Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Análise Operacional de Roturas em Ferramentas de Estampagem Progressiva

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Relatório de Projecto

Ricardo Manuel Pinto Ribeiro

Orientador na GESTAMP Portugal: Eng.º Santiago Pan
Orientador na FEUP: Prof. Abel Santos

Janeiro 2011

Dedico este Trabalho,

À minha Família. Aos meus Amigos.

Ao meu Mecenas. À Grande Criatividade

Que está na Origem deste Universo Extraordinário.

Sem eles nada teria sido possível.

Resumo

A evolução das vertentes industriais que utilizam componentes obtidos por conformação plástica a frio tem levado à selecção de materiais cada vez mais resistentes. Em complemento as geometrias tendem a ser igualmente complexas, pelo que, não raras vezes, se encontram processos de conformação que funcionam no limite técnico das ferramentas de estampagem que permitem a sua obtenção. Neste sentido é cada vez mais frequente encontrar casos de rotura de componentes de ferramentas em processos críticos de estampagem.

Este estudo refere-se á análise operacional de roturas em processos críticos de estampagem progressiva. Nele é definido um método de análise que conduza à resolução deste tipo de problemas. Após definição do método operacional é realizado um conjunto de ensaios mecânicos de forma a determinar quais as causas que conduzem à rotura.

A realização de ensaios engloba todos os elementos intervenientes no processo de conformação, como sejam a prensa mecânica, o sistema de alimentação, as características do material, ferramenta, processo escolhido, etc.

Numa última fase e, em jeito de conclusão, é definido ainda um conjunto de procedimentos de controlo, para processos críticos, de forma a reduzir as possibilidades de ocorrência de falhas durante a fase de produção em série.

Abstract

Due to the increasing demands towards vehicle safety and weight reduction, there has been a trend in using high strength and ultra high strength steels in structural automotive components, which are processed by sheet metal forming technology.

Using these high strength materials in the corresponding forming tools causes higher active loads in the cutting tools, which in turn will decrease their performance by some failure mechanisms. For this usage, besides a need of increased hardness, tools require higher levels of toughness so that premature failure is avoided.

In this work it is presented a study for a progressive type of stamping tool, in which is analyzed the causes of punch failures. A procedure is defined to associate and investigate such failures with every possible variable, including tooling, process and press variables. Besides process parameters such as clearances, edge radii, angles, geometries, evaluation tests are also considered for tool steel selection, press to be used, feeding systems, sheet material, tool dynamics and the stamping process.

Finally, a group of control procedures for tools is presented and suggested when processing high demanding components, which shall reduce the possibilities of process failure during the industrialization of such components.

Résumé

Les milieux industriels utilisant des composants obtenus par transformation à froid, ont évolué dans la sélection des matériaux. En effet, ces derniers sont devenus plus résistants et les géométries, elles, sont de plus en plus complexes. Ces contraintes réunies poussent, parfois, l'outillage d'emboutissage à travailler dans les limites, provoquant ainsi la rupture ce certains éléments qui le composent.

Cette étude se réfère à une analyse opérationnelle de ruptures obtenues dans certains outillages progressifs critiques. Il y est définit une méthode d'analyse qui conduit à la résolution de ce type de problèmes. Après la définition de la méthode opérationnelle, un ensemble d'essais mécaniques est réalisé de manière à déterminer les causes de cette rupture.

Les essais englobent touts les éléments intervenant dans le process d'emboutissage, tel que la presse mécanique, le système d'alimentation, les caractéristiques de la matière, l'outillage, etc.

Il est définit un ensemble de procédure de contrôle de manière à réduire les possibilités d'obtention de défauts pendant la phase de vie série.

Agradecimentos

Aos Bons Professores do meu Curso pelo que me transmitiram,

Ao Prof. Abel Santos pelo esforço de me fazer ver outras perspectivas,

Ao Eng.º Santiago Pan, ao Eng.º José Tiago e a toda a Extraordinária Equipa do Departamento de Projectos da Gestamp Portugal,

À empresa Gestamp Portugal Lda., por todos os meios técnicos, humanos e económicos que disponibilizou para a realização deste trabalho,

Aos Funcionários das Gestamp Portugal por tudo o que me ensinaram,

Á minha Família, aos meus Amigos,

A todos os que contribuíram para que chegasse até aqui:

Este Trabalho também é Vosso.

"Existe uma relação exacta entre a Humanidade e a Causa que a chamou a existir.
Assim, uma verdadeira Ciência, como uma verdadeira Religião,
Serão aquelas que expliquem os verdadeiros termos dessa relação."
Henrique José de Souza

Índice

1 Introdução 1

1.1 O Projecto na Gestamp Portugal 1

1.2 Apresentação da Gestamp Portugal 2

1.2.1 Serviços, Processos e Tecnologia 5

1.2.2 Layout e Departamentos Funcionais 6

1.2.3 Alguns Componentes Produzidos pela Gestamp Portugal 8

1.3 Estrutura e Temas Abordados 9

2 Tecnologia da Conformação Plástica de Chapas 10

2.1 A Tecnologia de Estampagem 10

2.1.1 Elementos Tecnológicos do Processo 11

2.1.2 Regime Plástico 12

2.1.3 Ensaios e Caracterização Mecânica de Materiais 24

2.1.4 Etapas do Projecto de uma Peça Estampada 26

2.1.5 Conformação Plástica de Chapas Assistida por Computador 28

2.2 Ferramentas, Máquinas e Sistemas Auxiliares 29

2.2.1 Prensa Mecânica 29

2.2.2 Sistemas de Alimentação 35

2.2.3 Ferramentas de Estampagem 38

2.2.4 Sistemas Auxiliares 41

2.2.5 Programação Sequencial Prensa – Alimentador – Ferramenta 44

3 Análise Operacional de Rupturas em Ferramentas de Estampagem Progressiva 47

3.1 Introdução 47

3.2 Apresentação do Componente 48

3.2.1 Geometria 48

3.2.2 Processo de Fabrico 49

3.2.3 Máquinas 50

3.2.4 Características do Material 51

3.3 Apresentação do Problema 52

3.4 Metodologia 55

3.5 Análise Global das Variáveis Envolvidas no Processo 56

3.5.1 Análise de Indícios das Causas de Ruptura 58

3.5.2 Definição e Estruturação de Ensaios Prioritários 64

3.6 Ensaios Relativos à Prensa Mecânica 65
3.6.1 Verificação de Paralelismo 65
3.6.2 Medição da Excentricidade da Ferramenta na Prensa 67
3.6.3 Verificação da Planeza da Mesa 68
3.7 Estudos Relativos ao Sistema de Alimentação 69
3.7.1 Avaliação da Conformidade da Máquina 69
3.7.2 Análise dos Parâmetros de Alimentação 70
3.7.3 Programação Sequencial Prensa-Alimentador-Ferramenta 73
3.8 Ensaios Relativos à Ferramenta 75
3.8.1 Punção 16 75
3.8.2 Punção 17 83
3.8.3 Punções 18 e 19 84
3.9 Discussão de Resultados 88
3.9.1 Punção 16 88
3.9.2 Punção 17 89
3.9.3 Punções 18 e 19 89
3.9.4 Falhas de Roscado 89
3.9.5 Discussão Geral de Procedimentos 90
3.10 Síntese de Medidas Operacionais 91
3.10.1 Punção 16 91
3.10.2 Punções 18 e 19 91
3.10.3 Falhas de Roscado 91
3.10.4 Procedimentos 92
4 Desenvolvimentos Realizados 93
4.1 Selecção de Material para o Punção 16 93
4.1.1 Introdução 93
4.1.2 Aços de Ferramentas segundo a Normas AISI SAE 94
4.1.3 Discussão e Selecção de Materiais 95
4.1.4 Revestimento Superficial dos Punções 98
4.1.5 Conclusões 98
4.2 Selecção de um Sistema de Alimentação Compatível 99
4.2.1 Introdução 99
4.2.2 Especificações Gerais da Prensa e do Alimentador 99
4.2.3 Especificações Introduzidas Pelo Sistema de Roscagem 100

4.2.4 Especificações Relativas às Saídas de Recortes de Sucata 101
4.2.5 Especificações de Paralelismo 102
4.2.6 Conclusões 103
4.3 Procedimento para Configuração de Parâmetros Óptimos de Alimentação 104
4.3.1 Introdução 104
4.3.2 Definição da Janela de Alimentação 105
4.3.3 Cálculo do Valor Mínimo da Velocidade Média de Avanço 107
4.3.4 Determinação dos Valores Mínimos da Aceleração e Desaceleração 108
4.3.5 Definição da Programação Sequencial da Prensa 113
4.3.6 Procedimento para a Configuração de Parâmetros de Alimentação 116
4.3.7 Software de Cálculo de Parâmetros Óptimos de Alimentação 119
4.3.8 Parâmetros Óptimos de Alimentação do Projecto PT428 122
4.4 Ante-Projecto de um Sistema de Pilotagem Móvel 124
4.4.1 Introdução e Objectivos 124
4.4.2 Solução Construtiva 125
4.4.3 Cadeia Cinemática 128
4.4.4 Definição Geométrica dos Elementos 131
4.4.5 Esboço do Conjunto Mecânico 138
4.4.6 Cargas e Esforços 140
4.4.7 Cálculos de Resistência 142
4.4.8 Conclusões do Ante-Projecto 147
4.5 Procedimento Operacional para Processos Críticos de Estampagem 148
4.5.1 Introdução 148
4.5.2 Definição de Processo Crítico de Confomação Plástica de Chapas 148
4.5.3 Variáveis Envolvidas nos Processos Críticos 150
4.5.4 Procedimento e Posto de Quarentena 151
4.5.5 Método de Análise 154
5 Considerações Finais 155
6 Referências 156
Anexos 157
Anexo 1 – Outros Estudos e Desenvolvimentos 157
Ensaios de Tracção de Componentes Roscados em Prensa 158
Anomalia no Durómetro Delta 169
Anexo 2 - Caracterização do Material S355MC 174

Anexo 3 – Estudo Detalhado de Banda 180
Anexo 4 – Desenho do Conjunto Mecânico do Componente PT428 181
Anexo 5 - Árvore Organizacional da Gestamp Portugal 182

1 Introdução

1.1 O Projecto na Gestamp Portugal

A presente monografia pretende documentar o Projecto Final referente ao 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Feup).

O Projecto foi realizado em ambiente industrial no seio da empresa Gestamp Portugal, Departamento de Projecto. Desta forma verificou-se a necessidade de compatibilizar os objectivos académicos, em termos de desenvolvimento de novas soluções e optimização de métodos pré-existentes, com as metas industriais, no que respeita à implementação eficiente de um conjunto de processos de fabrico que permitam um correcto e fiável desempenho da cadeia produtiva.

Neste sentido foi necessário lançar mão de vários conhecimentos técnicos, bem como estudar os diversos fundamentos teóricos de forma a abordar o problema em estudo de forma científica. Ensaios de materiais, cálculo estrutural, estudo de condições cinemáticas, entre outros, são parte integrante deste relatório, num esforço por usar um leque abrangente das ferramentas que deve estar de posse do Engenheiro Mecânico.

Esta dissertação incide fundamentalmente sobre a análise de casos de rotura em ferramentas de estampagem progressiva, embora se documente aqui outros estudos considerados relevantes porque de alguma forma destacam a importância da primeira etapa do processo de intervenção técnica: A Observação Cuidada.

1.2 Apresentação da Gestamp Portugal

Em 1995 surge em Vila Nova de Cerveira, Portugal, a empresa Gestamp Lap Portugal (actualmente Gestamp Portugal, Lda), como resultado da necessidade de expansão da Gestamp Vigo, empresa pertencente ao grupo de automoção da Corporación Gestamp.

Figura 1.1 - Logótipo da Gestamp Portugal

A Corporación Gestamp é uma multinacional europeia líder nos sectores do aço, fabrico de componentes para a indústria automóvel, armazenamento e logística. Actualmente a multinacional está presente em 18 países (Europa, América e Ásia) contando com 60 centros produtivos, 13 centros de investigação e cerca de 13.200 colaboradores. O volume de negócios da corporação ascende aos 2.030 milhões de euros (2009), centrando a sua actividade em três linhas de negócio:

- Componentes automóveis (Gestamp Automoción)
- Centros de Serviço de Aço (Gonvarri)
- Energias Renováveis (Gestampren)

Figura 1.2 - A Gestamp no Mundo

Até Dezembro de 2007 a Gestamp Portugal era composta por departamentos comuns com a sua associada em Vigo, mas em Janeiro de 2008, por estratégia do grupo, a Gestamp Portugal cria os seus próprios departamentos, deixando de reportar à Gestamp Vigo para passar a reportar directamente à casa mãe, ficando assim com autonomia para a tomada de decisões e estratégias para o futuro da empresa. Ainda assim a história da empresa de Vila Nova de Cerveira encontra-se intimamente ligada com a história da Gestamp Vigo que ainda hoje detém 99% do capital social da Gestamp Portugal, pertencendo o restante capital ao grupo Gestamp Automoción.

Figura 1.3 - Vista Exterior das Instalações da Gestamp Portugal

Para uma melhor compreensão da constituição e evolução da empresa atente-se na seguinte cronologia:

- **1995** – Constituição da Gestamp Lap Portugal – Primeiras contratações e pré-formação dos quadros;
- **1999** – Alteração da denominação da empresa para Gestamp Portugal, Lda;
- **Maio de 2000** – Certificação pela ISO 9002 e QS – 9000;
- **Junho de 2000** – Certificação EAQF – 94;
- **2002** – Ampliação e remodelação das instalações – A área coberta foi aumentada de 10.000 m^2 para 20.400 m^2, melhoraram-se as condições de trabalho e níveis de segurança e transformaram-se os processos produtivos de forma a garantir a qualidade total dos produtos fabricados;
- **2003** – Certificação pela ISO TS - 16949 (2002);
- **2003** – Instalação das células de soldadura robotizadas;
- **2004** – Certificação pela ISSO 14001;
- **2005** – Estampagem do primeiro componente em alumínio;
- **2006** – Certificação através do referencial EMAS;
- **2008** – A Gestamp Portugal cria os seus próprios departamentos;
- **2009** – Implantação na Rússia;
- **2010** – Absorção do grupo Alemão Edscha (14 novas plantas produtivas)

Como se pode depreender pelo exposto, a Gestamp Portugal tem apresentado um crescente aumento de produtividade que, embora condicionado pelas variações da procura, tem sido impulsionado pelo forte investimento na melhoria de todos os equipamentos e serviços, com consequente aumento dos seus recursos humanos (que passou de menos de 100 operários em 1998 a mais de 350 no fim de 2003) e introdução no mercado de produtos de maior valor acrescentado.

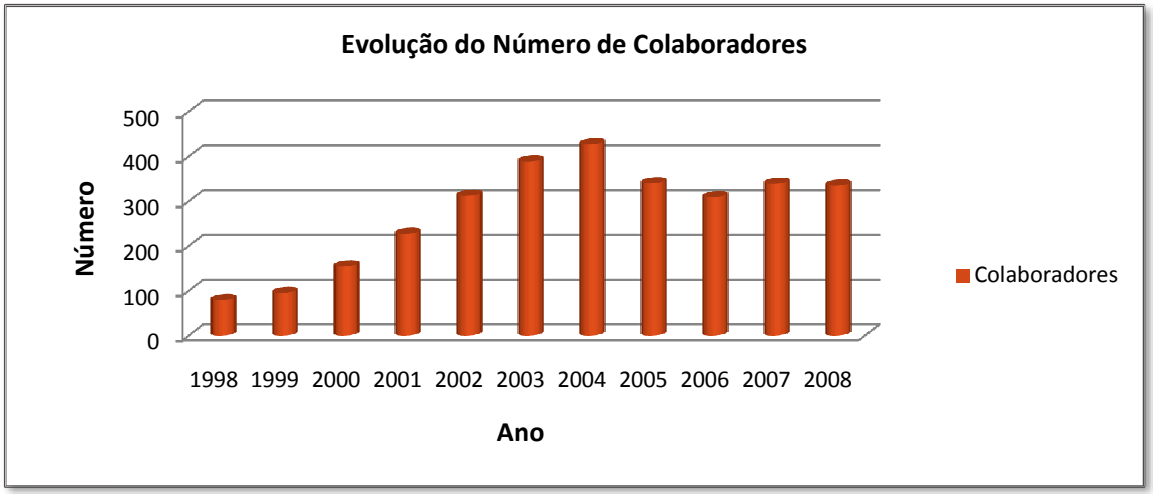


Figura 1.4 - Evolução dos Recursos Humanos da Gestamp Portugal

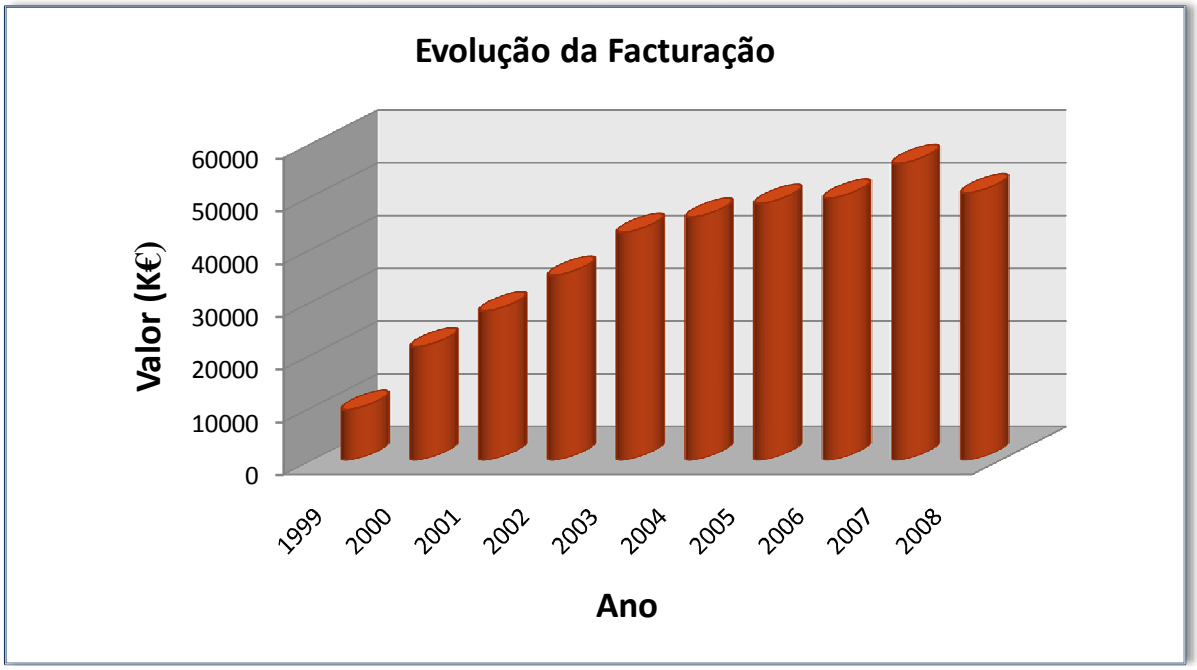


Figura 1.5 - Evolução da Facturação da Gestamp Portugal

1.2.1 Serviços, Processos e Tecnologia

No que respeita a tecnologia e maquinaria industrial a planta produtiva da Gestamp Portugal conta com:

- 1 Linha robotizada com 6 prensas de 300 ton de capacidade de carga
- 12 Prensas progressivas de 630/400/250 ton
- 1 Prensa transfer de 630 ton
- 1 Prensa hidráulica de 500 ton
- 2 Prensas manuais de 300 ton
- 2 Prensas manuais de 125/80 ton
- 9 Células de soldadura MIG/MAG
- 8 Células de soldadura por resistência
- 3 Máquinas de soldadura por resistência
- 25 Máquinas manuais de soldadura por resistência

Figura 1.6 - Planta Produtiva - Nave 1

Nos departamentos de apoio à produção, particularmente no departamento de ferramentaria, estão ainda disponíveis os seguintes equipamentos:

- 2 Máquinas de electroerosão
- 2 Fresadoras CNC
- 4 Rectificadoras (duas de comando numérico e duas manuais)
- 2 Tornos
- 1 Fresadora convencional
- 1 Forno para tratamentos térmicos
- 1 Estação de Lavagem

Figura 1.7 - Departamento de Ferramentaria

Como garantia de qualidade dos produtos fabricados o departamento de qualidade dispõem :

- 2 Máquinas CNC de medição 2D/3D
- 1 Estação de controlo não destrutivo (Ultrassons)
- 1 Laboratório de Metalografia e Materiais

1.2.2 Layout e Departamentos Funcionais

As instalações da Gestamp Portugal assentam no aproveitamento de uma área de 19.000 m^2, com a seguinte configuração (Facility Layout):

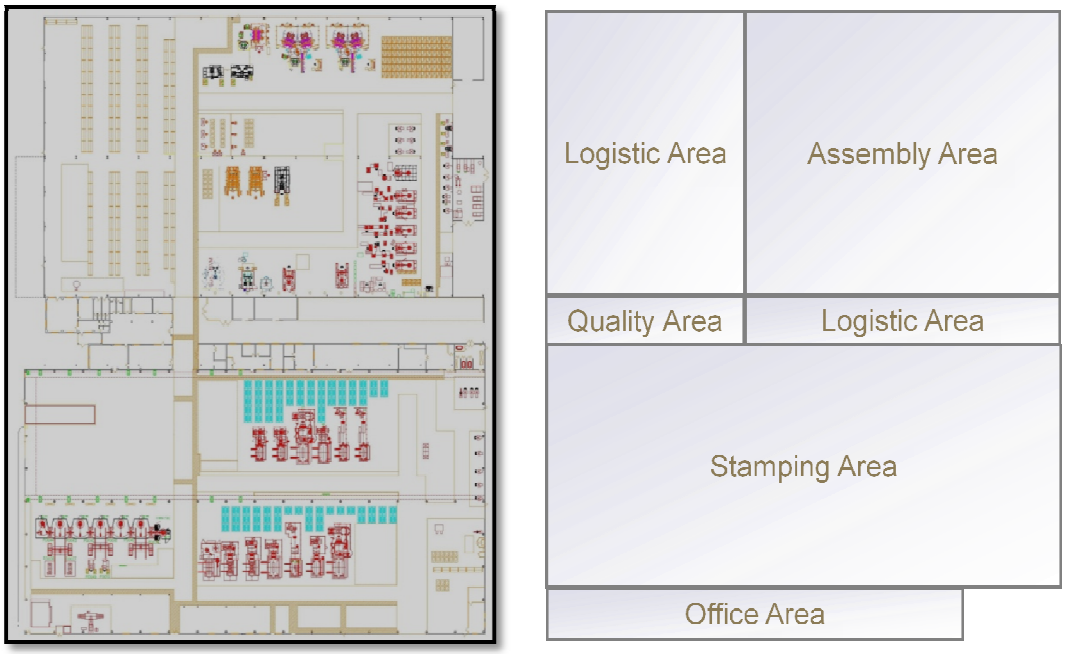


Figura 1.8 - Layout Operacional da Gestamp Portugal

Neste espaço estão distribuídos os diversos departamentos operacionais da Gestamp. Esta distribuição assenta também no princípio da máxima funcionalidade, ou seja, a sua localização foi definida como sendo a mais próxima possível de outros departamentos ou áreas de produção que lhe estejam de alguma forma associados. (A título de exemplo: O departamento de projectos fica em local adjacente ao departamento de ferramentaria e, ambos, na imediação da área de estampagem. O departamento de qualidade fica na imediação do departamento de manutenção e, ambos, em posição central na planta produtiva para que se encontrem equidistantes das áreas de estampagem e das de soldadura/montagem.)

Embora a árvore organizacional da empresa esteja incluída na secção *Anexos*, mister se faz, apresentar de forma sucinta os departamentos técnicos:

Produção: Encarrega-se de gerir os recursos humanos e técnicos de fabricação, para obter o produto no devido prazo e com a qualidade acordada com o cliente.

Ferramentaria: Dirige e coordena a oficina de Ferramentaria para melhoramento e desenvolvimento das ferramentas.

Qualidade: O seu objectivo é planificar, colocar em acção e manter um sistema de qualidade.

Logística e Aprovisionamentos: A sua missão é planificar, organizar e controlar um conjunto de actividades, movimentos e armazenamentos, que facilitem o fluxo e o aprovisionamento de materiais e produtos.

Manutenção: Dirige uma equipa organizada de pessoas, cujo objectivo é manter em perfeito estado o funcionamento de toda a maquinaria e instalações da empresa.

Projectos: Responsável pela definição e orçamentação dos novos projectos, assim como a gestão da industrialização dos meios de produção, controlo e alterações de produto.

Informática: Organiza e coordena os sistemas de informação, analisando as necessidades de melhoria e exploração dos sistemas.

1.2.3 Alguns Componentes Produzidos pela Gestamp Portugal

Em baixo apresentam-se alguns componentes produzidos na Gestamp Portugal, para melhor entendimento do resultado do processo industrial.

Componente	**Traverse de Planche de Bord**	
Cliente	Visteon	
Veículo	Berlingo/Partner	
Aplicação	Suporte do Tablier	

Tabela 1.1 - Traverse de Planche de Bord

Componente	**Renfort Siege AV**	
Cliente	Renault	
Veículo	Mégane	
Aplicação	Fixação de Bancos	

Tabela 1.2 - Renfort Siege AV

Componente	**Reinfort Charniére**	
Cliente	VW	
Veículo	VW Sharan	
Aplicação	Fecho de Porta	

Tabela 1.3 - Reinfort Charniére

Componente	**Traverse Inferieure Avant Façade**	
Cliente	PSA	
Veículo	C4 Picasso	
Aplicação	Fixação Inferior de Radiador	

Tabela 1.4 - Traverse Inferieure Avant Façade

1.3 Estrutura e Temas Abordados

Esta monografia compõe-se das seguintes secções:

- **Introdução** – Introduz o tema e âmbito do Projecto, bem como a empresa onde foi realizado;

- **Tecnologia da Conformação Plástica de Chapas** – Sintetiza os campos técnicos de engenharia necessários ao correcto entendimento deste estudo;

- **Análise Operacional de Roturas em Ferramentas de Estampagem Progressiva** – Trata da definição e aplicação de um método de análise de causas de rotura em ferramentas complexas de estampagem. Constitui o corpo principal deste trabalho;

- **Desenvolvimentos Realizados** – Conjunto de estudos e pequenos projectos que surgem na sequência da análise efectuada no capítulo anterior, materializando algumas das medidas operacionais que da mesma resultam;

- **Considerações Finais –** Apresenta as últimas considerações sobre o trabalho realizado, definindo em linhas gerais as perspectivas de trabalhos futuros;

- **Referências –** Exibe as fontes consultadas na elaboração desta monografia.

2 Tecnologia de Conformação Plástica de Chapas

2.1 A Tecnologia de Estampagem

Apesar da diversidade de conceitos relacionados com o termo *estampagem* a sua utilização na indústria automóvel refere-se normalmente a um conjunto de operações relacionadas com a conformação plástica de chapas.

Entende-se por estampagem todo o processo de conformação plástica que permite obter peças mais ou menos complexas a partir de operações consertadas de quinagem, corte e embutidura realizadas sobre uma chapa plana (esboço) em que a espessura é quase sempre desprezável face às restantes dimensões. A realização destas operações é possível graças ao uso de *ferramentas de estampagem* aplicadas em máquinas denominadas *prensas*.

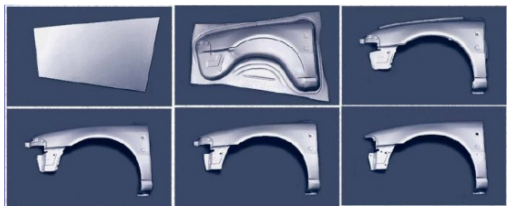


Figura 2.1 - Componente Automóvel obtido por operações consertadas de Embutidura, Corte e Quinagem

As operações de Corte e Quinagem efectuam-se normalmente em frio, enquanto as operações de embutidura se podem efectuar a frio ou quente, segundo as necessidades técnicas requeridas.

Muitas vezes é possível obter o componente final recorrendo apenas a um tipo de operação, mas nem sempre tal acontece. Para esses casos existem técnicas apropriadas de estampagem, como a estampagem progressiva ou as linhas *transfer*, como se verá mais à frente.

2.1.1 Elementos Tecnológicos do Processo

As operações intervenientes nos processos de estampagem são realizadas por intermédio de elementos mecânicos que, atacando o esboço, permitem obter deformações que o conduzem à forma pretendida. Dentro desses elementos mecânicos atente-se, numa primeira fase, nos conceitos de "punção" e de "matriz".

O **punção** é o componente mecânico activo, é o órgão mecânico que se movimenta no sentido de se aproximar da superfície da chapa obrigando-a a deformar. A **matriz** é o elemento mecânico passivo, ou seja, estático, contra o qual a chapa será pressionada sendo obrigada a deformar-se. É da conjugação das geometrias complementares do punção e da matriz que surge a forma do componente final.

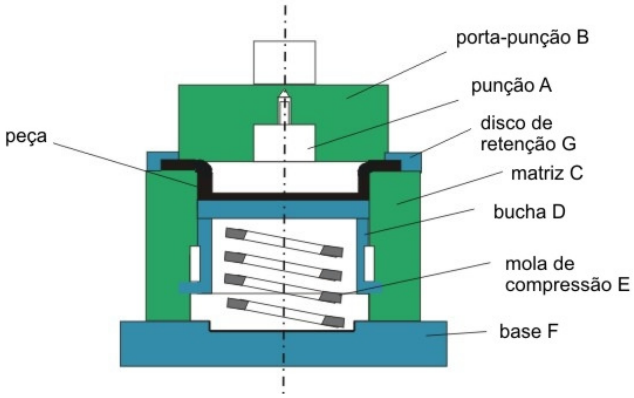


Figura 2.2 - Elementos Tecnológicos Básicos do Processo de Embutidura

Um outro elemento mecânico de grande importância é o designado **cerra - chapas**, que na Figura 2.2 toma o nome de "disco de retenção". Este elemento tem a função de pressionar a chapa contra a superfície da ferramenta de estampagem durante o processo de conformação, permitindo controlar o escoamento do material para dentro da matriz, evitando a formação de pregas ou rugas, e possibilitando ainda controlar o maior ou menor estiramento da chapa (redução de espessura) durante o processo.

O movimento dos órgãos móveis de uma ferramenta de estampagem (punções, etc.) relativamente aos órgãos fixos (matrizes, etc.) é possível graças a mecanismos dinâmicos que denominamos prensas ou máquinas de movimento rectilíneo alternativo.

Figura 2.3 - Prensa Mecânica existente na Gestamp Portugal

2.1.2 Regime Plástico

A conformação plástica de chapas implica uma deformação permanente do material, ou seja, a carga a aplicar ao esboço durante o processo tem de ultrapassar o limite a partir do qual o material já não consegue voltar à sua geometria inicial.

Na Figura 2.4 é apresentado um gráfico típico resultante do ensaio de tracção de um material dúctil. No mesmo podem ser identificadas:

1- Tensão Máxima, ou de Ruptura do Material – corresponde ao valor máximo de tensão que o material suporta antes da rotura quando exposto a uma solicitação uniaxial;

2- Tensão correspondente a uma deformação de 0.2% - este valor é muitas vezes usado como propriedade de referência nos catálogos comerciais dos fornecedores de aço, correspondendo ao ponto a partir do qual se inicia o regime plástico;

3 – Tensão Limite de Proporcionalidade – Valor de tensão a partir do qual a relação entre a tensão instalada e a deformação verificada deixa de ser linear;

4 – Valor de tensão convencional verificado aquando da rotura do provete de ensaio;

5 – Indica uma deformação de 0.2%.

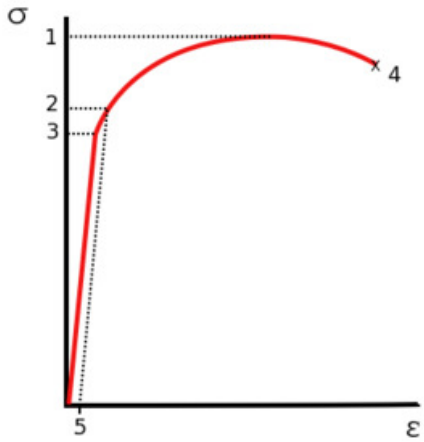


Figura 2.4 - Representação genérica do gráfico *tipo*, resultante do Ensaio de Tracção em Materiais Dúcteis

Como se pode observar a região a partir da qual se verifica deformação plástica não apresenta uma relação linear entre tensão e deformação, pelo que o comportamento do material a partir de "3" se torna difícil de prever, diferindo bastante de material para material.

A elevada não - linearidade inerente ao regime plástico conduz, não raras vezes, a que as primeiras amostras de um determinado componente, obtido por conformação plástica de chapa, apresentem sérios desvios (geométricos e dimensionais) relativamente às especificações requeridas para o mesmo. Estes desvios conduzem a um processo iterativo que, na indústria, toma o nome de afinação de ferramenta. Neste processo são realizados diversos ensaios (que simulam o processo de produção em série), sendo depois analisados (no caso da Gestamp Portugal, por recurso a uma máquina de medição laser tridimensional) os desvios dimensionais e geométricos, procedendo-se, após o exposto, a correcções ditas "de compensação" na ferramenta, de forma a alcançar uma geometria final para ferramenta que permita obter componentes dentro das tolerâncias exigidas pelo cliente.

Esta forte não - linearidade provém das características intrínsecas ao próprio material e manifesta-se sempre que a severidade das cargas conduz a deformações no domínio plástico. Entre essas características merecem especial destaque pelo seu peso relativo:

- Tensão de Cedência (à tracção e à compressão);
- Tensão de Ruptura;
- Módulo de Elasticidade;
- Modos de Deformação;
- Recuperação Elástica;
- Coeficiente de Anisotropia;
- Coeficiente de Encruamento;
- Sensibilidade à Velocidade de Deformação.

Neste sentido, no projecto de processos e ferramentas de conformação plástica de chapas, são utilizados frequentemente softwares de simulação (que utilizam o Método dos Elementos Finitos) que, embora não apresentem resultados 100% fiáveis, constituem uma das melhores aproximações ao comportamento dos materiais em regime plástico.

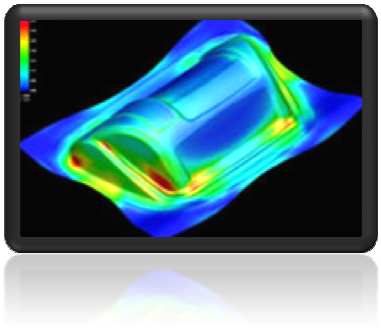


Figura 2.5 - Resultados da Simulação Numérica de um Componente Embutido

A influência conjunta das várias características dos materiais em regime plástico pode manifestar-se nos componentes sob a forma de defeitos, ou desvios relativamente ao produto pretendido, que devem ser compensados variando determinados parâmetros. Embora, por motivos de síntese, não seja adequado listar todos os defeitos que podem surgir nas peças estampadas, atente-se nos seguintes:

- Desvios geométricos devido a retorno elástico;
- Roturas por estiramento excessivo;
- Formação de orelhas por estiramento anisotrópico;
- Formação de rebarbas e marcas não admissíveis;
- Formação de pregas;
- Falhas de filetagem no processo de roscagem por extrusão;
- Etc.

Estes defeitos são corrigidos agindo-se sobre variáveis do processo, tais como:

- Geometria e dimensão dos elementos da ferramenta;
- Força exercida pelo cerra - chapas;
- Velocidade de conformação;
- Etapas do processo de estampagem.

2.1.2.1 Encruamento

O fenómeno de encruamento pode ser definido como sendo o aumento de resistência verificado por um dado material quando deformado plasticamente. A deformação plástica implica movimentos entre discordâncias (fronteiras entre cristais de diferente orientação) na estrutura metalográfica do material. Este movimento entre discordâncias conduz a uma redução de mobilidade gradual entre os diversos cristais pelo que se torna necessário aplicar uma maior tensão para provocar deformação plástica.

Este fenómeno pode ser, em geral, representado pela equação:

$$\sigma = K\varepsilon^n \qquad (2.1)$$

Sendo *K* o coeficiente de resistência e *n* o expoente de encruamento.

A equação apresentada é válida para a curva tensão/deformação real em regime plástico, ou seja, para um gráfico traçado considerando a secção real instantânea do provete.

O coeficiente de encruamento, n, assume valores entre 0 e 1 e fornece as seguintes informações sobre os diferentes comportamentos de encruamento dos materiais:

Quando $n = 0$ temos $\sigma = K\,\varepsilon^0 = K$, ou seja, quando o material entra na região plástica, a deformação ocorre a tensão constante, como mostra a Figura 2.6:

Figura 2.6 - Relação Tensão - Deformação para um Coeficiente de Encruamento Nulo

Nota-se que o aspecto da curva é mais representativo do comportamento dos Polímeros em geral, que apresentam grande facilidade de deformação.

Quando $n = 1$ temos $\sigma = K\,\varepsilon^1 = K\,\varepsilon$, ou seja, o material entra na região plástica com um comportamento linear.

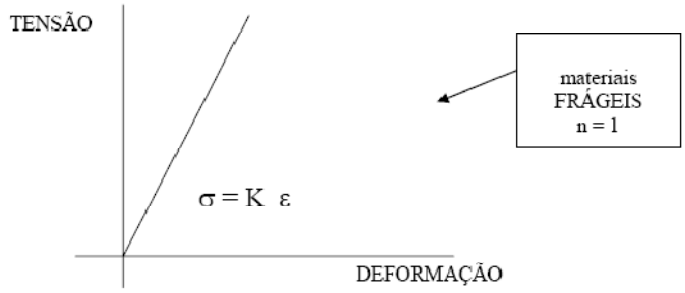


Figura 2.7 - Relação Tensão - Deformação para um Coeficiente de Encruamento Unitário

Nota-se que o aspecto da curva é mais representativo do comportamento dos Materiais Cerâmicos, que apresentam característica frágil, sendo a curva tensão/deformação dominada pelo comportamento elástico, quase sem a presença da zona plástica.

O comportamento intermediário é o que é melhor exibido pelos Metais, que apresentam estrutura cristalina bem mais regular, exibindo curvas que apresentam características nem muito frágeis, nem muito dúcteis, como mostra a Figura 2.8.

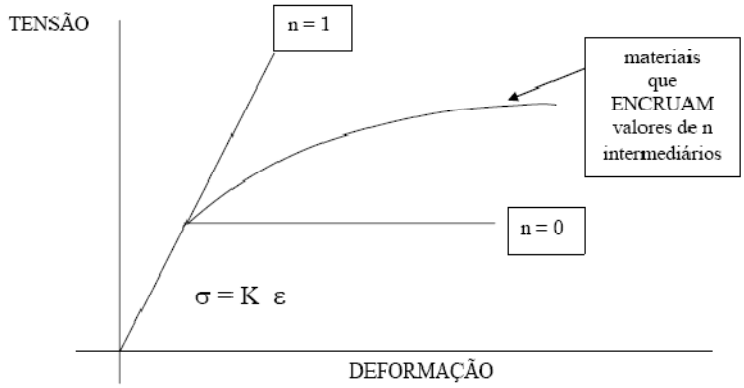


Figura 2.8 - Relação Tensão - Deformação para um Coeficiente de Encruamento, tal que: $0 < n < 1$

O coeficiente de encruamento é um indicador da capacidade intrínseca do material repartir as deformações quando sujeito a um gradiente de tensão, sendo habitual em estampagem definir-se um coeficiente de encruamento médio, $\bar{n}$, ponderando os diferentes coeficientes de encruamento no plano da chapa, definido pela seguinte expressão:

$$\bar{n} = \frac{n_0 + n_{90} + 2n_{45}}{4} \qquad (2.2)$$

Em que n_0, n_{45}, n_{90} são, respectivamente, o coeficiente de encruamento segundo a direcção de laminagem, segundo uma direcção fazendo 45° com a de laminagem e segundo uma direcção normal à direcção de laminagem [J. Rodrigues 2005].

Para melhor compreender a influência do coeficiente de encruamento médio na deformação, considere-se um provete de tracção uniaxial onde se vai analisar a progressão da deformação de um modo incremental. Deste modo, um incremento da tensão aplicada irá provocar numa região localizada do provete uma redução de secção, a qual passará a funcionar como um defeito geométrico, pois a deformação passa a ter tendência a localizar-se nessa zona. No entanto o encruamento que o material sofreu durante a deformação conduz ao aumento da tensão limite de elasticidade dessa zona, sendo esse acréscimo tanto mais elevado quanto maior for o coeficiente de encruamento. Então, sempre que a tensão associada a este último efeito superar a que resulta da redução da secção, a deformação plástica prosseguirá numa região exterior a esta e a deformação irá repartir-se globalmente pelo provete. No caso concreto da estampagem este fenómeno faz-se sentir essencialmente na zona do canto do cunho, onde o aumento do coeficiente de encruamento favorece os modos de deformação em expansão aí existentes, promovendo uma repartição mais

alargada e mais homogénea das deformações, oferecendo, por isso, uma maior resistência ao aparecimento da estricção e de todos os inconvenientes que lhe são associados [J. Rodrigues 2005].

Note-se que, apesar do exposto, o fenómeno do encruamento não é necessariamente benéfico aos processos de estampagem. Na verdade, dependendo do componente a conformar, o encruamento pode apresentar-se como uma vantagem ou um inconveniente. Um bom exemplo neste campo são os casos de rotura de ferramentas de estampagem, aos quais se refere esta monografia. Nestes casos, o encruamento da chapa em nada beneficia a resolução do problema, pelo contrário, contribui para que ele ocorra. Desta forma o encruamento deve ser tido, não como um benefício ou inconveniente, mas como uma variável característica do regime plástico, que deve ser estudada e controlada de modo a que se retire dela o melhor partido possível em cada caso específico.

2.1.2.2 Anisotropia

O coeficiente de anisotropia, ou coeficiente de Lankford (r), caracteriza a maior ou menor tendência que um determinado material apresenta no sentido de se deformar numa determinada direcção preferencial em detrimento das restantes.

As bobines de chapa usadas na industria de conformação plástica são obtidas por laminagem de aço, apresentando coeficientes de anisotropia não desprezáveis, sendo que a direcção em que se verifica maior resistência à deformação é a do laminado.

Figura 2.9 - Laminagem do Aço

Figura 2.10 - Bobinas de Aço Laminado

A determinação dos coeficientes de anisotropia (normal e planar) é realizada através do ensaio de tracção, segundo a norma ASTM E517-00 (Standard Test Method for Plastic Strain Ratio, r , for Sheet Metal).

Os corpos de prova definidos pela norma são deformados plasticamente abaixo da zona de estricção, medindo-se os comprimentos e larguras iniciais e finais e aplicando as equações correspondentes. Para determinação dos coeficientes de anisotropia normal e planar são retirados corpos de prova a 0, 45 e 90 ^{0} em relação à direcção de laminagem.

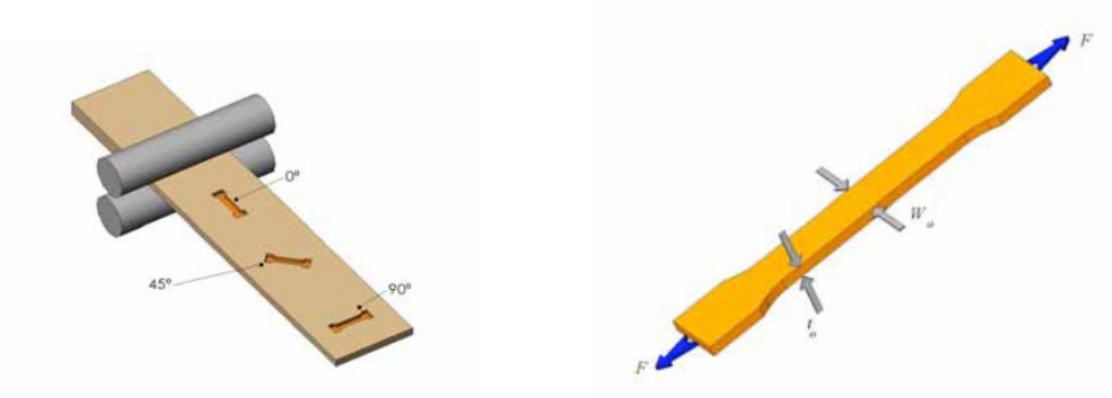


Figura 2.11 – Direcções de Corte dos Provetes relativamente ao Sentido de Laminagem

Por definição, o coeficiente de anisotropia é a razão entre a deformação real na largura (ε_w) e na espessura (ε_t) de um corpo de prova de tracção, após determinada deformação longitudinal predefinida.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \tag{2.3}$$

Na verdade devido a dificuldades de medição do valor ε_t, e como o volume do provete é naturalmente constante, é frequente substituir-se o valor de ε_t por $-(\varepsilon_w + \varepsilon_l)$, pelo que:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_w+\varepsilon_l)} = \frac{\ln\frac{w_0}{w_f}}{ln\frac{l_f w_f}{l_0 w_0}} \tag{2.4}$$

Onde ε_l representa a deformação real em sentido longitudinal.

Considerando o plano definido pela chapa usam-se os seguintes índices:

- Coeficiente de Anisotropia Normal

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \tag{2.5}$$

- Coeficiente de Anisotropia Planar

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \tag{2.6}$$

Em que r_0, r_{45} e r_{90}, representam os índices *r* considerando diferentes direcções de corte dos provetes relativamente ao sentido de laminagem.

O coeficiente de anisotropia normal permite avaliar em que medida o material resistirá à redução de espessura provocada pela deformação plástica, enquanto o coeficiente de anisotropia planar nos indica quais as direcções preferenciais de deformação no plano da chapa.

2.1.2.3 Modos de Deformação e Curvas Limite de Embutidura (CLE)

Existem dois tipos fundamentais de modos de deformação em embutidura:

- **Embutidura por Extensão** – neste modo de deformação a chapa sofre um alongamento positivo (tracção e aumento de comprimento) numa direcção do plano da chapa e um alongamento negativo (compressão e diminuição de comprimento) na direcção perpendicular à anterior;

- **Embutidura por Expansão** – neste modo de deformação a chapa sofre alongamentos positivos (tracção e aumento de comprimento) em todas as direcções do plano da chapa.

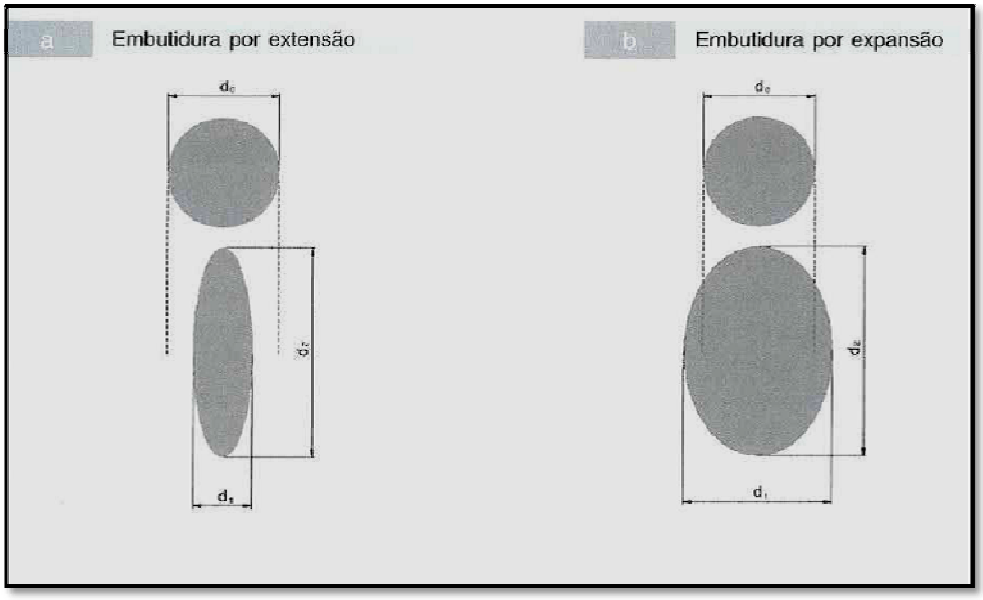


Figura 2.12 - Modos de Deformação em Embutidura
[Rocha 1992]

Os modos de solicitação que se encontram geralmente num processo de embutidura podem ser representados no plano das tensões principais σ_1e σ_2 dado que a tensão principal de Cauchy **(σ_3)** é, na maioria dos casos, insignificante face às tensões instaladas no plano da chapa **(σ_1 e σ_2).**

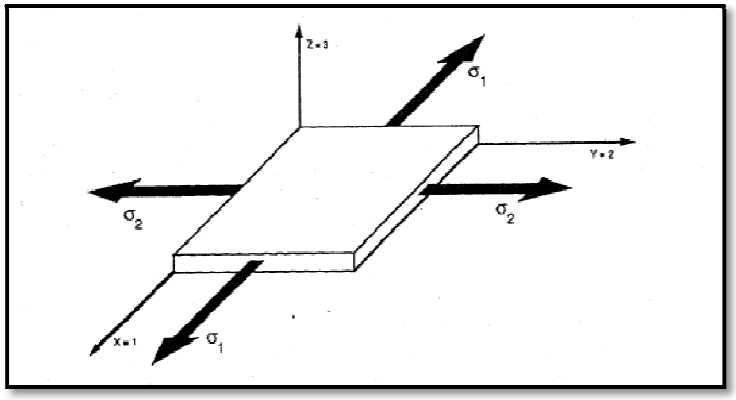


Figura 2.13 - Modos de Solicitação no Plano das Tensões

Na Figura 2.14 representam-se as trajectórias de carregamento lineares, **α**, possíveis de serem encontradas em peças embutidas:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \qquad (2.7)$$

A condição de incompressibilidade dos materiais na deformação plástica, $\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3=0$, permite representar, como para o estado de tensão, qualquer estado de deformação no plano ($\boldsymbol{\varepsilon_1}$, $\boldsymbol{\varepsilon_2}$).

Representam-se ainda, na Figura 2.15, as trajectórias de deformação lineares, **ρ**, possíveis de ser encontrados em peças embutidas e correspondentes às diferentes trajectórias de carregamento representada:

$$\rho=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}=\frac{2\alpha\text{-}1}{2\text{-}\alpha} \qquad (2.8)$$

Nos diagramas dos estados de tensão e de deformação das Figuras 2.14 e 2.15 distinguem-se dois domínios correspondentes a modos de solicitação distintos [Rocha 1987].

Domínio de Extensão: este domínio está compreendido entre as trajectórias de deformação correspondentes ao corte puro e à deformação plana ($\boldsymbol{\varepsilon_2}$ **<0**).

Domínio de Expansão: este domínio está compreendido entre as trajectórias de deformação plana e expansão biaxial simétrica ($\boldsymbol{\varepsilon_2} > \mathbf{0}$).

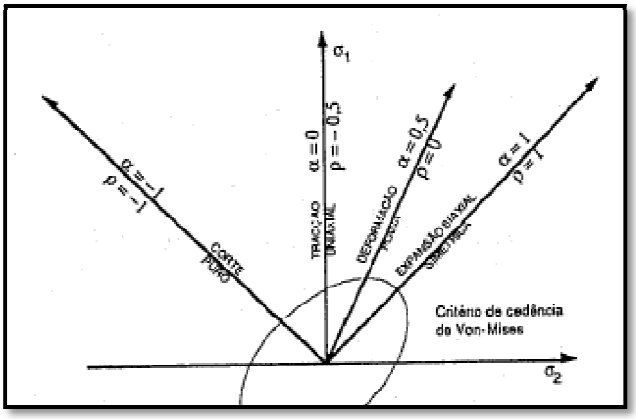


Figura 2.14 - Trajectórias de Carregamento em Peças Embutidas [Rocha 1987]

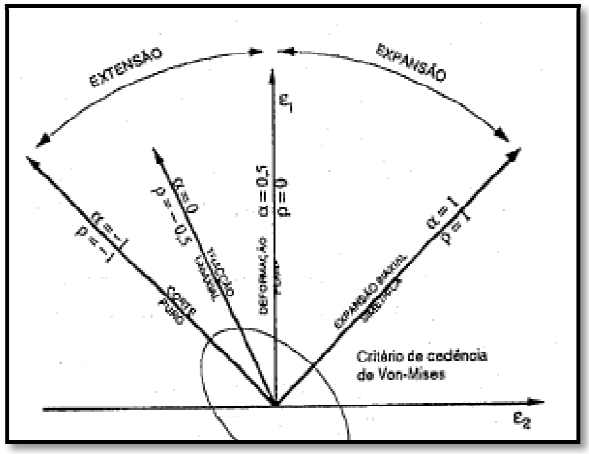


Figura 2.15 - Trajectórias de Deformação Linear em Peças Embutidas [Rocha 1987]

Os dois modos principais de deformação em embutidura dependem directamente da acção do cerra - chapas. Assim, se não existir cerra - chapas ou a pressão do cerra - chapas for insuficiente, o modo de deformação é fundamentalmente por extensão. Se a pressão do cerra - chapas for suficientemente elevada de modo a impedir o deslizamento da chapa entre a matriz e o cerra - chapas, o modo de deformação será fundamentalmente por expansão [Rocha 1992].

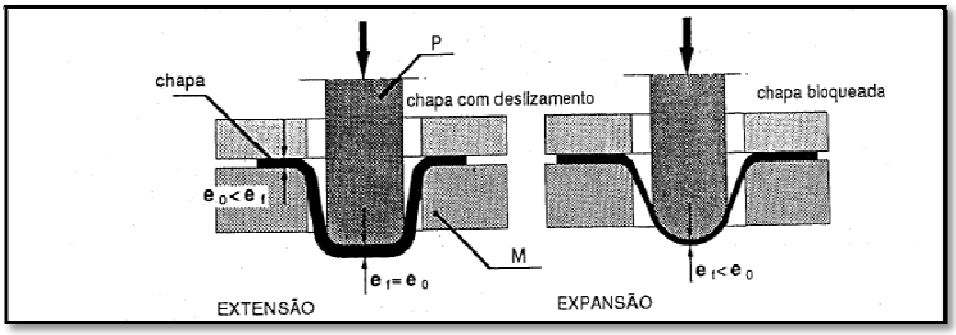


Figura 2.16 - Influência do Cerra-Chapas nos Modos de Deformação
[Rocha 1992]

Numa operação de embutidura real podem, em pontos distintos da peça, estar presentes os dois modos de deformação. Um dos fenómenos que limita a deformação admissível a que a chapa pode ser submetida é a estricção localizada, que precede a rotura e que pode ser bem visível, por exemplo, num ensaio de tracção convencional. No plano das deformações principais (ε_1, ε_2) é assim possível definir uma curva separando o domínio das deformações admissíveis do domínio das deformações não admissíveis (estricção ou rotura). Esta curva designada Curva Limite de Embutidura – CLE – permite caracterizar a conformabilidade das chapas finas, ou seja, a sua aptidão para a deformação plástica, qualquer que seja a trajectória do carregamento [Keeler 1975, Goodwin 1968].

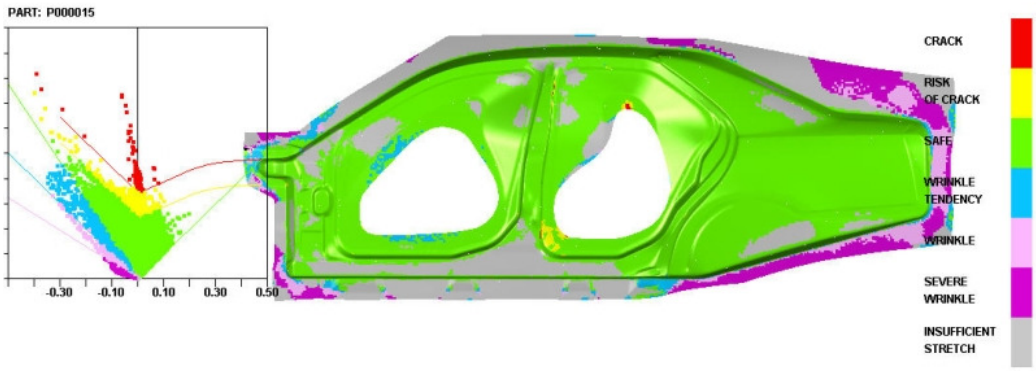


Figura 2.17 - Curvas Limite de Embutidura na Simulação de um Componente Embutido

A determinação experimental da Curva Limite de Embutidura é realizada a partir de vários ensaios de simulação ou ensaios de formabilidade de forma a cobrir uma vasta gama de trajectórias de deformação [Neto].

2.1.2.4 Grelhas de Referência e Utilização das Curvas Limite de Embutidura no Estudo de um Componente Embutido

Outra das ferramentas utilizadas na análise das tensões e deformações em peças de geometria complexa, é o método de gravação de grelhas de referência na superfície da chapa. Este método permite estudar o escoamento do material para o interior da matriz e avaliar os melhoramentos necessários quer ao nível da ferramenta, quer ao nível da matéria-prima. A comparação das deformações medidas na grelha gravada, com a Curva Limite de Embutidura permite-nos avaliar a margem de segurança do embutido.

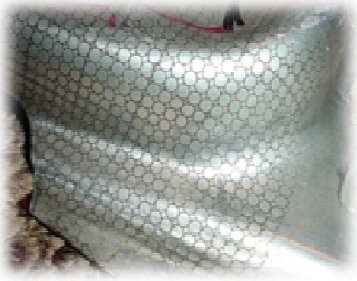


Figura 2.18 - Estudo das Deformações por recurso a Grelhas de Referência

Os ensaios e equipamentos que se descrevem de seguida permitem caracterizar os materiais segundo diferentes trajectórias de carregamentos e de deformação, definindo parâmetros de caracterização dos materiais e pontos da CLE.

2.1.3 Ensaios e Caracterização Mecânica de Materiais

Numa operação de embutidura, a matéria-prima está sujeita a estados de tensão e deformação impossíveis de caracterizar pelo ensaio de tracção convencional. Embora o ensaio de tracção continue a ser uma ferramenta indispensável nos processos de estampagem, com a determinação de n e r (coeficiente de encruamento e anisotropia respectivamente), a caracterização das chapas utilizadas nesta tecnologia passa actualmente pela realização de ensaios específicos que solicitam os materiais de modo mais aproximado ao que se verifica na prática [Neto].

2.1.3.1 Ensaios Elementares – Ensaio de Tracção

O ensaio mais largamente utilizado para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais é, sem margem para dúvida, o ensaio de tracção.

Este ensaio apresenta uma trajectória de carregamento $\alpha = 0$ permitindo assim determinar o ponto da CLE correspondente a esta trajectória de carregamento.

Este ensaio permite ainda determinar os parâmetros de resistência mecânica e de ductilidade, tais como R_e, $R_{0.2}$, R_m e, como já referido, os coeficientes de anisotropia e encruamento. Actualmente, estes índices, podem ser directamente obtidos do equipamento utilizado na realização dos ensaios de tracção, sempre que o mesmo esteja apetrechado com dois extensómetros dispostos em roseta biaxial segundo os planos principais de deformação. A utilização de extensómetros permite ainda obter a curva de tracção real, ou seja, relativa à secção real do provete em cada instante.

O ensaio de tracção encontra-se na categoria dos Ensaios Elementares, à semelhança do ensaio de expansão por enchimento hidráulico (Jovignot). Estes ensaios destinam-se a medir o comportamento mecânico das chapas num caso de solicitação simples, em que parâmetros como o atrito, a lubrificação, etc., não estão presentes.

2.1.3.2 Ensaios de Embutidura

Estes ensaios destinam-se a medir a capacidade de uma chapa formar um embutido simples: Os ensaios de Erichsen, Olsen, Swift, AEG, Fukui, etc., enquadram-se nesta categoria. Estes ensaios são designados correntemente como ensaios de embutidura e alguns são alvo de normalização.

Um destes ensaios de embutidura, o Ensaio de Erichsen Modificado, encontra-se bastante difundido em virtude dos baixos custos do equipamento necessário à sua realização. Neste ensaio a chapa é encastrada entre uma matriz aberta e o cerra - chapas, sendo deformada por um punção hemisférico até atingir rotura por estiramento. A profundidade de penetração do punção no momento da rotura, expressa em milímetros, define o conhecido Índice de Erichsen - I_e. Para uma determinada qualidade de chapa, o índice de Erichsen depende da espessura da mesma. As normas definem as correspondências entre as diferentes espessuras (NF A 36-401).

O punção e as duas faces do provete são lubrificados com uma massa grafitada. O Ensaio Erichsen Modificado difere do original devido ao bloqueio da chapa pelo cerra-chapas [Rocha 1992**].**

Figura 2.19 - Mecanismo de Ensaios Erichsen

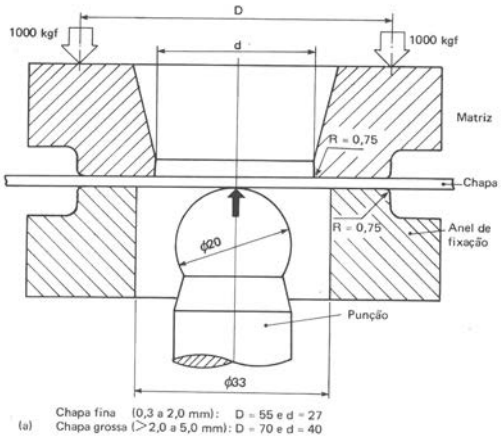


Figura 2.20 - Ensaio de Erichsen Modificado

Um estudo levado a cabo pela Comissão de Embutidura da Sociedade Francesa de Metalurgia permitiu comparar os diferentes ensaios e as diferentes técnicas de determinação de Curvas Limite de Embutidura (CLE). Concluiu-se que as CLE apresentam variações dependendo do tipo de ensaio utilizado sobretudo na vizinhança da deformação plana. Com efeito é necessário considerar duas famílias de ensaios consoante a severidade do gradiente de deformação:

- Ensaios de pequeno gradiente de deformação: Nakajima, ensaio de tracção de provete largo e ensaio Jovignot
- Ensaios de forte gradiente de deformação: Ensaio de tracção de provete entalhado, ensaio Fukui e Swift [Rocha 1992].

As CLE podem depois ser determinadas recorrendo a métodos que assentam nos resultados dos ensaios de formabilidade. Dentre esses métodos destacam-se:

- Método de Veerman
- Método de Bragard
- Método do Duplo Perfil
- Método de Hecker
- Método de Kobayashi
- Método nº 5 de Zurich

2.1.4 Etapas do Projecto de uma Peça Estampada

A obtenção de um determinado componente através de estampagem constitui uma solução técnica adequada sempre que se pretendam produzir grandes séries (amortizando o elevado custo das ferramentas de estampagem) e sempre que a peça seja constituída por paredes de espessura reduzida.

As etapas fundamentais que medeiam entre a necessidade e o produto final são:

- **Determinação das especificações do produto** – Nesta fase são definidas as métricas que o produto deve respeitar tendo em vista o fim que deverá desempenhar;

- **Cálculo estrutural e estabelecimento das métricas geométricas e de material** – Etapa em que se projecta o componente a fabricar, quase sempre recorrendo a softwares de CAD 2D/3D, modelando-se a geometria, definindo-se a espessura e material do componente;

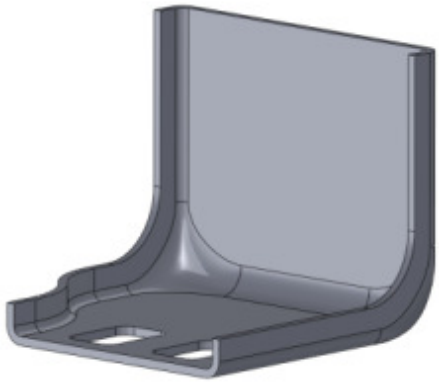


Figura 2.21 - Modelo de um Componente Embutido Concebido em CAD3D

- **Ante-Projecto** – Nesta etapa são definidos o tipo de processo de estampagem a adoptar (simples, progressivo, transfer, etc.) bem como a sequência de operações a realizar. Máquinas e equipamentos necessários ao fabrico das peças também são definidos nesta fase. O resultado desta etapa mais não é que um estudo detalhado da banda de chapa a conformar, estudo esse que deverá conter toda a informação necessária para que se avance para o projecto da ferramenta; Por ser na fase ante-projecto que ficam definidas todas as nuances do processo, poderá ser consultado um estudo detalhado de banda

respeitante a um processo de estampagem progressivo – Figura 2.22. O referido estudo poderá ser consultado na secção *Anexos*.

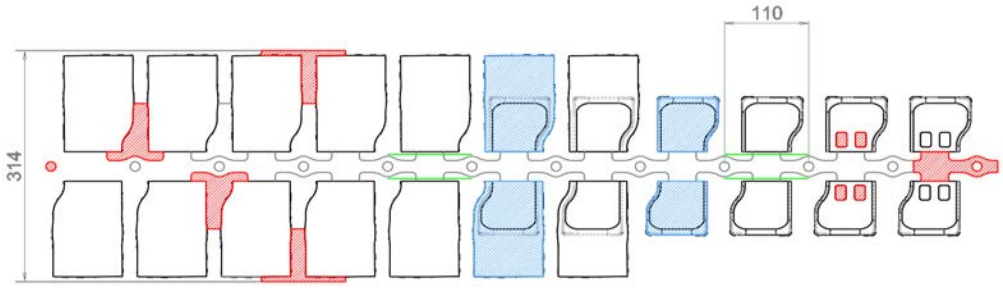


Figura 2.22 - Desenho Detalhado de Banda de um Processo de Estampagem Progressiva

- **Projecto da Ferramenta** – Definição de todos os elementos tecnológicos base que vão permitir a conformação plástica da chapa segundo o estabelecido no Ante-Projecto;

- **Fabrico da Ferramenta** – Mecanização por fundição e/ou maquinagem, de todos os elementos tecnológicos base que, no seu conjunto, constituem as ferramentas de estampagem;

- **Fabrico de Protótipos de Produto e Correcção da Ferramenta** – São fabricadas as primeiras peças protótipo. Nesta etapa analisam-se os desvios existentes nos protótipos relativamente ao produto final pretendido, procedendo-se a pequenas correcções na ferramenta;

- **Fabrico em Série** – Fim das etapas de projecto e início das rotinas operacionais de produção.

2.1.5 Conformação Plástica de Chapas Assistida por Computador

Os processos tecnológicos de conformação plástica de chapa são hoje correntemente utilizados em diversas áreas de produção. A complexidade crescente dos produtos, a constante redução dos ciclos de desenvolvimento e as tendências actuais de utilização de materiais mais leves e mais resistentes colocaram novos desafios aos processos de estampagem. Para fazer face a estes desafios, existe uma sucessiva aproximação ao conceito de produção virtual, e em particular à simulação numérica por elementos finitos. Na última década, tem sido dedicado um extenso esforço no desenvolvimento destas ferramentas numéricas e no estabelecimento de modelos matemáticos que permitam modelar o comportamento da chapa quando sujeita ao processo de conformação plástica. A validação dos novos desenvolvimentos numéricos necessita de resultados experimentais com a maior fiabilidade possível [Teixeira 2005].

As ferramentas numéricas são especialmente importantes na fase de ante-projecto de um componente embutido, já que é nessa fase que deve ser definido qual o processo de embutidura a adoptar, bem como previstas as dificuldades que possam estar inerentes ao processo. Dado o grande número de variáveis que influem sobre a conformação plástica de chapas, o uso de algoritmos que computam métodos de integração baseados em Elementos Finitos, permite a obtenção de um conjunto vasto de informação que, de outro modo, só poderia ser obtida por recurso a métodos experimentais ou empíricos morosos.

Estes softwares permitem modelar o processo de embutidura, apresentando previsões do comportamento do material segundo diversas perspectivas:

- Previsão de Retorno Elástico
- Previsão dos Modos de Deformação
- Previsão de Falhas por Estiramento, Ruptura ou Enrugamento
- Previsão do Atrito entre o componente e a Ferramenta, entre outros.

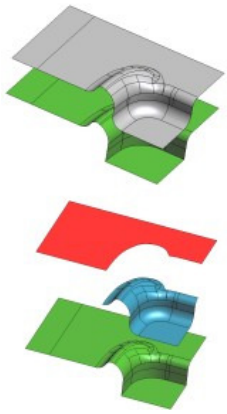


Figura 2.23 - Modelação Numérica dos Elementos Intervenientes no Processo de Embutidura

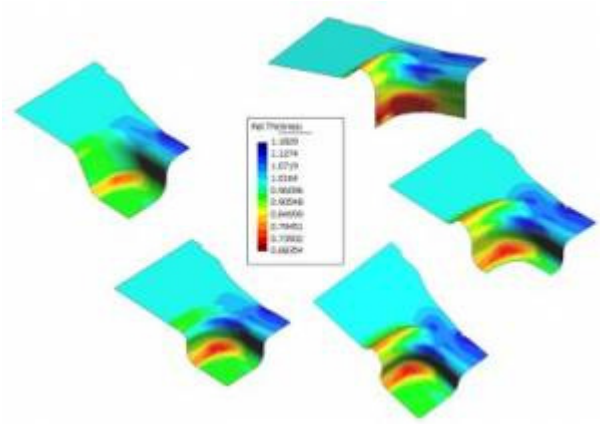


Figura 2.24 - Visualização de Resultados da Simulação Numérica

2.2 Ferramentas, Máquinas e Sistemas Auxiliares

2.2.1 Prensa Mecânica

A prensa é uma máquina capaz de fornecer a uma ferramenta a força e a energia necessárias à conformação plástica de uma chapa (esboço) e assim obter uma peça de forma e dimensões determinadas.

Este tipo de trabalho efectua-se por recurso a um movimento rectilíneo alternativo. É a partir da natureza do agente motor que potencia esse movimento que as prensas podem distinguir-se em:

- Prensas Mecânicas
- Prensas Hidráulicas

Por motivos de síntese, nesta revisão bibliográfica serão abordadas apenas as Prensas Mecânicas, por serem aquelas que mais caras são a esta dissertação.

O funcionamento das prensas mecânicas baseia-se no princípio "biela - manivela" que permite transformar o movimento angular proveniente de um motor de accionamento em movimento rectilíneo alternativo, tal como se mostra a seguir:

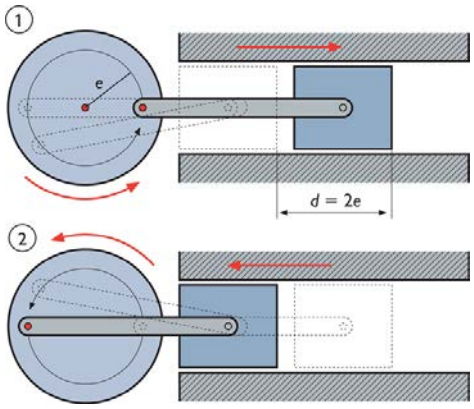


Figura 2.25 - Sistema "biela - manivela"

Na Figura 2.26 é apresentada a anatomia básica de uma prensa mecânica de duplo montante.

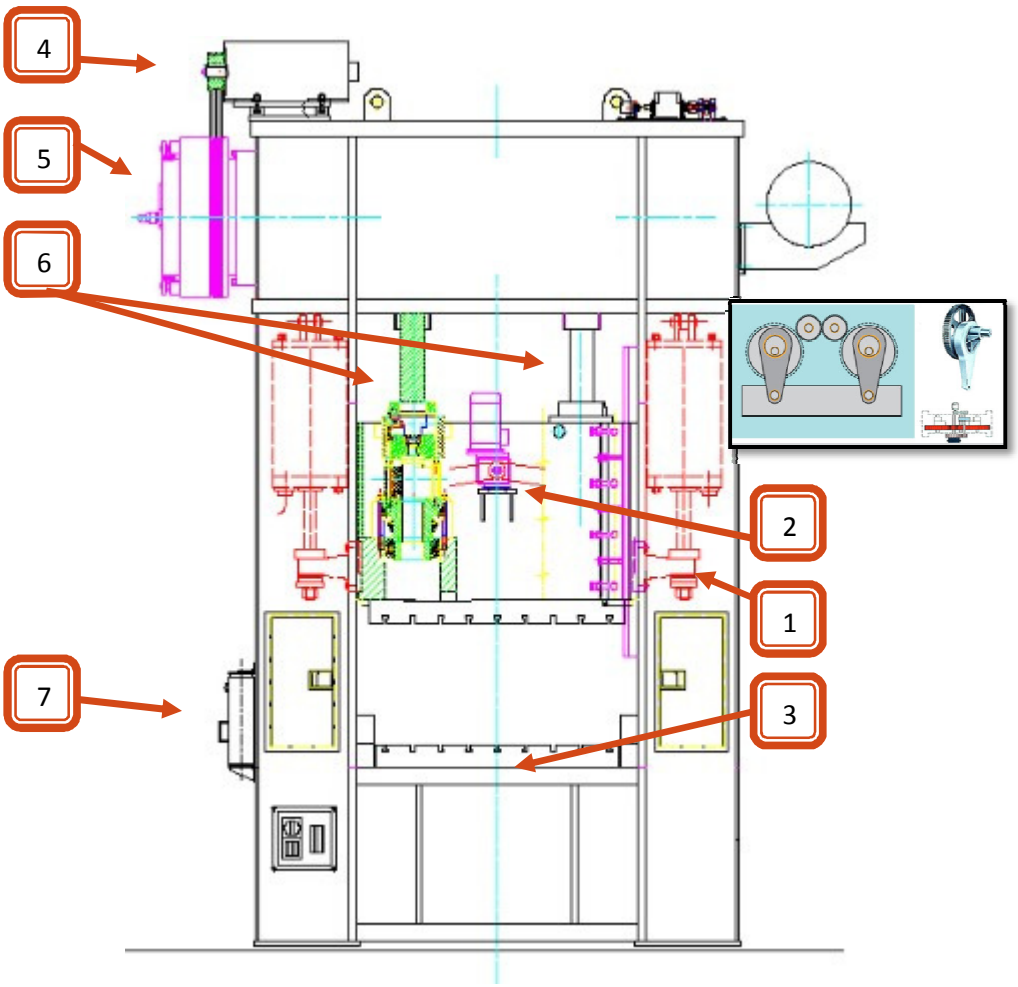


Figura 2.26 - Anatomia Básica de uma Prensa Mecânica de Duplo Montante

1. **Estrutura** – É o "esqueleto" da prensa, sustentáculo de todos os seus órgãos mecânicos. Quanto ao tipo de configuração que a estrutura pode apresentar existem diversas configurações. As mais comuns são as prensas de duplo montante (4 colunas) e as prensas de quadro em C. Este trabalho centrar-se-á nas primeiras, visto que pela sua maior capacidade de carga possuem maior interesse estratégico - industrial.

2. **Carro ou Corrediça** – Parte móvel da prensa que está animada de movimento rectilíneo alternativo. É onde é fixada a metade superior das ferramentas de estampagem, razão pela qual este órgão mecânico possuiu ranhuras, normalmente em forma de "T", na sua superfície inferior.

3. **Mesa** – Elemento fixo da prensa, onde é fixada a metade inferior das ferramentas de estampagem. Á semelhança do carro possuiu ranhuras que permitem a fixação destas últimas. Em adição algumas mesas de prensas apresentam furacões passantes que permitem a evacuação de recortes de sucata.

4. **Motor** – Fonte da energia da prensa. Normalmente está acoplado a um sistema de transformação de potência mecânica que inclui o volante de inércia e um redutor mecânico.

5. **Volante de Inércia** – Reservatório de energia mecânica da prensa.

6. **Biela** – Órgão dinâmico que faz a conexão entre a árvore de excêntricos (manivela) e o carro.

7. **Autómato e Sistema de Controlo** – permite a programação automática de uma prensa, processando diversos tipos de sinais, como são os que provêm de outras unidades que trabalham em série com a prensa (sistemas de alimentação, por exemplo), ou mesmo detecção de interrupção de barreiras de segurança. Este dispositivo pára a prensa sempre que se algum dos sinais (inputs) de controlo, não corresponde aos valores estipulados na programação.

2.2.1.1 Cinemática do Mecanismo

Numa prensa mecânica o movimento alternativo é conseguido através de um sistema biela - manivela (árvore de excêntricos ou cambota e biela). Define-se ponto morto inferior – PMI – como sendo a posição da corrediça correspondente à distância mínima entre a mesa e a corrediça, e ponto morto superior – PMS – como a posição correspondente à distância máxima.

O curso total da corrediça C, é igual a duas vezes o raio r, descrito pelo excêntrico ou manivela, tal que:

$$C = 2r \tag{2.9}$$

Para definição da cinemática de uma prensa mecânica atente-se na Figura 2.27:

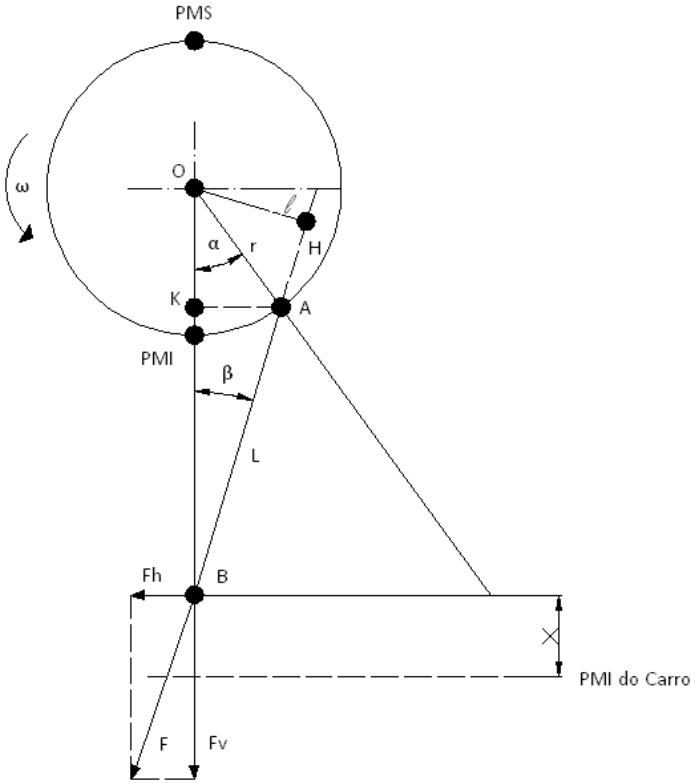


Figura 2.27 - Cadeia Cinemática de uma Prensa Mecânica
[Rocha 2001]

Onde,

- ω – Velocidade Angular
- x – Distância entre o carro e o PMI
- ℓ - Braço da Força F (=OH)
- r – Raio da manivela
- F – Força
- L – Comprimento da Biela

A coordenada "x" da corrediça (cotada a partir do PMI) é dada pela seguinte relação:

$$x = r + L - Lcos\beta - rcos\alpha \tag{2.10}$$

Mas,

$$Lsen\beta = rsen\alpha; \qquad sen\beta = \frac{r}{L}sen\alpha \tag{2.11}$$

Logo,

$$cos\beta = \sqrt{1 - sen^2\beta} = \sqrt{1 - \frac{r^2}{L^2} sen^2\alpha} \quad (2.12)$$

Substituindo,

$$x = r + L - \sqrt{L^2 - r^2 sen^2\alpha} - rcos\alpha \quad (2.13)$$

Sabendo que $\alpha = \omega t$, podemos escrever:

$$x = r(1 - cos\omega t) + L - \sqrt{L^2 - r^2 sen^2\omega t} \quad (2.14)$$

A expressão anterior pode-se escrever de uma forma aproximada:

$$x = r(1 - cos\omega t) + \frac{r^2}{2L} sen^2\omega t \quad (2.15)$$

Ou ainda:

$$x = r(1 - cos\omega t) \quad (2.16)$$

Se voltarmos a substituir ωt por α, temos:

$$x = r(1 - cos\alpha) \quad (2.17)$$

Esta equação permite descrever o movimento vertical do carro relativamente ao PMI [Rocha 2001].

Se, por outro lado, quisermos definir a cota, y, que representa distância do carro ao PMS, a partir das equações anteriores e considerando o ângulo θ como se representa a seguir, temos:

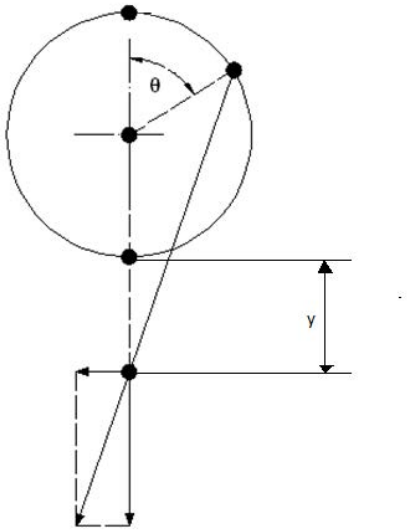


Figura 2.28 - Relação Geométrica entre o Ângulo de Rotação e o Deslocamento do Carro Relativamente ao PMS

A relação entre ângulos vem:

$$\theta = \pi - \alpha \tag{2.18}$$

E a relação entre x e y:

$$y = 2r - x \tag{2.19}$$

Como $x = r\ (1 - cos\alpha)$, temos:

$$x = r(1 - \cos(\pi - \theta)) \tag{2.20}$$

E consequentemente,

$$y = 2r - r(1 - \cos(\pi - \theta)) = r(1 + \cos(\pi - \theta)) \tag{2.21}$$

Como,

$$\cos(\pi - \theta) = -\cos(\theta) \tag{2.22}$$

Chega-se à equação:

$$y = r(1 - \cos(\theta)) \tag{2.23}$$

A definição do curso do carro nestes moldes, ou seja, relativamente ao PMS, é de grande importância pois, como veremos, a programação sequencial das prensas é sempre referenciada desta forma, tomando como origem do deslocamento angular e linear o PMS.

2.2.2 Sistemas de Alimentação

As necessidades produtivas têm conduzido, nos últimos anos, a uma automatização crescente das práticas industriais. Assim, cada vez mais, na produção de grandes séries, são implementadas unidades semi-autónomas que substituem ou minimizam a intervenção dos operários. A indústria de conformação plástica de chapas não é excepção. A chapa necessária a um determinado processo de conformação chega muitas vezes à prensa conduzida por unidades de alimentação de chapa. Estas unidades têm tido a sua evolução particular e, aquilo que à alguns anos eram simples sistemas auxiliares de alimentação, evolui para mecanismos complexos servo - automatizados, com múltiplos parâmetros programáveis.

2.2.2.1 Tipos de Alimentação

Dentro dos sistemas de alimentação automática podem distinguir-se basicamente dois tipos:

- Alimentação Robotizada de Formato: Este tipo de alimentação utiliza robôs equipados com garras, tipicamente mecânicas ou pneumáticas, para recolher o formato de chapa e posiciona-lo sobre a mesa da prensa. O mesmo sistema é usado para recolher a peça estampada. Este sistema é muito utilizado nas linhas fasas, ou “transfer”, como meio de alimentação, recolha, e transferência dos componentes semi-acabados entre a linha de prensas, como veremos a seguir.

- Unidades de Alimentação de Banda: São unidades compostas, projectadas para fornecer chapa em regime contínuo, chapa essa que é fornecida sob a forma de banda ou bobina. Estas unidades são sistemas complexos que integram 3 tipos de acção, a saber:

    - **Desenrolador:** É onde é colocada a bobina de chapa. Trata-se de um mecanismo animado de movimento angular que permite desenrolar a chapa segundo uma determinada taxa, taxa essa que está dependente da cadência do processo de estampagem e do passo de alimentação;

    - **Endireitador ou Calandra:** Constituindo por um conjunto de rolos endireitadores que devolvem à banda de chapa a forma plana;

    - **Alimentador:** Conjunto de rolos tractores que conduzem a banda até á mesa da prensa;

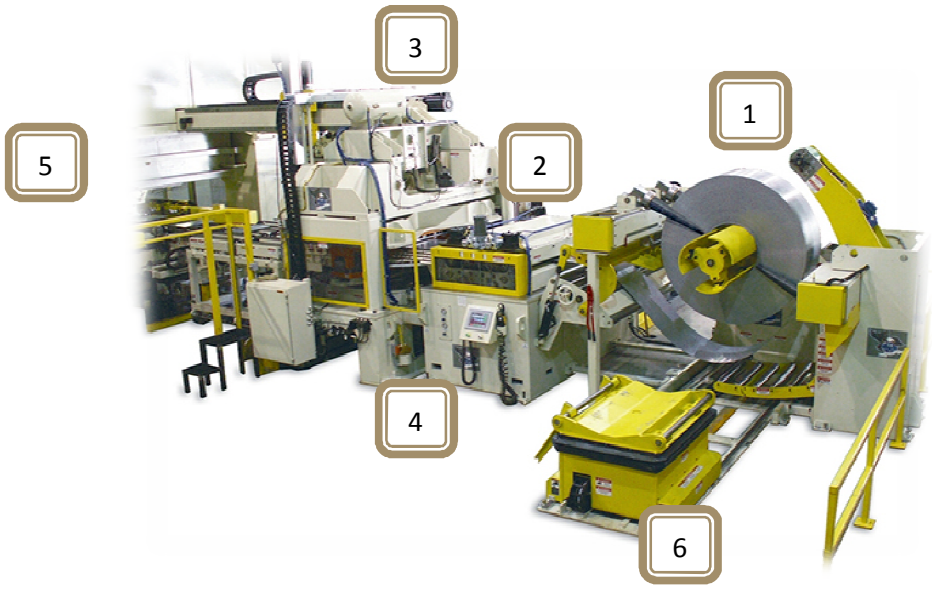


Figura 2.29 - Anatomia Básica de um Sistema de Alimentação de Banda de Chapa

Na Figura 2.29 pode-se observar um sistema de alimentação de banda articulado com a prensa mecânica. Na figura podem distinguir-se:

1. Desenrolador
2. Endireitador
3. Alimentador
4. Painel de Controlo e Consola de Programação
5. Prensa
6. Dispositivo de Mudança Rápida de Bobina

2.2.2.2 Parâmetros Programáveis das Unidades de Alimentação de Banda

As unidades de alimentação de banda são os sistemas tipicamente utilizados nos sistemas de estampagem progressiva. Assim, e para correcta compreensão deste trabalho, apresenta-se a seguir uma breve descrição dos parâmetros programáveis neste tipo de sistemas:

- **Cota P** – Passo de Alimentação. É o deslocamento imposto à chapa em cada ciclo. É normalmente expresso em milímetros e depende fundamentalmente das dimensões do componente a ser estampado que define a distância entre os postos do progressivo.

- **Velocidade de Avanço** – É normalmente expressa em percentagem relativamente à velocidade máxima do alimentador. Esta última é normalmente expressa em milímetros por segundo.

- **Aceleração/Desaceleração** – Define a aceleração/desaceleração aplicada à banda de chapa durante o processo de alimentação. Alguns fabricantes aconselham o uso de valores mínimos deste parâmetro (bem como da velocidade de avanço) para garantir uma melhor precisão do deslocamento de chapa.

- **Contador de Peças** – Define o número de vezes que o sistema de alimentação vai repetir o ciclo de avanço de chapa. Normalmente quando se coloca este parâmetro a zero o sistema de alimentação alimenta até que a bobine de chapa termine, sendo este o modo de proceder mais comum.

- **Pressão nos Cilindros Endireitadores** – Parâmetro de configuração mecânico - manual cuja definição depende em grande parte do operador. Esta pressão não deverá ser tão pequena que permita o escorregamento da chapa entre os rolos, nem tão elevada que conduza à laminagem da chapa.

- **Alinhamento da Alimentação** – Parâmetro de configuração mecânico - manual cuja definição depende em grande parte do operador. Relaciona-se com a centragem banda de chapa relativamente à prensa e ferramenta de estampagem. Uma incorrecta definição deste parâmetro conduz a torções de banda que podem prejudicar severamente o processo produtivo.

2.2.3 Ferramentas de Estampagem

2.2.3.1 Ferramentas de Simples, Duplo e Triplo Efeito

Segundo A. Rocha [Rocha 1992] a distinção entre estes três tipos de ferramentas tem por base o número de forças independentes que a ferramenta consegue desenvolver sobre o material. Assim, as ferramentas de simples efeito aplicam ao material apenas um tipo de solicitação, as de duplo - efeito aplicam duas solicitações distintas, ao passo que as de triplo efeito conseguem aplicar 3 solicitações independentes.

As **ferramentas de simples efeito** são naturalmente as mais simples, produzindo componentes de pequena a média dimensão com alturas de embutidura pouco profunda. Trata-se de ferramentas constituídas fundamentalmente por um punção e uma matriz montados numa prensa de simples efeito. A grande vantagem destas ferramentas é a elevada cadência produtiva proveniente das prensas de simples efeito utilizadas que, tipicamente apresentam ciclos de trabalho mais pequenos.

As **ferramentas de duplo efeito** diferem das ferramentas de simples efeito, normalmente, pela simples existência do cerra - chapas, que cria uma segunda solicitação sobre a chapa. São as ferramentas de uso mais frequente na indústria visto que a maioria dos processos não dispensa a presença do cerra - chapas, sem o qual se verificam muitas vezes rugas ou pregas nos componentes.

As **ferramentas de triplo efeito** conseguem desenvolver três forças distintas sobre a chapa permitindo embutir peças de difícil obtenção numa ferramenta de duplo efeito. Estas ferramentas são especialmente úteis quando se pretende embutir uma peça que necessita de embutidura em dois sentidos contrários. Na actualidade o desenvolvimento de sistemas auxiliares nas ferramentas de estampagem, como os carros de puncionamento e embutidura, já tornou mais frequente encontrarmos ferramentas que, tecnicamente, são consideradas de triplo - efeito, montadas numa prensa de duplo efeito.

2.2.3.2 Ferramentas "Transfer"

O termo "transfert" designa uma sucessão de operações diferentes em várias ferramentas colocadas numa mesma prensa, ou em prensas distintas, em que a chapa ou embutido passa de posto para posto por meio de pinças ou garras, normalmente agregadas a um sistema robotizado. Relativamente aos sistemas de estampagem progressiva, este sistema apresenta uma maior flexibilidade visto que os ajustes podem ser feitos em cada posto, independentemente dos seguintes. As economias atribuídas a este sistema são conseguidas em termos de mão-de-obra e de redução de stocks entre operações. Por outro lado note-se que este processo permite obter peças de grandes dimensões e geometria complexa, quando na vertente de transfer entre prensas, como se representa a seguir.

Figura 2.30 - Linha "Transfer" de Prensas com Alimentação Robotizada

2.2.3.3 Ferramentas Progressivas

Este tipo de ferramentas executa, na grande maioria dos casos, várias operações de embutidura, de corte, de puncionagem, etc., numa determinada sequência, apenas numa única ferramenta. Neste caso as operações são sequenciais e acontecem á medida que a banda ou tira de chapa vai entrando na prensa. Entra cada golpe da prensa dá-se o deslocamento da banda, designado por passo ou avanço da ferramenta. A peça mantém-se agarrada à banda até á última operação onde se finaliza o corte de contorno separando-se a peça da "grade" que a mantinha solidária com a banda. Durante a produção é possível observar, dentro da ferramenta, diversos estágios de conformação da peça no progressivo, sendo que, para que se consiga realizar o avanço entre as diversas etapas, estas ferramentas dispõem de um sistema mecânico de elevação de banda.

São estas, portanto, as ferramentas mais sofisticadas dentro da tecnologia de estampagem, sendo naturalmente mais caras e, por isso, utilizadas apenas em médias e grandes séries.

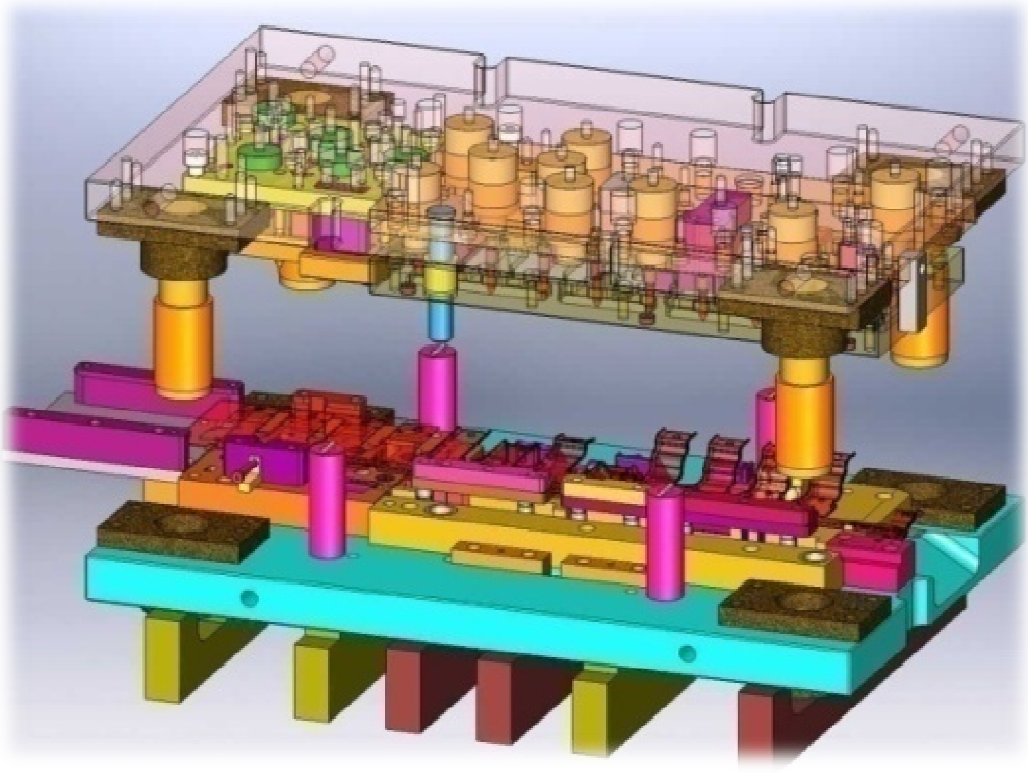


Figura 2.31 - Representação Tridimensional de uma Ferramenta de Estampagem Progressiva

2.2.4 Sistemas Auxiliares

2.2.4.1 Sistemas de Roscagem em Prensa

Por diversas vezes se verifica que os componentes estampados, após o trabalho em prensa, necessitam ainda de outras operações auxiliares, como é o caso da roscagem. Na Figura 2.32 apresenta-se o caso de uma peça roscada produzida por estampagem.

Figura 2.32 - Componente obtido por Estampagem com Roscagem Integrada

Estas peças necessitariam portanto, de dois processos distintos: o de estampagem (embutidura e corte) e o de roscagem. Actualmente existem sistemas que permitem a roscagem de componentes directamente em prensa. Estes sistemas são usualmente aplicados em ferramentas de estampagem progressiva, embora a sua aplicação em processos transfer de prensa única seja também possível.

Estes sistemas podem ser classificados segundo o tipo de accionamento, a saber:

- Accionamento usando a energia mecânica proveniente do movimento linear descendente da prensa;
- Accionamento externo, normalmente por recurso a unidades servo - motorizadas;

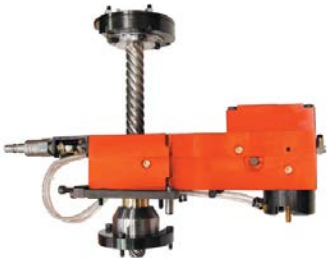


Figura 2.33 - Mecanismo de Roscagem em Prensa

A extremidade superior do mecanismo fixa-se á parte superior da ferramenta. Trata-se de um fuso de accionamento que vai actuar uma transmissão mecânica, de forma a imprimir à cabeça (macho) de roscar o movimento rotacional adequado para a roscagem do componente.

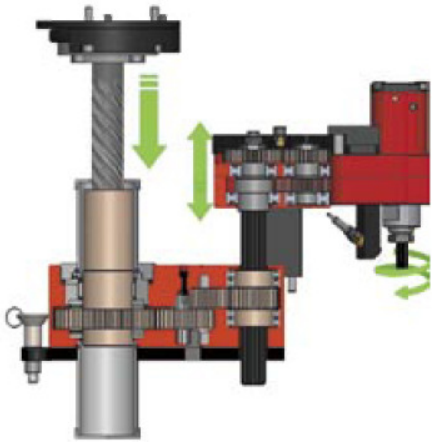


Figura 2.34 - Modo de Funcionamento de um Sistema de Roscagem

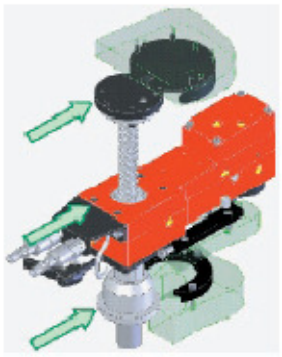


Figura 2.35 - Pontos de Fixação de um Sistema de Roscagem

A extremidade inferior encontra-se fixa à base da ferramenta, enquanto que a parte activa deste mecanismo se encontra junto à banda.

Um pormenor relevante nestes sistemas é que a roscagem não se efectua, como é usual por arranque de apara, mas antes por extrusão de material, ou seja, os filetes de rosca são conseguidos a partir de material que é arrastado a partir das paredes do embutido. Desta forma, examinando-se as roscas resultantes verificar-se-á que, os filetes apresentam um oco, uma cavidade que a extrusão de material não preencheu. Ainda assim, com estes sistemas conseguem-se qualidades de rosca apreciáveis.

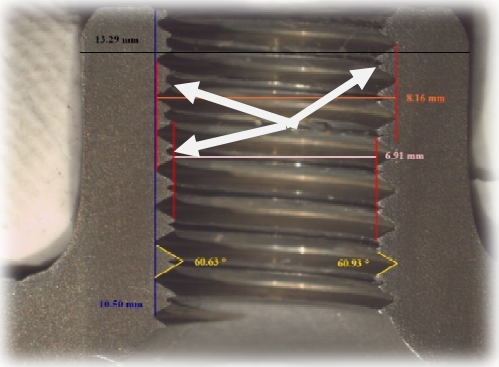


Figura 2.36 - Pormenor do Interior de uma Rosca Obtida por Extrusão

2.2.4.2 Sistemas de Puncionamento por Carros

A definição dos processos de estampagem progressiva implica o estudo da sequência de operações a realizar. Muitas vezes acontece que, um determinado furo, não possa ser realizado nas etapas iniciais do progressivo, pois, como a peça vai sofrer embutidos e quinagens posteriores, corre-se o risco de deformar o furo efectuado. Nesses casos, surge por vezes a necessidade de se realizarem furos (ou mesmo embutido) em direcções que não são a vertical, a do movimento da prensa. Para esses casos, em que é necessário converter o movimento vertical da prensa, num movimento horizontal ou oblíquo, usam-se os carros de estampagem.

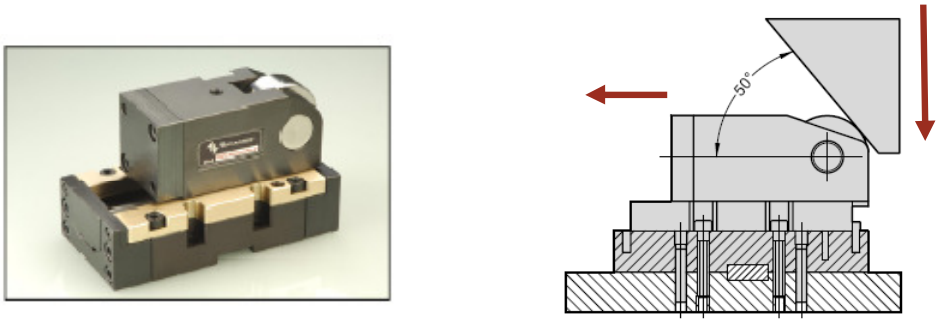


Figura 2.37 – Aspecto de um Carro de Puncionamento

Estes dispositivos são accionados por cunhas fixadas à parte superior da ferramenta. Estas cunhas, ao incidirem sobre o rolete existente na parte anterior do carro, fazem deslizar a sua parte superior – slider – pela decomposição da força e movimento descendentes da prensa, numa componente vertical e numa componente horizontal. Consequentemente, o ângulo mínimo que se pode definir entre a superfície da cunha e o plano da base do carro, não pode ultrapassar 50°, sob pena de dano do mecanismo.

2.2.5 Programação Sequencial Prensa – Alimentador – Ferramenta

Como já foi referido, as prensas utilizadas em processos complexos de estampagem possuem um autómato de controlo que regula o funcionamento automático da máquina e a articulação com os sistemas auxiliares. Dentro destes sistemas merecem especial atenção:

- Barreiras de Segurança
- Sistema de Alimentação
- Ferramenta de Estampagem

O controlo efectua-se por intermédio de sensores e transdutores que permitem à prensa confirmar que determinado tipo de acções ocorreram em tempo próprio e adequado. Essa verificação faz-se, em cada ciclo, tendo por referência o deslocamento angular da cambota relativamente ao PMS (0°). Por exemplo, para a produção de um determinado componente, a prensa está programada para que a alimentação ocorra entre os 320° e os 90°; se dentro dessa janela angular não tiver sido detectada alimentação de chapa, ou se a alimentação apresentar um erro de deslocamento (passo) superior a um determinado valor (tipicamente 1-2mm), a prensa pára, garantindo a segurança de máquinas e operadores, e só retoma o seu funcionamento após intervenção do operador.

Seguidamente apresenta-se, sob a forma de diagrama de blocos, um exemplo de um programa, ou gama de parâmetros, de um prensa de 630 toneladas empregue num processo de estampagem progressivo. Note-se que no referido diagrama não está presente nenhuma referência á interrupção das barreiras fotoeléctricas de segurança. Isto acontece porque os sistemas de segurança não são alvo de programação sequencial, pelo que o autómato pára a prensa sempre que estes sensores são actuados, independentemente do deslocamento angular da manivela.

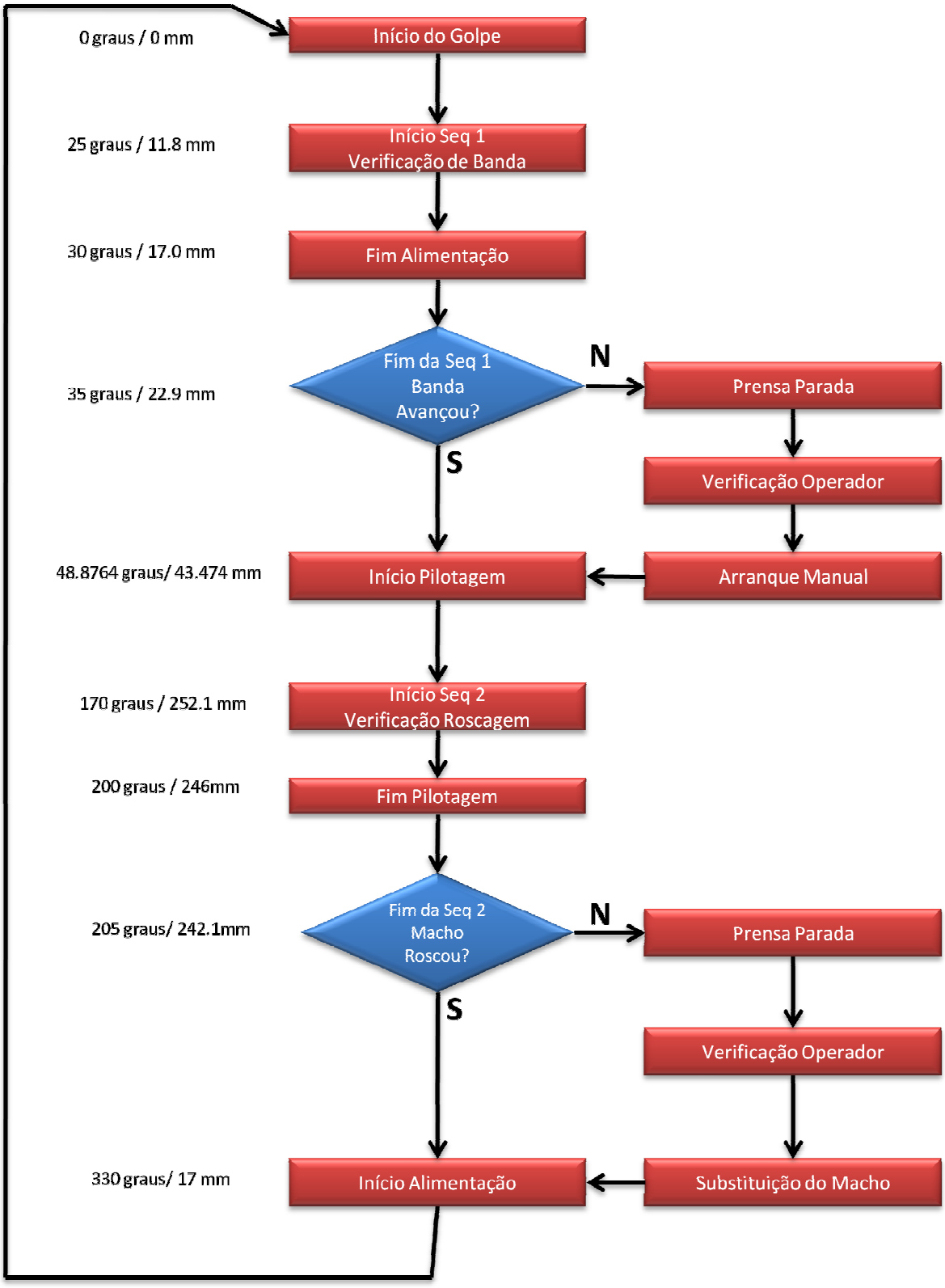


Diagrama 2.1 - Rotina Sequencial de um Processo de Estampagem Progressiva

No Diagrama 2.1 encontra-se sequenciada a programação dos seguintes eventos:

- **Seq 1 – Sequência 1** – Corresponde á verificação de avanço de banda ou, em outras palavras, do correcto ocorrer da alimentação;

- **Inicio e Fim da Alimentação** – Espaço angular para realização do avanço da banda de chapa;

- **Pilotagem** – Corresponde à abertura das pinças do alimentador no sentido de libertar a banda para que os órgãos de centragem da ferramenta a possam posicionar correctamente;

- **Seq 2 – Sequência 2** – corresponde à verificação de um determinado sensor específico de ferramentas especiais. No caso do Diagrama 2.1 corresponde á verificação do fim do processo de roscagem. O sensor garante que o macho de roscar atingiu um determinado valor de deslocamento, garantindo que se não fracturou.

3 Análise Operacional de Rupturas em Ferramentas de Estampagem Progressiva

3.1 Introdução

Constituindo o corpo principal desta tese, este estudo refere-se á análise operacional de roturas em processos críticos de estampagem progressiva. Esta análise surge em contexto industrial visando a resolução de um problema real.

Nela é definida um método de análise que conduza à resolução das seguintes anomalias:

- **Rotura de um Conjunto de Punções de Embutidura e Corte**
- **Falha no Processo de Roscagem em Prensa**

Após definição do método operacional é realizado um conjunto de ensaios mecânicos de forma a determinar quais as causas que conduzem à rotura.

A realização de ensaios engloba todos os elementos intervenientes no processo de conformação, como sejam a prensa mecânica, o sistema de alimentação, a matéria-prima, ferramenta, etc.

Os resultados serão depois discutidos com vista a que, apuradas as causas do problema, se proceda à estruturação de medidas operacionais para aplicação industrial.

O presente estudo tem como **Objectivos**:

- Compreender o problema de forma abrangente;
- Apresentar a análise global das variáveis que poderão estar na origem do problema;
- Estruturar um procedimento sequencial de ensaios técnicos que conduzam á identificação das principais causas de falha;
- Avançar para possíveis soluções recorrendo, sempre que possível à aplicação dos conhecimentos académicos e técnicos de Engenharia;
- Organizar o presente estudo para que se revele um guia, um auxiliar, na análise de causas de rotura de ferramentas em processos de conformação plástica de chapas.

3.2 Apresentação do Componente

3.2.1 Geometria

O componente a produzir é parte integrante de um conjunto mecânico a ser aplicado na construção das portas de um veículo automóvel do tipo monovolume. O conjunto é solidarizado por soldadura e possui funcionalidades estruturais no veículo, tendo sido projectado pelo cliente em função das solicitações que terá de suportar. O desenho do conjunto mecânico pode ser consultado na secção *Anexos*. Na Figura 3.1 é apresentada a forma geométrica geral do componente, bem como a sua relação com outros elementos do conjunto. O componente será doravante tratado pela sua referência de lote: **PT428**.

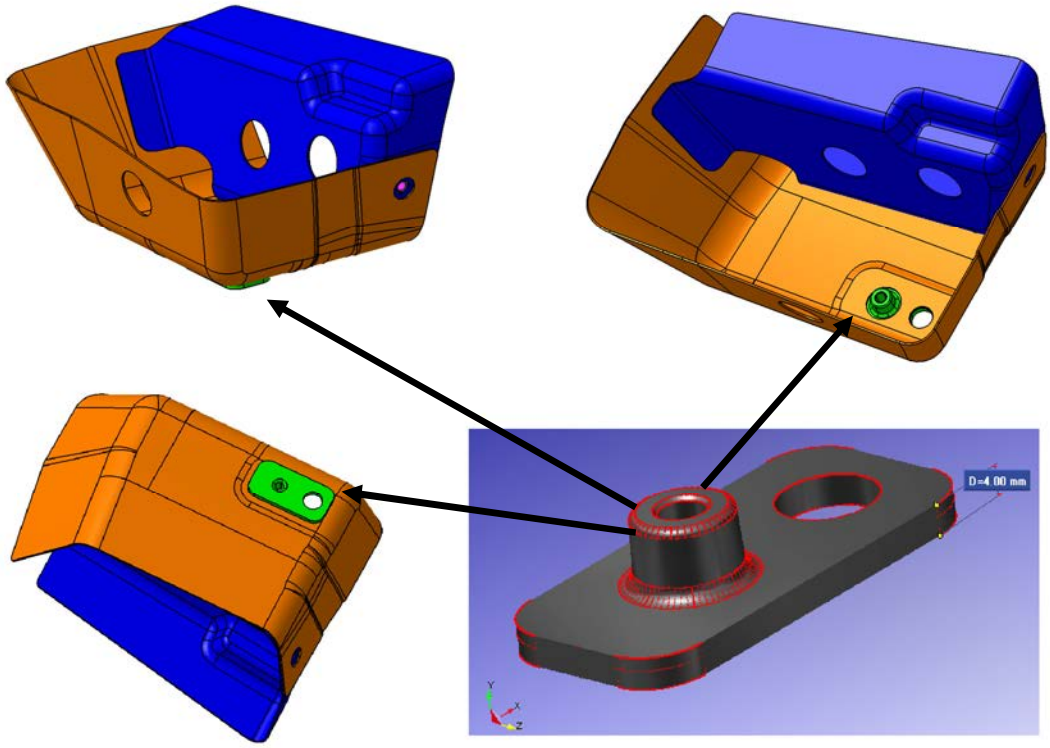


Figura 3.1 - O Componente PT428 e sua relação com o Conjunto Mecânico

3.2.2 Processo de Fabrico

O PT428 é obtido por recurso ao processo conhecido como estampagem progressiva, em que uma banda de chapa é conduzida através de várias etapas de corte/embutidura, realizadas sequencialmente na mesma ferramenta, até à última etapa que define a forma final do componente.

As características geométricas da banda de chapa utilizada vêm na Tabela 3.1:

Material	Largura (mm)	Espessura (mm)	Passo (mm)
S355MC (EN10149-2)	164	4	52

Tabela 3.1 - Características da Banda de Chapa

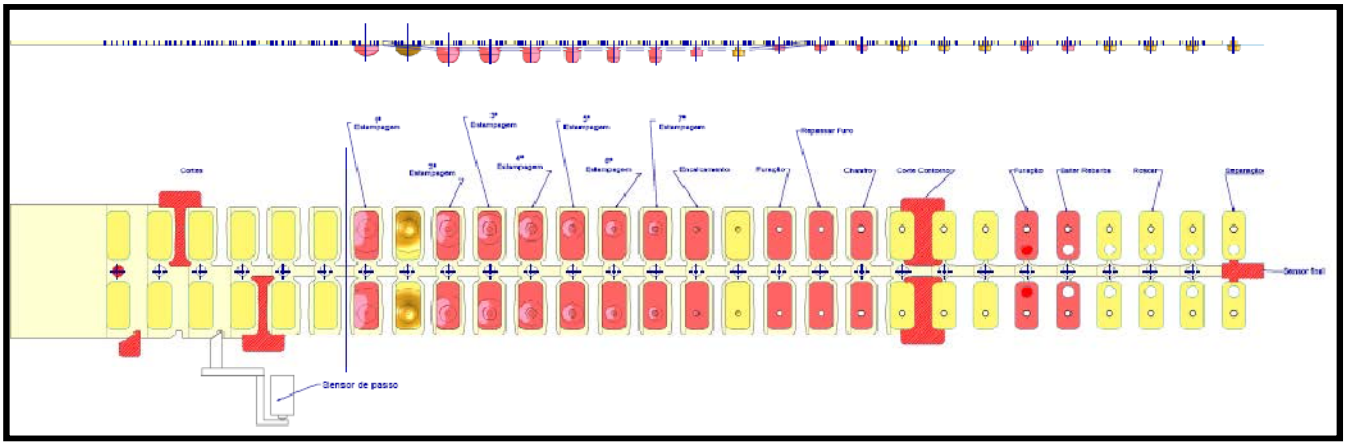


Figura 3.2 - Evolução da Banda através dos Diversos postos do Progressivo

3.2.3 Máquinas

3.2.3.1 Prensa Mecânica

A conformação da banda é feita por recurso a uma prensa mecânica ARISA de 400 ton. de capacidade, cujos dados se encontram listados abaixo.

Figura 3.3 - Prensa Mecânica usada no fabrico do componente em estudo

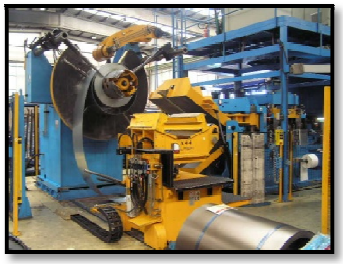
Marca	Capacidade de Carga (ton.)	Ano	Dimensões da Mesa/Carro (mm)	Curso (mm)	Regulação (mm)	Cadência (golpes/min.)
ARISA	400	1997	2700 x1200	100 - 350	146	15-40

Tabela 3.2 – Características da Prensa Mecânica

3.2.3.2 Sistema de Alimentação

A alimentação de banda é assegurada por uma unidade Fagor ARRASATE 600 x 3, cujos dados se encontram listados a seguir.

Figura 3.4 - Sistema de Alimentação



Largura Max. Banda	**Espessura Max. Banda**	**Espessura Min. Banda**	**Nº de Cilindros de tracção**	**Nº de Cilindros Endireitadores**	**Ø Cilindros**	**Dureza Cilindros**	**Altura de Alimentação**
600 $\boldsymbol{mm}$	3 mm	0.8 mm	4	7	80 mm	62 HRC	1150 mm
Regulação de Altura	**Velocidade de Avanço**	**Precisão de Avanço**	**Potência do Motor**	**Tensão de Funcionamento**	**Sentido de Alimentação**	**Desbobinado**	**-**
+/- 100 $\boldsymbol{mm}$	42 m/min	+/- 0.1 mm	7 KW	380V (50Hz)	Esq. – Dir.	Inferior	-

Tabela 3.3 – Características do Sistema de Alimentação

3.2.4 Características do Material

O material a conformar, segundo a norma EN10149-2, é o **S355MC**, cujas propriedades são listadas nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Code	Norme		Re min.	max.	Rm min.	max.	A <3	A 3-5.65
EN 10149-2	Faurécia	S355MC	**355**	-	**430**	500	20	25

Tabela 3.4 – Características Mecânicas do Aço S355MC

Quanto à distribuição de elementos de liga tem-se:

C	Si	Mn	P	S	Nb min.	Nb max.
0,10	0,40	0,90	0,025	0,015	0,01	0,06
V min.	**V max.**	**Al min.**	**Al max.**	**Ti min.**	**Ti max.**	
0,01	0,08	0,010	0,08	0,01	0,10	

Tabela 3.5 – Distribuição de Elementos de Liga do Aço S355MC

Segundo o International Iron and Steel Institute pode-se considerar aço de alta resistência (High Strength Steel) todo o aço que apresenta valores de tensão de cedência compreendidos entre 210 e 550 MPa, e de tensão de rotura no intervalo compreendido entre 270 e 700MPa. É neste grupo que se encontra inserido o aço S355MC. A conformação plástica deste tipo de materiais vem portanto acrescida de dificuldades inerentes às propriedades de resistência do próprio material. Em complemento muitos processos de conformação lidam com espessuras de chapa mais ou menos elevadas o que, em aços desta gama, conduz frequentemente os equipamentos usados na produção das peças ao seu limite técnico.

Neste sentido, pela grande influência que as características do material possuem em processos críticos de conformação de chapas, foi efectuada a caracterização do material S355MC que poderá ser consultada na secção *Anexos* deste trabalho.

3.3 Apresentação do Problema

Por altura da realização deste estudo, a peça já se encontrava em fase de produção, com cerca de 100.000 unidades [pares] já produzidas. Nesta fase é vulgar que a generalidade dos problemas frequentemente encontrados no fabrico deste tipo de componentes já esteja resolvida. A ferramenta de estampagem deveria encontrar-se perfeitamente afinada e só deveria ser corrigida periodicamente devido a desgaste natural dos elementos de corte/embutidura, típico em tão longas séries.

Figura 3.5 - Várias Etapas do processo progressivo do componente PT428

No entanto tal não se verificou. Desde o início dos primeiros ensaios da ferramenta que se verificaram dificuldades acrescidas na obtenção de peças conformes com as especificações e, em acréscimo, roturas frequentes na ferramenta.

De forma sintética, na fase de afinação os problemas encontrados foram:

1. Tolerâncias geométricas por cumprir (planeza, etc.);
2. Marcas na peça derivadas de excesso de sucata na furação (limalha);
3. Desgaste excessivo dos punções de corte;
4. Ruptura dos punções de corte e embutidura;
5. Deformação dos punções de corte e embutidura;
6. Roscado interior imperfeito e dificuldades várias no processo de roscagem;

Após a fase de afinação da ferramenta os problemas que persistiram foram:

- **Ruptura Frequente de Punções;**
- **Falhas no Processo de Roscagem.**

Numa primeira análise, podemos atribuir a sua causa à seguinte conjugação:

1. Características resistentes do material
2. Espessura de chapa elevada
3. Diâmetro reduzido dos punções de embutir (Punção 16)

Estes factores levam a que o presente processo de estampagem seja crítico, ou seja, alguns elementos de ataque da ferramenta encontram-se no limite pré-rotura, pelo que qualquer anomalia ou desvio nas variáveis do processo conduz ao dano da ferramenta.

Figura 3.6 - Fractura do Punção de Embutir

Este estudo visa analisar as possíveis causas dos problemas de rotura de punções e falhas de roscagem, num esforço de estabelecer um caminho que conduza à resolução dos problemas.

No que respeita à rotura dos punções, serão analisados com mais pormenor os elementos construtivos correspondentes às etapas 16, 17, 18 e 19 do progressivo, por serem aqueles em que se verificam roturas frequentes da ferramenta. Qualquer outra etapa do processo de estampagem, bem como qualquer processo adjacente que possa ter influência nas roturas verificadas, será igualmente alvo de estudo.

Pretende-se de igual forma identificar e solucionar a causa das falhas de roscagem do componente.

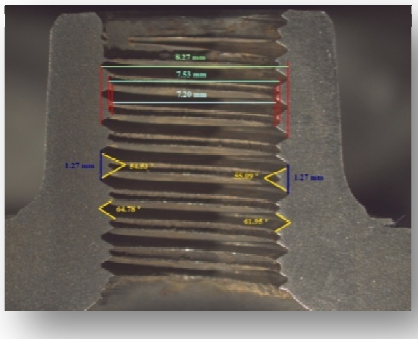


Figura 3.7 - Falhas na Rosca do componente PT428

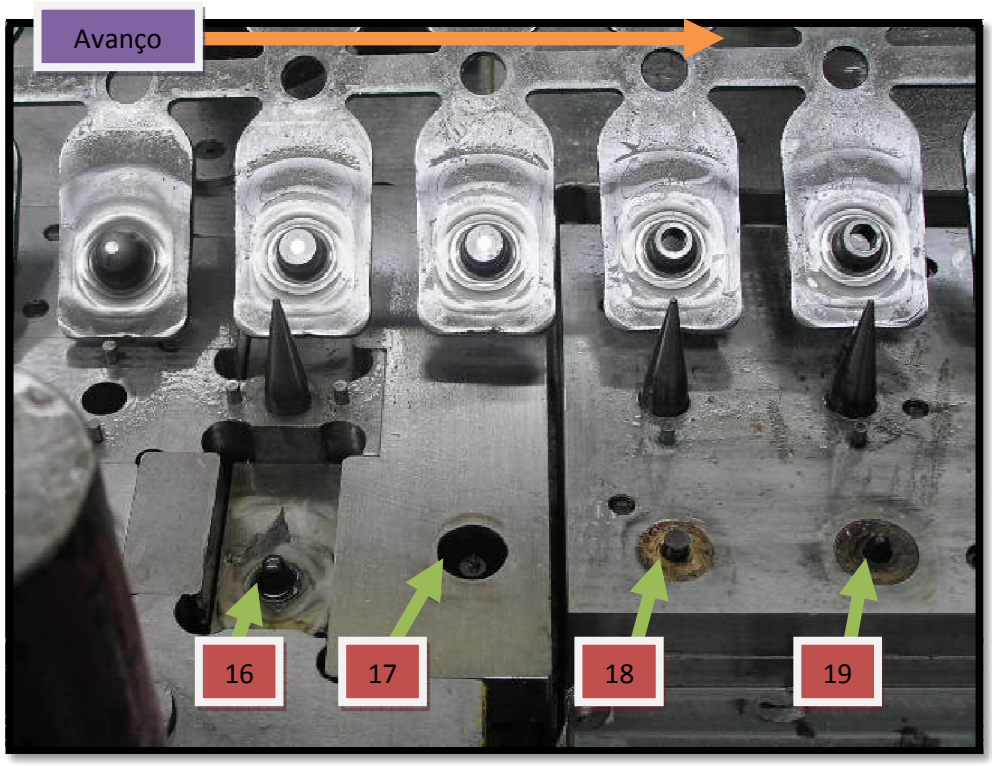


Figura 3.8 - Pormenor dos Punções das Etapas Críticas

Na Figura 3.8 encontram-se representados os punções em que se verificam roturas frequentes, a saber:

- **Punção 16** – Rebatimento inferior do embutido
- **Punção 17** – Calibração do embutido
- **Punção 18** – Corte (furação)
- **Punção 19** – Calibração do furo

Figura 3.9 - Punção 16 Gravemente Danificado

3.4 Metodologia

Para alcançar os objectivos propostos foi definida a seguinte sequência operacional:

Diagrama 3.1 – Metodologia Utilizada na Análise

- **Análise Global das Variáveis Envolvidas no Processo:** Devido á complexidade dos diversos elementos envolvidos no processo de conformação, torna-se necessário considerar as diversas variáveis que cada um deles introduz no processo, estruturando um conjunto de ensaios que permita avaliar a influência das mesmas no caso de estudo;
- **Análise de Indícios e Definição dos Ensaios Prioritários:** Sendo parte integrante *da Análise Global das Variáveis Envolvidas no Processo*, esta etapa trata da identificação de indícios que coloquem em evidência as causas mais prováveis do problema. Desta forma, poderá ser feita uma triagem às variáveis candidatas, de forma a reduzir consideravelmente o número de ensaios a realizar;

- **Realização dos Ensaios Prioritários:** Nesta etapa são realizados os ensaios e verificações de mais importância, conforme o definido na etapa anterior;

- **Análise de Resultados:** Nesta etapa analisam-se os resultados dos diversos ensaios e verificações no sentido de os relacionar com a origem das falhas do processo. Nesta fase já deve ser possível identificar um conjunto de causas que conduzam às anomalias. Quando tal não acontece deverá ser considerada a realização dos ensaios *não prioritários* com vista a recolher outros elementos de análise. Por outro lado, desta análise podem resultar novos indícios, que estabeleçam outros ensaios como sendo prioritários. Este processo iterativo só deve terminar quando esteja definida uma causa, ou conjunto de causas que permitam a definição de medidas operacionais;

- **Definição de Medidas Operacionais:** após a identificação da causa (ou causas) do problema deverão ser definidas as medidas correctivas a implementar;

- **Implementação e Desenvolvimento:** Implementação das medidas que conduzem à resolução das falhas.

3.5 Análise Global das Variáveis Envolvidas no Processo

Pelo exposto deverão ser estudadas de forma exaustiva todas as possíveis causas que levem a desvios no funcionamento regular do sistema de estampagem, pois estes, em conjugação com as dificuldades referentes ao material, conduzem às falhas do processo.

A totalidade do sistema envolvido na estampagem do componente em estudo é constituído por:

- Prensa Mecânica
- Sistema de Alimentação de Chapa
- Ferramenta de Estampagem
- Processo de Estampagem
- Material a ser Conformado

Na Tabela 3.6 são apresentadas as diversas possibilidades de falha para cada um destes elementos constituintes do sistema, listando à frente quais os estudos a efectuar para confirmar ou excluir a hipótese inicial.

			Falha Associada	
Elemento do Sistema	Variável/Possível Anomalia	Estudos a Efectuar	Ruptura de Punções	Falhas de Roscagem
Prensa Mecânica	Falta de Paralelismo entre a Mesa e o Carro	Medição de Paralelismo	x	x
		Medição da Distribuição de Carga entre Bielas	x	
		Medição de Planeza	x	x
Sistema de Alimentação	Instabilidade no Passo de Alimentação	Análise dos Parâmetros de Alimentação		x
		Avaliação da Conformidade do Alimentador		x
	Articulação dos Parâmetros de Alimentação na Programação da Prensa	Restruturação Sequencial		x
Ferramenta de Estampagem	Variação das Propriedades do Material Relativamente às Especificações	Ensaios de Dureza e Materialográfico dos Punções Críticos	x	
	Toleranciamento Geométrico e Dimensional	Verificação Geométrica e Dimensional da Ferramenta	x	
	Distribuição de Esforços pelos Postos de Estampagem Inadequada	Estudo Teórico e Simulação Numérica	x	
Processo de Estampagem	Nº de Passos de Embutidura Muito Reduzido	Estudo Teórico	x	
	Velocidade de Estampagem Inadequada	Simulação	x	
Material	Variação das Propriedades do Material Relativamente às Especificações	Ensaio de Tracção	x	
		Ensaio de Estampabilidade	x	
		Medição de Dureza	x	

Tabela 3.6 – Possibilidades de Falha Associadas aos Elementos do Sistema

Considerando a variedade de ensaios e verificações a realizar torna-se necessário efectuar uma triagem que tenha como objectivo seleccionar de entre as variáveis candidatas aquelas que apresentam maiores evidências no sentido de estarem na origem do problema. Assim passa-se á exposição das evidências, dos indícios recolhidos em ambiente industrial, que servirão de suporte a essa selecção.

3.5.1 Análise de Indícios das Causas de Ruptura

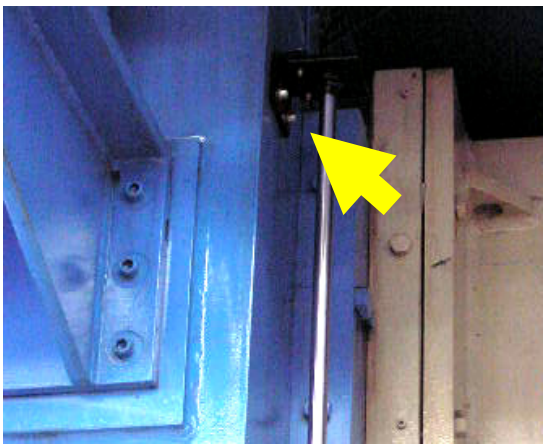
3.5.1.1 Estado de Superfície da Mesa da Prensa

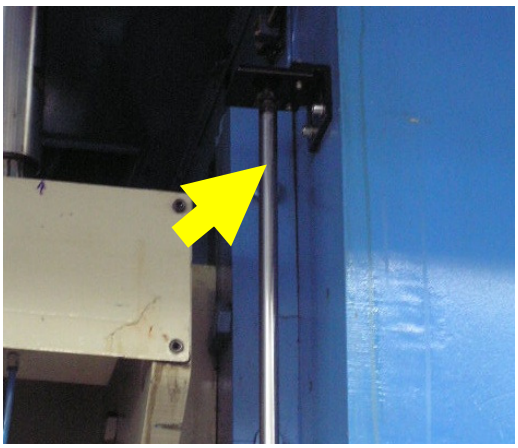
O processo de troca rápida de ferramenta existente na Gestamp Portugal é constituído por uma mesa móvel onde é fixada a matriz, e por um conjunto de fixadores hidráulicos que permitem uma substituição veloz das ferramentas de estampagem entre as operações escalonadas pelo departamento de produção. No entanto, após a produção de uma determinada quantidade de um componente, acumulam-se na mesa da prensa fragmentos de sucata provenientes das operações de corte e embutidura realizadas. Verifica-se na maioria das vezes que estes fragmentos não são removidos da superfície das prensas (operação de manutenção considerada de nível 1), ficando situados entre a superfície da mesa e a matriz da ferramenta de estampagem da produção seguinte, dando origem a marcas severas que têm consequências a nível do paralelismo entre a mesa e o carro do mecanismo, bem como em relação à planeza que deve existir na referida mesa [Pais 2008]. Estas anomalias conduzem a um funcionamento irregular do conjunto prensa-ferramenta, causando uma distribuição não uniforme da carga podendo levar a falhas no processo produtivo, defeitos nas peças obtidas, danos nas prensas bem como nas ferramentas.

Figuras 3.10 e 3.11 - Danos verificados nas Mesas das Prensas por Esmagamento de Sucata

3.5.1.2 Excentricidade das Cargas Aplicadas

Os diversos processos de estampagem em decurso na planta produtiva recorrem a ferramentas, muitas das quais progressivas, em que os diversos passos de embutidura/corte necessários à obtenção do componente final apresentam necessidades de carga distintas entre si, pelo que a distribuição de carga na ferramenta será assimétrica, da mesma forma que a distribuição de carga no carro, corrediça e bielas da máquina, no momento do impacto correspondente ao golpe da prensa. Em complemento cada prensa é utilizada no fabrico de diversos componentes diferentes diariamente, cada um deles com a sua ferramenta portadora de uma assimetria de cargas própria. O trabalho continuado neste regime leva a uma potenciação do fenómeno de fadiga por trabalho mecânico nos equipamentos levando à sua degradação e funcionamento irregular que naturalmente prejudica o correcto funcionamento das ferramentas e processos de estampagem. Nas Figuras 3.12 e 3.13 é apresentado um exemplo de assimetria nas folgas da prensa provocado por trabalho mecânico assimétrico.





Figuras 3.12 e 3.13 - Folgas Assimétricas nos Guiamentos do Carro da Prensa PO24

A distribuição uniforme da capacidade de carga numa ferramenta progressiva de estampagem pode ser conseguida aplicando nas etapas menos exigentes cilindros de nitrogénio que elevem a carga de conformação necessária nessa etapa até um nível próximo da carga necessária nas etapas de maior esforço. Este melhoramento implica naturalmente um maior custo no projecto e fabrico da ferramenta, bem como uma maior energia necessária à conformação. Não obstante com este procedimento pode conseguir-se decréscimos e poupanças substanciais em operações de manutenção, componentes danificados, bem como diminuir a ocorrência de defeitos nos componentes por funcionamento irregular da prensa.

3.5.1.3 Aspecto de Fractura nos Punções e Matrizes

Na detecção de problemas de estampagem que envolvem o dano das peças em fabrico ou dos componentes da própria ferramenta, a observação cuidada dos elementos danificados pode conduzir a uma melhor compreensão do sucedido permitindo, por conseguinte, avançar para a resolução técnica adequada.

Neste sentido foi possível obter alguns dos elementos funcionais da ferramenta que foram substituídos por se encontrarem danificados. Entre eles figuram punções de estampagem e de corte, casquilhos e matrizes do tipo MPB. Note-se que os elementos danificados que foi possível recolher não constituem a totalidade dos elementos danificados da ferramenta em estudo. Isto porque não existe na Gestamp Portugal uma logística de recolha análise e armazenamento deste tipo de elementos, potenciando um entendimento mais reduzido dos problemas.

3.5.1.3.1 Punções de embutir – 16

Figura 3.14 - Fractura do Punção 16

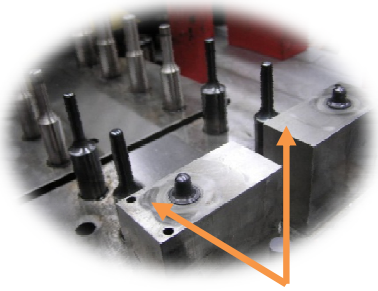


Figura 3.15 - Blocos Temperados que envolvem o Punção 16

Relativamente ao punção 16 é importante ter em conta:

- Quando se verifica rotura deste punção é frequente que ocorram roturas nos punções a jusante (principalmente nos punções 17, 18 e 19);
- Este punção já foi alvo de diversas modificações no sentido de solucionar o problema de rotura. Entre as mais importantes figuram:
    - Modificações relativas à geometria do punção em termos de conicidade, raios de concordância, etc;
    - Inclusão de uma etapa extra (que actualmente corresponde à etapa 17) para calibração do embutido;
- A fractura ocorre mais frequentemente num dos lados da ferramenta;
- O punção encontra-se protegido por um bloco de aço temperado que serve para rebater a superfície do componente (para assegurar a planura), estando impedido de encurvar para além da folga existente entre o seu corpo e o furo do bloco de aço;
- A fractura ocorre após a produção de alguns milhares de peças: trata-se se uma fractura por fadiga.

3.5.1.3.2 Punções de Corte – 18

Figura 3.16 - Desgaste Localizado nos Punções 18 e 19

Figura 3.17 - Cabeça Fracturada do Punção 18

Relativamente ao punção da etapa 18 (corte) é importante ter em conta:

- Verifica-se um desgaste localizado num dos lados do punção de corte (18);
- O referido desgaste tem consequências na etapa seguinte (19) em que o punção que calibra o furo é levado também a desgastar-se no lado oposto para compensar a deficiência do trabalho realizado no posto anterior;
- Estas anomalias ocorrem apenas num dos lados da ferramenta;
- Note-se que se os punções 18 e 19 estivessem alinhados entre si, por muito que a banda ou a ferramenta apresentassem desvios, não se verificaria desgaste dos dois punções mas tão somente do primeiro punção, pois o outro, respeitando o mesmo desalinhamento não teria como desgastar-se;
- Em relação ao exposto deve ter-se em conta que, devido às várias roturas verificadas, as etapas do progressivo em estudo já foram severamente agredidas, pelo que é de considerar que o posto de corte (18) apresente deformações a nível da placa porta punções que estejam a conduzir aos desgastes acima discutidos;
- Na Figura 3.17 pode ainda ver-se uma imagem do punção 18 (corte) cuja cabeça se encontra completamente destruída (esta anomalia ocorre pontualmente), apontando mais uma vez, para um trabalho mecânico irregular.

3.5.1.3.3 Matrizes de Corte

Figuras 3.18 e 3.19 - Matrizes de Corte Gravemente Danificadas (Etapa 18 do progressivo)

Relativamente ás matrizes de corte (etapa 18) é importante ter em conta:

- A incidência dos defeitos indicia um ataque incorrecto do punção 18, que já tinha sido indiciado como possivelmente desviado. Mais uma vez se deve ter em conta que esta anomalia se verifica apenas num dos lados da ferramenta.

3.5.1.3.4 Casquilhos de Guiamento

Figuras 3.20 e 3.21 - Casquilhos de guiamento Danificados (Etapas 18 e 19 respectivamente)

Relativamente aos casquilhos de guiamento é importante ter em conta:

Os danos visíveis nas Figuras 3.20 e 3.21 não derivam de nenhum ataque irregular dos punções, mas são um reflexo da violência que a rotura dos punções em estudo inflige aos órgãos adjacentes da ferramenta, podendo conduzir a alterações permanentes (e algumas imperceptíveis a olho nu) da geometria da ferramenta, com consequente alastrar de problemas para o processo.

3.5.1.4 Comportamento Irregular no Avanço de Banda

O fluxo de chapa entre as várias etapas da ferramenta progressiva é assegurado por um sistema de alimentação programável. Este sistema deve ser configurado para cada componente a produzir actuando em diversos parâmetros, como:

- O passo, ou medida de avanço da banda de chapa entre as etapas do progressivo;
- O aperto da chapa por entre os rolos do endireitador;
- A velocidade, aceleração e desaceleração com que é efectuado o avanço;
- Os ângulos de rotação da manivela da prensa em que o alimentador deverá bloquear ou fazer avançar a chapa;
- Outros (a tratar em pormenor no estudo do sistema de alimentação).

Figura 3.22 – Marcas Causadas por Roscagem Excêntrica

Por outro lado o correcto posicionamento da banda na ferramenta é também assegurado por recurso a elementos da própria ferramenta, como são:

- Pilotos, ou pinos de guiamento de banda;
- Guias laterais;
- Os próprios punções ou machos da ferramenta no início do ataque à chapa;

Durante a observação de campo, enquanto a ferramenta estava a ser usada para produção foi possível verificar:

- Um recuo apreciável da banda no momento do fechar da ferramenta;
- Movimentações laterais de banda imediatamente antes do contacto com o cerra - chapas;
- Estes dados obtidos por observação indiciam que a chapa se encontra avançada em relação ao seu correcto posicionamento na ferramenta, por um lado, e que poderá ter tendência a torcer (não se mantém absolutamente rectilínea dentro das guias), por outro;
- As movimentações expostas são um reflexo da acção do macho de roscar que, entrando em contacto com a peça, mesmo antes do cerra - chapas, pilotos ou outros punções, a obriga a posicionar-se “correctamente”;
- Os parâmetros do sistema de alimentação são estabelecidos recorrendo á vasta experiência laboral de operários, mas o verdadeiro conhecimento da influência de cada um dos parâmetros no processo, bem como a escolha de parâmetros óptimos para um determinado processo, não é de todo conhecida.

Sobre o exposto note-se:

- Não é função dos machos de roscar actuarem como guiamento fundamental de banda, ainda que possam fornecer um certo auxílio neste processo – este comportamento não é adequado para o processo nem para os equipamentos.

3.5.2 Definição e Estruturação de Ensaios Prioritários

Da análise de indícios foi possível concluir:

- As irregularidades verificadas nas prensas justificam a realização de ensaios que avaliem a possível influência das mesmas nas roturas da ferramenta usada na produção do componente PT428;

- O aspecto dos elementos danificados da ferramenta indicia:
  - Deverá ser estudada com mais pormenor a fragilidade apresentada pelo punção 16
  - Em virtude da violência de roturas anteriores a ferramenta poderá encontrar-se danificada na sua constituição unitária. (Caso particular do punção de corte - 18)
- O sistema de alimentação apresenta funcionamento anómalo
- O sistema de posicionamento da banda não é adequado

Como consequência temos:

- **Roturas frequentes de punções nas etapas críticas do progressivo**
- **Desgaste no punção de corte e calibração**
- **Falhas de filetagem e centragem do furo roscado**

Assim, os ensaios e estudos a realizar deverão incidir primeiramente:

- Ensaios de Conformidade da Prensa Mecânica (Prensa PO20 e respectivo sistema de alimentação)
- Estudo de Influência dos Parâmetros de Alimentação
- Estudo Correctivo da Ferramenta

Então, a tabela das possibilidades de falha poderá ser reduzida apenas aos campos prioritários definidos na análise de indícios, tal que:

			Falha Associada	
Elemento do Sistema	Variável/Possível Anomalia	Estudos a Efectuar	Ruptura de Punções	Falhas de Roscagem
Prensa Mecânica	Falta de Paralelismo entre a Mesa e o Carro	Medição de Paralelismo	x	x
		Medição da Distribuição de Carga entre Bielas	x	
		Medição de Planeza	x	x
Sistema de Alimentação	Instabilidade no Passo de Alimentação	Análise dos Parâmetros de Alimentação		x
		Avaliação da Conformidade do Alimentador		x
	Articulação dos Parâmetros de Alimentação na Programação da Prensa	Restruturação Sequencial		x
Ferramenta de Estampagem	Variação das Propriedades do Material Relativamente às Especificações	Ensaios de Dureza e Materialográfico dos Punções Críticos	x	
	Toleranciamento Geométrico e Dimensional	Verificação Geométrica e Dimensional da Ferramenta	x	
	Distribuição de Esforços pelos Postos de Estampagem Inadequada	Estudo Teórico e Simulação Numérica	x	

Tabela 3.7 – Possibilidades de Falha mais Prováveis

3.6 Ensaios Relativos à Prensa Mecânica

3.6.1 Verificação de Paralelismo

No sentido de avaliar o paralelismo entre a mesa e o carro da prensa mecânica encarregue de produzir o PT428, foi consultado o resultado da última acção de manutenção preventiva na máquina.

As medições são efectuadas em quatro pontos da mesa (junto às colunas) e nos diferentes cursos de trabalho da máquina por recurso a um comparador digital. Para cada curso são efectuadas medições nas diferentes posições do ciclo de trabalho: PMS (ponto morto superior), 90 graus, 270 graus e PMI (ponto morto inferior).

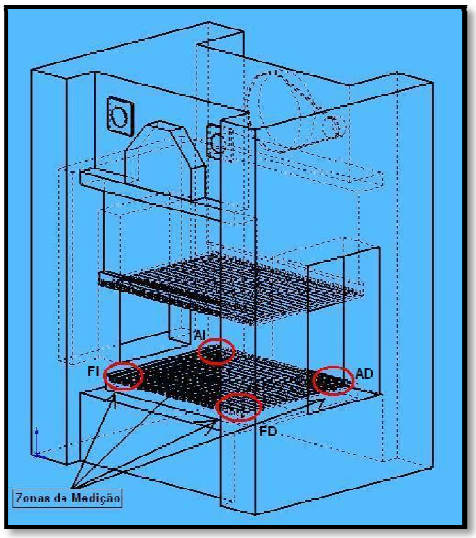


Figura 3.23 - Zonas de Medição de Paralelismo

Figura 3.24 - Comparador Analógico Usado na Medição de Paralelismo

O valor máximo estabelecido pelo fabricante para os erros de paralelismo é igual a 0.08mm por cada 1000mm de comprimento do carro.
A prensa em estudo, PO20, possui um carro com dimensões de 2550x1000, assim os valores máximos para os desvios vêm:

$$Desvio\ Máximo\ em\ Comprimento: \frac{2550}{1000} \times 0.08 = 0.204\ mm$$

$$Desvio\ Máximo\ em\ Largura: \frac{1200}{1000} \times 0.08 = 0.096\ mm$$

Como a medição é feita por comparação relativamente a um ponto inicial onde se define o zero do comparador (Ponto FD), e como o ponto AI se encontra em direcção diagonal relativamente a esse ponto, torna-se necessário calcular a distancia entre esses dois pontos bem como o desvio máximo admissível nessa direcção diagonal.

$$Comprimento\ da\ Diagonal = \sqrt{2550^2 + 1200^2} = 2818.24\ mm$$

$$Desvio\ Máximo\ em\ Direcção\ Diagonal: \frac{2818}{1000} \times 0.08 = 0.225\ mm$$

Desta forma os desvios máximos admissíveis para cada um dos pontos relativamente ao ponto zero ou FD, são:

Ponto FD (Zero do Comparador)	Ponto FI	Ponto AI	Ponto AD
0	0.204 mm	0.225 mm	0.096 mm

Tabela 3.8 – Desvios Máximos de Paralelismo

Para a máquina que nos é mais relevante os resultados das medições efectuadas pelo departamento de manutenção vêm na Tabela 3.9. Os valores fora dos limites calculados estão sinalizados a vermelho.

			TRIMESTRE 1			
			16-09-2010			
PRENSA	**CURSO**	**POSIÇÃO**	**FD**	**FI**	**AI**	**AD**
20	**Máximo**	**PMS**	0	0,54	0,55	0,25
		90º	0	0,36	0,55	0,41
		270º	0	0,31	0,53	0,31
		PMI	0	0,45	0,43	0,41
	Médio	**PMS**	0	0,39	0,45	0,46
		90º	0	0,66	0,61	0,19
		270º	0	0,37	0,45	0,21
		PMI	0	0,31	0,13	0,29
	Mínimo	**PMS**	0	0,49	0,41	0,11
		90º	0	0,67	0,77	0,16
		270º	0	0,33	0,08	0,35
		PMI	0	0,55	0,74	0,51

Tabela 3.9 – Desvios no Paralelismo da Prensa 20

Comentários: Pela análise efectuada verificaram-se desvios de paralelismo acima dos valores admissíveis, com especial atenção para o regime de funcionamento em curso médio (200-254mm) e para o ponto morto inferior, região em torno da qual é transmitida a potência de conformação á banda de chapa.

3.6.2 Medição da Excentricidade da Ferramenta na Prensa

As prensas mecânicas de duas bielas possuem um sistema interno de monitorização de carga. De facto as ligações entre as bielas e o carro não são ligações mecânicas rígidas, mas antes materializadas por um sistema hidráulico como o representado abaixo. Desta forma é possível avaliar as discrepâncias na distribuição de carga ao longo do comprimento da máquina pela medição do diferencial de pressão do óleo na base dos cilindros.

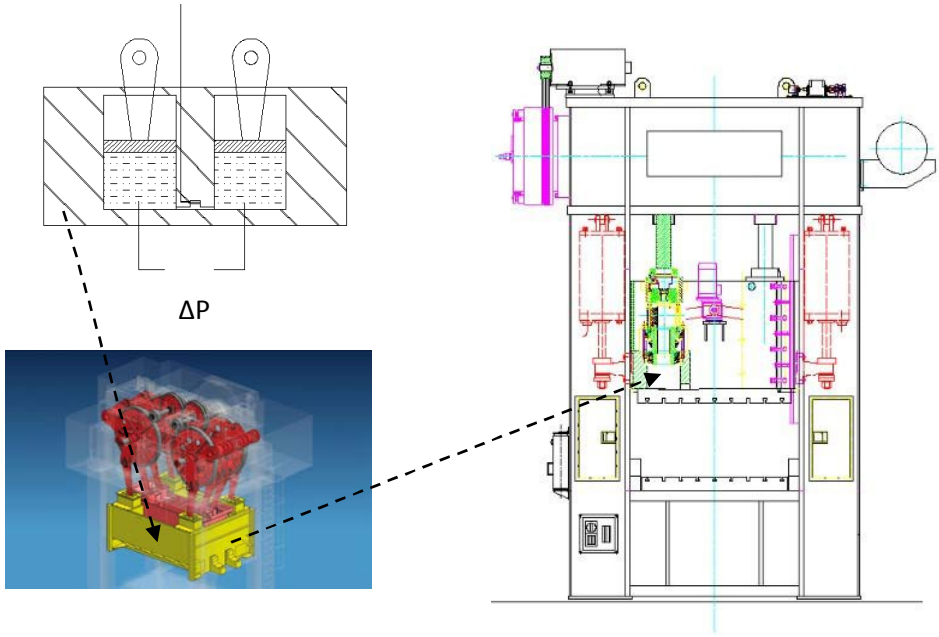


Figura 3.25 - Sistema Hidráulico de Ligação entre as Bielas e o Carro da Prensa

Através das medições efectuadas na máquina que produz o PT428, com a ferramenta em funcionamento foi possível apurar:

- Pressão do óleo na base da biela esquerda no momento do golpe: 200,3 bar
- Pressão do óleo na base da biela direita no momento do golpe: 233,3 bar

Apurou-se portanto um diferencial de pressão de: $\mathbf{233,3 - 200,3 = 33}\ \boldsymbol{bar}$

Comentários: No caso da presente ferramenta o diferencial de pressões entre bielas aponta para uma ferramenta com um equilíbrio de carga razoável. Não obstante o mesmo não se passa com a generalidade das ferramentas utilizadas na Gestamp Portugal, algumas das quais acarretam diferenças de carga entre bielas que se traduzem em diferenciais de pressão superiores a 100 bar. Neste sentido a prensa em questão, apesar de não estar ser esforçada por cargas excêntricas derivadas a esta ferramenta de estampagem, pode ainda assim estar molestada por trabalho com cargas excêntricas derivadas de outras ferramentas e processos da planta produtiva.

3.6.3 Verificação da Planeza da Mesa

A verificação de planeza da mesa de uma prensa pode ser efectuada recorrendo a equipamentos especialmente destinados á medição desta grandeza ou utilizando medição por nuvem de pontos em máquina de medição 3D. Apesar de existir uma máquina de medição 3D no Departamento de Qualidade da Gestamp Portugal, esta não possui características que lhe permitam efectuar leituras em componentes com a dimensão da mesa de uma prensa de arcada. Assim não foi possível realizar o ensaio mecânico de verificação de planeza, embora que se possa dispensar o uso de um equipamento de leitura fina, quando a simples observação visual permite de per si concluir que o estado da mesa da prensa não lhe assegura um nível mínimo de planeza.

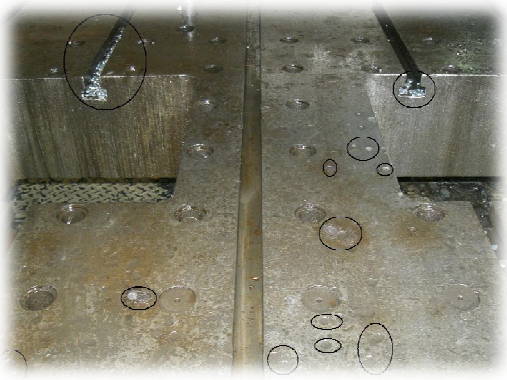


Figura 3.26 - Crateras e Incrustações que Comprometem a Planeza da Mesa da Prensa Mecânica

3.7 Estudos Relativos ao Sistema de Alimentação

3.7.1 Avaliação da Conformidade da Máquina

O sistema de alimentação utilizado é articulado com a prensa mecânica e possibilita o desenrolamento, o endireitamento e a alimentação da banda de chapa relativamente à prensa. Trata-se de uma unidade *Fagor Arrasate 600 x 3* cujas métricas se encontram apresentadas na Tabela 3.10.

Largura Max. Banda	**Espessura Max. Banda**	**Espessura Min. Banda**	**Nº de Cilindros de tracção**	**Nº de Cilindros Endireitadores**	**Ø Cilindros**	**Dureza Cilindros**	**Altura de Alimentação**
600 $\boldsymbol{mm}$	3 mm	0.8 mm	4	7	80 mm	62 HRC	1150 mm
Regulação de Altura	**Velocidade de Avanço**	**Precisão de Avanço**	**Potência do Motor**	**Tensão de Funcionamento**	**Sentido de Alimentação**	**Desbobinado**	**-**
+/- 100 $\boldsymbol{mm}$	42 m/min	+/- 0.1 mm	7 KW	380V (50Hz)	Esq. – Dir.	Inferior	-

Tabela 3.10 – Métricas do Sistema de Alimentação

Comentários: Como se pode constatar, a espessura máxima de chapa, admissível por este tipo de máquina, é de 3 mm enquanto que a chapa utilizada para o fabrico do componente possui 4 mm de espessura. Neste sentido pode-se pôr em causa até que ponto este sistema de alimentação é adequado à obtenção do componente em estudo. Apesar de existirem alguns sistemas de alimentação que funcionem até um valor máximo de área da secção recta da chapa, não é certo que tal seja o caso do sistema de alimentação em análise.

De facto a espessura de 3mm é definida como valor máximo de espessura admissível no manual da máquina, pelo que não é adequado supor que o mecanismo poderá suportar espessuras superiores só pelo facto da área da secção recta da banda ser inferior a 600 x 3 (mm). Neste sentido pode-se estar na presença de uma das causas basilares para o problema da falha (atraso) detectado no passo de alimentação.

3.7.2 Análise dos Parâmetros de Alimentação

Por consulta ao manual da máquina foi ainda possível apurar quais os seus parâmetros configuráveis. Estes parâmetros são definidos para cada processo de conformação pelo Departamento de Projecto da Gestamp Portugal conjuntamente com o Departamento de Produção durante a fase de afinação da ferramenta e são:

- **Cota P** – Passo de Alimentação (mm)
- **Velocidade de Avanço** – Percentagem da velocidade máxima do alimentador (%)
- **Aceleração / Desaceleração** – Define o tempo necessário para o alimentador atingir a velocidade de avanço definida
- **Contador de Peças** – Conta as peças a produzir e pára a máquina ao atingir o valor introduzido (=0 significa produção ininterrupta)
- **Pressão nos Cilindros Endireitadores** – Deverá ser suficientemente elevada para que não haja escorregamento da banda, mas não tão elevada que conduza à laminagem da chapa (Ajuste Manual)
- **Alinhamento Horizontal da Alimentação** (Ajuste Manual)
- **Alinhamento Vertical da Alimentação** (Ajuste Manual)

À parte os parâmetros de ajuste manual, todos os outros valores são introduzidos através da consola de programação dos autómatos de controlo das máquinas (prensa e alimentador). Existe um documento que estabelece, para cada processo, os valores, ou intervalo de valores a aplicar (gama de parâmetros), no entanto estas margens são muitas vezes alvo de pequenas modificações durante o *setup* da máquina e que têm como fito um melhor desempenho do processo produtivo.

A título de exemplo veja-se que no caso do parâmetro *Cota P*, ou seja, o passo ou avanço de chapa, estabelecido para produção do PT428 é de 52 mm, que representa a distância exacta entre os diversos postos do processo progressivo de estampagem. A verdade é que esse parâmetro é sempre configurado acima do valor exacto (52.35, 52.6, etc.), isto porque o alimentador "falha o passo", atrasa-se e, pelo exposto, o operário introduz um passo de valor superior ao passo nominal. Esta é a principal causa de a chapa se encontrar avançada apresentando, portanto, um recuo antes de se atingir o PMI, aquando da entrada em contacto com os machos de roscar que forçam a banda (avançada) a retomar a sua correcta posição. Este procedimento conduz ás mordeduras encontradas na peça, originárias de um início de roscagem excêntrico. Para além do parâmetro *Cota P* também os parâmetros de velocidade, aceleração, desaceleração e pressão nos cilindros endireitadores são alvo de modificações relativamente aos valores estabelecidos na gama de parâmetros. Em adição essas

modificações são muitas vezes implementadas de forma não isolada, não permitindo uma leitura eficaz do efeito que cada uma delas provoca no processo.

Apesar da dificuldade verificada em recolher informação sobre os parâmetros mais adequados a adoptar na configuração de unidades de alimentação de chapa, foi possível recolher dados sobre a resolução de problemas (troubleshooting) de alimentação pela consulta do manual de um conhecido fornecedor de unidades de servo-alimentação. Transcrevem-se a seguir os campos da tabela de *troubleshooting* relevantes para o problema em estudo.

Problema	Causa Possível	Solução
Alimentação Insuficiente	-Aceleração Excessiva -Força Insuficiente nos Rolos de Aperto -Material demasiado Lubrificado -Obstrução na Ferramenta	-Baixar Aceleração -Aumentar Força de Aperto dos Rolos -Limpar o Material -Verificar e Ferramenta
Alimentação Excessiva	-Escorregamento do Material -Desaceleração Excessiva	-Baixar Desaceleração -Baixar Desaceleração
Material Tende a Curvar	-Força Excessiva nos Rolos de Aperto	- Baixar Força de Aperto dos Rolos
Alimentação Desalinhada	-Guias de Banda mal Configuradas - Banda desalinhada com Alimentador - Material Inadequado	- Configurar guiamento de Banda - Centrar o Material - Usar outra bobine de Chapa

Tabela 3.11 – Resolução de Problemas em Sistemas de Alimentação

Comentários: Não existe um procedimento consistente de configuração dos parâmetros de alimentação dos processos de conformação. O ajuste e definição dos parâmetros é efectuado com base na experiência empírica dos técnicos e engenheiros da empresa não devendo, contudo, esta experiência ser desvalorizada. No entanto embora se possa admitir uma certa impossibilidade de estabelecer uma lógica exacta para estabelecimento da generalidade dos parâmetros de alimentação (em relação, por exemplo, à configuração da pressão dos cilindros endireitadores o próprio fabricante, no manual do mecanismo, afirma não existir um procedimento bem determinado para o ajuste) poder-se-á com certeza estabelece-la para outros, bem como atribuir uma lógica de base aos restantes.

As modificações paramétricas introduzidas pelos técnicos de produção, apesar de terem como objectivo reduzir a possibilidade de ocorrências de falha, mascaram as causas reais que conduzem à mesma. Em processos de estampagem menos problemáticos essas modificações surtem efeitos razoáveis ao passo que em processos críticos, como o em estudo, tais modificações podem revelar-se insuficientes e em qualquer dos casos constituem um modo de proceder inadequado.

Assim, pela análise do quadro apresentado em cima, para fazer face aos problemas identificados, a configuração do sistema de alimentação deve obedecer aos seguintes princípios:

- Aceleração e Desaceleração reduzidas ao mínimo;
- Aumentar a pressão nos rolos de aperto;
- Configurar os rolos endireitadores de forma a garantir o mínimo atrito entre a banda e as guias da ferramenta;
- A lubrificação de banda deve acontecer na ferramenta; não deve existir lubrificação excessiva no seio dos rolos de alimentação;
- A introdução do valor do passo de alimentação dever ser configurada para o seu valor nominal e, caso se verifiquem atrasos no avanço da banda, este deverá ser aumentado gradualmente atravéz de incrementos pequenos, até que se estabilize o processo. Desta forma evitar-se-á o problema do avanço excessivo da chapa;
- Cada uma destas acções deverá ser implementada de forma isolado de maneira a permitir uma correcta avaliação do seu efeito no processo.

3.7.3 Programação Sequencial Prensa-Alimentador-Ferramenta

A implementação de um processo de estampagem automático, implica uma sequenciação consertada das diversas operações a realizar. No caso do processo em estudo é necessário compatibilizar as acções da prensa mecânica, do sistema de alimentação e do macho de roscagem. A sequência em vigor é representada no Diagrama 3.2:

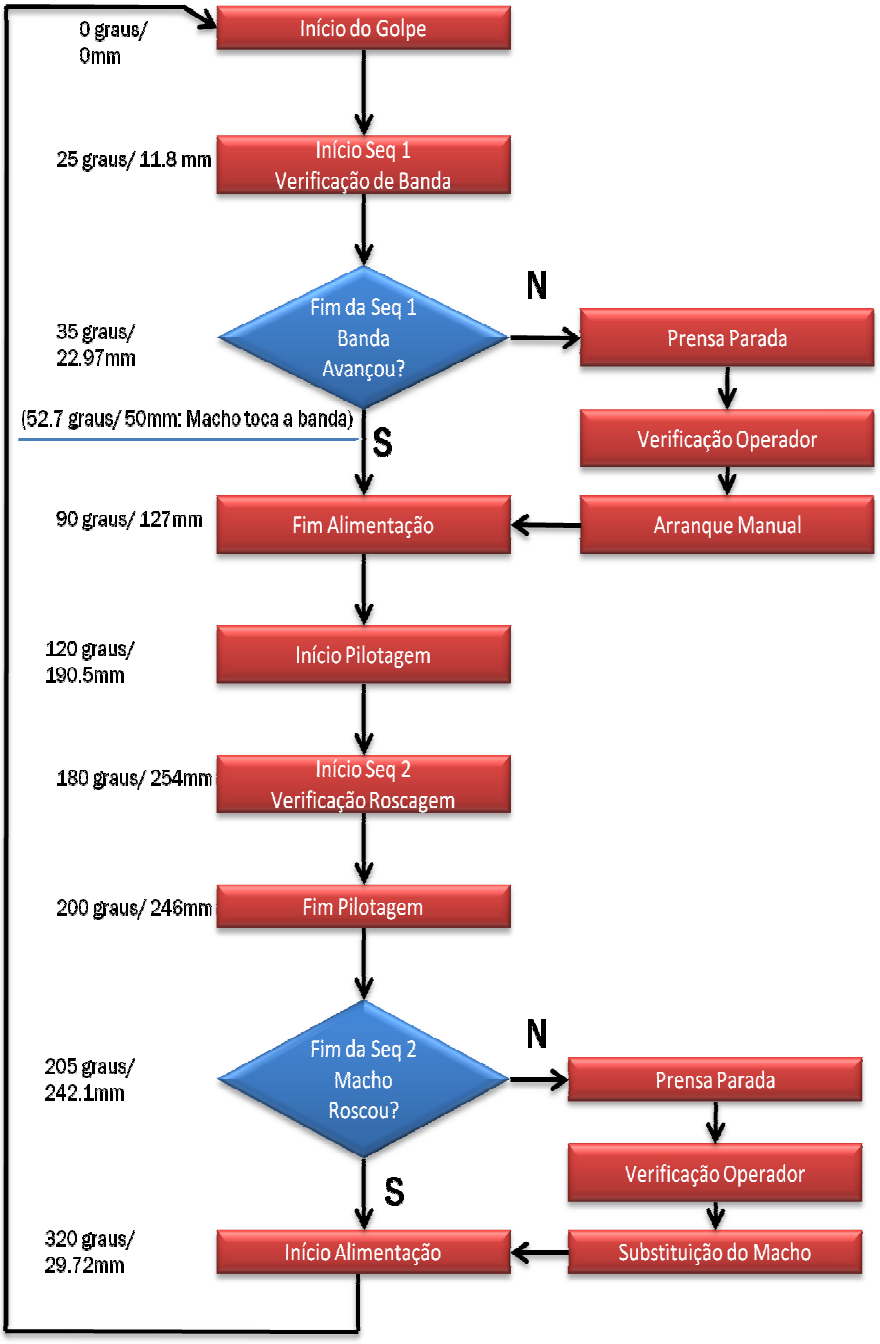


Diagrama 3.2 – Programação Sequencial da Prensa

Os pontos notáveis do Diagrama 3.2 são:

- **320° - INICÍO DA ALIMENTAÇÃO** – O alimentador abre as pinças e a chapa é levada a avançar na ferramenta progressiva;
- **0° - INÍCIO DO GOLPE** – A prensa encontra-se no PMS e vai iniciar o movimento descendente;
- **25° - INÍCIO DA SEQUÊNCIA 1** – O autómato da prensa encontra-se disponível para receber um sinal indicativo de que a banda avançou correctamente (tolerância ~2mm)
- **35° - FIM DA SEQUÊNCIA 1** – Neste ponto a prensa já devia ter recebido o sinal de que o avanço da banda foi realizado correctamente (52 mm), caso contrário pára e só retoma a produção após intervenção do operador;
- **90° - FIM DA ALIMENTAÇÃO** – Término da janela disponível para o processo de alimentação de chapa;
- **120° - INÍCIO DA PILOTAGEM** – O alimentador abre as pinças de forma a deixar a banda livre para ser posicionada pelos centradores da ferramenta (pinos piloto). Esta etapa deve acontecer quando, pelo menos 80% do comprimento dos centradores já está abaixo da cota zero de forma a não permitir escorregamentos da banda para fora da ferramenta;
- **180° - INÍCIO DA SEQUÊNCIA 2** – O autómato da prensa encontra-se disponível para receber um sinal indicativo de que a o macho de roscar efectuou a roscagem em todo o comprimento do furo;
- **200° - FIM DA PILOTAGEM** – O alimentador volta a fechar para garantir imobilidade da chapa enquanto os centradores estão afastados da ferramenta;
- **205° - FIM DA SEQUÊNCIA 2** - Neste ponto a prensa já devia ter recebido o sinal de que a roscagem foi realizada correctamente (sensor actuado), caso contrário pára e só retoma a produção após intervenção do operador;
- **320° - INÍCIO DA ALIMENTAÇÃO** – (Novo Ciclo)

Comentários: A Sequência 1 termina antes do fim do período de alimentação. Tal não é coerente visto que a Sequência 1 visa verificar se a alimentação foi correctamente efectuada devendo, por isso, ter o seu término só após o fim da janela programada para a alimentação. Neste sentido a programação deverá ser alterada de forma a devolver a coerência ao bloco sequencial;

O exposto só não acarreta problemas para o processo porque o fim real da alimentação ocorre bastante antes do fim programado, já que a velocidade máxima do alimentador é de $700\ mm/s$ e o avanço de chapa a realizar é pequeno ($52\ mm$). Daqui também se pode concluir que o alimentador não se encontra a debitar chapa à velocidade mínima para a janela de alimentação disponível, mas sim um valor muito superior, podendo contribuir esse excesso de velocidade para uma introdução mais frequente de erros no avanço;

A sequência 2 tem o seu início aos 180° de rotação da manivela, ou seja no PMI. Apesar de ser exactamente neste ponto que se espera que o macho accione o sensor de roscagem deveria iniciar-se esta sequência ligeiramente antes, para garantir que qualquer variação nos intervalos de detecção reais não conduz a paragens da produção.

3.8 Ensaios Relativos à Ferramenta

3.8.1 Punção 16

Relativamente ao punção 16 já se tinha apurado da fase de indícios:

- A fractura deste punção conduz à fractura dos punções que se lhe seguem;
- A geometria foi alterada diversas vezes com o objectivo de minorar o número de roturas;
- A fractura ocorre após a produção de cerca de 5000 peças (pares), pelo que se trata de uma rotura por fadiga.

A Figura 2.27 trata da relação geométrica entre o punção 16 e a banda de chapa. Em vermelho encontra-se representado o punção, em azul a banda de chapa, em lilás o ejector e em negro a matriz de embutir. O contacto efectua-se primeiramente nos raios de concordância do punção, zona onde se verificam as fracturas.

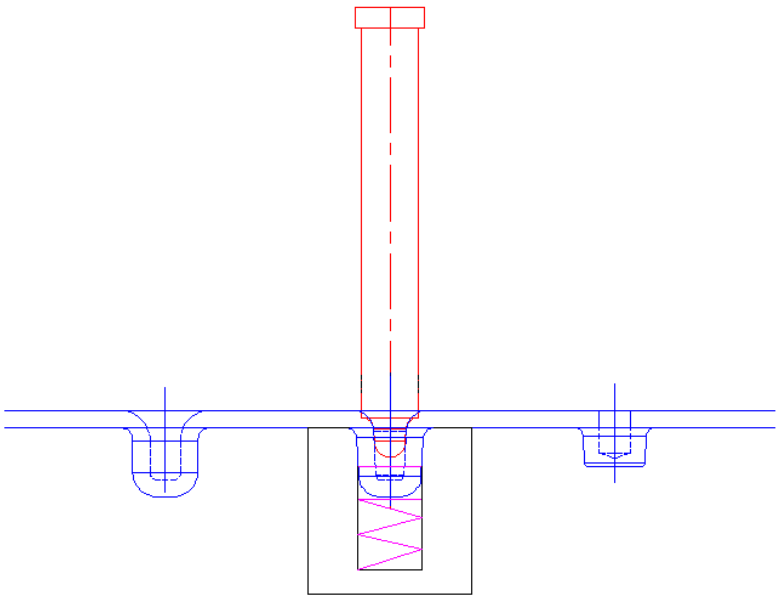


Figura 3.27 - Relação Geométrica entre o Punção 16 e a Banda de chapa

A natureza das solicitações no punção pode, portanto ser dividida:

- Compressão axial e radial no movimento de descida
- Compressão radial e tracção axial no movimento de subida

3.8.1.1 Um Novo Indício: Uma Geometria que Nunca Fracturou

Em complemento pôde ser apurado que, de entre as diversas geometrias que este punção experimentou, existe uma que apresentou uma durabilidade maior. O punção correspondente a essa geometria encontra-se representado na Figura 2.28. A geometria propriamente dita, em ficheiro CAD, foi perdida pelo fornecedor da ferramenta.

Figura 2.28 - Relação Geométrica entre o Punção 16 e a Banda de chapa

A resistência invulgar que este punção apresentou relativamente aos seus congéneres poderia residir:

- Na sua Geometria
- No Material

Assim procedeu-se, em primeiro lugar, à recuperação da geometria CAD por recurso à digitalização laser por nuvem de pontos. Para esse fim foi utilizado um equipamento Mitutoyo Coordinate Measuring Machine (modelo Crysta Apex C).

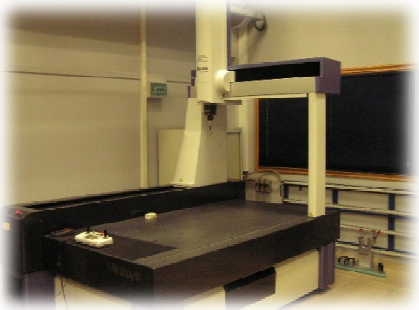


Figura 3.29 - Equipamento de Medição e Digitalização 3D

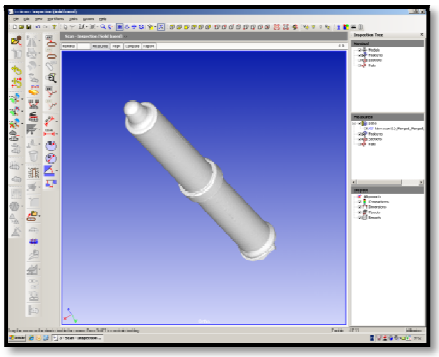


Figura 3.30 - Aspecto da Nuvem de Pontos no fim da Digitalização

De referir também que o punção de geometria "perdida" apresentava sinais evidentes de deformação na sua zona de trabalho, podendo igualmente indicar que a maior durabilidade que apresentou pode dever-se, por alguma falha no tratamento térmico (têmpera e revenido), a que se trate de um punção de material mais brando, cujo défice de dureza tenha conduzido à deformação do mesmo punção, ao invés de rotura por compressão.

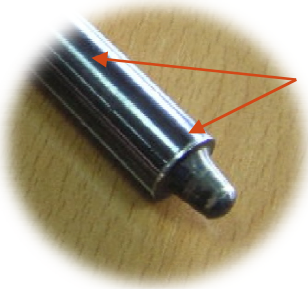


Figura 3.31 - Deformação do Punção Originando uma Variação de Diâmetro ao Longo do Corpo Cilíndrico

3.8.1.2 Medição Comparativa do Comprimento dos Punções

A deformação referida foi indiciada por uma diferença anormal entre os diâmetros do corpo do punção que deveria ser perfeitamente cilíndrico. Naturalmente essa diferença, esse acréscimo de material na zona de trabalho, tem de se fazer a custo de uma redução de material numa outra zona. Desta forma procedeu-se à medição do comprimento dos exemplares existentes dos punções deste posto (rebatimento), de forma a perceber quais as variações de cota envolvidas.

As medições foram realizadas para quatro geometrias distintas do mesmo punção em estudo. Essas geometrias estão representadas na Figura 3.32.

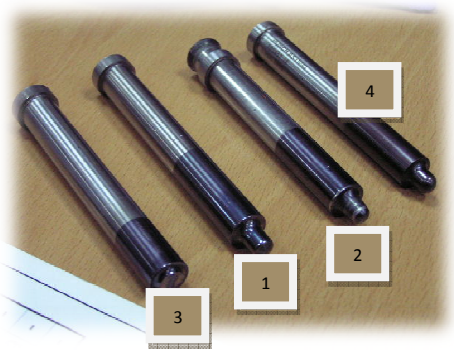


Figura 3.32 - Indexação das Várias Geometrias Sujeitas a Ensaio

1. **Uma das primeiras geometrias adoptadas para o punção** – Conicidade na zona de trabalho inexistente
2. **Geometria "perdida" – Punção Deformado** – É a que apresenta maior conicidade na zona de trabalho
3. **Geometria anterior à actual** – Punção Fracturado
4. **Geometria Actual** – Apresenta o 2º maior valor de conicidade

As medições efectuadas são apresentadas na Tabela 3.12 (valores em mm) e foram realizadas recorrendo a um paquímetro digital Mitutoyo. Em complemento são também apresentados os valores nominais (de projecto) da geometria actualmente utilizada (geometria 4).

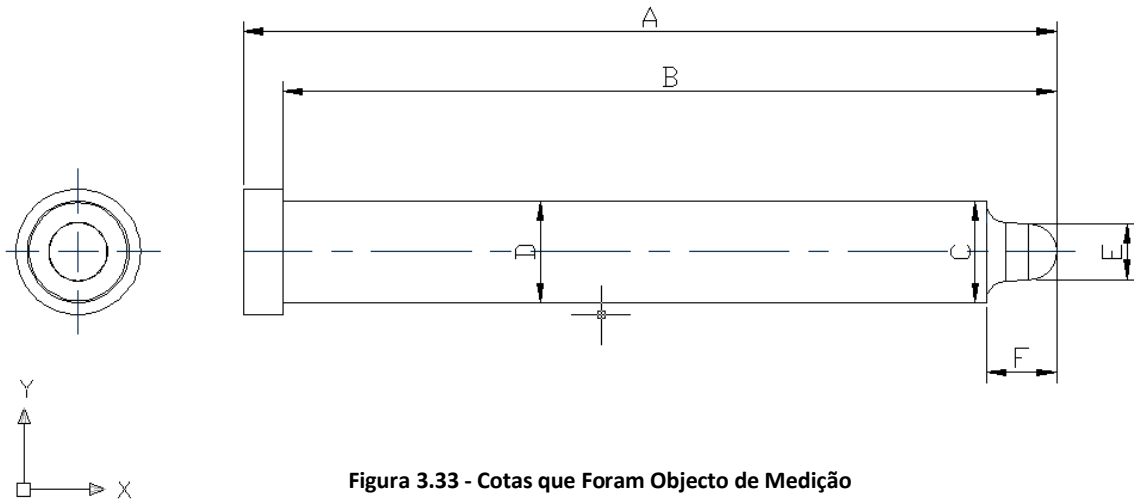


Figura 3.33 - Cotas que Foram Objecto de Medição

Geometria	A	B	C	D	E	F
1 (Geometria Primordial)	105.09	100.04	13.01	13.00	7.32	9.70
2 (Deformado/Resistente)	104.24	97.44	13.14	12.97	6.35	9.24
3 (Fracturado)	N/A	N/A	13.00	13.00	N/A	N/A
4 (Actual)	104.43	99.24	13.01	13.01	7.28	9.12
Valor Nominal Geometria Actual (4)	104.00	99.00	13.00	13.00	7.50	9.00

Tabela 3.12 – Valores das Medições Realizadas nos Punções

Comentários: Verificam-se diferenças consideráveis entre as cotas de comprimento total das primeiras geometrias do punção relativamente às geometrias actuais;

A geometria perdida é aquela que apresenta menor valor medido no seu comprimento total, conduzindo por isso a menores esforços de compressão;

A geometria actual é aquela que melhor aproxima as dimensões da geometria "perdida" que mostrou ter sido até agora a mais resistente, no entanto a cota "B", que é a que define a penetração máxima do punção no embutido (mais significativa para o agravamento do esforço de compressão) apresenta uma diferença de 1,8 mm, o que acarreta esforços de compressão consideravelmente maiores no punção actual quando comparado com o punção de geometria perdida;

Verificaram-se diferenças entre os valores medidos e de projecto no que respeita à geometria actualmente em funcionamento. Essas diferenças devem-se a desvios reais relativamente ás especificações de projecto);

A deformação verificada junto à zona de trabalho do punção 2 é de 1,4 décimas de milímetro (diâmetro) relativamente ao valor de projecto;

A deformação verificada na geometria perdida não trouxe anomalias na qualidade do embutido, pelo que se considera viável a adopção desta geometria caso a mesma prove, em estudo apropriado (simulação de carga) ser mais apropriada que a geometria vigente;

Os valores "A", "B" e "E" do punção 3 não puderam ser alvo de medição em virtude de se tratar de uma amostra fracturada.

3.8.1.3 Ensaios de Dureza

Foram realizados ensaios de dureza nas mesmas amostras já apresentadas de forma a obter informação acerca da influência das propriedades do material na fractura ou resistência dos punções.

Os resultados são listados na Tabela 3.13.

			Medição 1	Medição 2
Punção 16	**Partido (3)**	Ponta	52	52
		Corpo	52	52
	Deformado (2)	Ponta	43	43
		Corpo	42	42
	Geometria Antiga (1)	Ponta	61	61
		Corpo	60	61
	Novo (4)	Ponta	57	56
		Corpo	57	58
Anunciado no Desenho Actual				**51-53 HRC**

Tabela 3.13 – Valores de Dureza para as Diferentes Geometrias do Punção 16

Comentários: Como esperado o punção deformado (2) apresenta uma dureza bastante inferior aos demais punções (42-43 HRC). Como a tenacidade é, grosso modo, inversamente proporcional à dureza, este punção apresenta maior capacidade de resistência à fractura por choque. No entanto é de realçar que o valor de dureza medido para esta amostra não é admissível em punções de estampagem, bem como a deformação plástica por compressão verificada. Desta forma no caso de se considerar o projecto de um punção em material diferente deve-se ter em conta que o valor de dureza a obter poderá ser mais baixo que a especificação actual de projecto, mas não tão baixo que permita deformações plásticas no punção.

Á parte o punção partido (3), nenhum dos outros punções respeita o valor de dureza especificado para o componente. Este facto merece dois reparos importantes: em primeira instância deve-se concluir que uma dureza de 52 HRC (punção partido – 3), apesar de se encontrar dentro das especificações, não garante suficiente tenacidade ao componente para que possa suportar o esforço de compressão a que é sujeito. Por outro lado note-se que, tratando-se de um componente crítico que rompe por compressão é de importância basilar garantir que os valores especificados para a sua dureza não são ultrapassados.

3.8.1.4 Avaliação da Conformidade do Material do Punção

No sentido de verificar se o material empregue no fabrico dos punções estava conforme com as suas necessidades estruturais pôde ser apurado:

O material usado para o punção 16, o punção mais crítico do processo no que respeita a roturas, corresponde à referência S600 do fornecedor Böhler. O tratamento térmico aplicado ao punção deve ser tal que este apresente uma dureza de 52HRC após revenido.

Trata-se de um aço pertencente à classe dos aços rápidos. A composição em termos de elementos de liga, bem como a relação deste aço com as normas internacionais são apresentadas a seguir:

C	Cr	Mo	V	W
0,90	4,10	5,00	1,80	6,40

AISI	DIN
≅ M2 Reg C	1.3343

Tabela 3.14 – Composição do Aço Utilizado no Punção 16

Sobre a composição do aço:

- **Carbono (C):** a percentagem elevada deste elemento determina a dureza da massa da matriz. Possibilita ainda a formação de carbonetos que aumentam a resistência do aço ao desgaste;
- **Crómio (Cr):** eleva a resistência ao revenido, a dureza a quente e aumenta a profundidade de têmpera;
- **Tungsténio (W) e Molibdénio (Mo):** formam carbonetos muito duros, aumentam a resistência a quente e a resistência ao revenido da matriz;
- **Vanádio (V):** forma carbonetos muito duros, aumenta a resistência ao desgaste a quente, a resistência ao revenido e a dureza a quente da matriz;

Comentários:

Este aço está talhado para aplicação em ferramentas para maquinagem com elevados rendimentos mesmo a grandes velocidades de corte, apresentando características como:

- Boa resistência do gume
- Dureza elevada a frio e a quente
- Máxima resistência a frio e a quente
- Boa temperabilidade
- Grande resistência ao revenido

A utilização deste aço em punções e matrizes é possível e algo frequente em operações de corte em prensa, embora apresente as seguintes desvantagens:

- O material, aço rápido, é mais caro que outros aços destinados a ferramentas de conformação a frio;
- Baixos níveis de tenacidade e resistência à fadiga relativamente a outros aços de ferramenta.

Assim, e considerando que as roturas deste punção ocorrem por fadiga, deverá ter-se em conta a selecção de um material mais conforme com a exigência do trabalho mecânico a que este elemento está sujeito.

3.8.2 Punção 17

A Figura 3.34 representa algumas roturas e deformações verificadas no punção 17. Estas roturas nunca acontecem isoladamente mas sim como eventual consequência da rotura do punção 16. A função deste punção é fazer o repasse do embutido, facilitando o corte (furacão) que acontece no posto seguinte (posto 18). Por esse motivo o seu comprimento é menor, levando a que este punção nem sempre apresente danos aquando da rotura do punção 16. Já o mesmo, como veremos, não se passa com o punção de corte (18).

Figura 3.34 - Fractura e Deformação no Punção 17 Resultante da Ruptura do Punção 16 a Montante

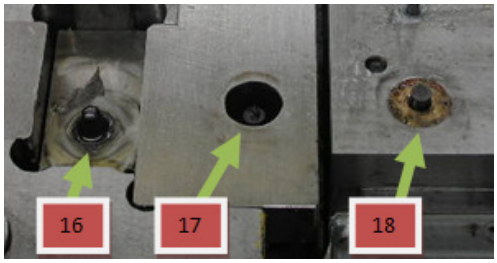


Figura 3.35 - Pormenor das diferentes profundidades de ataque entre o Punção 17 e 18

3.8.2.1 Ensaios de Dureza

			Medição 1 (HRC)	Medição 2 (HRC)
Punção 17	**Fracturado**	Ponta	60	61
		Corpo	61	61
	Deformado	Ponta	60	61
		Corpo	62	61

Tabela 3.15 – Ensaios de Dureza do Punção 17

Comentário: Os valores de dureza medidos apresentam-se conformes com as especificações do punção. Não foi detectada nenhuma anomalia.

3.8.3 Punções 18 e 19

Relativamente aos punções 18 e 19 já se tinha apurado da fase de indícios:

- Verifica-se um desgaste localizado num dos lados do punção de corte (18);
- O referido desgaste tem consequências na etapa seguinte (19) em que o punção que calibra o furo é levado também a desgastar-se no lado oposto para compensar a deficiência do trabalho realizado no posto anterior;
- Em adição verifica-se pontualmente a fractura da cabeça do punção 18;
- Estas anomalias ocorrem apenas num dos lados da ferramenta.

Figura 3.36 - Desgaste Localizado no Punção 19

Figura 3.37 - Desgaste Localizado no Punção 18

As hipóteses para a causa destas anomalias são:

1. Torção de Banda (Causados pela acção do macho de roscar)
2. Desvios Geométricos da Ferramenta (Causados pelas agressões decorrentes da fractura do punção 16)

Ambas podem causar um ataque irregular à chapa provocando desgaste localizado nos punções em estudo. No entanto, na possibilidade de ocorrer torção de banda não se verificaria desgaste dos dois punções mas tão-somente do primeiro punção, pois o outro, respeitando o mesmo desalinhamento não teria como desgastar-se;

Nesse sentido procedeu-se à realização de ensaios mais focados na confirmação (ou negação) da existência de desvios geométricos na ferramenta. Como já referido esses desvios, se existirem, têm uma causa lógica na severa agressão sofrida pelo punção 18 sempre que ele é forçado a atacar a banda na qual está presa a ponta rompida do punção 16. As Figuras 3.38, 3.39 e 3.40 pretendem ilustrar a situação descrita.

Na figura superior esquerda pode observar-se a ponta fracturada do punção 18 presa na banda depois de romper por choque com a ponta do punção 16 que rompeu em primeiro lugar. Na figura inferior esquerda pode ver-se a destruição total do extrudido forçado pelas duas pontas fracturadas pressionadas no momento do golpe.

Figuras 3.38, 3.39 e 3.40 – Efeitos da Ruptura do Punção 16 nos Punções a Jusante

3.8.3.1 Ensaios de Dureza

Foram realizados ensaios de dureza em duas amostras do punção 18 e numa amostra do punção 19, tendo-se obtido os seguintes resultados:

			Medição 1 (HRC)	Medição 2 (HRC)
Punção 18	Cabeça Fracturada	Ponta	61	61
		Corpo	61	60
	Desgastado	Ponta	61	61
		Corpo	61	61

Tabela 3.16 – Ensaios de Dureza do Punção 18

		Medição 1	Medição 2
Punção 19	Ponta	61	63
	Corpo	60	61

Tabela 3.17 – Ensaios de Dureza do Punção 19

Comentários: Os valores apurados nos ensaios de dureza realizados nos punções 18 e 19 estão conformes com as especificações de projecto, não se tendo verificado nenhum desvio significativo.

3.8.3.2 Verificação Geométrica e Dimensional da Placa Porta-Punções

No sentido de verificar em que medida a placa porta-punções responsável pela fixação dos punções 18 e 19 poderia apresentar desvios dimensionais ou geométricos relativamente às tolerâncias de projecto foram medidas, por recurso a um comparador analógico Mitutoyo, articulado com um mecanismo CNC, as variações existentes nos furos de alojamento dos punções.

Figuras 3.41 e 3.42 - Sistema de Medição CNC usado para a Verificação Geométrica

A Figura 3.43 trata do desenho de definição da placa porta-punções indicando a posição dos furos correspondentes ao punção 18, que se prevê desviado.

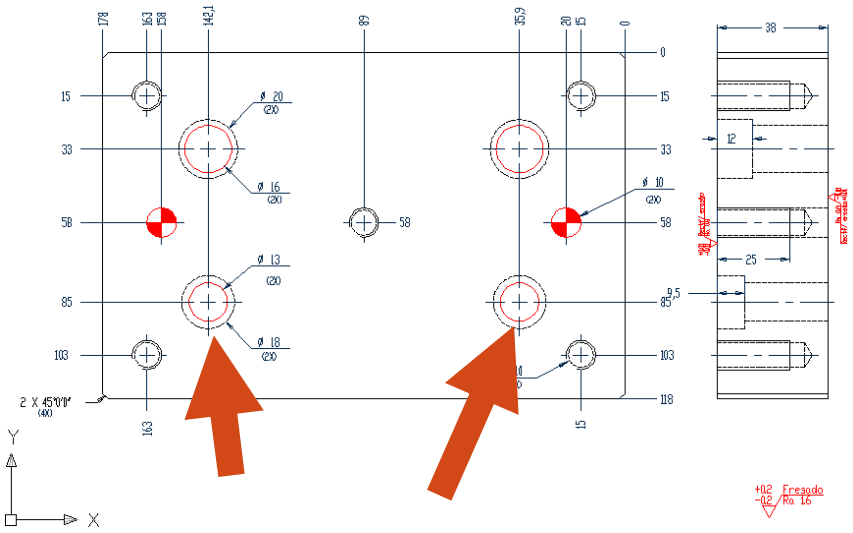


Figura 3.43 - Placa Porta-Punções dos Punções 18 e 19

Nas medições efectuadas foram detectados os seguintes desvios no furo de alojamento do punção 18:

Desvio Máximo no Eixo das Abcissas (mm)	Desvio Máximo no Eixo das Ordenadas (mm)	Desvio Combinado Máximo (mm)	Tolerância de Projecto (mm)
0.08	0.08	$0.113 = \sqrt{0.08^2 + 0.08^2}$	(H7 – Φ13): 0.018

Tabela 3.18 – Desvios Encontrados na Placa Porta-Punções

Comentário:

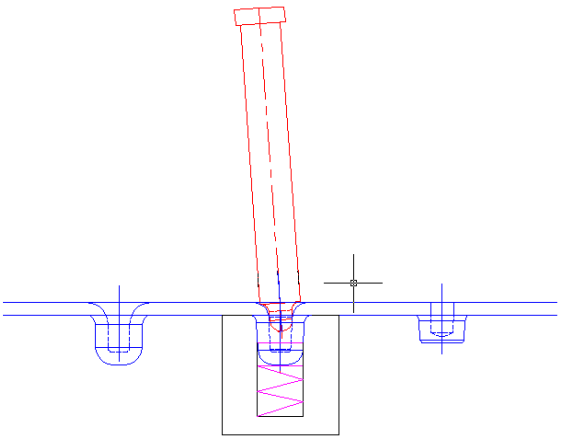
Foram verificados desvios na placa porta-punções correspondentes ao alojamento do punção 18. Esses desvios são de valor superior ao admitido para um furo H7, pelo que deverá ser maquinada e aplicada uma nova placa porta-punções.

3.9 Discussão de Resultados

3.9.1 Punção 16

- Sendo este punção aquele que está na origem das demais roturas a jusante e considerando as dificuldades de conformação derivadas do pequeno diâmetro do punção, bem como a resistência e espessura da chapa, não se considera vã a influência dos erros de paralelismo da prensa bem como da falta de planeza da mesa da mesma.

  Na Figura 3.44 é exibida uma amplificação do referido efeito sobre o processo, que se traduz na criação de um momento flector na ponta do punção, podendo conduzir á sua rotura.



Figuras 3.44 e 3.45 - Influência dos Erros de Paralelismo da Prensa na Verticalidade do Punção

  Neste sentido é aconselhável seleccionar uma outra prensa mecânica para realizar a produção deste componente, uma máquina cujos erros de paralelismo se encontrem minorados e o estado da mesa da prensa em melhor estado de conservação.

- Os ensaios que incidiram sobre o punção de geometria perdida, o mesmo que nunca chegou a fracturar, revelaram as seguintes características:
  - Maior Conicidade da zona de trabalho;
  - Menor comprimento total do punção;
  - Material mais brando e, por isso, mais tenaz.

Estes dados permitem definir uma sequência de modificações a ser implementada com o fito de eliminar as roturas no punção. Essa sequência é seguidamente apresentada por ordem sequencial:

- Redução da cota de comprimento do punção;
- Adopção de uma conicidade semelhante à da geometria perdida;
- Modificação do material do punção para um material mais tenaz.

3.9.2 Punção 17

- O punção 17 não apresentou nenhuma irregularidade, quer nos ensaios realizados, quer nas observações relativas à fase de recolha de indícios. Assim considera-se que as fracturas verificadas neste elemento são exclusivamente consequência das fracturas do punção 16 a montante.

3.9.3 Punções 18 e 19

- Foram detectados desvios não admissíveis na placa porta-punções que assegura o posicionamento destes punções. Esses desvios não asseguram o correcto posicionamento do punção 18 que, por isso, não se apresenta concêntrico com a matriz de corte respectiva. Os desgastes localizados verificados no punção 18 são atribuídos ao exposto, ao passo que o desgaste do punção 19 advém do trabalho de calibração realizado num furo que, em virtude do desvio do punção 18, chega ao posto 19 com uma certa excentricidade.

  Assim, para este caso recomenda-se a substituição da placa porta-punções.

3.9.4 Falhas de Roscado

As falhas de roscado detectadas devem-se a um ataque descentrado, excêntrico da macho de roscar à banda de chapa. Na busca de uma solução para o problema foi analisado o comportamento do sistema de alimentação no qual se detectaram as seguintes inconformidades:

- O sistema de alimentação utilizado no processo não é adequado á espessura de chapa a conformar;
- Não existe na Gestamp Portugal um procedimento consistente para a configuração dos parâmetros de alimentação, sendo que os valores utilizados no processo em estudo são distantes dos valores que garantem o mínimo erro de avanço/posicionamento da banda de chapa;

- A sequência de programação que, na prensa, controla a acção do sistema de alimentação bem como de sistemas auxiliares, possui erros e incoerências que em nada beneficiam o correcto desempenho do processo;

Assim recomenda-se:

- A utilização de um sistema de alimentação conforme com a espessura de chapa a conformar;
- A definição de um procedimento geral de configuração de parâmetros de alimentação que conduza à menor introdução de erros ou possibilidades de falha, segundo o que se expõem neste estudo;
- Reestruturar a programação sequencial do processo em estudo de forma coerente e em função da configuração óptima dos parâmetros de alimentação;
- Em alternativa poderá desenvolver-se um sistema de pilotagem móvel que garanta uma pré centragem da banda antes da acção do macho de roscar. Esta solução no entanto apresenta-se como paliativa, pelo que não dever ser implementada antes da correcção das anomalias encontradas no sistema actual.

3.9.5 Discussão Geral de Procedimentos

Na análise de falhas e processos críticos de estampagem progressiva é de salientar o papel que os elementos danificados possuem pelas informações que podem revelar mediante observação cuidada. Sem esses elementos, o leque de dados disponíveis fica reduzido em qualidade e quantidade, pelo que se faz mister criar um suporte de recolha e armazenamento da informação relativa a processos críticos. No decorrer deste estudo dispôs-se apenas dos elementos fracturados existentes, sendo que muitos outros foram perdidos e, com eles, outras informações que poderiam ter sido relevantes. Neste sentido aconselha-se a criação de uma base de dados que sustente informação do tipo escrito e gráfico relativa aos processos de conformação da planta produtiva.

Por outro lado, durante a realização deste trabalho, não foi fácil fazer concorrer as contribuições dos diversos departamentos intervenientes no processo de conformação, num mesmo sentido. Para tal sugere-se a criação de grupos de melhoria cuja função é melhorar, controlar e acompanhar um determinado processo considerado crítico. Estes grupos deverão ser multidisciplinares, envolvendo elementos de todos os departamentos ligados directamente ao processo.

Considera-se ainda que as intervenções operacionais nas variáveis do processo (ferramenta, prensa, variáveis de projecto) deverão ficar a cargo de um só técnico por departamento (ou dois, no caso do regime de turnos) que, integrado no grupo de melhoria, recebe e produz informação consistente, informação essa que deve estar na base de qualquer intervenção operacional em processos críticos de estampagem.

3.10 Síntese de Medidas Operacionais

3.10.1 Punção 16

As seguintes medidas deverão ser implementadas isoladamente, pela ordem apresentada. Sempre que a medida implementada não se mostre eficaz, dever-se-á prosseguir para a seguinte.

- Selecção de uma prensa em melhor estado de conservação para o processo produtivo;
- Redução da cota de comprimento do punção;
- Adopção de uma conicidade semelhante à da geometria perdida;
- Modificação do material do punção para um material mais tenaz.

3.10.2 Punções 18 e 19

- Substituição da placa porta-punções.

3.10.3 Falhas de Roscado

- Utilização de um sistema de alimentação conforme com a espessura de chapa a conformar;

- Definição de um procedimento geral de configuração de parâmetros de alimentação que conduza à menor introdução de erros ou possibilidades de falha, segundo o que se expõem neste estudo;

- Reestruturação da programação sequencial do processo em estudo de forma coerente e em função da configuração óptima dos parâmetros de alimentação;

- Desenvolvimento de um sistema de pilotagem móvel que garanta uma pré centragem da banda antes da acção do macho de roscar. Esta solução no entanto apresenta-se como paliativa, pelo que não dever ser implementada antes da correcção das anomalias encontradas no sistema actual.

3.10.4Procedimentos

- Criação de base de dados que albergue a informação relativa a falhas em processos críticos de estampagem;
- Criação de Grupos de Melhoria para intervenção e acompanhamento de processos críticos;
- Destacamento, em cada departamento, de técnicos específicos para intervenção e acompanhamento de cada processo crítico;
- Implementar operações de verificação e manutenção preventiva dos equipamentos utilizados entre cada produção;

4 Desenvolvimentos Realizados

4.1 Selecção de Material para o Punção 16

4.1.1 Introdução

No *capítulo 3* desta monografia apurou-se que o material usado para o punção 16, o punção mais crítico do processo no que respeita a roturas, corresponde à referência S600 do fornecedor Böhler. Segundo as especificações de projecto, o tratamento térmico aplicado ao punção deve ser tal que este apresente uma dureza de 52HRC após revenido.

Tinha-se igualmente verificado que o material utilizado no punção 16 não era o mais adequado dadas as suas limitações no que respeita a:

- Capacidade de Absorção de Energia em Regime Elástico;
- Resistência à Ruptura por Fadiga.

A fragilidade verificada para o punção 16 sugere **duas possibilidades de modificação**:

- **Diminuição da dureza do material actual** – S600 – (com consequente ganho em tenacidade) através da selecção de uma temperatura de revenido diferente. Como se sabe, o punção de "geometria perdida" apresentava valores muito baixos de dureza (cerca de 42 HRC), atribuindo-se a esse facto a causa de nunca ter fracturado. Assim poderia considerar-se modificar a temperatura de revenido para que a dureza final do punção rondasse os 47 HRC.

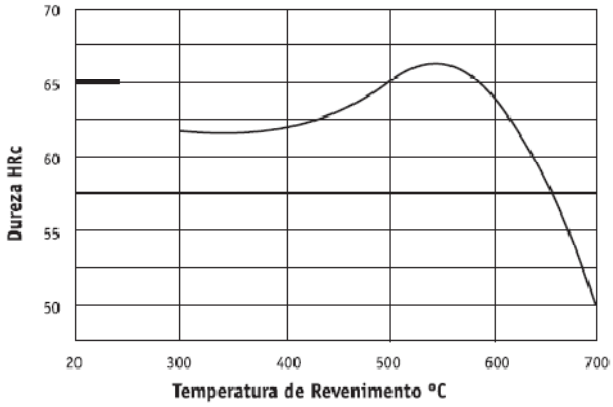


Gráfico 4.1 – Curva de Revenido do aço S600 - Böhler

- **Seleccionar um outro material para o punção** considerando para tal um aço que seja mais conforme com as necessidades verificadas: **tenacidade e resistência à fadiga**. É no sentido de estudar esta possibilidade que se desenvolve a presente secção.

4.1.2 Aços de Ferramentas Segundo a Norma AISI SAE

Segundo a norma AISI (American Iron and Steel Institute), os aços de ferramentas podem ser divididos nas seguintes séries (descrição apenas das séries relevantes para este estudo):

- **Série W – Aços Temperáveis em Água** – aços ao carbono (0.6-1.4%) sem elementos de liga. Apresentam riscos de fissuração ou distorção na têmpera. Temperaturas de austenitização baixas (800-850°C). Baixa temperabilidade. Baratos. Hipereutéctoides. Pouca precisão dimensional.

- **Série S – Aços Resistentes ao Choque** – Principais elementos de liga: Cr, Si, W. São geralmente aços muito pouco ligados, com aproximadamente 0.5% de carbono. São hipoeutéctoides de temperabilidade moderada. Possuem excelente tenacidade e resistência á fadiga.

- **Série O – Aços para Trabalho a Frio de Têmpera em Óleo** – possuem maior resistência mecânica quando comparados com a série S. São hipoeutéctoides com poucos elementos de liga (até 5%). Possuem uma temperabilidade mediana. Os elementos de liga típicos são W, Mn, Cr e Mo..

- **Série A – Aços para Trabalho a Frio, de Média Liga, Temperáveis ao Ar** – A temperabilidade é resultante de maiores quantidades de elementos de liga, enquanto que a resistência ao desgaste é assegurada pelas elevadas percentagens de carbono. Fraca resistência ao choque. A resistência ao choque pode ser melhorada aumentando a percentagem de Ni e diminuindo a percentagem de C.

- **Série D – Aços Indeformáveis** – aços para trabalho a frio. Possuem grande temperabilidade e resistência ao desgaste devido á alta percentagem de carbono e carbonetos de crómio (12% Cr). Fraca resistência ao choque. Velocidade crítica superior de têmpera muito baixa.

- **Série H – Aços para Trabalho a Quente**

- **Série T – Aços Rápidos ao Tungsténio** – Alta percentagem de elementos de liga (superior a 10%). Boa resistência ao desgaste (conferido pelo W). Boa resistência a quente (Co). Fraca resistência ao choque. Necessita de vários revenidos para eliminar a austenite residual. A quantidade de Co não é suficiente para baixar a temperabilidade.

- **Série M – Aços Rápidos ao Molibdénio** – Aços Rápidos ao Molibdénio – boa resistência ao desgaste, mas tendem a descarbonizar com mais facilidade que os anteriores, embora sejam mais baratos. Boa dureza e resistência a quente. Necessita de vários revenidos para eliminar a austenite residual. A quantidade de Co não é suficiente para baixar a temperabilidade.

- **Série P – Aços para Moldes de Injecção**

4.1.3 Discussão e Selecção de Materiais

As necessidades relativas ao punção 16 especificam:

- Dureza: 47-52 HRC
- Elevada Tenacidade
- Elevada Resistência à Fadiga

De entre as diversas séries de aços de ferramenta, aquelas que se encontram dentro destas especificações, segundo o exposto, são:

- Aços da **Série O – Aços para Trabalho a Frio de Têmpera em Óleo**
- Aços da **Série S – Aços Resistentes ao Choque**

Os **Aços da Série S**, apresentando elevado teor em silício, são aqueles que possuem os melhores índices de tenacidade e resistência à fadiga dentro da classe de aços de ferramenta. Não obstante, a sua capacidade de absorção de energia, deriva igualmente das baixas percentagens de carbono envolvidas na sua composição.

De facto, embora estes aços possuam características que permitam a resolução do problema de fractura da ferramenta, podem não apresentar a resistência ao desgaste necessária neste tipo de aplicação, já que a formação de Martensite dura será limitada ao pouco carbono disponível.

Consequentemente considera-se que a escolha de um aço da série S poderá trazer tanto em tenacidade como retirar em resistência ao desgaste.

Já os **Aços da Série O**, possuindo menores percentagens de silício (em alguns destes aços o silício é inexistente), conseguem a sua tenacidade através do teor elevado em manganês. Este elemento potencia o encruamento por choque, conferindo ao aço um aumento de resistência superficial, mantendo a tenacidade no núcleo. Por outro lado a percentagem de carbono é alta, o que se traduz no alcance de durezas elevadas. O molibdénio e o tungsténio são inexistentes (ou residuais), pelo que se formará uma menor quantidade de carbonetos duros no seio da matriz, potenciando novamente uma maior tenacidade quando comparado com o aço da série M, utilizado actualmente no punção.

Segundo o que se expôs, a selecção deverá respeitar um critério de compromisso entre a tenacidade e a dureza, de forma: A escolha recai sobre os **Aços da Série O**.

Material Seleccionado: Aço AISI O2 (ligado ao manganês) – correspondente à referência **Böhler K720.**

A composição percentual de elementos de liga para este aço vem:

C	Si	Mn	Cr	V
0,90	0,25	2,00	0,35	0,10

Tabela 4.1 – Composição do Aço K720 - Böhler

Onde,

- **Carbono** – Assegura a dureza da estrutura;
- **Silício** - Aumento do limite elástico, tenacidade e resistência à fadiga;
- **Manganês** – Confere um aumento de resistência à matriz e aumenta a temperabilidade. Eleva o efeito de encruamento por choque pelo que leva o aço a adquirir grande dureza superficial mantendo a tenacidade do núcleo;
- **Crómio** – Aumenta a temperabilidade e a resistência ao desgaste;
- **Vanádio** – Torna a estrutura do aço mais fina. Aumenta a resistência ao desgaste e a duração do corte. Aumenta o limite elástico.

Como se pode constatar o aço seleccionado apresenta a mesma percentagem de carbono do aço actualmente em uso. Desta forma prevê-se durezas semelhantes após um tratamento térmico adequado. O aço K720, equivalente ao AISI O2, traz ainda a vantagem de possuir uma percentagem de silício não desprezável, pelo que se prevê uma tenacidade superior relativamente a este último. Trata-se de um aço ligado ao manganês, de temperabilidade média-alta (temperável em óleo) em que a resistência ao desgaste vem aumentada pela influência do crómio e do vanádio.

As curvas Temperatura – Tempo – Transformação, para o material seleccionado, são apresentadas no Gráfico 4.2:

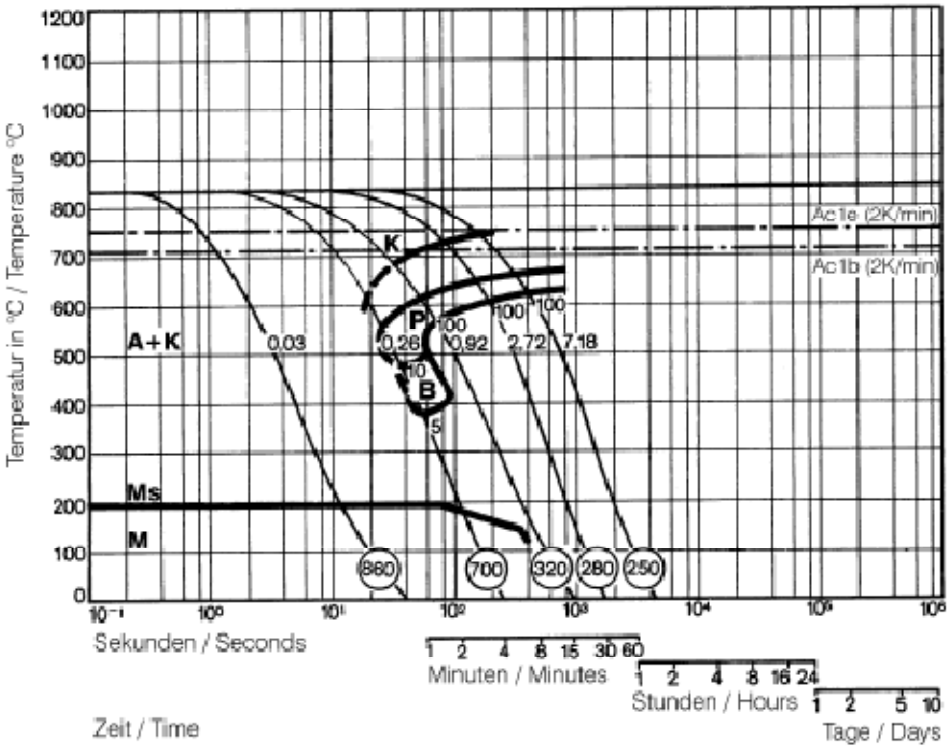


Gráfico 4.2 – Curvas Tempo-Temperatura-Transformação do Aço K720

E a curva de revenido é tal que:

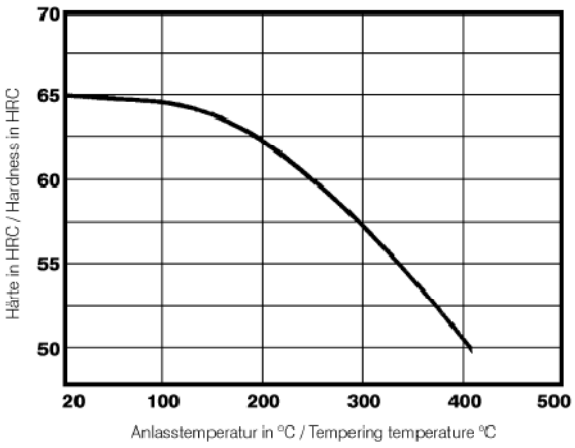


Gráfico 4.3 – Curva de Revenido do Aço K720

4.1.4 Revestimento Superficial dos Punções

No Gráfico 4.3 é perceptível que a contrapartida deste material é a baixa resistência ao revenido. Como tal o revestimento superficial anti-desgaste utilizado pela Gestamp Portugal nos punções de embutir – Balinit Lumena (TiAlN) – não pode ser aplicado, já que este revestimento é aplicado a temperaturas que rondam os 400-500°C, podendo conduzir à migração do carbono com consequente perda de dureza.

Assim, para correcta implementação deste material deverá ser seleccionado um novo tipo de revestimento anti-desgaste, que possa ser aplicado a temperaturas mais baixas, garantindo que as especificações de dureza exigidas para a embutidura são cumpridas.

Revestimento	Composição	Fornecedor	Temperatura de Aplicação	Microdureza (HV 0.05)	Temperatura máxima de Funcionamento
Balinit Lumena **(Actual)**	TiAlN	Balzers	400-500°C	3400	900°C
Balinit Futura Nano Artic **(Substituto)**	TiAlN	Balzers	200°C	3300	700°C

Tabela 4.2 – Características do Novo Revestimento Superficial Comparativamente ao Actualmente Utilizado

4.1.5 Conclusões

Deste estudo conclui-se:

- É possível conseguir uma maior resistência á fadiga e maiores níveis de tenacidade, modificando o material actualmente utilizado no Punção 16, que por se tratar de um aço rápido não possui as características adequadas à função desempenhada pelo punção.

- A selecção do material foi efectuada com base nas composições químicas dos diversos aços de ferramenta, sendo que os aços das séries S e O mostraram ser os mais adequados pelas suas características em termos de resistência ao choque.

- Os aços da série S não apresentam teores de carbono que garantam a dureza necessária à função do punção, pelo que foram eliminados do grupo de materiais candidatos;

- Dentro dos aços da série O, foi seleccionado o aço K720, correspondente ao AISI O2. Pelas suas características espera-se que este material cumpra as especificações de resistência e tenacidade anteriormente definidas.

4.2 Selecção de um Sistema de Alimentação Compatível

4.2.1 Introdução

No *capítulo 3* desta monografia apurou-se que o sistema de alimentação associado à produção do componente PT428 não era adequado para trabalhar uma chapa de 4 mm de espessura.

A escolha de um sistema de alimentação compatível implica, não só a selecção de uma unidade de alimentação de banda de chapa que se mostre adequada, mas também da prensa que lhe está associada. Isto porque quando nos referimos a prensas e a unidades de alimentação concebidos para a produção de grandes séries, estamos a falar de equipamentos de grandes dimensões, com condições de instalação bem determinadas, cuja movimentação implica custos de ordem elevada.

Assim, ao seleccionar um determinado sistema de alimentação que seja compatível com a espessura de chapa a trabalhar, está-se, de forma indirecta, a seleccionar a prensa que é alimentada por esse sistema.

4.2.2 Especificações Gerais da Prensa e do Alimentador

A escolha de uma máquina compatível para alimentação em termos da espessura máxima admissível está limitada aos pares coordenados prensa-alimentador existentes na planta produtiva. Assim, de entre as várias linhas produtivas a compatibilidade é determinada por:

1. Espessura máxima admitida pelo alimentador: igual ou superior a 4 mm
2. Capacidade de Carga Mínima: 400ton

Dentro destas especificações, o parque de máquinas da Gestamp Portugal dispõem:

Prensa/Alimentador	Capacidade de Carga (ton.)	Espessura Máxima de Chapa (mm)	Cursos Próximos (mm)
PO35	400	5	209,233,265
PO65	400	5	230,247,265
PO24	630	6	207,272,292
PO28	630	5	207,272,292
PO63	630	6	207,272,292

Tabela 4.3 – Máquinas Compatíveis com as Especificações Gerais

Como se pode observar na Tabela 4.3, nenhuma das máquinas (prensas) compatíveis apresenta um curso de funcionamento de 254 mm, o curso da prensa que actualmente produz o componente

PT428. Desta forma, para que a ferramenta que produz o componente possa ser aplicada numa das máquinas listadas na Tabela 4.3, é necessário verificar, se a mudança para um curso de funcionamento diferente está sujeita a algum tipo de limitações.

4.2.3 Especificações Introduzidas Pelo Sistema de Roscagem

A ferramenta de estampagem que produz o componente PT428 possui, como se sabe, um sistema de roscagem integrado que permite a roscagem da peça. Esse sistema é accionado por um fuso cujo deslocamento é projectado em função do curso de funcionamento da prensa destinada à produção do componente. Desta forma, a adopção de um novo conjunto prensa-alimentador para o fabrico, deve respeitar o comprimento máximo do fuso do sistema de roscagem garantindo, caso se opte por um curso maior do que o curso de funcionamento actual, que o fuso de accionamento não desengrene do corpo do mecanismo. Na Figura 4.1 pode observar-se uma vista lateral da ferramenta de estampagem em que estão cotadas sobre o fuso do sistema de roscagem:

1. Um comprimento correspondente ao curso da prensa: 254 mm;
2. Um comprimento correspondente à diferença entre o curso da prensa e o comprimento total do fuso de accionamento: 26 mm;

Por outro lado a diminuição do curso deve ser evitada, na medida em que se reflectirá numa menor penetração do macho de roscar, conduzindo a uma pior qualidade da rosca obtida.

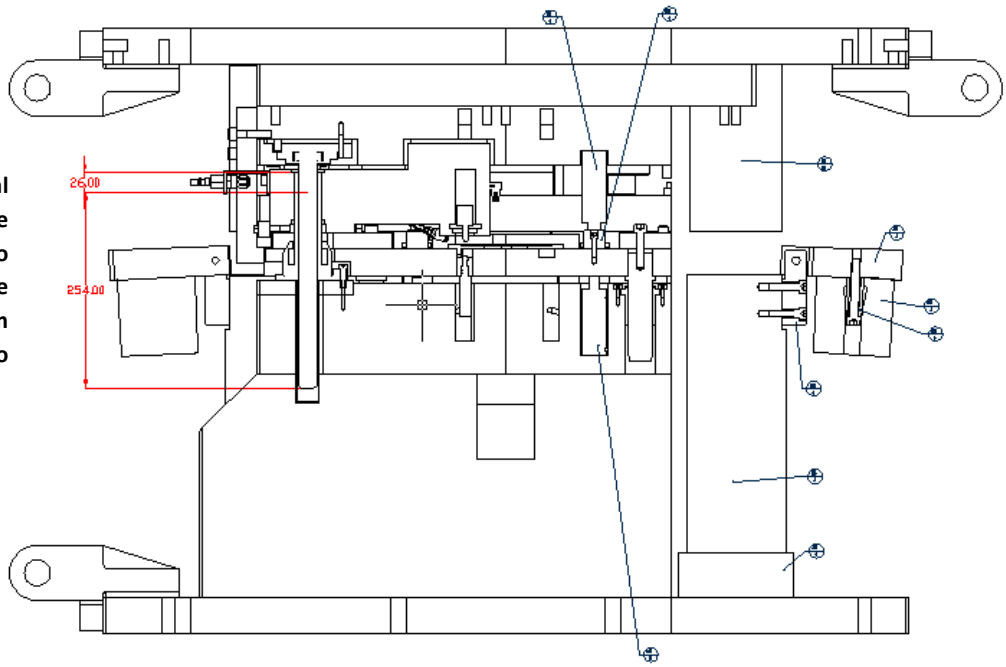


Figura 4.1 – Vista Lateral da Ferramenta onde pode ser observado o máximo aumento de curso que se pode implementar sem risco de desengrenamento do sistema de Roscagem

Assim, os limites admitidos para o novo curso a adoptar são:

- Limite Superior (Curso do sistema de roscagem): 254+26= **280 mm;**
- Limite Inferior: **254 mm** (a diminuição do curso levaria a uma menor penetração do macho de roscagem com consequentes perdas na qualidade da rosca obtida).

Desta forma a Tabela 4.3 vem reduzida:

Prensa	Capacidade de Carga (ton.)	Espessura Máxima de Chapa (mm)	Cursos Próximos (mm)
PO35	400	5	**265**
PO65	400	5	**265**
PO24	630	6	**272**
PO28	630	5	**272**
PO63	630	6	**272**

Tabela 4.4 – Selecção de Cursos Admissíveis

4.2.4 Especificações Relativas às Saídas de Recortes de Sucata

Deve ainda ser considerado que as aberturas, ou furações, existentes nas mesas das prensas para possibilitar a evacuação dos recortes de sucata por gravidade, diferem consoante a prensa seleccionada é de 400 ou 630 toneladas. Assim, a adopção de uma prensa de 630 toneladas traria a necessidade de efectuar alterações na ferramenta para garantir a correcta evacuação desses recortes, pelo que esta opção deverá ser evitada. Assim a Tabela 4.4 fica reduzida:

Prensa	Capacidade de Carga (ton.)	Espessura Máxima de Chapa (mm)	Cursos Próximos (mm)
PO35	400	5	**265**
PO65	400	5	**265**

Tabela 4.5 – Máquinas com Saída de Sucata Compatível

4.2.5 Especificações de Paralelismo

Tendo em conta que a produção do componente PT428 pode ser considerada um processo crítico de estampagem progressiva, os equipamentos associados ao processo devem ser aqueles que se apresentem em melhores condições de funcionamento. Neste contexto já foram feitas as considerações necessárias - *capítulo 3* – acerca da importância do paralelismo nas prensas afectas aos processos. Deverá pois, dentro do leque de máquinas disponível, seleccionar-se aquela com menores erros de paralelismo no curso considerado.

Os valores máximos admitidos para os erros de paralelismo, definidos no *capítulo 3* desta monografia, são:

Ponto FD (Zero do Comparador)	Ponto FI	Ponto AI	Ponto AD
0	0.204	0.225	0.096

Tabela 4.6 – Erros Limite de Paralelismo

Assim, para as máquinas PO35 e PO65 os erros de paralelismo relativamente aos valores máximos admitidos vêm assinalados a vermelho:

			TRIMESTRE 1			
			22-01-2009			
PRENSA	**CURSO**	**POSIÇÃO**	**FD**	**FI**	**AI**	**AD**
maq 65	**Maximo**	**PMS**	0	**0,58**	**0,96**	**0,17**
		90º	0	**0,87**	**1,25**	**0,16**
		270º	0	**0,65**	**0,98**	**0,11**
		PMI	0	**0,61**	**1,03**	**0,29**
	Medio	**PMS**	0	**0,67**	**1,04**	**0,1**
		90º	0	**0,81**	**1,21**	**0,11**
		270º	0	**0,63**	**0,97**	**0,11**
		PMI	0	**0,47**	**0,79**	0,04
	Minimo	**PMS**	0	**0,68**	**1,06**	0
		90º	0	**0,69**	**1,06**	**0,16**
		270º	0	**0,71**	**1,1**	**0,12**
		PMI	0	**0,69**	**1,01**	0,03

Tabela 4.7 – Desvios no Paralelismo da Prensa PO65

			2010			
PRENSA	CURSO	POSIÇÃO	FI	FD	AI	AD
maq 35	Maximo	PMS	0	0,69	0,55	0,62
		90º	0	0,41	0,71	0,53
		270º	0	0,26	0,11	0,21
		PMI	0	0,07	-0,26	-0,19
	Medio	PMS	0	0,48	0,22	0,52
		90º	0	0,49	0,14	0,52
		270º	0	0,09	-0,04	0,07
		PMI	0	0,2	-0,04	0,02
	Minimo	PMS	0	-0,12	-0,07	-0,1
		90º	0	0,31	-0,31	-0,35
		270º	0	0,15	0,02	0,71
		PMI	0	0,04	0,11	0,07

Tabela 4.8 – Desvios no Paralelismo da Prensa PO35

4.2.6 Conclusões

Desta forma considerando:

- Uma prensa cuja capacidade de carga seja de 400 toneladas ou superior;
- Um sistema de alimentação capaz de admitir chapa de 4 mm de espessura;
- Uma prensa com curso de funcionamento compreendido entre 254 e 280 mm;
- Uma prensa cuja mesa possua saídas de sucata compatíveis.

É possível transferir a ferramenta que produz o PT428 para um conjunto prensa-alimentador com capacidade para trabalhar uma chapa de 4mm de espessura e funcionando em melhores condições de paralelismo. Esse conjunto de máquinas corresponde à prensa PO35 e ao sistema de alimentação que lhe está associado.

Prensa	Capacidade de Carga (ton.)	Espessura Máxima de Chapa (mm)	Novo Curso (mm)
PO35	400	5	**265**

Tabela 4.9 – Métricas Relevantes do Posto de Trabalho Seleccionado

4.3 Procedimento para Configuração de Parâmetros Óptimos de Alimentação

4.3.1 Introdução

No *capítulo 3* foi identificada a necessidade de desenvolver um método consistente que permita a configuração coerente dos parâmetros de alimentação.
O objectivo é estabelecer um procedimento base, que regule a definição e configuração de parâmetros de alimentação para um determinado processo de estampagem progressivo, de forma a assegurar a mínima introdução de erros de avanço ou incoerências de programação no funcionamento automático da máquina.

Em secção anterior foram apresentados quais os parâmetros configuráveis nos sistemas de alimentação:

- Passo ou Avanço (Deslocamento);
- Velocidade de Avanço;
- Aceleração do Avanço;
- Desaceleração do Avanço;
- Pressão nos Cilindros Endireitadores (Ajuste Manual);
- Alinhamento Horizontal da Alimentação (Ajuste Manual);
- Alinhamento Vertical da Alimentação (Ajuste Manual).

Já foi também estabelecido que, para uma menor introdução de erros no avanço (deslocamento) da banda de chapa, deve ser respeitado:

- Aceleração e Desaceleração reduzidas ao mínimo;
- O material deverá estar limpo (não lubrificado), entre os rolos do alimentador, para que não haja escorregamento;
- O material deverá estar perfeitamente alinhado com os guiamentos de banda na ferramenta, quer vertical quer horizontalmente;
- A pressão nos cilindros endireitadores deve ser alta (evitar escorregamento), mas não tão alta que conduza à laminagem da chapa.

Neste sentido passa-se a definir normas de configuração que respeitem o exposto.

4.3.2 Definição da Janela de Alimentação

Para determinar os parâmetros óptimos de alimentação comece-se por definir a janela disponível para a realização do avanço de chapa.

A janela de alimentação corresponde ao espaço angular em que a ferramenta se encontra com uma abertura suficiente para que o alimentador possa fazer avançar a chapa com segurança, isto é, sem que esta última colida com os órgãos da ferramenta. Esta janela é definida numa primeira análise, pelo momento em que o primeiro órgão mecânico da parte superior da ferramenta atinge o nível da banda de chapa. Assim a janela de alimentação máxima deverá ser definida tal que:

- Termine imediatamente antes que o primeiro órgão mecânico da parte superior da ferramenta atinge o nível da banda de chapa, constituindo um impedimento ao seu avanço
- Se inicie logo que esse mesmo órgão da parte superior da ferramenta abandona o nível da chapa, deixando-a desimpedida para avançar.

É através da definição da janela de alimentação máxima, afectada de um determinado coeficiente de segurança, que será possível definir a mínima velocidade de alimentação.

Usando o formalismo matemático, seja d a distância que separa o órgão mecânico mais próximo da banda de chapa, da mesma, no momento em que a prensa se encontra no ponto morto superior (θ=0), tal como se representa a seguir.

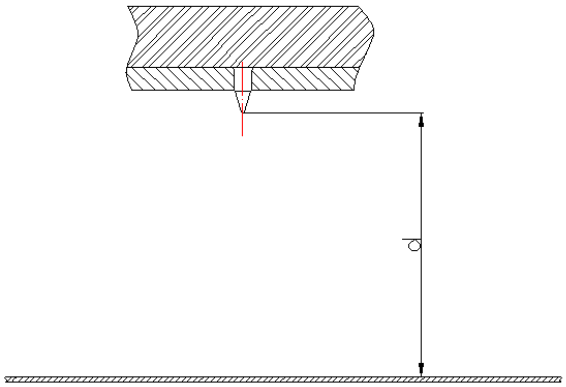


Figura 4.2 – Distância do Orgão Mecânico mais Próximo à Banda de Chapa no Início do Golpe

Como ficou patente no capítulo *Ferramentas, Máquinas e Sistemas Auxiliares* a equação que estabelece a distância, y, do carro ao PMS em função do ângulo de rotação da manivela, θ, e do raio da manivela, r, é:

$$y = r(1 - \cos(\theta)) \tag{4.1}$$

Pelo que, o ângulo de contacto θ_c, para o qual o primeiro órgão mecânico da parte superior ferramenta atinge a cota da banda de chapa vem:

$$\theta_c = \arccos\left(1 - \frac{d}{r}\right) \tag{4.2}$$

Assim, a janela de alimentação máxima, ou seja, o espaço angular em que a banda pode avançar sem riscos de colisão com outros órgãos mecânicos da ferramenta, vem:

- Início da Alimentação: $\theta_i = 360 - \theta_c$
- Fim da Alimentação: $\theta_f = \theta_c$
- Janela de Alimentação: $\Delta\theta = 2 \times \theta_c$

Defina-se agora um coeficiente de segurança que, a partir da janela de alimentação máxima, estabeleça uma janela de alimentação admissível.

Assim, para garantir a inexistência de colisões, considere-se que a janela de alimentação admissível fica definida pelo ângulo θ_c afectado por um decremento de 10°, ou seja, considera-se que a alimentação admissível deverá iniciar-se 10° após o ângulo em que a banda fica livre para avançar e, da mesma forma, deverá terminar 10° antes da banda ficar bloqueada por qualquer outro elemento.

Assim:

$$\theta_a = \theta_c - 10 \tag{4.3}$$

Desta forma a janela de alimentação admissível vem:

- Início da Alimentação Admissível: $\theta_{ia} = 360 - \theta_a$
- Fim da Alimentação Admissível: $\theta_{fa} = \theta_a$
- Janela de Alimentação Admissível: $\Delta\theta_a = 2 \times \theta_a$

4.3.3 Cálculo do Valor Mínimo da Velocidade Média de Avanço

Seja $\dot{\theta}$ a velocidade de rotação da árvore de excêntricos num determinado processo de estampagem progressivo, tal que:

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \tag{4.4}$$

Então, o tempo disponível para realização da alimentação dentro de um ciclo, vem:

$$\Delta t_a = \frac{\Delta\theta_a}{\dot{\theta}} \tag{4.5}$$

Desta forma a velocidade média requerida para o avanço de chapa vem:

$$\bar{V} = \frac{P}{\Delta t_a} \tag{4.6}$$

Em que P representa o passo ou avanço que é necessário imprimir à chapa entre os postos do processo progressivo.

4.3.4 Determinação dos Valores Mínimos da Aceleração e Desaceleração

A segunda lei de Newton estabelece a relação entre a força que é necessário aplicar a uma determinada massa para lhe imprimir uma determinada aceleração, tal que:

$$F = m.a \tag{4.7}$$

Assim, para uma mesma massa, quanto mais reduzida for a aceleração a imprimir, menor será o esforço a aplicar. É neste sentido que, ao reduzir os valores de aceleração e desaceleração do avanço de chapa, se garante um menor esforço para a movimentação da mesma, reduzindo a possibilidade de escorregamento entre o material e os rolos tractores.

O avanço de chapa na ferramenta obedece a 3 fases distintas:

- Movimento uniformemente acelerado até á velocidade de alimentação;
- Movimento uniforme à velocidade de alimentação;
- Movimento uniformemente desacelerado até á velocidade nula.

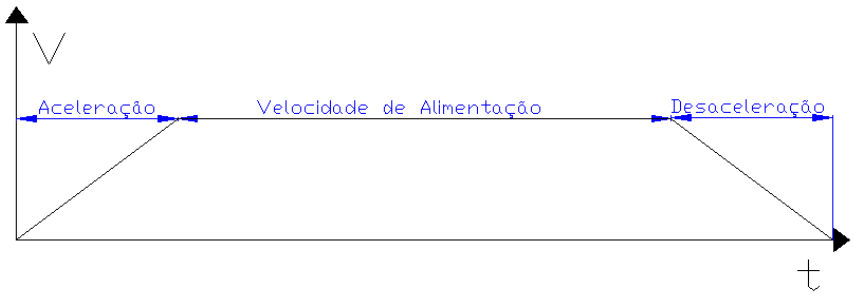


Gráfico 4.4 – Fases do Movimento da Chapa Durante o Ciclo de Alimentação

Pretendem-se minimizar Aceleração e Desaceleração:

- Minimizando a aceleração pretende-se reduzir as possibilidades de ocorrer avanço de chapa insuficiente por escorregamento do material;
- Minimizando a desaceleração pretende-se reduzir as possibilidades de ocorrer avanço de chapa excessivo por escorregamento do material.

Desta forma os intervalos de tempo em que ocorrem a aceleração e desaceleração deverão ser idênticos, garantindo esforços iguais nos rolos tractores, ora para acelerar a chapa, ora para a imobilizar.

Desta forma, o movimento de avanço de chapa será simétrico no tempo, podendo-se reduzir o modelo em análise a duas fases distintas:

- Movimento Uniformemente Acelerado
- Movimento Rectilíneo Uniforme

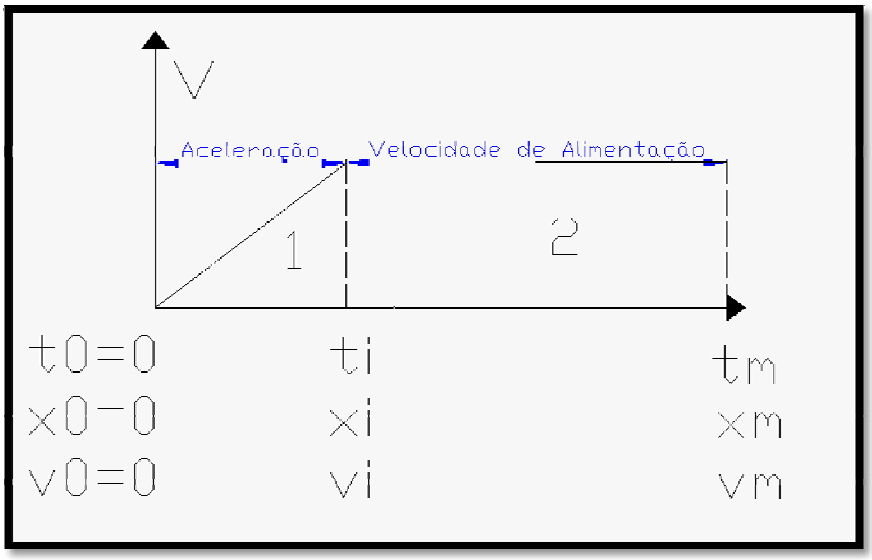


Gráfico 4.5 – Fases do Movimento da Chapa Durante o Ciclo de Alimentação

Assim, esta análise poderá ser simplificada considerando:

- Duas zonas 1 e 2, caracterizadas pelas respectivas velocidades médias: $\overline{V_1}$ e $\overline{V_2}$
- Um deslocamento xm igual a metade do avanço de chapa necessário: $x_m = \frac{P}{2}$
- Um intervalo de tempo tm igual a metade do tempo disponível para alimentação: $t_m = \frac{\Delta t_a}{2}$

Para a zona 1 temos ao nosso dispor as seguintes equações relativas ao movimento uniformemente variado:

$$x = x_0 + v_0(t - to) + \frac{1}{2}a\,(t - t_0)^2 \tag{4.8}$$

$$v = v_0 + at \tag{4.9}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \tag{4.10}$$

As equações anteriores aplicadas ao ponto $i\ resultam$:

$$x_i = +\frac{1}{2}a\ {t_i}^2 \tag{4.11}$$

$$v_i = \overline{V_2} = at_i \tag{4.12}$$

$${v_i}^2 = \overline{V_2}^2 = 2ax_i \tag{4.13}$$

As Equações 4.11 e 4.13 podem ainda ser reescritas como:

$$a = \frac{2x_i}{{t_i}^2} \tag{4.14}$$

$$a = \frac{\overline{V_2}^2}{2x_i} \tag{4.15}$$

Logo,

$$\frac{2x_i}{{t_i}^2} = \frac{\overline{V_2}^2}{2x_i} \tag{4.16}$$

Resolvendo em Ordem a $\overline{V_2}$:

$$\overline{V_2} = \frac{2x_i}{t_i} \tag{4.17}$$

Mas,

$$\frac{x_i}{t_i} = \overline{V_1} \tag{4.18}$$

Então:

$$\overline{V_2} = 2\overline{V_1} \tag{4.19}$$

Ou seja, a velocidade média na zona 1 é metade da velocidade média na zona 2.

Para compatibilizar as equações relativas às duas zonas ou fases do movimento composto de avanço, com a velocidade média mínima, requerida para o avanço, deverá ter-se em conta:

$$\overline{V} = \frac{\overline{V_1}+\overline{V_2}}{2} \tag{4.20}$$

Pelo que, as velocidades médias em cada zona, podem agora ser definidas à custa da velocidade média mínima definida anteriormente, tais que:

$$\overline{V_1} = \frac{2}{3}\overline{V} \tag{4.21}$$

$$\overline{V_2} = \frac{4}{3}\overline{V} \tag{4.22}$$

Para definição do valor mínimo da aceleração (e consequentemente da desaceleração), atente-se na Equação 4.15:

$$a = \frac{\overline{V_2}^2}{2x_i}$$

Para minimizar o valor da aceleração é então necessário:

- Minimizar $\overline{V_2}$
- Maximizar xi

Note-se que o valor de $\overline{V_2}$ depende directamente de $\bar{V}$, atingindo o seu valor mínimo quando $\bar{V}$ for mínimo. Ora, como $\bar{V}$ já é o mínimo valor que podemos tomar para média das velocidades durante o avanço completo, **o valor mínimo de $\overline{V_2}$ vem**:

$$\overline{V_2} = \frac{4}{3}\bar{V} \tag{4.23}$$

Já **o valor máximo que xi** pode assumir corresponde a:

$$x_i = x_m = \frac{P}{2} \tag{4.24}$$

Assim, **a aceleração mínima** pode finalmente ser calculada através da seguinte expressão:

$$a = \frac{\left(\frac{4}{3}\bar{V}\right)^2}{P} \tag{4.25}$$

Em que, $\bar{V}$ e P, são a velocidade média mínima e o passo de avanço, respectivamente.

A velocidade de alimentação a adoptar corresponde ao valor de $\overline{V_2}$.

O valor a introduzir na consola do alimentador é, como referido, a razão entre a velocidade pretendida e a velocidade máxima que o alimentador consegue debitar, expressa em termos percentuais, tal que:

$$V_a = \frac{\overline{V_2}}{V_{máx}} \times 100 \tag{4.26}$$

4.3.5 Definição da Programação Sequencial da Prensa

O accionamento das acções do sistema de alimentação é, como vimos, governado pelo autómato de controlo da prensa que, em função do deslocamento angular da árvore de excêntricos relativamente ao PMS, acciona o sistema de alimentação bem como verifica os sensores auxiliares.

Neste sentido, para além dos parâmetros de alimentação já discutidos, a correcta definição de uma gama de parâmetros implica o estabelecimento das posições angulares em que o alimentador deverá realizar as suas acções.

De uma forma geral a programação sequencial de uma prensa mecânica estabelece:

- Ângulo de início e ângulo de fim da alimentação de chapa
- Ângulo de início e ângulo de fim da verificação de avanço de chapa
- Ângulo de início e ângulo de fim da Pilotagem
- Ângulo de início e ângulo de fim da Verificação de Processos Auxiliares

4.3.5.1 Ângulo de início e ângulo de fim da alimentação de chapa

A posição angular em que deve acontecer o início e o fim da alimentação já é conhecida, pois já foi calculada aquando da definição da janela de alimentação admissível. Deverá ser tal que:

- Início da Alimentação Admissível: $\theta_{ia} = 360 - \theta_a$
- Fim da Alimentação Admissível: $\theta_{fa} = \theta_a$

4.3.5.2 Ângulo de início e ângulo de fim da verificação de avanço de chapa

Estes parâmetros definem o espaço angular em que os sensores da prensa deverão verificar que o avanço da chapa se realizou correctamente. Assim esta verificação deverá iniciar-se ligeiramente antes do fim da alimentação e terminar ligeiramente depois. Tome-se o valor de 10^{o}, como um desfasamento angular razoável para definição do início e fim desta verificação ou *Sequência 1*.

- Início da Sequência 1: $\theta_{is1} = \theta_a - 10$
- Fim Sequência 1: $\theta_{fs1} = \theta_a + 10$

4.3.5.3 Ângulo de início e ângulo de fim da Pilotagem

A pilotagem corresponde ao momento em que o alimentador abre as pinças de aperto de forma a deixar a banda de chapa livre para ser correctamente posicionada pelos órgãos de pilotagem da ferramenta. Esta abertura de pinças só pode acontecer quando os elementos de pilotagem já se encontrarem em contacto com a chapa, para que esta nunca tenha a possibilidade de retroceder por gravidade.

Considera-se seguro efectuar a pilotagem quando 80% do corpo do órgão de pilotagem da ferramenta já ultrapassou a cota correspondente à superfície da banda, ou seja, em termos de distância ao ponto morto superior:

$$d_p = d + (0.8 \times p) \tag{4.27}$$

Em que *p* representa o comprimento total do órgão de pilotagem.

Conhecendo d_p pode-se calcular o ângulo em que 80% do piloto já atravessou a chapa, correspondendo este ao nosso ângulo de início de pilotagem, tal que:

- Início da Pilotagem: $\theta_{ip} = \arccos\left(1 - \frac{(d+0.8p}{r}\right)$

O fim da pilotagem deverá ocorrer no momento em que os pilotos abandonam a banda, pelo que, seguindo mesmo princípio, o alimentador deverá fechar as pinças quando 80% do corpo dos pilotos, agora em movimento ascendente, estiver à mesma cota da superfície da banda. Assim o ângulo em que termina a pilotagem pode ser definido:

- Fim da Pilotagem: $\theta_{fp} = 360 - \theta_{ip}$

4.3.5.4 Ângulo de início e ângulo de fim de Verificação de Processos Auxiliares

Estes parâmetros definem o espaço angular em que os sensores da ferramenta deverão sinalizar que um determinado processo auxiliar se realizou com sucesso. No caso do projecto PT428, esta verificação incide sobre o mecanismo de roscar, avaliando se sensor de fim de roscagem foi accionado.

Assim, como o fim da roscagem se dá no PMI, a verificação deste processo, ou *Sequência 2*, encontra um espaço angular coerente num desfasamento de 10º relativamente ao PMI (180º de rotação da manivela Θ). Desta forma podem definir-se os seguintes limites:

- Início da Sequência 2: $\theta_{is2} = 180 - 10 = 170^0$
- Fim Sequência 2: $\theta_{fs2} = 180 + 10 = 190^0$

Note-se que a definição do espaço angular relativo à Sequência 2 foi efectuada considerando a aplicação de um sistema de roscagem em prensa, não sendo portanto generalizável a todos os processos de estampagem progressiva.

4.3.6 Procedimento para a Configuração de Parâmetros de Alimentação

4.3.6.1 Parâmetros Programáveis

Pelo que se expôs anteriormente a configuração dos parâmetros de alimentação deve ser efectuada tomando como base as expressões que conduzem à menor introdução de erros no processo de alimentação. Listam-se a seguir as fórmulas de cálculo adequadas à determinação de cada parâmetro, cuja demonstração foi exibida anteriormente.

- **Janela Disponível para Alimentação ($\Delta\theta_a$)**

$$\Delta\theta_a = 2 \times \left(\arccos\left(1 - \frac{d}{r}\right) - 10\right) \tag{4.28}$$

- **Aceleração/Desaceleração mínimas (a):**

$$a = \frac{\left(\frac{4}{3}\bar{V}\right)^2}{P} \tag{4.29}$$

Com,

$$\bar{V} = \frac{P}{\Delta t_a} \tag{4.28}$$

- **Velocidade mínima a introduzir na consola do alimentador (V_a):**

$$V_a = \frac{\overline{V_2}}{V_{máx}} \times 100 \tag{4.30}$$

Com,

$$\overline{V_2} = \frac{4}{3}\bar{V} \tag{4.31}$$

Estas expressões são definidas á custa dos seguintes dados de cada processo específico:

- Velocidade angular árvore de excêntricos, $(\dot{\theta})$,
- Distância que separa a o órgão mecânico mais próximo (parte superior da ferramenta) da banda de chapa, cotado a partir do PMS, (d),
- Curso de Funcionamento, $(C = 2r)$,
- Velocidade máxima do alimentador, $(V_{máx})$,
- Passo ou Deslocamento Necessário, (P),

4.3.6.2 Programação Sequencial da Prensa

Como foi exposto a determinação dos espaços angulares correspondentes à programação sequencial de controlo na prensa pode ser efectuada através das seguintes expressões:

Alimentação de Chapa

- Início da Alimentação Admissível: $\theta_{ia} = 360 - \theta_a$
- Fim da Alimentação Admissível: $\theta_{fa} = \theta_a$

Verificação da Alimentação de Chapa (Sequência 1)

- Início da Sequência 1: $\theta_{is1} = \theta_a - 10$
- Fim Sequência 1: $\theta_{fs1} = \theta_a + 10$

Pilotagem

- Início da Pilotagem: $\theta_{ip} = \arccos\left(1 - \frac{(d+0.8p}{r}\right)$
- Fim da Pilotagem: $\theta_{fp} = 360 - \theta_{ip}$

Verificação de Processos Auxiliares (Sequência 2)

- Início da Sequência 2: $\theta_{is2} = 180 - 10 = 170^0$
- Fim Sequência 2: $\theta_{fs2} = 180 + 10 = 190^0$

Note-se que para a determinação do ângulo de início e de fim da pilotagem é necessário conhecer o valor do comprimento total do órgão de posicionamento (piloto);

Note-se ainda que a janela disponível para verificação de processos auxiliares foi estabelecida para processos em que a "Sequência 2" corresponde à verificação de fim de curso do macho de roscagem. Assim, neste caso, a janela angular determinada só é válida para casos semelhantes.

4.3.6.3 Parâmetros Manuais

Os restantes parâmetros de alimentação não se encontram definidos por se tratar de variáveis de ajuste manual, para as quais não existe ainda informação disponível que permita estabelecer uma lógica exacta de configuração. No entanto, os procedimentos para a sua configuração manual podem seguir as seguintes directivas:

- **Pressão nos Cilindros Endireitadores (Ajuste Manual)**
    - Deverá ser aplicada de forma a garantir a inexistência de escorregamento entre a banda de chapa e os cilindros tractores;

- **Alinhamento Horizontal da Alimentação (Ajuste Manual)**
    - Poderá ser equacionado o projecto de um mecanismo de posicionamento horizontal de chapa por recurso a um feixe laser;

- **Alinhamento Vertical da Alimentação (Ajuste Manual)**
    - Deverá ser configurado de forma a que a alimentação de chapa se efectue à cota média do curso de elevação de banda;

- **Passo de Alimentação:** deverá ser configurado para o valor nominal do avanço. Caso se verifiquem atrasos na alimentação (ou alternativamente alimentação excessiva) os incrementos a aplicar ao valor nominal do passo deverão ser pequenos e aplicados gradualmente até se conseguir a estabilidade do processo.

4.3.7 Software de Cálculo de Parâmetros Óptimos de Alimentação

As expressões apresentadas anteriormente com vista a regular o melhor funcionamento das unidades de alimentação comandadas pela prensa mecânica podem ser integradas num bloco de programação que permita, em função das variáveis de entrada específicas do processo, devolver os valores finais dos parâmetros programáveis, bem como os espaços angulares que regulam a programação da prensa.

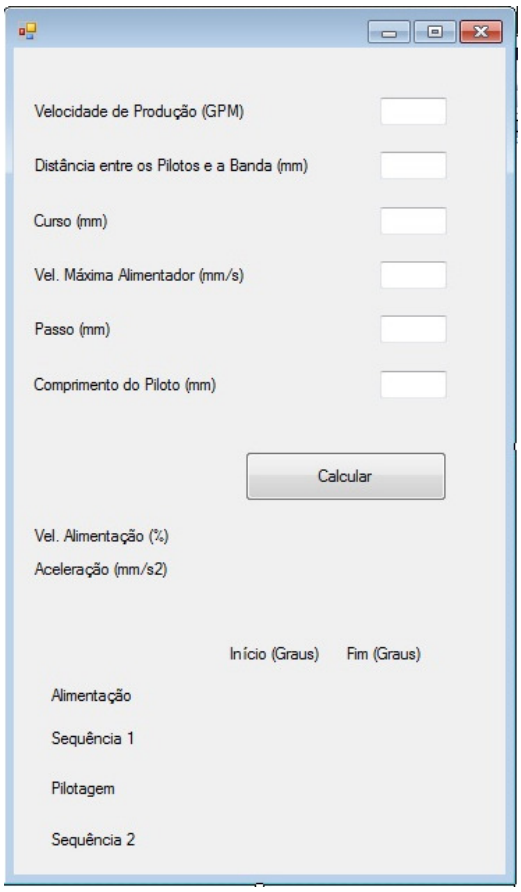
Este tipo de integração computorizada possui ainda a vantagem de constituir uma solução "Poka Yoke", ou seja, uma solução á prova de erros, permitindo aos Departamento de Produção estipular os valores óptimos de alimentação para um determinado processo, de forma rápida e eficaz. A aplicação foi criado por recurso ao software Visual Studio e toma o nome de **GestFeed 1.0**.

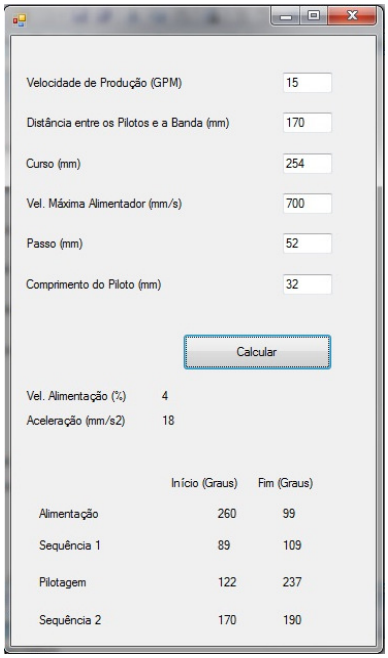
4.3.7.1 Interface

A interface da aplicação criada consiste numa janela com a forma de calculadora. As variáveis de entrada são introduzidas nas caixas de texto existentes.

Os valores das variáveis de saída são apresentados após premido o botão "Calcular".

A relação entre as variáveis de entrada e de saída correspondem às expressões de cálculo de valores óptimos estabelecidos neste desenvolvimento.





Figuras 4.2 e 4.3 - Interface da Aplicação GestFeed

4.3.7.2 Codificação de Variáveis

Na construção do bloco do programa foi usada a seguinte codificação de variáveis:

Variável	Tipo	Codificação
Velocidade da Prensa	Entrada	a
Distancia do Piloto à chapa	Entrada	d
Curso de Funcionamento	Entrada	c
Velocidade Máxima do Alimentador	Entrada	f
Passo de Avanço	Entrada	p
Comprimento do Piloto	Entrada	h

Tabela 4.10 – Codificação das Variáveis de Entrada

Variável	Tipo	Codificação
$\Delta\boldsymbol{\theta_a}$	Auxiliar	Deltatetaa
$\Delta\boldsymbol{t_a}$	Auxiliar	deltata
$\boldsymbol{\theta_{ip}}$	Auxiliar	deltatetap
$\dot{\boldsymbol{\theta}}$	Auxiliar	tetaponto
Velocidade média	Auxiliar	vmed
N/A	Auxiliar	u
N/A	Auxiliar	v

Tabela 4.11 – Codificação das Variáveis Auxiliares

Variável	Tipo	Codificação
Velocidade % Alimentador	Saída	Vel
Aceleração/Desaceleração	Saída	Acc

Tabela 4.12 – Codificação das Variáveis de Saída

4.3.7.3 Rotina de Cálculo

Mostra-se seguidamente a sequência programática que materializa as relações entre variáveis de entrada e saída, através das expressões demonstradas anteriormente:

```
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click

        Dim a, c, d, f, p, h, erre, tetaponto, deltatetaa, deltata, vmed, acc,
        vel, u, tetaa, v, deltatetap As Single

        a = TextBox1.Text
        d = TextBox2.Text
        c = TextBox3.Text
        f = TextBox4.Text
        p = TextBox5.Text
        h = TextBox6.Text

        erre = (c / 2)

        tetaponto = ((a * 360) / 60)

        u = (1 - (d / erre))


        deltatetaa = ((((Math.Acos(u) * 180) / 3.1415) - 10) * 2)
        deltata = deltatetaa / tetaponto

        vmed = p / deltata

        acc = (((((4 / 3) * vmed) ^ 2)) / p)

        vel = ((((4 / 3) * vmed) / f) * 100)

        tetaa = deltatetaa / 2

        v = (1 - ((d + (0.8 * h)) / erre))

        deltatetap = ((Math.Acos(v) * 180) / 3.1415)

        Label23.Text = Int(vel)
        Label24.Text = Int(acc)

        Label15.Text = Int(360 - tetaa)
        Label16.Text = Int(tetaa)

        Label17.Text = Int(tetaa - 10)
        Label18.Text = Int(tetaa + 10)

        Label19.Text = Int(deltatetap)
        Label20.Text = Int(360 - deltatetap)

        Label21.Text = Int(180 - 10)
        Label22.Text = Int(180 + 10)

    End Sub
```

4.3.8 Parâmetros Óptimos de Alimentação do Projecto PT428

4.3.8.1 Variáveis de Entrada

Na Tabela 4.1.3 estão patentes os valores específicos das variáveis de entrada relativas ao projecto PT428. Note-se que o elemento que primeiro toca a banda de chapa é o macho de roscar, assim, as variáveis "comprimento do piloto" e "distância do piloto á chapa" referem-se ao macho de roscar, que é de facto o primeiro órgão mecânico a atingir a banda de chapa.

Variável	Tipo
Velocidade da Prensa	15
Distância do Piloto à chapa	50
Curso de Funcionamento	254
Velocidade Máxima do Alimentador	700
Passo de Avanço	52
Comprimento do Piloto	5

Tabela 4.13 – Variáveis de Entrada Específicas do Projecto PT428

4.3.8.2 Resultados

Na Tabela 4.14 apresentam-se os resultados, obtidos directamente a partir do software GestFeed, para os valores de entrada correspondentes ao projecto PT428.

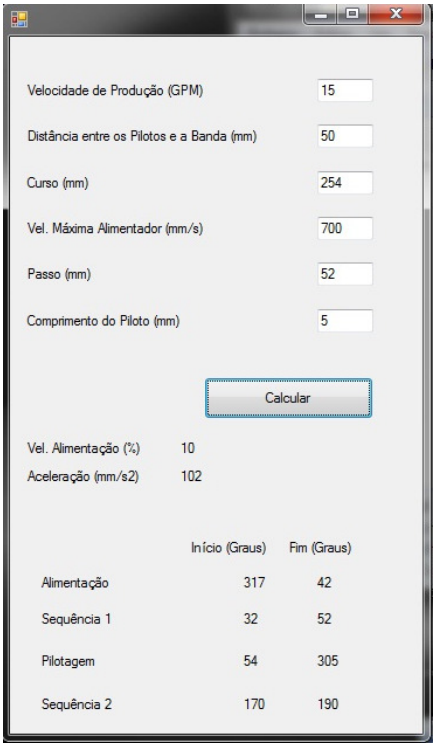


Figura 4.4 – Resultados de Cálculo na Interface GestFeed

	Início (Graus)	Fim (Graus)
Alimentação	317	42
Sequência 1	32	52
Pilotagem	54	305
Sequência 2	170	190
Velocidade (mm/s)	10	
Aceleração/Desaceleração (mm/s2)	102	

Tabela 4.14 – Parâmetros de Alimentação Óptimos para o Projecto PT428

4.3.8.3 Diagrama de Blocos da Nova Programação Sequencial

De acordo com os resultados obtidos, a nova programação sequencial a implementar na prensa mecânica, vem:

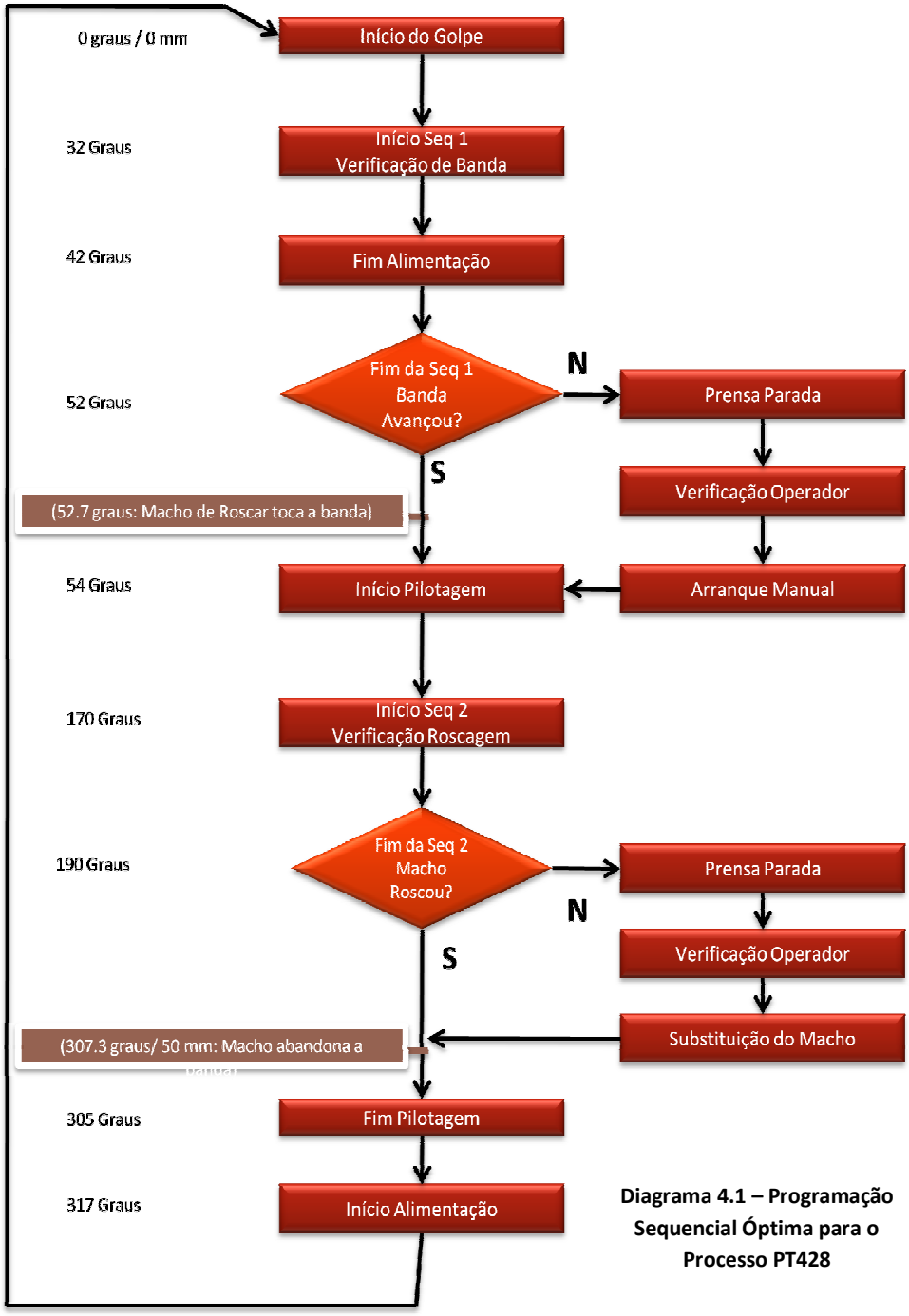


Diagrama 4.1 – Programação Sequencial Óptima para o Processo PT428

Como se pode constatar as anomalias existentes na antiga programação sequencial foram eliminadas. Os valores de velocidade e aceleração/desaceleração foram reduzidos ao mínimo admissível ainda que dispondo de uma margem de segurança de 20°, repartidos em torno da janela de alimentação. Adicionalmente, com a implementação da aplicação **GestFeed 1.0**, os mesmos critérios poderão ser rapidamente aplicados a outros processos de estampagem progressiva.

4.4 Ante-Projecto de um Sistema de Pilotagem Móvel

4.4.1 Introdução e Objectivos

As soluções de roscagem em prensa existentes no mercado permitem obter componentes roscados directamente a partir dos processos de estampagem progressiva. Para que tal aconteça os fornecedores de tais equipamentos (sistemas de roscagem) desenvolveram módulos capazes de serem integrados directamente na ferramenta de estampagem ocupando um determinado posto de trabalho do progressivo.

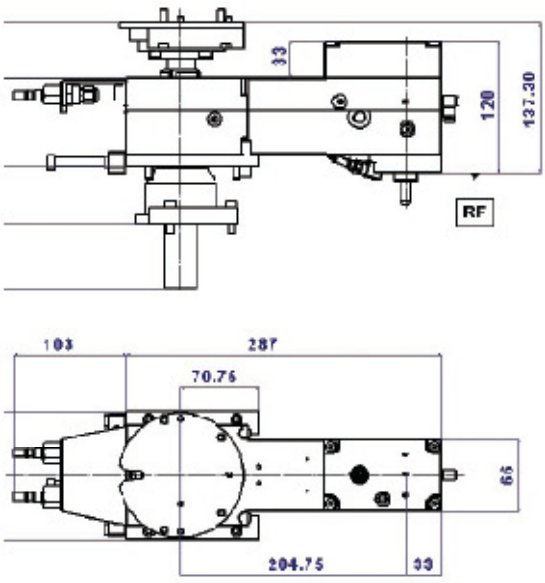


Figura 4.5 – Mecanismo de Roscagem em Prensa

As roscas alcançam níveis de qualidade relativamente elevados, como se poderá verificar num outro estudo desta monografia, mas, para que tal seja possível, o curso da parte activa destes módulos, ou seja, do macho de roscagem deverá ser o mais longo possível, garantindo assim uma correcta extrusão dos filetes da rosca.

Para conseguir alcançar esses níveis de qualidade, e sabendo que os sistemas de transmissão destes módulos garantem um avanço do macho de roscagem correspondente a 10% do avanço do carro da prensa (dependendo do fabricante), é necessário que o inicio do processo de roscagem se inicie muito cedo, assim, o macho de roscagem alcança a banda de chapa antes de qualquer outro elemento da ferramenta (inclusive os elementos de guiamento da banda - pilotos).

Neste sentido é fundamental que, quando o macho de roscagem toca a banda, esta se encontre correctamente posicionada, ou seja, o furo a ser roscado, deverá estar perfeitamente concêntrico com o macho, caso contrário verificar-se-ão “mordeduras “ que podem invalidar a peça, ou mesmo causar ligeiras torções na banda de chapa, torções essas que podem afectar o bom funcionamento de outras etapas do progressivo.

Este estudo surge no âmbito do projecto PT428, no qual se verificaram anomalias no processo de roscagem. Assim, passar-se-á de seguida, ao estudo de um mecanismo que permita uma pré centragem da banda de chapa, cuja acção ocorra ligeiramente antes da acção dos módulos de roscagem.

Note-se ainda que não é objectivo deste estudo definir completamente todos os elementos necessários à implementação de um tal sistema (do que deveriam resultar desenhos de definição para cada elemento), mas sim estabelecer todas as métricas que garantam a eficácia do sistema, como são as condições cinemáticas, geométricas e estruturais, bem como apresentar um esboço primário do desenho de conjunto do mecanismo.

4.4.2 Solução Construtiva

Para se centrar a banda antes da acção do macho de roscar, deve ser conhecida a distância máxima a que este se encontra da chapa, ou seja, no início do golpe.

Distância do macho de roscar à banda de chapa (Projecto PT428), d_m :

$$d_m = 5mm \tag{4.32}$$

Como o macho de roscar efectua um deslocamento percentual de 10% relativamente ao deslocamento que carro da prensa realiza relativamente ao PMS, temos:

Deslocamento do total do carro a partir do PMS, no momento em que o macho de roscar ataca a banda, D_c:

$$D_c = d_m \times 10 = 5 \times 10 = 50mm \tag{4.33}$$

Considerando a equação que relaciona o ângulo da manivela com o PMS:

$$y = r(1 - \cos(\theta)) \tag{4.34}$$

Tomando para valor de y o da distância D_c, e resolvendo em ordem a θ, obtém-se:

$$\theta = 52{,}7^0 \tag{4.35}$$

Assim, a acção de pilotagem deverá acontecer antes que a posição do carro relativamente ao PMS tenha atingido $50mm$, o que corresponde a um ângulo de rotação da manivela de $52{,}5^0$.

A solução mais trivial para o problema de pré centragem é, de facto, a de se utilizarem pilotos de um comprimento tal que a sua extremidade inferior diste menos de $50mm$ da banda. Na Figura 4.6 é apresentado um esboço da geometria que apresentariam os centradores com tais dimensões. Facilmente se percebe que, dispensando qualquer cálculo, tais centradores correm severos riscos de dano por encurvadura.

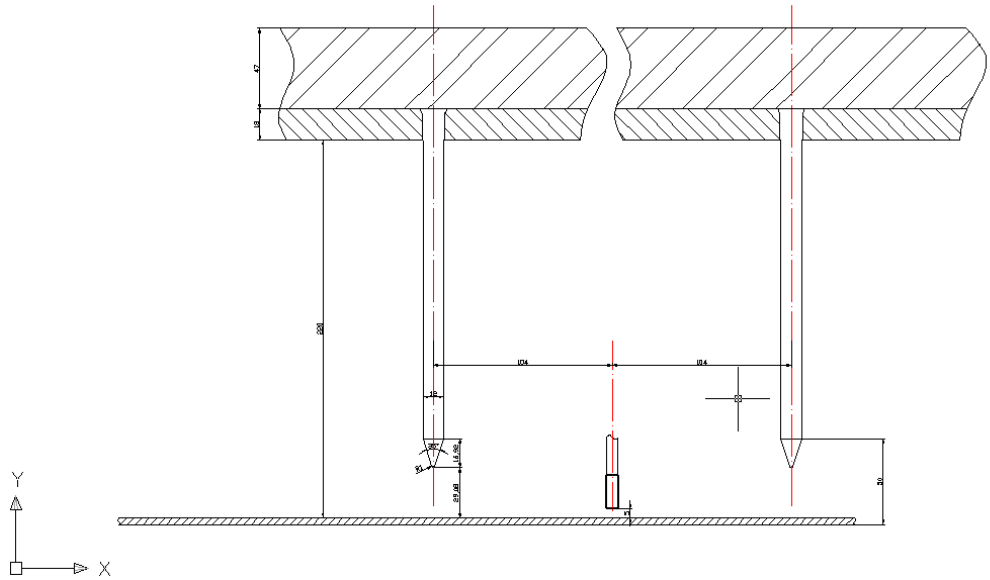


Figura 4.6 – Comprimento Excessivo dos Pilotos da Solução Trivial

Esta solução mostra-se portanto ineficaz para o nosso problema e, em adição, um excelente exemplo das dificuldades encontradas neste projecto para encontrar uma solução capaz de cumprir os objectivos a que se propõem. Diversas soluções foram estudadas mas, devido a impossibilidades cinemáticas, estruturais ou de atravancamento, uma a uma, todas foram rejeitadas. Por motivos de síntese não é pertinente detalhar cada uma delas neste relatório, mas, para que se tenha uma ideia melhor do ritmo difícil a que este projecto avançou relativamente aos restantes, passa-se a enumerar cada uma delas bem como o motivo porque foram rejeitadas.

- **Pilotos Longos** – Rejeitada por perigo de encurvadura;
- **Sistema de Engrenagem de Cames** – Rejeitada por incompatibilidade com a janela de alimentação;
- **Biela-Manivela** – Rejeitada por atravancamento e peso excessivos;
- **Pilotagem Pneumática** – Rejeitada por ausência de portas comunicação (rede Profibus) suplementares com o autómato de controlo da prensa
- **Alavanca de Bell** – Rejeitada pelo curso excessivo das molas de gás necessárias;
- ***Came Slider*** – Solução Construtiva Adoptada

Vejamos então quais os contornos geométricos da solução ***Came-Slider***. O mecanismo consiste na articulação consertada de dois carros normalmente utilizados em operações de corte/embutidura para que, numa ferramenta, haja a possibilidade de realizar furações ou embutidos laterais. Trata-se portanto de unidades que transformam movimento rectilíneo vertical, em movimento rectilíneo horizontal (90^{o}) - (à parte outros ângulos de aplicação). No nosso caso, a articulação de dois destes mecanismos, permitirá duas conversões na direcção do movimento descendente da prensa: a primeira converte movimento descendente vertical em movimento horizontal. O movimento horizontal pode depois ser utilizado no accionamento do segundo carro que o transforma em movimento vertical ascendente. Desta forma resulta uma inversão no sentido do movimento, permitindo que a pré centragem da banda se realize de baixo para cima guiado pela base da ferramenta e pelos porta-matrizes que a esta são anexos.

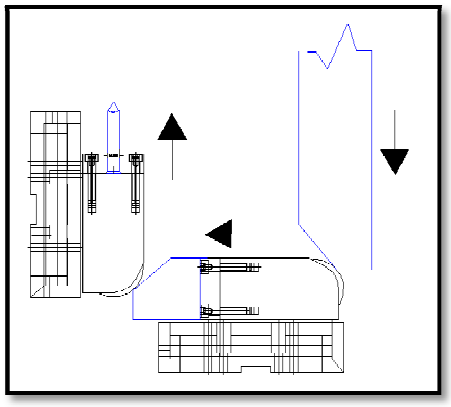


Figura 4.7 – Dinâmica Básica da Solução de Pré Centragem *CAME SLIDER*

Na Figura 4.8 mostra-se uma vista lateral da ferramenta, onde se encontra assinalado o local onde será alojado o mecanismo. Trata-se de um espaço vazio existente entre a base e a sub-base da ferramenta e que tem 290mm de altura. Nesse espaço existem condições para alojar um conjunto mecânico que centre a banda de chapa actuando de baixo para cima, permitindo que a extremidade do piloto se situe de forma mais próxima à banda e sem colidir com outros elementos.

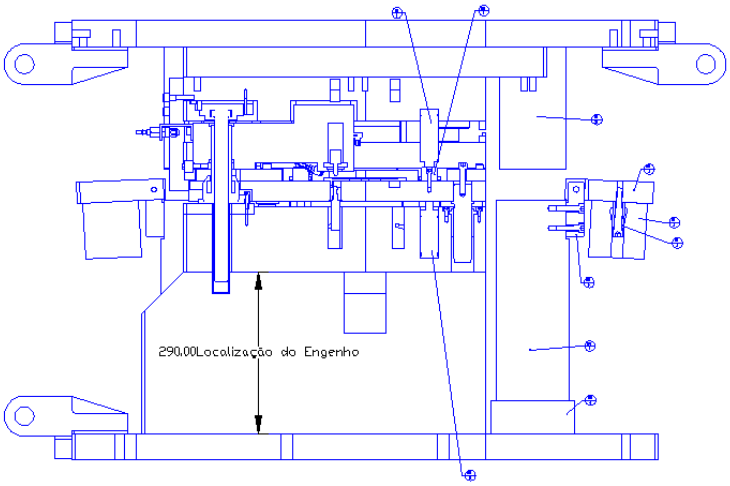


Figura 4.8 – Localização Possível do Mecanismo de Pré Centragem na Ferramenta

4.4.3 Cadeia Cinemática

Para uma correcta definição das geometrias do mecanismo em projecto atente-se às seguintes especificações:

- Distância que o novo piloto deve guardar da banda para evitar colisões durante a alimentação automática: $12mm$;
- Conicidade máxima admitida para os pilotos segundo o caderno de encargos da Gestamp Portugal: 60^{o};
- Considera-se seguro abrir as pinças do alimentador quando 80% da ponta cónica do piloto ultrapassou a superfície inferior da chapa;
- A pilotagem considera-se realizada quando a parte cilíndrica do piloto tenha ultrapassado a superfície superior da chapa em, pelo menos 2mm;
- Deve ser respeitada uma folga repartida de 1mm entre o piloto e a furação que existe na chapa. Assim, como a furação da chapa apresenta 13mm de diâmetro, os pilotos deverão possuir 12mm;
- A centragem da banda deverá realizar-se antes que a posição do carro relativamente ao PMS tenha atingido $50mm$, o que corresponde a um ângulo de rotação da manivela de $52{,}5^{0}$;
- A pilotagem não deverá interferir com nenhum dos elementos mecânicos da ferramenta, bem como diminuir excessivamente a janela de alimentação.

Considerando as especificações expostas a configuração geométrica da extremidade do piloto relativamente á superfície inferior da banda (PMS) deverá ser como a que se representa a seguir.

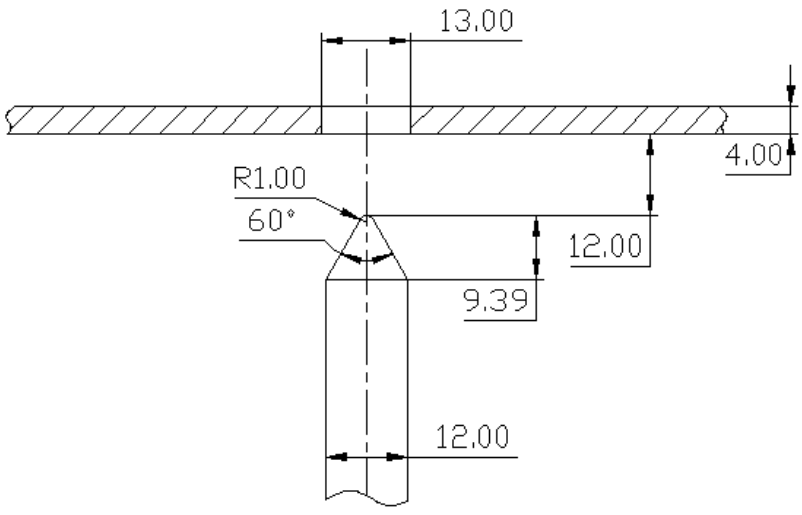


Figura 4.9 – Configuração Geométrica do Piloto Relativamente à Banda de Chapa

Pelo que a distância total que o piloto, d_p, terá de percorrer vem:

$$d_p = 9.4 + 12 + 4 + 2 = 27.4mm \tag{4.36}$$

Analise-se agora a relação de transmissão que se pode obter a partir da articulação dos dois carros.

Os carros de puncionado são accionados a partir de elementos mecânicos do tipo cunha cuja inclinação máxima não poderá exceder os 40º, tal como se representa a seguir:

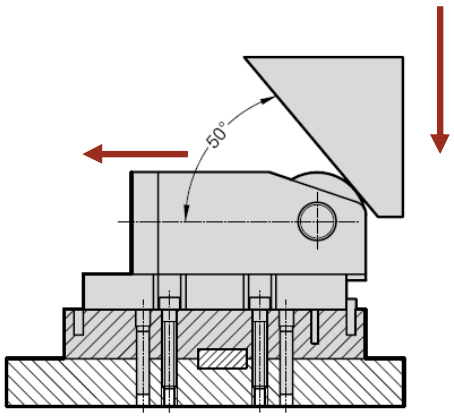


Figura 4.10 – Ângulo Limite de Transmissão em Carros de Puncionado

Desta forma, o movimento horizontal x estará relacionado com o movimento descendente da prensa y pela Equação 4.37:

$$x = y.tan\,\alpha \qquad \alpha \leq 40^0 \tag{4.37}$$

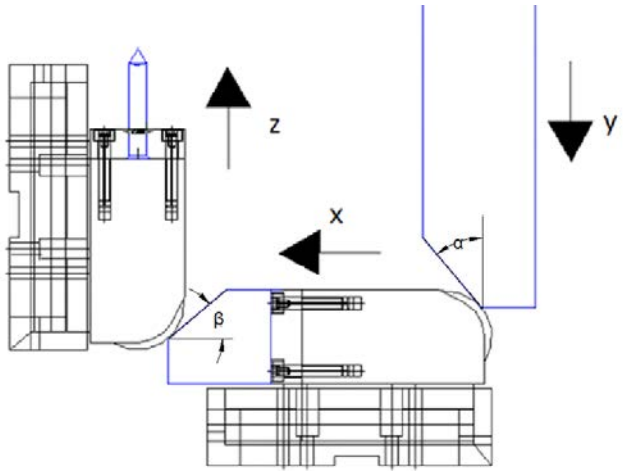


Figura 4.11 – Relação de Transmissão Definida através dos Ângulos α e β

E o movimento ascendente do piloto, z, estará relacionado com o movimento y da seguinte forma:

$$z = x.\tan\beta = y.tan(\alpha)\tan(\beta), \qquad \alpha, \beta \leq 40^0 \tag{4.38}$$

Fazendo α=β=40º (máxima relação de transmissão permitida) e resolvendo em ordem a y, temos:

$$y = \frac{z}{\tan^2(40)} \tag{4.39}$$

Sabemos que a pilotagem de banda realiza-se para um deslocamento z, do piloto tal que z =$d_p = 27.4\text{mm}$, assim:

$$y = \frac{27.4}{\tan^2(40)} = 38.9mm \tag{4.40}$$

Como o macho de roscar atinge a superfície da banda aos 50mm de deslocamento do carro da prensa, temos a seguinte margem de segurança:

$$50 - 38.9 = 11.1mm \tag{4.41}$$

O que corresponde a uma distância entre o macho de roscar e a chapa de:

$$11.1 \times 0.1 = 1.11mm \tag{4.42}$$

Ou seja, usando as inclinações máximas permitidas para a geometria das cunhas consegue-se pilotar a banda quando o macho de roscar ainda se encontra a cerca de 1mm da mesma.

4.4.4 Definição Geométrica dos Elementos

O sistema em projecto é constituído por:

- Carros de Transmissão
- Cunha de transmissão horizontal
- Estrutura de suporte
- Piloto
- Cunha de accionamento
- Mola de Gás e Fixação Superior
- Casquilhos, Elementos de Fixação e Outros Orgãos Auxiliares

4.4.4.1 Carros de Transmissão

A aplicação de carros de estampagem pode utilizar modelos standard patentes no catálogo do fabricante, ou optar por carros desenhados especialmente para a aplicação específica. Normalmente a última opção é reservada aos casos para os quais, por atravancamento excessivo ou por necessidade de maiores capacidades de carga, os carros standard não se mostram eficazes.

Considerando que o nosso mecanismo deverá possuir as menores dimensões que se lhe possam atribuir dentro do espaço de eficácia dever-se-á optar por carros de accionamento de dimensões reduzidas.

Por outro lado, no projecto do sistema de pré pilotagem existe um requisito fundamental: o accionamento deve ter início no instante inicial do movimento descendente da prensa. Assim, a cunha de accionamento, continuará o seu movimento de descida, após ter accionado o carro. Como se pode observar a seguir, no caso de uma configuração standard do carro, surgiriam problemas de colisão entre a cunha e a base do carro.

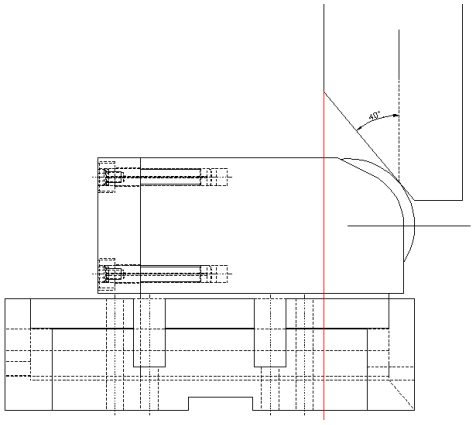


Figura 4.12 – Colisão entre a Cunha e a Base de um Carro Standard

Partindo deste princípio foi solicitado a um fornecedor deste tipo de equipamentos, o desenho de um modelo que, possuindo dimensões mais reduzidas que os seus congéneres, apresentasse uma mecanização na base de forma a possibilitar a passagem da cunha.

A solução apresentada pelo fornecedor baseia-se na alteração do modelo TPRC2000 – 50 [Tecaprés 2010] e apresenta-se na Figura 4.13.

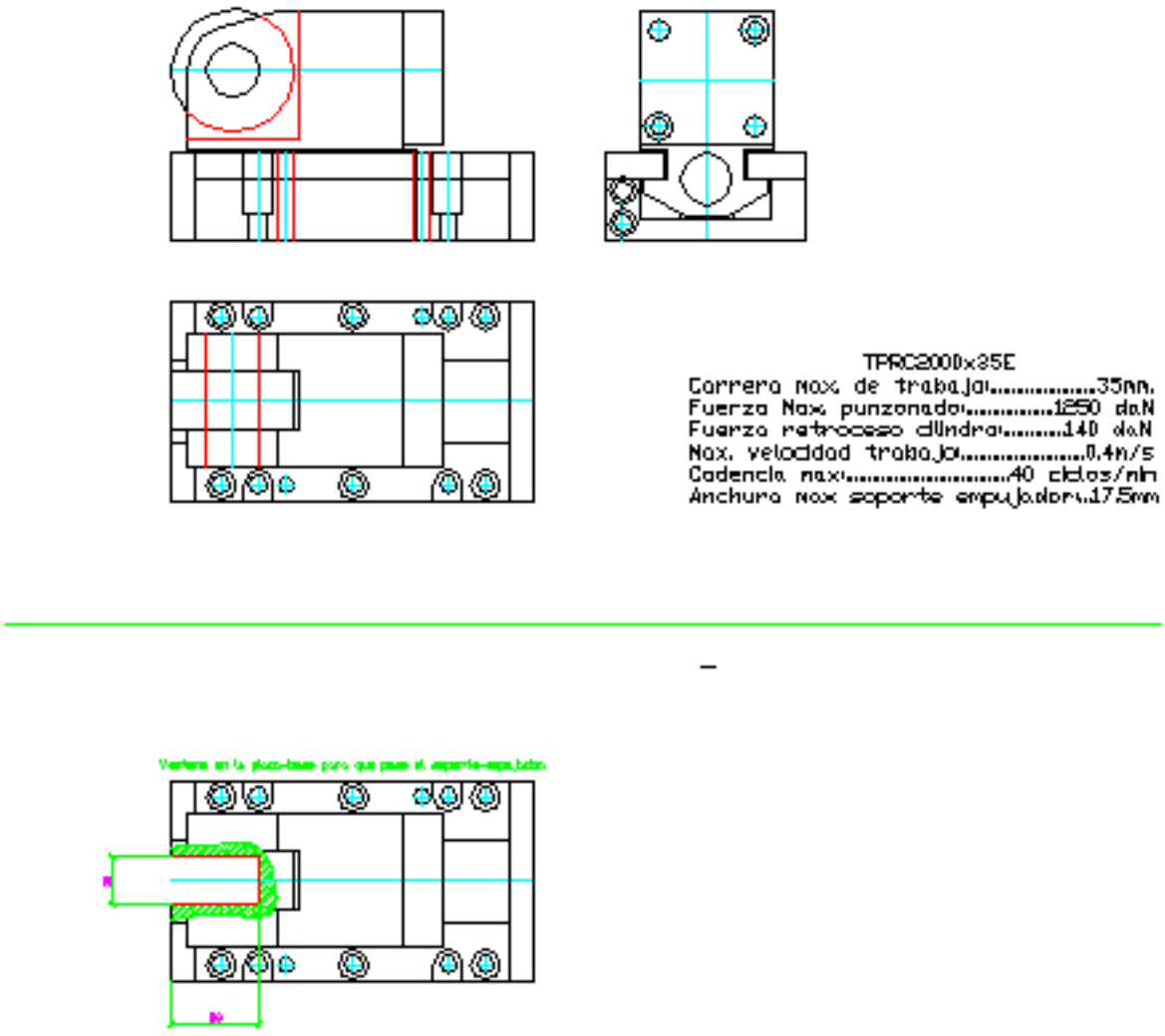


Figura 4.13 – Alteração Proposta pelo Fornecedor ao Modelo TPRC2000

4.4.4.2 Cunha de Transmissão Horizontal

Para a cunha de transmissão horizontal, já tivemos oportunidade de mostrar que:

- O deslocamento em x terá de ser igual a 32,64 mm;
- E o deslocamento em z igual a 27,4 mm.

Assim, temos a seguinte configuração geométrica:

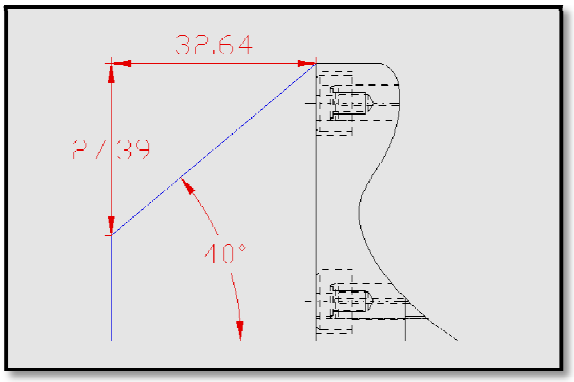


Figura 4.14 – Geometria da Cunha de Transmissão Horizontal

4.4.4.3 Estrutura de Suporte

Para uma primeira aproximação ao desenho da estrutura de suporte é necessário ter em conta o curso de funcionamento da cunha de accionamento. Sabe-se que essa cunha terá um curso total igual ao curso de funcionamento da prensa, ou seja, 254 mm. Então para se poder implementar o sistema este deveria estar 254mm acima da sub-base da ferramenta, sendo esta distância considerada a partir da extremidade inferior da cunha de accionamento, implicando assim, operações de maquinagem na base da ferramenta de forma a alojar os restantes componentes do sistema. Estas operações de maquinagem poderiam acarretar perdas de resistência não admissíveis para a ferramenta.

Para solucionar este problema dividiu-se o curso da cunha em duas parcelas:

- 144mm de penetração da cunha após accionamento;
- 110mm restantes garantidos pela compressão de uma mola de gás.

Para melhor compreensão da repartição do curso tome-se como exemplo a Figura 4.14:

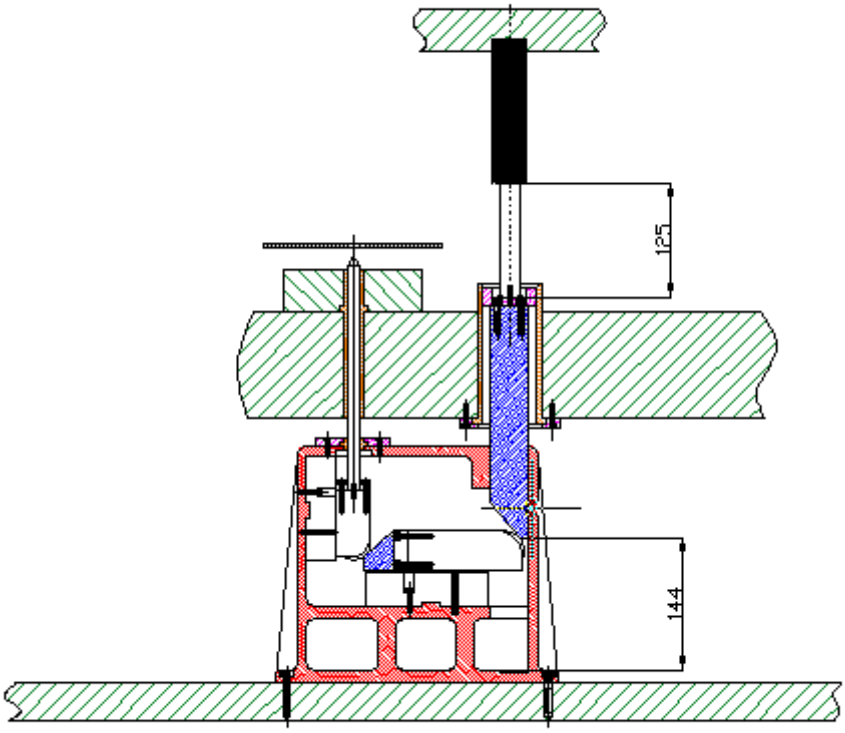


Figura 4.15 – Exemplo Gráfico da Repartição de Cursos

Assim, numa primeira fase a cunha desce 144 mm, após o que, sendo impedida de avançar por ter alcançado a base da estrutura, inicia-se a compressão da mola de gás (representada a vermelho e com um curso de 125mm), durante 110 mm.

Na Figura 4.14 está representada uma estrutura típica obtida por fundição. Este tipo de solução é normalmente vantajosa quando o número de mecanismos a produzir é elevado.

Alternativamente, o correcto posicionamento dos elementos do sistema, pode ser materializado por um conjunto de calços de fixação, como se mostra a seguir:

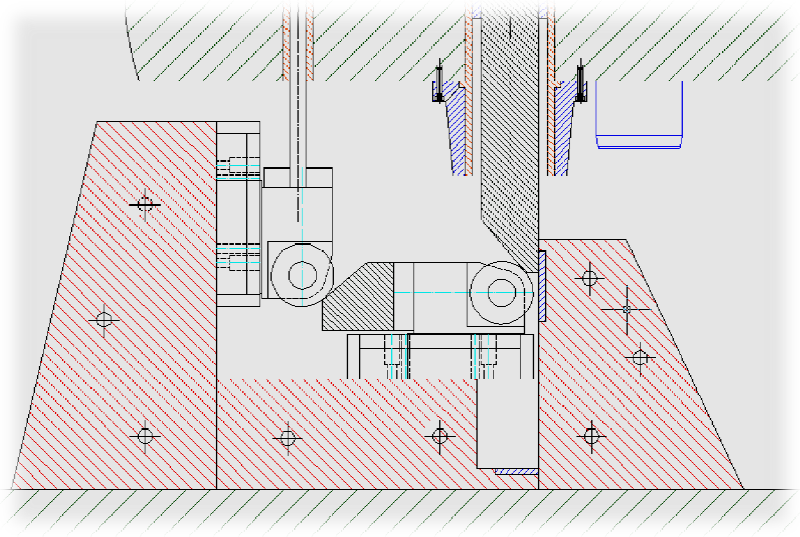


Figura 4.16 – Estrutura de Suporte Materializada através de Calços de Fixação

Desta forma conseguir-se-ão custos mais baixo da totalidade do sistema, já que os apoios, ou calços, de suporte poderão ser materializados em aço macio, através de operações simples de maquinagem. Com esta última solução fica definida a estrutura de suporte.

4.4.4.4 Piloto

Para o piloto de centragem foram definidas as seguintes métricas:

- Conicidade máxima segundo o caderno de encargos da Gestamp Portugal – 60%;
- Folga de 0.5mm por banda – corresponde a um diâmetro de 12mm do piloto;
- Fixação ao carro através de perno roscado;
- Comprimento tal que a extremidade do piloto diste 12mm da superfície inferior da banda.

Desta forma obtemos a configuração apresentada na Figura 4.16.

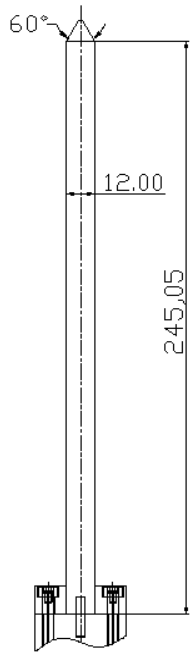


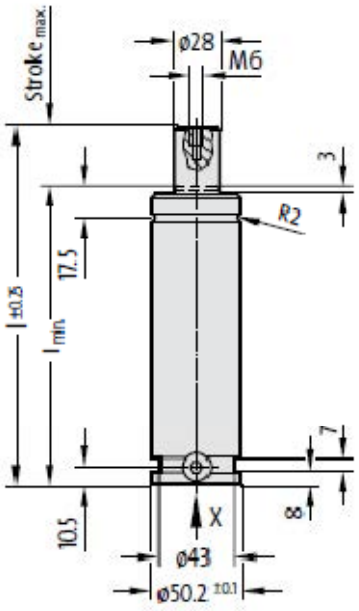
Figura 4.17 – Geometria do Piloto de Pré Centragem

4.4.4.5 Mola de Gás

A mola de gás a utilizar foi seleccionada com base no curso pretendido e na força que deve desenvolver:

- Curso > 110mm
- Força > 5000N (Definida na secção *Cargas e Esforços*)

Assim, foi seleccionado o modelo 2488.13.01000 (do fornecedor Fibro) de curso 125 mm, capaz de desenvolver uma força nominal de 8 KN, quando pressurizado a 130 bar.



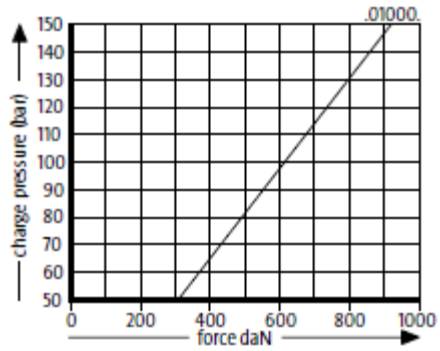


Gráfico 4.6 – Relação Força - Pressão [Fibro 2010]

Figura 4.18 – Cilindro de Gás Seleccionado [Fibro 2010]

A fixação da mola de gás à parte superior da ferramenta deverá ser materializada de forma proteger os operadores de uma eventual explosão do corpo do cilindro. Assim, a fixação poderá ser como a que se mostra a seguir:

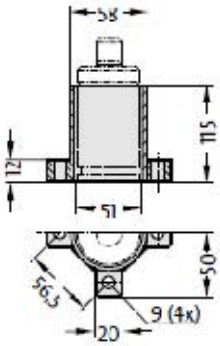


Figura 4.19 – Fixação do Cilindro de Gás [Fibro 2010]

4.4.4.6 Cunha de Accionamento

Para a cunha de accionamento, já tivemos oportunidade de mostrar que:

- Deslocamento em y igual a 38,9mm;
- Inclinação máxima α igual a 40º.

Então,

$$x = y \times \tan(40) = 38{,}90 \times \tan(40) = 32.64\ mm \qquad (4.43)$$

Assim, temos a seguinte configuração geométrica:

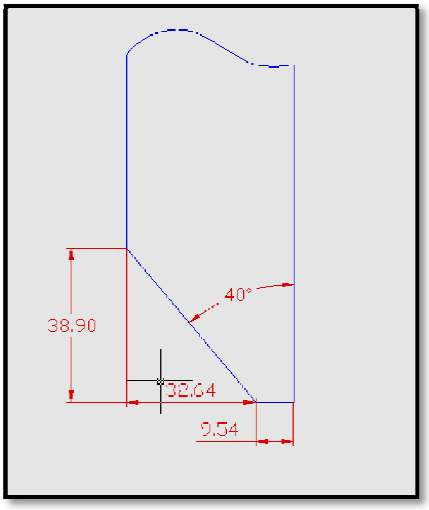


Figura 4.20 – Geometria da Cunha de Accionamento

4.4.4.7 Casquilhos, Elementos de Fixação e Outros Orgãos Auxiliares

Para além dos elementos já apresentados, deverão ser ainda considerados:

- Manga de solidarização da cunha de accionamento com a mola de gás
- Manga de guiamento da coluna
- Casquilho de bronze para guiamento do piloto
- Casquilho de bronze para guiamento da coluna
- 2 Placas de Choque
- Parafusos M10 para fixação dos apoios de suporte
- 2 Parafusos M6 para fixação da coluna de accionamento
- 2 Pernos Roscados M6

4.4.5 Esboço do Conjunto Mecânico

Apresenta-se na Figura 4.20 um esboço primário do conjunto mecânico do mecanismo já alojado no espaço existente entre a base e a sub-base da ferramenta. A fixação dos calços de suporte realiza-se por intermédio de ligações aparafusadas aos tacos de apoio.

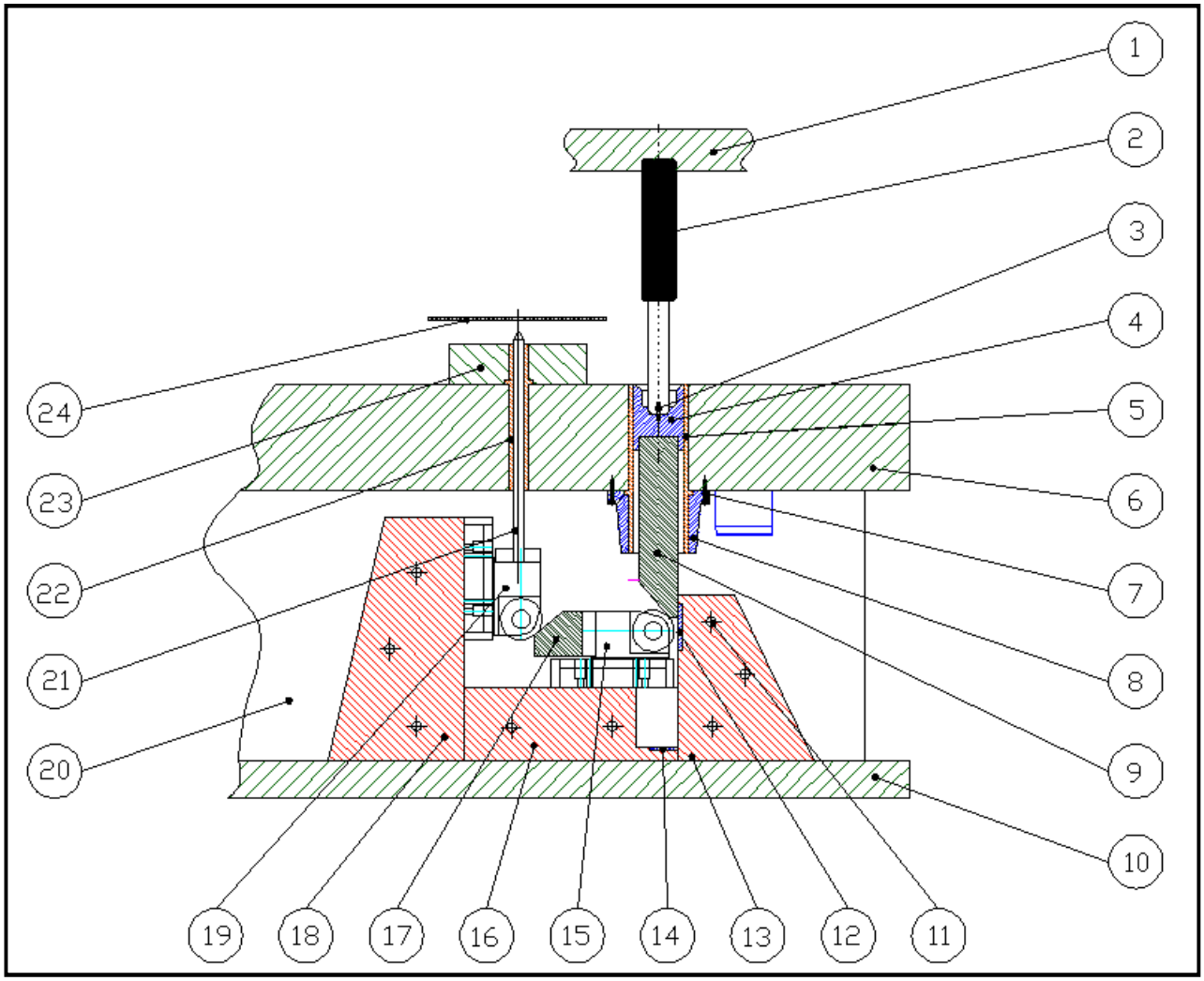


Figura 4.21 – Esboço do Conjunto Mecânico

Os elementos constituintes do mecanismo estão, segundo este ante-projecto, listados na Tabela 4.15.

12	1	Placa de Choque	**24**	-	Banda de Chapa
11	8	Parafuso M10	**23**	-	Placa Porta-Matrizes
10	-	Sub-Base da Ferramenta	**22**	1	Casquilho de Bronze
9	1	Coluna/Cunha de Accionamento	**21**	1	Piloto
8	1	Manga de Guiamento	**20**	-	Taco de Apoio da Ferramenta
7	6	Parafuso M6	**19**	1	Carro de Puncionamento
6	-	Base da Ferramenta	**18**	1	Calço de Suporte
5	1	Casquilho de Bronze	**17**	1	Cunha de Transmissão Horizontal
4	1	Manga de Solidarização	**16**	1	Calço de Suporte
3	2	Pino Roscado M6	**15**	1	Carro de Puncionamento
2	1	Mola de Gás	**14**	1	Placa de Choque
1	-	Parte Superior da Ferramenta	**13**	1	Calço de Suporte
Detalhe Nº	**Qt.**	**Designação**			

Tabela 4.15 – Lista de Peças Consideradas no Ante-Projecto

4.4.6 Cargas e Esforços

Pretende-se que o mecanismo disponibilize ao piloto móvel, uma **força de centragem mínima de 1000N**. Para tal passa-se a apresentar as relações de transmissão de carga para o mecanismo em projecto.

Sejam:

- $\overrightarrow{F_c}$ - Força de Avanço da coluna
- $\overrightarrow{F_h}$ - Força de Avanço do Carro Horizontal
- $\overrightarrow{F_p}$ - Força de Avanço do Carro Vertical
- $\overrightarrow{F_{Rh}}$ - Força de Recuo do Carro Horizontal: 1400N
- $\overrightarrow{F_{Rv}}$ - Força de Recuo do Carro Vertical: 1400N

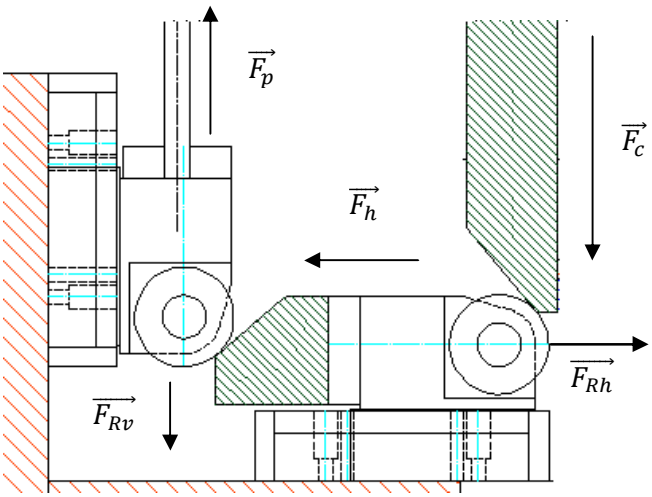


Figura 4.22 – Forças Envolvidas no Processo de Centragem

Sabendo que as mudanças de direcção impostas pelas cunhas implicam uma decomposição vectorial segundo o ângulo de inclinação da sua superfície (40°), temos:

$$\begin{cases} \overrightarrow{F_h} = \tan(40)\,\overrightarrow{F_c} - \overrightarrow{F_{Rh}} - \tan(40)\overrightarrow{F_{Rv}} \\ \overrightarrow{F_p} = \tan(40)\overrightarrow{F_h} - \overrightarrow{F_{Rv}} \end{cases} \quad (4.44)$$

Assim, se quisermos exprimir a força de accionamento,$\overrightarrow{F_c}$, em função da força disponível para pilotagem, $\overrightarrow{F_p}$:

$$\overrightarrow{F_c} = \frac{\frac{\overrightarrow{F_p}+1400}{\tan(40)}+1400+1400\tan(40)}{\tan(40)} \quad (4.45)$$

Desta forma, para que se obtenha uma força de pilotagem de 1000N a força de accionamento deverá ser tal que:

$$\overrightarrow{F_p} = 1KN \Longrightarrow \overrightarrow{F_c} = 6.5\ KN \quad (4.46)$$

Para que o cilindro, ou mola de gás, comece a comprimir após a cunha de accionamento ter chegado ao final do seu curso (144mm), ele deve ser capaz de exercer uma força maior ou igual a **6,5 KN**. Por outro lado, considerando as perdas por atrito entre os órgãos mecânicos, deverá ser respeitado um certo coeficiente de majoração, que garanta uma força de pilotagem como a requerida.

Respeitando estes princípios a mola de gás seleccionada foi pensada para disponibilizar uma força de **8KN** quando pressurizada a **130 bar**.

4.4.7 Cálculos de Resistência

Para garantir o correcto funcionamento do mecanismo efectua-se a seguir, os cálculos de resistência relativos aos elementos mecânicos não normalizados que se encontram sujeitos a cargas significativas.

4.4.7.1 Resistência à Encurvadura da Coluna de Accionamento

Para verificação de resistência à encurvadura da coluna de accionamento, atente-se, numa primeira fase, nas condições fronteira que definem os comprimentos de encurvadura a utilizar nos cálculos.

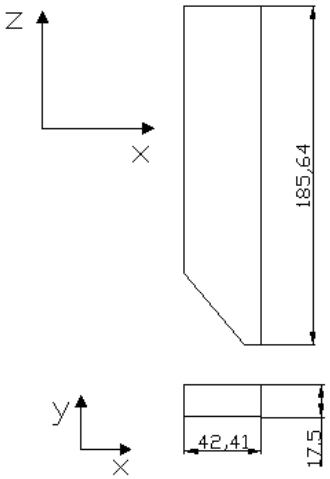


Figura 4.23 – Características Geométricas da Coluna de Accionamento

- Segundo o plano xz, teremos a coluna encastrada no extremo superior e simplesmente apoiada no extremo inferior, como seguidamente se representa:

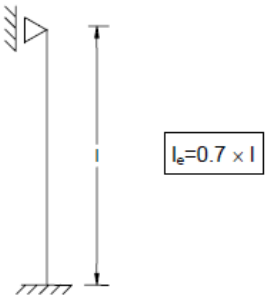


Figura 4.24 – Condições Fronteira do Plano xz

Pelo que o comprimento de encurvadura neste plano virá tal que:

$$le_{xz} = 0.7 \times 185.64 = 129.948\ mm \tag{4.47}$$

- Segundo o plano yz, teremos a coluna encastrada no extremo superior e livre no extremo inferior, como seguidamente se representa:

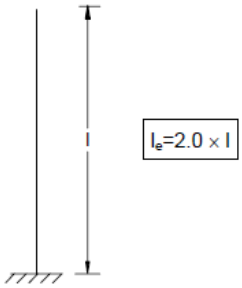


Figura 4.25 – Condições Fronteira do Plano yz

Pelo que o comprimento de encurvadura neste plano virá tal que:

$$le_{yz} = 2 \times 185.64 = 371.28\ mm \tag{4.48}$$

Os momento de inércia da secção recta da coluna são tais que:

$$I_x = \frac{42.21 \times 17.5^3}{12} = 18852\ mm^4 \tag{4.49}$$

$$I_y = \frac{17.5 \times 42.21^3}{12} = 111240\ mm^4 \tag{4.50}$$

E a área da secção recta:

$$A = 17.5 \times 42.41 = 742.175\ mm^2 \tag{4.51}$$

Desta forma pode-se calcular os raios de giração segundo os dois planos de encurvadura considerados:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{4.52}$$

$$i_x = \sqrt{\frac{18852}{742.175}} = 5.04\ mm \tag{4.53}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{111240}{742.175}} = 12.24\ mm \tag{4.54}$$

Pode-se então passar ao cálculo do coeficiente de esbeltesa para os dois planos de encurvadura, tal que:

$$\lambda_x = \frac{le_{xz}}{i_y} = 10.61 \tag{4.55}$$

E,

$$\lambda_y = \frac{le_{yz}}{i_x} = 73.52 \tag{4.56}$$

Assim, o plano crítico de encurvadura, corresponde ao plano yz, visto ser aquele que apresenta maior coeficiente de esbeltesa.

A partir do valor de λ_y podemos agora calcular o valor do coeficiente de encurvadura, Φ. Considere-se a gama de aços Fe360 ($\sigma_{ced} = 235\ MPa$), para $\lambda_y = 73.52$, temos (segundo o Regulamento de Estruturas em Aço para Edifícios - REAPE):

$$\Phi = 1.1328 - 0.00664\lambda = 0.641 \tag{4.57}$$

Pelo que a tensão instalada no perfil, considerando a carga máxima imposta pelo cilindro de gás (8000N) virá:

$$R_{sd} = \frac{N_{sd}}{A \times \Phi} = \frac{8000}{742 \times 0.641} = 16.8\ MPa \tag{4.58}$$

Então, o coeficiente de segurança da coluna de accionamento vem tal que:

$$n = \frac{235}{16.8} = 14 \tag{4.59}$$

Assim se mostra que a coluna é robusta o suficiente para suportar as cargas derivadas do accionamento do mecanismo.

4.4.7.2 Resistência à Encurvadura do Piloto

Aplique-se agora o mesmo procedimento de cálculo anterior ao caso piloto. As características geométricas do perfil são:

- Comprimento de interesse: 63,4 mm
- Diâmetro da secção recta: 12 mm

Como se trata de um perfil circular, os comprimentos de encurvadura e momentos de inércia serão iguais nos diversos planos.

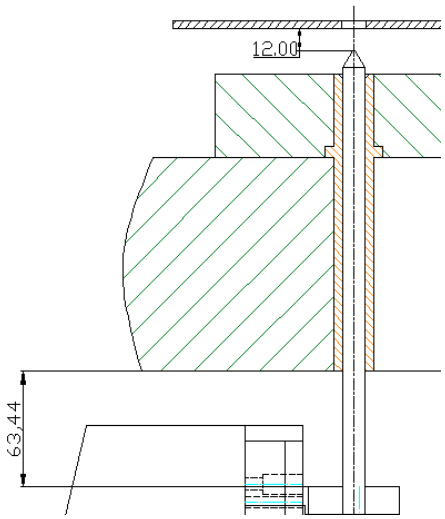


Figura 4.26 – Comprimento do Piloto, relevante para Cálculo à Encurvadura

Figura 4.27 – Condições Fronteira do Piloto

Desta forma, o comprimento válido para encurvadura é tal que:

$$l_e = \frac{63{,}4}{2} = 31{,}7\ mm \tag{4.60}$$

E as características geométricas do perfil, tais que:

$$A = \frac{\pi \emptyset^2}{4} = 113.1\ mm^2 \tag{4.61}$$

$$I = \frac{\pi \emptyset^4}{64} = 1017\ mm^4 \tag{4.62}$$

Pelo que termos a seguinte expressão para o raio de giração:

$$i = \sqrt{\frac{1017}{113}} = 3\ mm \tag{4.63}$$

Do que resultará um coeficiente de esbeltesa:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} = \frac{31{,}7}{3} = 10{,}6 \tag{4.64}$$

Mais uma vez, segundo o REAPE, para um material da classe Fe360, com $\lambda = 10{,}6$ temos o seguinte coeficiente de encurvadura:

$$\Phi = 1 \tag{4.65}$$

Pelo que a tensão instalada na secção recta considerando a carga de centragem de 1000N virá:

$$\sigma_{sd} = \frac{N_{sd}}{A \times \Phi} = \frac{1000N}{113 \times 1} = 8.8\ MPa \tag{4.66}$$

Então, o coeficiente de segurança do piloto vem:

$$n = \frac{235}{8.8} = 26{,}7 \tag{4.67}$$

Assim se mostra que o piloto é robusto o suficiente para suportar as cargas derivadas da pilotagem de banda.

4.4.8 Conclusões do Ante-Projecto

Nas subsecções anteriores foram apresentadas as linhas gerais de um mecanismo de pilotagem móvel que solucione a dificuldade de assegurar um correcto posicionamento da banda de chapa quando um determinado sistema auxiliar, como os sistemas de roscagem, atinge a banda de chapa antes que esta esteja centrada pelos elementos da ferramenta. Note-se que a introdução de um sistema deste tipo introduz novas variáveis no processo de estampagem que, já de si, engloba um conjunto de mecanismos de complexidade apreciável. Assim, soluções deste tipo devem ser evitadas sempre que se possam encontrar soluções baseadas no correcto funcionamento dos sistemas já existentes.

4.5 Procedimento Operacional para Processos Críticos de Estampagem

4.5.1 Introdução

Ao longo deste documento foi desenvolvido um método de análise para a resolução de falhas num processo de estampagem progressiva considerado processo crítico (capítulo *3*). Após análise e realização de ensaios foram definidas medidas operacionais que visam combater e eliminar as causas de tais anomalias e, por último, avançou-se com algumas propostas de melhoria (*capítulo 4*) que pretendem materializar algumas das medidas estabelecidas.

A presente secção propõe-se a organizar os diversos conhecimentos resultantes das secções anteriores num procedimento operacional coordenado que possa ser aplicado a ferramentas de estampagem em processos críticos de conformação plástica de chapas.

Aqui será definido o que se pode ter como sendo processo crítico de estampagem. Serão estabelecidos os contornos de um procedimento de quarentena a implementar em tais processos, por um lado, e apresentada a estratégia de análise para determinação das causas de falha, por outro.

4.5.2 Definição de Processo Crítico de Confomação Plástica de Chapas

A industrialização de um determinado componente está sempre afecta ao número total de peças a produzir. Desta forma os órgãos mecânicos e os materiais usados na concepção das ferramentas de estampagem são muitas vezes projectados em função da carga de trabalho que a ferramenta terá de realizar sem apresentar grandes irregularidades.

Neste sentido, a definição de processo crítico de conformação deverá igualmente ter em conta o número de peças a obter:

Defina-se então um índice k que estabeleça a relação entre o número de peças total a produzir e o número de peças que uma determinada ferramenta produz sem apresentar falhas ou anomalias que a levem a precisar de manutenção, tal que:

$$k = \frac{Número\ de\ Peças\ Produzidas\ sem\ Falhas}{Número\ Total\ de\ Peças\ a\ Produzir} \tag{4.68}$$

Foi recolhida informação, junto de técnicos experientes, acerca de quais os critérios que deveriam ser tomados em consideração na definição do que é um processo crítico. Foram obtidas as seguintes relações:

- Numa série de 1000000 de peças (golpes) considera-se crítico todo o processo que apresente falhas antes que se tenham produzido 20000 peças desde a última intervenção operacional;

- Deve ainda ser considerado em estado intermédio entre *processo crítico* e *processo regular* de que farão parte todos os processos que, numa série de 1000000 de peças apresentem necessidades de manutenção antes que se tenham produzido 50000 peças desde a última intervenção;

Com base nestes critérios pode então ser definido:

- **Processo Crítico:**

$$k \leq \frac{20000}{1000000} \Longrightarrow \boldsymbol{k \leq 0.02} \qquad \textbf{(4.69)}$$

- **Processo Irregular:**

$$0.02 < k \leq \frac{50000}{1000000} \Longrightarrow \boldsymbol{0.02} < k \leq 0.05 \qquad \textbf{(4.70)}$$

- **Processo Regular:**

$$\boldsymbol{k} > 0.05 \qquad \textbf{(4.71)}$$

Em termos percentuais pode-se considerar como crítico (1) todo o processo em que ocorram falhas antes de se ter produzido **2% da série total** desde a última intervenção. Processo irregular (2) será todo aquele cuja ocorrência de falhas aconteça entre produções de **2 a 5% da série total** e processo regular (3) todo o processo que apresente falhas apenas após se terem produzido **mais de 5% da série total** desde a última intervenção operacional, conforme se representa na Figura 4.27.

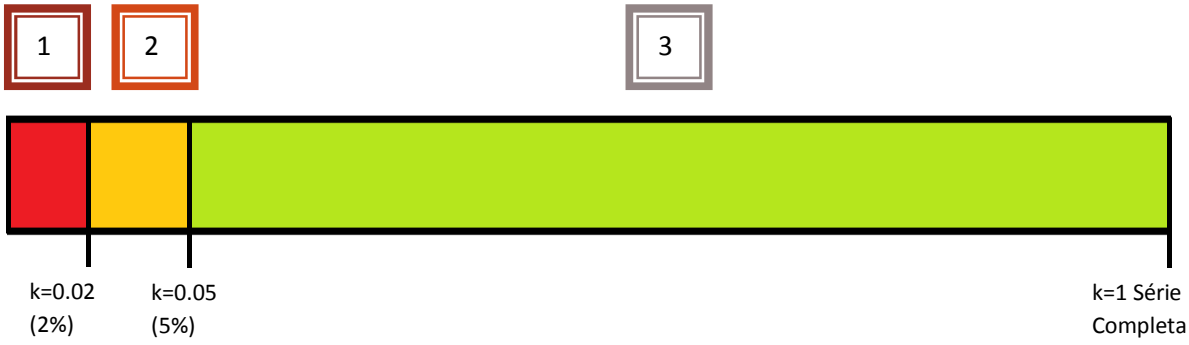


Figura 4.28 – Definição de Processo Crítico em Função da Série Total a Produzir

4.5.3 Variáveis Envolvidas nos Processos Críticos

Como se sabe, num processo crítico de estampagem estão envolvidas diversas variáveis. Estas variáveis estão organizadas no Diagrama 4.2 segundo a sua natureza.

Diagrama 4.2 – Classificação de Elementos Intervenientes nos Processos de Estampagem

A elevada sensibilidade que tais processos apresentam a desvios nestas variáveis pode conduzir á falha, pelo que deve ser definido um procedimento que possibilite o controlo cuidado e a manutenção eficaz dos meios envolvidos, bem como um método de análise que conduza á identificação de anomalias que, se solucionadas, podem resgatar o processo de estampagem da condição de processo crítico.

Considere-se então, que depois de um determinado processo de estampagem ser identificado como processo crítico, a definição de um procedimento operacional pode ser decomposta em duas vertentes:

- **Procedimento de Quarentena** – Conjunto de directivas de controlo exercida sobre meios técnicos e humanos de forma a minimizar as possibilidades de falha resultantes de irregularidades nos equipamentos e de erros introduzidos pelos técnicos intervenientes no processo.

- **Método de Análise** – Metodologia de diagnóstico e identificação das variáveis que estão na origem dos problemas que determinam que um determinado processo seja crítico. Engloba finalmente a definição de medidas operacionais que materializem as soluções encontradas.

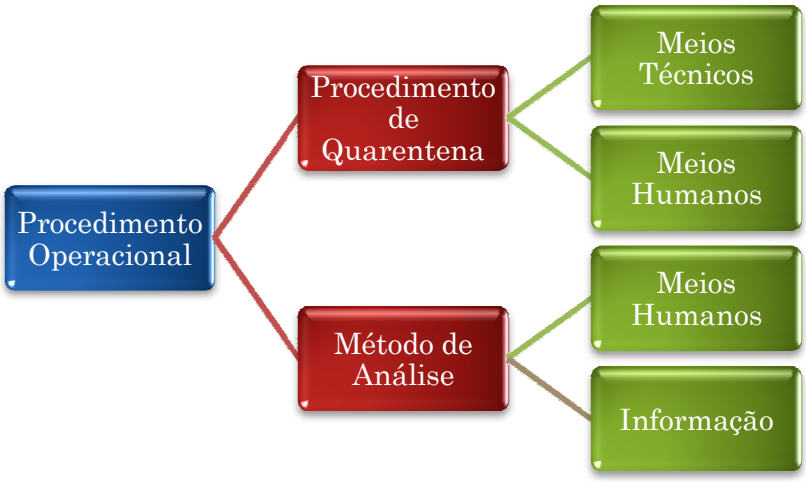


Diagrama 4.3 – Procedimento Operacional em Processos Críticos

4.5.4 Procedimento e Posto de Quarentena

O estabelecimento de um procedimento de quarentena para processos críticos de estampagem baseia-se num apertado controlo dos elementos intervenientes no processo de forma a garantir meios de produção próximos do ideal. Neste contexto poderá ser equacionado, dentro de uma determinada planta produtiva, existir um posto de trabalho específico para estes casos: O **Posto de Quarentena**, onde os elementos intervenientes são alvo de directivas especiais que se estabelecem a seguir.

4.5.4.1 Prensa

Relativamente à prensa do posto de quarentena deverá ser tido em consideração:

- Tratar-se de um equipamento cuja capacidade de carga e furações existentes para saída de recortes de sucata sejam compatíveis com a generalidade das ferramentas;
- Assegurar que os desvios de paralelismo entre o carro e a mesa da prensa se encontram dentro da tolerância estabelecida pelo fabricante;
- Assegurar que os transdutores de deslocamento (*encoders*) que relacionam o funcionamento mecânico da prensa com o autómato de controlo se encontram correctamente calibrados de forma a evitar a introdução de erros de leitura;
- Assegurar a planeza da superfície da mesa da prensa dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante;
- Realização de operações de manutenção e verificação preventiva entre cada produção.

4.5.4.2 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação do posto de quarentena deverá respeitar os seguintes princípios:

- Tratar-se de um equipamento capaz de alimentar grandes espessuras de chapa de forma a ser compatível com a generalidade dos processos de conformação existentes na planta produtiva;
- Assegurar que os transdutores de deslocamento (*encoders*) que relacionam o funcionamento mecânico do alimentador com o autómato de controlo se encontram correctamente calibrados de forma a evitar a introdução de erros de leitura;
- Configurar os parâmetros de alimentação usando critérios que minimizem a introdução de erros no avanço da chapa, à semelhança do que se mostrou num dos desenvolvimentos realizados neste trabalho;
- Assegurar que a lubrificação do mecanismo não introduz lubrificante entre os rolos tractores e o material a conformar;
- Realização de operações de manutenção e verificação preventiva entre cada produção.

4.5.4.3 Ferramenta

No que respeita á ferramenta de estampagem os procedimentos de quarentena a considerar são:

- Realização de operações de Lavagem, verificação e manutenção preventiva entre cada produção;
- Inspecção cuidada do segmento da banda de chapa que fica dentro da ferramenta no final de cada produção, no sentido de avaliar o estado da ferramenta através de indícios marcados na banda deformada;
- Inspecção cuidada dos postos críticos do progressivo;
- Implementar na ferramenta sistemas auxiliares cujo fito é equilibrar a carga necessária aos vários postos do progressivo. De facto, mesmo que se assegure que um determinado processo crítico funciona numa prensa com erros de paralelismo aceitáveis, poderão ocorrer torções entre as metades superior e inferior da ferramenta imputadas por diferenças significativas entre as necessidades de carga dos postos do progressivo.

4.5.4.4 Material a Conformar

As bobinas de material a conformar chegam dos fornecedores, muitas vezes, com algum grau de lubrificação derivado do processo de enrolamento e laminagem. Essa película de lubrificante pode potenciar o deslizamento de material entre os rolos do alimentador, introduzindo erros de avanço. Consequentemente deve-se eliminar este efeito considerando, por exemplo, o projecto de um sistema auxiliar que permita remover a película de lubrificante antes da entrada do material nos rolos do alimentador.

4.5.4.5 Técnicos Envolvidos e Grupos de Melhoria

Num determinado processo de estampagem estão envolvidos técnicos de vários departamentos, a saber: Manutenção de máquinas, Manutenção de ferramentas, Projecto e Qualidade.

Os processos críticos exigem uma atenção dedicada por parte dos dois técnicos envolvidos, assim, para estes processos deve considerar-se:

- Atribuir um técnico específico de cada departamento para realização das intervenções operacionais da sua competência;
- Integrar o conjunto de técnicos envolvidos no processo em equipas multidisciplinares constituindo grupos operacionais de melhoria;
- Os grupos de melhoria deverão reunir-se após cada produção no sentido de actualizar a informação existente sobre o processo, definir ensaios e medidas operacionais;

4.5.4.6 Armazenamento da Informação

A diversidade de variáveis relacionadas com os processos de conformação exige, por si só, uma logística consistente de armazenamento e organização da informação relativa a um determinado processo. Quando nos referimos a processos críticos a importância da gestão da informação vem aumentada. A título de exemplo note-se que muitas das medidas que foram definidas para o Punção 16 (*capítulo 3*) tiveram por base os indícios levantados por um punção que nunca tinha fracturado. Sem este dado, o rumo do estudo principal desta tese poderia ter sido bastante diferente.

Desta forma deverá considerar-se a criação de uma aplicação/base de dados que constitua uma plataforma de armazenamento de informação relativa a processos críticos. A idealização de uma plataforma deste tipo poderá ser concebida em parceria com os técnicos de informática da empresa. Este tipo de aplicação deve permitir:

- Edição e consulta dos detalhes actualizados do projecto da ferramenta/instalações de produção;
- Edição e consulta do histórico detalhado de intervenções técnicas nos diversos equipamentos envolvidos;
- Edição e consulta do histórico de falhas;
- Edição e consulta de detalhes relacionados com as falhas (imagens, gráficos, etc.);
- Edição e consulta do histórico de produção;
- Edição e consulta dos relatórios resultantes da acção dos grupos de melhoria.

Esta plataforma informática deverá permitir a edição apenas por parte dos técnicos afectos a um determinado processo crítico, ao passo que a consulta de informação não necessita de ser alvo de nenhuma restrição.

4.5.5 Método de Análise

O método de análise de falhas num determinado processo crítico pode ser implementado segundo o que se expôs neste trabalho (*capítulo 3*). No Diagrama 4.4 está definida a estratégia de análise.

Diagrama 4.4 – Método de Análise de Falhas

Note-se que, de alguma forma, o método estabelecido para análise é exaustivo, ou seja, considera numa primeira fase a análise de todas as variáveis envolvidas no processo, após o que são seleccionadas as variáveis consideradas de maior peso segundo os indícios recolhidos na observação de campo. Mesmo depois desta triagem o conjunto de ensaios a realizar pode ser relativamente extenso, pelo que se supõem que o método de análise definido possa ainda vir a ser alvo de diversas optimizações, constituindo a solução apresentada uma primeira aproximação ao tratamento de casos de rotura em ferramentas de estampagem progressiva.

5 Considerações Finais

A resolução de falhas técnicas em processos de conformação plástica de chapa está intimamente ligada com a análise dos equipamentos, procedimentos e materiais envolvidos na produção. Neste sentido, o aparecimento de ferramentas de estampagem cada vez mais complexas associadas a sistemas de alimentação programáveis, prensas automatizadas, entre outros, introduz um conjunto elevado de variáveis no leque das possíveis causas do problema.

Neste contexto torna-se necessário definir um método que permita recolher e estruturar a informação de forma eficaz, concorrendo para um melhor entendimento dos problemas e contribuindo para a sua rápida resolução.

O trabalho aqui documentado refere-se à análise de falhas num processo real de conformação de chapas, processo esse tão específico como o componente que o mesmo visa produzir. Não obstante foram intentados esforços para que a análise se baseasse numa metodologia abrangente, que permitisse delinear os contornos de um método que, sendo geral, pudesse ser aplicado a outros casos semelhantes: os processos críticos de conformação plástica de chapas.

Durante este estudo lançou-se mão de diversos recursos técnicos. Foram realizados ensaios de diversos tipos, foram igualmente revistos os alicerces teóricos fundamentais ao entendimento das variáveis envolvidas e, por último, foi feito um esforço para tentar agregar toda essa informação num todo coordenado: O Procedimento Operacional para Processos Críticos de Estampagem.

No entanto, para além de tudo o que foi estudado e desenvolvido, muito mais existe para investigar e desenvolver. A título de exemplo no capítulo *Desenvolvimentos Realizados* muitos outros estudos poderiam estar documentados: A criação de uma base de dados que permitisse organizar e armazenar a informação relativa aos processos críticos de estampagem, a simulação numérica do processo de conformação nos postos críticos de embutidura, etc. Mesmo na definição da metodologia de análise de falhas não é certo que não se possam encontrar outros caminhos, mais céleres e, por isso, mais eficientes.

Este permanente ponto de interrogação é o que de mais aliciante apresenta a Formação em Engenharia Mecânica: ser um caminho que não tem fim.

6 Referências

[Cahoon 1983] – Cahoon, J.R.. 1983. Metallurgical Transactions. The Determination of Yield Strength From Hardness Measurements

[Goodwin 1968] – Goodwin, G. M..1968. La Metallurgia Italiana

[J. Rodrigues 2005] - Rodrigues, Jorge and Paulo Martins. 2005. Tecnologia Mecânica. Lisboa: Escolar Editora

[Keeler 1975] – Keeler, S. P..1975. doc DDR / WG III. IDDRG Working Group Meetings

[Neto] – Neto et al. Neto, Rui, Maria Adelaide e Silva Lourenço, J. Ferreira Duarte and A. Barata da Rocha. Caracterização Estrutural e Mecânica de Chapas Metálicas Finas Para a Conformação Plástica.

[Nitro 2010] – Nitorgas. 2010. Catálogo de Produtos

[Pais 2008] – Pais, Pedro Felga. 2008. Análise e Controlo da Manuteção. Tese de Mestrado Feup

[Pinto Soares 1992] – Soares, Pinto. 1992. Aços, Características, Tratamentos

[Rocha 1987] – Rocha, A. Barata. 1987.Análise Experimental de Deformações – Curvas Limite de Embutidura. Porto: LNETI

[Rocha 1992] – Rocha, A. Barata and J. Ferreira Duarte. 1992. Tecnologia da Embutidura. Ed. Associação Portuguesa das Tecnologias de Conformação Plástica

[Rocha 2001] – Rocha, A. Barata and J. Ferreira Duarte. 2001. Tecnologias da Conformação Plástica. DEMEGI – Feup

[Rossi 1966] - Rossi, Mário. 1966. Estampado en frío de la chapa. Barcelona: Hoepli Editorial Cientifico-Médica

[Tecaprés 2010] – Tecaprés. 2010. Catálogo de Produtos

[Teixeira 2005] – Teixeira, Pedro. 2005. 'Benchmarks' Emperimentais de Modelação Numérica por Elementos Finitos de Processos de Conformação Plástica. Tese de Mestrado da Universidade do Porto

Anexos

Anexo 1 – Outros Estudos e Desenvolvimentos

Neste anexo documentam-se alguns projectos que, não possuindo uma relação directa com o estudo principal desta monografia, tiveram lugar durante o estágio na empresa, apresentando-se como um complemento ao trabalho realizado.

Ensaios de Tracção de Componentes Roscados em Prensa

Para efeitos de documentação de processo foi analisada a resistência mecânica de tracção das roscas obtidas por extrusão em prensa – sistema de roscagem Pronic. Este estudo permitiu, não apenas classificar a classe de rosca segundo a norma interna de um conhecido fabricante do sector automóvel, como também detectar anomalias relacionadas com a realização deste tipo de testes, corrigindo-as.

Figura A1.1 – Componente Roscado Sujeito a Ensaio

Os ensaios de rosca são realizados no laboratório de ensaios da Gestamp Portugal convertendo o ensaio de tracção num ensaio de compressão. De facto seria necessário fabricar suportes de fixação especiais para a maioria dos componentes roscados a ensaiar de forma a que os ensaios se pudessem realizar num dispositivo de ensaios de tracção como o que existe na Gestamp Portugal. Esta questão resolve-se convertendo os ensaios de tracção de rosca em ensaios de compressão equivalentes, em que a rosca sofre um esforço axial de compressão, sendo que para esta alternativa os suportes de fixação necessários são do tipo *standard* com adição de um calço de apoio para o parafuso de ensaio. A Figura A1.2 pretende ilustrar a forma de realização do ensaio.

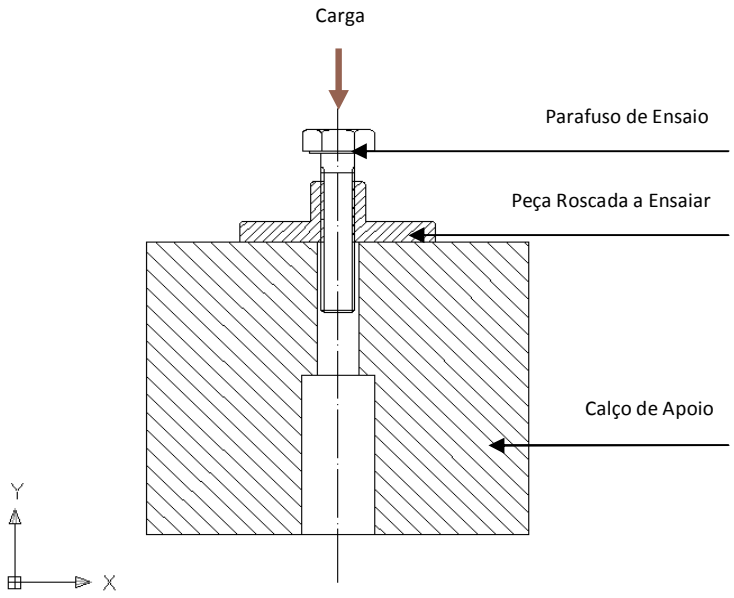


Figura A1.2 – Materialização do Ensaio de Tracção de Rosca através de um Ensaio de Compressão "Equivalente"

Durante o ensaio, o mecanismo comprime o parafuso (cuja classe de material deverá ser sempre superior à classe da rosca a ensaiar) para um determinado valor de carga correspondente a uma determinada classe de material. Depois do carregamento a peça é retirada da máquina de ensaios e o parafuso utilizado deverá ser capaz de roscar e desenroscar na peça sem esforço, comprovando que a rosca ensaiada não se deformou plasticamente.

1. **Objectivos do Estudo:**

Determinação da classe de rosca (M10 x 1,5) do componente 743540002R segundo a norma interna do fabricante automóvel.

2. **Amostras:**

O ensaio foi realizado considerando 4 amostras do componente, com a seguinte indexação:

1. **Lado1_LIM60** – Amostra produzida no lado 1 da ferramenta em que a força máxima de ensaio atinge 60KN
2. **Lado1_LIM70,3** – Amostra produzida no lado 1 da ferramenta em que a força máxima de ensaio atinge 70,3KN
3. **Lado2_LIM60** – Amostra produzida no lado 2 da ferramenta em que a força máxima de ensaio atinge 60KN
4. **Lado2_LIM70,3** – Amostra produzida no lado 2 da ferramenta em que a força máxima de ensaio atinge 70,3KN

A divisão das amostras em "lado 1" e "lado2" assenta no facto de a ferramenta de estampagem produzir duas peças simétricas por golpe, ou seja, levanta-se a possibilidade de que essas peças, consoante são originárias de um ou outro lado da ferramenta, poderem apresentar qualidades diferentes de rosca. Os ensaios foram realizados para dois valores de carga distintos (60KN e 70,3KN), valores esses que representam ligeiros majorantes dos valores nominais de carga exigidos pelo fabricante para verificar cada uma das classes de material. Em baixo poderá ser consultada a tabela constante na norma do fabricante, cujo nome e código normativo serão omitidos por motivos de confidencialidade.

Charge d'épreuve en Newtons

		Classes de qualité						
d x p (mm)	Section résistante As du mandrin (mm²)	3	4	5	6	8	10	12
5** x 0,80	14,2	4302	5737	7171	8605	11474	14342	17210
6 x 1,00	20,1	6090	8120	10150	12181	16241	20301	24361
8 x 1,25	36,6	11090	14786	18483	22180	29573	36966	44359
10 x 1,25*	61,2	18544	24725	30906	37087	49450	61812	74174
10 x 1,50	58	17574	23432	29290	35148	46864	58580	70296
12 x 1,75	84,3	25543	34057	42571	51086	68114	85143	102172

*Pas, non conseillé
** Diamètre, non conseillé

Tabela A1.1 – Tabela Normativa de Classes de Rosca

3. Resultados:

a. LADO1_LIM60

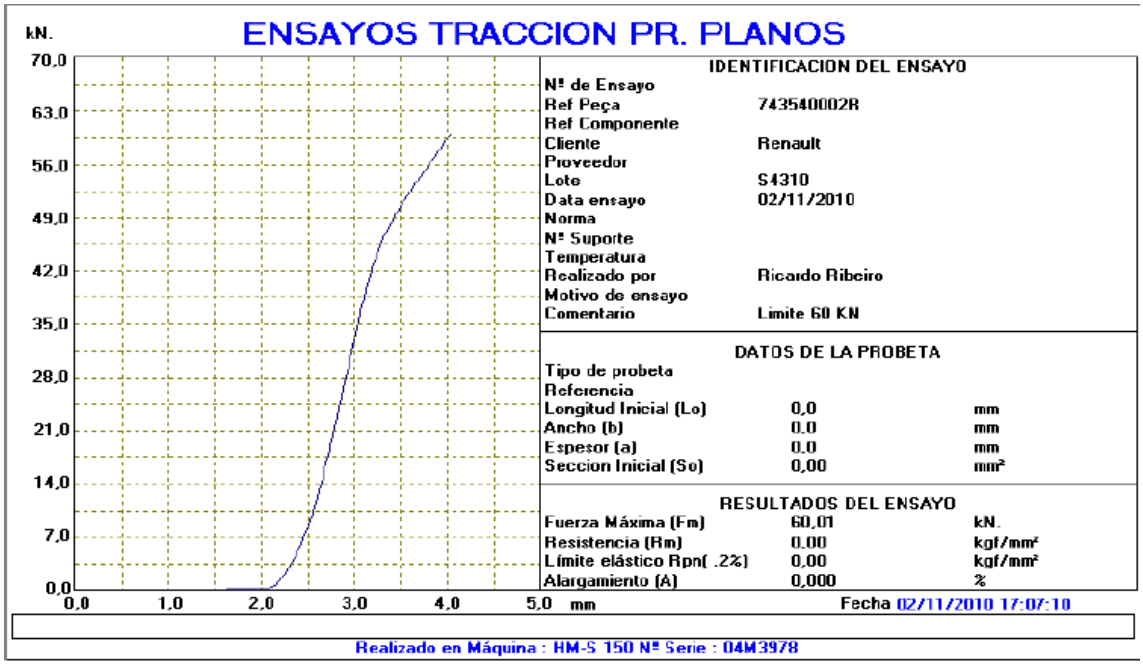


Figura A1.3 – Resultados do Ensaio de Tracção – Amostra Lado1_LIM60

Figura A1.4 – Amostra Lado1_LIM60 Após Ensaio

Comentário: A rosca resistiu de forma consistente à solicitação aplicada. **Classe 10 verificada.**

b. Lado1_LIM70,3

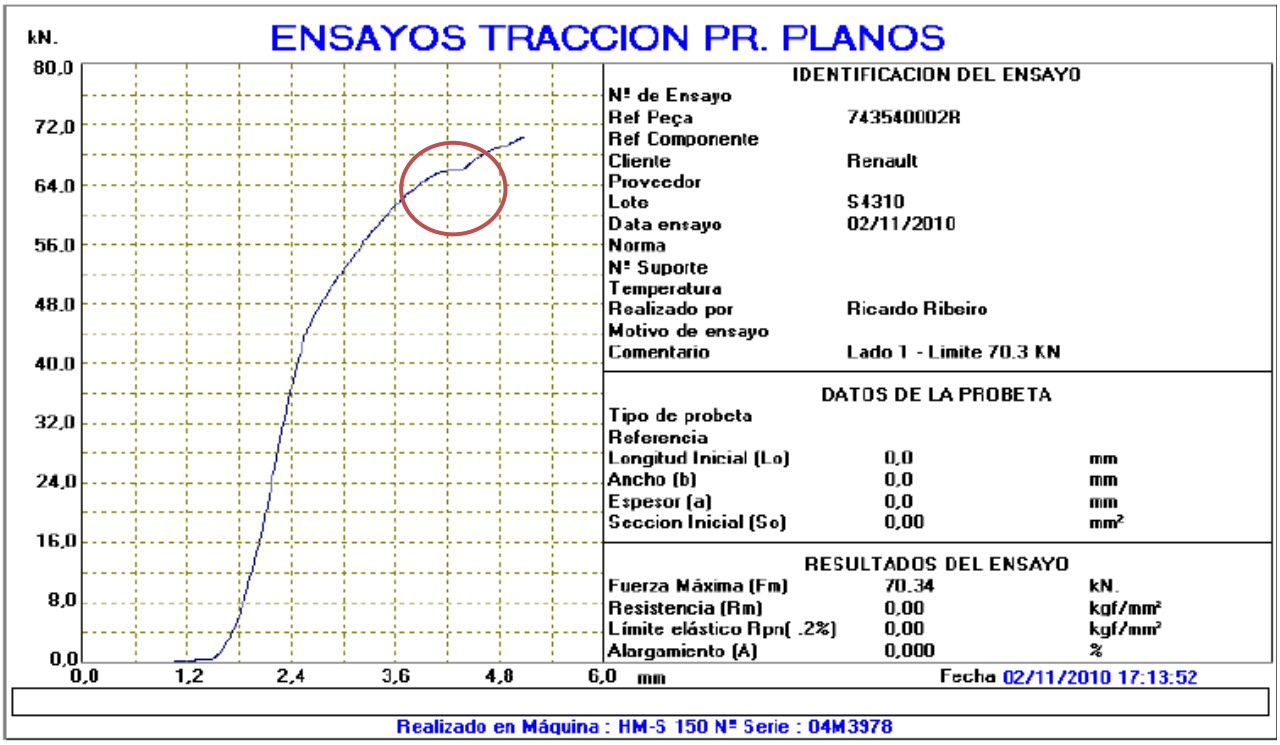


Figura A1.5 – Resultados do Ensaio de Tracção – Amostra Lado1_LIM70,3

Figura A1.6 – Amostra Lado1_LIM70,3 Após Ensaio

Comentário:

Verificou-se cedência localizada do extrudido na envolvente do roscado. Como tal e, pela análise do gráfico de tracção (compressão) não é possível concluir acerca da capacidade resistente da rosca. Esta cedência teve por origem uma instabilidade plástica local induzido em boa parte pelo péssimo estado de conservação do calço de apoio. Este último pormenor será tratado na discussão de resultados. **Classe 12 não verificada.**

c. Lado2_LIM60

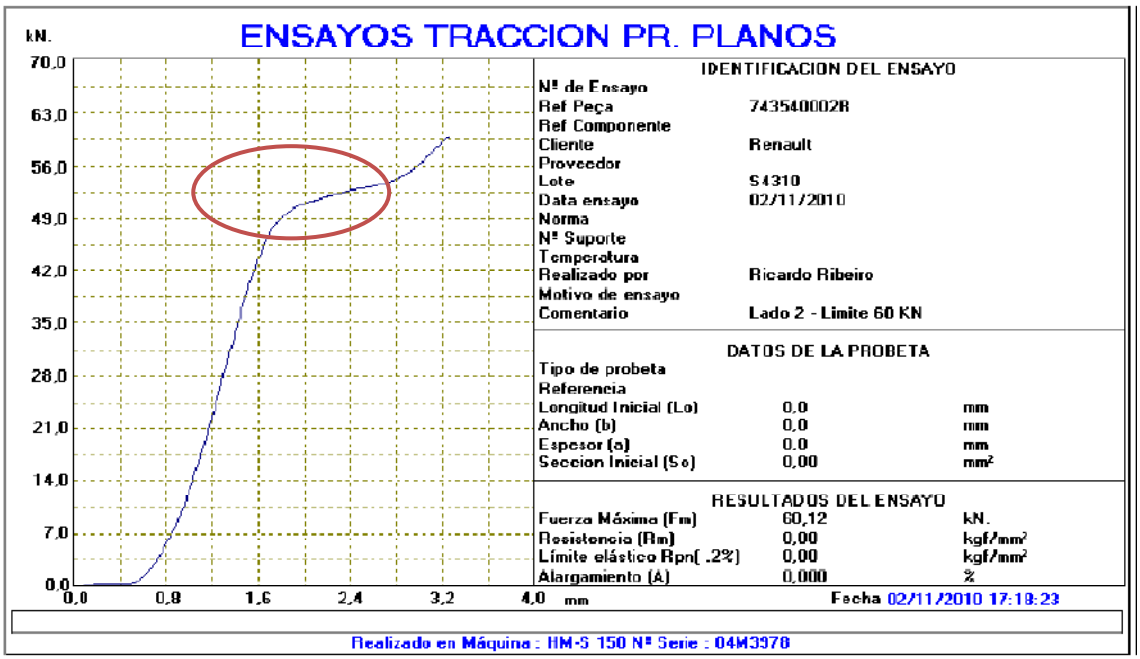


Figura A1.7 – Resultados do Ensaio de Tracção – Amostra Lado2_LIM60

Figura A1.8 – Amostra Lado1_LIM70,3 Após Ensaio

<u>Comentário:</u>

No gráfico de tracção verifica-se, a dado instante, uma variação na taxa tensão/deformação (assinalada a vermelho). Pela observação da peça ensaiada verifica-se uma deformação sob a forma de alteração da condição de planeza (formação de barriga). Aparentemente é dessa deformação (cedência) que provém a variação que se assinala no gráfico do ensaio. A referida deformação aponta de forma veemente para uma pobre condição de fronteira no calço de apoio.

A rosca resistiu de forma consistente à solicitação aplicada. **Classe 10 verificada.**

d. Lado2_LIM70,3

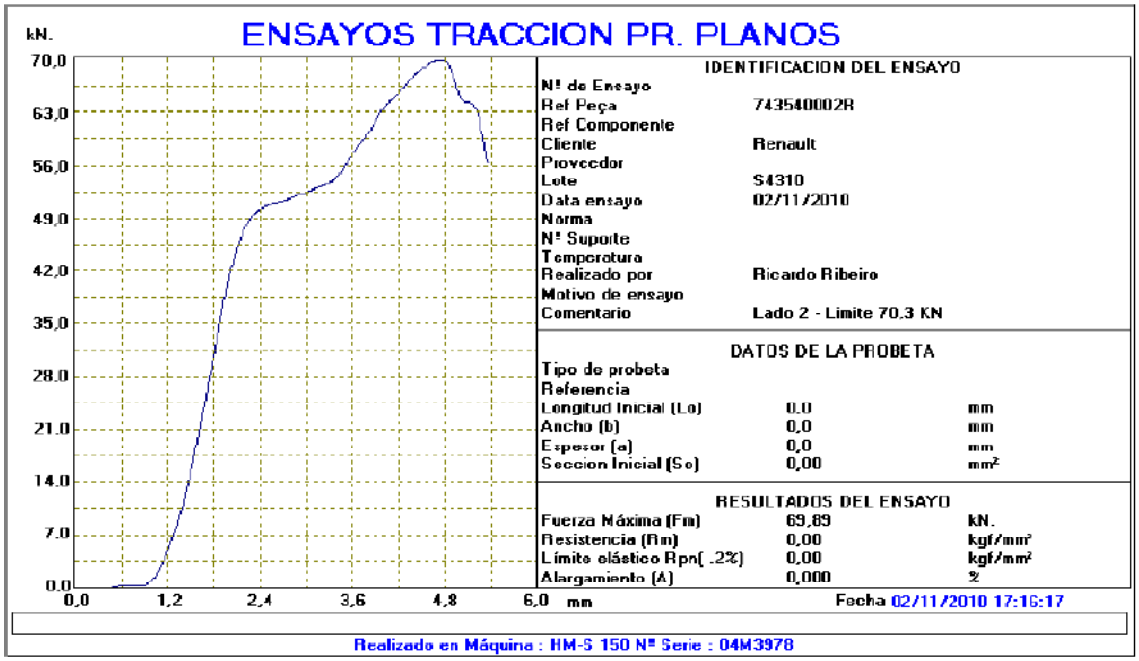


Figura A1.9 – Resultados do Ensaio de Tracção – Amostra Lado2_LIM70,3

Figura A1.10 – Amostra Lado2_LIM70,3 Após Ensaio

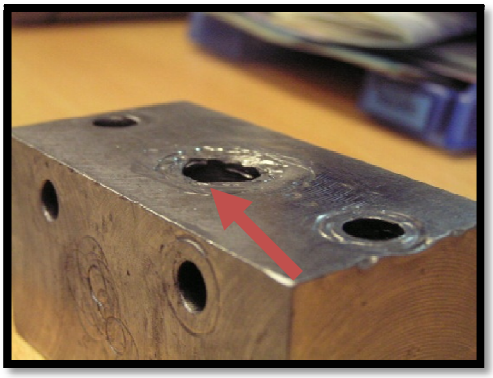
Comentário:

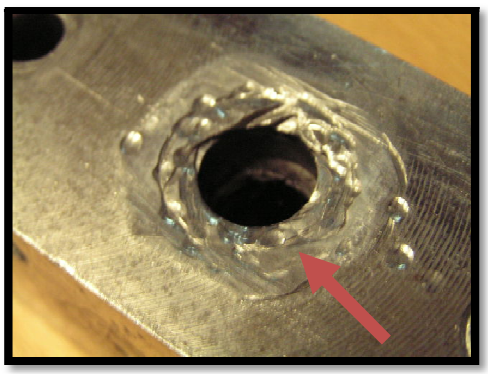
A carga aplicada levou a rotura da rosca por deformação e arranque de filetes. **Classe 12 não verificada.**

4. Conclusões e Discussão de Resultados

Do presente estudo foi possível concluir:

- Não se verificaram diferenças de resistência relevantes entre as roscas das peças obtidas num e noutro lado da ferramenta;
- A rosca M10 ensaiada verifica a classe 10 de material com um coeficiente de segurança de 1,024;
- A rosca M10 ensaiada não possui características de resistência que permitam verificar a qualidade 12 de material.
- É de alguma forma urgente a substituição do calço usado para apoio de componentes no ensaio realizado, visto ter-se notado uma grande influência dos danos deste nos resultados do ensaio, conduzindo até á falibilidade inconclusiva nalgumas amostras.
- O problema verificado com o equipamento poderá ser resolvido de forma permanente pela utilização de calços temperados ou, no mínimo, pré-tratados.





Figuras A1.11 e A1.12 – Deformações no Calço de Apoio ao Ensaio de Tracção

5. Projecto de Novo Calço para Ensaios de Compressão

Em virtude das irregularidades verificadas nos elementos de apoio das peças a ensaiar, mais especificamente no calço de apoio inferior para peças roscadas, torna-se necessário equacionar o projecto de um novo calço, mais conforme com as necessidades estruturais relativas à sua função.

a. Selecção do Material

As deformações verificadas no elemento a substituir indicam uma insuficiência da sua capacidade de resistir à deformação plástica. De facto o calço era construído em aço macio, inadequado portanto ao uso numa máquina de ensaios mecânicos.

Por consulta da norma interna do fabricante, para os ensaios de tracção de rosca, os calços ou elementos de apoio devem ser temperados e revenidos, bem como apresentar uma dureza mínima de 45 HRC.

O material disponível na Gestamp Portugal é, naturalmente, aquele que sairá mais barato usar, por ser encomendado em quantidades apreciáveis pelo Departamento de Ferramentaria. Este aço, o AISI D2 (referência K110 da Böehler), é um aço para ferramentas de trabalho a frio, possui uma excelente temperabilidade e, em complemento, existe uma experiência considerável por parte dos operários da empresa em temperar e revenir este material.

Tenhamos como dureza alvo para o processo 54 HRC, dureza esta que, para além de ser conforme com as especificações de dureza mínima para o componente, assegura ainda uma boa margem de segurança.

b. Geometria

O calço a projectar terá de permitir o ensaio de roscas de vários diâmetros. O calço anterior só permitia o ensaio de roscas M8, M10 e M12, assim, o novo calço será desenhado de forma a permitir o ensaio desses diâmetros, bem como M4, M5 e M6. Os diâmetros dos furos a realizar no calço, para cada diâmetro de rosca, têm os desvios máximos estabelecidos pela tabela do fabricante:

d	M5	M6	M8	M10	M12 et 7/16-20
Db	$5^{+0,105}_{+0,03}$	$6^{+0,13}_{+0,04}$	$8^{+0,13}_{+0,04}$	$10^{+0,16}_{+0,05}$	$12^{+0,16}_{+0,05}$

Tabela A1.2 – Desvios Admitidos para o Furo do Calço de Apoio

A geometria final para maquinagem encontra-se representada na Figura A1.13.

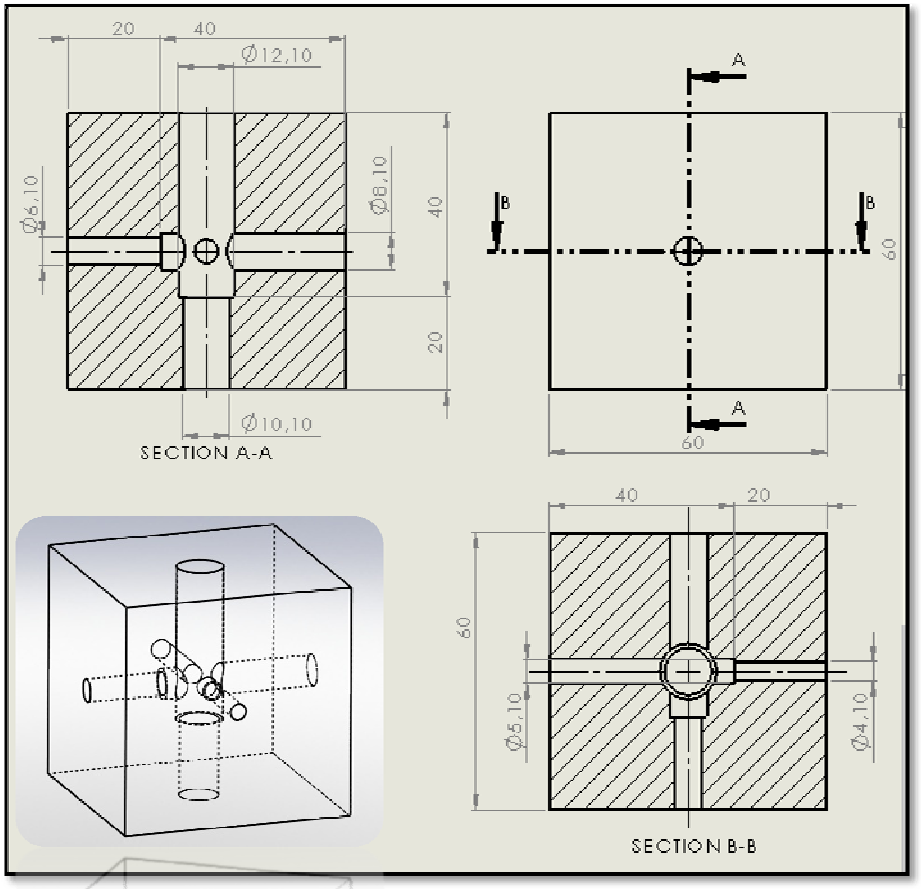


Figura A1.13 – Desenho do Novo Calço de Apoio

c. Tratamento Térmico

O aço seleccionado é fornecido no estado recozido, assim, o tratamento térmico a aplicar consistirá somente em temperar e revenir a peça.

Segundo o catálogo do fornecedor a têmpera deverá realizar-se a uma temperatura de 1020-1040°C, com arrefecimento ao ar sempre que as peças possuam formas complicadas, ou em óleo ou banho de sais (400-450°C), quando as formas do componente forem mais simples. O tempo de estágio aconselhado é de 15-30 minutos. Seguindo estas recomendações a dureza pós tempera deverá rondar os 63-65HRC.

O revenido deverá realizar-se imediatamente após têmpera, quando a temperatura do componente estiver perto dos 60°C. O tempo de permanência no forno deverá ser de 1 hora por cada 20mm de espessura da peça, com um mínimo definido de 2 horas. O arrefecimento deverá ser lento até se atingir a temperatura ambiente. A temperatura de revenido vai determinar a dureza final do componente. Em baixo encontra-se exposta a curva de revenido deste material, para uma temperatura de têmpera de 1030°C **[Pinto Soares 1992]**.

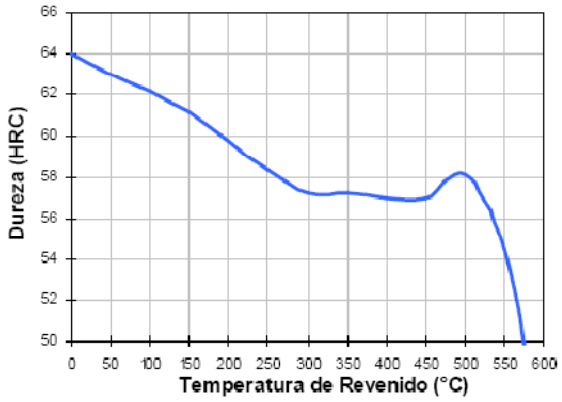


Gráfico A1.1 – Curva de Revenido do Aço AISI D2

Como se pode observar, para obtenção da dureza pretendida (54 HRC) o revenido deverá ser realizado a uma temperatura de 550°C. Seguidamente apresenta-se o diagrama final do tratamento térmico completo, ou seja, têmpera e revenido. Os degraus no aquecimento até à temperatura de têmpera deverão ser em número de 3, já que se trata de um aço ligado (baixa condutibilidade térmica) cuja temperatura de têmpera é superior a 1000°C **[Pinto Soares, 1970]**.

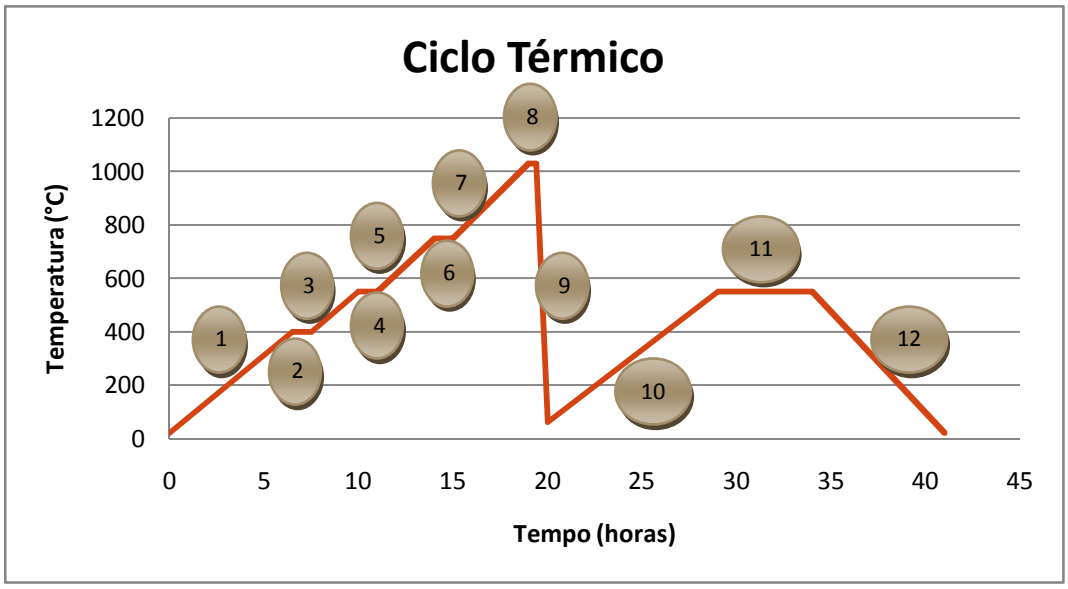


Gráfico A1.2 – Ciclo de Tratamento Térmico para o Aço AISI D2

1. Aquecimento até aos 400°C a uma taxa de 60°C/hora
2. Degrau intermédio: 400°C durante 1 hora
3. Aquecimento até aos 550°C a uma taxa de 60°C/hora
4. Degrau intermédio: 550°C durante 1 hora
5. Aquecimento até aos 750°C a uma taxa de 67°C/hora
6. Degrau intermédio: 750°C durante 1h
7. Aquecimento até aos 1030°C (temperatura de têmpera) a uma taxa de 70°/hora
8. Estágio a 1030°C durante 25 minutos
9. Arrefecimento em óleo até aos 60°C
10. Início do Revenido: Aquecimento até os 550°C a uma taxa de 55°/hora
11. Estágio a 550°C durante 5h
12. Arrefecimento ao Ar

Na Figura A1.14 encontra-se representado o novo calço de apoio a ensaios de tracção de componentes roscados em prensa, conforme definido neste pequeno estudo.

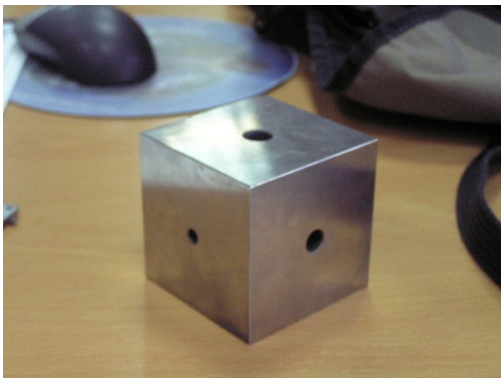


Figura A1.14 – Novo Calço de Apoio

Anomalia no Durómetro Delta

1. Introdução

Nos ensaios realizados no âmbito do estudo das causas de rotura do componente PT428 foram verificadas anomalias nos resultados das medições de dureza. O primeiro dispositivo utilizado para a medição de dureza dos provetes da banda de chapa foi o durómetro Delta que existe no Departamento de Ferramentaria da Gestamp Portugal. O dispositivo em questão encontra-se representado na Figura A1.14.

Figura A1.15 – Durómetro Delta

As medições de dureza realizadas nos provetes por recurso a este durómetro acusaram valores excessivos quando comparados com os valores anunciados pelo fabricante, como se poderá verificar na Tabela A1.3.

			Dureza (HRB)
Valor Anunciado Fabricante			79
Provete 1 (MP1)	Traz	MP1T1	85
		MP1T2	85
	Frente	MP1F1	85,5
		MP1F2	83
Provete 2 (MP2)	Traz	MP2T1	85
		MP2T2	84
	Frente	MP2F1	83
		MP2F2	84

Tabela A1.3 – Resultados Suspeitos na Medição de Dureza dos Provetes

Por outro lado se compararmos os valores medidos para a tensão de cedência dos provetes por recurso a ensaio de tracção verificaremos a tendência oposta, ou seja, a banda de chapa ensaiada apresenta um limite elástico ligeiramente inferior ao anunciado pelo fabricante. Neste sentido atente-se na Tabela A1.4:

Propriedade		Código Provete	Re (Mpa)
Valor Anunciado Fabricante			379
Corte Longitudinal	Limadas	LL1	25,2
		LL2	359,7
		LL3	358
	Não Limadas	NL1	350,3
		NL2	345,7
		NL3	344,4
Corte Diagonal	Limadas	LD1	153
		LD2	350,2
		LD3	350,2
	Não Limadas	ND1	339
		ND2	339,7
		ND3	362,3

Tabela A1.4 – Resultados dos Ensaios de Tracção dos Provetes

2. Indícios de Erros de Medição do Durómetro Delta

Segundo J. R. Cahoon **[Cahoon, 1983]** existe uma relação íntima entre a dureza medida para um determinado material e a sua tensão de cedência. De facto o ensaio de dureza Rockwell baseia-se na diferença entre a profundidade de penetração que uma determinada ponteira consegue imprimir na superfície do material quando pressionada por um diferencial de cargas cujo valor varia consoante o tipo de ensaio Rockwell a realizar. Ora, essa profundidade será tanto menor quanto maior for a resistência do material à deformação plástica. Daí que diversos estudos têm sido realizados no sentido de obter as relações matemáticas exactas entre essas grandezas, dureza e tensão limite de elasticidade. Por ora, para este estudo, interessa apenas entender que essas grandezas se relacionam de forma directa, ou seja que o aumento da dureza de um determinado material, por tratamento térmico por exemplo, é geralmente acompanhado por um aumento do seu limite elástico expresso no valor da tensão de cedência.

Ora pelo que se pôde observar nos quadros apresentados, verifica-se exactamente o oposto, ou seja, os provetes ensaiados apresentam uma dureza bastante superior relativamente ao anunciado pelo fabricante, ao passo que a tensão de cedência medida é, em todos os casos, inferior ao

anunciado. Sobre este último parágrafo note-se que os provetes utilizados para os ensaios de tracção foram cortados a partir da mesma banda de chapa e nas mesmas condições dos provetes utilizados nos ensaios de dureza.

3. Avaliação do Estado do Mecanismo

Após se ter verificado um comportamento anómalo na medição de durezas, o mecanismo foi sujeito a testes de avaliação da sua precisão. Para tal foi usado um calibre como o que se mostra na Figura A1.15 seguinte. Esse calibre possui dureza nominal 64HRC.

Figura A1.16 – Calibre para Máquinas de Ensaio de Dureza

Ao efectuar-se o teste de dureza no calibre, o durómetro Delta acusava um valor de **82 HRC**, ou seja, completamente fora do valor nominal esperado. Era portanto imperioso proceder-se à inspecção e manutenção do durómetro.

4. Avaliação do Estado do Comparador Analógico

Como se pode observar na FiguraA1.14, o durómetro Delta permite a leitura do valor de dureza através da acoplagem de um comparador analógico da marca Mitutoyo. Assim o comparador analógico foi sujeito a testes de avaliação da sua precisão.

Figura A1.17 – Comparador Analógico Mitutoyo

Figura A1.18 – Avaliação do Estado do Comparador Analógico

O mecanismo que permite efectuar essa avaliação mais não faz que impor um deslocamento ao perno de medida do comparador digital, apresentando um valor aumentado cerca de dez vezes na sua escala própria, permitindo assim uma melhor resolução de leitura de qualquer erro ou desvio que se possa verificar. A título de exemplo: quando o mecanismo de teste impõe ao comparador um deslocamento de 5mm, apresenta na sua escala um valor de 50mm. Se existir algum erro de medição no comparador, os valores apresentar-se-ão fora desta razão que mais não é que uma escala de 1:10.

Os resultados da verificação de precisão do comparador digital estão expressos na Tabela A1.5 que se segue.

Deslocamento Medido no Comparador (mm)	Deslocamento Medido no Mecanismo de Teste (mm)
10	100
20	200
30	300
40	400

Tabela A1.5 – Relação Entre o Deslocamento Medido no Comparador Digital e o Deslocamento no Mecanismo de Avaliação

Como se pode constatar o comparador digital encontra-se correctamente calibrado. Assim, o próximo passo será avaliar se os erros de medição verificados se devem aos penetradores amovíveis usados para realização dos diversos tipos de ensaios de dureza Rockwell.

5. Avaliação do Estado dos Penetradores

O órgão de contacto entre o durómetro e o objecto a ensaiar é um penetrador cuja constituição depende do tipo de dureza Rockwell a medir. Assim, se se pretende medir uma dureza em escala HRB, esse penetrador portará uma pequena esfera na zona de contacto, ao passo que quando se deseja efectuar medições na escala HRC o penetrador contacta com o material através de um pequeno diamante.

Estes penetradores são um dos órgãos mais expostos da máquina, o durómetro, sendo muitas vezes alvo de choques acidentais que as poderão danificar de forma relevante. Desta forma foram substituídas as ponteiras de medição existentes e realizados novos testes de dureza no calibre. Todas as medições apresentaram o valor de 64HRC, ou seja, o valor nominal de dureza do calibre.

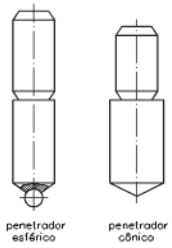


Figura A1.19 – Penetradores usados no Ensaio de Dureza

6. Conclusões do Estudo Calibração do Durómetro Delta

Do presente estudo foi possível concluir:

- É possível indiciar o estado de conservação de um durómetro através da análise da variação dos valores de dureza comparativamente à variação dos valores da tensão de limite elástico dos provetes;

- Os erros de leitura detectados não eram provenientes do comparador digital mas tão-somente dos penetradores utilizados nas medições;

- Os penetradores usados no durómetro Delta, quer para medição de Rockwell B, quer para medição de Rockwell C, encontram-se danificados, pelo que se deve proceder à sua substituição;

- Os danos verificados nos penetradores poderão ter origem nas fracas condições de conservação e exposição do durómetro Delta, demasiado exposto a vibrações de pavimento e a sujidades provenientes de operações de maquinagem efectuadas na sua proximidade.

Anexo 2 - Caracterização do Material S355MC

No sentido de avaliar a conformidade das propriedades da chapa utilizada no fabrico do PT428 relativamente às enunciadas pelo fabricante foram realizados ensaios de tracção e de dureza. Uma análise mais profunda deveria incluir a realização de ensaios de estampabilidade, recorrendo por exemplo ao ensaio de Erichsen, isto porque, no processo de conformação a chapa está sujeita a um estado triaxial de tensão, o que retarda o aparecimento da instabilidade plástica a que se dá o nome de tensão de rotura. Isto significa, por um lado, que na prática o material está sujeito a cargas bastante mais elevadas do que a carga máxima verificada no ensaio de tracção e, por outro, que resiste a tensões de valor mais alto que a tensão de rotura verificada nos ensaios.

Na verdade existe um dispositivo para realização de ensaios Erichsen no Departamento de Qualidade da Gestamp Portugal, mas esse equipamento está vocacionado para ensaiar chapas entre 0,2 e 2mm, o que põe de parte a sua utilização neste trabalho (chapa a ensaiar: espessura 4mm). Não obstante é de notar que os ensaios realizados, apesar de não permitirem compreender profundamente a relação entre as características do material e as dificuldades encontradas no processo, são válidos para verificar a conformidade das propriedades do material com o anunciado pelo fabricante.

1. Provetes dos Ensaios de Tracção/Dureza

Foram efectuados ensaios de tracção a um total de 12 provetes segundo a seguinte distribuição:

- 3 Amostras limadas e polidas cortadas no sentido longitudinal da banda (LL1, LL2, LL3)
- 3 Amostras não limadas e não polidas cortadas no sentido longitudinal da banda (NL1, NL2, NL3)
- 3 Amostras limadas e polidas cortadas no sentido diagonal da banda (LD1, LD2, LD3)
- 3 Amostras não limadas e não polidas cortadas no sentido diagonal da banda (ND1, ND2, ND3)

A amostragem apresentada teve como objectivo avaliar, não só as propriedades mecânicas do material a estampar, mas também avaliar o impacto do polimento dos provetes (apesar da norma obrigar a um acabamento da superfície lateral dos provetes por forma a impedir que a existência de rebarbas provoque a fissuração precoce do provete por concentração de tensões, a banda não é limada nem polida antes de ser conformada e por isso se optou por efectuar metade dos ensaios com amostras polidas e outra metade com amostras “cruas”, ensaiadas exactamente como saem do equipamento de corte de provetes) bem como da influência da direcção de laminagem na resistência dos provetes. Neste último sentido metade dos ensaios foram realizados em sentido longitudinal e a outra metade em sentido diagonal (ângulo inferior a 45° relativamente à direcção de laminagem). É sabido que o correcto procedimento para determinação de coeficientes de

anisotropia implica o corte de provetes em 3 direcção do laminado (longitudinal, 45° e 90°), no entanto a largura reduzida da banda (167 mm) não permitiu a obtenção de amostras nestas 3 direcções de corte.

Os ensaios de dureza foram efectuados sobre os provetes de tracção não utilizados, para que não houvesse falsificação dos resultados por encruamento. Neste caso foram ensaiados dois provetes que foram alvo de quatro medições cada um, ou seja duas medições por cada uma das faces de cada provete. Assim para os ensaios de dureza temos a seguinte amostragem:

- Amostra MP1 – Alvo de quatro medições: duas por cada face
- Amostra MP2 – Alvo de quatro medições: duas por cada face

Nas Figuras A2.1 e A2.2 são exibidas duas perspectivas dos provetes utilizados.

Figuras A2.1 e A2.2 – Provetes Utilizados no Ensaio de Tracção

2. Máquinas e Sistemas

Os ensaios de tracção foram realizados num engenho da marca HOYTOM (modelo CV-PC) segundo a norma EN 10002-1 e UNE 7-277-73. Em complemento são fixados ao provete a ensaiar um extensómetro e contractómetro, permitindo uma medição sensível da variação da secção longitudinal e transversal do corpo de prova. Os dados do ensaio são processados em tempo real pelo software HOYWIN 32 RS que devolve:

- Gráfico do Ensaio de Tracção

- Resultados Numéricos do Ensaio:
  - Força máxima aplicada (Newton)
  - Tensão de Rotura (MPa)
  - Tensão de limite elástico (MPa)
  - Alongamento (%)
  - Estricção (%)
  - Índice de Anisotropia Plástica (Norma UNE 36-404-88)
  - Índice de Encruamento (Norma UNE 36-405-88)

Figura A2.3 – Máquina de Ensaios de Tracção

Os resultados considerados relevantes para este estudo são a tensão de cedência (Re), tensão de rotura (Rm), Alongamento (A), Índice de encruamento (N) e Índice de anisotropia (R), sendo que este último não é apresentado pelo fabricante, pelo que não sendo possível efectuar uma comparação, é no entanto importante para avaliar as direcções preferenciais de deformação do material.

Note-se ainda que para cada ensaio são introduzidos os valores da secção inicial e final do provete medidos manualmente por recurso a um paquímetro digital. Estes valores são de especial relevância para a determinação dos índices de anisotropia realizados pelo software referido.

Os ensaios de dureza foram efectuados recorrendo a um durómetro Hoytom (modelo Minor 69). As medições foram feitas segundo a Norma ISO 6508-1 utilizando a escala Rockwell B, ou seja,

utilizando uma carga principal de 100 kgf e uma ponta esférica de 1/16" de diâmetro. O Equipamento utilizado encontra-se representado na Figura A2.3.

Figura A2.3 – Durómetro utilizado nos Ensaios

3. Propriedades Anunciadas Pelo Fornecedor da Banda de Chapa

Na Tabela A2.1 são apresentadas as propriedades anunciadas pelo fornecedor para o material utilizado, o aço S355MC.

Bobina/Lote	Dureza (HRB)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	N
12509925	79,0	379,00	436,00	37,1	0,16

Tabela A2.1 – Propriedades do Material segundo o Fornecedor

Como se pode verificar as propriedades anunciadas pelo fabricante estão de acordo com os valores mínimos estabelecidos pela norma para o aço S355MC, valores estes apresentados anteriormente na secção de apresentação do componente. A distribuição de elementos de liga não é relevante para este estudo, em todo o caso interessa mencionar que estão de acordo, de igual forma, com os valores estabelecidos pela norma.

4. Resultados – Ensaios de Tracção

Na Tabela A2.2 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de tracção realizados para a amostragem enunciada:

Propriedade		Código Provete	Re (Mpa)	Rm (MPa)	A (%)	N (Encruamento)	R (Anisotropia)
Valor Anunciado Fabricante			379	436	37,1	0,16	
Corte Longitudinal	**Limadas**	LL1	25,2	101,8	24,9	0,66	0,65
		LL2	359,7	455,3	26,1	0,1	0,66
		LL3	358	450,8	24,8	0,09	-4,4
	Não Limadas	NL1	350,3	440,7	28,8	0,09	0,66
		NL2	345,7	435,9	24	0,09	0,64
		NL3	344,4	435,9	27,9	0,09	0,61
Corte Diagonal	**Limadas**	LD1	153	225,7	22,3	0,14	0,66
		LD2	350,2	440,3	27	0,09	0,66
		LD3	350,2	432,9	25,7	0,09	0,71
	Não Limadas	ND1	339	437,8	23,7	0,1	0,64
		ND2	339,7	436,3	26,9	0,09	0,66
		ND3	362,3	452,4	39,32	0,09	0,65

Tabela A2.2 – Resultados dos Ensaios de Tracção

Comentários:

- Verificaram-se valores anómalos no que respeita á tensão de cedência e de rotura dos provetes LL1 e LD1. Essas anomalias têm como causa provável um escorregamento dos provetes relativamente às pinças da máquina de tracção. Estes provetes serão portanto desconsiderados nesta análise;

- A totalidade dos valores registados para a tensão de cedência está abaixo do valor anunciado pelo fabricante embora apenas apresentem pequenos desvios relativamente ao valor mínimo especificado pela norma (355MPa);

- A grande maioria dos valores registados para a tensão de rotura está acima do valor especificado pelo fabricante bem como dos valores especificados pela norma (430 MPa);

- Tanto em resistência à plastificação como em resistência à rotura verificaram-se valores superiores sempre que as amostras eram limadas e polidas, bem como quando as amostras eram provenientes de um corte longitudinal da chapa (sentido do laminado). Este último reparo vem de acordo com o esperado, ou seja, o material limado e polido apresenta características superiores de resistência visto que a possibilidade de fissuração por micro entalhe lhe é diminuída. Por outro lado confirma-se uma maior resistência da chapa quando

ensaiada no sentido do laminado, confirmando-se que existe um determinado grau de anisotropia causado pelo processo de obtenção de banda. A excepção a esta regra foi a amostra ND3 que, apesar de não limada, não polida e cortada em sentido diagonal, apresentou valores superiores de resistência. Deste estudo, bem como da observação dos provetes ensaiados não foi possível apurar a causa desta excepção;

- Os valores obtidos para o alongamento apresentam-se abaixo dos valores especificados pelo fabricante embora sejam conformes com o valor especificado pela norma (25%). Estes valores não apresentam uma lógica evidente de variação entre os diversos ensaios;

- Os valores verificados para o encruamento são bastante inferiores ao especificado pelo fabricante. Não há um valor definido para este coeficiente na norma do material;

- O coeficiente de anisotropia não pode ser alvo de comparação, isto porque não existem valores de referência por parte do fabricante ou da norma para este índice;

- Considerando que para o processo de conformação se pretendem: tensões limite de elasticidade não muito elevadas, tensões de rotura elevadas, alongamentos elevados, coeficientes de encruamento baixos e coeficientes de anisotropia baixos: Conclui-se que, embora existam variações significativas dos valores apurados por ensaio de tracção relativamente aos valores anunciados pelo fabricante, essas variações são favoráveis aos processo de estampagem em geral e, especificamente, ao processo crítico estudado.

5. Resultados – Ensaios de Dureza

Na Tabela A2.3são apresentados os valores obtido nos ensaios de dureza realizados para a amostragem enunciada:

Dureza HRB			
Valor Anunciado Fabricante			79
Provete 1 (MP1)	**Traz**	MP1T1	77
		MP1T2	76
	Frente	MP1F1	75
		MP1F2	75
Provete 2 (MP2)	**Traz**	MP2T1	76
		MP2T2	78
	Frente	MP2F1	76
		MP2F2	76,5

Tabela A2.3 – Resultados dos Ensaios de Dureza

Comentários:

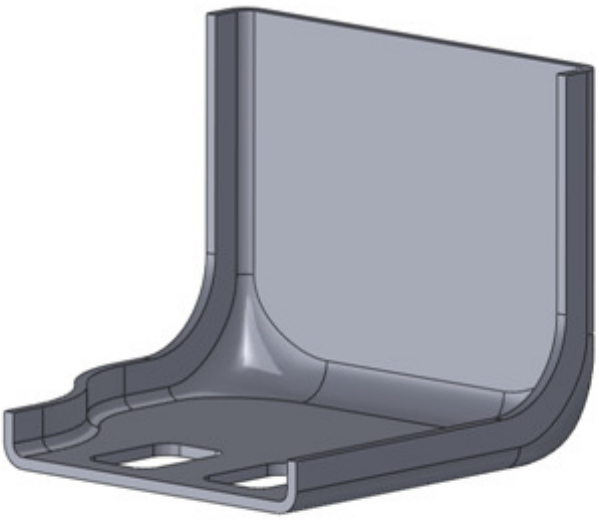
Os valores apurados em ensaio de dureza apresentaram-se ligeiramente abaixo dos especificados pelo fabricante. Este facto beneficia o processo de estampagem estudado.

Anexo 3 – Estudo Detalhado de Banda

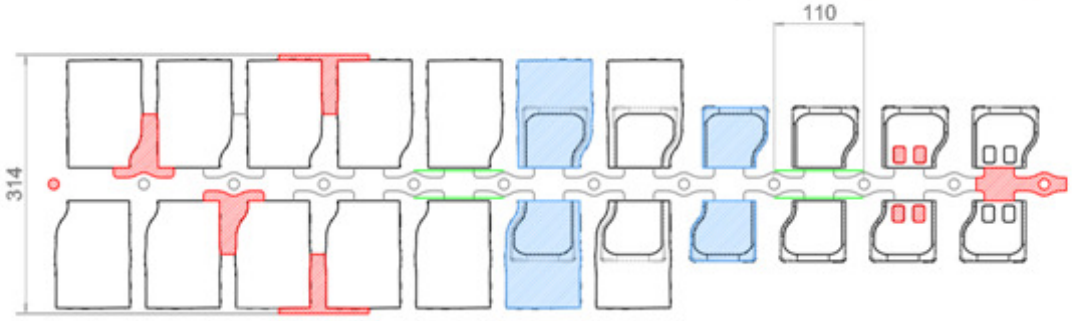
CLIENTE	PSA			DATA	
PROJECTO	MS/MM			05-01-2011	
CADENCIA	150.000	PEÇAS / ANO			
DESCRIÇÃO					
VEICULO	MS/MM				

GESTAMP PORTUGAL

DESCRIÇÃO	Equerre				
REFERENCIA	4436025729				
MATERIAL	HE260M G10/10				
FICHEIRO CAD	4436025729_-_EQUERRE-POUR-CONSULT_----0000CAT				
ESPESSURA	2,00	mm			
PESO NETO	0,171	Kg	1 PEÇA	COEFICIENTE	
PLANIFICADO	151x92x2	mm			
BOX SIZE (C x L x A)	79x74x63	mm			

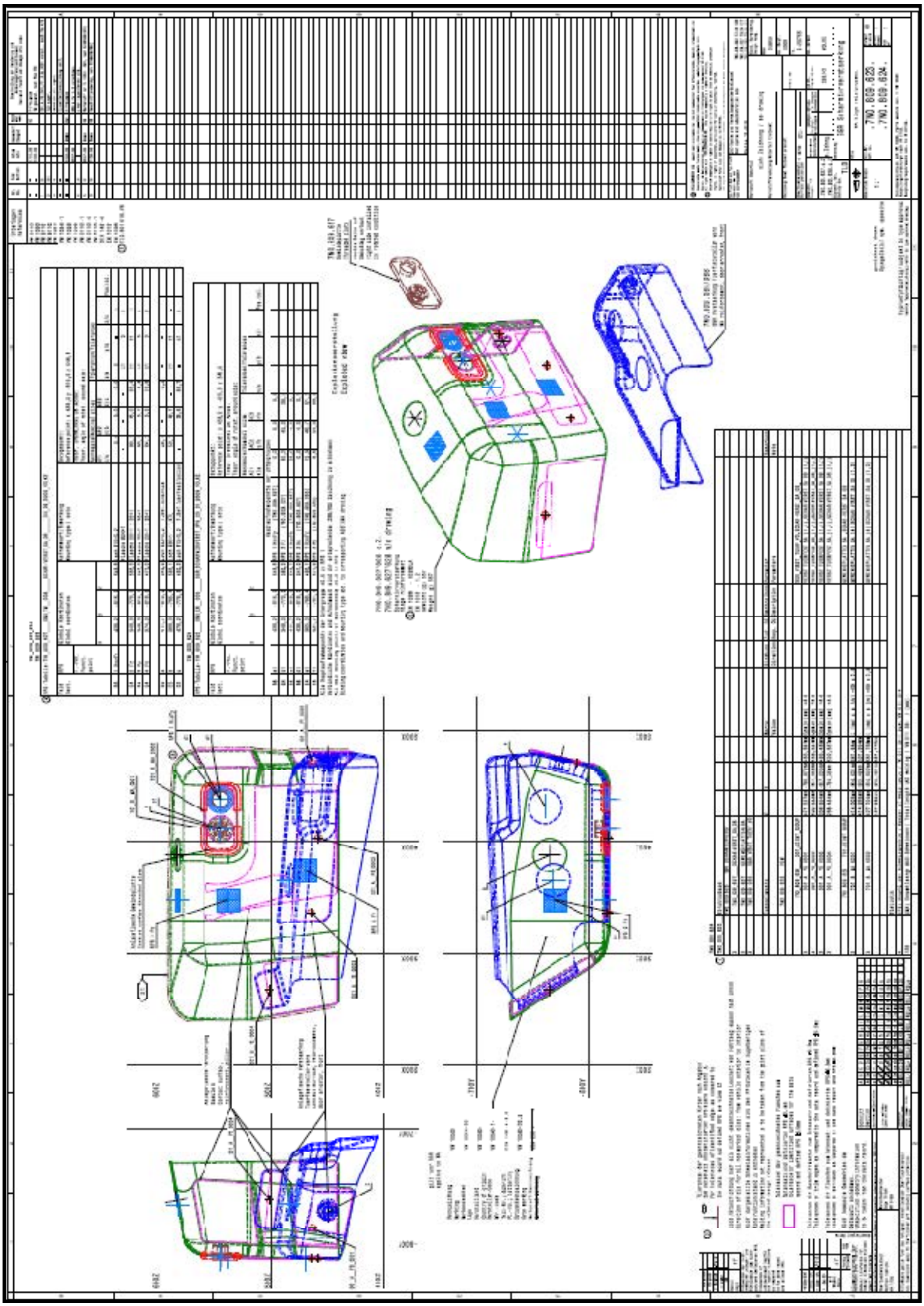


PASSOS:	DESCRIÇÃO
4	corte
1	rotação
1	dobrar a 70° + bordos abertos
1	livre
1	finalizar forma
1	desfazer rotação
1	furação
1	separação
11	TOTAL



LARG. DE BANDA	314	mm	COMPR. DE BANDA	1210	mm	PESO BRUTO	0,542	Kg
PASSO	110	mm						
PRENSA	250	Ton				% de SUCATA	36,9	%
ORÇAMENTO (!)		(!)						
PEÇAS / GOLPE	2	Unidades						
MAQUETE (!)		(!)						
PEÇAS / CONTROLO	1	Unidades						
TOTAL (!)		(!)						

Anexo 4 – Desenho do Conjunto Mecânico do Componente PT428



Anexo 5 - Árvore Organizacional da Gestamp Portugal