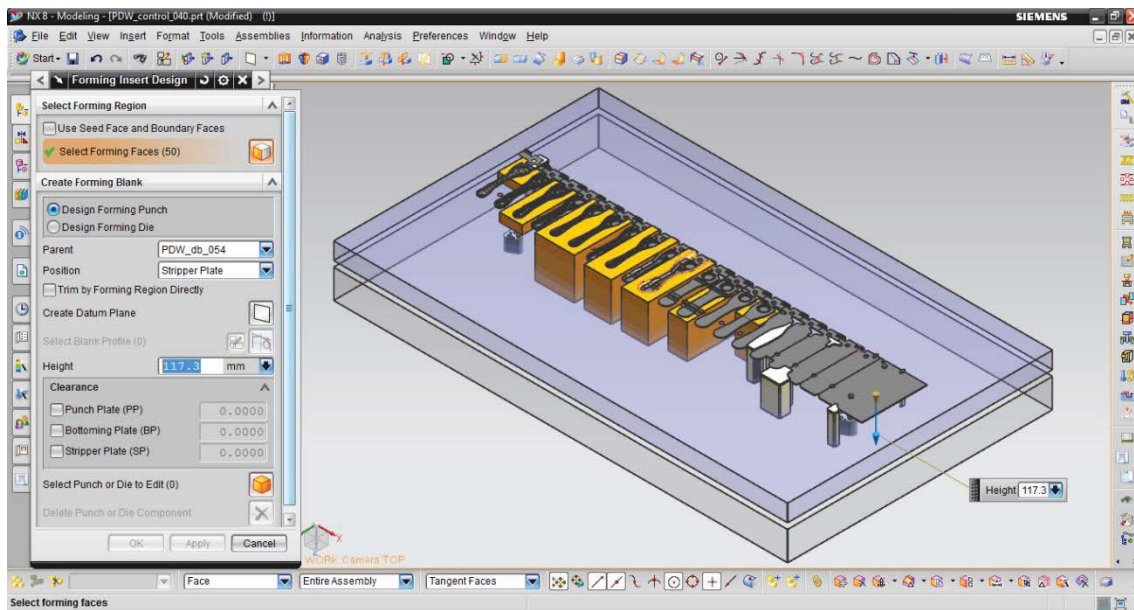


Figura 35 – Introdução dos cunhos e dos encostadores.

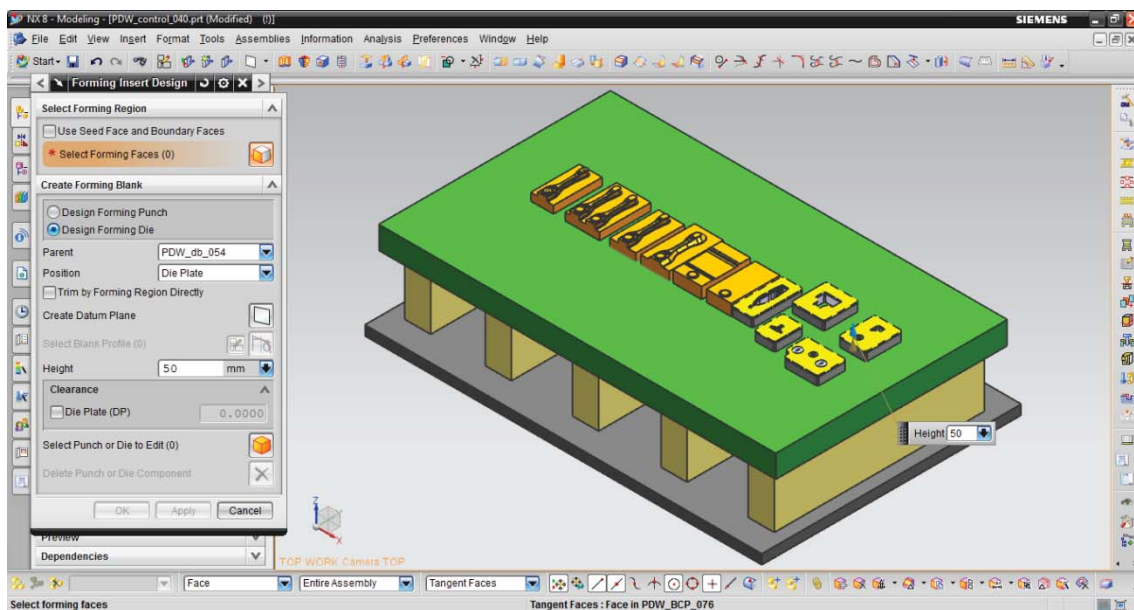
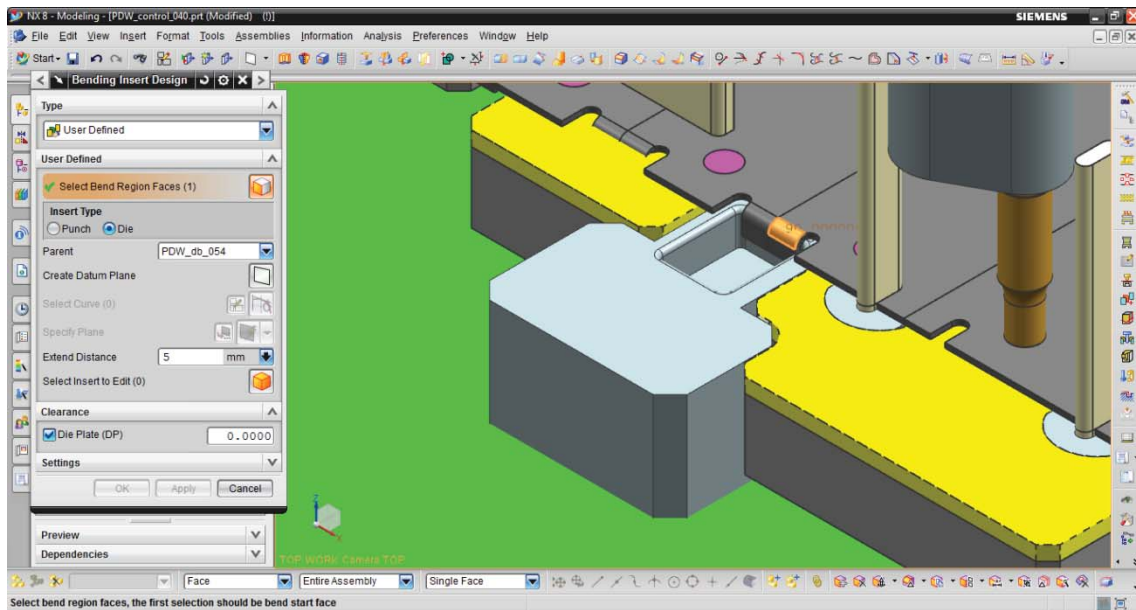


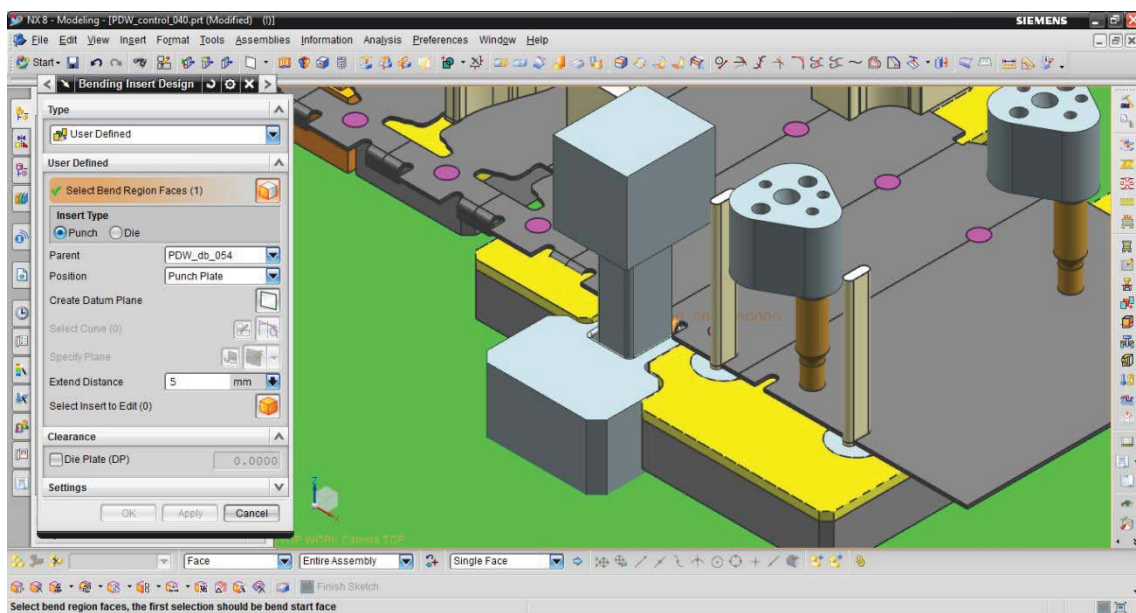
Figura 36 – Introdução das matrizes de estampar.

### 5.5.2.3 Operação de dobragem

Para a execução da operação de dobragem presente nesta ferramenta, recorreu-se à funcionalidade “*Bending Insert Design*” para desenhar a matriz e o punção que irão realizar a operação de dobragem (ver Figura 37 e Figura 38).



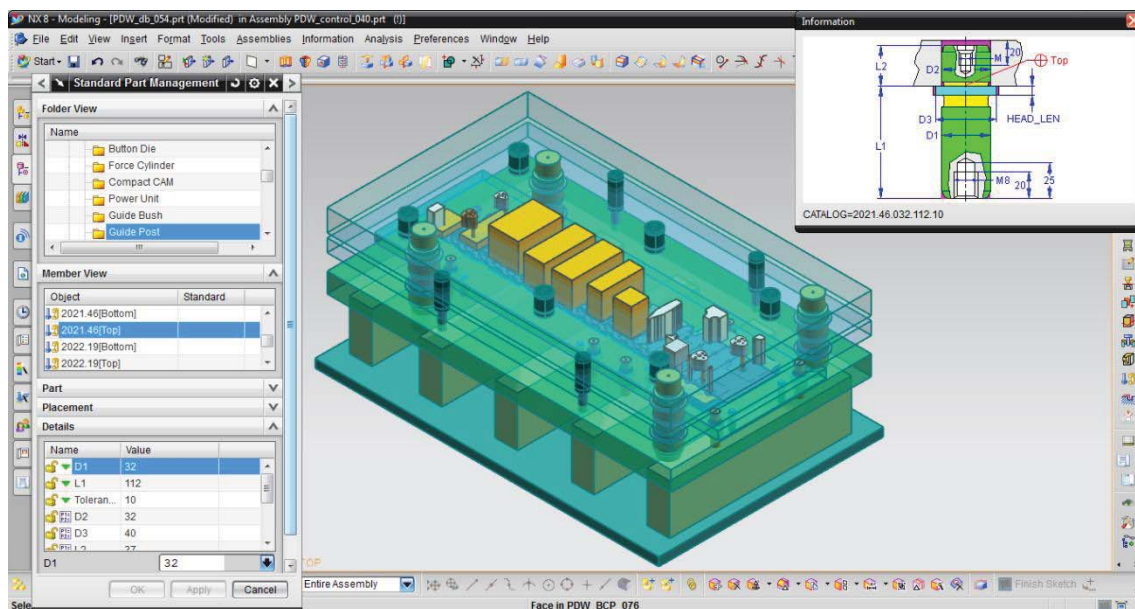
**Figura 37 – Introdução da matriz de dobra.**



**Figura 38 – Introdução do punção de dobra.**

### 5.5.3 Elementos periféricos

Finda a definição dos elementos funcionais resta a definição dos elementos periféricos. Dentro deste conjunto de elementos podemos mencionar as colunas e respetivos casquilhos que efetuaram o guiamento dos vários elementos móveis. Assim como as molas a gás que permitiram o correto funcionamento dos elevadores e dos porta-pisas. Deste modo recorrendo novamente à biblioteca “*Standard Part Management*” introduziram-se estes elementos na ferramenta (ver Figura 39).



**Figura 39 – Introdução dos elementos normalizados.**

Para a elaboração dos restantes elementos periféricos torna-se necessário a aplicação da metodologia “tradicional”, desenhando deste modo peça-a-peça os restantes elementos necessários.

Página em branco

# Capítulo 6

## 6.1 Comparação

De modo a facilitar a identificação de pontos forte e pontos fracos em ambos os métodos de projeto descritos neste TFM, apresenta-se de seguida um comparativo entre ambas as metodologias agrupado em três seções correspondentes às fases mais importantes do processo de projeto de uma ferramenta: a elaboração do planificado, a elaboração da banda e a elaboração da ferramenta.

## 6.2 Elaboração do planificado

No decorrer deste TFM foram elaborados três planificados recorrendo a três softwares distintos. A fim de validar as geometrias que foram utilizadas para efetuar os planificados, importaram-se e sobrepuseram-se as geometrias utilizadas a fim de quantificar possíveis desvios (ver Figura 40 e Figura 41).

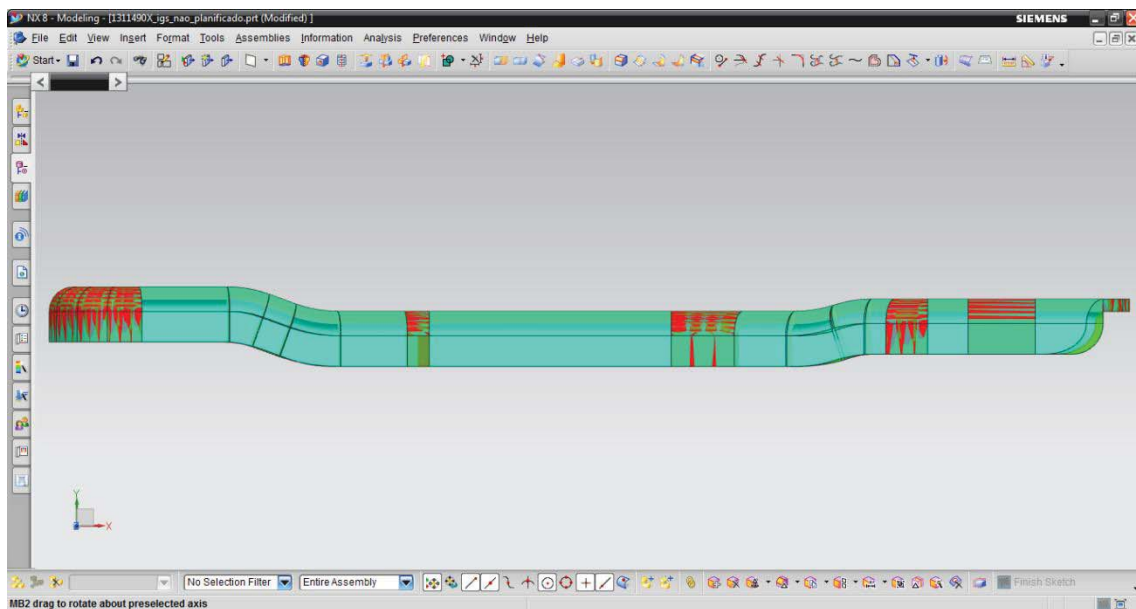
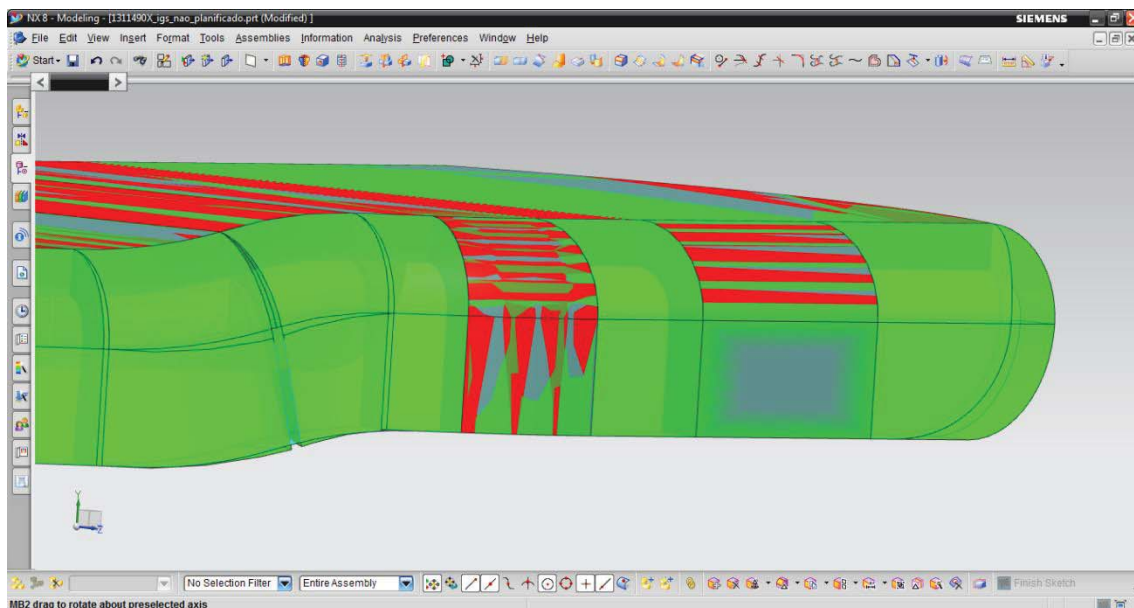
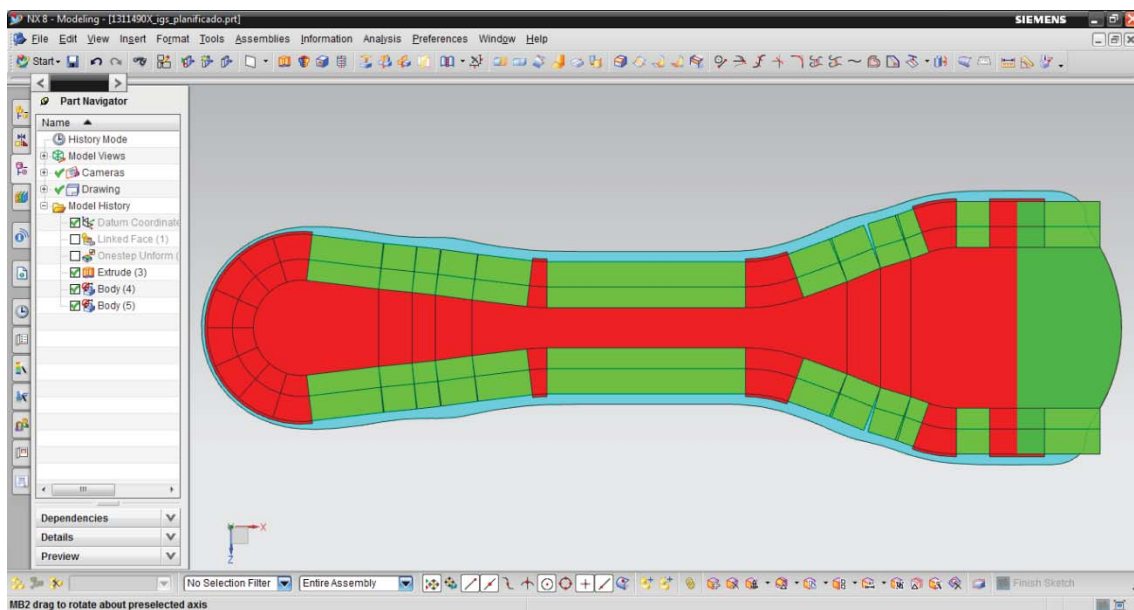


Figura 40 – Comparação das geometrias utilizadas para o cálculo dos planificados.



**Figura 41 – Comparação das geometrias utilizadas para o cálculo dos planificados (detalhe).**

Através desta comparação podemos afirmar, que as geometrias utilizadas para a elaboração dos planificados nas três plataformas de desenho são viáveis, tendo em conta a peça inicial. Sendo apenas de mencionar um ligeiro desvio da geometria utilizada no CATIA V5 (sólido a verde), no topo da peça, relativamente à peça inicial (sólido a azul). Desvio esse, que não influencia o cálculo do desenvolvimento da chapa, e consequente largura final do planificado. Assim como um pequeno desvio desprezável (0.33 mm) devido à falta de convergência entre as abas elaboradas em CATIA V5 para simular as abas laterais da peça. No entanto, apesar das geometrias utilizadas para o cálculo dos planificados serem comparativamente semelhantes entre si, a comparação dos planificados obtidos apresenta valores muito discrepantes.



**Figura 42 – Comparação dos planificados obtidos.**

Para esta análise deverá ser ignorado o desvio presente no topo, devido às questões anteriormente descritas.

O planificado a azul (NX8) apresenta relativamente ao planificado a vermelho (SolidWorks 2012) um desvio aproximadamente constante a todo o perímetro da aba de 1.5 mm. Por seu lado o planificado verde (CATIA V5) apresenta relativamente ao planificado a azul um desvio de 2 mm (ver Figura 42). No entanto, apesar da dispersão de resultados aqui apresentados, a prática (ver capítulo Capítulo 7), assim como a experiência de projetos anteriores realizados na empresa Manuel Da Conceição Graça, Lda. indicam que o planificado azul (NX8), apesar de necessitar de algumas correções mínimas é de todos o que permite ficar mais próximo do produto final.

### **6.3 Elaboração da banda**

Comparando ambas as metodologias expostas neste trabalho concluiu-se que hoje em dia é indispensável a utilização de um *software* que recorra ao método dos elementos finitos para a elaboração dos planificados.

Pode concluir-se também que a utilização da ferramenta “*Progressive Die Wizard*” reduz o tempo de conceção das bandas quer para orçamento quer para aprovação do

processo de estampagem. No caso deste TFM apenas se pode constatar esta redução na elaboração da banda para aprovação do processo de estampagem (final), uma vez que na empresa onde este projeto foi desenvolvido (MCG), as bandas de orçamentação são elaboradas por um gabinete externo ao gabinete de projeto, leia-se gabinete de orçamentação. Devido a esse facto, hoje em dia quando uma ferramenta é adjudicada, o gabinete de projeto não possui nenhuma banda em formato CAD para iniciar o seu trabalho, tendo que gerar as bandas para aprovação por parte do cliente de raiz. Através da aplicação deste *software* tornar-se-ia possível elaborar orçamentos rápidos e eficazes, permitindo ainda no decorrer deste processo criar um documento que posteriormente serviria de base para elaboração do projeto final após adjudicação, melhorando assim a articulação entre o gabinete de orçamentação e o gabinete de projeto.

De referir também que na fase final da elaboração deste TFM foi detetada uma ligeira discrepância entre os valores de aproveitamento de matéria-prima calculados pela ferramenta “*Progressive Die Wizard*” (46.6%) e pelo método “tradicional” (48.7%). Esta diferença é justificada pela ocorrência de um erro na elaboração de bandas pelo método “tradicional”. Este erro consiste na consideração da área do planificado na sua totalidade sem a esta ser descontada a área de matéria-prima que será removida nas operações de furação. No caso particular deste TFM a produção anual situar-se-á em valores ditos pequenos (<500.000 peças por ano), pelo que este erro não possui um peso muito relevante, no entanto, em peças com grandes produções anuais (1.000.000 peças por ano, ou mais), estes pequenos erros adquirem proporções diferentes, sendo deste modo um bom exemplo de como a aplicação da ferramenta “*Progressive Die Wizard*” pode reduzir as possibilidades para a ocorrência de erros.

Comparando os valores obtidos para a força principal total da ferramenta de estampagem pelo método “tradicional” (548657 N (54868 Kgf)) e os valores obtidos pelo método “otimizado” (564297 N (57542 Kgf)) podemos observar entre ambos uma diferença de aproximadamente 3%, que podemos considerar como desprezável e que pode ser atribuída à utilização de diferentes formas de cálculo e/ou coeficientes de equivalência/segurança.

## 6.4 Elaboração do projeto da ferramenta

Após definida a banda para aprovação do processo de estampagem, procedeu-se ao projeto da ferramenta.

Nas subfases que se encontram contempladas na ferramenta “*Progressive Die Wizard*” foi possível diminuir o tempo de projeto, através das funcionalidades que permitem, após ter definido a banda como foi feito na fase anterior, obter rapidamente os punções, cunhos e matrizes de corte e estampagem, assim como os encostadores para operações de calibração ou separação. No entanto, a utilização desta ferramenta não evita a necessidade de continuar a recorrer ao método “tradicional”, nomeadamente na elaboração de elementos móveis tais como elevadores, extratores, encostadores, ou de outros elementos que necessitem de uma abordagem diferente dos elementos comuns às ferramentas de estampagem ou que careçam de uma solução inovadora de modo a cumprir com os requisitos do espaço disponível. Deste modo a opção pelo método exclusivamente paramétrico torna-se demasiado limitativa, na medida em que cria demasiados obstáculos à criatividade do projetista.

No entanto, apesar de no decorrer deste TFM, ter sido demonstrada a impossibilidade da utilização do método “otimizado” em exclusivo, não deixa de ser reconhecida a mais-valia que advém da sua utilização no sentido de melhorar algumas partes cruciais do projeto.

Página em branco

# Capítulo 7

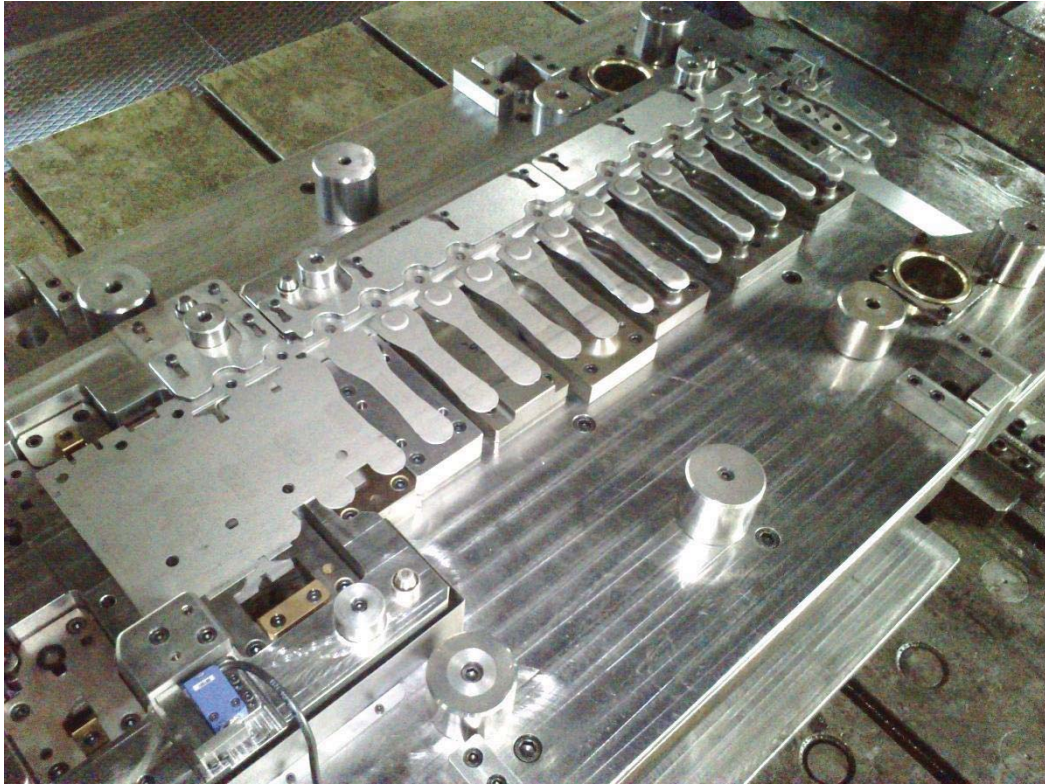
## 7.1 Concretização

Em simultâneo com a elaboração deste TFM, decorreu a construção do objeto de estudo, que serviu de base a este TFM.

A maquinação de cunhos e matrizes de estampar pode por vezes apresentar dificuldades na geração das estratégias de maquinação CAM, por vezes devido a pequenas imperfeições presentes nas superfícies destas peças, no entanto durante o fabrico desta ferramenta, não foram registados problemas desse tipo, sendo possível confirmar o aspeto final que este projeto adquiriu. Assim como observar a concretização das várias transformações que a banda vai sofrendo ao longo das várias operações a que a banda é sujeita de modo a obter a peça final (ver Figuras 43-45).



**Figura 43 – Aspeto da ferramenta após montagem.**



**Figura 44 – Aspeto da ferramenta em prensa.**



**Figura 45 – Aspeto da ferramenta em prensa.**



**Figura 46 – Peça final.**



**Figura 47 – Peça final.**

O planejado utilizado na construção dos punções e matrizes de corte foi o planejado gerado pelo *software* NX8, que apesar das discrepâncias detetadas entre os vários *softwares* utilizados no decorrer deste TFM, possibilitou a obtenção de uma peça dentro das especificações do cliente (ver Figuras 46-47). Esta situação justifica-se devido à baixa complexidade da peça final, não sendo prática comum a elaboração de punções e matrizes de corte diretamente do planejado gerado pelo *software* NX8. Por norma a construção da ferramenta inicia-se pelos elementos de estampar, ficando os punções e matrizes de corte a aguardar o decorrer de um processo iterativo de estampagem de planejados cortados a laser e medição de peças estampadas. Apenas após a obtenção de peças dentro da especificação do cliente é que se inicia a construção dos punções e matrizes de corte.

# Capítulo 8

## 8.1 Conclusões

No decorrer deste TFM, foram apresentados dois métodos de abordagem ao processo de projeto de ferramentas de estampagem metálica, o método “tradicional” mais conservador, onde todas as atividades de projeto são realizadas manualmente em vários *softwares* distintos, e o método “otimizado” que agrupando todas estas atividades na ferramenta “*Progressive Die Wizard*” do *software* NX8 e automatizando algumas delas permitiu reduzir o *lead-time* de algumas das fases do projeto global.

O recurso a esta ferramenta permitiu-nos diminuir o tempo de conceção dos documentos necessários para orçamentação e para adjudicação da ferramenta (elaboração das referidas bandas), para um valor na ordem dos 60% do tempo gasto pelo método “tradicional”.

Na fase do projeto da ferramenta, durante a elaboração deste TFM, tornou-se evidente que o método “otimizado” não permitiria a elaboração na íntegra do projeto da ferramenta, sendo sempre necessária alguma modelação 3D adicional após aplicação da ferramenta “*Progressive Die Wizard*”. Esta necessidade é justificada pela especificidade que cada projeto apresenta, e que cada empresa de construção de ferramentas apresenta, e que foge ao âmbito generalista das funcionalidades de projeto paramétrico do *software* PDW.

Para efeitos de quantificação dos ganhos em termos de tempo definiram-se três subfases dentro da fase do projeto da ferramenta. A primeira subfase denomina-se por “Elementos estruturais” e consiste no projeto dos elementos que servirão de estrutura a todas as operações da ferramenta. A segunda subfase “Elementos funcionais” engloba o projeto de todos os elementos que irão realizar trabalho nas várias operações de corte, dobragem, estampagem e calibração (punções, cunhos, matrizes, encostadores). Na terceira e última subfase “Elementos periféricos” contemplam-se todos os restantes elementos que mesmo não realizando trabalho nas várias operações, são indispensáveis ao correto funcionamento da ferramenta (elevadores, extratores, pilotos), assim como a

correção de pormenores também importantes tais como colisões entre elementos, folgas funcionais, assim como furos de aperto e posicionamento para parafusos e cavilhas.

Devido à necessidade de terminar o projeto com recurso ao método “tradicional” a redução do tempo gasto na fase do “projeto da ferramenta” situou-se na casa dos 85% do tempo que demoraria exclusivamente pelo método “tradicional”.

**Tabela 3 – Comparativo**

	Método “tradicional”	Método “otimizado”	Redução
<b>Elaboração da banda</b>	10 horas	6 horas	40 %
<b>Projeto da ferramenta</b>	112 horas	95 horas	15 %
Elementos estruturais	16 horas	12 horas	25 %
Elementos funcionais	40 horas	27 horas	32 %
Elementos periféricos	56 horas	56 horas	0 %
<b>TOTAIS</b>	122 horas	101 horas	18 %

Durante o decorrer deste TFM foi apresentado um método designado como “otimizado” que delineou uma estratégia de “otimização” da modelação 3D. No entanto esta filosofia de “otimização” pode, graças às ferramentas existentes hoje em dia, estender-se também à modelação 2D. Paralelamente ao projeto de “otimização” da modelação 3D, encontra-se a decorrer na empresa Manuel da Conceição Graça, Lda., um projeto de otimização da modelação 2D recorrendo à ferramenta PMI (*Product and Manufacturing Information*) também do *software* NX8 da Siemens. Em traços gerais, este projeto consiste na incorporação de determinada informação, que tradicionalmente se encontra presente apenas desenhos 2D, diretamente no ficheiro final das peças modeladas em 3D. Esta nova possibilidade combinada com as capacidades existentes hoje em dia de maquinação com recurso à programação CAD/CAM, permitirá para além de transportar toda a informação dimensional necessária para executar uma determinada peça, incorporar informações relativas a acabamentos superficiais e tolerânciamientos geométricos, diretamente no ficheiro 3D. Esta nova possibilidade permitirá a simplificação da elaboração dos desenhos 2D, podendo no limite deixar de ser

necessário a elaboração dos mesmos, devido ao fato de toda a informação poder ser transportada no interior do ficheiro 3D. Esta nova possibilidade permitirá também reduzir as probabilidades de erro durante os processos de maquinação, uma vez que o operador poderá consultar todas as informações necessárias em ambiente 3D, eliminando os possíveis erros por falta de formação, conhecimento, ou capacidade de interpretação de desenhos 2D. Deste modo, como trabalho futuro para este TFM poderia ser feita a integração de ambas as ferramentas no processo de projeto da empresa Manuel da Conceição Graça, Lda., permitindo assim reduzir lead-times e colocar o processo produtivo da empresa entre os melhores das empresas de projeto de ferramentas em Portugal.

Página em branco

## Bibliografia

- [1] M. Ghatrehnaby e B. Arezoo, “A fully automated nesting and piloting system for progressive dies,” *Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 525-535, 2009.
- [2] W. Zhang, T. S. e G. Britton, “A Hybrid Intelligent System for Stamping Process Planning in Progressive Die Design,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, pp. 774-783, 2005.
- [3] S. Kumar e R. Singh, “An automated design system for progressive die,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 4482-4489, 2011.
- [4] D. Luria, J. Baron e K. Dzikczek, “The World Class Tool Shop and it's Prospects in Michigan,” The Center for Automotive Research, Michigan, 2006.
- [5] J. Rodrigues e P. Martins, *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. II Aplicações Industriais*, Lisboa: Escolar Editora, 2ª Edição 2010.
- [6] S. Holmberg, B. Enquist e P. Thilderkvist, “Evaluation of sheet metal formability by tensile tests,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 145, pp. 72-83, 2004.
- [7] J. Barbosa, *Análise Não-Linear Transitória e Quase-Estática de Placas Recorrendo à Relaxação Dinâmica*, F.E.U.P. (Porto), 1984.
- [8] T. Altan e A. Tekkaya, *Sheet Metal Forming - Fundamentals*, Estados Unidos da América: ASM International, 2012.
- [9] J. Rodrigues e P. Martins, *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. I Fundamentos Teóricos*, Lisboa: Escolar Editora, 2ª Edição 2010.

- [10] S. Azraq, R. Teti e J. Costa, "Springback prediction with FEM analysis of advanced high strength steel stamping process," *Intelligent Production Machines and Systems*, pp. 264-269, 2006.
- [11] G. Ingarao e R. Di Lorenzo, "A new progressive design methodology for complex sheet metal stamping operations: Coupling spatially differentiated restraining forces approach and multi-objective optimization," *Computers and Structures*, vol. 88, pp. 625-638, 2010.
- [12] I. Suchy, *Handbook of Die Design*, 2nd Edition, E.U.A.: McGraw-Hill, 1998.
- [13] W. P. Romanowski, *Handbook of cold metal forming*, Warsaw: WNT, 1961.
- [14] Fibro GmbH, *Standard Parts Catalogue*, Alemanha, 2013.
- [15] S. Kumar e R. Singh, "A low cost knowledge base system framework for progressive die design," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 958-964, 2004.
- [16] "MatWeb - The Online Materials Information Resource," [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0bb90e2770864e33891b60a26b4f5118&ckck=1>. [Acedido em 06 03 2013].
- [17] "Spring Back," [Online]. Available: <http://sheetmetal.me/spring-back/>. [Acedido em Junho 2013].

## Anexo A – Características teóricas do aço S420MC

### Propriedades Mecânicas [16]

<b>Tensão de Ruptura</b>	480 – 620 MPa
<b>Tensão de Cedência</b>	$\geq 420$ MPa
<b>Enlongamento</b>	$\geq 19$ %
<b>Impacto de Charpy</b>	40 J (EN 10045)
<b>Raio de Dobragem mínimo</b>	0,5*t (ISO 7438)

### Composição Química [16]

<b>Carbono</b>	$\leq 0.100$ %
<b>Manganês</b>	$\leq 1.600$ %
<b>Nióbio</b>	$\leq 0.070$ %
<b>Fósforo</b>	$\leq 0.025$ %
<b>Sílica</b>	$\leq 0.150$ %
<b>Enxofre</b>	$\leq 0.010$ %
<b>Vanádio</b>	$\leq 0.100$ %

## Anexo B – Características reais do aço S420MC

# MCG - MIND FOR METAL

## Laboratório Ensaio Mecânicos

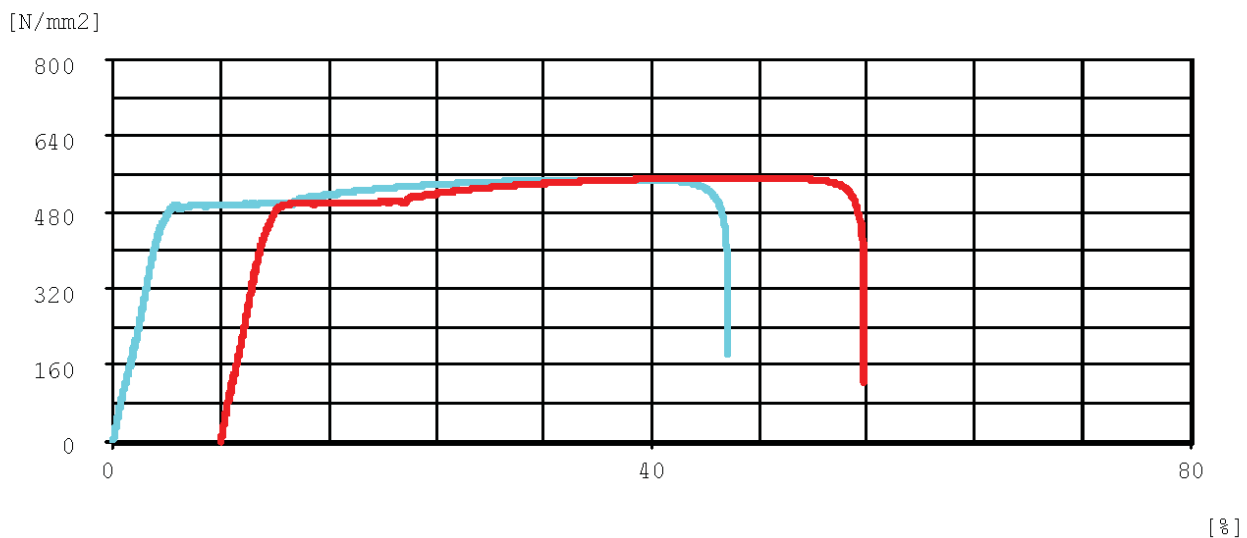
Date/Time: 01-03-2013

**Batch Name:** 0154BE0000 - S420 - LAYDE STEEL - PPAP

Shape: Plate

Gauge Length: 80.00

Calc. CP1, CP2 CP Unit Pass-Fail Unit	Alonga c/Marcas	ReH 0.100 [%] 420.000, 1000.00 [N/mm2]	Rm [N/mm2]	Width: [mm]	Thickness: [mm]
1	20.00	495.101	548.86	20.68	1.99
2	21.25	499.369	552.20	20.67	1.98
Mean	20.62	497.235	550.53	20.67	1.98
Std-D (N-1)	0.88	3.01819	2.36	0.00	0.00
Max	21.25	499.369	552.20	20.68	1.99
Min	20.00	495.101	548.86	20.67	1.98
Range	1.25	4.26837	3.34	0.01	0.01



## Anexo C – Cálculos parciais das forças (Método “tradicional”)

<b>Estação</b>	<b>Força Principal</b>	<b>Força Encostador</b>
<b>01 (Corte)</b>	84074 N (8408 Kgf)	8408 N (841 Kgf)
<b>02 (Corte)</b>	17269 N (1727 Kgf)	1727 N (173 Kgf)
<b>03 (Dobragem)</b>	2640 N (264 Kgf)	1320 N (132 Kgf)
<b>04 (Corte)</b>	151100 N (15110 Kgf)	15110 N (1511 Kgf)
<b>05 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>06 (Corte)</b>	166163 N (16617 Kgf)	16617 N (1662 Kgf)
<b>07 (Estampagem)</b>	28501 N (2851 Kgf)	5701 N (571 Kgf)
<b>08 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>09 (Estampagem)</b>	2100 N (210 Kgf)	- *
<b>10 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>11 (Dobragem)</b>	16800 N (1680 Kgf)	8400 N (840 Kgf)
<b>12 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>13 (Dobragem)</b>	25200 N (2520 Kgf)	12600 N (1260 Kgf)
<b>14 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>15 (Calibração)</b>	-	-
<b>16 (Calibração)</b>	-	-
<b>17 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>18 (Corte)</b>	33390 N (3339 Kgf)	3339 N (334 Kgf)
<b>19 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>20 (Corte)</b>	21420 N (2142 Kgf)	2142 N (215 Kgf)

\* Uma vez que esta operação de estampagem será efetuada a simples efeito, ou seja sem recorrer a um encostador, não existirá valor de encostador nesta estação.

## Anexo D – Cálculos parciais das forças (Método “otimizado”)

<b>Estação</b>	<b>Força Principal</b>	<b>Força Encostador</b>
<b>01 (Corte)</b>	84073 N (8573 Kgf)	8407 N (857 Kgf)
<b>02 (Corte)</b>	17215 N (1756 Kgf)	1722 N (176 Kgf)
<b>03 (Dobragem)</b>	3149 N (321 Kgf)	1574 N (161 Kgf)
<b>04 (Corte)</b>	151099 N (15408 Kgf)	15110 N (1541 Kgf)
<b>05 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>06 (Corte)</b>	166309 N (16959 Kgf)	16631 N (1696 Kgf)
<b>07 (Estampagem)</b>	20905 N (2132 Kgf)	4181 N (426 Kgf)
<b>08 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>09 (Estampagem)</b>	9134 N (932 Kgf)	- *
<b>10 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>11 (Dobragem)</b>	21522 N (2195 Kgf)	10761 N (1097 Kgf)
<b>12 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>13 (Dobragem)</b>	26902 N (2743 Kgf)	13451 N (1372 Kgf)
<b>14 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>15 (Calibração)</b>	-	-
<b>16 (Calibração)</b>	-	-
<b>17 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>18 (Corte)</b>	33548 N (3421 Kgf)	3355 N (342 Kgf)
<b>19 (Passo em falso)</b>	-	-
<b>20 (Corte)</b>	30442 N (3104 Kgf)	3044 N (310 Kgf)

\* Uma vez que esta operação de estampagem será efetuada a simples efeito, ou seja sem recorrer a um encostador, não existirá valor de encostador nesta estação.