



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

DEFINITIVO

**Maquinação de componentes
integrantes em ferramentas para
estampagem de chapa metálica a frio**

Autor

Frederico Gomes Pinto

Orientador

João Miguel Maia Carrapichano

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, fevereiro de 2021



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Maquinação de componentes integrantes em ferramentas para estampagem de chapa metálica a frio

Relatório de Estágio de Natureza Profissional para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

Frederico Gomes Pinto

Orientador

João Miguel Maia Carrapichano

Supervisor na empresa
e cortantes LDA

Bairrimoldes – Fábrica de moldes cunhos

Sérgio Luís Ferreira Costa

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, fevereiro de 2021

AGRADECIMENTOS

Antes de apresentar o meu trabalho gostaria de expressar o meu reconhecimento a todas as pessoas envolvidas neste relatório.

Em primeira instância, gostaria de agradecer à Empresa Bairrimoldes pela oportunidade de estágio, por toda a formação e trabalho realizado.

Da mesma forma, um enorme agradecimento ao Engenheiro Sérgio Costa por toda a orientação dada na empresa. Agradeço também ao meu professor e orientador, Doutor João Carrapichano, por todo o apoio cedido e por todos os esclarecimentos.

Por fim, agradeço à minha família e amigos por todo o incentivo demonstrado.

RESUMO

O setor denominado de ferramentas e moldes para a conformação de chapa metálica tem assumido, cada vez mais, uma transferência de competências a jusante da indústria dos grandes estampadores, participando ativamente em soluções avançadas que potenciam o fornecimento de valor acrescentado em novos produtos nos *tiers* superiores. O efeito de escala inerente ao método progressivo e de *transfer* destas ferramentas associa-se comumente ao setor de fornecimento automóvel, relevando e impondo, como consequência, um conjunto de fatores críticos, tais como: a incorporação de conhecimento avançado dos processos e variáveis de estampagem metálica, o domínio do comportamento dos materiais e, naturalmente, as tecnologias de fabrico, a maquinação CNC, em particular, no desenvolvimento dos componentes integrantes de ferramenta.

Os requisitos técnicos, tolerâncias dimensionais nas peças estampadas cada vez mais exigentes e a procura no limite dos processos pelo projeto inteligente de otimização estrutural com geometrias complexas, priorizam a abordagem a parâmetros de maquinação na transformação de componentes com superfícies ativas e decisivas na conformação final da peça em chapa.

O presente trabalho apresenta um caso real de estudo no decorrer do desenvolvimento de uma ferramenta progressiva de grandes dimensões. A abordagem seletiva às operações críticas da ferramenta na definição funcional da qualidade da peça obtida foi determinante. O foco estratégico na maquinação dos elementos integrantes nestas etapas é elencado neste relatório.

Palavras-Chave: ferramenta progressiva, estampagem metálica, matriz-punção, maquinação

ABSTRACT

The so-called metal sheet forming tools and moulds sector has increasingly assumed a transfer of skills downstream from the large stampers industry, actively participating in advanced solutions that enhance the supply of added value in new products in the upper tiers. The scale effect inherent to the progressive and transfer method of these tools is commonly associated with the automotive supply sector, revealing and imposing as a consequence a set of critical factors, such as: the incorporation of advanced knowledge of metal stamping processes and variables, the mastery of material behavior and, of course, manufacturing technologies, CNC machining in particular, in the development of tooling components.

Technical requirements, dimensional tolerances on increasingly demanding stamped parts, the search at the edge of processes for intelligent design of structural optimization with complex geometries, prioritize the approach to machining parameters in the transformation of components with active and decisive surfaces in the final forming of the sheet metal part.

This work presents a real case study in the course of the development of a large progressive tool. The selective approach to the critical operations of the tool in the functional definition of the quality of the part obtained was decisive. The strategic focus on the machining of the integral elements in these steps is listed in this report.

Key words: progressive tool, metal stamping, die-punch, machining

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS.....	vi
1 MOTIVAÇÃO	1
2 ENQUADRAMENTO SETOR <i>TOOLING</i>	3
3 CONTEXTO BAIRRIMOLDES	5
3.1 Equipamentos de produção da empresa	9
4 FERRAMENTAS PROGRESSIVAS.....	11
4.1 Elementos e seus grupos	11
4.1.1 Prensas	13
4.2 Métodos de estampagem	15
4.2.1 Estampagem peça a peça (1).....	15
4.2.2 Ferramenta progressiva (2)	15
4.2.3 Ferramentas <i>transfer</i> (3).....	16
4.2.4 Sistema híbrido (<i>progressive</i> + <i>transfer</i>)	16
5 CASO DE ESTUDO SELECIONADO	19
5.1 Posto de operação e elementos selecionados.....	23
5.1.1 Programação da matriz de estampar 081 em <i>MasterCam</i>	27
5.2 Maquinação dos componentes selecionados.....	32
5.3 Análise metrológica – sistema de pontos de referência	37
5.3.1 Sistema de pontos de referência, RPS	37
5.4 Sistema de cravação	41
6 CONCLUSÕES.....	43
7 TRABALHOS FUTUROS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 - Sede da empresa <i>Bairrimoldes</i>	5
Figura 02 - Produto final com espessura 1,6 mm	7
Figura 03 - Produto final com espessura 1,5 mm	7
Figura 04 - Produto final com espessura variável	8
Figura 05 - Prensa 800 T	9
Figura 06 - Prensa 400 T	9
Figura 07 - Um dos Centros de Maquinação <i>QUASER MV214</i>	10
Figura 08 - Equipamento de medição <i>CMM AXIOM</i>	10
Figura 09 - Sistema biela-manivela	13
Figura 10 - Prensa hidráulica <i>Accurl</i>	14
Figura 11 - Ferramenta completa OB_1962	19
Figura 12 - Representação parcial do desenho técnico e modelo 3D da peça OB_1962	19
Figura 13 - Banda completa OB_1962	21
Figura 14 - Parte inferior	21
Figura 15 - Parte superior	22
Figura 16 - Elevação	22
Figura 17 - Guia com sistema de cravação	23
Figura 18 - Parte parcial da banda da OP 8 até OP 12	23
Figura 19 - Matrizes de estampar da OP 9 e OP 11	24
Figura 20 - Punções de estampar da OP 9 e OP 11	25
Figura 21 - Punções e matrizes em estudo da OP 9 e OP 11	26
Figura 22 - Matriz de estampar 081	27
Figura 23 - Desenho técnico 2D da matriz 081	28
Figura 24 - Simulação 1º lado	28
Figura 25 - Programação 1º lado	29
Figura 26 - Simulação 2º lado	30
Figura 27 - Programação 2º lado	31
Figura 28 - Programação da remaquinação	32
Figura 29 - Aço ainda por maquinar	33
Figura 30 - Retificação plana	34
Figura 31 - Elementos postiços	35
Figura 32 - Matriz de estampar com elementos postiços implementados	36
Figura 33 - Punções de estampar com elementos postiços implementados	36
Figura 34 - Sistema de coordenadas global de um veículo	38
Figura 35 - Graus de liberdade no espaço tridimensional	39
Figura 36 - Aplicação da regra 3-2-1	39
Figura 37 - Equipamento de medição <i>CMM AXIOM</i>	40
Figura 38 - Sistema de cravação aplicado na ferramenta	41
Figura 39 - Resultado ao teste de performance normativa dos pernos-parafusos	42

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

2D	duas dimensões
3D	três dimensões
ASSY	assemblagem/conjunto
Buy-off	ensaio da ferramenta num estado superior a 85%
CAD/CAM	desenho e fabrico assistido por computador
CMM	equipamento de medição de coordenadas
HRC	dureza Rockwell
I&D+I	investigação, desenvolvimento e inovação
Matting	superfície de alto rigor dimensional, plana
OB	obra interna
OEM	fabricante de equipamento original
OP	posto de operação
RPS	sistema de pontos de referência
Sistema in-tool	sistema integrado na própria ferramenta
Springback	retorno elástico
Tiers	nível de fornecimento no mundo automóvel
Transfer	por transferência
Try-out	ensaio de ferramenta final na prensa do cliente
VW	Volkswagen

1 MOTIVAÇÃO

O setor do *Tooling* ou, como é comumente reconhecido na especialidade, ferramentaria de cunhos e cortantes, atua, participa e desenvolve soluções dentro do ramo da indústria metalúrgica e metalomecânica, a qual representa aproximadamente 7% da transação exportável do PIB nacional (dados referentes ao plano estratégico de 2014-2020 da AIMMAP – Associação dos Industriais Metalúrgicos, Metalomecânicos e Afins de Portugal). O próprio setor reclama este contributo, mas fá-lo apoiado num crescimento anual que se vem acentuando nos últimos anos para um universo de 15 mil empresas associadas. A resiliência é justificada com a reciclagem de valor e o posicionamento estratégico e consolidado de um conjunto de atividades foco em mercados de exigência referencial, como é sempre exemplo o mercado exportável alemão. A motivação na elaboração da temática da presente tese é consentânea, por isso, com o nicho tecnológico em questão, denominado por *Engineering & Tooling*, ao qual está também integrada a área multiplicável dos moldes para a indústria, e que representa apenas um grupo de 500 entidades empresariais de maior tendência especializante, devidamente assumida sob uma estratégia coletiva para a diferenciação de produto. Neste contexto, desenvolvem-se soluções de diferentes níveis de engenharia na aplicação de conformabilidade de chapa metálica, para uma complexidade técnica e tecnológica exigível na indústria automóvel, aeronáutica, entre outros, operando com ferramentas de estampagem para um vasto conjunto diferenciado de materiais, geometria de peça conformada e complexidade de método no processo de manufatura. A escolha desta ferramenta, tem uma especial importância pela sua complexidade e dificuldade acrescida no que toca às dimensões geométricas finais e tolerâncias exigidas pelo cliente. É uma ferramenta que necessita de várias vertentes da engenharia, utilizando técnicas muito avançadas e muito precisas. O rigor é elevado, tanto no início do projeto como na maquinação, assim como na montagem.

Este subsetor representa uma oportunidade contínua de desenvolver produto de maior valor acrescentado, abordagem complementar em matéria de inovação e desenvolvimento e, acima de tudo, a pertinência de reportar uma abordagem de trabalho num meio por muitos desconhecido, mesmo para os agentes de Engenharia Mecânica.

2 ENQUADRAMENTO SETOR *TOOLING*

A escolha das ferramentas de estampar é delineada por vários parâmetros, principalmente a sua complexidade face aos custos intrínsecos. O tamanho máximo da prensa, a composição do material, a sua espessura e, principalmente, o toleranciamento final pretendido da peça a produzir em larga escala, são fatores cruciais que têm que ser levados em consideração quando se inicia o projeto de uma ferramenta. Desta forma, as prensas podem dividir-se em três tipos: ferramentas para trabalho peça a peça, ferramentas progressivas e ferramentas *transfer*, como é explicado posteriormente, no capítulo 4.2.

3 CONTEXTO BAIRRIMOLDES



Figura 01 - Sede da empresa *Bairrimoldes*

A *Bairrimoldes, Fábrica de Moldes Cunhos e Cortantes, Lda*, desenvolve a sua atividade neste setor aplicável e estende a sua produção atual a serviços especializados e integrados de maquinação de elevada precisão, para o desenvolvimento de ferramentas especiais em soluções de conformação de chapa metálica. A *Bairrimoldes* evoluiu como fornecedora de soluções de ferramentas especiais para os grandes grupos de referência do segundo *tier* automotivo, como são exemplos as unidades da *Kirchhoff – Automotive* ou a *Gestamp*, entre outros, e posiciona-se atualmente num vetor de crescimento que lhe permite desenvolver integralmente ferramentas e soluções de processo, para linhas de transformação de peça estampada a frio em chapa metálica em ligas de alto limite elástico, geometria de peça de média-alta complexidade e com método aplicável em tipologia *transfer* automático e/ou progressivo. Posiciona-se de modo diferenciado no segmento de nicho referente a ferramentas especiais de grandes dimensões, acima de 3000 mm, para conjuntos de componentes assemblados até 6000 mm.

A empresa integra valências internas de projeto, simulação numérica, maquinação, desenvolvimento de protótipo e ensaio das soluções de ferramenta final em contexto de *Buy-off* com produção de pré-séries de peças. O domínio da matéria em foco exige novas abordagens concetuais e levanta a necessidade, mas também a oportunidade, de reforçar continuamente a I&D+I. Esta tese materializa, em paralelo, a preocupação direta e indireta no posicionamento dos serviços da empresa para a conceção e produção de ferramentas especiais, focadas em processos críticos, e o controlo respetivo dos mesmos. Trata-se de produção *engineer-to-order* de ferramentas únicas que são preponderantes para a inovação e competitividade dos seus clientes. Os principais clientes são: *Kirchhoff*, *TB&C*, *Epedal*. No que diz respeito às ferramentas progressivas, estas são projetadas, maquinadas, analisadas e

testadas na empresa (*Buy-off*). No que diz respeito ao “ciclo de trabalho” da empresa, a ferramenta solicitada pelo cliente é projetada através do programa *VISI*, consoante as necessidades do próprio. O conjunto complexo de “peças” é maquinado e a montagem da ferramenta realizada. Por sua vez, a mesma sofre ensaios na prensa. Depois de analisado o produto final e concluir que está dentro das exigências do cliente, em primeira instância, é realizado um *Buy-off* junto com o mesmo na nossa empresa, onde é aprovado ou é corrigido algum defeito.

Numa fase inicial, o cliente envia o projeto da peça que pretende ser produzida. É feito um estudo primitivo da mesma. Os projetistas realizam um estudo antecipado de como será a ferramenta e analisam se existe aptidão para a construir. Agregado a esta etapa, é feito um orçamento que vai delinear o custo de produção da ferramenta. Após a aceitação do orçamento, dá-se início à fase do projeto, onde tudo é criado ao pormenor, tendo sempre em atenção as exigências do cliente. À medida que o projeto vai sendo validado para execução, começam a ser maquinados os componentes únicos e faz-se o pedido dos componentes normalizados. Terminada a construção da ferramenta, segue-se a fase de amostras, que tem como objetivo obter a aprovação do cliente. Para além do controlo de qualidade das amostras enviadas, ao longo de todo o processo da criação da ferramenta, existem algumas verificações dimensionais e de tolerância para que haja o mínimo de lacunas possível (montagem da ferramenta). Por outro lado, também existe partilha de informação entre cada secção até ao produto final, pois só assim é possível evitar erros maiores.

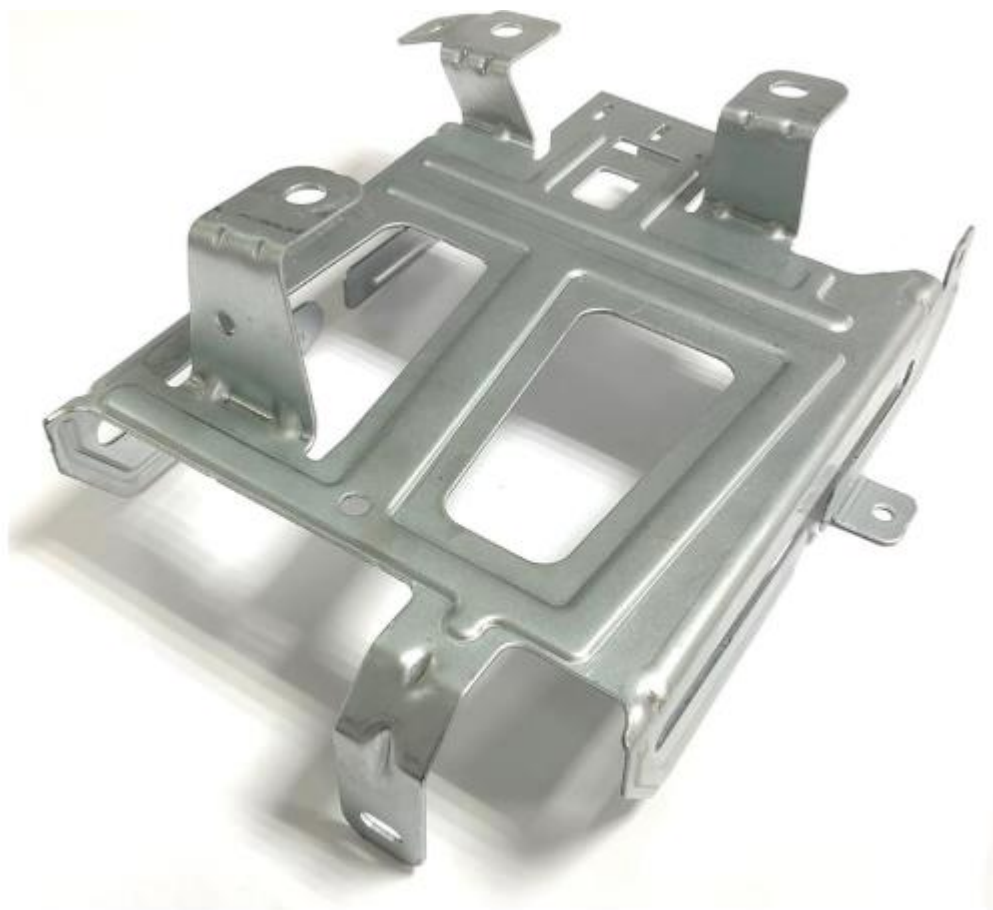


Figura 02 - Produto final com espessura 1,6 mm



Figura 03 - Produto final com espessura 1,5 mm



Figura 04 - Produto final com espessura variável

3.1 Equipamentos de produção da empresa

Neste capítulo, será feita uma abordagem aproximada aos componentes da fábrica em questão, tais como, máquinas, motores e outros equipamentos.

❖ Prensas mecânicas



Figura 05 - Prensa 800 T



Figura 06 - Prensa 400 T

❖ Centros de maquinação (CNC)

Centros de Maquinação de 3 eixos para peças com tamanho reduzido (figura 7) e um de 3 metros de comprimento, para a maquinação das bases e dos tetos das ferramentas.



Figura 07 - Um dos Centros de Maquinação QUASER MV214

❖ Metrologia (equipamento de medição CMM e outros de apoio)

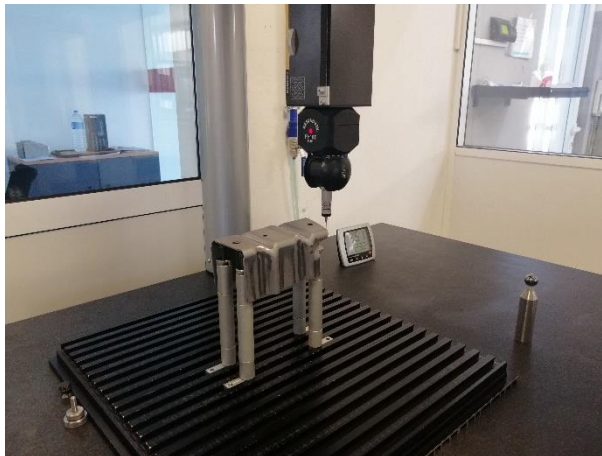


Figura 08 - Equipamento de medição CMM AXIOM

- ❖ Erosão de fio
- ❖ Operações de montagem conjunto de ferramenta
- ❖ Retificadoras e radial
- ❖ Torno convencional
- ❖ Fresadoras convencionais

4 FERRAMENTAS PROGRESSIVAS

As ferramentas progressivas são criadas para executar uma sequência de operações de conformação, através de uma alimentação contínua de uma chapa metálica, em dois ou mais passos, ou etapas em cada curso (batimento) de uma prensa. Em cada passo, é executada uma ou mais operações diferenciadas em função de uma evolução sequencial de transformação geométrica da peça final. Portanto, de um estado de chapa de matéria prima inicial resulta uma ou mais peças com requisitos funcionais previstos, segundo um caderno de encargos específico, que naturalmente influencia este mesmo processo.

Para o desenvolvimento de uma ferramenta progressiva, dadas as possíveis e inúmeras etapas envolvidas que se traduzem em diversos componentes integrantes, para uma melhor compreensão da mesma, torna-se estritamente necessário subdividi-la em grupos de elementos organizados. Cada um destes órgãos assume um objetivo particular para o qual foi projetado e, desta forma, torna-se obrigatório perceber a sua função e em que grupo o mesmo se enquadra.

4.1 Elementos e seus grupos

Grupos de elementos e componentes normalizados da ferramenta progressiva:

- ❖ Banda metálica;
- ❖ Parte inferior
 - Sub-base
 - Calços para altura funcional da ferramenta
 - Base
 - Cepos e casquilhos;
- ❖ Elementos ativos inferiores
 - Matrizes ou punções
 - Porta-matrizes ou porta-punções
 - Marcadores
 - Batentes;
- ❖ Parte móvel intermédia (Componentes-guia, Componentes-elevação)
 - Guia/Porta calcadores

- Elevações
- Réguas/guia
- Retentor/Limitador (parafusos com caixa)
- Almofadas
- Pisadores;
- ❖ Parte superior
 - Elementos ativos superiores
 - Matrizes ou punções
 - Porta-matrizes ou porta-punções
 - Placas de choque
 - Marcadores
 - Batentes
 - Colunas
 - Teto
 - Calços Superiores
 - Sobre-teto;
- ❖ Matrizes: de corte (normalizadas, pilotagem) e de estampagem de forma;
- ❖ Punções: fazem par com as matrizes e geralmente estão situados na parte superior da ferramenta; os punções e as matrizes devem ser altamente resistentes ao desgaste, ao impacto e à deformação; geralmente, sofrem tratamentos térmicos, como têmperas e revestimento específico, caracterizado pelo caso em particular;
- ❖ Casquilhos e colunas: estes elementos fazem par um do outro, trabalham em conjunto; surgem para assegurar o alinhamento entre punções e as matrizes, e garantem a folga adequada para que o processo decorra conforme é projetado;
- ❖ Cilindros e/ou Molas;
- ❖ Calibradores;
- ❖ Componentes de ligação: cavilhas, parafusos, elementos de transporte, centradores.

Embora haja variação de uma para outra, todas as ferramentas progressivas regem-se pelo mesmo princípio.

4.1.1 Prensas

Tipos de prensas

❖ Mecânico:

Sistema biela ou manivela clássico e sistema biela ou manivela variável. Este sistema é designado normalmente por excêntrico, que confere um movimento alternativo de subida e descida da corrediça. A energia disponível para o trabalho de conformação é cedida por um volante de inércia ligado a um motor elétrico. Durante o processo, o volante de inércia roda continuamente e o seu movimento é transmitido ao sistema biela-manivela, através do funcionamento de uma embraiagem.

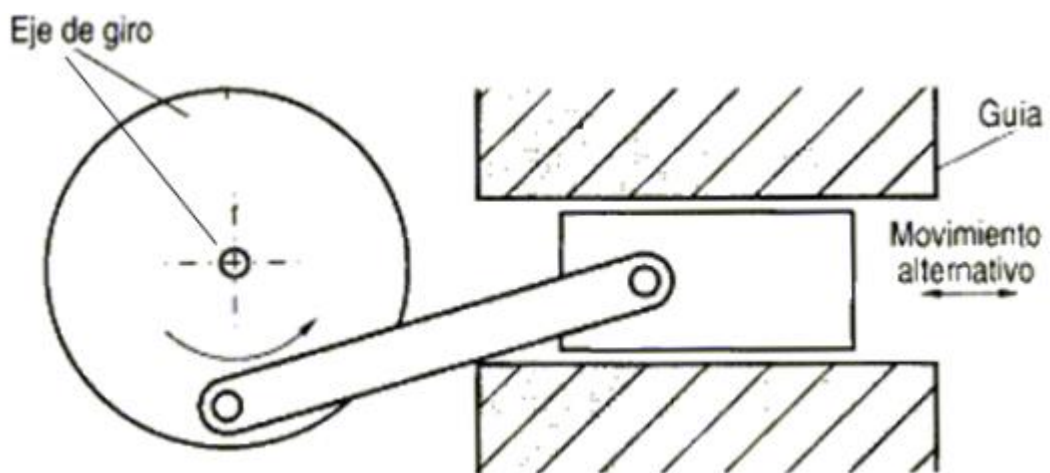


Figura 09 - Sistema biela-manivela

❖ Hidráulico:

Estas prensas têm um funcionamento mais simplificado, com um ou mais êmbolos hidráulicos, que fornecem a potência hidráulica necessária ao movimento de subida e descida da corrediça para a conformação de chapas metálicas. Nesta situação, o motor necessita de debitar efetivamente a potência total para o ciclo completo do processo, enquanto que nas prensas mecânicas, é a rotação do volante de inércia que gera a energia necessária ao processo. Desta forma, este tipo de prensas, apesar de operarem a velocidades menores, são usadas para trabalhos de estampagem profunda, devido ao maior controlo da sua velocidade.



Figura 10 - Prensa hidráulica Accurl

As prensas são elementos que têm como principal função transferir várias forças e movimentos para uma ferramenta, com o intuito de realizar trabalho sobre uma ou várias peças. Muito simplificada, este trabalho é executado sobre uma mesa, onde é instalada uma matriz e um elemento superior, no qual é colocado um punção acionado por um sistema mecânico ou hidráulico. Estas prensas criam uma forte pressão, utilizando energia potencial (mecânica) ou energia de um fluido (hidráulica), e transformam a mesma em energia mecânica transferida para o processo de estampagem.

4.2 Métodos de estampagem

As ferramentas do processo de estampagem dividem-se essencialmente em três métodos: estampagem peça a peça (1), ferramenta progressiva (2) e ferramenta *transfer* (3).

4.2.1 Estampagem peça a peça (1)

No método de estampagem peça a peça, o mais simplificado, só é possível realizar uma única operação em cada batimento da prensa. É fundamental uma ferramenta para cada operação. Quando a produção já se encontra em curso, é necessária uma movimentação das peças de uma ferramenta para a outra até à etapa final da peça.

4.2.2 Ferramenta progressiva (2)

O processo de ferramenta progressiva já se torna mais complexo. A chapa em questão irá entrar em banda com alimentação automática ou manual, dependendo da quantidade de peças a ser retiradas. A mesma poderá ser sujeita a várias operações de corte, estampagem, cravamento, dobragem, até chegar a uma peça final. Por cada batimento da prensa, sai uma peça e o material/banda, desloca-se para a posição seguinte, usualmente da esquerda para a direita. Nas primeiras etapas do processo, geralmente são efetuados furos que servem como guias da banda, para que não ocorram erros de tolerância nos passos seguintes. Uma ferramenta progressiva pode ter de duas a trinta etapas para produzir uma peça completa. Existe um custo inicial considerado, tanto na projeção da ferramenta, como na conceção e afinação, mas o custo de mão de obra e de trabalho posterior é reduzido. A nível de produção, dependendo do equipamento em questão e da complexidade do processo, pode variar sensivelmente entre 600 a 2000 peças por hora, 12 a 100 por minuto, dependendo da complexidade. Em processos de fabrico para a indústria automóvel, é comum usar um intervalo de 12 a 24 (peça /par de peça).

Algumas vantagens deste processo:

- ❖ eficácia e fabricação de custo reduzido;
- ❖ produção de alta velocidade - considerando o número de peças que são feitas por hora, obtem-se mais quantidade de peças num período mais curto relativamente à fabricação tradicional;

- ❖ tolerâncias muito apertadas;
- ❖ produção de mais que uma peça por batimento da prensa;
- ❖ sucata reduzida - a maioria do material/banda metálica é aproveitada no processo - a sucata é o mínimo possível (exceto quando há muitas etapas de corte, é inevitável não existir material sem valor);
- ❖ execução duradoura - o facto de a alimentação de material ser contínua, o processo pode ocorrer durante muito tempo sem interrupções (produção contínua), produzindo, dessa forma, um alto volume de peças.

Com estes fatores, o custo final de uma peça é bastante reduzido e é possível obter peças complexas de uma forma rápida e económica.

4.2.3 Ferramentas *transfer* (3)

As ferramentas *transfer* surgiram com a necessidade de produzir peças com geometrias cada vez mais complexas.

Este tipo de ferramenta é bastante semelhante à ferramenta progressiva, mas a movimentação da matéria prima em estado planificado é realizada por sistemas *transfer* automáticos ou por robots, equipados com garras mecânicas ou pneumáticas. O grau de liberdade, a nível de rotação, é maior em comparação com a ferramenta progressiva. É possível obter uma peça mais complexa do que com o método acima referido, dado que as regulações podem ser realizadas em cada posto, independentemente do posto seguinte.

4.2.4 Sistema híbrido (*progressive* + *transfer*)

Um sistema híbrido é todo o contexto de transformação progressiva de chapa metálica, o qual precisa de ser complementado com transferência posicional fora do plano de alimentação de banda (movimento de acionamento paralelo). Tal deve-se à geometria mais complexa a estampar, numa determinada operação, que vai obrigar à rotação da peça para o fazer.

Neste contexto, aplicam-se robots sincronizados exteriores, com a função específica de grampear a peça e movê-la, transladando-a e rotacionando-a para a operação seguinte.

Fá-lo, por isso, entre operações *transfer* com a peça solta, ao contrário do processo estritamente progressivo, que se caracteriza com uma ligação consecutiva

e permanente da banda de chapa, até à separação final da qual resulta(m) a(s) peça(s).

Análise dinâmica da ferramenta progressiva

Numa fase posterior ao projeto, dá-se início à fabricação da ferramenta, encomendando-se, para tal, o material necessário e, conseqüentemente, principiar a maquinação da mesma. Consecutivamente, após a sua montagem, é feito um ensaio com uma parte parcial da ferramenta. Nesta situação, não é necessária a sub-base, nem o sobre-teto. Ao fim deste ensaio, verificam-se as tolerâncias da peça final e se está de acordo com os parâmetros pretendidos pelo cliente. É nesta fase que é possível verificar eventuais falhas existenciais do projeto.

5 CASO DE ESTUDO SELECIONADO

De todas as ferramentas em produção, escolhemos uma, em particular, que teve algumas alterações até ser finalizada. Estamos perante a seguinte ferramenta (obra interna 1962):

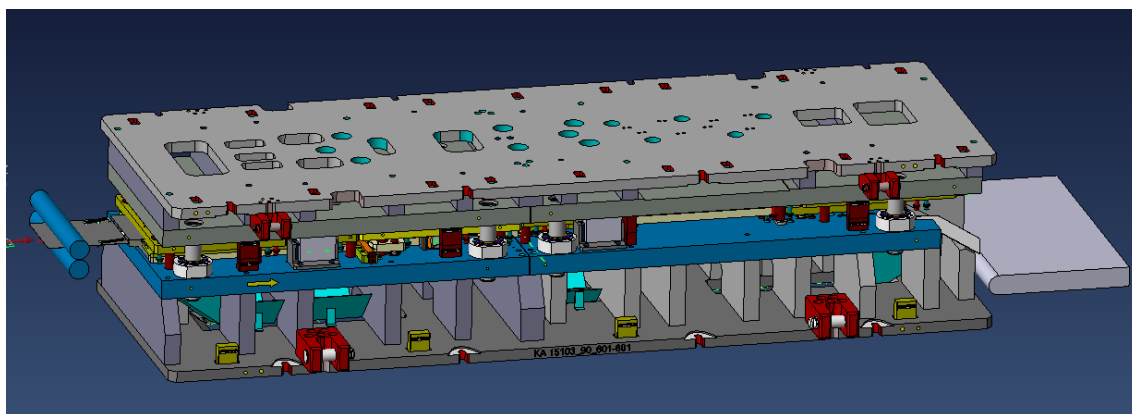


Figura 11 - Ferramenta completa OB_1962

Ferramenta progressiva que está em fase final de desenvolvimento, que objetiva a conformação da peça representada na figura 12.

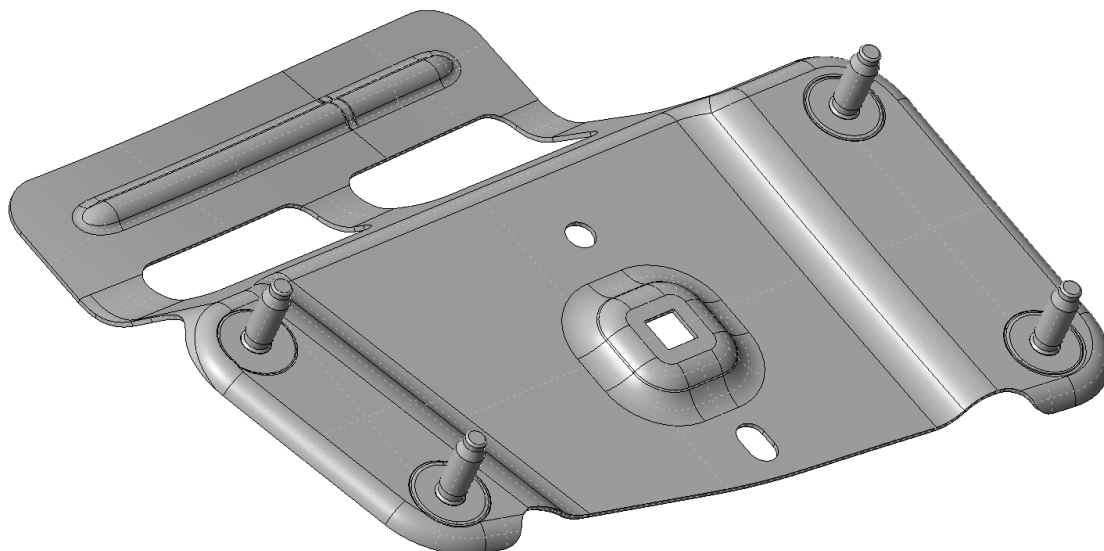


Figura 12 - Representação parcial do desenho técnico e modelo 3D da peça OB_1962

O cliente da ferramenta é a *Kirchhoff Automotive Portugal*, para fornecimento das peças estampadas para o *OEM Grupo VW*.

A seleção deste caso recaiu num enquadramento técnico, que se avaliou como oportuno, especificamente, um leque de variáveis que eleva a complexidade do conjunto, a mencionar:

- ❖ método progressivo que prevê a obtenção de par simétrico de peça;
- ❖ material de espessura baixa (1 mm);
- ❖ requisitos elevados de tolerânciamento dimensional (enfoque na planicidade, em três superfícies *matting* com intervalo de tolerância de 0,4 mm, identificadas a tracejado no desenho técnico); estas superfícies são pretendidas na receção de outros componentes de montagem, para o seu posicionamento e fixação;
- ❖ complementaridade técnica desta fixação, através da cravação de oito parafusos com requisitos normativos de resistência ao binário, e compressão axial; esta funcionalidade implica a colocação de um sistema independente de cravação automática.

Estes aspetos, acima referenciados, originam um conjunto ferramental de 4 metros, de aproximadamente 16 toneladas, distribuído por operações progressivas, que estão representadas na banda em estudo da figura 13. No decorrer do processo de primeira validação (produção dos primeiros protótipos de peça em ferramenta nota 0), constatou-se dificuldades acrescidas no compromisso dimensional das superfícies mais exigentes. Aqui, recaiu o estudo em causa, levando a uma serie de modelação e maquinação de formas, em especial nas operações OP 9 e OP 11. O objetivo concentrou-se na compensação geométrica necessária para a resolução do problema. Foi tido em conta o efeito de *Springback* do material em conjunto com os parâmetros de maquinação.



Figura 13 - Banda completa OB_1962

Do início da ferramenta até ao final, ou seja, do primeiro batimento até ao último, obtem-se a parte inicial do corte, a estampagem, o sistema de cravação e a separação das peças.

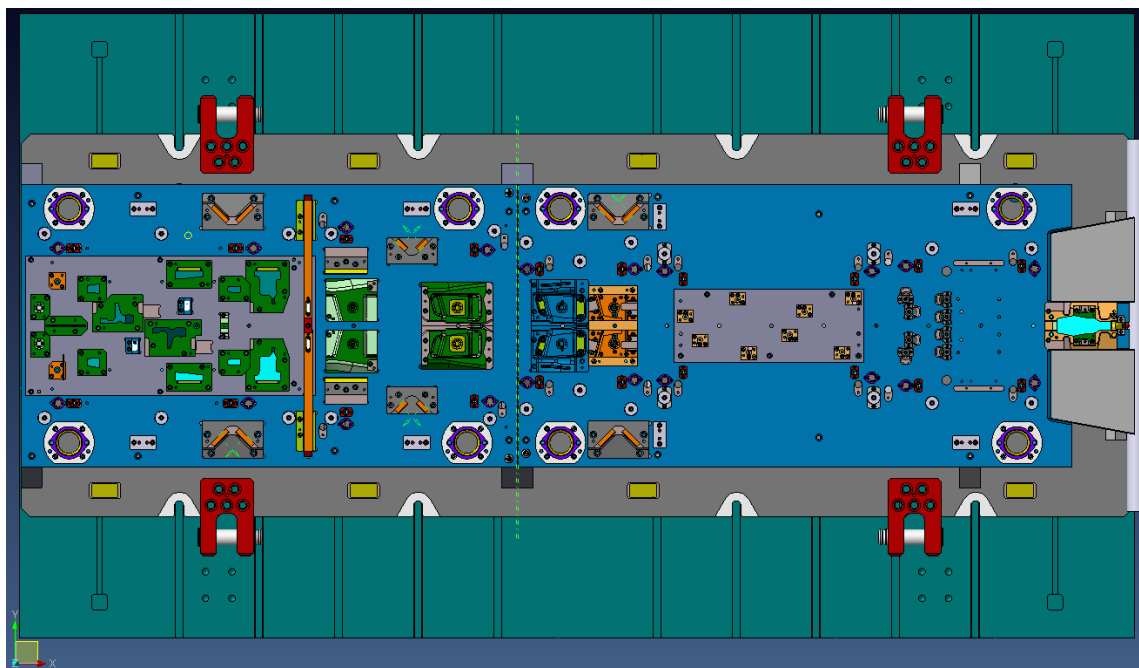


Figura 14 - Parte inferior

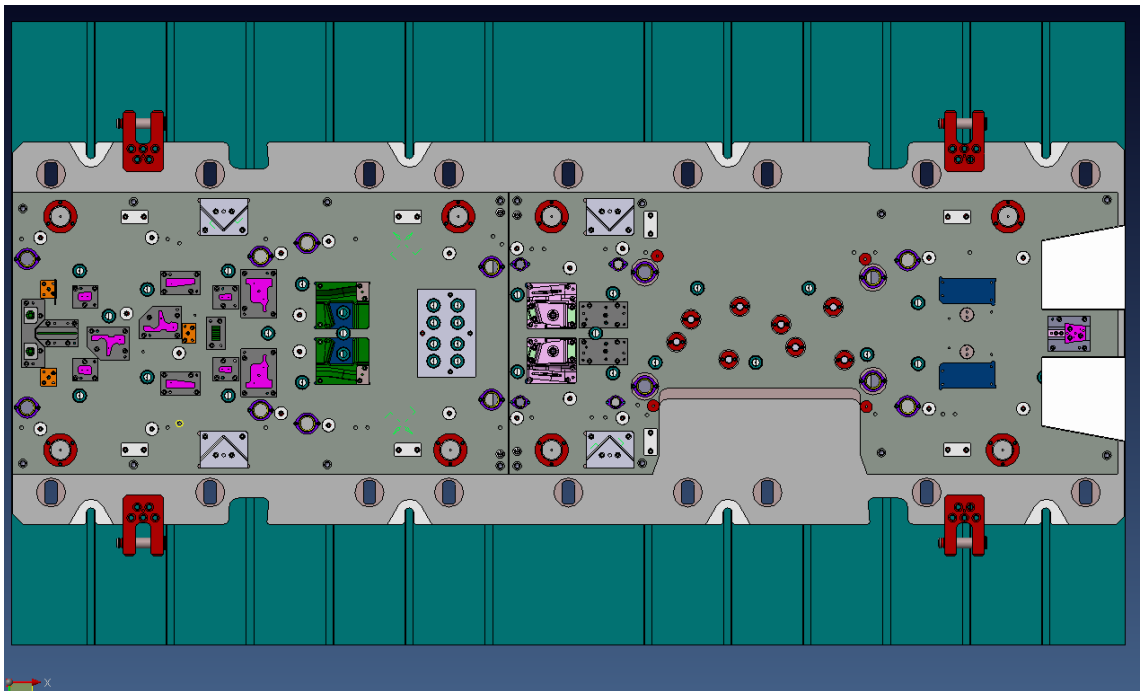


Figura 15 - Parte superior

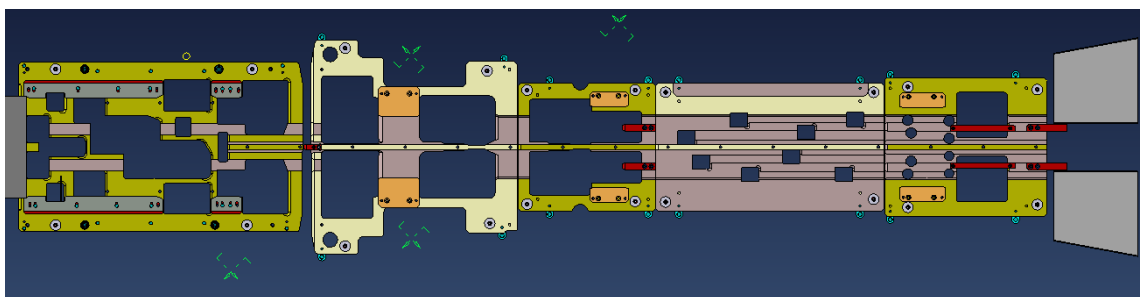


Figura 16 - Elevação

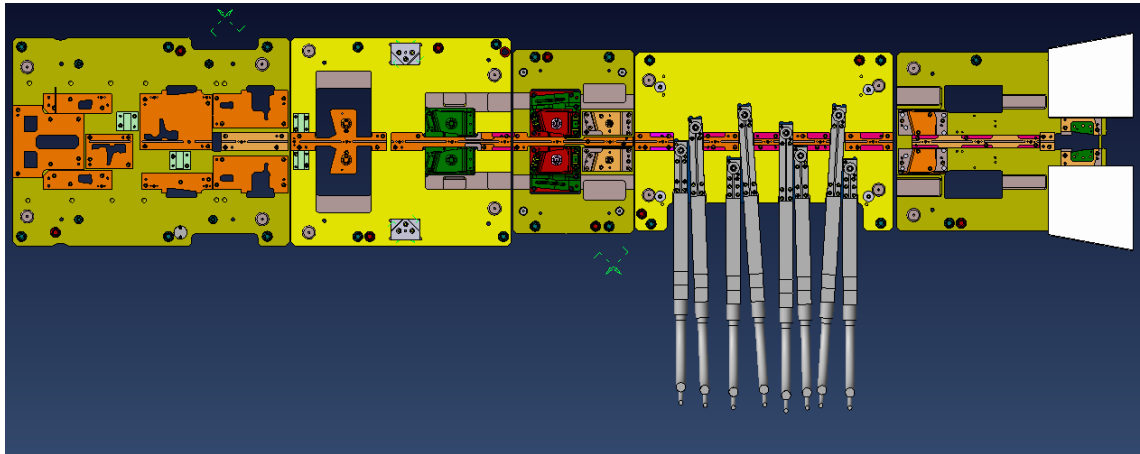


Figura 17 - Guia com sistema de cravação

5.1 Posto de operação e elementos selecionados

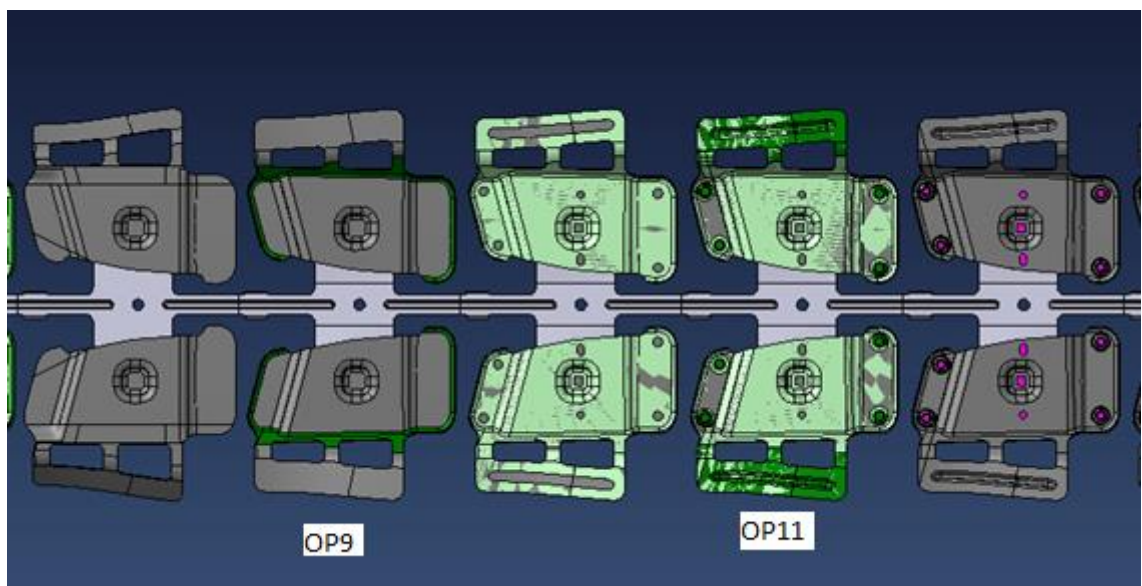


Figura 18 - Parte parcial da banda da OP 8 até OP 12

A OP 9 e OP 11 destinam-se, respetivamente, às operações de conformação principal de superfícies no plano identificadas como *matting* e, por isso, de maior exigência dimensional e funcional da peça, e de calibração das mesmas. Para esta finalidade, fazem parte o punção e a matriz respetiva, como elementos ativos na transformação da banda nestes postos de trabalho. Obviamente fazem parte outros elementos da ferramenta, tais como, pisador, sistema de elevação, pilotagem, entre outros, mas que aqui não interferem diretamente com a atenção do problema

requerida. O par punção e matriz para ambas as operações, estão em contacto com a banda a transformar sendo, por isso, a sua influência decisiva na forma geométrica a gerar. Os punções e as matrizes de cada operação estão representados na figura 19 e figura 20:

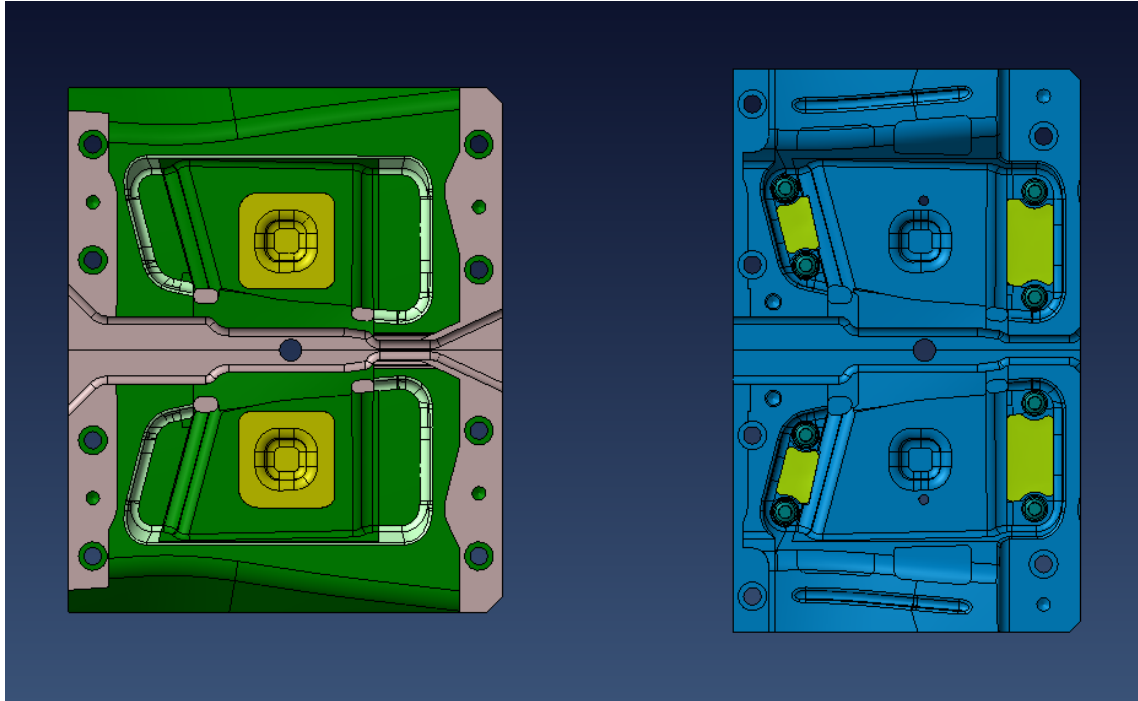


Figura 19 - Matrizes de estampar da OP 9 e OP 11

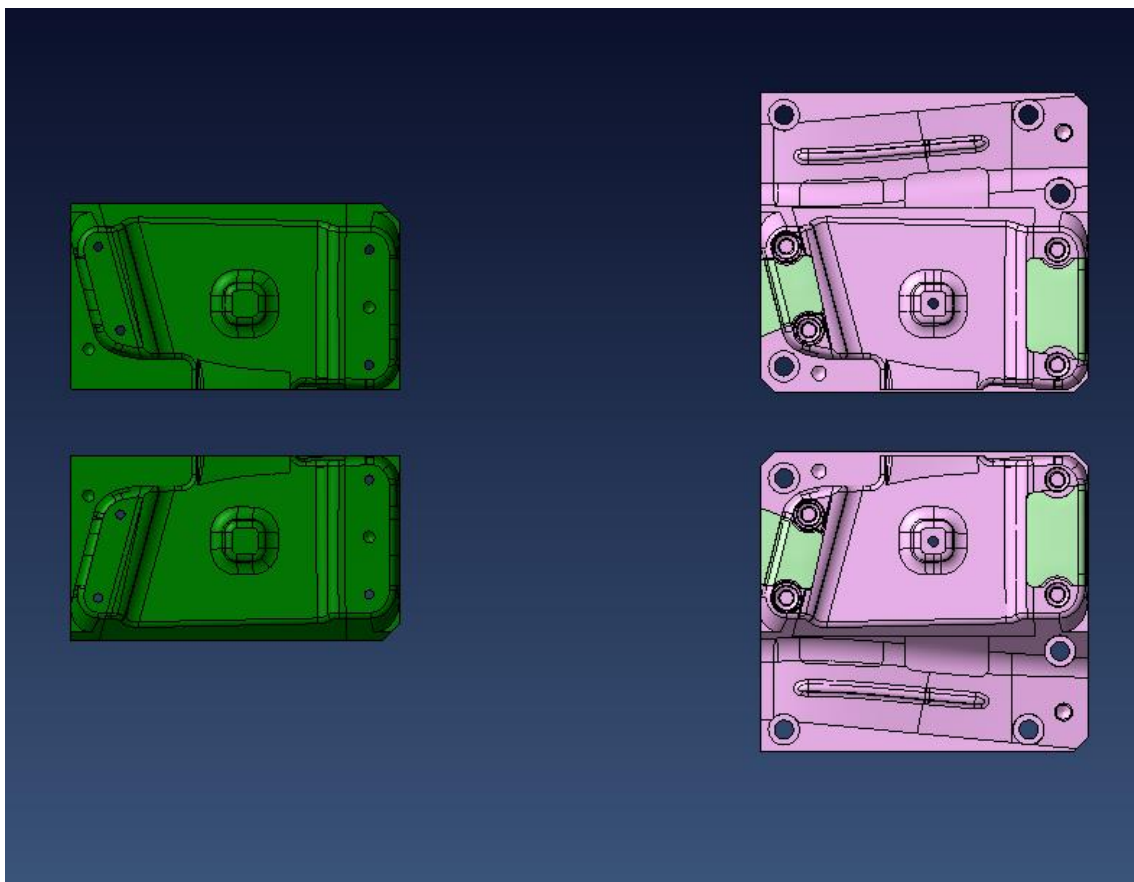


Figura 20 - Punções de estampar da OP 9 e OP 11

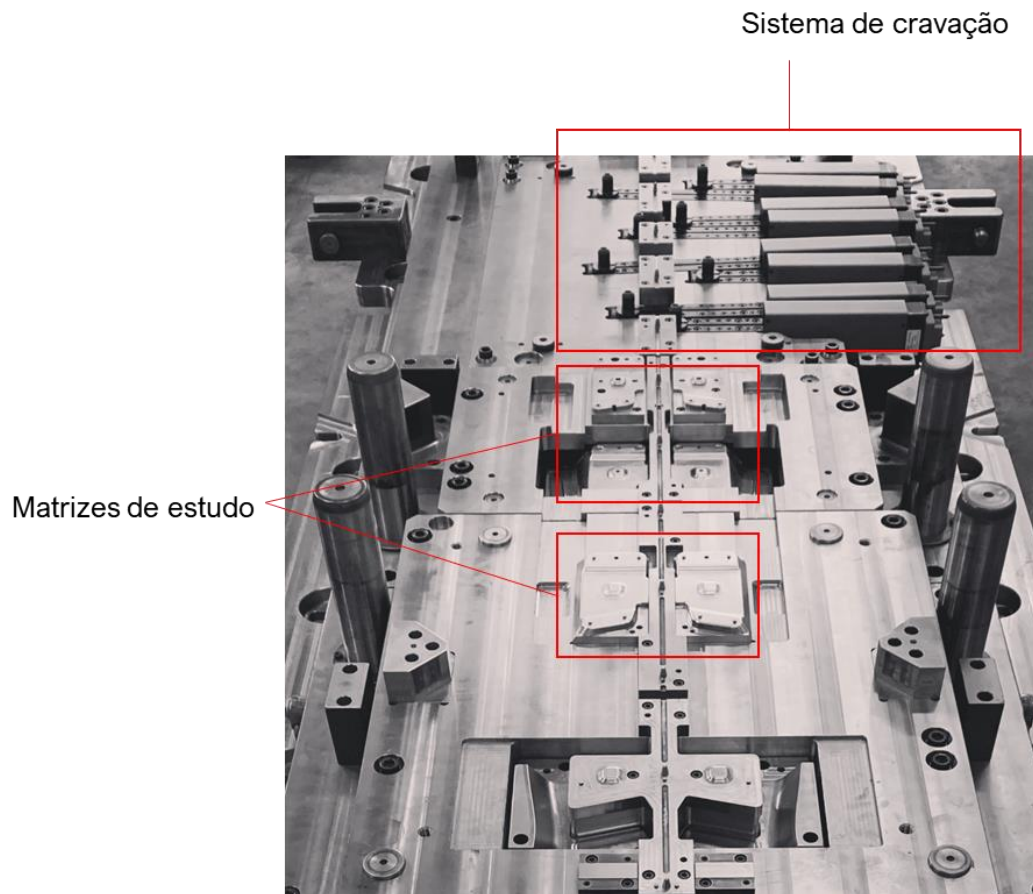


Figura 21 - Punções e matrizes em estudo da OP 9 e OP 11

5.1.1 Programação da matriz de estampar 081 em *MasterCam*

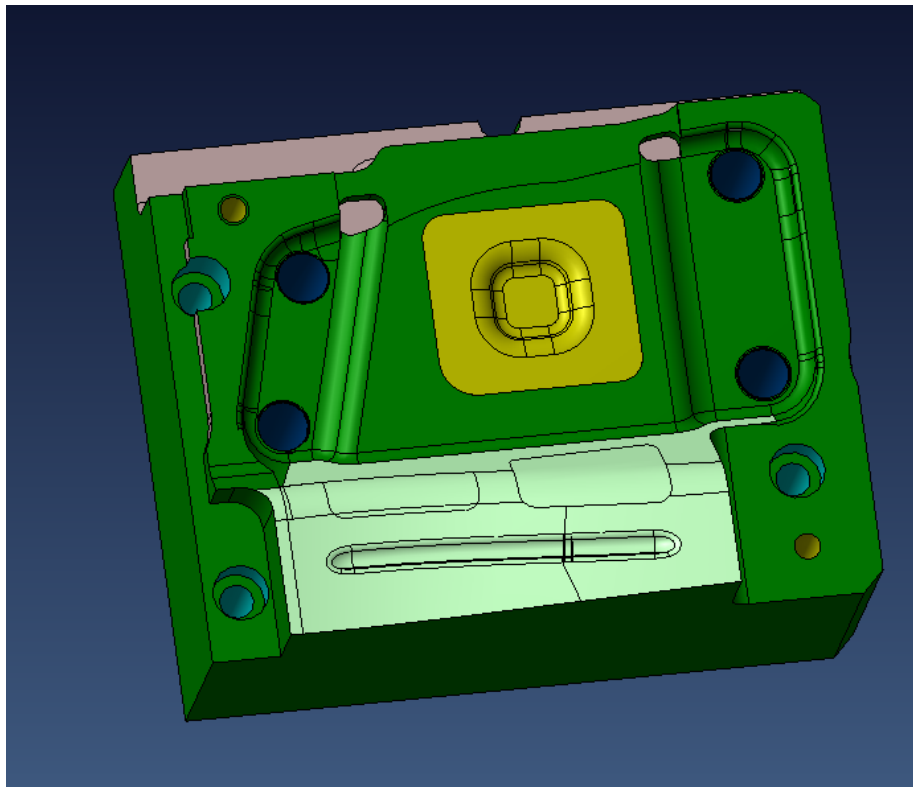


Figura 22 - Matriz de estampar 081

No que diz respeito à programação, a peça divide-se em duas fases: programação da pré maquinação e programação da maquinação. É deixado ao programador um desenho técnico 2D em conjunto com o aço em questão, como se pode verificar na figura 23.

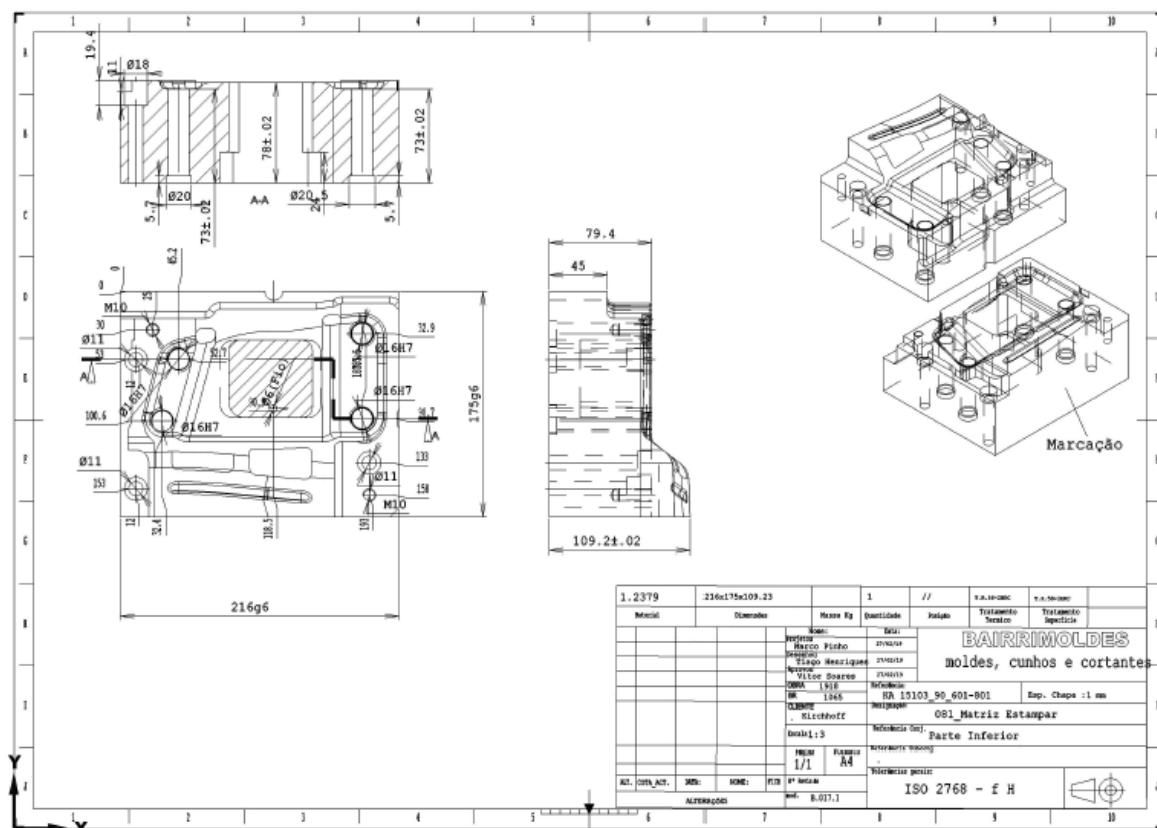


Figura 23 - Desenho técnico 2D da matriz 081

É feita uma análise às cotações importantes, tolerâncias, folgas e à altura total da peça. Na maquinação inicial é deixado material a mais na peça. Esta tem de ser maquinada dos dois lados, devido à sua altura. No primeiro lado, é feito um *facing*, estruturação e furação, como está simulado na figura 24.

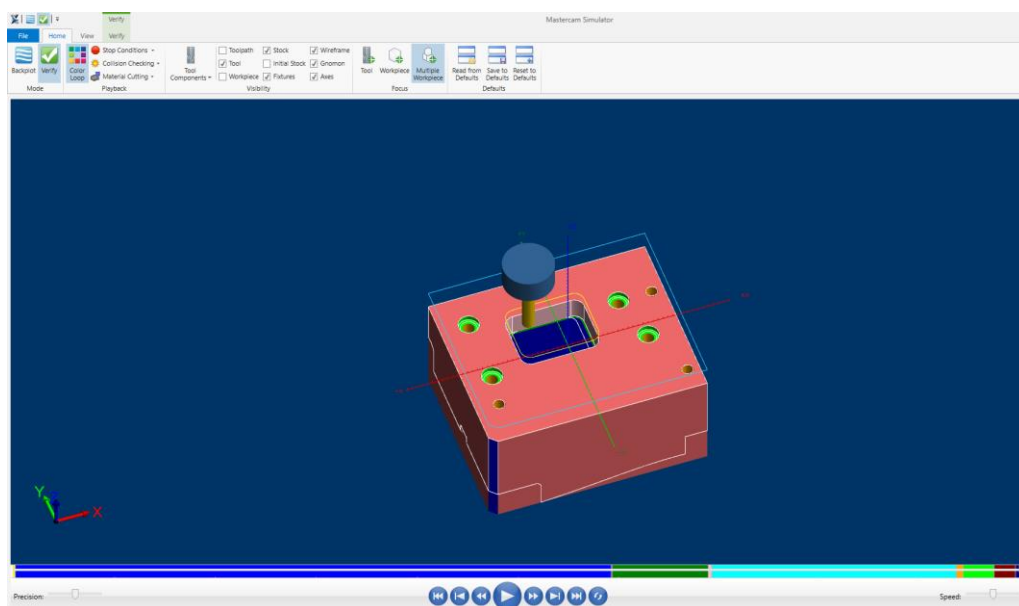


Figura 24 - Simulação 1ºlado

Como a peça tem de ir à erosão de fio, as cavilhas 16H7 não se podem fazer, para que o rigor dimensional seja o maior possível, evitando, assim, erros de centramento neste processo. Os programas usados neste primeiro lado (programas simples) estão representados na figura 25: facejamento da parte superior com uma roca, contorno em rampa com ferro a estruturar o aço, furações respetivas, desbaste de caixas com fresas, chanfrador e acabamento de caixa de parafusos com ferro de pastilhas direitas.

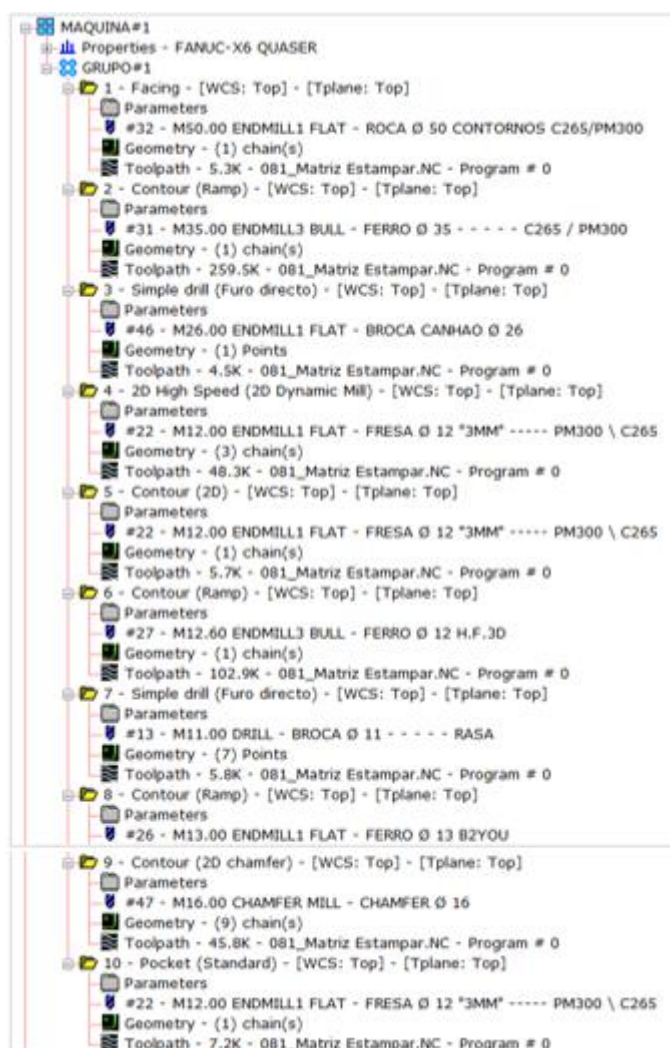


Figura 25 - Programação 1º lado

No segundo lado, é feita uma maquinação próxima da geometria da peça final, mas sobredimensionada, como se pode verificar na simulação da figura 26. No que diz respeito à caixa de parafusos de fixação, furação para roscas métricas e zonas de alívio, estas já ficam acabadas, pois não necessitam de grande tolerância.

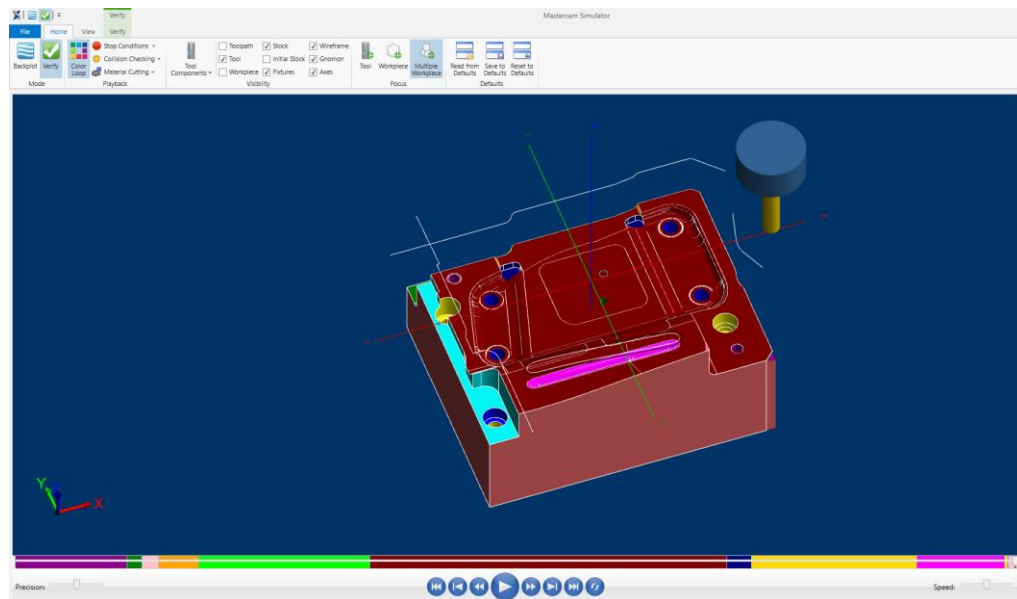


Figura 26 - Simulação 2ºlado

Neste lado, a programação já é mais complexa como se pode verificar na figura 27.

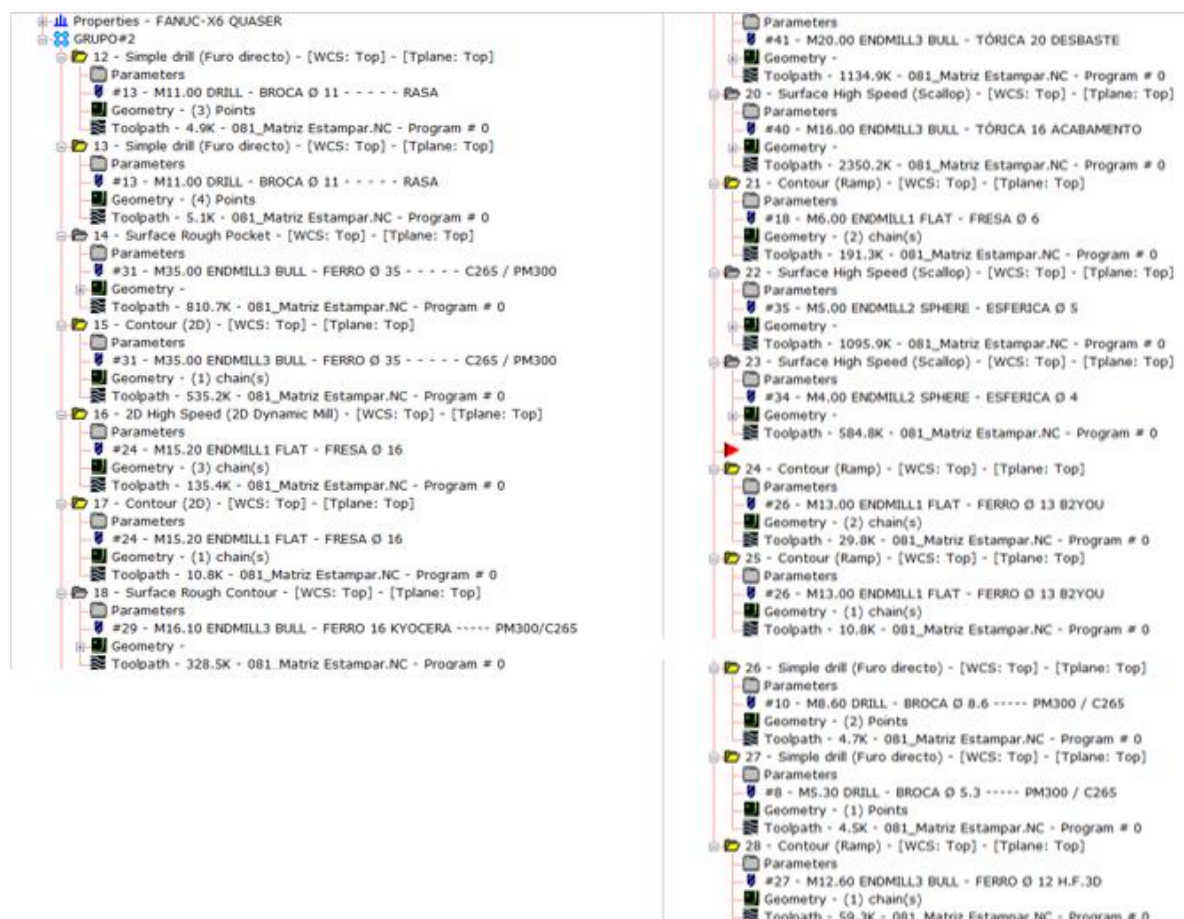


Figura 27 - Programação 2ºlado

Inicialmente, é feita uma pré furação, de seguida um *Surface Rough Pocket* com um ferro 35 a deixar 0,5 mm de material, e depois é feita diminuição de raios com ferros de menor diâmetro, consecutivamente ferros tóricos e, no final, fresas esféricas para deixar um bom acabamento e, ao mesmo tempo, deixar material em excesso, sempre à volta de 0,25 mm em toda a superfície de rigor dimensional.

Por fim, e não menos importante, é feita uma remaquinação depois da peça levar um tratamento térmico. Nesta fase, o aço é maquinado novamente, exclusivamente as partes com rigor dimensional muito apertado, e onde se deixou material a mais. São usados dois programas de acabamento, de forma a garantir que a rugosidade da superfície seja o mais ínfima possível, pois estamos na presença de uma peça fulcral do processo de estampagem: um pré acabamento com um ferro tórico a deixar 0,05 mm e, de seguida, dois acabamentos com fresas esféricas a deixar 0,0 mm de material.

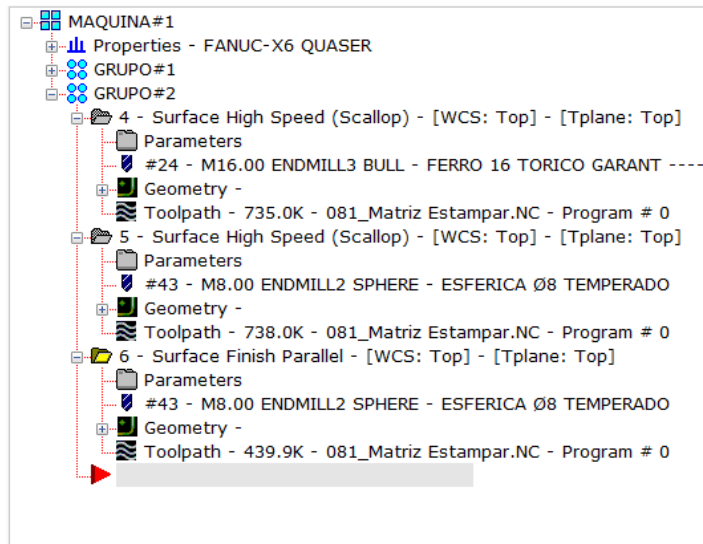


Figura 28 - Programação da remanufatura

5.2 Maquinação dos componentes selecionados

O aço passa por três processos: maquinação (num posto de maquinação, *QUASER MV214*), tratamento térmico e remanufatura.

Numa primeira instância, o aço chega em bloco e é sujeito a uma pré-maquinação, de forma a deixar mais 0,25 mm do que a dimensão final em toda a peça, devido ao facto de a peça sofrer dilatações térmicas e ligeiros empenos com o tratamento térmico a que vai estar sujeita, para obter uma dureza de 62 HRC e retornar à máquina para ser realizada a maquinação final.

Etapas do centro de maquinação/programação:

I. Pré-análise do componente em função do seu papel na ferramenta:

Inicialmente, estes componentes, depois de projetados, são enviados, sob a forma de desenho técnico e “ficheiro 3D”, para o centro de programação. É feita, pelo responsável da secção, uma análise minuciosa da função de cada conjunto na ferramenta, no que diz respeito, sobretudo, a cotas importantes da peça e tolerâncias dimensionais.

II. Programação em MasterCam:

Consequentemente, é cedido a um operador, o aço em “bruto” reunido com o desenho técnico 2 D, como exemplifica a figura 29, com a identificação da obra e a sua posição.



Figura 29 - Aço ainda por maquinar

De seguida, faz-se a programação da peça em questão usando o *software CAD/CAM, MasterCam*: programação da pré maquinação e da maquinação final.

III. Pré maquinação do aço em bruto

É feita uma maquinação por toda a peça, deixando 0,25 mm por excesso de material em relação à sua forma final pretendida, exceto onde existe uma tolerância menos apertada (caixas para parafusos de fixação, zonas de alívios, onde a cota final tem um intervalo de tolerância elevada, entre outros);

IV. Retificação de faces

Nesta fase, é realizada uma retificação plana das faces horizontais da peça, deixando também 0,25 mm em excesso, como demonstra a figura 30.



Figura 30 - Retificação plana

V. Processo de tratamento térmico

Este estágio é a justificação por todo o excesso de material deixado na peça neste momento. É realizado um processo térmico (têmpera), oferecendo à peça uma dureza de 62 HRC, como anteriormente mencionado. O componente em questão, neste processo, fica sujeito a um aquecimento, com o objetivo de reorganizar os cristais do metal (austenitização) e, futuramente, aumentar a sua dureza. De seguida, é realizado um arrefecimento rápido, em óleo ou em água.

VI. Retificação final

Depois de temperada, a peça fica deformada e, para poder ser maquinada novamente, terá que ser sujeita a uma nova retificação dos planos direitos/paralelos da mesma. Aqui, já são cumpridas as tolerâncias geométricas finais.

VII. Maquinação final das partes cruciais da peça, no que diz respeito ao seu toleranciamento

Finalmente, o componente vai ser maquinado a "zero", isto é, todas as superfícies são levadas teoricamente à cota "0", não deixando nenhum material para além da dimensão final pretendida. Neste momento, o aço em questão, devido ao processo térmico, está extremamente duro. Para um acabamento perfeito, terão que ser realizados vários estágios de acabamento. Geralmente, usa-se um ferro tórico a deixar 0,05 mm da cota final, fresas para a diminuição de raios a deixar 0,02 mm e, posteriormente, é feito o acabamento com fresas esféricas específicas para aços com alta dureza a deixar 0,0 mm de material. O objetivo principal de todo este processo é

que o componente fique com a dureza pretendida e que a diferença dimensional entre a geometria simulada e a geometria gerada seja o menor possível.

Neste caso particular, como num primeiro estágio não se obteve o resultado esperado, houve a necessidade de recorrer à criação de postigos, para alterar a ferramenta naqueles postos de trabalho. Estes postigos são usados para alterar a peça naquele ponto específico e não comprometer a geometria total da mesma. Com estes afinadores, que estão presentes na figura 31, é possível maquinar o postigo e, se por alguma eventualidade o batimento não estiver correto, voltar a remaquinar e acrescentar um “calço/lamela de afinação” para compensar a altura que foi retirada. Estes são muito importantes para compensar o *Springback*, quando necessário. É um ponto de melhoria numa ferramenta e pouco dispendioso a nível económico.

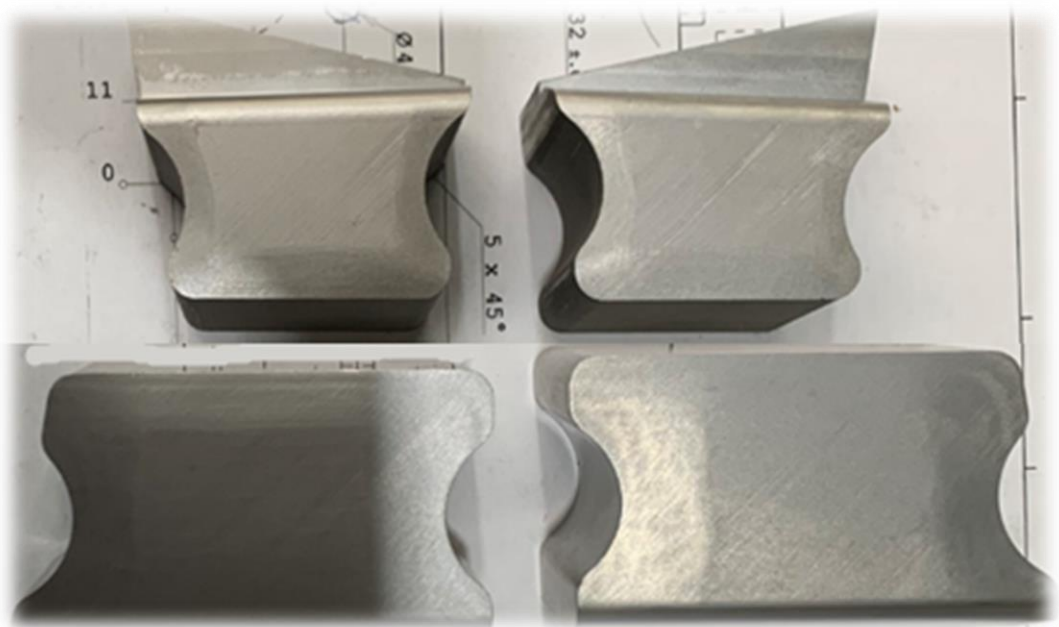


Figura 31 - Elementos postigos



Figura 32 - Matriz de estampar com elementos postigos implementados



Figura 33 - Punções de estampar com elementos postigos implementados

5.3 Análise metrológica – sistema de pontos de referência

A medição e a avaliação do estado metrológico de protótipos são realizadas pelo departamento de qualidade da empresa. Esta análise obedece a um conjunto de requisitos, que passam desde uma metodologia de medição, até à validação de um conjunto de variáveis de toleranciamento dimensional. O desenho técnico, associado à peça entre outra informação crítica, é fornecido pelo cliente e rege, em grande parte, todo o contexto, para verificação do desempenho da peça. O *RPS*, Sistema de Pontos de Referência (do inglês, *Reference Points System*), é um sistema que, tal como o nome indica, torna universal as condições para posicionamento e alinhamento para uma determinada medição. Nele estão associados os parâmetros e tolerâncias dimensionais mais importantes, a ter em conta na avaliação metrológica.

5.3.1 Sistema de pontos de referência, RPS

Em particular, o conceito *RPS*, descrito na norma VW 010 55, tem por isso como objetivo garantir que as referências dimensionais sejam semelhantes em todas as etapas do processo de desenvolvimento do produto e a sua montagem, através da limitação dos seis graus de liberdade do movimento de um corpo no espaço. Antecipadamente, estes pontos, *RPS*, são definidos por equipas de Engenharia Simultânea (*SET – Simultaneous Engineering Team*), constituídas por representantes das áreas envolvidas com a qualidade do produto.

Uma das ideias básicas de forma do sistema de pontos de referência é o sistema de coordenadas orientado de acordo com a norma VW 010 52.

Um veículo, aqui como exemplo para referenciação espacial, é dimensionado por meio de um sistema de coordenadas globais (sistema de coordenadas matemáticas do veículo), em que a origem é definida no centro, ao nível do eixo dianteiro, como se pode verificar na figura 34.

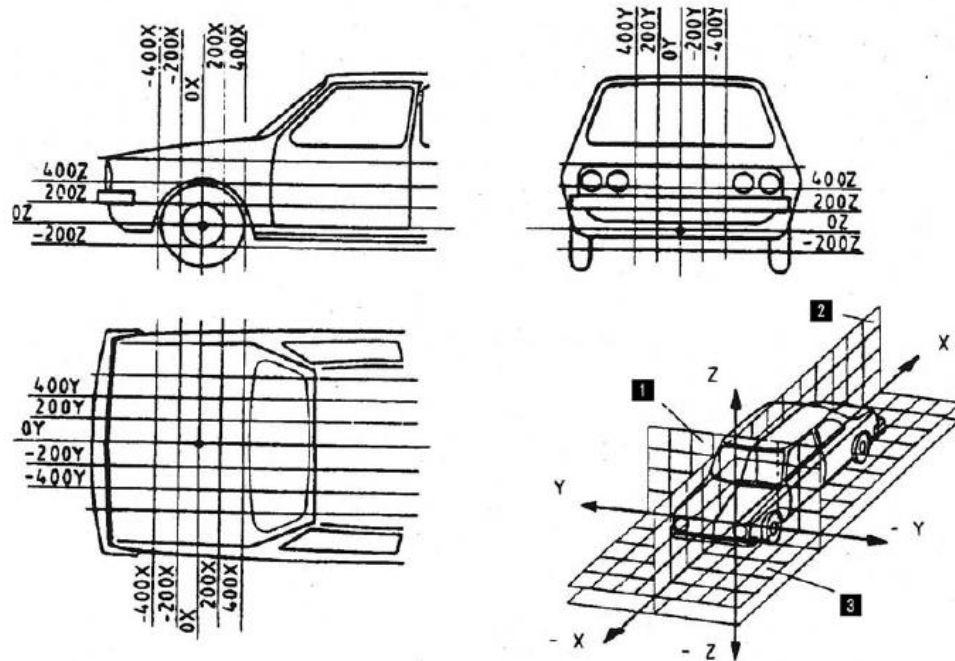


Figura 34 - Sistema de coordenadas global de um veículo

A partir dos eixos desse sistema de coordenadas, as linhas em grelha são espalhadas paralelamente aos eixos. Estas têm 100 mm de distância e penetram teoricamente no veículo. Por outras palavras, os eixos ajudam a determinar cada posição de cada componente no veículo.

A origem do sistema de referência do componente é definida pela interseção de três planos de referência. Os planos de referência são formados por assemblagem de pontos *RPS* no componente. Quando várias partes são assembladas, são toleranciadas umas em relação às outras. Posterior à união das peças, o ASSY (procedimento para montagens) é descrito por um sistema de referência combinado com componentes orientados.

A regra 3-2-1

Todo o corpo rígido possui seis graus de liberdade no espaço tridimensional: três graus translacionais paralelos aos eixos de um sistema de referência e três graus de rotação ao redor dos eixos, como se pode constatar na figura 35.

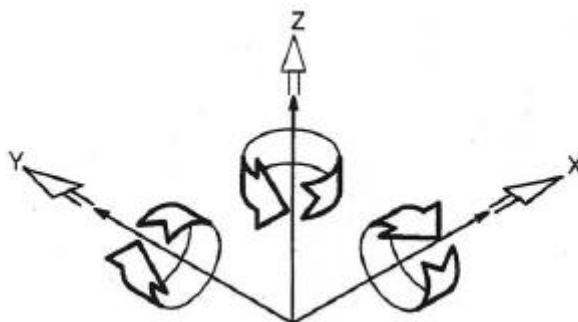


Figura 35 - Graus de liberdade no espaço tridimensional

Para apoiar um corpo não rotacionalmente simétrico, de uma maneira exclusivamente determinada, este deve ser fixado em todas as seis direções possíveis de movimento. A regra 3-2-1 prevê essa fixação única, o que determina a seguinte distribuição de montagem principal:

- ❖ 3 montagens na direção z ;
- ❖ 2 montagens na direção y ;
- ❖ 1 montagem na direção x .

A implementação desta regra é mostrada com base na seguinte representação da figura 36.

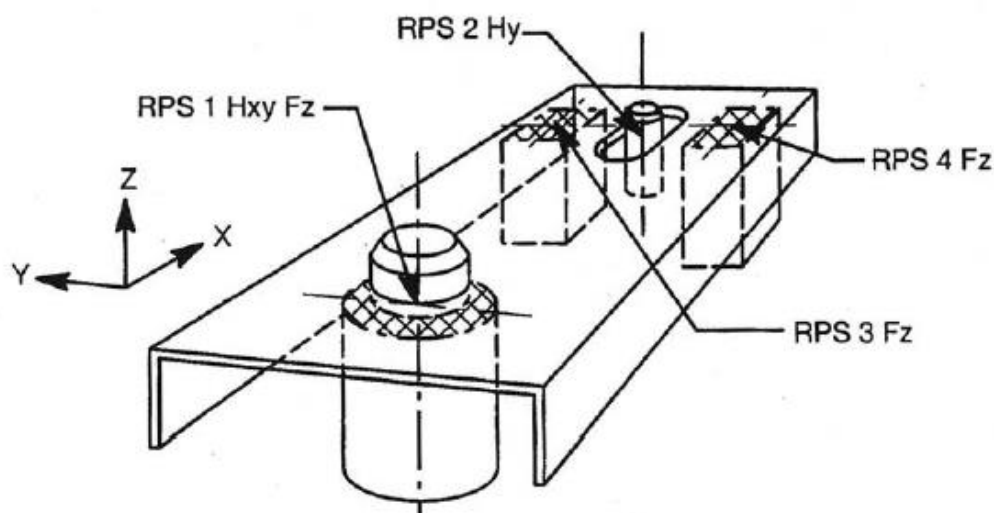


Figura 36 - Aplicação da regra 3-2-1.

As três montagens na direção z restringem três graus de liberdade: translação na direção z e rotação em torno dos eixos z e y . O pino no furo redondo evita o movimento paralelo aos eixos nas direções x e y e, finalmente, o pino no furo longo impede a rotação em torno do eixo z . Esta regra aplica-se, da mesma forma, a outro

componente rígido, mesmo que a sua estrutura seja mais complexa. O RPS 1 deve ser o ponto que tem o maior grau de liberdade. Estes pontos em questão são obtidos por um equipamento específico, CMM, maquinação de medição por coordenadas, (do inglês, *Coordinate Measuring Machine*). Esta máquina tem a capacidade de medir as características físicas geométricas de um objeto. As medições são definidas por uma sonda fixa ao eixo z deste equipamento (braço), como se verifica na figura 37.

A mesma é composta por três eixos x,y, e z, possuindo cada um, um sistema de escala que indica a posição correta.



Figura 37 - Equipamento de medição CMM AXIOM

5.4 Sistema de cravação

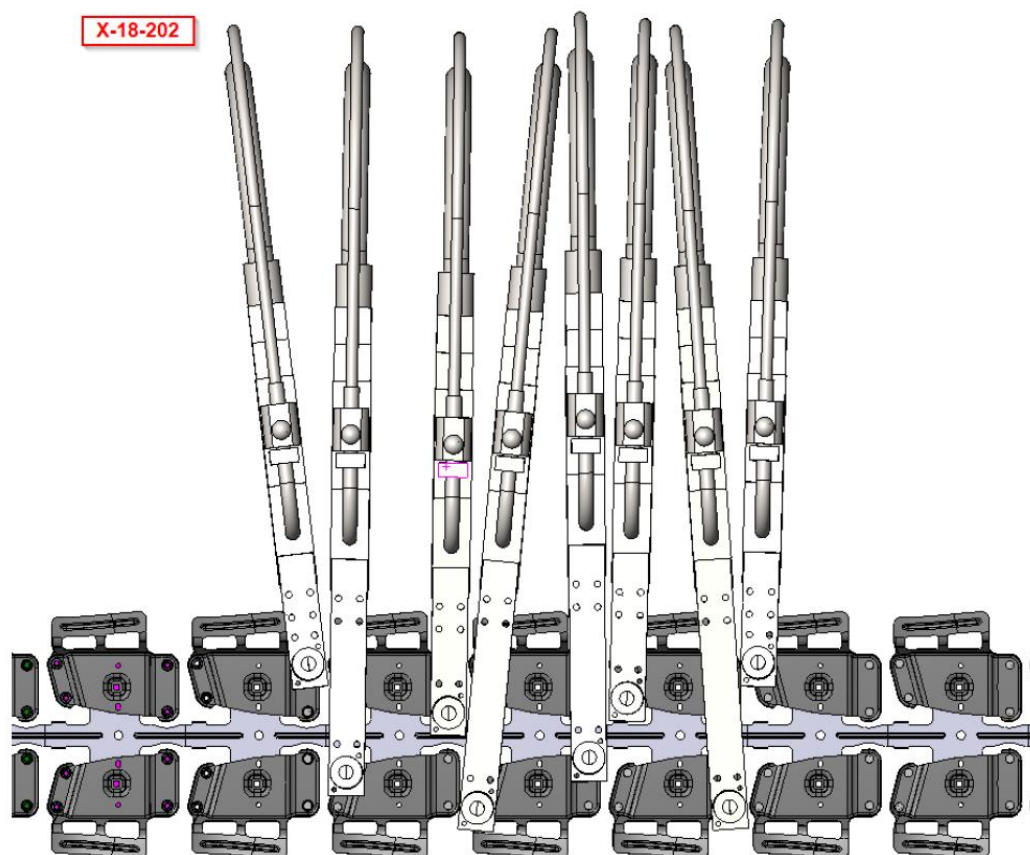


Figura 38 - Sistema de cravação aplicado na ferramenta

Um conjunto de sistema de cravação, como representado na figura 38, é comumente denominado no setor *tooling* ou em ambiente de conformação de chapa metálica, todo o conjunto integrado de componentes, que formam um equipamento que se objetiva a aplicar um ou vários elementos de fixação numa peça ou banda progressiva. Pretende-se que seja capaz de colocar parafuso, porca ou outro numa determinada superfície controlada em produção em série. O sistema caracteriza-se por ser independente aos elementos da ferramenta, está *in-tool* e pode ser semiautomático ou automático, dependendo se utiliza a força e movimento da prensa para complementar a reação de força necessária, de forma a cumprir a performance de fixação normativa aplicada, ou ser totalmente provida por ação exterior, respetivamente. O acionamento dos elementos a cravar é sempre efetuado pelo próprio sistema independente. Utiliza, para isso, admissão pneumática e/ou hidráulica. O contexto normalmente aplicável de funcionamento surge sincronizado com o ciclo de abertura de prensa entre golpes de trabalho. Assim, regimes de trabalho progressivo com 35 batimentos por minuto, impõem uma margem mínima de atuação isolada do sistema de cravar de pouco mais de 1 segundo para toda a sua ação: reconhecimento posicional; admissão de parafuso, porca ou outro; alinhamento e posicionamento concêntrico com a superfície a receber; cravação e avaliação do

estado local. É, por isso, um sistema multidisciplinar, complexo, de elevada precisão para o ambiente enquadrável, que interfere no processo com ação decisiva e ao qual é exigida competência para a reprodutibilidade de produção de peça.

Como caso concreto desta ferramenta, apresenta-se a figura 40, um resultado ao teste de performance normativa dos pernos-parafusos para um torque mínimo exigido de 11,30 N.m e compressão axial em dinamómetro de 1260 N.



Figura 39 - Resultado ao teste de performance normativa dos pernos-parafusos

Em apenas quatro postos de trabalho, consegue-se garantir a força exigida (1260 N), como se pode ver nos resultados dos testes normativos à compressão da figura 39.

6 CONCLUSÕES

O trabalho consumado no presente relatório retrata o vetor estratégico para o desenvolvimento de soluções no setor *tooling*, em conformação de chapa metálica, cada vez mais priorizado para abordagens inteligentes e avançadas, no foco seletivo de determinados componentes, operações, e rotinas de fabrico, que convirjam em elementos ativos de influência capital nos resultados finais.

Neste contexto, o relatório reportou um caso de estudo de uma ferramenta especial de estampagem metálica, segundo o método progressivo, com várias operações de corte e estampagem de diferentes formas conformáveis, num enquadramento funcional de elevada exigência, para a obtenção de peça final estampada com rigor dimensional diferenciado. A multifuncionalidade requerida no caderno de encargos desta peça, com destino ao setor de montagem da indústria automóvel, inclui um sistema de cravação *in-tool* de quatro parafusos específicos em cada peça. As respetivas superfícies de controlo, com bossas conformáveis para receber as referidas operações de cravação, foram alvo de estudo a diferentes níveis: controlo de toleranciamento *matting* com exigência para um compromisso numa ordem de desvio de apenas $\pm 0,2$ mm; planicidade requerida para cumprimento funcional e normativo dos parafusos cravados; e fator de influência da variação destes parâmetros dimensionais, a montante e a jusante, das operações de cravação. Por isso, o projeto mecânico focalizou estratégias de afinação, com elementos postíços em operações de pré-estampagem e estampagem, identificadas pela relevância no resultado das superfícies de controlo.

O trabalho de mestrado fundamentou a referida estratégia e abordou a problemática da maquinação, em especial a remaquinação, de componentes integrantes de interesse determinante no processo. O desenvolvimento final passou por diversas etapas iterativas, com influência significativa no processo progressivo e no respetivo estado dimensional final das peças. A procura de um compromisso de toleranciamento dimensional exigido, em simultâneo com o desempenho normativo a ensaios de tração e torque dos parafusos, acentuou ainda mais o potencial para o estudo da remaquinação operada nos postíços ativos integrantes em matrizes e punções de estampagem.

A tecnologia da maquinação, através da orientação para rotinas e seleção de parâmetros principais, é dos pressupostos para que não existam erros ou, no limite, para que haja controlo e minimização dos mesmos. A implementação dos referidos postíços nas matrizes e a sua remaquinação foi algo complexo, mas com os parâmetros estudados e uma análise a cada passo dado, levou a resultados altamente satisfatórios, validando assim, quer o contributo prestado, quer novo conhecimento transferido para soluções aplicáveis. Os problemas anteriormente identificados foram resolvidos, o que permitiu fechar com sucesso o desenvolvimento no terreno da

respetiva ferramenta, e a mesma ser devidamente preparada para *try-out* de lançamento na prensa do cliente.

Todo o trabalho desenvolvido neste estágio teve, por isso, um sucesso que foi transferido e aplicável. Toda uma cadeia de processos foi interpretada, estudada e enriquecida, elevando o potencial de formação do ciclo de estudos neste mestrado. Ao nível particular, fiquei contextualizado na temática com conhecimento de causa, adaptado ao setor altamente especializado e exigente, e que me orientou de forma a dar um contributo técnico melhorado dentro da empresa.

O setor *tooling*, que atua em diferentes áreas de fornecimento à escala produtiva, está em constante mudança, exigindo-se, por isso, o estudo de mais conhecimento e mais controlo em variáveis que permitam potenciar novas ideias, tanto de conceção da ferramenta, como de maquinaria dos seus elementos.

7 TRABALHOS FUTUROS

O conhecimento adquirido no presente estágio levará a novas oportunidades e objetivos no desenvolvimento do potencial aplicável de sistemas normativos mais complexos como, por exemplo, oito pernos mais compridos na peça em questão.

Ao nível da maquinação, a utilização de pratos magnéticos de larga escala e as técnicas de remaquinação do conjunto (base ou teto) com os seus elementos ativos, serão futuramente equacionados, principalmente para diminuir significativamente o desalinhamento final das ferramentas. A aquisição de tecnologia *scanner* 3D, para inspeção metrológica avançada numa leitura completa do conjunto ferramental em ativo na prensa, será também uma mais-valia na interpretação e no controlo de erros reproduzidos.

O trabalho realizado neste estágio foi, sem dúvida, um motor de arranque para o meu percurso no mundo da estampagem. Espero dar continuidade ao mesmo e contribuir, de dia para dia, com a procura de novas soluções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ Bairrimoldes (2020). Site oficial da Bairrimoldes LDA, <https://www.bairrimoldes.com//>.
- ❖ Bairrimoldes LDA: Bibliografia / Documentação
- ❖ Davim, J.P. e Grácio, J.J. (1999). Tecnologia dos materiais metálicos. Universidade aberta, Lisboa.
- ❖ Lim, Yongseob. (2014). *Process Control for Sheet-Metal Stamping*. Springer, London.
- ❖ Morais, S. (2006). *Desenho Técnico Básico*. Porto Editora, Porto.
- ❖ Rodrigues J. e Martins P. (2010) *Tecnologia Mecânica Vol. II* Escolar Editora, Lisboa
- ❖ Schaeffer, L. (2004). *Conformação de chapas metálicas*; Impresa Livre, Porto Alegre.
- ❖ YUMPU (2020). <http://www.yumpu.com/en/document/read/17606116/reference-point-system-rps-vw-010-55/>. Reference point system (página internet oficial).