

MELCONIAN, Marcos Vinícius. "Revisão Bibliográfica", p.17-24. In MELCONIAN, Marcos Vinícius. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos**, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. ISBN 978-85-8039-090-2 <http://dx.doi.org/10.5151/BlucherOA-melconian-02>

# 2

## CAPÍTULO

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura apresenta estudos sobre freios de estampagem, observando-se as variáveis estudadas que preponderam no modelo aplicado ao problema em estudo, além dos resultados obtidos.

Os principais objetivos deste capítulo são revisar o estado da arte na área e analisar como o assunto tem sido tratado até o presente momento.

O projeto de um freio de estampagem requer um modelo para estimar FR e FP de forma a se considerar 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 foram desenvolvidos. A Tabela 1 traz um resumo cronológico dos trabalhos já elaborados.

**Tabela 1 – Modelos propostos para a FR e FP, de acordo com Xu *et al.* (1998), *apud* Duarte (2007)**

MODELO	HIPÓTESES	APLICAÇÕES	CARACTERÍSTICAS	PRECISÃO
C. WEIDEMANN (1978)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material: rígido-plástico, isotrópico, efeito Bauschinger</li> <li>- Atrito: Lei de Coulomb</li> <li>- Sem variações de tensão ou deformação ao longo da espessura da chapa</li> <li>- Nenhum efeito de tensão sobre o momento fletor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Somente calcula a FR</li> <li>- Freios circulares, retangulares e freios de contorno</li> <li>- Uma ou mais fila de freios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forma simples e de fácil aplicação</li> <li>- Requer uma estimativa da FP e do ângulo de curvatura da chapa</li> <li>- Raio de flexão da chapa igual ao raio da ferramenta</li> </ul>	- Em torno de 40% para alumínio e uma subestimação de 60% para o aço
N. M. WANG (1982)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material: rigidoplástico, isotrópico, sem efeito Bauschinger, critério de escoamento anisotrópico de Hill</li> <li>- Atrito: lei de Coulomb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- FR e FP rigidoplástico, isotrópico, efeito Bauschinger</li> <li>- Uma ou mais filas de freios</li> <li>- Qualquer geometria de freio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimento numérico <i>step by step</i></li> <li>- Modelo baseado em equilíbrio de momentos</li> <li>- Raio da ferramenta igual ao raio de flexão da chapa</li> </ul>	- Cerca de 15% para A-k steel e 20% para alumínio
B.S. LEVY (1983)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesmas hipóteses de Wang</li> <li>- Atrito: lei de Coulomb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Somente calcula a FR</li> <li>- Uma fila de freios circulares com penetração completa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forma explícita semi-empírica</li> <li>- Parâmetro determinado por dados experimentais</li> <li>- Derivação baseada no princípio dos trabalhos virtuais</li> </ul>	- Aproximadamente 10%
J. M. YELLUP (1984)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesmas hipóteses de Wang</li> <li>- Chapa está dividida em fibras ao longo da espessura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- FR e FP iso-plástico, isotrópico, efeito Bauschinger</li> <li>- Distribuição de tensão e deformação</li> <li>- Freios circulares, de contorno, retangulares, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solução com procedimentos numéricos</li> <li>- Possibilidade de incorporação de diferentes leis de materiais</li> <li>- Uso da forma real da chapa no modelo</li> </ul>	- Menos de 10%
T.B. STOUGH TON (1988)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material para a FR: mesmas de Wang</li> <li>- Material para a FP: elastoplástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- FR e FP</li> <li>- Uma ou mais filas de freios</li> <li>- Potencial para se usar também em outras geometrias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formulação analítica completa de fácil aplicação</li> <li>- Uso de um raio de flexão efetivo</li> <li>- Uso do princípio dos trabalhos virtuais na obtenção da equação</li> </ul>	Subestima a FR em torno de 10% com relação aos dados experimentais de Nine (1978) e em 13% ou menos a FP.
L.R. SANCHEZ e K.J. WEIMANN (1988)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material para a FR: mesmas de Wang</li> <li>- Inclui efeito Bauschinger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- FR e FP</li> <li>- Distribuição de tensão e deformação</li> <li>- Freios circulares e outros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solução iterativa numérica</li> <li>- Divide a chapa em varias fibras ao longo da sua espessura</li> <li>- Determinação da geometria da chapa pelo modelo</li> <li>- Ferramentas e freios considerados circulares</li> </ul>	- Em torno de 10% ou menos
S. KLUGE (1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material: similar ao modelo de Weideman, com encruamento a cada flexão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Somente calcula a FR</li> <li>- Freios semicirculares</li> <li>- Uma ou duas filas de freios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formulações analíticas e semi-empíricas completas e de fácil aplicação</li> <li>- Necessidade de estimativa da FP</li> <li>- Raio de flexão da chapa igual ao raio da ferramenta</li> </ul>	- Na forma analítica, subestima aços entre 20 e 30%. Melhor precisão para a forma semi-empírica

O modelo proposto por Weidemann (1978), assume que a tensão devida à flexão ao longo da seção transversal da chapa é constante, que o raio da chapa conformada assume o mesmo raio do freio e das ferramentas.

Wang (1982) propôs um modelo que considera um material com anisotropia e que segue a lei de encruamento de Hollomon. O número de freios também pode ser arranjado em mais de uma fila de freios de estampagem. Este modelo pode fazer uma predição da FR com um erro médio em torno de 15% para o aço A-K e 20% para ligas de alumínio.

Levy (1983) se baseou nos estudos de Wang (1982) e, utilizando as mesmas hipóteses para os materiais, apresentou um modelo baseado no conceito de trabalhos virtuais. Utilizando a base de dados de Nine (1978), este modelo pode fazer uma predição da FR com um erro médio de 10%.

Yellup (1984) desenvolveu um modelo semelhante ao desenvolvido por Wang. Como ponto de partida é considerado o equilíbrio de momentos em relação ao centro de flexão. A força e o momento total são calculados integrando-se ao longo de todas as fibras que compõem a espessura da chapa, permitindo a utilização de diferentes modelos de materiais.

Sanchez e Weinmann (1988), desenvolveram um modelo geral baseado nos estudos de Yellup e de Wang, com relação à análise interativa da simulação da deformação mecânica da chapa ao passar por um freio. A chapa é dividida em um determinado número de fibras virtuais ao longo de sua espessura, que difere das camadas do modelo de Yellup.

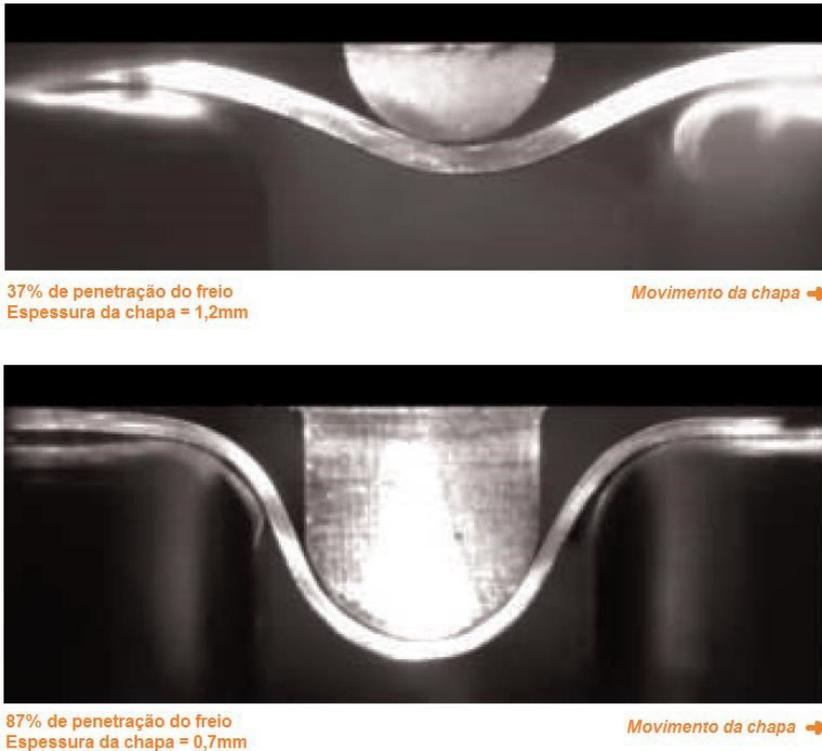
Stoughton (1988), baseou-se nos resultados obtidos por Levy e elaborou um modelo descrito por uma equação analítica fechada. Isto foi feito integrando-se o “Trabalho de deformação” ao longo da espessura da chapa e através do freio.

Semelhante ao modelo de Weidemann, o modelo de Kluge (1992) 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.

Outros trabalhos foram publicados mais recentemente em que são realizados estudos empíricos e numéricos dos freios de estampagem.

Keeler (2000) da Keller Technologies, em publicação na revista *Metalforming*, referência no setor industrial metalúrgico, aponta que, à medida que o material deforma em torno do freio quando é penetrado para dentro da cavidade, a força

de retenção é estabelecida com maior intensidade. A Figura 2 demonstra que, conforme o freio aumenta a penetração na cavidade, o raio da chapa diminui, assumindo o raio do próprio freio e causando um aumento significativo na força de retenção. Isto mostra que a espessura da chapa também é um fator muito sensível nesta força, tendo em vista que esta variável afeta a conformação da chapa em torno do freio.



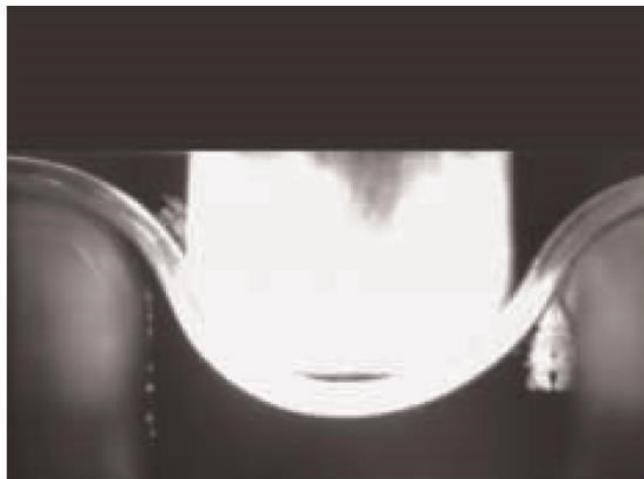
**Figura 2** – Imagem da deformação da chapa em função da penetração do freio, (KEELER, 2000)

A situação é muito mais complexa para freios retangulares que, por terem ângulos agudos, são projetados para proporcionar uma FR maior, restringem o movimento horizontal da chapa. Conforme mostra a Figura 3 a chapa ignora o formato do freio e assume um perfil circular. Para alcançar os benefícios de um freio circular, a cavidade deveria ser projetada, para apertar a chapa contra o freio.



33% de penetração do freio  
Espessura da chapa = 1,2mm

Movimento da chapa →



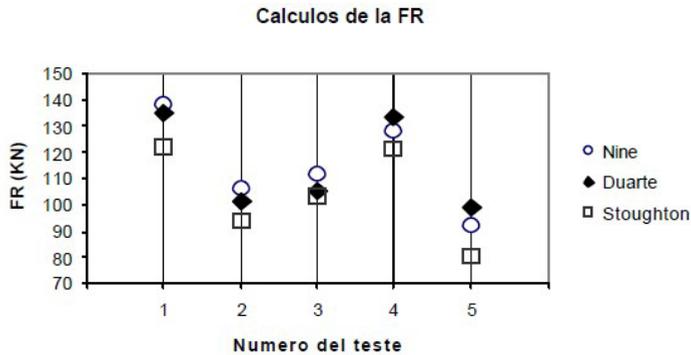
76% de penetração do freio  
Espessura da chapa = 1,2mm

Movimento da chapa →

**Figura 3** – Chapa se movendo em um freio retangular, (KEELER, 2000)



Além dos procedimentos de validação do modelo em elementos finitos, dois tipos diferentes de testes foram feitos com a EPG, utilizando simulações numéricas diferentes daquelas utilizadas na obtenção das equações componentes e estudos anteriormente publicados por Nine (1978) e Stoughton (1988), conforme mostra a Figura 5.



**Figura 5** – Testes com os resultados experimentais de Nine (1978) e com os analíticos de Stoughton (1988), disponíveis em Guo *et al.* (2000)

Os cálculos feitos com a EPG são similares aos resultados analíticos de Stoughton (1988) e experimentais de Nine (1978). A média dos valores absolutos das diferenças percentuais foi igual a 6% e o valor máximo para cada diferença dos resultados da EPG em relação aos dados experimentais é igual a 11%.

