

ÉCIO NAVES DUARTE

**ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO DE FREIOS DE
ESTAMPAGEM EM CHAPAS METÁLICAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2007

ÉCIO NAVES DUARTE

**ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO DE FREIOS DE ESTAMPAGEM EM
CHAPAS METÁLICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientadora: Sonia A. G. Oliveira

Co-orientador : Prof. Dr. Rafael Weyler

UBERLÂNDIA-MG

2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- D812e Duarte, Écio Naves, 1962-
Estudo analítico-numérico de freios de estampagem em chapas metálicas / Écio Naves Duarte. - 2007.
117 f. : il.
- Orientadora: Sonia A.G. Oliveira.
Co-orientador: Rafael Weyler.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Estampagem (Trabalhos em metal) - Teses. 2. Método dos elementos finitos - Teses. I. Oliveira, Sonia Aparecida Goulart de. II. Weyler, Rafael. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.983

Para minha esposa, Ledisley.

AGRADECIMENTOS

A esta tese foram aportadas muitas e inestimáveis colaborações. Como forma de reconhecer as imprescindíveis contribuições das pessoas e instituições com as quais pude contar durante este trabalho, gostaria de fazer constar aqui meus mais sinceros agradecimentos:

À Professora Sonia A. G. Oliveira, idealizadora do tema e visionária da metodologia empregada nesta tese, com a qual realmente pude contar para nortear estes estudos, mas principalmente por ter sido mestra e amiga;

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, que me possibilitou fazer a graduação, mestrado e agora esta tese de doutorado;

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, de onde vieram os recursos para a bolsa do Programa de Doutorado com Estágio no Exterior (PDEE), no período durante o qual foram feitas as pesquisas referentes à contribuição desta tese ao programa STAMPACK®, em Barcelona, Espanha;

A Eugenio Oñate, chefe do CIMNE – Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia – departamento vinculado à Universitat Politècnica de Catalunya;

À Quantech ATZ, empresa que comercializa e desenvolve o STAMPACK®, vinculada ao CIMNE e em cujas dependências tive o suporte de toda a natureza para desenvolver estas investigações no exterior. Especiais e inestimáveis foram, entretanto, as contribuições do Dr. Fernando Rastellini, Gerardo Socorro e Albert Forgas a este trabalho;

Ao Dr. Laurentiu Neamtu, gerente de Desenvolvimento de Software da Quantech ATZ e ao Dr. Rafael Weyler, co-orientador desta tese, pelo sem número de orientações inestimáveis e de toda natureza;

Aos meus filhos, Mel e Jedai, por serem a minha fonte de inspiração;

Associados, diretores e colegas da APEC – Associação dos Pesquisadores e Estudantes Brasileiros na Catalunha, por terem me confiado não só a presidência da associação, mas também suas amizades imprescindíveis;

À Sra. Tatiana Diwo, por sua dedicação aos trabalhos de formatação desta tese e ao Sr. Márcio Melazzo pelo auxílio na execução de alguns desenhos;

Aos colegas e funcionários da Uniminas. Muito especiais agradecimentos, todavia, ao Professor Dieter Sergei Sardeli de Paiva, coordenador do curso de Administração e ao Prof. Fernando Antonio Ferreira, diretor acadêmico da Uniminas;

Por último, gostaria de agradecer a quem me fez pleno das energias necessárias para vencer desafio desta estatura; pela sua inequívoca fidelidade, por sua paciência inesgotável e por ser o motivo de tudo, sempre: minha esposa, Ledisley.

DUARTE, E. N. **Estudo Analítico-numérico de Freios de Estampagem em Chapas Metálicas**. 2007. 133 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Para se obter peças com a melhor qualidade possível em um processo de estampagem de chapas metálicas, a taxa de fluxo de material para dentro da matriz deve ser eficientemente controlada. Este controle é feito por uma força de retenção (FR) originada no prensa-chapas, nos freios de estampagem ou em ambos. Quando a FR requerida é muito alta, o uso dos freios se torna ainda mais necessário, embora excessivas deformações possam ocorrer na peça estampada por causa do contato com os freios. Outros tipos de efeitos indesejáveis decorrentes do uso deste tipo de dispositivos ainda podem ocorrer, tais como dificuldades para se determinar o valor adequado da FR, o que pode consumir muito tempo. Para se resolver estes problemas e reduzir o número das tentativas de ajustes, são necessários conceitos mais precisos sobre os freios de estampagem. Com a finalidade de se avaliar a influência dos parâmetros mais importantes na FR e de se estabelecer uma teoria para se fazer a predição da FR, desenvolveu-se neste estudo uma metodologia híbrida, empregando-se a teoria da similitude com bases de dados gerados através de simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados foram comparados com os experimentos de Nine (1978, 1982) e com o modelo analítico de Stoughton (1988). A média dos desvios absolutos com respeito aos dados experimentais foi de 6% e, para os casos estudados, a discrepância máxima foi sempre menor ou igual a 11%. Em relação ao modelo analítico, a média dos desvios absolutos foi de 5% e, para os casos estudados, o desvio máximo nunca foi superior a 7%. Predições feitas com esta abordagem tiveram, portanto, uma boa precisão, quando comparadas com o modelo analítico e com os dados experimentais. Por este motivo, esta teoria foi aceita como contribuição para o programa STAMPACK®, um código de solução explícita utilizado na simulação de processos de estampagem de chapas metálicas.

DUARTE, E. N. **A Hybrid Approach for Estimating the Drawbead Restraining Force in Sheet Metal Forming**. 2007. 133 f. Doctoring Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

In order to get a better part quality in sheet metal forming, the rate of the material flow into the die cavity must be efficiently controlled. This control is made by a restraining force supplied either by the blankholder, the drawbeads or both. When the restraining force required is too high, the use of drawbeads is necessary, although excessive deformations may be produced. Some others disadvantages, such as difficulties of adjustment during die try-outs in order to determine the actual Drawbead Restraining Force (DBRF), may also be emphasized. To solve these problems and to reduce the number of die try-outs, which are very time consuming, accurate enough drawbeads concepts are necessary.

Aiming to understand the influence of the most important parameters on the DBRF and to establish a pre-estimate DBRF theory, in this study a methodology has been developed using similitude. The data bases were achieved by Finite Element (FE) simulations done with an explicit code. Two different materials were used: A-K Steel and 2036-T4 Aluminum.

The results have been compared with experimental databases of Nine(1978, 1982) and with the analytical model of Stoughton(1988). The average of absolute error with respect to experimental data bases was about 6 % and, for those cases studied, the maximum discrepancy was found to be less than 11%. For analytical ones, the average of absolute error was about 5 % and, for the cases studied, the maximum error was about 7%.

Predictions made with this approach have a very good precision when compared with analytical and experimental results. For this reason, it was used as a contribution for STAMPAK®, an explicit finit element code used to simulate forming process.

Keywords: *Drawbead. Restraining force. Finite element method. Sheet metal forming. Similitude.*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da Seção Transversal de uma Barra
A_0	Área Inicial
a	Aceleração
$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$	Magnitudes das Quantidades Primárias
$\mathbf{a}'$	Vetor de Incógnitas Nodais
B	Largura do Freio de Seção Circular
$\mathbf{B}'$	Matriz de Flexão
BPT	Triângulo Básico de Placa
BST	Triângulo Básico de Lâmina
$\mathbf{C}$	Constante de Amortecimento
c	Folga Horizontal entre o Freio e a Chapa
C_α	Constante em Função dos Grupos de Variáveis Adimensionais
CST	Triângulo de Deformação Constante
$\hat{\mathbf{D}}$	Matriz das Velocidades de Deformações
$\dot{\mathbf{d}}$	Vetor das Velocidades de Translação Nodais
$\ddot{\mathbf{d}}$	Vetor das Acelerações de Translação Nodais
$\mathbf{d}(t)$	Vetor de Deslocamentos Nodais
E	Módulo de Elasticidade (Young)
EF	Elementos Finitos
EPG	Equação de Predição Geral
EPT	Estado Plano de Tensão
$\mathbf{F}$	Força
F, L e T	Quantidades Primárias Apropriadas
FLC	Curva Limite de Conformabilidade
FLD	Diagrama Limite de Conformação
FP	Força do Prensa-chapas
FR	Força de Retenção
$\mathbf{f}(d, t)$	Forças Externas
H	Módulo de Plasticidade

H^-	Módulo de Encruamento Cinemático
h	Altura da Penetração do Freio
K	Constante de Encruamento da Lei de Hollomon
K	Matriz de Rigidez
L	Comprimento do Freio de Estampagem
<i>l</i>	Comprimento de uma Barra
M	Massa Associada a cada Ponto
M	Matriz de Massa da Estrutura
MEF	Método dos Elementos Finitos
<i>n</i>	Expoente de Encruamento
PFV	Princípio das Forças Virtuais
PDV	Princípio dos Deslocamentos Virtuais
<i>p(d, ḋ)</i>	Forças das Resistências Internas
Q	Carga Elétrica
R	Parâmetro que mede a Anisotropia Plástica
R _d	Raio da Seção do Freio Circular
R _m	Raio de Arredondamento do Ombro da Matriz
<i>r</i>	Raio de Flexão da Chapa
<i>r</i>	Média dos Coeficientes de Lankford
S ^e	Tensão Limite de Elasticidade
S ^P	Tensão Limite de Proporcionalidade
S ^y	Tensão de Escoamento
T	Tempo
T	Matriz de Transformação
<i>t</i>	Espessura da Chapa
t _f	Folga Vertical
U_e	Energia Potencial Externa
U_i	Energia de Deformação Interna
W	Trabalho
<i>w</i>	Deslocamento
α	Ângulo em Radianos
β	Quantidade Secundária
Δ	Deformação da Barra

Δt_{cr}	Tempo Crítico
Δt_n	Intervalo de Tempo
$\Delta \mathbf{u}$	Vetor de Incrementos dos Deslocamentos
$\Delta \mathbf{u}_s$ e $\Delta \mathbf{u}_m$	Incrementos de Deslocamentos
$\boldsymbol{\varepsilon}^P$	Deformação Elástica Reversível
$\boldsymbol{\varepsilon}^P$	Deformação Plástica
$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$	Taxa de Deformação Plástica Efetiva
$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$	Deformação Plástica Efetiva
γ	Penetração de Contato Segundo a Normal Definida
r_0 , r_{45} e r_{90}	Coeficientes de Lankford a 0°, 45° e 90°
$\boldsymbol{\lambda}$	Vetor das Forças de Contato
μ	Coeficiente de Atrito
ν	Coeficiente de Poisson
π_i	Pi termo
θ	Temperatura
$\boldsymbol{\sigma}$	Tensor Tensão Real
$\boldsymbol{\sigma}_{eq}$	Tensão Equivalente do Material
$\boldsymbol{\sigma}_{ij}$	Tensão Limite de Escoamento do Material
ω_{max}	Frequência Angular Máxima do Sistema
ϵ	Parâmetro de Perturbação

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS	7
2.1 Introdução	7
2.2 Conformação de chapas metálicas	7
2.3 Equipamentos e ferramentas para estampagem	11
2.4 Freios de estampagem	14
2.4.1 Generalidades	14
2.4.2 Projeto de freios de estampagem	14
2.4.3 Modelos propostos para a FR	21
2.4.4 Modelos em EF para a FR	25
CAPÍTULO III – SIMILITUDE EM ENGENHARIA MECÂNICA	27
3.1 Introdução	27
3.2 Características das observações e seleção das quantidades	28
3.3 Análise Dimensional	29
3.4 Obtenção das Equações Preditivas	31
3.4.1 Condições para a Função ser um Produto	34
3.4.2 Condições para a função ser uma soma	36
3.4.3 Condições Suplementares para mais de três Pi termos	38
CAPÍTULO IV – O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	40
4.1 Introdução	40
4.1.1 A Notação Matricial	41
4.1.2 Fundamentos da Análise Estrutural	42
4.1.3 O Princípio dos Deslocamentos Virtuais e o Método da Energia	43
4.1.4 A Etapa de Pré-processamento	44
4.1.5 A Etapa de Processamento	46
4.1.6 A Etapa de Pós-processamento	47
4.2 As soluções Explícita e Implícita	48
4.2.1 A solução explícita	48
4.2.2 A solução implícita	50

4.3 As abordagens 2D e 3D	52
4.3.1 <i>2D ou 3D no código STAMPAK</i>	52
4.3.1.1 <i>Formulação do Elemento BST utilizado no STAMPAK</i>	53
4.3.1.2 <i>Formulação do Elemento Quadrilateral 2D utilizado no STAMPAK</i>	54
4.3.2 <i>Análise do Problema de Contato</i>	58
4.3.2.1 <i>O Algoritmo de Contato no STAMPAK</i>	61
4.3.3 <i>Validações do STAMPAK</i>	62
CAPÍTULO V – ASPECTOS DE PLASTICIDADE E MODELOS DE MATERIAIS	64
5.1 <i>Introdução</i>	64
5.2 <i>A caracterização do material</i>	65
5.3 <i>O Comportamento Elástico</i>	66
5.4 <i>O Comportamento Plástico</i>	67
5.5 <i>Anisotropia</i>	69
5.6 <i>A Deformação plástica efetiva</i>	71
5.7 <i>As Leis de Encruamento Isotrópico</i>	71
5.8 <i>O Diagrama do Limite de Conformação – FLD</i>	73
CAPÍTULO VI – METODOLOGIA	75
6.1 <i>Introdução</i>	75
6.2 <i>Validações do Modelo em EF</i>	77
6.2.1 <i>Bases de Dados Experimentais</i>	77
6.2.1.1 <i>Experimentos</i>	77
6.2.2 <i>O Modelo em EF</i>	84
6.2.3 <i>Ajuste do Modelo: Influência dos Parâmetros Numéricos na Força de Freio (FR)</i>	85
6.2.3.1 <i>Número de Elementos na Espessura da Chapa</i>	85
6.2.3.2 <i>Número de Elementos no Comprimento da Chapa</i>	86
6.2.3.3 <i>Tempo Crítico</i>	87
6.2.3.4 <i>Amortecimento</i>	88
6.2.4 <i>O Modelo em EF Definitivo</i>	89
6.3 <i>Desenvolvimentos da Equação Preditiva Geral</i>	89
6.3.1 <i>Parâmetros Geométricos</i>	89
6.3.1.1 <i>Raio de curvatura efetivo da chapa</i>	89
6.3.1.2 <i>Espessura da Chapa</i>	90
6.3.2 <i>Parâmetros de Materiais</i>	91
6.3.3 <i>Atrito</i>	91
6.3.4 <i>Outros Parâmetros</i>	92

6.4 Definições dos Pi termos-----	92
6.5 Obtenção das Equações Componentes -----	95
6.6 Programando a Interface Gráfica em STAMPACK® -----	96
CAPÍTULO VII – RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	98
7.1 Introdução-----	98
7.2 Das equações componentes -----	99
7.3 Validações da EPG com dados experimentais -----	102
7.4 Validações da EPG com a solução analítica de Stoughton (1988)-----	105
7.5 Testes suplementares da EPG com simulações bidimensionais em EF-----	107
CAPÍTULO VIII – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS-----	109
8.1 Conclusões -----	109
8.2 Sugestões de trabalhos futuros-----	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	115
ANEXO -----	118

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A qualidade das peças produzidas em um processo de estampagem de chapas metálicas é muito dependente do controle do fluxo de material conformado para dentro da matriz. Este controle é feito utilizando-se a Força de Retenção (FR) produzida pelo prensa-chapas, pelos freios de estampagem ou por ambos. Quando se necessita de uma magnitude muito grande para esta força, geralmente se utilizam os freios de estampagem. Trincas, dobras ou rugas na peça podem ser evitadas por meio deste controle feito através de uma FR adequadamente estipulada.

Em alguns casos, a força requerida no prensa-chapas pode até ultrapassar a capacidade da prensa. Isto pode causar desgastes excessivos nas ferramentas e até mesmo soldas pontuais por contato, decorrentes dos altos valores de pressões envolvidos, segundo Xu (1998). O freio de estampagem, no entanto, pode ajudar na obtenção de altas FR's, mesmo em níveis de pressões mais baixos.

Em face do exposto, na estampagem de peças com geometria complexa – ver Figs. 1.1 a 1.3 – ou em grandes peças automotivas, quando são requeridas altas FR's, o uso dos freios é quase imperativo, segundo Tufekci et al., (1994).

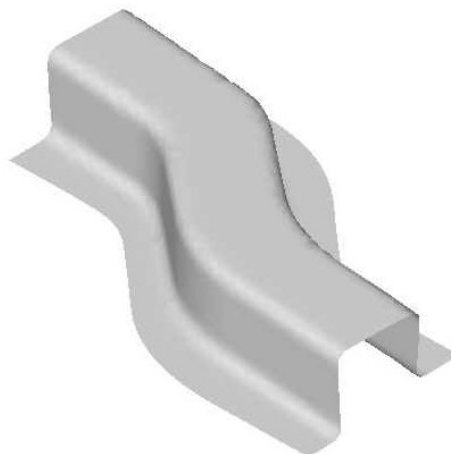


Figura 1.1 – Peça a ser estampada – “s-rail”, Cortesia Quantech ATZ.

Definem-se freios de estampagem, de acordo com a ASM (1988), como uma saliência localizada na superfície do prensa-chapas que penetra numa ranhura da matriz – ver Fig. 1.4 – para ajudar no controle da taxa de fluxo do material estampado.

Para se reduzir o número de tentativas de ajustes desta força devida aos freios de estampagem, conceitos mais precisos sobre estes freios são muito importantes para os projetistas.

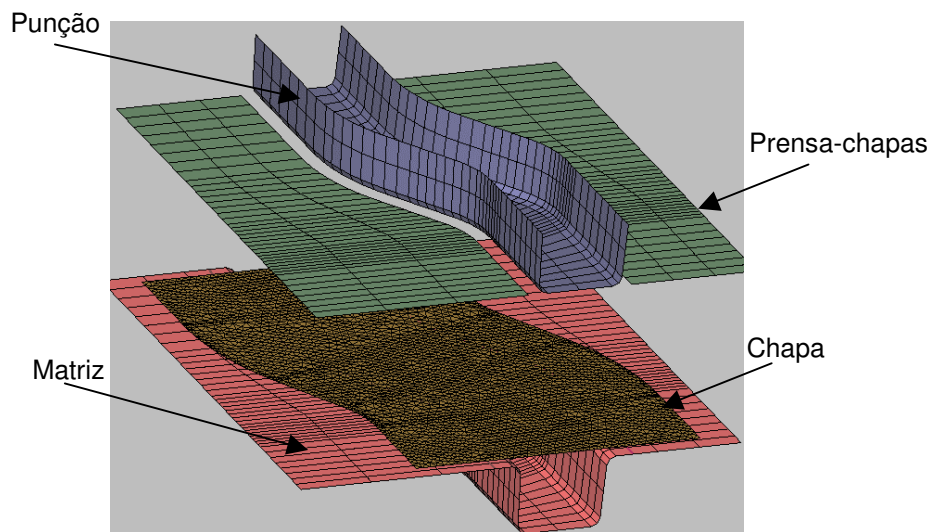


Figura 1.2 – Ferramentas utilizadas no processo de estampagem - Cortesia Quantech ATZ

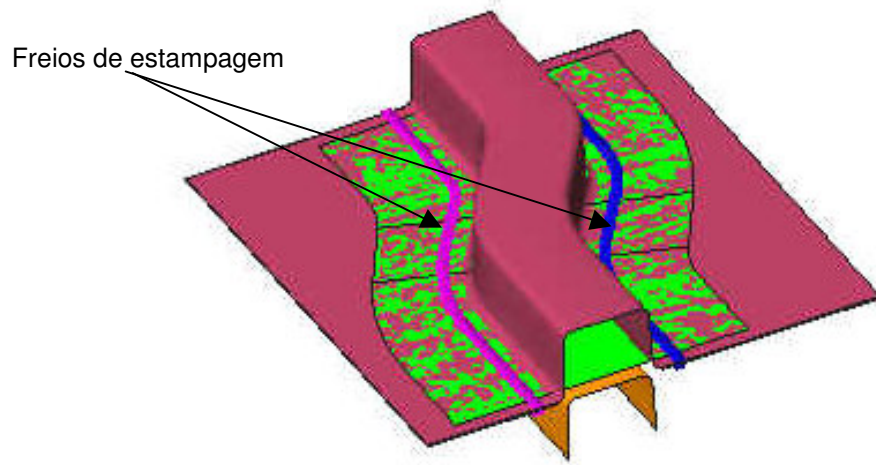


Figura 1.3 – Posição dos freios de estampagem na matriz - Cortesia Quantech ATZ

O uso dos freios de estampagem, no entanto, possui alguns inconvenientes, como a dificuldade de se encontrar um valor adequado para a FR, o que, via tentativa e erro, pode consumir muito tempo. Além disto, deformações excessivas podem ocorrer na chapa que passa pelos freios, comprometendo o acabamento superficial da peça estampada.

A geometria da seção transversal dos freios mais usual é a circular, ainda que outras geometrias também possam ser utilizadas, como a retangular, trapezoidal, triangular e assimétrica. Neste estudo, somente a forma circular será investigada – ver Fig. 1.4.

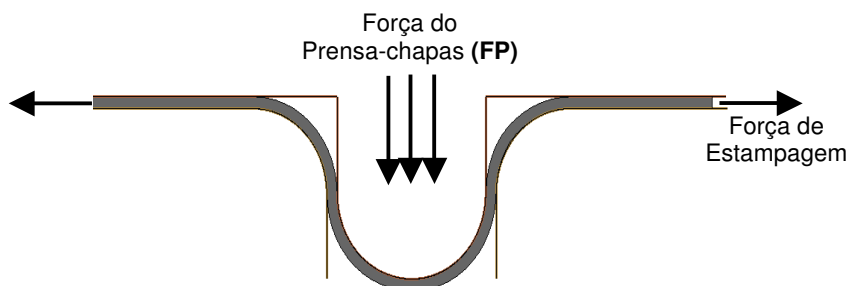


Figura 1.4 – Freio de estampagem de seção circular

Geralmente, um grande esforço é despendido em ajustes no projeto de uma matriz de estampagem por causa do grande número de variáveis, tais como geometria, atrito, freios de estampagem etc. Por isto, nos últimos trinta anos, vários autores estudaram este problema. Abordagens analíticas, numéricas e empíricas foram desenvolvidas. O primeiro estudo analítico do tema foi de Swift (1948). Nine (1978) fez experimentos para estudar a influência da deformação por flexão da chapa e do atrito no valor da FR. Seu trabalho considerou a sucessão de flexão e flexão inversa enquanto a chapa está sob a ação do freio. A força do prensa-chapas (FP) – Fig. 1.4 – e a FR foram medidas para chapas em aço e em alumínio. Os dados experimentais de Nine (1978) foram utilizados nas validações desta tese.

Levy (1983) fez um estudo parcialmente empírico para estimar a FR com uma equação fechada. Nesta equação, parâmetros de materiais, de geometria da chapa e dos freios foram considerados. Stoughton (1988) partiu deste modelo de Levy para desenvolver uma formulação analítica para a predição da FR. As hipóteses de Stoughton incluem a Lei de Atrito de Coulomb e o critério anisotrópico de fluência de Hill. A equação de Stoughton foi obtida através da integração do trabalho de deformação ao longo de todo o freio e através da espessura da chapa. Seu modelo pode ser aplicado a freios circulares, no entanto tem potencial para estimar a FR em freios com outras geometrias.

Os estudos que envolvem uma solução numérica em Elementos Finitos (EF) para a estampagem de chapas metálicas têm crescido muito nos últimos anos. Não há mais dúvidas com respeito ao potencial das técnicas numéricas. No entanto, a simulação 3D em EF da estampagem de peças complexas ainda tem um custo computacional alto, em termos de tempo de simulação. Por este motivo, têm sido feitas pesquisas com o objetivo de se investigar o problema da estimação da FR e a redução destas limitações para um nível mais aceitável.

Para se alcançar este objetivo, necessitam-se de uma redução da quantidade de memória utilizada nas simulações e do tempo de processamento destas simulações. Por este motivo, muitos estudos sobre simulações 2D em EF também foram feitos nos últimos anos. Um modelo 3D de um freio de estampagem, perfeitamente bem definido em EF, pode não ser uma boa opção por várias razões. Primeiramente, pelo fato de a malha na região do freio ter que ser muito mais refinada que em outras partes da chapa, devido ao pequeno raio de curvatura do freio. As mudanças abruptas de formas também fazem com que haja fortes gradientes para se descrever as evoluções associadas com a seqüência de flexões/deslizamentos/flexões inversos que são impostas pela passagem da chapa pelo freio de estampagem.

Utilizando-se simulações 2D em Elementos Finitos (EF), Carleer et al. (1994) estabeleceram uma abordagem com a qual as distribuições da FR na chapa são inicialmente calibradas com funções dos deslocamentos que são aplicadas como condições de contorno para produzir efeitos similares no modelo 3D do mesmo problema. Geralmente, o freio é modelado como uma linha ao longo da qual uma força de resistência é aplicada. A espessura de deformação resultante da passagem da chapa através do freio pode também ser incluída no modelo do freio equivalente, conforme Carleer (1996). Esta metodologia é definida como o “método do freio equivalente”. You et al. (1998) propuseram também um modelo numérico para o cálculo da FR, levando em conta, em seu modelo, o encruamento cinemático e o efeito de Bauschinger.

Em que pese a boa concordância dos resultados das simulações feitas com o programa STAMPACK®, este código possui algumas características indesejáveis que estão relacionadas com o fato de ser um programa de solução explícita, isto é: dependendo do problema, o tempo de simulação pode ser alto; além disto, no caso específico deste programa, há a necessidade de uma simulação 2D para se estimar a FR no freio de estampagem, antes de se iniciar a simulação tridimensional da peça.

Para se eliminar estas características indesejáveis, uma equação analítica seria relevante, já que, uma vez obtidos os valores dos parâmetros necessários para a estimação da FR, os cálculos seriam praticamente instantâneos, se comparados ao tempo de uma simulação.

Na validação dos modelos em EF e nos testes dos resultados da equação desenvolvida nesta pesquisa, foram utilizados os resultados experimentais de Nine (1978) e os resultados analíticos de Stoughton (1988), além de algumas simulações 2D utilizadas para verificação da conveniência da implementação desta equação como contribuição ao STAMPACK®.

Os objetivos desta pesquisa podem ser divididos em duas frentes, quais sejam: estudar a influência dos parâmetros mais importantes na FR e estabelecer uma equação fechada para a predição da FR, para esta finalidade, uma metodologia híbrida foi desenvolvida por meio da utilização de similitude em engenharia. Este procedimento foi adotado ao se constatar os bons resultados das simulações 2D em EF da FR para freios circulares feitas no código comercial STAMPACK[®], cujas validações se encontram no capítulo IV, relativo ao tema de Elementos Finitos.

Estes objetivos estão assim definidos em função da relevância de se entender, com maior acurácia, a influência de parâmetros de natureza geométrica, de materiais e do atrito sobre a FR.

Convém ainda mencionar que a contribuição científica deste estudo também repousa sobre a metodologia desenvolvida para a obtenção da equação de estimação da FR, via similitude. Pois, neste caso, utilizou-se uma base de dados gerados numericamente para a determinação das equações componentes de uma Equação de Predição Geral (EPG) e não dados experimentais, como usualmente se faz nesta teoria. Esta metodologia foi programada em FORTRAN 90.

A média dos erros absolutos obtidos nos testes experimentais da equação aqui proposta foi de cerca de 6%. E, para os casos estudados, a maior discrepância encontrada, seja em relação aos dados experimentais ou analíticos, foi de 11%. As estimativas da FR feitas com este estudo foram consideradas suficientemente precisas para serem aceitas como contribuição ao STAMPACK[®], sob a forma de um módulo de cálculo rápido da FR nos freios de estampagem convencionais.

Os capítulos II, III, IV e V desta tese tratam da fundamentação teórica deste estudo, respectivamente, divididos em Estampagem de Chapas Metálicas, Similitude, Elementos Finitos e Aspectos de Plasticidade e Modelos de Materiais.

O capítulo VI discute detalhadamente a metodologia desenvolvida neste estudo para obtenção da EPG, bem como da metodologia utilizada na obtenção dos dados experimentais utilizados nas validações e ajustes dos modelos em EF através dos quais se gerou a base de dados numéricos.

O capítulo VII trata da apresentação e discussão dos resultados e dos testes com a EPG, bem como da apresentação da interface gráfica que foi projetada e programada no STAMPACK.

O capítulo VIII expõe, com certa concisão, as conclusões que foram sendo coletadas ao longo de todo este tempo de investigação.

O Anexo I desta tese traz ainda o tutorial destinado ao usuário do programa para melhor orientá-lo na utilização da interface gráfica projetada e implementada para se estimar a FR.

CAPÍTULO II

ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS

2.1 Introdução

Projetar uma matriz para estampagem de chapas metálicas é um processo relativamente complexo. Em diversas ocasiões, passam-se várias etapas de ajustes até que se consigam definir as condições geométricas das ferramentas adequadas às condições de lubrificação e de propriedades mecânicas das chapas a serem estampadas com a qualidade e a quantidade desejadas.

Neste capítulo se fará uma abordagem mais geral de alguns processos de conformação mecânica, bem como uma ilustração dos equipamentos comumente utilizados na estampagem de chapas metálicas. Além disto, será feita uma abordagem mais detalhada dos freios de estampagem, desde sua definição e tipologias até os parâmetros que mais influem no projeto das matrizes de estampagem equipadas com este dispositivo cuja principal função é a de melhorar o acabamento das peças metálicas obtidas pelo processo de estampagem.

2.2 Conformação de chapas metálicas

Muitas operações de conformação em chapas metálicas são empregadas na indústria mecânica. Alguns exemplos destes processos serão ilustrados a seguir:



Figura 2.1 – Conformação de chapa em ângulo, “Air bending”, [Schuler, Inc.]

Na Figura 2.1 pode-se observar a conformação de uma chapa em ângulo, enquanto na Fig. 2.2 se verificam os tipos de processos de estampagem denominados “*hemming*”, no qual a aresta da chapa metálica é dobrada sobre si mesma:

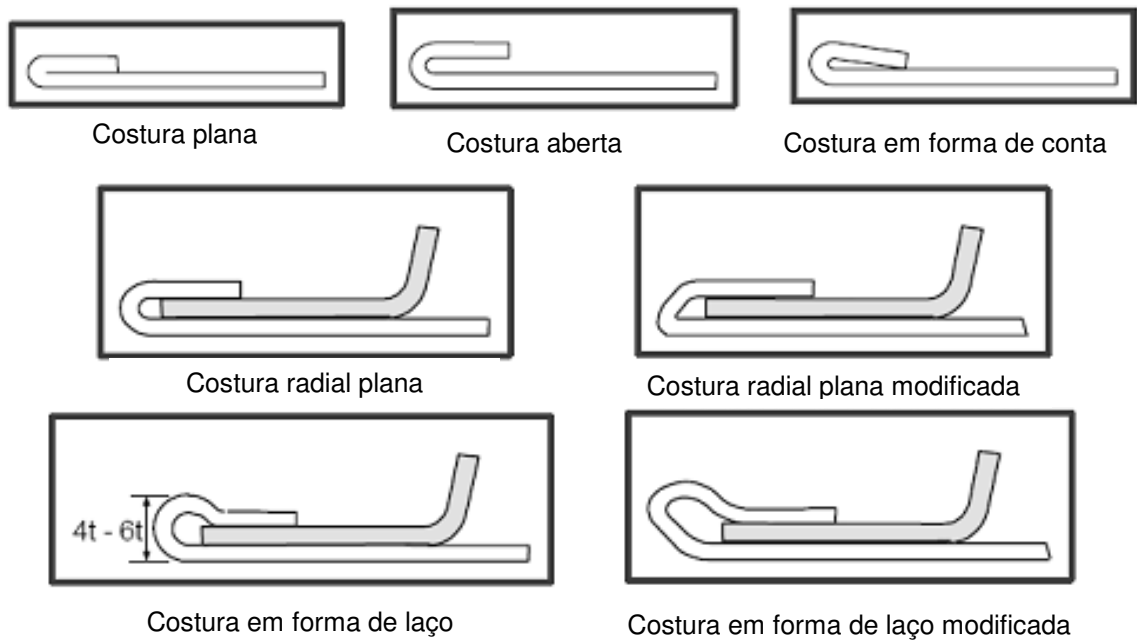


Figura 2.2 – Diferentes etapas de conformação tipo “*hemming*”, [Schuler, Inc.]

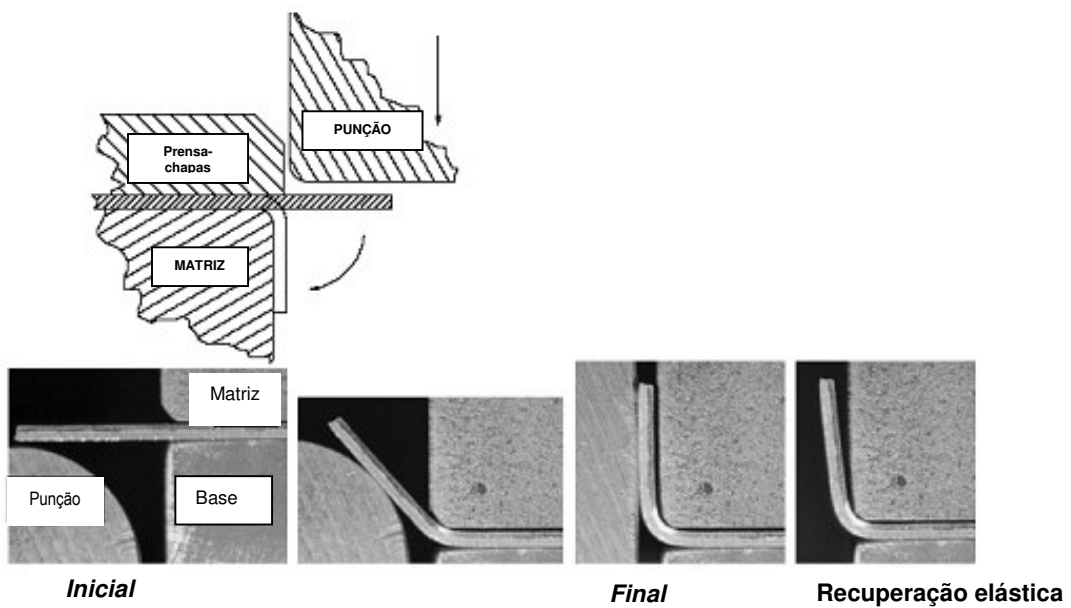


Figura 2.3 – Flangeamento de chapa em ângulo, [Schuler, Inc.].

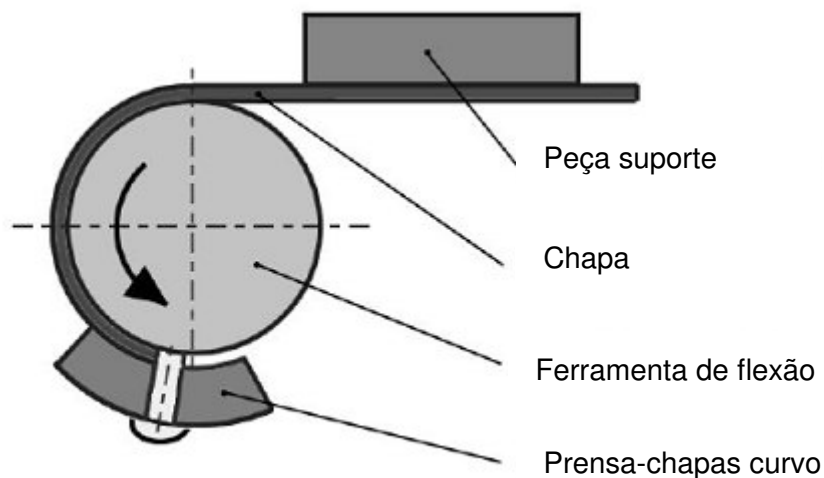


Figura 2.4 – Conformação circular de chapa, [Schuler, Inc.].

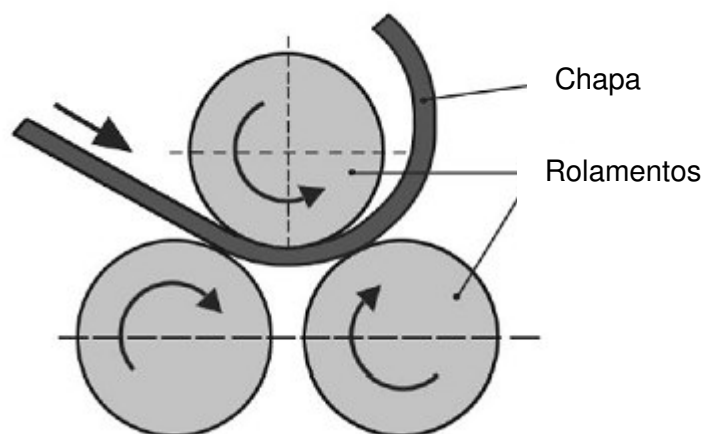


Figura 2.5 – Conformação de chapa por rolamentos, [Schuler, Inc.].

As Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 esquematizam outros processos de conformação mecânica, respectivamente denominados de flangeamento de chapa em ângulo, conformação circular de chapa e conformação de chapa por rolamentos.

Os freios de estampagem são freqüentemente utilizados, entretanto, no processo conhecido por estampagem profunda ou “*deep drawing*” de chapas metálicas, como se vê na Fig. 2.6, são utilizados para controlar o fluxo de material estampado para dentro da matriz em peças grandes e/ou com geometria complexa.

As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram também a aplicação destes processos com algumas peças prontas e a utilização dos freios na conformação de chapas metálicas, respectivamente:

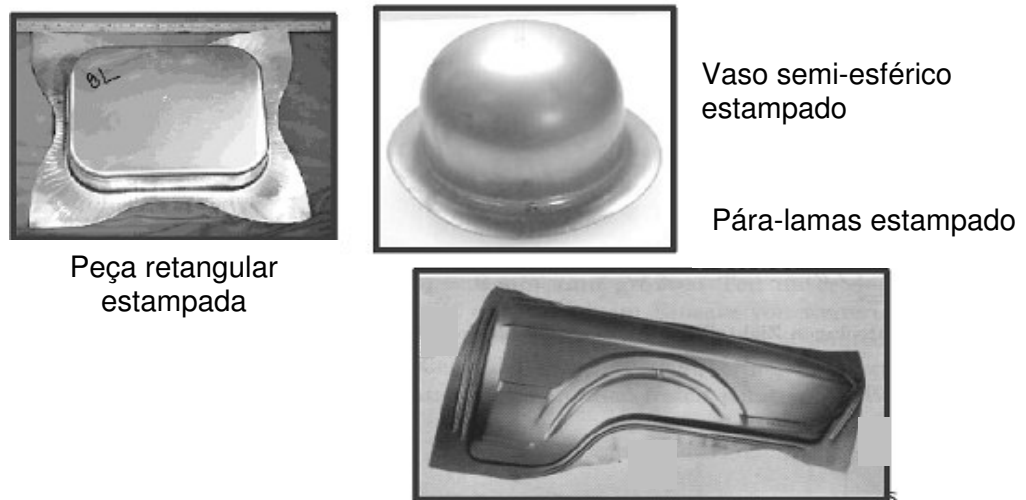


Figura 2.6 Estampagem profunda de chapas metálicas, [Schuler, Inc.].



Figura 2.7 – Aspecto de uma prensa e uma matriz com os sulcos dos freios de estampagem, Cortesia Quantech ATZ.

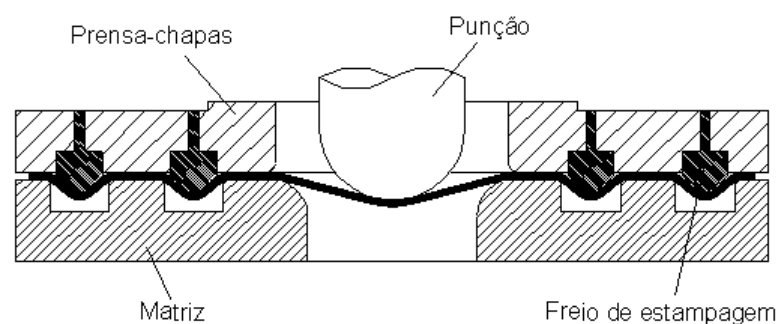


Figura 2.8 – Estampagem de chapas metálicas com freios de estampagem.

Uma vasta gama de processos de estampagem de chapas ainda poderia ser destacada. Entretanto, objetivando delimitar o tema desta tese, somente estes casos permitem situar a aplicação dos freios de estampagem neste contexto. A próxima seção dedica-se a ilustrar alguns equipamentos utilizados nos processos de estampagem de chapas metálicas.

2.3 Equipamentos e ferramentas para estampagem

O tipo de equipamento e as ferramentas que se utilizam em uma linha de produção são afetados em grande parte pelo tamanho da peça estampada, pelo volume de produção e pelo equipamento disponível na fábrica.

Os equipamentos e ferramentas típicos utilizados nas operações de estampagem são:

- Matrizes progressivas em prensas automáticas;
- Matrizes individuais de processo em prensas convencionais;
- Prensas contínuas (tipo “*transfer*”) com várias matrizes;
- Linha de prensas com distintas matrizes (tipo “*tandem*”).

As matrizes progressivas, Fig. 2.9, são recomendadas para uma produção com elevado número de peças pequenas, isto é, acima de 200.000 peças. Geralmente possuem um baixo custo por serem de produção automática.

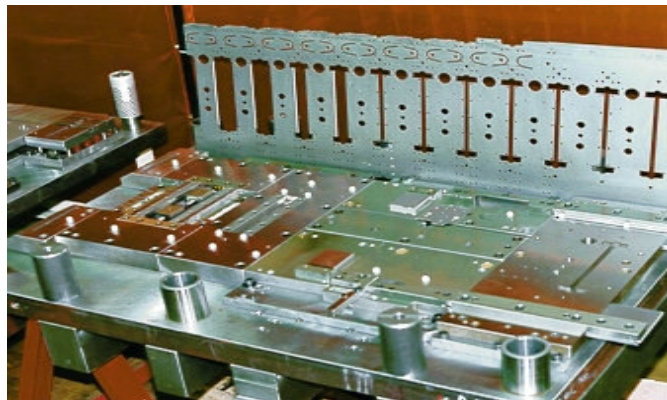


Figura 2.9 – Matriz progressiva – Cortesia QUANTECH - ATZ

As matrizes individuais em prensas convencionais – Fig. 2.10 – são utilizadas geralmente para produção de baixo volume de peças com tamanhos médios e grandes. Os custos para este tipo de ferramenta são menores quando comparados aos custos das prensas tipo “*transfer*”, mas os custos de mão de obra aumentam por não serem automatizadas.

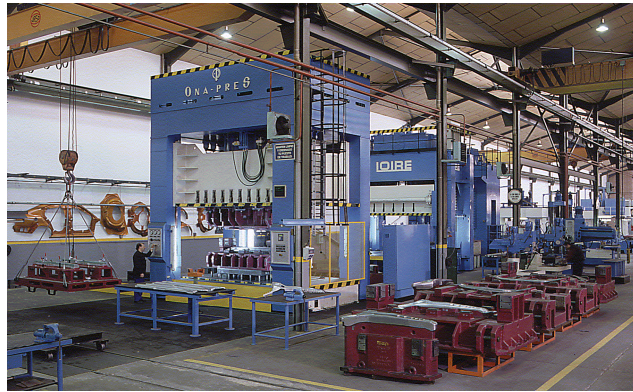


Figura 2.10 – Prensa convencional – Cortesia QUANTECH - ATZ

As prensas tipo “*transfer*”, Fig. 2.11, são as que melhor se ajustam aos níveis elevados de produção de peças de tamanho médio. Uma prensa deste tipo tem valores predeterminados para as alturas e distâncias de transferências entre matrizes, o que faz com que o projeto das matrizes tenha que levar em conta estas limitações.



Figura 2.11 – Prensas “*Transfer*” – Cortesia QUANTECH - ATZ

As prensas tipo “*tandem*”, Fig. 2.12, são utilizadas principalmente para peças grandes que não possam ser abarcadas por uma prensa tipo “*transfer*”.



Figura 2.12 – Prensa do tipo “*Tandem*” – Cortesia QUANTECH - ATZ

Na estampagem de chapas metálicas executada por uma prensa, um movimento duplo é requerido para a execução da operação completa: no primeiro movimento, o prensa-chapas é baixado em direção à periferia da chapa para sujeitá-la na posição adequada. No segundo movimento, o punção é movimentado de encontro à matriz, levando consigo a chapa a ser conformada na cavidade da matriz que dará a forma da peça estampada, conforme ilustra a Fig. 2.13:

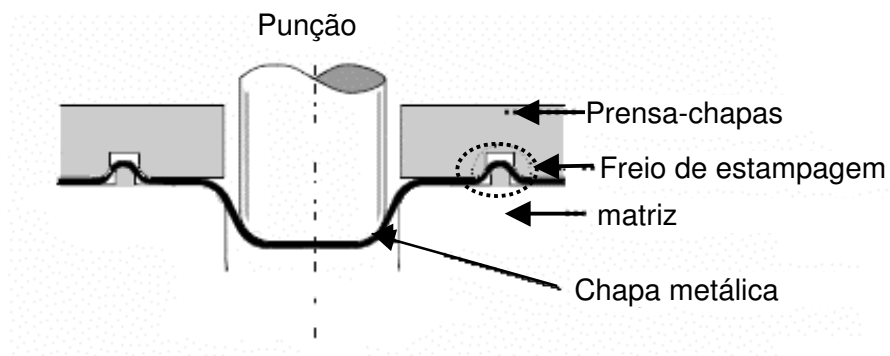


Figure 2.13 – Esquema de uma estampagem profunda com freios.

Na Figura 2.14 pode-se visualizar separadamente, cada uma das ferramentas típicas utilizadas numa estampagem, respectivamente representadas, de cima para baixo, pelo punção, pelo prensa-chapas, pela chapa e pela matriz:

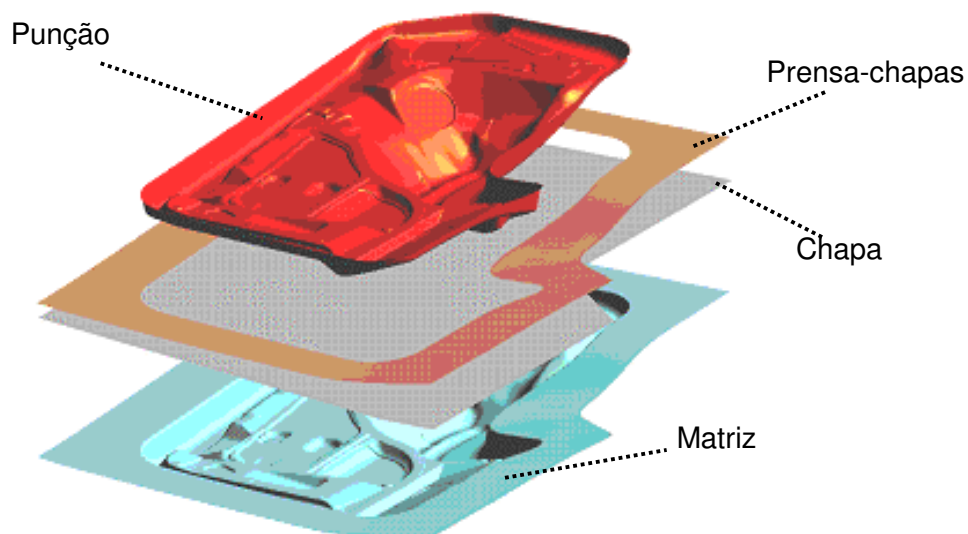


Figura 2.14 – Ferramentas usadas numa estampagem profunda – Cortesia QUANTECH – ATZ

2.4 Freios de estampagem

2.4.1 Generalidades

A obtenção de peças estampadas com uma boa qualidade está fortemente associada ao controle adequado do fluxo de material estampado para dentro da cavidade da matriz. Trinças, dobras ou rugas na peça podem ser evitadas por meio deste controle feito através de uma força de retenção (FR). Esta força, como já visto, provém ou do prensa-chapas, ou dos freios ou de ambos. Do prensa-chapas resulta a FR oriunda da fricção entre a chapa e a ferramenta. Quando uma alta FR é requerida para a obtenção de uma peça estampada sem defeitos, então altos valores de força do prensa-chapas são requeridos. Isto pode causar desgaste excessivo nas ferramentas e/ou defeitos nas peças estampadas. Como em alguns casos, a força requerida no prensa-chapas pode até ultrapassar a capacidade da prensa, desgastes excessivos podem ocorrer nas ferramentas.

Por estes motivos, na estampagem de peças com geometria complexa, tais como grandes peças automotivas, onde se requerem altas FR's, o uso dos freios se faz necessário na obtenção de altas FR's, em níveis de pressões mais baixos na prensa, de acordo com Tufekci et al. (1994).

2.4.2 Projeto de freios de estampagem

Um freio de estampagem convencional de seção circular consiste de dois componentes: uma saliência de seção transversal circular e uma ranhura que se localiza na matriz de estampagem na qual se projeta a referida saliência – ver Fig. 2.15.

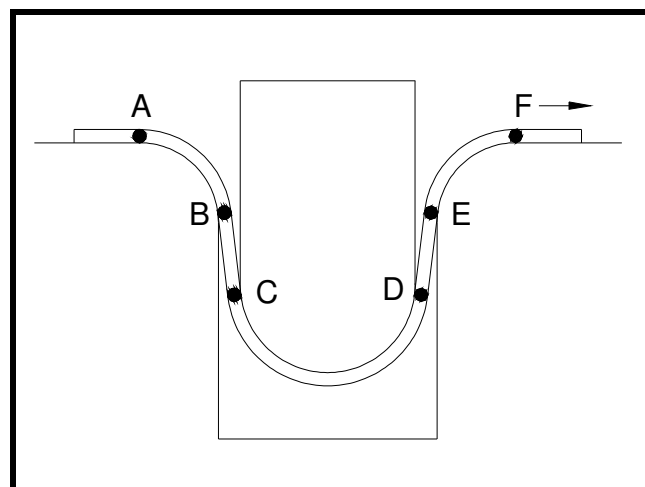


Figura 2.15 – Diagrama de flexão e flexão inversa em um freio de estampagem – Xu et al., 1998.

A Figura 2.15 ilustra o desenvolvimento da deformação e fricção em um freio de seção circular. À medida que a chapa passa através do freio, vai se deformando a partir do ponto A, flexão. Neste ponto, a chapa começa a se deformar com o raio de entrada da matriz. O deslizamento que se desenvolve em seguida, entre os pontos A e B, é responsável pela origem das forças de fricção. A partir do ponto B, a chapa se endireita e deixa de curvar-se com o raio de entrada da matriz, flexão inversa. Esta seqüência de flexão, deslizamento e flexão inversa contribui para aquela parcela da FR referente ao primeiro ombro de entrada da matriz. Similarmente, o mesmo processo se passa nos trechos CD e EF. O valor total da FR se compõe das contribuições devidas ao trabalho realizado nas três seqüências de flexão, flexão inversa e deslizamento mais a força de atrito entre o freio de estampagem e a chapa estampada.

A Figura 2.16 traz as geometrias convencionais das seções dos freios de estampagem, as quais podem ser: circular, retangular, triangular, trapezoidal ou assimétrica.

Quando um freio de seção retangular – *flat bottom* – é utilizado, há quatro seqüências de flexão e flexão inversa sobre os raios de arredondamentos, na ranhura da matriz. Teoricamente, este tipo de freio tem potencial para aumentar a contribuição à FR por causa de uma flexão extra em uma das regiões curvas do macho do freio. Porém, este aumento vai depender de outros parâmetros como as condições de lubrificação e da folga entre a chapa e o freio.

De acordo com Nine (1978), se mais flexões podem ser adicionadas com um único freio, ao invés de se adicionar outros freios, então os possíveis danos na peça decorrentes da FR podem ser amenizados. Isto poderia, em tese, resultar em peças com melhor acabamento.

O desempenho dos freios com maior número de saliências é relativamente mais insensível às condições de lubrificação, segundo Wang et al. (1991). Então, dependendo destas condições, os freios retangulares são mais adequados àquelas situações em que o atrito varia, enquanto a FR se mantém constante.

Pode-se observar na Fig. 2.16 que a largura do freio de seção circular é determinada pelo raio do freio, isto é, $B = 2R$. Para se sobrepor a esta limitação, um freio triangular pode ser utilizado, alternativamente. Este tipo de freio é uma modificação do freio convencional de seção circular e possibilita quase a mesma FR para um mesmo raio. A base mais larga deste freio, no entanto, permite uma melhor resistência aos esforços cisalhantes oriundos da força que puxa a chapa através do freio, segundo Tufekci, (1993). Além disto, o raio R do freio triangular pode ser tão pequeno quanto maior se queira a FR. Contudo, um raio muito pequeno pode aumentar a possibilidade de danos, tanto na chapa, quanto nas ferramentas.

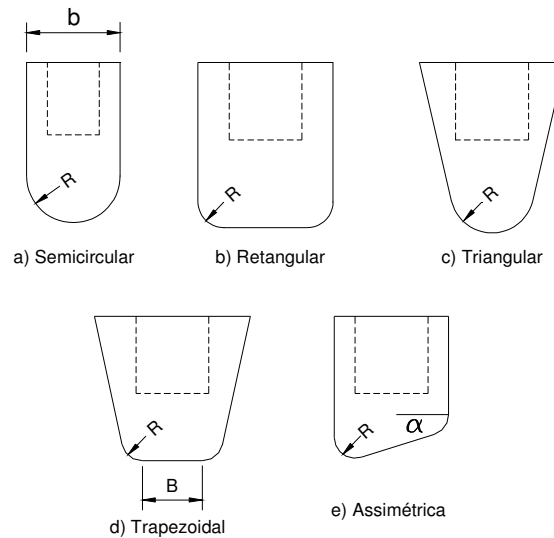


Figura 2.16 – Geometrias das seções de freios mais usuais. a) Semicircular; b) Retangular; c) Triangular d) Trapezoidal; e) Assimétrica – Xu et al., 1998.

A Figura 2.16 (d) ilustra ainda que, se $B = 0$, o freio trapezoidal se transforma em triangular. Todavia, se B é maior que zero, o desgaste da superfície inferior do freio é bastante reduzida, em decorrência da baixa pressão da chapa ao deslizar sobre o freio nesta região. Neste sentido, o freio de seção trapezoidal pode ser considerado melhor que o triangular.

O freio de seção trapezoidal pode também ser considerado como uma modificação do freio retangular. Enquanto um freio retangular não possui limitação na largura de sua base quando se usam pequenos raios de arredondamentos, o aumento de sua largura para se obter maior robustez em uma seção transversal pode acarretar num aumento do arranque de partículas da chapa. Mas, se um freio trapezoidal é usado com a mesma largura de base que a de um freio retangular, então é possível que se evite a perda de material da chapa estampada, sem o comprometimento da resistência do freio.

A Figura 2.16(e) ilustra também a geometria de um freio assimétrico típico. Dependendo do ângulo α , é possível se criar seis ou oito seqüências de flexão e deflexão. Quando $\alpha = 0$, este freio se torna um freio de seção retangular. Assim, um freio assimétrico é uma combinação de um retangular e um triangular e seu ângulo de contato α pode ter qualquer valor entre 0 e 180 graus. A vantagem desta geometria de freio é a de possuir uma maior facilidade de ser usinada que a geometria triangular. Além disto, esta geometria possibilita um amplo espectro de valores para a FR.

Os freios de estampagem estão geralmente posicionados nas bordas da matriz ou na região interna do prensa-chapas. A ranhura onde penetra o macho do freio de estampagem

pode ou não ter a mesma geometria do freio. Se a geometria é a mesma, então há uma compressão mais justa da chapa contra a ranhura localizada na matriz. Neste caso, ainda há o fato de um aumento na FR em decorrência do atrito adicional da chapa contra a face oposta da ranhura que acompanha a geometria da saliência do freio. Além disto, este tipo de ranhura previne contra possíveis rugas que possam ocorrer na peça estampada. Por outro lado, a usinagem deste tipo de ranhura consome muito tempo e o ajuste da folga entre a chapa e o freio é mais complicado, sendo, portanto um fator limitador do uso mais geral das ranhuras com geometrias que acompanham as geometrias da saliência do freio.

A grande maioria das formas das ranhuras, entretanto, não possui usualmente a forma complementar das saliências dos freios de estampagem. A chapa estampada quase sempre está em contato efetivo somente com a face do macho do freio de estampagem. A vantagem deste tipo de ranhura é a sua facilidade de usinagem e de ajuste. A ranhura mais amplamente utilizada – e por isso a escolhida para o modelo desta tese – possui uma seção retangular que não entra em contato direto com a chapa estampada. Há outros tipos de geometrias para a seção transversal de ranhuras menos usuais em Zharkov (1995).

O freio de estampagem pode ser montado ou na parte superior do prensa-chapas ou na inferior. Esta opção depende de diversas considerações, de acordo com Weidemann (1978) e Tufekci et al. (1994), as quais dependem de fatores como instalação, ajuste e manutenção do freio e da ranhura, condições de trabalho e aporte de material de chapa na prensa.

Os materiais utilizados na usinagem dos freios são preferencialmente aços com fração volumétrica de carbono em torno de 1%, de maneira a possibilitar a obtenção do endurecimento e acabamento superficiais mais adequados às superfícies de contato, segundo Waller (1978). Entretanto, o material do freio também depende de requisitos específicos do processo de estampagem. Aços com 0,5% de carbono também têm sido utilizados como materiais de usinagem dos freios.

Um projeto típico de um freio está publicado em "SME Die Design Handbook" (1990), no qual são feitas as especificações técnicas de projetos para freios de estampagens comumente usados na indústria norte-americana para médias e grandes peças estampadas. De acordo com Herderich (1990), a dimensão B do freio – ver Fig. 2.16 – pode assumir valores tão pequenos quanto 6,4 mm. Parâmetros de freios utilizados na indústria russa podem ser encontrados em Zharkov (1995). Os parâmetros de projeto dos freios de estampagem utilizados na indústria alemã estão padronizados em VDI 3141(1990).

Genericamente, numa comparação entre os parâmetros correspondentes utilizados no projeto dos freios de estampagem de peças de médios e grandes portes, é possível

perceber que os maiores valores são os da indústria russa, os da indústria americana são os menores enquanto que os valores alemães estão entre ambos.

A Tabela 2.1 traz alguns valores recomendados pela norma alemã VDI 3141(1990) para os parâmetros dos freios de estampagem, em caráter ilustrativo:

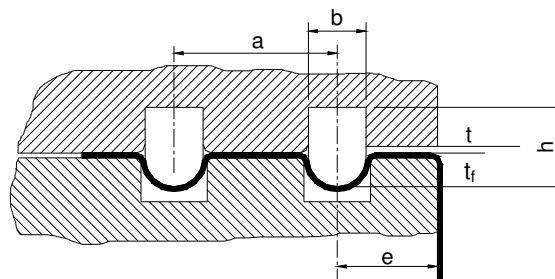
Tabela 2.1 – Parâmetros para freios de acordo com VDI 3141, em mm, Xu et al.(1998).

2R = B	h	e	t_f	a	Rosca
10 _{-0,036}	8	20	4	32	M5x12
13 _{-0,043}	10	25	5	38	M6x20
16 _{-0,043}	13	32	6	45	M6x25

A Figura 2.17 ilustra o significado geométrico de cada um dos parâmetros da Tab. 2.1.

No processo de estampagem profunda de chapas metálicas, há parâmetros que são controláveis e outros não. Os requisitos de projetos para os freios de uma matriz não são geralmente intercambiáveis, o que torna a experiência prática durante a execução do projeto relativamente importante. Isto significa que, atualmente, os dados constantes em livros sobre este tema ainda são utilizados apenas como referência no projeto de matrizes em estampagem. Assim, algumas informações experimentais se tornam relevantes no projeto de freios, por exemplo, no que tange aos fixadores dos freios na matriz. O principal fator que determina o número de fixadores para os freios na matriz é a curvatura dos freios de estampagem, de acordo com Zharkov (1995):

- Para freios planos, a distância entre fixadores para os freios deve ser de até 100 mm;
- Para freios com raio de curvatura superior a 150 mm, a distância entre fixadores deve estar entre 60-70 mm;
- Para freios com raio de curvatura menor que 150 mm, recomenda-se que a máxima distância entre fixadores esteja entre 25 e 40 mm.



(a)

Figura 2.17 – a) Desenho esquemático dos parâmetros da Tabela 2.1– Xu et al., 1998.

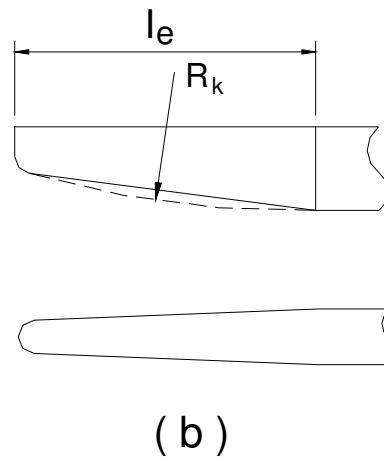


Figura 2.17 – b) região final do freio de estampagem – Xu et al., 1998.

Um projeto inadequado para a região terminal do freio pode afetar a formabilidade da chapa metálica, segundo Xu et al. (1995). Objetivando-se reduzir a ocorrência de deformações excessivas e trincas na peça estampada, deve-se projetar a parte final do freio tendo-se em conta as seguintes características, segundo Weidemann (1978) e VDI 3141 (1990):

- A ranhura onde se insere a saliência do freio deve possuir uma pequena folga t_f entre a chapa e o freio (Fig. 2.17a):

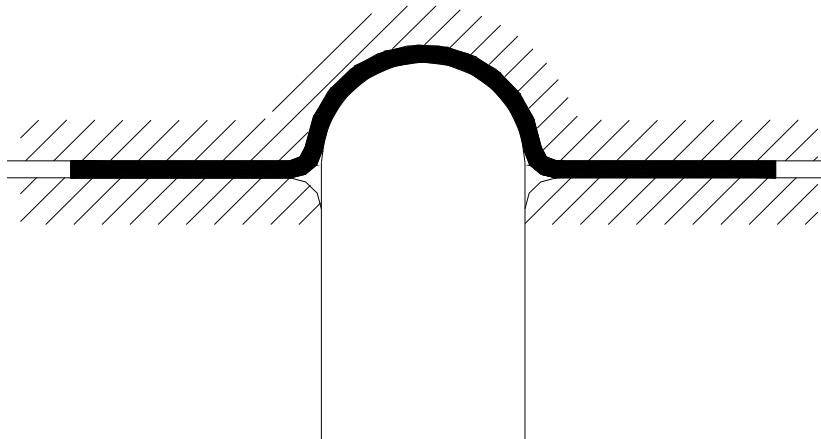


Figura 2.18 – A ranhura com a mesma forma do freio – Xu et al., 1998.

- A parte final do freio deve possuir uma projeção l_e em torno de 50 mm – linha contínua – ou um grande raio R_k – linha tracejada – como se pode ver na Fig. 2.17 b.

Às vezes mais de uma fila de freios pode ser posicionada em regiões onde há a necessidade de um grande controle de fluxo de metal para dentro da cavidade da matriz. De acordo com Zharkov (1995), diversas considerações podem ser feitas acerca do número de filas de freios, a saber:

- Para a estampagem de peças grandes, duas ou mais filas de freios podem ser necessárias em função das especificidades de cada caso e da necessidade de fazer o controle da recuperação elástica após a estampagem;
- Para o adequado controle de rugas nas peças estampadas, pode ser necessário um aumento no número de filas de freios com uma conseqüente redução da espessura da chapa;
- Para um melhor controle local do fluxo de material para dentro da matriz, filas de freios mais curtos podem ainda ser utilizados em associação aos freios mais longos, onde se necessita um aumento da FR, localmente;
- De acordo com Herderich et al.(1990), estima-se que a FR e a FP (Força do Prensa-chapas) aumentam proporcionalmente com o quadrado ou o cubo do número de filas de freios.

O Método do Freio Equivalente é utilizado porque os raios que definem a curvatura dos freios de estampagem são geralmente muito pequenos, se comparados às curvaturas das demais ferramentas de estampagem. Destes altos gradientes de geometria usualmente se originam problemas numéricos, como dificuldades na convergência da integração da equação que governa este fenômeno ou ainda altos custos computacionais para a simulação do problema tridimensional. Por isso, nos procedimentos numéricos para solucionar a integração da referida equação, STAMPACK®, e também outros códigos de simulação de estampagem de chapas, consideram os freios como outra ferramenta e os modela com maior simplicidade, isto é, como se fossem uma linha sobre a qual existe uma FR distribuída ao longo de seu comprimento.

Em algumas indústrias ainda se podem encontrar os freios de estampagem ativos, providos de sensores que comandam certos ajustes às diferentes condições de trabalho sob as quais se desenvolvem as estampagens de chapas. Estas condições são influenciadas pelas propriedades das chapas, lubrificação, dimensões do *blank*, desgaste e condições de acabamento da matriz e temperatura ambiente, as quais estão constantemente variando de chapa para chapa, fornecedores, etc. O valor da FR requerido para um bom acabamento da peça estampada pode variar durante a estampagem. Isto faz com que o freio tenha que se adaptar às diferentes condições, freqüente e rapidamente. Além disto, para se melhorar a formabilidade e evitar sulcos de deformação oriundos da passagem da chapa através dos freios, o estado de tensão da mesma pode ser controlado durante o processo, manipulando-

se o valor da FR. Um sistema, portanto, que pudesse detectar tais condições importantes neste processo, compará-las com as condições desejadas, determinar as discrepâncias e ajustar-se adequadamente aos valores ótimos em tempo real, seria um sistema desejável para uma matriz “inteligente”.

2.4.3 Estado da arte dos modelos propostos para a FR

O projeto de um freio de estampagem requer um modelo para se estimar a FP que leve em conta quatro tipos de influências: da geometria do freio, da geometria da chapa metálica, das propriedades de materiais e das condições de contorno. Para este objetivo, diversos modelos para a predição da FR foram desenvolvidos. A Tab. 2.2 traz um resumo cronológico dos modelos propostos para a FR e FP, sintetizando o estado da arte referente ao tema desta tese.

Weidemann (1978), em seu modelo, assume que a tensão devida à flexão ao longo da seção transversal da chapa é constante sempre, negligenciando variação de tensões tratativas e compressivas em diferentes fibras, e que a tensão de flexão média ao longo da espessura da chapa é dada por:

$$\sigma_{med} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \quad (2.1)$$

onde $\bar{\sigma}$ representa a tensão de escoamento do material que encrua devido à deformação em cada flexão pela qual passa a chapa.

Tabela 2.2 – Modelos propostos para a FR e FP, de acordo com Xu et al.(1998).

MODELO	HIPÓTESES	APLICAÇÕES	CARACTERÍSTICAS	PRECISÃO
C. WEIDEMANN (1978)	- Material: rígido-plástico, isotrópico, efeito Bauschinger; - Atrito: lei de Coulomb; - Sem variação de tensão ou deformação ao longo da espessura da chapa; - Nenhum efeito de tensão sobre o momento fletor.	- Somente calcula a FR; - Freios circulares, retangulares e freios de contorno; - Uma ou mais fila de freios;	- Forma simples e de fácil aplicação; - Requer uma estimativa da FP e do ângulo de curvatura da chapa; - Raio de flexão da chapa igual ao raio da ferramenta;	Em torno de 40% para alumínio e uma subestimação de 60 % para o aço.

MODELO	HIPÓTESES	APLICAÇÕES	CARACTERÍSTICAS	PRECISÃO
<i>N. M. WANG (1982)</i>	- Material: rígido-plástico, isotrópico, sem efeito Bauschinger, critério de escoamento anisotrópico de Hill; - Atrito: lei de Coulomb.	- FR e FP rígido-plástico, isotrópico, efeito Bauschinger; - Uma ou mais filas de freios; - Qualquer geometria de freio.	- Procedimento numérico <i>step by step</i>; - Modelo baseado em equilíbrio de momentos; - Raio da ferramenta igual ao raio de flexão da chapa;	Cerca de 15% para A-k steel e 20% para alumínio
<i>B.S. LEVY (1983,1985)</i>	- Mesmas hipóteses de Wang; - Atrito: lei de Coulomb.	- Somente calcula a FR; - Uma fila de freios circulares com penetração completa;	- Forma explícita semi-empírica; - Parâmetro determinado por dados experimentais; - Derivação baseada no princípio dos trabalhos virtuais;	Aproximadamente 10%
<i>J. M. YELLUP (1984,1985)</i>	- Mesmas hipóteses de Wang; - Chapa está dividida em fibras ao longo da espessura.	- FR e FP isotrópico, efeito Bauschinger; - Distribuição de tensão e deformação; - Freios circulares, de contorno, retangulares, etc.	- Solução com procedimentos numéricos; - Possibilidade de incorporação de diferentes leis de materiais; - Uso da forma real da chapa no modelo;	Menos de 10%
<i>T.B. STOUGH TON (1988)</i>	- Material para a FR: mesmas de Wang; - Material para a FP: elastoplástico	- FR e FP; - Uma ou mais filas de freios; - Freios circulares - Potencial para se usar também em outras geometrias;	- Formulação analítica completa de fácil aplicação; - Uso de um raio de flexão efetivo; - Uso do princípio dos trabalhos virtuais na obtenção da equação;	Subestima a FR em torno de 10% com relação aos dados experimentais de Nine (1978) e em 13% ou menos a FP.
<i>S. KLUGE (1992)</i>	- Material: similar ao modelo de Weideman, com encruamento a cada flexão.	- Somente calcula a FR; - Freios semicirculares; - Uma ou duas filas de freios;	- Formulações analítica e semi-empírica completas e de fácil aplicação; - Necessidade de estimação da FP; - Raio de flexão da chapa igual ao raio da ferramenta;	Na forma analítica, subestima aços entre 20 e 30%. Melhor precisão para a forma semi-empírica.
<i>L.R. SANCHEZ e K.J. WEIMANN (1988)</i>	- Material para a FR: mesmas de Wang; - Inclui efeito Bauschinger.	- FR e FP; - Distribuição de tensão e deformação; - Freios circulares e outros;	- Solução iterativa numérica; - Divide a chapa em várias fibras ao longo da sua espessura; - Determinação da geometria da chapa pelo modelo; - Ferramentas e freios considerados circulares;	Em torno de 10 % ou menos.

O trabalho de plastificação devido à flexão é o produto entre σ_{med} e a deformação média devida à flexão, dada pela Eq.(2.2) a seguir:

$$\varepsilon_{med} = \frac{t}{4 \left(r + \frac{t}{2} \right)} \quad (2.2)$$

onde t e r são, respectivamente, a espessura da chapa e o raio de flexão da chapa em torno da ferramenta. Ao se computar adicionalmente a isto as contribuições devidas à força de flexão e de atrito, a FR pode ser estimada, aproximadamente. Os erros devidos às simplificações inerentes a este modelo redundam em uma subestimação da FR em torno de 40-60%, quando comparada aos dados experimentais.

Wang (1982) propôs um modelo que considera um material mais realista com anisotropia e que segue a lei de encruamento de Hollomon – Lei de Potência de Encruamento. Neste modelo leva-se em conta a influência das tensões e deformações ao longo da espessura da chapa na flexão e flexão inversa – *unbending* – e uma equação de equilíbrio de momentos em torno de um centro de flexão instantâneo é utilizado para modelar o processo sob o qual se passa o fenômeno físico em questão. Neste modelo, um Procedimento numérico é aplicável a diferentes geometrias de freios. O número de freios pode ser arranjado em mais de uma fila de freios de estampagem. Utilizando esta mesma abordagem, Karima (1989) desenvolveu um programa denominado DRAWBEAD para simulações 2-D em projetos de matrizes de estampagem.

Levy (1983) e Levy (1985), utilizando-se do Princípio dos Trabalhos Virtuais, obteve uma fórmula relativamente simples para a predição da FR:

$$FR = a_0 + (a_1 + a_2 m) x_1 \quad (2.3)$$

na qual,

$$x_1 = f(\dot{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}, w, t, R, n, m, r) \quad (2.4)$$

é uma função das propriedades de materiais e da geometria do freio e da chapa. Os parâmetros a_0 , a_1 , a_2 são determinados através da calibração da equação com base em dados experimentais. Utilizando-se a base de dados de Nine (1978), este modelo pode fazer

uma predição da FR com um erro médio em torno de 10%. Ressalte-se, entretanto que este modelo possui uma natureza semi-empírica e que sua precisão está associada à qualidade dos dados experimentais. Este modelo possui ainda a restrição de ter a_0 maior que zero sempre, o que faz com que não tenha bons resultados quando x_1 se aproxima de zero.

O modelo de Levy pode ser considerado uma boa primeira aproximação e por isto foi ponto de partida para o Modelo de Stoughton (1988) que obteve um modelo mais geral com uma equação analítica fechada para o problema. Isto foi feito integrando-se o “Trabalho de Deformação” ao longo da espessura da chapa e através do freio. Este procedimento também se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais. Adotando-se considerações cuidadosamente elaboradas para o processo de flexão sob o qual a chapa está submetida, geometria do freio e da chapa, o modelo de Stoughton logrou eliminar a necessidade dos parâmetros experimentais do modelo de Levy. Uma característica importante deste modelo é a adoção do raio efetivo de flexão da chapa com o qual se pode, mesmo com pequenas penetrações, manter a precisão para os casos onde há grandes penetrações do freio na ranhura da matriz. O erro percentual dos resultados deste modelo, se comparados aos dados experimentais de Nine (1978), é de aproximadamente 5 %, de acordo com Xu (1998).

Semelhantemente ao modelo de Weidemann, o modelo de Kluge calcula o momento fletor a cada flexão, desconsiderando a influência da tensão. A FR é computada pela soma de todas as contribuições das forças de flexão, flexão inversa e do atrito. O efeito do encruamento é levado em conta calculando-se a média das deformações a cada flexão. Consideram-se iguais os ângulos de curvatura do freio e dos ombros da matriz. Negligencia-se ainda a redução da espessura da chapa devida à flexão e à tensão. Todas estas simplificações deste modelo levam a resultados que subestimam a FR em torno de 20 a 30%, quando comparados a dados experimentais.

O modelo de Yellup (1984) é semelhante ao modelo desenvolvido por Wang. O equilíbrio de momentos com respeito ao centro de flexão é considerado como o ponto de partida para o modelo do freio de estampagem. Entretanto, a chapa no modelo de Yellup está dividida em um número discreto de fibras ao longo da espessura da chapa, em relação às quais se determinam o campo de tensões e de deformações para cada fibra. A força e o momento total para a chapa é calculada integrando-se ao longo de todas as fibras que compõem sua espessura, o que permite a utilização de diferentes modelos de materiais. Com este modelo, Yellup pôde demonstrar que, para pequenas penetrações do freio, ao se utilizar o raio da matriz, ao invés do raio efetivo de flexão da chapa, pode-se superestimar a FR em até 40%. No modelo de Yellup (1985) o que se faz é propor um método geométrico puro para se estimar este raio efetivo de flexão da chapa que passa pelo freio de estampagem, donde se obtiveram melhores resultados para a predição da FR.

O modelo de Sanchez e Weinmann (1988), baseado nos modelos de Yellup e de Wang, é um modelo mais geral na simulação da deformação mecânica da chapa ao passar por um freio que adota o conceito de análise iterativa do modelo de Wang. A chapa é dividida em um determinado número de fibras virtuais ao longo de sua espessura, que difere das camadas do modelo de Yellup.

O efeito de Bauschinger é o fenômeno durante o qual um corpo de prova submetido a um carregamento de tensão ou compressão na região plástica, ao ser submetido novamente a um carregamento no sentido inverso, possui uma tensão de escoamento substancialmente menor que a tensão de escoamento no sentido original. Este efeito é levado em consideração neste modelo.

Além disto, ao contrário de outros modelos onde a geometria da chapa e o arco de contato devem ser determinados *a priori*, neste modelo se faz a predição da geometria da chapa deformada durante a iteração numérica. Esta geometria deformada é afetada por todos os parâmetros do processo, sejam geométricos ou físicos. Tais características possibilitam um grande potencial de aplicabilidade na predição da FR em freios ativos, nos quais a penetração do freio é controlada durante o processo. Possui ainda a vantagem de uma boa acessibilidade aos parâmetros usuais em projetos de matrizes.

2.4.4 Modelos em EF para a FR

O Método dos Elementos Finitos, por ter se mostrado cada vez mais uma ferramenta poderosa na análise dos problemas em diversas áreas, incluso em estampagem de chapas metálicas, tem dado origem a um crescente número de modelos para melhor estimar a FR e a FP. Entretanto, a simulação deste tipo de problema através de uma abordagem tridimensional ainda possui um custo computacional elevado. Disto redundaram vários modelos em 2-D para a simulação dos freios de estampagem em EF, objetivando reduzir os custos computacionais, além de abordar os seguintes temas influentes na predição da FR:

- Desenvolvimento de modelos em EF para adequadamente computar o problema do contato dinâmico com atrito entre os freios de estampagem e a chapa metálica, Cao e outros (1992) e Chabrand (1992, 1996);
- Uma caracterização detalhada do comportamento do campo de deformações da chapa ao passar por um freio de estampagem pode ser de difícil obtenção – ainda que possível. Entretanto, modelos para o campo de tensões e deformações para uma chapa que passa por um freio de estampagem podem ser encontrados em Cao e outros (1992). Modelos da distribuição da pressão de contato entre a chapa e o freio estão descritos em Chabrand e outros (1992) e ainda em Carleer e outros (1994). Os modelos em EF demonstram que altas pressões de contato ocorrem em

uma pequena zona de contato localizada próxima ao ponto do início desta região de contato, o que está em consonância com as observações experimentais de Nine (1978), apesar destes mesmos modelos também predizerem que as distribuições de pressões de contato são não homogêneas. Isto não está de acordo com as hipóteses de distribuição uniforme da pressão de contato ou de crescimento linear da pressão de contato que poderia aplicar-se aos freios de estampagem, segundo o mesmo autor destes experimentos;

- Geração da FR e das deformações ao longo da espessura da chapa que devem ser aplicadas como condições de contorno em um modelo tridimensional em EF, em Carleer e outros (1994, 1996). Nesta abordagem, as distribuições da FR ao longo do comprimento do freio de estampagem e das deformações da chapa através de uma simulação 2-D em EF são inicialmente feitas através do ajuste de uma curva como função do deslocamento do punção. Posteriormente, no modelo tridimensional, estas funções são aplicadas nas regiões onde se localizariam os freios, como condições de contorno, de maneira a se obter um efeito similar àquele que se obteria ao se simular um freio tridimensional – de alto custo computacional. Esta abordagem é denominada Método do Freio Equivalente.

O Capítulo Metodologia desta tese destina-se a se estabelecer os detalhes da **metodologia proposta para a predição da FR**. Esta metodologia emprega o Teorema Pi de Buckingham para estabelecer uma equação de predição da FR que se utiliza de simulações numéricas feitas para parâmetros de natureza geométrica, de materiais e de atrito em um código explícito de EF.

Nesta abordagem, durante as simulações, as seguintes hipóteses foram consideradas: critério de escoamento anisotrópico de Hill para os valores simulados, lei de atrito de Coulomb, velocidade de deslocamento do punção constante e igual 0,90 m / min, aplicável aos freios de seção transversal circular. O erro médio nas predições com a equação obtida por esta metodologia está próximo dos 5 % para os dados experimentais de Nine (1978), utilizados na validação e nas provas com o modelo proposto.