

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -PPGEM

ESTUDO DO PROCESSO DE CORTE DE CHAPAS POR CISALHAMENTO

João Henrique Corrêa de Souza

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2001

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -PPGEM

ESTUDO DO PROCESSO DE CORTE DE CHAPAS POR CISALHAMENTO

João Henrique Corrêa de Souza
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia da Transformação.

Porto Alegre
2001

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia da Transformação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS.

Coorientador:

Dr. Ing. Arno Richter

Professor visitante no LdTM.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ing. Arno Karl Wilhelm Richter, professor visitante.

Prof. Dr. Ronaldo Antônio Neves Marques Barbosa

Pró-Reitor de Pós-Graduação da UFMG – Professor do Departamento de Metalurgia e Minas – Escola de Engenharia - UFMG

Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Júnior

Professor do Laboratório de Fundição – Centro de Tecnologia - UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Coordenador do PPGEM

Para Dani e Isa

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Lírio Schaeffer pelas oportunidades proporcionadas durante o mestrado e pela orientação do mestrado.

Também ao Professor Arno Richter pela orientação na escolha do tema, durante a realização do trabalho e valiosas contribuições.

Ao estagiário Adalberto Lenhart pela ajuda com a parte prática dos experimentos (monta...desmonta...monta...).

Ao Sr. Algirdas Tamaliunas, diretor da Metalúrgica THF Ltda., pela utilização da prensa e instalações da fábrica.

Aos funcionários do Centro de Tecnologia.

A todos, muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 Elementos Básicos e Mecanismo do Processo	18
2.2 Força de Corte	22
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	24
3.1 Equipamento Desenvolvido	24
3.1.1 Descrição dos Sensores	28
3.1.2.1 Sensor de Força do Punção	30
3.1.2.2 Sensor de Força do Prendedor de Chapas	34
3.1.2.3 Sensor de Deslocamento	37
3.2 Instrumentação Utilizada	38
3.3 Teste do Sistema	39
3.4 Planejamento dos Experimentos	43
3.4.1 Modelo Estatístico	47
4. RESULTADOS	49
5. DISCUSSÃO.....	58
6. CONCLUSÕES.....	61
7. PERSPECTIVAS.....	62
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

LISTA DE FIGURAS

2.1	Componentes de um silenciador para moto serras.	15
2.2	Exemplos de peças cortadas por cisalhamento que requerem alta qualidade da região cortada.	16
2.3	Classificação do processo de corte por cisalhamento segundo a DIN 8580.	17
2.4	Elementos básicos de uma ferramenta de corte por cisalhamento.	18
2.5	Partes principais de uma peça cisalhada.	19
2.6	Seqüência das etapas do processo de corte por cisalhamento.	19
3.1	Fotografia da ferramenta de corte instrumentada.	25
3.2	Representação esquemática do sistema de troca rápida de punção e matriz utilizado.	25
3.3	Corte parcial através da ferramenta mostrando a localização dos componentes e sensores.	27
3.4	a. Vista 3-D da célula de carga do punção. b. Dimensões.	31
3.5	a. Vista 3-D da célula de carga do prensa chapas. r _{1..4} strain gauges. b. Dimensões.	31
3.6	a. Posição de aplicação dos strain gauges. b. Dimensões da célula de carga. c. Diagrama do sinal (mV) vs. força aplicada (kN) para carregamento simétrico e duas posições da mola sobre o sensor.	35
3.7	a. Posições de aplicação dos strain gauges. b. Dimensões da nova célula de carga. c. Diagrama do sinal (mV) vs. força aplicada (kN) para carregamento simétrico e duas posições da mola, após as modificações.	35
3.8	Diagrama esquemático do sensor de deslocamento.	36
3.9	Vista do sistema PROCONTROL, usado neste trabalho para a supervisão do processo de corte.	37
3.10	Chanfro aplicado a um dos punções para simular uma situação de desgaste.	39
3.11	Aspecto da aresta cortada de uma chapa de aço AISI 304 com espessura de 1 mm e folga entre punção e matriz de 5%.	39
3.12	Diagrama de força de corte vs. tempo dos ensaios.	40
3.13	Aspecto da aresta cortada de uma chapa de aço inox 304 com espessura de 1 mm e folga entre punção e matriz de 20%.	41
3.14	Peça cortada com o punção onde foi simulado desgaste, mostrando a grande rebarba resultante.	41
3.15	Matriz dos experimentos. Esta tabela foi preenchida com os resultados dos ensaios e a partir dela foi feita a análise de variância.	47

4.1	Curva força x tempo mostrando o comportamento da força de corte (linha contínua) e da força do prendedor (linha tracejada).	48
4.2	Diagrama do efeito principal e da interação AB.	51
4.3	Diagrama da interação AC.	52
4.4	Diagrama da interação AD.	53
4.5	Diagrama da interação BC.	54
4.6	Diagrama da interação BD.	55
4.7	Diagrama da interação CD.	56
5.1	Concentração da força de corte causada pelo aumento da folga. Força de corte em a) maior que em b).....	58

LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplos de cálculo da máxima força de corte para um punção de 25 mm de diâmetro e espessura da chapa 1 mm.	23
3.1	Dimensões dos punções utilizados.	39
3.2	Tipos de chapas utilizadas.	44
3.3	Dimensões dos punções utilizados.	44
3.4	Dimensões dos prendedores utilizados.	45
3.5	Molas utilizadas.	45
3.6	Fatores e níveis do experimento.	47
4.1	Resultados distribuídos na matriz dos experimentos.	49
4.2-4.3	Resultados da análise da variância.	50
4.4	Resultados da CMM.	51
4.5	Resultados da CMM para a interação AC.	52
4.6	Resultados da CMM para a interação AD.	53
4.7	Resultados da CMM para a interação BC.	54
4.8	Resultados da CMM para a interação BD.	55
4.9	Resultados da CMM para a interação CD.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

F_c	Força de corte
τ_c	Tensão de cisalhamento
A_c	Área de Corte
L_c	Linha de corte
e_c	Espessura do corte
R_m	Resistência do material
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
ε	Deformação relativa
E	Módulo de Elasticidade
TC	Termo de Correção
SQi	Somas quadradas de i
MQi	Médias quadradas de I
GDL	Graus de Liberdade
S_x	Desvio padrão das médias
n	Número de repetições
L_d	Limite de decisão
CMM	Comparação Múltipla de Médias
DS	Diferença Significativa
DNS	Diferença Não Significativa

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta instrumentada para o estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento. Sua instrumentação permite a medição da força de corte, da força do prendedor de chapas e do deslocamento do punção, permitindo a realização de experimentos visando a otimização do processo. O equipamento permite também o estudo de métodos de supervisão do processo através da determinação da curva característica do processo para uma determinada situação de corte. Foram realizados experimentos variando alguns parâmetros do processo e procedendo-se uma análise de variância sobre os resultados. Os experimentos mostraram que, para materiais com grande resistência, a força necessária para o corte tem relação com a força exercida pelo prendedor de chapas.

ABSTRACT

This work describes an instrumented tool for the use in research of the shearing processes. With its integrated instrumentation is possible to measure the cutting force, the blankholder force and the punch displacement, allowing a wide variety of investigations aiming the process optimization. The tool capabilities also allow its application in process supervision strategies research. Experiments were made with an analysis of variance. The results showed that, for high strength sheet metal materials, the force needed to the cutting process has some relation with the force due to the blankholder.

1. Introdução

A técnica da estampagem ganha cada vez mais importância na manufatura de componentes. A pesquisa para se atingir elevados índices de produção de componentes de precisão ao menor custo possível conduziu ao aumento do uso da conformação por prensa, o que, por sua vez, está abrindo novos mercados. Processos de manufatura que consomem tempo, como fundição, sinterização, forjamento e usinagem estão cada vez mais sendo substituídos pelos processos de estampagem. Na base desse contexto estão também os desenvolvimentos contínuos em materiais e ferramental [1, 2].

Durante a fabricação de um componente por estampagem diversos processos como corte, embutimento profundo, flangeamento, calibração, dobra, etc., são utilizados de acordo com a complexidade da forma final desejada. Nesse contexto o processo de corte situa-se como a mais amplamente utilizada técnica de separação, seja isoladamente, como na preparação de geratrizes para embutimento profundo e posterior recorte do excesso, seja em ferramentas progressivas, onde convive com outros processos [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Dentre as diversas técnicas de separação existentes, o corte por cisalhamento, ou corte convencional, tem como característica importante um ferramental mais simples quando comparado a outras técnicas, que pode ser utilizado em prensas de simples ação e que permite a produção de peças com uma qualidade dimensional suficientemente boa para a maioria das aplicações. Porém, a exigência por qualidade tem crescido dia a dia, junto com a necessidade de redução de custos e aumento da velocidade de produção, o que torna a necessário um constante desenvolvimento do processo [8, 10, 11, 12].

Atualmente o conhecimento existente sobre o processo está baseado quase que totalmente em estudos fenomenológicos, devido à inexistência de uma teoria que descreva satisfatoriamente o mecanismo do processo [13]. Com o objetivo de realizar estudos sobre o processo, neste trabalho foi projetada e construída uma ferramenta instrumentada para pesquisa de métodos para a otimização e a supervisão do processo de cisalhamento de chapas. A ferramenta desenvolvida permite que se varie de forma controlada os fatores mais importantes do processo, tornando possível o estudo da influência desses fatores na

qualidade do corte. Além disso, permite que sejam realizados experimentos orientados à supervisão do processo como forma de acompanhar o desgaste das partes ativas da ferramenta e também detectar problemas como trincas ou quebras durante o processo.

2. Revisão da Literatura

A figura 2.1 mostra o exemplo de um silenciador para moto serras, onde o processo está presente no recorte das geratrizes, recorte das janelas para escape dos gases, dos componentes internos e externos e das furações para montagem [13, 14].

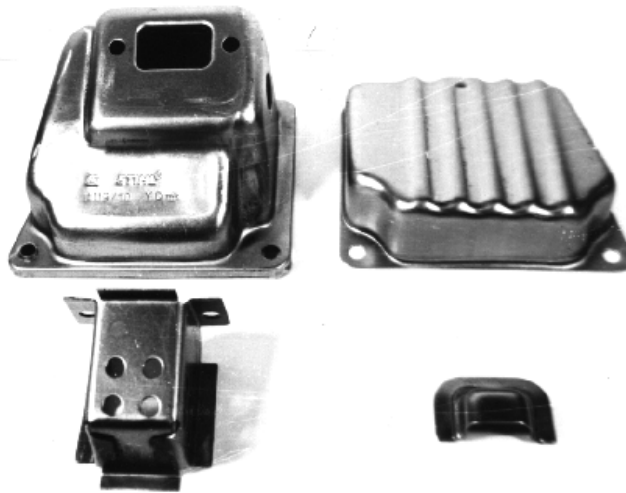


Figura 2.1 Componentes de um silenciador para moto serras. Exemplo de produto estampado fabricado do Brasil em que o processo de corte é muito utilizado. Fonte: Metalúrgica THF Ltda.

Na maioria dos casos, a qualidade da região cortada é definida pela aplicação da peça. Casos em que a região cortada possui características funcionais requerem um controle acurado dos parâmetros do processo. Alguns exemplos são mostrados na figura 2.2.

O fator determinante do processo de corte a ser utilizado na fabricação de um componente é a qualidade da região cortada, e processos que garantem uma melhor qualidade de corte são mais caros por necessitar de ferramentas e prensas mais sofisticadas. A pesquisa por métodos de otimização do processo de corte por cisalhamento pode portanto resultar em reduções de custos dos equipamentos necessários à fabricação. Além disso, métodos de produção modernos exigem supervisão constante de todos os fatores que influenciem a qualidade do produto final.

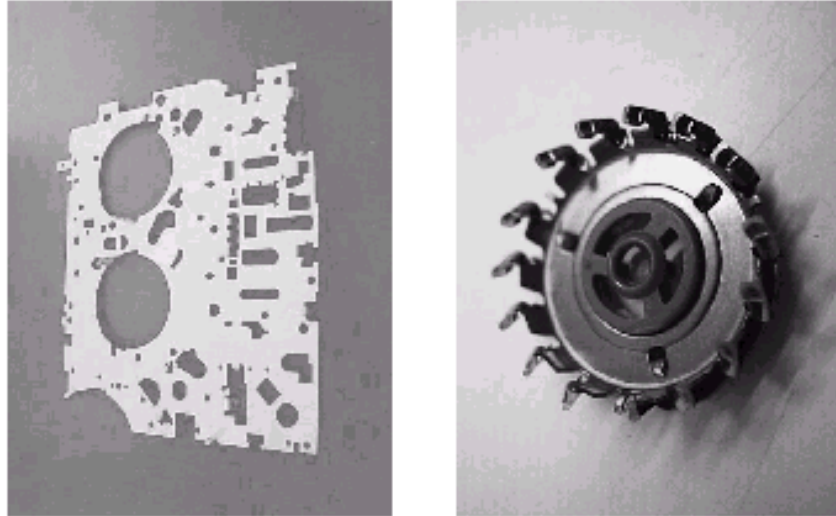


Figura 2.2 Exemplos de peças cortadas por cisalhamento que requerem alta qualidade da região cortada. Esquerda: placa de fixação de componentes mecânicos em um aparelho de CD para automóveis. Direita: lâminas rotativas de um barbeador [13].

Devido aos diversos fatores que influenciam o processo, o problema da otimização sempre foi considerado de difícil solução [4]. Com o desenvolvimento dos sensores para medição de forças foi possível conhecer o comportamento da força de corte para diferentes materiais e parâmetros do processo. A aplicação de sensores às ferramentas de corte, já na década de 70 [3] e nos dias atuais [5, 11, 15, 16, 23], permitiram um melhor conhecimento do processo.

O processo de corte que é objeto deste trabalho está classificado na norma alemã DIN 8580 – Processos de Fabricação [17]. A DIN 8580 começa a classificação segundo o tipo de processamento em três grupos principais: criação da forma, alteração da forma e alteração das propriedades do material. Dentro destes três grupos são distribuídos os processos de fabricação, classificados como mostra a figura 2.3. No grupo 3 encontram-se classificados os processos de separação, entre estes os processo de corte (descrito na DIN 8588 [18]), entre estes o corte por cisalhamento. Adiante a norma classifica as diversas maneiras de se efetuar o corte por cisalhamento, no presente trabalho aplicando-se o corte com uma única

batida de prensa. Finalmente, a norma classifica o corte segundo o formato da linha de corte, que neste trabalho caracteriza-se pela linha de corte fechada em si mesma.

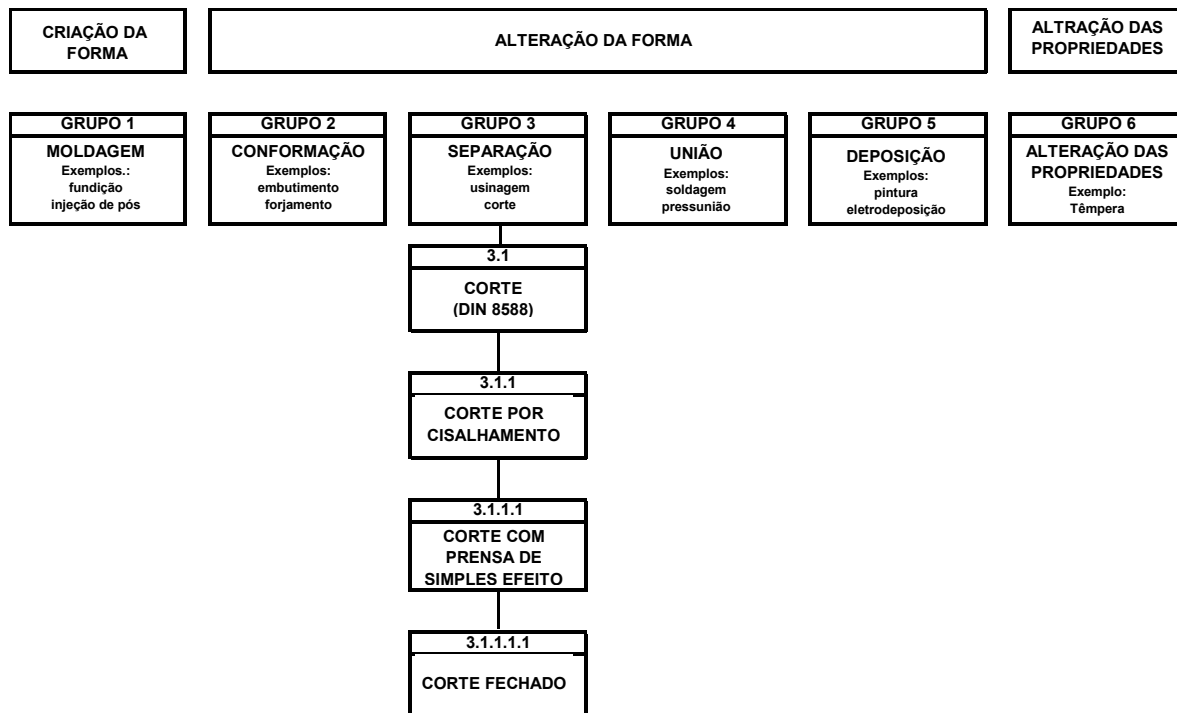


Figura 2.3 Classificação do processo de corte por cisalhamento segundo a DIN 8580.

Igualmente existem classificações originadas das indústrias especializadas nos processos de corte, que podem ser descritas como [19]:

- Técnica de corte convencional: produz peças com valores médios de tolerância, com média frequência de batidas da prensa. É feita em prensas mecânicas com estrutura tipo “C”. Esta é a técnica estudada neste trabalho;
- Técnica de corte de alta velocidade: produz peças com tolerâncias mais justas que o processo de corte convencional, com velocidade de até 1800 batidas por segundo. Utiliza predominantemente ferramentas de metal duro, em prensas com estrutura tipo “O”;
- Técnica de corte fino: produz peças de chapas de 1 até 10 milímetros de espessura com tolerâncias muito boas e alta qualidade da superfície cortada. Esta é necessária onde a superfície do corte possui uma função mecânica no componente (p.ex.

engrenagens), com pequenas tolerâncias de forma e de medidas e alta qualidade da superfície cortada.

2.1 Elementos Básicos e Mecanismo do Processo

Os componentes básicos de uma ferramenta de corte convencional ou corte por cisalhamento é mostrado na figura 2.4:

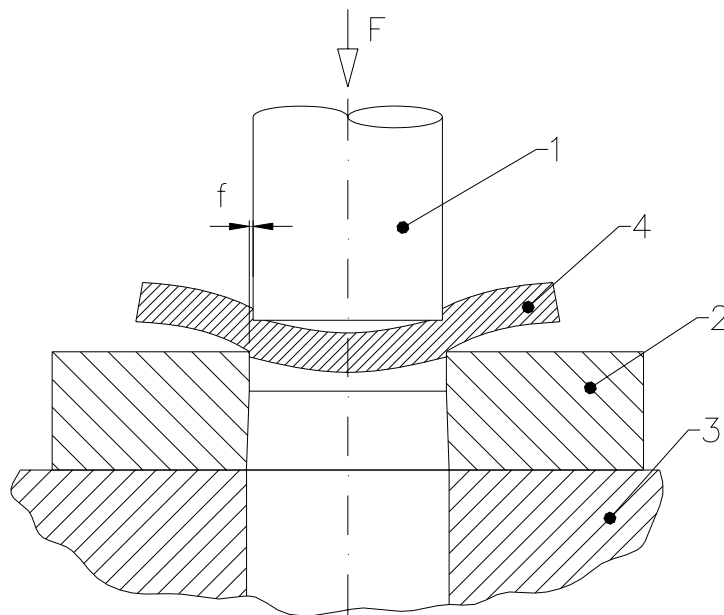


Figura 2.4 Elementos básicos de uma ferramenta de corte por cisalhamento. 1- punção, 2- matriz, 3- base da ferramenta, 4- chapa, F - força de corte, f - folga punção-matriz.

O corte é realizado através do movimento relativo de um punção de corte contra uma matriz, causando a separação do material da chapa. O objetivo do corte pode ser tanto realizar um furo com o formato do punção na chapa quanto separar o componente (também com o formato do punção) da chapa. No caso de um punção circular, o diâmetro do punção é levemente inferior ao diâmetro da matriz de forma a existir uma folga entre os dois que permite que o punção penetre na matriz, separando a chapa em duas partes. Esta folga é o parâmetro mais importante do processo.

Uma peça cortada com o processo de corte convencional apresenta características próprias originadas da forma como as tensões se distribuem sobre a chapa no momento do corte, como mostra a figura 2.5. Estas características definem qualitativamente o processo no que diz respeito ao resultado do corte.

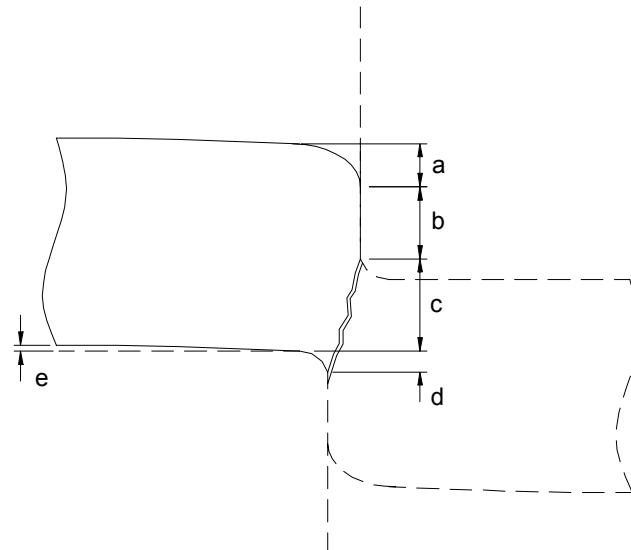


Figura 2.5 Partes principais de uma peça cisalhada. a- zona de arredondamento, b- zona cisalhada, c- zona fraturada, d- rebarba, e- empenamento.

A forma como se processa o corte pode ser bem entendido mediante a análise em seqüência de cada uma das fases do processo como descrito abaixo e ilustrado na figura 2.6.

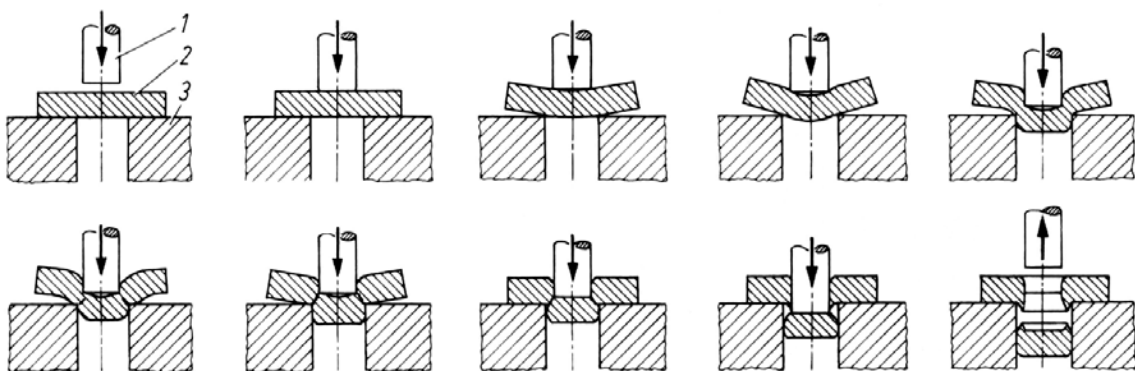


Figura 2.6 Seqüência das etapas do processo de corte por cisalhamento. 1-punção, 2-chapa, 3-matriz. Fonte: [20].

1. Com a atuação da força do punção sobre a chapa aparece em primeiro lugar uma deformação elástica. A chapa arqueia-se sob o punção e tende a levantar suas extremidades devido à folga entre punção e matriz.. Desta fase passa-se rapidamente a uma deformação plástica, caracterizada por um arredondamento permanente da chapa, com um perfil que termina tangenciando a próxima fase, de cisalhamento. Como a folga existente entre a matriz e o punção é muito pequena em relação à espessura da chapa, esta fase é também pequena e termina tangente à próxima fase, de cisalhamento, correspondendo a uma altura de 5 a 10% da espessura da chapa.
2. A seguir ocorre a fase de cisalhamento. O material escoar devido ao esforço realizado pelo punção sobre a matriz formando a zona cisalhada. O modo principal de deformação é cisalhamento ao longo de um plano determinado pelo punção e pela matriz, perpendicular ao plano da chapa. Devido ao crescente encruamento do material durante o corte, a zona de arredondamento da chapa tende também a crescer.
3. A crescente solicitação é aplicada até que se esgote a capacidade de deformação da secção da chapa. Quando isto ocorre, surge na aresta de corte da matriz uma trinca na direção da máxima tensão de cisalhamento, que conduz finalmente à separação do material. A trinca resultante pode ser reconhecida na peça cortada como uma região rugosa e de formato oblíquo, com o ângulo de inclinação dependente do tamanho da folga. A forma como ocorre a fratura também é responsável pelo tipo e tamanho da rebarba resultante na peça.

O estado de tensões durante o processo de corte é variável. A máxima tensão de cisalhamento na trinca alcança o limite de ruptura ao cisalhamento antes do limite de escoamento, devido ao crescente encruamento que vai ocorrendo durante o processo. O surgimento da trinca ocorre então na direção da máxima tensão de cisalhamento. Com a separação da peça cortada ocorre o retorno elástico do material remanescente na chapa, que

se comprime em torno do punção. Finalmente, com o movimento de retorno o punção é extraído da chapa.

A qualidade do final do corte pode variar principalmente em função do material e da folga entre punção e matriz. Uma chapa de aço inox apresenta uma zona de arredondamento maior em comparação com uma chapa de alumínio, devido ao fato que a resistência causada pelo encruamento na primeira ser consideravelmente maior que na segunda. No alumínio a região fraturada é maior que no aço inoxidável pois resiste menos a deformações, rompendo mais cedo.

A influência da folga é também evidente. Uma folga maior resulta em uma zona de arredondamento maior, pois as deformações são maiores. Uma folga menor resulta em uma zona cisalhada maior dado que as tensões sobre o material são mais elevadas, o que posterga o aparecimento da trinca [3, 5, 6, 20].

A folga é certamente a variável mais importante para construção de uma ferramenta de corte. A sua correta determinação tem relação direta com o desgaste das partes ativas da ferramenta, pois quanto menor a folga, maior a força necessária para o corte. Em cortes com folgas pequenas o desgaste será maior, pois após o corte o material restante da chapa tende a fechar-se sobre o punção, sendo necessária a utilização de extratores. Existe alguma dificuldade em especificar a correta força de corte para cada liga metálica, pois o tipo de micro-estrutura, tamanho da folga e o alinhamento da ferramenta causam significativas variações na força de corte [5]. A forma de se especificar a folga varia, sendo que algumas literaturas citam a possibilidade de que, para materiais macios e pequenas espessuras, esta praticamente não deve existir [8, 21]. Normalmente fala-se em folgas menores (4% da espessura) para metais mais moles como latão e alumínio até 10% para aços mais resistentes, como aço inox. Outra maneira é calcular a folga como espessura da chapa dividido por 20, 16 ou 14, para metais macios (aço doce, latão e similares), aço médio e aço duro, respectivamente [22]. Esta última é a maneira ensinada nos SENAI, pelo menos no Rio Grande do Sul, que forma os ferramenteiros que irão trabalhar na indústria de estamparia.

É oportuno mencionar que não foi encontrada na literatura consultada nenhuma alusão à influência da presença ou não de um prendedor de chapas na qualidade do corte. Cita-se o mesmo apenas com a função de extrair a chapa do entorno do punção após o corte ou, muito superficialmente, para evitar o empenamento da chapa. Na determinação da força exercida pelo mesmo costuma-se utilizar como parâmetro a força necessária para a extração da chapa, sendo calculada como um terço da força de corte para a força do prendedor [3, 6, 22].

2.2 Força de Corte

As forças envolvidas no processo de corte, mesmo para chapas finas, são altas, especialmente se materiais com alta resistência mecânica são cortados. A abordagem mais simples e mais utilizada para o cálculo da força de corte é multiplicar a tensão de ruptura ao cisalhamento pela área a ser cisalhada, ou seja:

$$F_c = \tau_c \cdot A_c \quad (1)$$

Onde F_c é a força de corte, τ_c é a tensão de ruptura do material quando submetido a cisalhamento e A_c é a área a ser cisalhada, calculada por:

$$A_c = l_c \cdot e_c \quad (2)$$

Onde l_c é o perímetro ou comprimento da aresta de corte e e_c é a espessura da chapa. A tensão de ruptura ao cisalhamento está geralmente entre 50 e 80 por cento da tensão de ruptura do material, dependendo da liga e da microestrutura. Se a razão entre o diâmetro do punção e a espessura da chapa for maior do que 2 a seguinte relação é suficiente para um cálculo aproximado da tensão de resistência ao cisalhamento:

$$\tau_c = 0,8 \cdot R_m \quad (3)$$

Onde R_m é a tensão de resistência do material. A variação entre a força de corte real e a determinada através desta relação é de mais ou menos 20% [20]. A tabela 2.1 mostra exemplos de cálculo para a máxima força de corte em um corte fechado com diâmetro do punção de 25 mm. A espessura da chapa é de 1 mm.

Tabela 2.1 Exemplos de cálculo da máxima força de corte para um punção de 25 mm de diâmetro e espessura da chapa 1 mm.

Tipo	Material (DIN)	Força de Corte	Resistência do Material (R_m)
Aço Baixo Carbono	Fe P O4 (St14, 1.0338)	≈20,0 kN	270.....350 N/mm ²
Aço Inoxidável	304 S 15 (X5 CrNi 18 10, 1.4301)	≈40,0 kN	550.....750 N/mm ²

3. Desenvolvimento do Trabalho

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados para a realização do trabalho, o que inclui equipamentos desenvolvidos, instrumentação utilizada e o projeto dos experimentos.

3.1 Equipamento Desenvolvido

Um dos objetivos deste trabalho foi projetar e construir um equipamento que permitisse o desenvolvimento de pesquisas sobre o processo. Este deveria possibilitar uma abordagem de engenharia ao processo de corte por cisalhamento permitindo a variação sistemática dos parâmetros mais importantes no fenômeno em questão. A solução encontrada foi projetar uma ferramenta de corte instrumentada utilizando apenas componentes convencionais de ferramentas para estampagem, de forma a aproximar-se o máximo possível a uma ferramenta de produção utilizada na indústria.

A figura 3.1 mostra uma foto da ferramenta construída. Esta possui como estrutura principal uma base de estampo convencional com três placas e duas colunas. As colunas são fixas na placa inferior, tendo as placas intermediária e superior guiadas nos pinos por buchas-guia. As placas são feitas de aço ABNT 1020. Esta estrutura foi usinada para poder abrigar todos os componentes (molas, sensores, etc.) que compõe a ferramenta de ensaio (ver Anexo). O punção é fixo na placa superior e a matriz na placa inferior. A placa intermediária carrega o prendedor de chapas e serve também de guia para o punção. Tanto o punção como a matriz são fixados por meio de sistema de troca rápida com travamento por esfera, o que se adapta perfeitamente à necessidade de se poder realizar ensaios de corte com diferentes configurações de punção e matriz. Com este sistema, mostrado na figura 3.2, garante-se que a condição de alinhamento da ferramenta é sempre a mesma para qualquer ensaio.

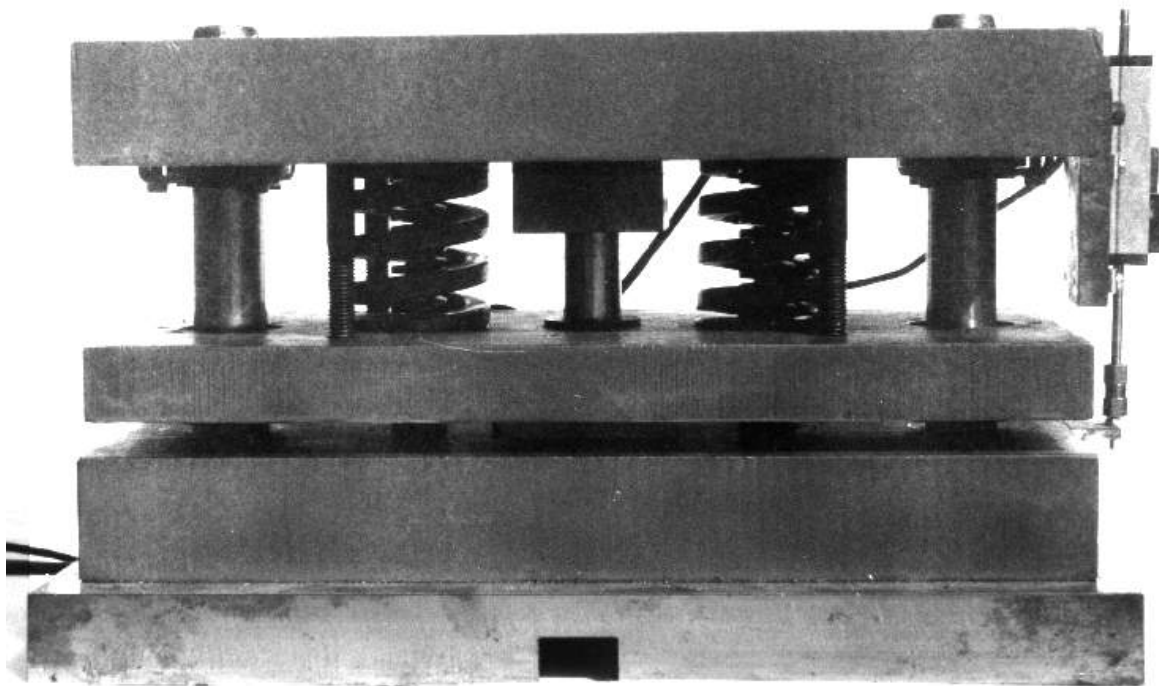


Figura 3.1 Fotografia da ferramenta de corte instrumentada[23].

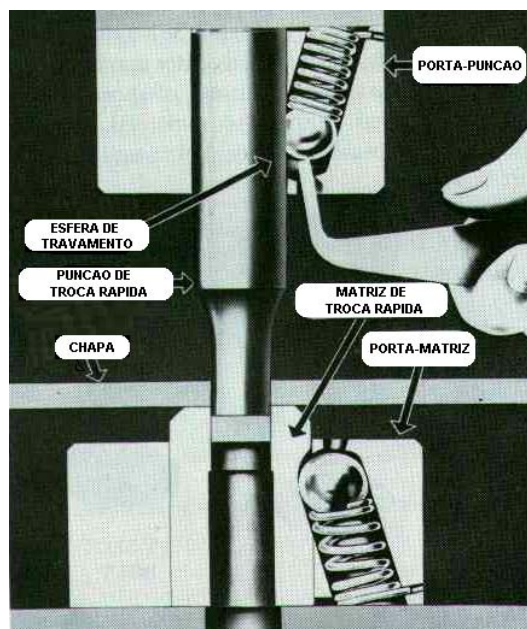


Figura 3.2 Ilustração do sistema de troca rápida de punção e matriz utilizado [3].

O punção utilizado possui 25 mm de diâmetro e é fixado em uma placa equipada com uma esfera de travamento que permite sua troca com facilidade. Isso permite que se substitua o

punção de acordo com o tipo de ensaio, variando o tamanho da folga e simulando situações como desgaste ou quebra do punção. A matriz de corte possui o mesmo sistema de travamento por esfera utilizado no punção. Pode-se também variar facilmente a matriz utilizada de acordo com o corte a ser realizado. A fixação do porta matriz é feito por ajuste deslizante em um furo na placa inferior o que permite sua retirada com facilidade. O sistema de troca rápida funciona nos dois casos de forma a tornar mais prática a substituição dos componentes. Para se substituir o punção ou a matriz, pressiona-se a esfera para baixo, empurrando-a contra uma mola existente que destrava o sistema. A força do prendedor de chapas e a extração do punção são feitos por meio de dois pares de molas helicoidais. O projeto permite variar a força do prendedor de chapas sobre uma ampla faixa de valores e permite a utilização de diversos tipos de molas, como molas de elastômero ou jogos de molas prato.

A ferramenta é completamente independente da prensa não necessitando ser fixada por meio de espigas ou grampos fixadores. A prensa age somente fornecendo força para o processo de corte e para a compressão das molas. Isso diminui a possibilidade de possíveis deflexões nas colunas ou desalinhamento entre punção e matriz causados pela prensa [25]. O retorno da ferramenta ao fim do processo é executado por duas molas helicoidais menores que elevam as partes móveis da ferramenta de volta à posição inicial.

Além do que foi descrito acima a ferramenta foi equipada com sensores instalados no seu interior para captar as informações necessárias ao estudo e/ou à supervisão do processo. Os sensores instalados foram:

- Uma célula de carga que mede a força de corte localizada diretamente sobre o punção;
- Uma célula de carga que mede a força efetuada pelo prendedor de chapas, posicionada sob uma das molas;
- Um sensor de deslocamento, que permite medir o deslocamento do punção durante o processo de corte.

A figura 3.3 mostra uma vista em corte parcial da ferramenta, mostrando os componentes internos e as posições das células de carga. Como mostrado na figura 3.3, as células de

carga foram projetadas para serem inseridas no interior das placas da base de estampo da ferramenta. Suas localizações e dimensões foram definidas pelas regiões onde os esforços a serem medidos são aplicados e pelas dimensões dos componentes que transmitem estes mesmos esforços.

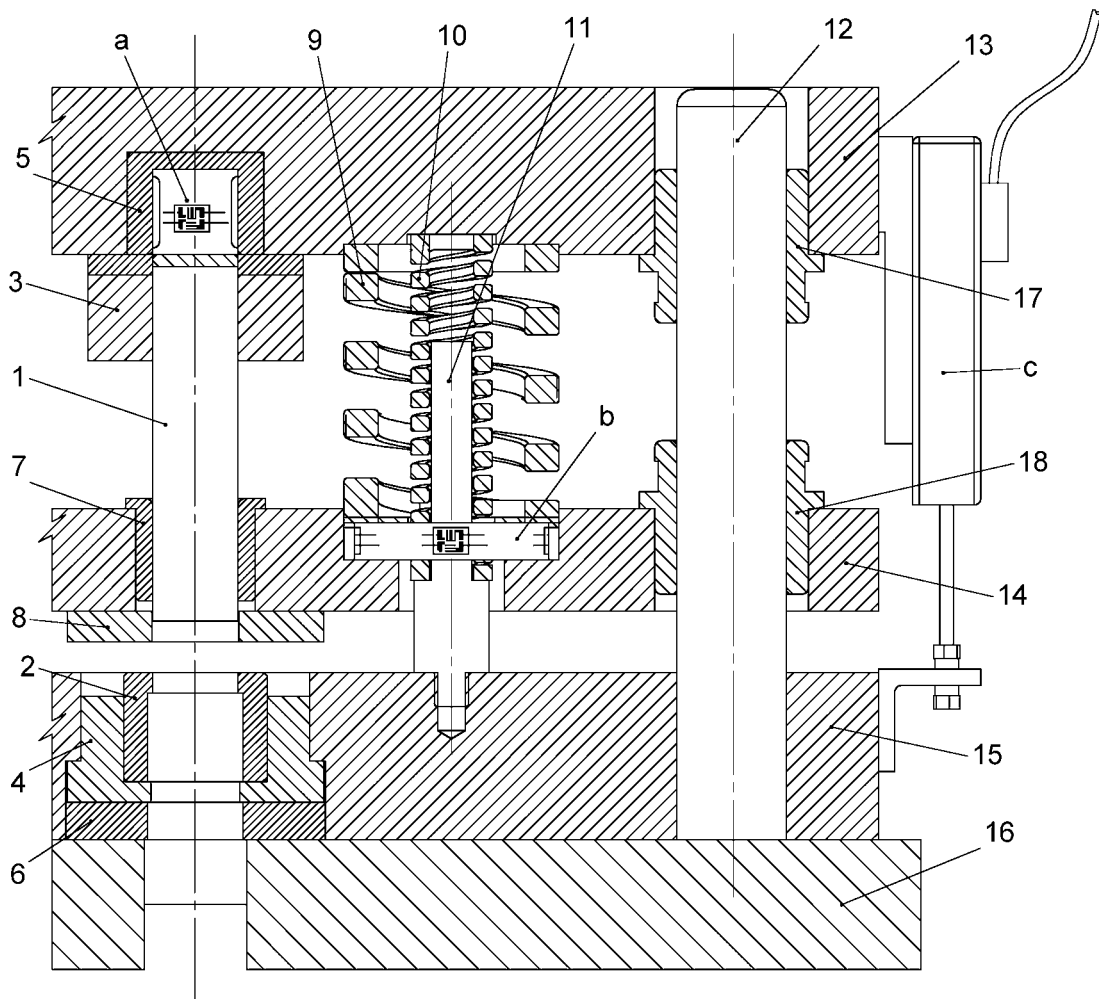


Figura 3.3 Corte parcial através da ferramenta mostrando a localização dos componentes e sensores: a. célula de carga do punção; b. célula de carga do prendedor de chapas; c. sensor de deslocamento; 1. punção; 2. matriz; 3. suporte do punção; 4. suporte da matriz; 5. placa de choque da célula de carga; 6. placa de choque da matriz; 7. bucha guia do punção; 8. prendedor de chapas; 9. mola do prendedor de chapas; 10. mola de retorno; 11. guia da mola de retorno; 12. coluna guia; 13. placa superior; 14. placa intermediária; 15. placa inferior; 16. placa base; 17 e 18. buchas de guia.

As diferentes localizações possíveis dos sensores têm influência na precisão da medição da força de corte. Especialmente em ferramentas com molas ou com mais de um punção, uma medição exata da força não é possível com sensores fixados na estrutura, no excêntrico ou no martelo da prensa (em uma placa entre a placa superior da ferramenta e o martelo). Estas localizações de sensores permitem apenas medições comparativas [15]. Além disso, strain gauges colados diretamente nas partes ativas da ferramenta têm uma desvantagem que impossibilita o uso em ferramentas de produção industrial: eles não podem ser facilmente substituídos. Em caso de quebra é necessário desmontar a ferramenta e colar novos strain gauges. Para obter valores mais exatos em cada parte da ferramenta é necessário utilizar células de carga localizadas o mais próximo possível das partes ativas da ferramenta, isto é, nas regiões onde agem estas forças. Em ferramentas de produção isto significa que a geometria do sensor deve ser compacta, e seu perfil deve ser adaptado à secção do componente ativo da ferramenta [26]. Além disso, é de vital importância a necessidade de redução de custos, evitando a necessidade de componentes especiais, fora de padrão. Portanto, a supervisão de processo utilizando sensores montados dentro das ferramentas, requer projetos especiais e criativos de sensores e de sua localização de forma a permitir não apenas um correto posicionamento dos sensores com relação à força a ser medida, mas também que haja espaço suficiente para os sensores dentro da ferramenta sem a necessidade de aumentar a espessura das placas, o que resulta em aumento de peso e de custo [27].

3.1.1 Descrição dos Sensores

Os principais fatores considerados para o projeto dos sensores de força utilizados foram:

- 1** A resistência do sensor aos esforços envolvidos no processo;
- 2** O formato dos sensores, levando em conta o espaço disponível no interior ferramenta;
- 3** A posição de fixação dos strain-gauges, que depende da natureza do carregamento que atuará sobre o sensor.

Estes três fatores relacionam-se uns com os outros, exigindo uma análise do problema como um todo.

Para o projeto das células de carga foi necessário estimar um valor de força máxima para servir de parâmetro para a utilização da ferramenta e que permita o estudo de um número relativamente abrangente de tipos de chapas metálicas. Este valor foi definido como a força necessária para cortar uma chapa de aço inoxidável austenítico ABNT 304 com espessura de 3 mm. Este aço possui um valor elevado de resistência mecânica e foi escolhido devido a ser amplamente utilizado em estamparia. O valor a tensão de ruptura ao cisalhamento τ_c do aço inox ABNT 304 pode se calculada pela equação (3). De [28] tem-se que a resistência máxima a tração de uma chapa deste aço é $\sigma_m = 600 \text{ N/mm}^2$. Substituindo na equação (3):

$$\tau_c = 480 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

A área cisalhada pode ser obtida pela equação (2). Sendo a seção transversal do punção circular com diâmetro $d = 25 \text{ mm}$ o comprimento da circunferência da aresta de corte vale $l = 78,54 \text{ mm}$. A espessura da chapa $e = 2 \text{ mm}$. Substituindo esses valores na equação (2) obtemos:

$$A = 157,08 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

Substituindo os resultados (4) e (5) na equação (1) obtém-se o valor da força estipulada para o projeto:

$$F \approx 75 \text{ kN} \quad (6)$$

Para a construção das células foram utilizados extensômetros de resistência elétrica (*strain gauges*) fabricados pela empresa Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), da Alemanha, do tipo roseta com dois elementos de medição (grades) a noventa graus, código XY 91 – tipo 1. Em cada célula foram instaladas duas rosetas situadas em posição central e diametralmente opostas uma a outra, ligadas em um circuito tipo *Ponte de Wheatstone*. Foi utilizada ligação em ponte completa. Segundo [29], esta é o melhor escolha para a medição de força normal pois oferece compensação de temperatura e flexão e os efeitos de

interferência devido às ligações são altamente suprimidas. As duas células de carga utilizadas na ferramenta estarão sujeitas a compressão no momento do ensaio. Foi considerado um estado de carregamento uniaxial, com os esforços aplicados homogeneamente ao longo da seção transversal. Nestas condições, temos que [30]:

$$\sigma_1 = \sigma \quad e \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (6)$$

Onde σ é a tensão decorrente da força de corte; σ_1 é a tensão na direção da aplicação da força; σ_2 e σ_3 são as tensões nas duas direções ortogonais a σ_1 .

A deformação do corpo da célula no sentido do eixo de aplicação da força pode ser calculada por:

$$\varepsilon = (E.A)^{-1}.F \quad (7)$$

Onde ε é a deformação relativa decorrente de σ , E é o Módulo de Elasticidade do material, A é a área da seção transversal da célula e F é a força de corte. Fazendo uso destas equações pode-se então dimensionar as células, como segue.

3.1.1.1 Sensor de Força do Punção

O dimensionamento da célula de carga do punção foi feito levando-se em consideração o diâmetro do punção e um valor de força de corte que permitisse o estudo de um número relativamente abrangente de tipos de materiais de chapas. A figura 3.4 mostra o formato e as dimensões da célula de carga do punção. Este foi dimensionado para transmitir toda a força de corte através de sua seção e foi posicionado na ferramenta diretamente acima do punção de corte.

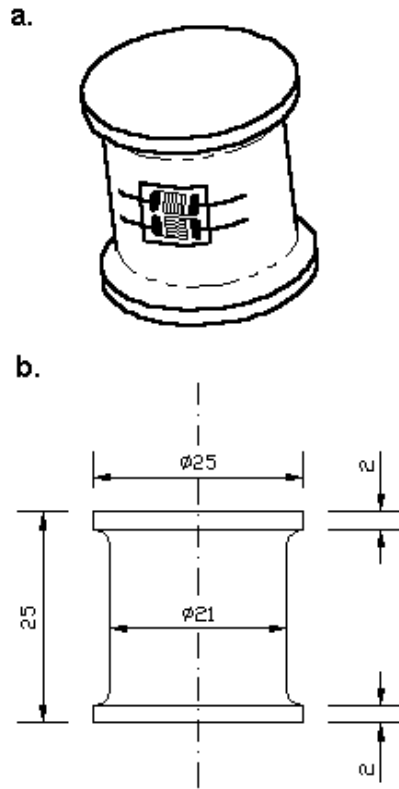


Figura 3.4 a. Vista em perspectiva da célula de carga do punção. b. Dimensões.

O material escolhido para a célula de carga foi um aço ferramenta ABNT D6, temperado. Este aço é muito utilizado na confecção de matrizes para corte, estampagem, forjamento, entre outros. Possui características como indeformabilidade, alta dureza de têmpera e resistência ao desgaste.

Para determinar o diâmetro da célula partiu-se do diâmetro do punção. Foram descontados 2 mm de cada lado para poder conter os strain gauges e ligações, ficando então 21 mm de diâmetro, como pode ser visto na figura 3.5. Para calcular a força de corte máxima para a célula foi utilizada a equação (7), isolando o termo F :

$$F = \varepsilon.E.A \quad (8)$$

A área da seção transversal foi calculada por:

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \quad (9)$$

Onde d é o diâmetro da célula.

Foi necessário estimar um valor para a deformação ε devido à característica de indeformabilidade (fragilidade) do aço utilizado para a confecção da célula, o que torna difícil a determinação do valor exato do limite de escoamento. Foi considerado como valor da tensão de escoamento aquela que, levada à origem do gráfico do ensaio de tração por uma reta paralela ao trecho elástico linear, provoca uma deformação permanente de 0,2% [31]. Para obter uma boa margem de segurança, trabalhou-se com a metade deste valor, ou seja, $\varepsilon = 0,1\%$. Sendo o valor do diâmetro $d = 21 \text{ mm}$ e substituindo em (9) tem-se que a área $A = 346,36 \text{ mm}^2$. Tomando $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ e $\varepsilon = 0,1\%$ e substituindo esses valores na equação (8) temos o valor da força máxima que pode ser aplicada à célula:

$$F = 73 \text{ kN} \quad (11)$$

Este valor está na mesma ordem de grandeza da força de projeto estipulada em (6) portanto foi considerada suficiente.

Foi necessário também avaliar se a deformação que a célula sofrerá no momento do corte não deformará o sensor. Segundo o fabricante, estes strain gauges resistem a uma alongação máxima em torno de 5%. Sendo o valor do comprimento da célula $c = 25 \text{ mm}$, para uma deformação relativa de 0,1% tem-se, multiplicando o comprimento pela deformação, que a célula sofre uma deformação absoluta de 0,025 mm. Sabendo que o comprimento da grade do *strain gauge* mede 3 mm, a deformação sofrida pelo mesmo é de 0,83%, o que fica bem abaixo do limite de 5%. Além disso, o fato de que toda a força de corte é transmitida pelo sensor para a base de estampo requer a utilização de uma placa de choque, diminuindo assim o desgaste causado pelo trabalho repetitivo da ferramenta. Esta placa de choque possui o formato de um copo, como mostrado na figura 3.3-5.

3.1.1.2 Sensor de Força do Prendedor de Chapas

A medição da força exercida pelo prensa-chapas sobre a chapa é feita através de uma célula de carga em formato de anel, mostrada na figura 3.5, localizada em um rebaixo usinado na placa intermediária, sendo que uma das molas do prensa-chapas fica diretamente apoiada sobre a mesma. A escolha do formato de anel se deveu a fatores construtivos, principalmente quanto à espessura da placa intermediária. O material utilizado foi um aço ferramenta ABNT D6. A força que atua no prensa chapa provém da compressão das duas molas existentes entre as placas superior e intermediária (figura 3.3-9). Como a célula de carga está localizada sob uma destas molas, a mesma medirá a metade do esforço exercido pelo prendedor no momento do corte.

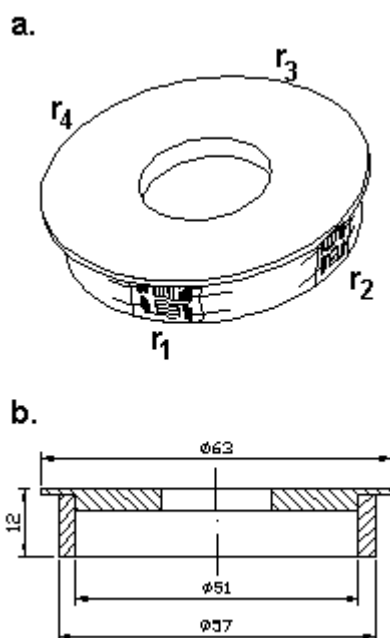


Figura 3.5 a. Vista em perspectiva da célula de carga do prensa chapas. $r_{1...4}$ strain gauges. b. Dimensões.

O cálculo da força máxima foi feito de forma semelhante à utilizada para calcular a força na célula do punção, utilizando os mesmos valores para E e ε . A área da seção transversal do anel é obtida através da equação:

$$A = \pi/4 \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \quad (12)$$

Onde D_{ext} é o diâmetro externo da célula e D_{int} é o diâmetro interno. Substituindo $D_{ext} = 57 \text{ mm}$ e $D_{int} = 47 \text{ mm}$ em (11) temos que:

$$A = 816,8 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Colocando $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ e $\varepsilon = 0,001$ na equação (9), temos o valor da força:

$$F = 171,5 \text{ kN} \quad (15)$$

A mola do prensa chapas atua diretamente sobre o sensor. Sua altura é limitada pela espessura da placa intermediária. Isto causou problemas na calibração devido a pequena relação altura / diâmetro e ao número de strain gauges utilizados. A princípio foram colados dois extensômetros a 180° , mas este número precisou ser aumentado para quatro a 90° , devido a problemas na calibração. O uso de molas helicoidais causou uma má distribuição da força transmitida sobre o sensor durante a compressão das molas. Este fenômeno ocorreu devido às seguintes razões:

- 1- A mola precisa de uma força inicial de compressão para se posicionar no rebaixo, portanto, a distribuição da força sobre o sensor não é constante do estado de distensão até o estado de compressão durante a medição;
- 2- O grande diâmetro da mola, que potencializou o efeito descrito acima.

Como consequência, a curva de calibração do sensor mostrou uma forte não linearidade, tornando-o incapaz de ser utilizado. Para confirmar os motivos descritos acima, foram realizadas medições utilizando um cilindro sólido em lugar da mola para obter uma distribuição de forças constante sobre o sensor. Além disso, foi analisada a influência de se rodar a mola em relação a uma marca efetuada na placa da ferramenta, a fim de encontrar uma posição mais favorável. Estes resultados são mostrados na figura 3.6. Para eliminar essa não linearidade a célula foi redimensionada, sendo dividida em duas partes. A espessura da parede do anel foi reduzida para aumentar a sensibilidade e mais dois strain gauges foram fixados a 90° um com o outro para reduzir a influência de cargas excêntricas. A figura 3.7 mostra a célula após as modificações.

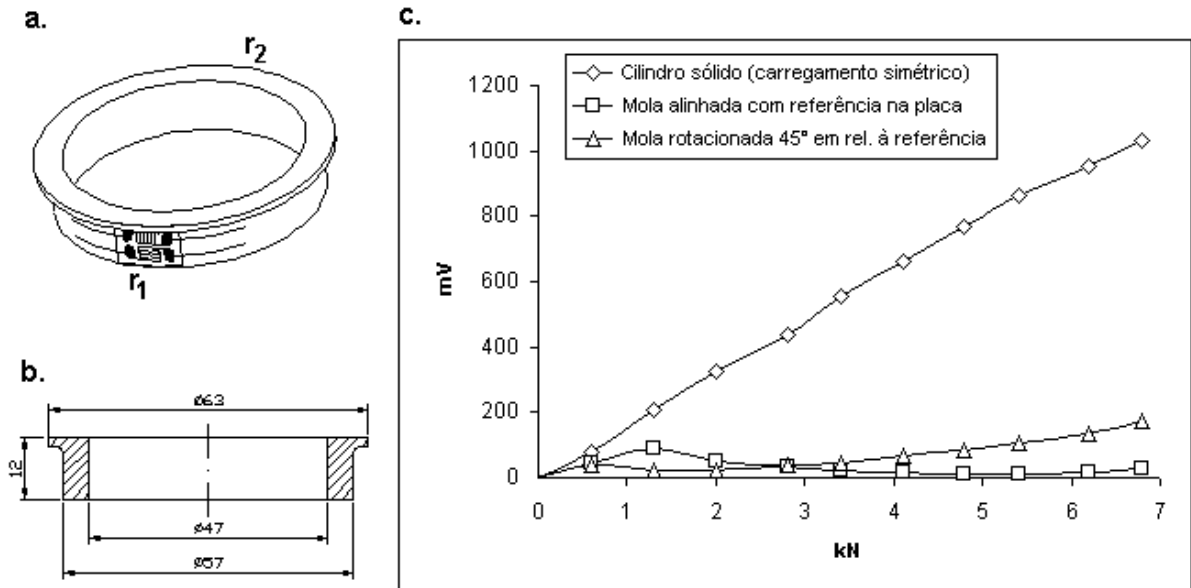


Figura 3.6 a. Posiç3o de aplicaç3o dos strain gauges. b. Dimens3es da c3elula de carga. c. Diagrama do sinal (mV) vs. forç3a aplicada (kN) para carregamento sim3etrico e duas posiç3es da mola sobre o sensor.

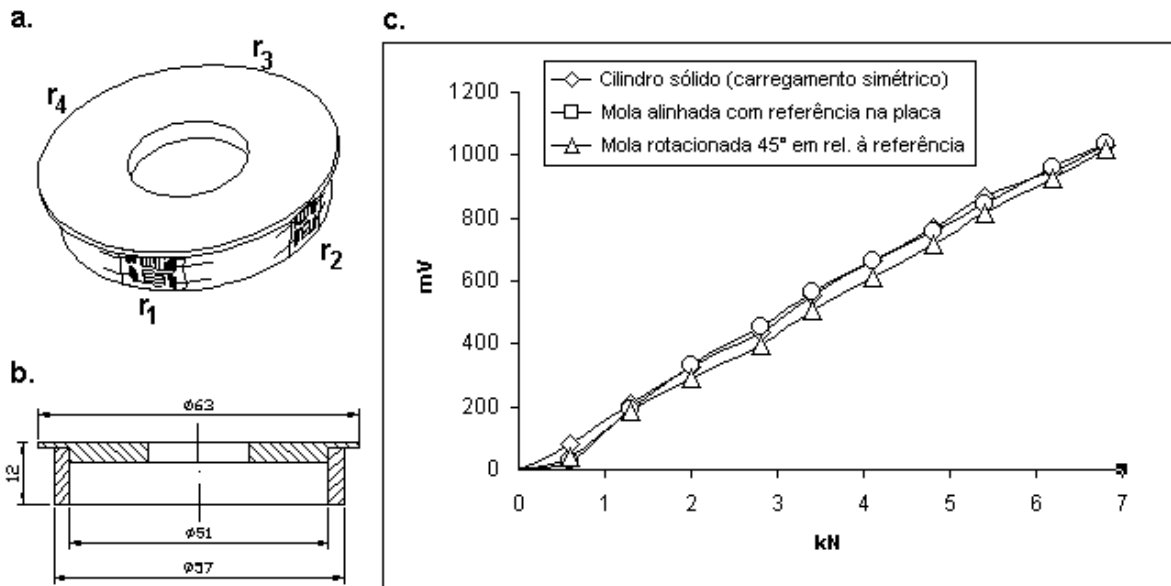


Figura 3.7 a. Posiç3es de aplicaç3o dos strain gauges. b. Dimens3es da nova c3elula de carga. c. Diagrama do sinal (mV) vs. forç3a aplicada (kN) para carregamento sim3etrico e duas posiç3es da mola, ap3s as modificaç3es.

A figura 3.7-c mostra que o sensor tem uma resposta linear praticamente independentemente da posiç3o da mola.

3.1.1.3 Sensor de Deslocamento

A ferramenta foi equipada com um sensor de deslocamento resistivo posicionado externamente, ao lado (vide figura 3.3-d). O sensor foi fabricado pela empresa Novotechnik, código T50, e possui um curso de 50 mm (ver figura 3.8). Este mede o movimento relativo entre o punção e a matriz, pois têm a extremidade da haste fixada à base da ferramenta, enquanto a parte superior movimenta-se junto com a placa superior durante o processo.

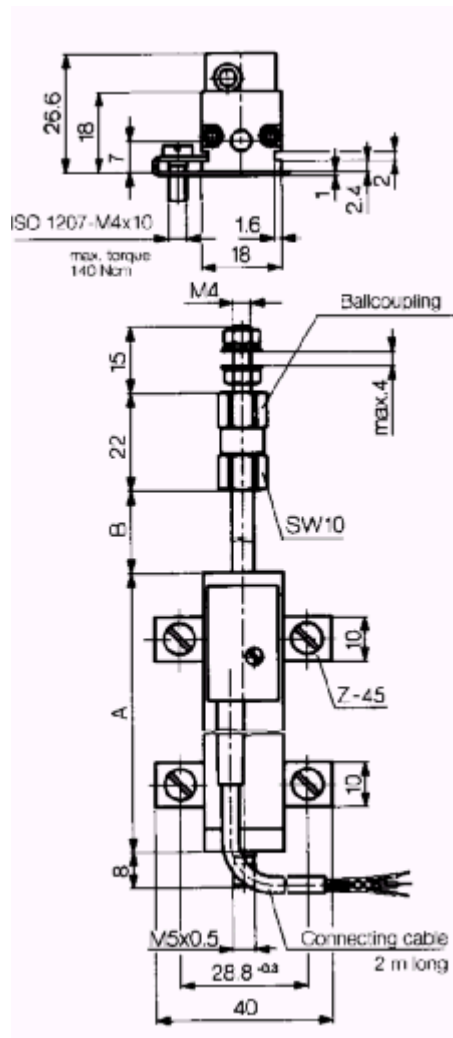


Figura 3.8 Diagrama esquemático do sensor de deslocamento. Fonte: Novotechnik Transducers

3.2 Instrumentação Utilizada

O sistema de supervisão de processos é mostrado na figura 3.9. Este permite o registro e a supervisão de até cinco canais de força, os quais podem ser representados em diagramas força vs. tempo e força vs. deslocamento. O sistema consiste em uma central microprocessada de fácil operação que acomoda amplificadores e conversores analógico-digitais. Seu painel frontal é ocupado por um visor e algumas teclas de controle. O painel traseiro contém os conectores para ligação dos sensores, saída para impressora e uma saída que permite desligar a prensa no caso da detecção de algum problema no processo corrente. Todas as entradas ao sistema são feitas através de uma interface gráfica de fácil utilização. Sua operação é baseada em oito teclas localizadas abaixo do visor.

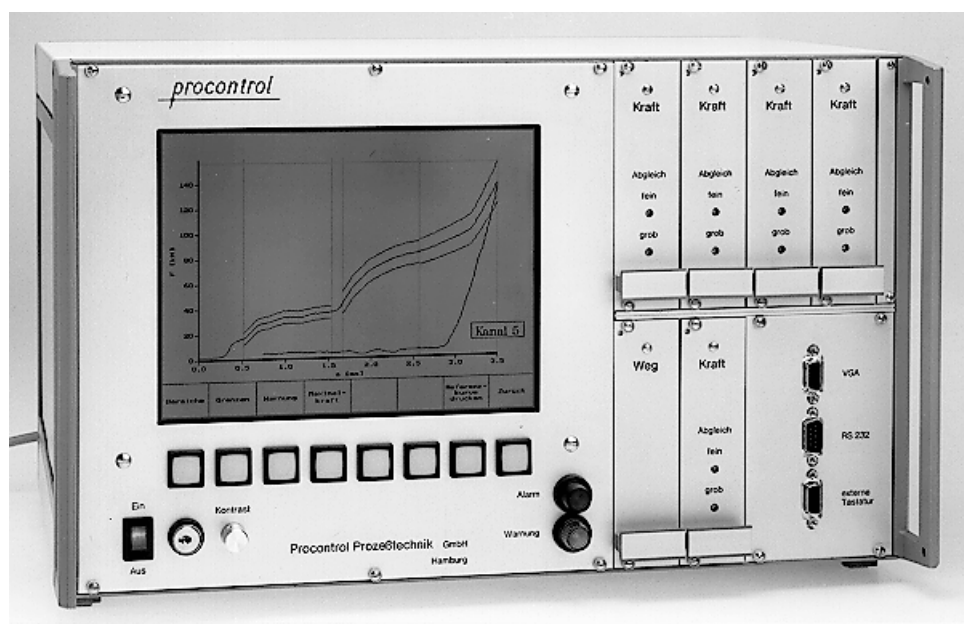


Figura 3.9 Vista do sistema PROCONTROL, usado neste trabalho para a supervisão do processo de corte [6].

A supervisão é baseada no fato de que diferenças no processo que resultam em diferenças na qualidade do produto podem ser observadas em uma curva força vs. deslocamento, também chamada curva característica do processo. O perfeito funcionamento de sistemas deste tipo depende da reprodutibilidade do processo [31].

3.3 Teste do Sistema

Para avaliar a ferramenta foram realizados ensaios de corte com quatro tipos de punções. Os ensaios tiveram como objetivo analisar a influência da folga entre punção e matriz e do desgaste na força exercida pelo punção e na qualidade da superfície cortada, portanto apenas o sinal da célula de carga do punção foi adquirido. O início da medição é disparado por um gatilho (*trigger*) no sensor de deslocamento.

Foram utilizados quatro punções com 25 mm de diâmetro usinados de acordo com a folga desejada. O material utilizado nos ensaios foi tiras de aço baixo carbono com 1 mm de espessura. A usinagem dos punções foi feita tendo como base a espessura da chapa. A literatura recomenda para este tipo de chapa uma folga de 0,05 ou 5% da espessura da chapa [34]. Para fins de comparação dos resultados e como o objetivo é avaliar a capacidade da ferramenta captar as alterações quando da mudança dos parâmetros do processo os punções foram usinados de forma a determinarem folgas de 5%, 10% e 20% da espessura da chapa. No quarto punção foi inserido artificialmente um perfil de desgaste conforme a figura 3.10. Este ensaio teve como objetivo avaliar as alterações causadas pelo desgaste na força de corte e na qualidade do corte. Um aspecto de desgaste semelhante é gerado em condições reais pelo atrito entre a lateral do punção e o material da chapa no momento da retirada e ainda pelo atrito entre a face frontal do punção e a superfície da chapa no momento do corte [5]. Na tabela 3.1 podem ser vistas as dimensões dos punções e folgas utilizados nos ensaios. A figura 3.11 mostra o aspecto da aresta cortada com uma folga de 5%. Nota-se nesta figura três características importantes de uma peça cisalhada. De cima para baixo, o arredondamento, a parte cisalhada e a parte fraturada.

O diagrama força vs. tempo da figura 3.12 mostra o resultado dos ensaios. As curvas apresentam claramente todas as etapas do corte: etapa de deformação elástica, etapa de escoamento e de ruptura. Pode-se notar claramente a influência da folga na força máxima, comprovando o que afirma a literatura sobre o assunto.

Tabela 3.1 Dimensões dos punções utilizados. D_m – diâmetro da matriz, d_p – diâmetro do punção, f – folga unilateral.

Punção	D_m	d_p	f	chanfro
1	25,00	24,90	0,05	-
2	25,00	24,80	0,10	-
3	25,00	24,60	0,20	-
4	25,00	25,90	0,05	0,5 x 45°

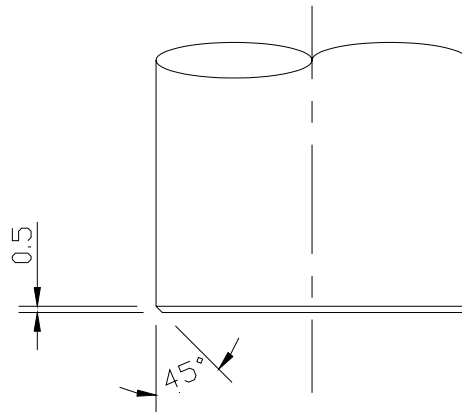


Figura 3.10 Chanfro aplicado a um dos punções para simular uma situação de desgaste.

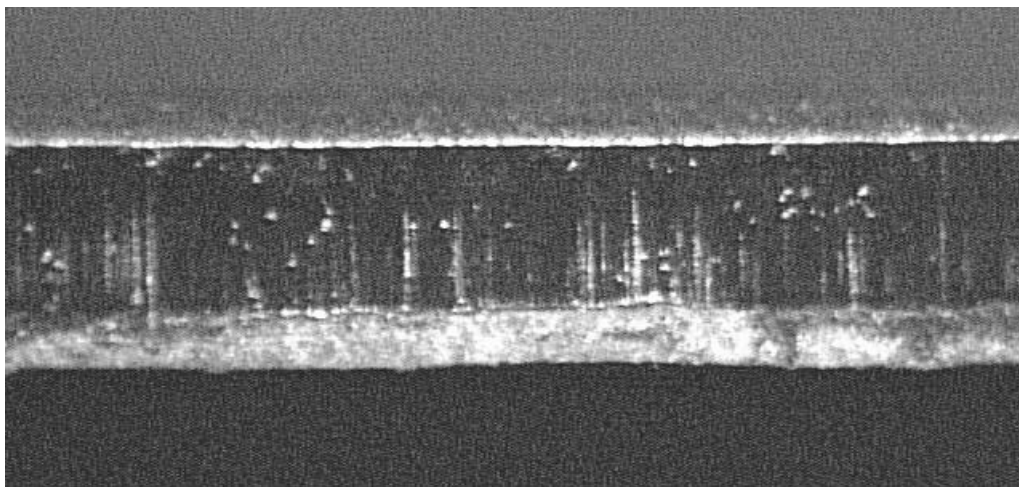


Figura 3.11 Aspecto da aresta cortada de uma chapa de aço baixo carbono com espessura de 1 mm e folga entre punção e matriz de 5%.

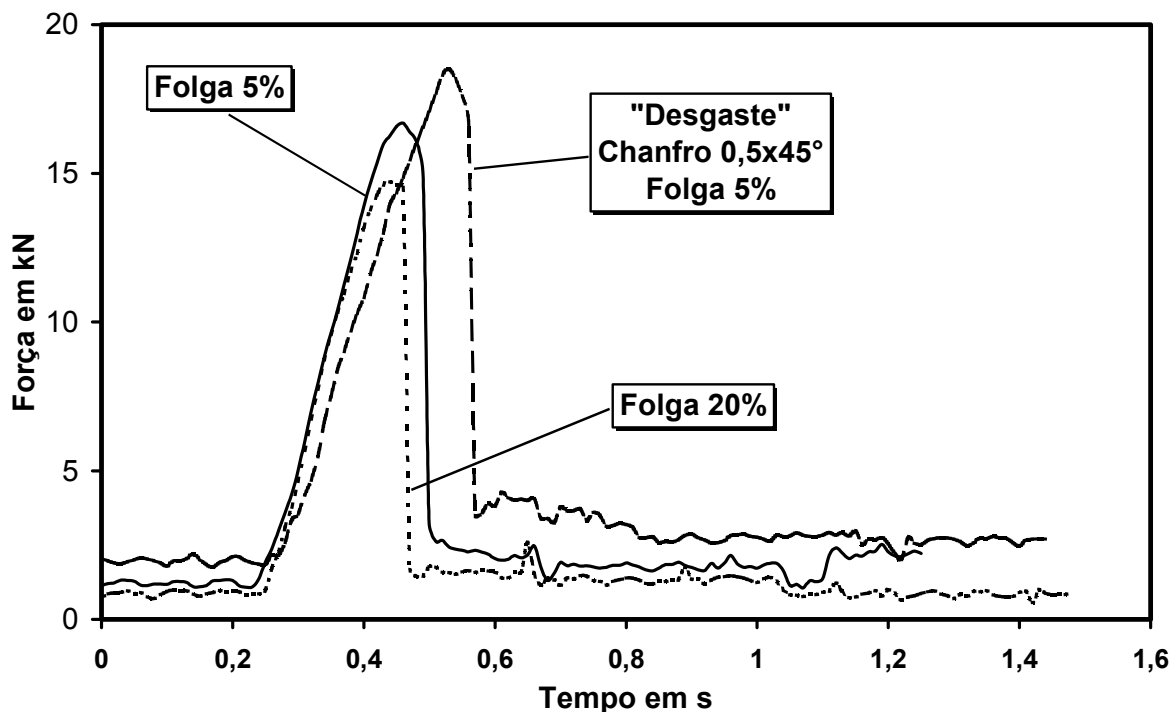


Figura 3.12 Diagrama de força de corte vs. tempo dos ensaios.

Na figura 3.13 é mostrado o aspecto da aresta cortada utilizando o punção com folga de 20% da espessura da chapa. Nota-se a grande diferença em relação ao tamanho da parte fraturada e o pequeno tamanho da parte cisalhada. É possível visualizar também duas rachaduras na parte fraturada, causadas provavelmente por fratura secundária, comum quando da utilização de folga excessiva.

Comparando-se o aspecto das arestas cortadas e as curvas força vs. tempo para as folgas de 5% e 20%, pode-se explicar a diferença existente no valor da força máxima para o corte. O maior tamanho da parte fraturada no corte com folga de 20% sugere que a trinca inicial ocorreu antes do que com a folga de 5%, atingindo assim uma força máxima menor.

A curva força vs. tempo para o punção artificialmente desgastado apresentou um formato diferente das outras, pois se comportou quase como um embutimento profundo, havendo uma fase de escoamento com elevação da força antes da etapa de corte propriamente dita. Isto se comprova com a análise do aspecto da parte cortada na figura 3.14, que mostra a

grande rebarba resultante do corte com o punção artificialmente desgastado. A presença do chanfro neste caso fez com que o material se deformasse sem diminuição da área cisalhada, causando uma considerável elevação na força de corte.

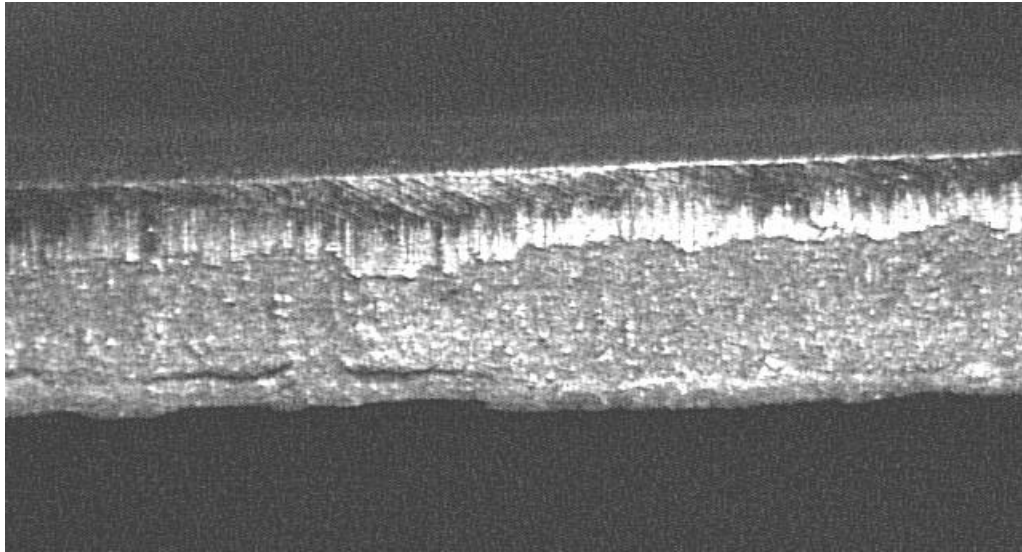


Figura 3.13 *Aspecto da aresta cortada de uma chapa de aço inox 304 com espessura de 1 mm e folga entre punção e matriz de 20%.*

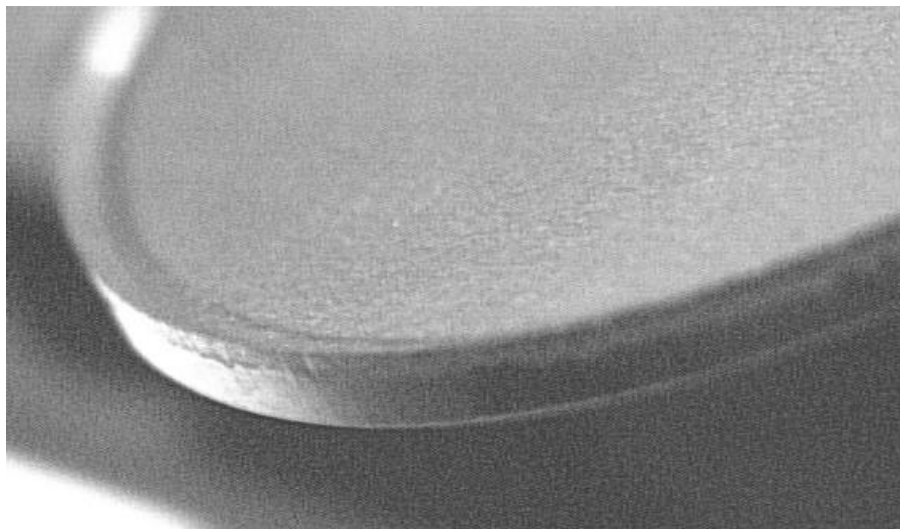


Figura 3.14 *Peça cortada com o punção onde foi simulado desgaste, mostrando a grande rebarba resultante.*

3.4 Planejamento dos Experimentos

Buscando obter uma maior eficiência em termos de informações na realização dos experimentos, utilizou-se um método capaz de permitir uma análise criteriosa dos resultados ao invés da pura realização de uma seqüência não estruturada de ensaios. A realização de um planejamento de experimentos otimiza a quantidade de informação e os resultados são confiáveis. Uma das vantagens é que o efeito dos fatores não controláveis (erro experimental) é minimizado e quantificado. Outra, é a redução, em geral considerável, do trabalho experimental [33]. O planejamento dos experimentos foi utilizado para a realização de uma seqüência sistemática de ensaios com a ferramenta. O objetivo foi variar alguns parâmetros do processo e observar o efeito destas variações nas características de qualidade ou eficiência do processo. Podemos citar como características de qualidade aspectos dimensionais da aresta cortada (conforme figura 2.3) ou a força necessária para o corte. No caso específico deste trabalho foi avaliada apenas a força máxima de corte necessária para realizar o processo. De acordo com a terminologia comumente utilizada na teoria de planejamento de experimentos, a seguir são descritas algumas informações importantes para o entendimento da forma de abordagem do problema.

Características de qualidade: o cliente, neste caso a indústria de estampagem de chapas, busca sempre a melhoria da qualidade e a redução dos custos de fabricação. Para o corte por cisalhamento, considerando os aspectos dimensionais, o ideal é obter uma região cortada completamente lisa e sem rebarbas. Como isto é impossível com apenas uma etapa de corte, procura-se então maximizar a região plana do corte, minimizar a região fraturada, a rebarba e o arredondamento. A força de corte é um fator importante, já que tem influência no desgaste das partes ativas da ferramenta, na energia necessária para o processo e na disponibilidade de prensas. Outros processos que produzem uma melhor qualidade final da peça cortada, como o corte fino, ou operações posteriores de rebarbamento requerem mais investimentos com ferramental e prensas, ou aumentam o tempo de fabricação.

Variáveis de resposta: são as formas de se quantificar as características de qualidade. A seguir são descritos alguns exemplos. Considerando os aspectos dimensionais, podemos listar:

- altura da zona arredondada;
- altura da zona cisalhada;
- altura da zona fraturada;
- altura da rebarba;
- altura do empenamento.

Considerando aspectos microestruturais:

- mudanças na microestrutura decorrentes no processo;
- influencia do processo em chapas revestidas ou com algum tipo de proteção superficial.

Considerando aspectos relacionados à ferramenta:

- a força necessária para o processo e também o comportamento desta no tempo ou em relação ao deslocamento do punção;
- o formato da curva força vs. tempo ou força vs. deslocamento, como forma de supervisionar o processo.

Parâmetros do processo: são as variáveis que podem ser alteradas e que talvez tenham um efeito sobre as variáveis de resposta. Com o equipamento desenvolvido neste trabalho é possível variar diversos parâmetros do processo de corte. Em relação à ferramenta, pode-se citar:

- folga punção-matriz;
- formato da linha de corte (corte fechado);
- perfil de corte do punção;
- força exercida pelo prendedor de chapas;
- folga entre prendedor de chapas e punção;
- punções e matrizes feitos de materiais ou com revestimentos especiais resistentes ao desgaste e a trincas, por exemplo.

Em relação à chapa a ser cortada:

- diferentes materiais de chapas, metálicos ou não;

- materiais com diferentes espessuras;
- materiais com diferentes texturas ou revestimentos.

Em relação às condições do processo:

- lubrificantes;
- velocidade de corte;

Fatores controláveis: são um subconjunto dos parâmetros do processo; são aqueles parâmetros do processo que foram eleitos para serem estudados a vários níveis no experimento. No experimento realizado no presente trabalho, os fatores controláveis são:

- Material da chapa, com três níveis: foram escolhidos três tipos de materiais com diferentes valores de resistência à tração. O objetivo foi observar a influência da resistência à tração na força de corte. Os materiais e seus valores de resistência podem ser vistos na tabela 3.2. Os três materiais selecionados são amplamente utilizados nas indústrias de estampagem.

Tabela 3.2 Tipos de chapas utilizadas.

Tipo	Material	Resistência do Material
Alumínio	ABNT 1200	110...130 N/mm ²
Aço Baixo Carbono	NBR 5007 G3 RL	310...340 N/mm ²
Aço Inoxidável	ABNT 304 L	530.....570 N/mm ²

- Folga punção x matriz, com dois níveis: foram usinados dois punções, um com folga de 5% e outro com 10% da espessura da chapa, conforme a tabela 3.3.

Tabela 3.3 Dimensões dos punções utilizados. D_m – diâmetro da matriz, d_p – diâmetro do punção, f – folga unilateral.

Punção	D_m	d_p	f
1	25,00	24,90	0,05 (5%)
2	25,00	24,80	0,10 (10%)

- c) Folga punção x prendedor, com dois níveis: foram usinados dois prendedores de chapas, um com folga de 1 mm (unilateral) e outro ajustado ao punção (ver tabela 3.4).

Tabela 3.4 Dimensões dos prendedores utilizados. D_f – diâmetro do furo, f_p – folga unilateral.

Prendedor	D_f	f_p
1	27,00	1 mm
2	25,00	H7

- d) Força do prendedor de chapas, com dois níveis: foram utilizados dois tipos de molas no prendedor de chapas, ambas de elastômero (tipo Plastiprene) com diferentes durezas conforme a tabela 3.5. Como o sensor do prendedor mede a força de uma mola apenas, o resultado precisa ser multiplicado por dois para obter a força total.

Tabela 3.5 Molas utilizadas. Sh – dureza Shore, f_{pc} – força do prendedor, F_{Tpc} – força total.

Mola	Sh	f_{pc}	F_{Tpc}
1	60 (amarela)	0,4 kN	0,8 kN
2	90 (verde)	1,4 kN	2,8 kN

Fatores constantes: são os parâmetros do processo que não entram no experimento e que são mantidos constantes durante o experimento:

- formato da linha de corte: foram utilizados punções circulares com diâmetro nominal de 25 mm, usinados de acordo com a folga desejada (retífica circular).
- perfil de corte do punção: a aresta de corte do punção atinge o material da chapa de uma só vez, ou seja, o ângulo de inclinação da aresta de corte é 0° .

- material de punções e matrizes: foram fabricados em aço ABNT D6 temperados e revenidos, com uma dureza de 56-58 HRc, conforme o catálogo da empresa Steinel.
- espessura do material: foram cortadas chapas de 1 mm de espessura;
- lubrificante: todos os ensaios foram realizados sem a utilização de qualquer lubrificação.
- velocidade de corte: todos os ensaios foram realizados a uma velocidade média do punção de 15 mm/s.
- prensa utilizada: os ensaios foram realizados em uma prensa excêntrica fabricada pela empresa Walviwag com capacidade de 45 toneladas e frequência de 60 batidas por minuto.

Fatores não controláveis: variáveis que não podem ser controladas pela equipe técnica. São responsáveis pelo erro experimental (variabilidade). Podemos citar como prováveis fontes de erro:

- variações devido à tolerância dimensional da espessura das chapas. A tolerância do fabricante varia entre $\pm 0,04$ e $\pm 0,08$ mm.
- A influência do ruído ambiental no sinal adquirido. Procurou-se minimizar esta fonte de erro realizando um bom aterramento do equipamento de medição.

3.4.1 Modelo Estatístico

O modelo estatístico escolhido para o experimento foi um projeto fatorial com 4 fatores, conforme mostra a tabela 3.6. Foram feitas 4 repetições de cada ensaios, o que totalizou 96 medições com a ferramenta.

A partir daí construiu-se a matriz dos experimentos em Excel, como mostra a figura 3.15, de forma a poder-se preencher os valores dos resultados obtidos nos ensaios e automatizar os cálculos. Como não é o objetivo deste trabalho, será omitido o formulário utilizado para

a análise de variância. As fórmulas estão disponíveis em qualquer livro sobre planejamento de experimentos, como em [30].

Tabela 3.6 Fatores e níveis do experimento.

Fator	Nº de níveis	Níveis	Unidade
Resistência do Material	3	120	N/mm ²
		320	
		550	
Folga punção x matriz	2	0,05	mm
		0,10	
Folga punção x prendedor	2	1	mm
		0	
Força do prendedor	2	0,8	kN
		2,8	

PROJETO FATORIAL COM 4 FATORES

FATOR A(i): Material Nº de Níveis: 3 Nível 1: Alumínio; Nível 2: Aço C; Nível 3: Aço Inox.
 FATOR B(j): Folga Punção x Matriz Nº de Níveis: 2 Nível 1: 5%; Nível 2: 10%
 FATOR C(k): Folga Punção x Prendedor Nº de Níveis: 2 Nível 1: 1 mm; Nível 2: 0 mm
 FATOR D(l): Força do Prendedor Nº de Níveis: 2 Nível 1: 0,8 kN; Nível 2: 2800 kN
 Nº de Repetições: 4

	FOLGA PUNÇÃO x MATRIZ 1				FOLGA PUNÇÃO x MATRIZ 2				Ti...											
	FOLGA PUNÇÃO x PRENDEDOR 1		FOLGA PUNÇÃO x PRENDEDOR 2		FOLGA PUNÇÃO x PRENDEDOR 1		FOLGA PUNÇÃO x PRENDEDOR 2													
	FORÇA PREND.1	FORÇA PREND.2	FORÇA PREND.1	FORÇA PREND.2	FORÇA PREND.1	FORÇA PREND.2	FORÇA PREND.1	FORÇA PREND.2												
Alumínio																				
Aço C																				
Aço Inox																				
T...																				
T...k																				
T..j..																				
TOTAL																				

Figura 3.15 Matriz dos experimentos. Esta tabela foi preenchida com os resultados dos ensaios e a partir dela foi feita a análise de variância.

4. Resultados

Os ensaios foram realizados de acordo com o planejamento apresentado no capítulo 3. Os sinais adquiridos ficaram armazenados no disco rígido do sistema Procontrol para serem posteriormente analisados. A figura 4.1 mostra um exemplo de curva obtida.

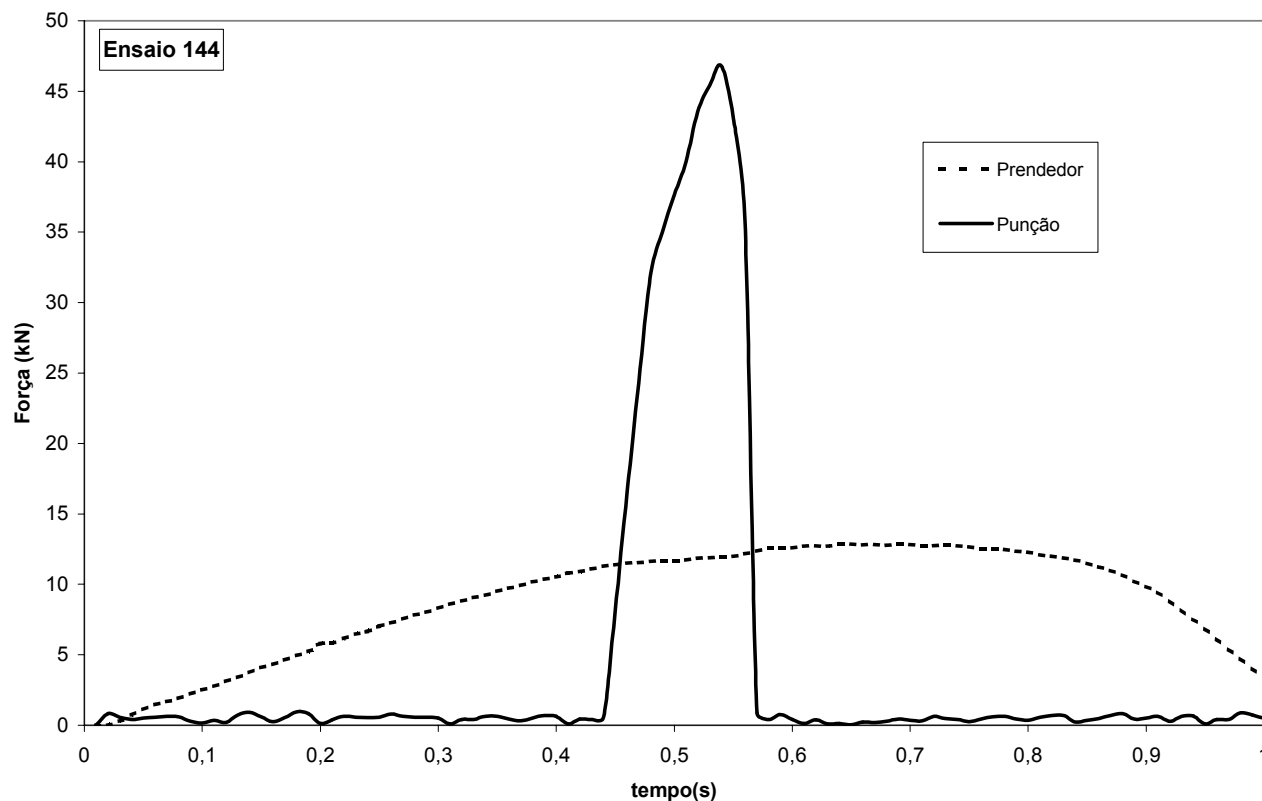


Figura 4.1 Curva força x tempo mostrando o comportamento da força de corte (linha contínua) e da força do prendedor (linha tracejada).

De gráficos como o da figura 4.1 foram extraídos a força máxima de corte e a força máxima do prendedor. Na tabela 4.1 estão distribuídos os resultados dos experimentos. A partir dos valores digitados nas células da planilha os resultados dos cálculos foram feitos automaticamente e os resultados podem ser vistos nas tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 Resultados distribuídos na matriz dos experimentos.

PROJETO FATORIAL COM 4 FATORES

FATOR A(i): Material	Nº de Níveis:	3	Nível 1: Alumínio; Nível 2: Aço C; Nível 3: Aço Inox.
FATOR B(j): Folga PunçãoxMatriz	Nº de Níveis:	2	Nível 1: 5%; Nível 2: 10%
FATOR C(k): Folga PunçãoxPrendedor	Nº de Níveis:	2	Nível 1: 1mm; Nível 2: 0,05 mm
FATOR D(l): Força do Prendedor	Nº de Níveis:	2	Nível 1: 400 kgf; Nível 2: 1400 Kgf
	Nº de Repetições:	4	

	FOLGA PUNÇÃO xMATRIZ 1								FOLGA PUNÇÃO xMATRIZ 2								Ti...
	FOLGA PUNÇÃOxPRENDEDOR 1				FOLGA PUNÇÃOxPRENDEDOR 2				FOLGA PUNÇÃOxPRENDEDOR 1				FOLGA PUNÇÃOxPRENDEDOR 2				
	FORÇA PREND.1		FORÇA PREND.2		FORÇA PREND.1		FORÇA PREND.2		FORÇA PREND.1		FORÇA PREND.2		FORÇA PREND.1		FORÇA PREND.2		
Alumínio	9,251	9,516	9,221	9,266	8,856	8,974	8,65	8,946	6,532	6,797	7,768	7,944	7,562	7,209	7,415	7,621	
	9,56	9,442	9,133	9,059	9,151	8,856	8,474	8,533	6,473	6,473	7,856	7,85	7,15	7,062	7,473	7,326	
	37,769	9,44225	36,679	9,16975	35,837	8,95925	34,602	8,6505	26,275	6,56875	31,218	7,8045	28,983	7,24575	29,835	7,45875	261,2
Aço C	28,091	28,209	28,018	28,239	26,981	27,716	27,864	28,275	25,569	26,098	27,363	27,746	26,745	27,04	27,658	28,011	
	28,504	28,592	28,312	28,032	27,864	27,805	28,246	28,57	26,363	25,833	27,422	27,246	26,657	27,481	27,315	26,451	
	113,396	28,349	112,601	28,1503	110,366	27,5915	112,955	28,2388	103,863	25,9658	109,777	27,4443	107,923	26,9808	109,435	27,3588	880,32
Aço Inox	44,158	44,322	43,281	42,958	43,517	44,311	43,987	44,488	44,311	43,428	46,371	46,135	44,399	44,517	45,253	46,841	
	44,147	44,325	43,016	43,399	44,164	44,429	44,134	44,399	45,282	45,429	46,429	46,429	45,047	45,606	46,194	46,812	
	176,952	44,238	172,654	43,1635	176,421	44,1053	177,008	44,252	178,45	44,6125	185,364	46,341	179,569	44,8923	185,1	46,275	1431,5
T...l	328,117		321,934		322,624		324,565		308,588		326,359		316,475		324,37		
T..k.	650,051				647,189				634,947				640,845				
T..j.	1297,24								1275,792								
TOTAL	2573,032																

Tabelas 4.2(e) & 4.3(d) Resultados da análise da variância.

CÁLCULOS:

TC=	68963,48
SQA=	21424,79
SQB=	4,79
SQC=	-34478,89
SQD=	-51716,81
SQAB=	51,45
SQAC=	34479,84
SQAD=	51722,23
SQBC=	86494,34
SQBD=	51730,90731
SQCD=	86200,61199
SQABC=	-108847,0886
SQABD=	-24880,2301
SQBDC=	-138211,758
SQACD=	-86199,63561
SQABCD=	133731,086
SQR=	9,8835995
SQT=	21515,51
Verificação=	21515,51

TABELA ANOVA

FONTE	SQ	GDL	MQ	F Calculado	F Tabelado	
A	21424,79	2	10712,39399	78037,59824	3,123901138	S
B	4,79	1	4,791840667	34,90757876	3,973894991	S
C	-34478,89	1	-34478,89428	-251171,6898	3,973894991	N
D	-51716,81	1	-51716,8086	-376746,3685	3,973894991	N
AB	51,45	2	25,72612467	187,4095542	3,123901138	S
AC	34479,84	2	17239,9186	125589,2794	3,123901138	S
AD	51722,23	2	25861,11261	188392,9137	3,123901138	S
BC	86494,34	1	86494,34261	630093,5876	3,973894991	S
BD	51730,90731	1	51730,90731	376849,0747	3,973894991	S
CD	86200,61199	1	86200,61199	627953,8202	3,973894991	S
ABC	-108847,0886	2	-54423,5443	-396464,3842	3,123901138	N
ABD	-24880,2301	2	-12440,11505	-90623,69269	3,123901138	N
BCD	-138211,758	1	-138211,758	-1006844,376	3,973894991	N
ACD	-86199,63561	2	-43099,81781	-313973,3537	3,123901138	N
ABCD	133731,086	2	66865,54299	487101,7988	3,123901138	S
Erro	9,8835995	72	0,137272215			
Total	21515,51	95				

Pode-se observar que o resultado da tabela 4.3 indicou alguns efeitos significativos, indicados com a letra S na sua última coluna. Para cada efeito significativo foi realizada uma Comparação Múltipla de Médias (CMM), para descobrir se existe diferença significativa, ou seja, se o efeito causado por um fator ou por uma interação de fatores é maior do que a variabilidade do erro presente nos resultados. Para isso é preciso calcular o desvio padrão das médias, pela fórmula

$$S_X = \text{sqrt}(MQR) / \text{sqrt}(n), \quad (13)$$

onde MQR é a média quadrada do erro e n é o número de repetições por ensaio. Da tabela 4.3 tem-se que $MQR = 0,137272215$. O número $n = 4$, como mostra a tabela 4.1, logo

$$S_X = 0,1852513. \quad (14)$$

Com isso definiu-se o limite de decisão L_d como

$$L_d = 3 \cdot S_X, \quad (15)$$

ou seja, três desvios padrão, o que resulta

$$L_d = 0,5557539. \quad (16)$$

Calculado o Limite de Decisão faz-se a comparação das médias fixando-se um dos fatores e subtraindo as médias da variação do outro fator. Com essas informações é possível proceder a análise de cada efeito significativo

Efeito Principal e interação AB: o diagrama da figura 4.2 mostra o comportamento da força de corte quando se varia o tipo de material, para folgas punção x matriz de 5% e 10%.

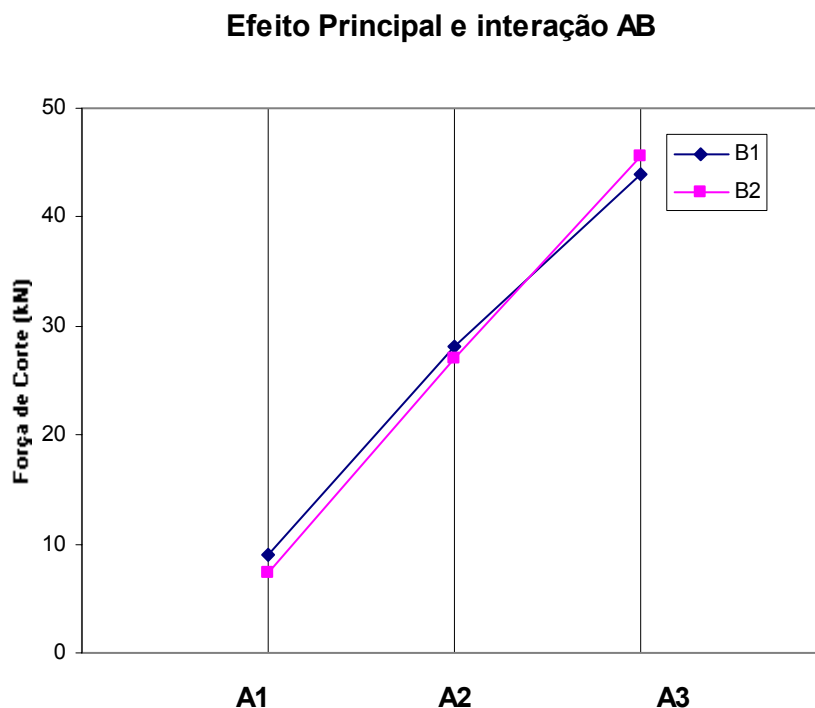


Figura 4.2 Diagrama do efeito principal e da interação AB.

A tabela 4.4 mostra que houve diferença significativa nos três níveis do fator A.

Tabela 4.4 Resultados da CMM.

	A1	A2	A3
Média B1	9,0554	28,082	43,94
Média B2	7,2694	26,937	45,53
	1,786	1,5905	1,145
	DS	DS	DS

Efeito da interação AC: o diagrama da figura 4.4 mostra o comportamento da força de corte quando se varia o tipo de material, para folgas punção x matriz de 1 mm e sem folga.

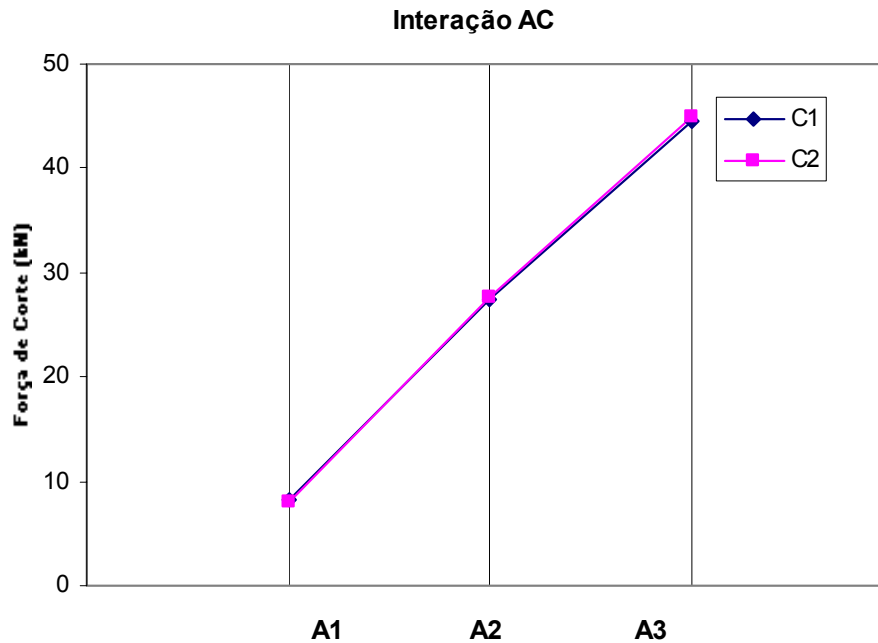


Figura 4.3 Diagrama da interação AC.

A tabela 4.5 mostra que não houve diferença significativa nos três níveis do fator A.

Tabela 4.5 Resultados da CMM para a interação AC.

	A1	A2	A3
Média C1	8,5541	27,477	44,589
Média C2	8,0786	27,542	44,881
	0,4756	0,0651	0,2924
	DNS	DNS	DNS

Efeito da interação AD: o diagrama da figura 4.5 mostra o comportamento da força de corte quando se varia o tipo de material e a força do prendedor. A tabela 4.6 mostra que não houve diferença significativa nos três níveis do fator A.

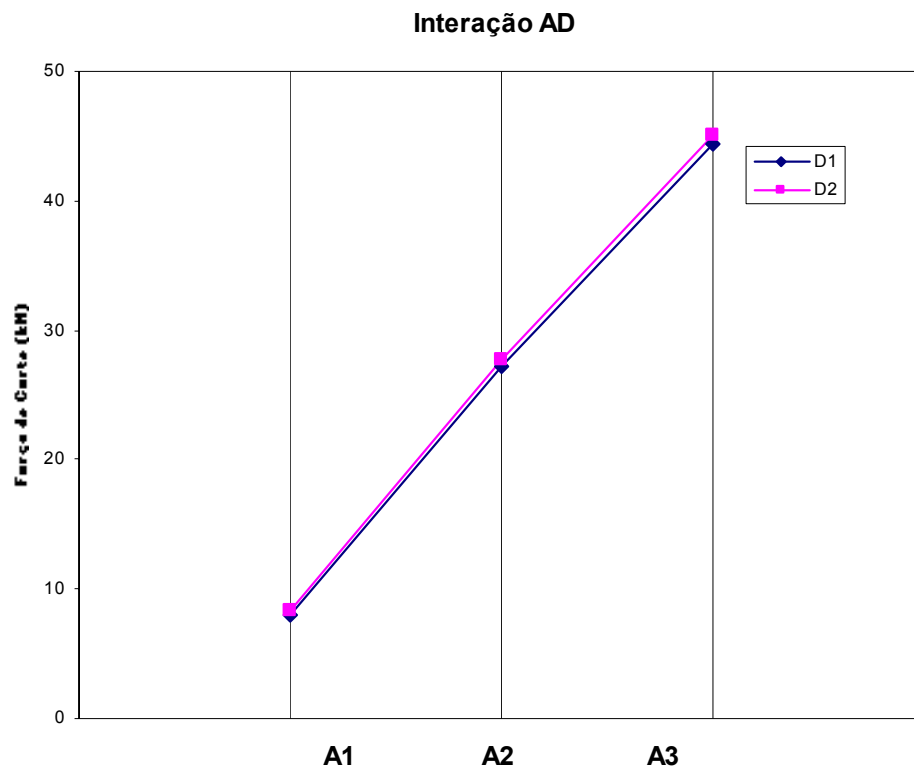


Figura 4.4 Diagrama da interação AD.

Tabela 4.6 Resultados da CMM para a interação AD.

	A1	A2	A3
Média D1	8,054	27,222	44,462
Média D2	8,2709	27,798	45,008
	0,2169	0,5762	0,5459
	DNS	DNS	DNS

Efeito da interação BC: o diagrama da figura 4.5 mostra o comportamento da força de corte quando se varia a folga punção x matriz e a folga punção x prendedor. A tabela 4.7 mostra que não houve diferença significativa nos dois níveis do fator B.

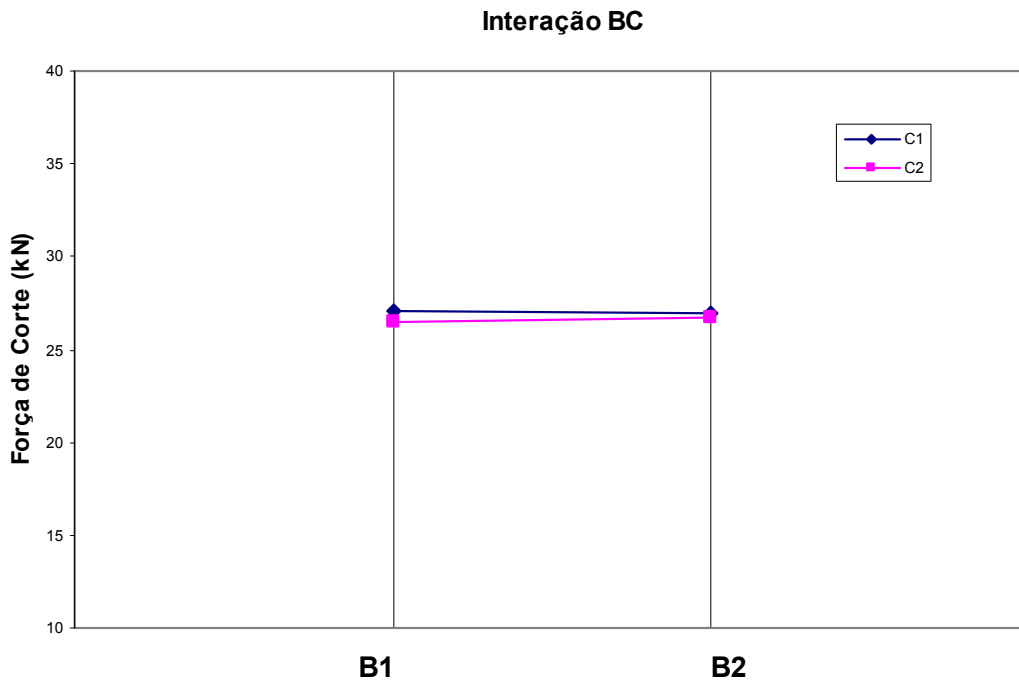


Figura 4.5 Diagrama da interação BC.

Tabela 4.7 Resultados da CMM para a interação BC.

	B1	B2
Média C1	27,085	26,456
Média C2	26,966	26,702
	0,1192	0,2458
	DNS	DNS

Efeito da interação BD: o diagrama da figura 4.7 mostra o comportamento da força de corte quando se varia a folga punção x matriz e a força do prendedor. A tabela 4.8 mostra que não houve diferença significativa no primeiro nível do fator B, mas no segundo nível a diferença é significativa.

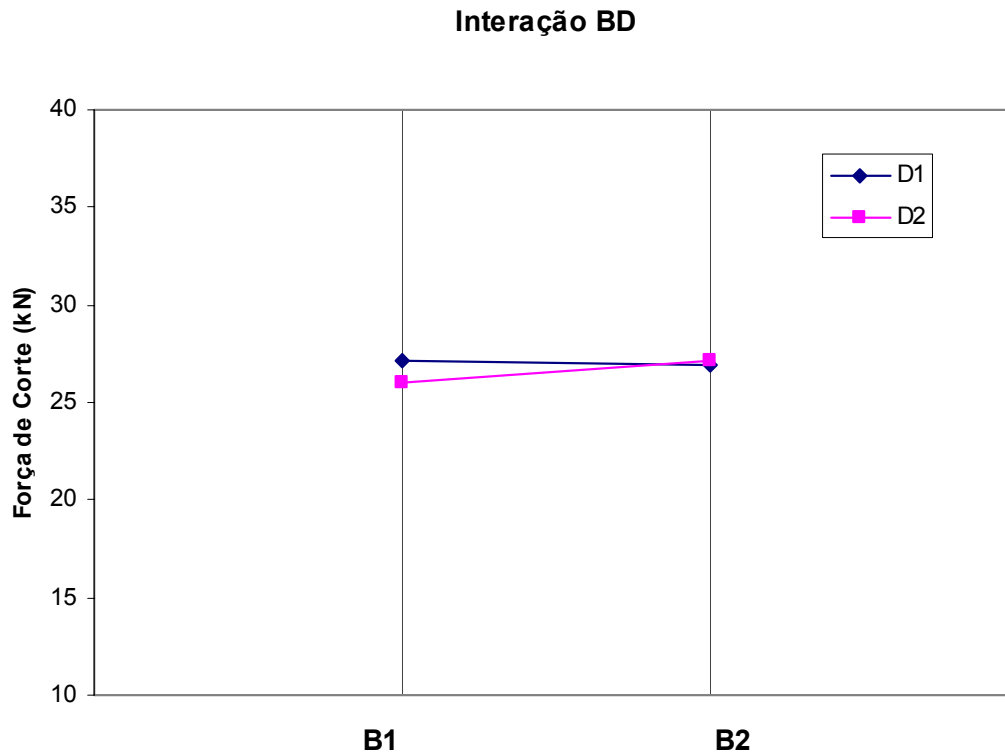


Figura 4.6 Diagrama da interação BD.

Tabela 4.8 Resultados da CMM para a interação BD.

	B1	B2
Média D1	27,114	26,044
Média D2	26,937	27,114
	0,1768	1,0694
	DNS	DS

Efeito da interação CD: o diagrama da figura 4.8 mostra o comportamento da força de corte quando se varia a folga punção x prendedor e a força do prendedor. A tabela 4.9 mostra que não houve diferenças significativas nos dois níveis do fator C.

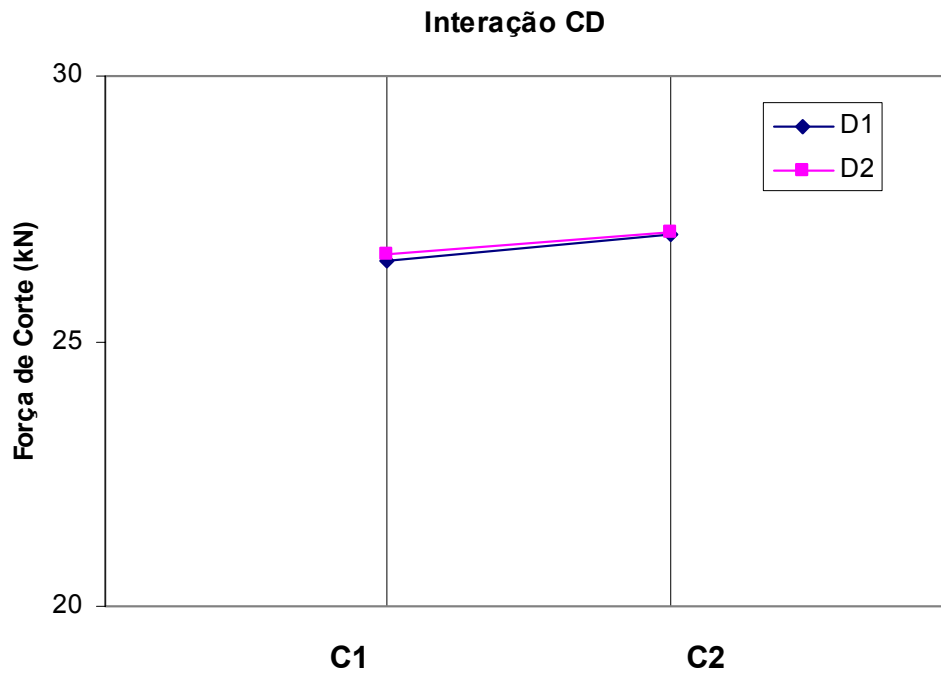


Figura 4.7 Diagrama da interação CD.

Tabela 4.9 Resultados da CMM para a interação CD.

	C1	C2
Média D1	26,529	26,629
Média D2	27,012	27,039
	0,4828	0,4098
	DNS	DNS

5. Discussão

Dos resultados analisados os fatores e interações que causaram alterações significativas na força de corte foram:

Fator A – Resistência do material: a influência deste fator é óbvia. Esta influência reforça o que afirma a literatura sobre a forma de determinação da folga punção x matriz, pois a influência deste fator é muito forte e influencia diretamente a vida útil de punção e matriz.

Fator B – Folga punção x matriz: assim como o fator anterior, também era esperado este resultado. Porém, para o aço inox a força de corte comportou-se de maneira inversa ao que seria normalmente esperado, não acompanhando a mesma tendência do alumínio e do aço comum.

Interação BD – Folga punção x matriz e Força do prendedor: a obtenção deste resultado sugere que a força de sujeição do prendedor de chapas tem alguma influência sobre a força de corte.

É possível que exista realmente a influência obtida na interação BD, pois no momento em que o punção inicia a penetrar na chapa é gerado um momento resistente ao corte da chapa. Este momento resistente tem relação direta com a folga punção x matriz. Quanto maior a folga, maior é o raio de giração da força sobre o material da chapa, o que gera um maior momento para a mesma força de corte. Com isto, o estado de tensões na região do corte é alterado.

O diagrama da figura 4.6 mostra que a força de corte comportou-se com uma tendência de crescimento com o aumento da força do prendedor. Uma tentativa de explicar este resultado pode ser feita comparando dois cortes, ambos com a mesma força de prendedor, porém com folgas diferentes. Com uma folga maior, o momento resistente será maior, causando uma distorção maior na chapa. Esta distorção faz com que a força de corte concentre-se mais

das arestas do punção e da matriz, facilitando o corte, mas provavelmente aumentando a rebarba (ver a figura 5.1).

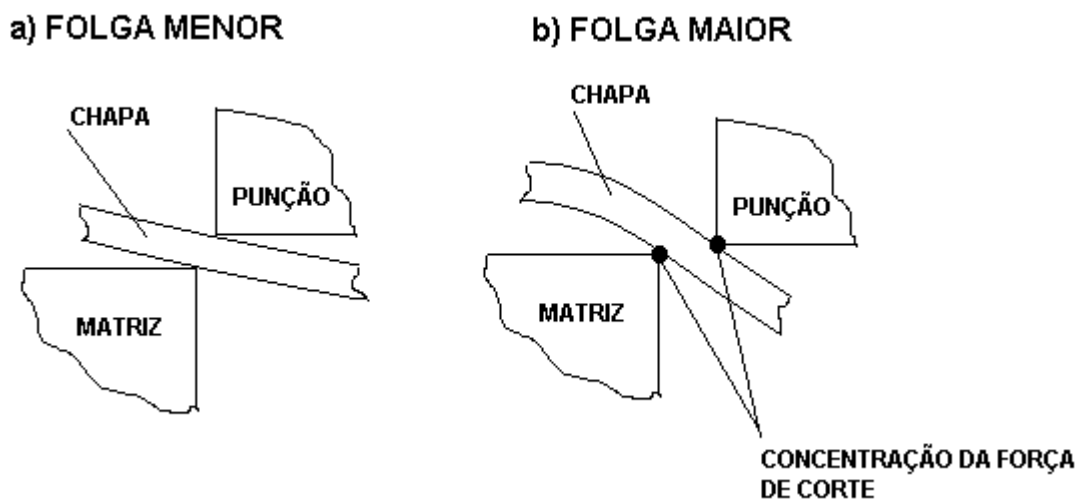


Figura 5.1 Concentração da força de corte causada pelo aumento da folga. a) força de corte maior que em b).

Considerando que com uma força de prendedor maior a distorção ocorrida na chapa seria menor, o resultado seria semelhante a uma redução da folga, aumentando assim a força necessária ao corte, conforme sugere a interação BD.

Pode-se estender esta explicação ao resultado obtido para o fator B, onde, com uma folga maior, a força para cortar o aço inox aumentou ao invés de diminuir. É sabido que o aço inox tem uma resistência muito alta devido entre outros fatores ao seu índice de encruamento que não é constante, mas cresce à medida que aumenta a deformação. Isto faria com que, apesar de a folga ter sido aumentada, a força do prendedor impediu que o corte fosse facilitado, ocorrendo um forte encruamento que fez crescer a força de corte.

Além dos fatores A e B e da interação BD, também a interação ABCD foi significativa na tabela 4.3. Isto significa que existe uma influência da variação de todos os quatro fatores na força de corte. Como será necessária uma análise mais complexa deste resultado, esta interação não foi até o momento estudada a fundo, mas demonstra a variedade de fatores que pode influenciar o processo.

Neste trabalho foi avaliada somente a força de corte adquirida com a ferramenta. Durante a realização dos ensaios, as peças cortadas foram marcadas e separadas de acordo com a seqüência realizada, de forma a permitir estudos também da altura da rebarba, altura do empenamento, altura da parte cisalhada, etc., utilizando a mesma matriz construída, porém inserido estes valores em lugar da força de corte. Este será o próximo passo do estudo do processo.

6. Conclusões

- O sistema de troca rápida de punção e matriz torna muito prática a realização dos ensaios com a ferramenta;
- Os testes realizados com o equipamento demonstram que a ferramenta instrumentada é capaz de ser usada em estudos visando a otimização do corte por cisalhamento já que verificou com sucesso o conhecimento existente atualmente na literatura (Capítulo 3.3 – Teste do sistema);
- As diferenças apresentadas nas curvas mostraram que o sensor utilizado possui sensibilidade suficiente para responder a diferentes alterações efetuadas nos parâmetros do processo durante a pesquisa. Mostra também que o equipamento é capaz de ser utilizado na pesquisa de métodos de supervisão de processos tendo como base a aquisição e comparação do sinal do sensor com uma curva característica do processo supervisionado
- Os dois tipos de células de carga apresentados mostram que sensores extensométricos são uma boa opção para a supervisão em ferramentas de estampagem;
- É possível construir ferramentas instrumentadas para supervisão de processos de estampagem utilizando itens de série e conseqüentemente baixo custo, desde que seja conhecido corretamente o comportamento dos esforços e que o formato dos sensores seja bem projetado;
- A resistência do material é realmente o fator mais importante para a determinação dos outros parâmetros do processo, comprovando a validade dos métodos citados na literatura para a determinação dos mesmos;
- Além da folga punção x matriz, o efeito do prendedor sobre a chapa no momento do corte deve também ser considerado devido a sua influência sobre a força de corte, principalmente em materiais mais resistentes. Esta conclusão é importante, pois tem relação direta com o desgaste da ferramenta e conseqüentemente com os custos de produção;

7. Perspectivas

- . Com a instalação de um alimentador de bobinas e uma prensa automática é possível a realização de estudos sobre a evolução do desgaste quanto a sua influência na curva característica do processo e na qualidade da aresta cortada. Com o mesmo equipamento é possível também o estudo de novos materiais ou revestimentos para ferramentas;
- Os resultados obtidos devem ser comprovados pela realização de novos ensaios eliminando do experimento os fatores que não foram significativos, simplificando a análise e eliminando possíveis fontes de erro.

8. Referências Bibliográficas

- 1- Hoffmann, H. “**EPE – European Production Engineering**”, revista Máquinas e Metais, agosto de 1998.
- 2- Keremedjiev, G., “**In-Die, Value-Added Operations with Electronics**”, *MetalForming* 06 (2001), pp. 68
- 3- Eary, D., Reed, E., “**Techniques of Pressworking Sheet Metal**”, Prentice-Hall, New Jersey, 1974.
- 4- Iliescu, C., “**Cold-Pressing Technology**”, Elsevier Science Publisher Company, Romênia, 1990.
- 5- Spur G., Stoferle T., “**Handbuch der Fertigungstechnik-Umformen-Zerteilen**”, Carl Hanser Verlag, München, 1985.
- 6- Oehler, Kaiser, “**Schnitt-, Stanz- und Zieh- Werkzeuge**”. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- 7- Schaeffer, L., Richter, A., Corrêa de Souza, J. H., “**Otimização do Processo de Cisalhamento em Aço Inoxidável**”, Anais da II Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre - Brasil, e de novembro de 1999, páginas 60 a 67.
- 8- Méroz, R., Cuendet, M., “**As estampas – A Eletroerosão – Os Moldes**”, Fédération dès Écoles Techniques de Suisse – Neuchâtel, Editora Hemus, 1982.
- 9- Altan, T., “**As aplicações industriais dos processos de fabricação de peças já na forma final**”, revista Máquinas e Metais, agosto de 1997.
- 10- Klocke, F., Nöken, St., Altmüller, S., “**Fabricação de modelos, matrizes e moldes no encadeamento integrado de processos**”, revista Máquinas e Metais, janeiro de 1998.
- 11- Brüninghaus, G., “**Process Monitoring on Automatic Punching Machines**”, Blech Rohre Profile, Germany, 1993.

- 12- **“Shearing Tool Change – Boost Turret Press Uptime”**, reportagem da revista Metal Forming, fevereiro de 2001 (www.metalforming.com).
- 13- Goijaerts, Ad., **“Prediction of Ductile Fracture in Metal Blanking”**, Tese de doutorado, Technische Universiteit Eindhoven, 1999. ISBN 90-386-2751-3.
- 14- Schaeffer, L., Richter, A., Corrêa de Souza, J. H., **“Análise e Otimização de Processos de Estampagem Profunda”**, revista Máquinas e Metais, abril de 2000, páginas 168-179.
- 15- Breitling, J.; Pfeiffer, B.; Altan, T. and Siegert, K., **“Process control in blanking”**, Journal of Materials Processing Technology 71 (1997), pp. 187 - 192.
- 16- Stegeman, Y. W., Goijaerts, A. M., Brokken, D., et alli, Brekelmans, W. A. M., Govaert, L. E., Baaijens, F. P. T., **“An Experimental and Numerical Study of a Planar Blanking Process”**, Journal of Material Processing Technology 87 (1999), pp. 266 – 276.
- 17- DIN 8580 – **“Fertigungsverfahren”**, Beuth Verlag, Berlin, 1985.
- 18- DIN 8588 – **“Fertigungsverfahren - Zerteilen”**, Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- 19- HELLWIG, W., SEMLINGER, E. **“Spanlose Fertigung: Stanzen”**, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1996.
- 20- Lange, K. **“Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft – Band 3: Blechbearbeitung”**, Springer Verlag, Berlin, 1990.
- 21- Rossi, M., **“Estampado en Frío de la Chapa”**, Editora Científico-Médica, Barcelona, 1971.
- 22- Provenza, F, **“Estampos II”**, Editora F. Provenza, 1993.
- 23- Goijaerts, A.M., Stegeman, Y.W., Govaert L.E., Brokken, D., Brekelmans W.A.M., Baaijens, F.P.T., **“Can a new experimental and numerical study improve metal blanking?”**, Journal of Materials Processing Technology 103 (2000), pp. 44-50.
- 24- Richter A., Corrêa de Souza J. H., Schaeffer L., **“In die supervision of shearing process”**, 9th International Conference on Sheet Metal, 2-4 April 2001.

- 25- Siegert, K, Ladwig, J., “**Optimization of sheet metal forming processes by determination of the force vector and the position of its application**”, Journal of Materials Processing Technology 46 (1994), pp. 393-399.
- 26- Richter A., Corrêa de Souza, J.H., Schaeffer, L., “**Ferramenta Instrumentada para Pesquisas em Processos de Cisalhamento de Chapas**”, Annals of the III National Conference of Sheet Metal Forming, Porto Alegre - Brazil, October 24th - 27th 2000
- 27- Keremedjiev, G., “**Creative Sensors Instalations**”, *Metal Forming Magazine*, November 1999, pp. 74
- 28- Mesquita, E. L. A. , Rugani, L. L., “**Estampagem dos Aços Inoxidáveis**”, Programa de Capacitação da Cadeia Produtiva, Acesita Aços Especiais, 1997.
- 29- Hoffmann, K., “**An Introduction to Measurement using Strain Gages**”, Hottinger Baldwin Messtechnik Gmbh, Darmstadt, 1989.
- 30- Masuero, J. R., Creus, G. J., “**UFRGS - Mecânica Estrutural I**”, apostila da disciplina, Porto Alegre, 1996.
- 31- Richter, A., “**Möglichkeiten und Grenzen der Prozeßüberwachung zur Qualitätssicherung beim Fügen durch Umformen**”, Doctors Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1997
- 32- Corrêa de Souza, J. H., Richter, A., Schaeffer, L., “**Ferramenta Instrumentada de Cisalhamento de Chapas – Pesquisa e Otimização do Processo**” - Congresso de Corte e Conformação 2001, outubro de 2001, editora Aranda, em CDROM.
- 33- Ribeiro Duarte, J. L., “**Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos**”, apostila da disciplina Projeto de Experimentos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS, março de 2000.
- 34- Lange, K., Blaich, M., “**cap. 4.2 Scheren und Schneiden**” em *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. Ed. W. Beitz e K.-H. Küttner. Springer-Verlag, Berlin 1986.

- 35- Brokken, D., Brekelmans, W.A.M., Baaijens, F.P.T., “**Numerical modelling of the metal blanking process**”, Journal of Materials Processing Technology 83 (1998) 192-199.
- 36- Dae-Cheol Ko, Byung-Min Kim, Jae-Chan Choi, “**Finite-element simulation of the shear process using the element-kill method**”, Journal of Materials Processing Technology 72 (1997) 129-140.
- 37- Samuel, M., “**FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process**”, Journal of Materials Processing Technology 84 (1998) 97-106.
- 38- Faura, F. García, A., Estrems, M., “**Finite element analysis of the optimum clearance in the blanking process**”, Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998) 121-125.