

MARCOS VINÍCIUS MELCONIAN

MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL COM SIMILITUDE E ELEMENTOS FINITOS

Desenvolvimento de Equação Preditiva
para o Cálculo da Força de Retenção
em Freios de Estampagem

SÃO PAULO
2014

Modelagem Numérica e Computacional com Semelhança e Elementos Finitos:

Equação preditiva geral para o cálculo da força
de retenção em freios de estampagem

© 2014

1st edition – 2014

Editora Edgard Blücher Ltda.

ISBN: 978-85-8039-090-2

Blucher

Rua Pedrosa Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-012 – São Paulo – SP – Brazil
Fax 55 11 3079 2707
Phone 55 11 3078 5366
editora@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 5a ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela
Editora Edgard Blucher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Melconian, Marcos Vinícius

Modelagem numérica e computacional com
semelhança e elementos finitos : equação preditiva
geral para o cálculo da força de retenção em freios
de estampagem [livro eletrônico] / Marcos Vinícius
Melconian. -- São Paulo : Blucher, 2014.

3 Mb ; ePUB.

Bibliografia

ISBN 978-85-8039-090-2 (e-book)

ISBN 978-85-8039-089-6 (impresso)

1. Engenharia Mecânica – ecnologia 2. Método dos
elementos finitos 3. Estampagem (Metais) I. Título

14-0612

CDU 623.045

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais Sarkis e Anaid, e ao meu irmão Sérgio, por serem à base da minha vida e inspiração.

AGRADECIMENTOS

A realização e conclusão deste trabalho passaram pela ajuda, apoio e dedicação de muitas pessoas. Gostaria de agradecer principalmente:

Ao Luis Fernando que me ajudou com os primeiros passos, na utilização do STAMPACK®.

Agradeço aos pesquisadores da QUANTECH ATZ, em especial Albert Forgas, por toda ajuda e disponibilidade com a utilização do STAMPACK®.

Aos professores, funcionários e colegas de classe do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo e de Bragança Paulista por toda a ajuda, dedicação, apoio e amizade.

Por fim, e de maneira muito especial, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Écio Naves Duarte. Obrigado por todas as inúmeras aulas e aconselhamentos. Sempre indicando os melhores caminhos para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, com muita disposição e compromisso e aos meus familiares por toda ajuda e incentivo.

“Predição é muito difícil, especialmente se for sobre o futuro.”

Niels Bohr

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos e justificativas do trabalho.....	15
1.2 Organização da obra	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 Estampagem de chapas metálicas	26
3.2 Freios de estampagem.....	30
3.3 Características dos materiais.....	33
3.3.1 Deformação.....	33
3.3.2 Deformação elástica.....	33
3.3.3 Deformação plástica.....	34
3.3.4 Módulo de elasticidade	34
3.3.5 Limite convencional de elasticidade.....	36
3.3.6 Lei de encruamento isotrópico	37
3.3.7 Anisotropia	39
3.3.8 Critério de plasticidade.....	41
3.4 Similitude em engenharia.....	44
3.4.1 Descrição da metodologia.....	44
3.4.2 Obtenção das equações preditivas	47
3.5 O método dos elementos finitos	49
3.5.1 Descrição geral do método.....	49
3.5.2 Passos para a análise e solução em elementos finitos	52
3.5.2.1 O processo de discretização do método.....	53
3.5.2.2 Definição das propriedades dos elementos.....	54
3.5.2.3 Montagem das matrizes de rigidez dos elementos	55
3.5.2.4 Aplicar as cargas.....	56
3.5.2.5 Definir as condições de contorno	56
3.5.2.6 Solucionar o sistema de equações	57
3.5.2.6 Calcular os esforços	57
3.5.3 Fases do método dos elementos finitos.....	57
3.5.3.1 Pré-processamento.....	57
3.5.3.2 Processamento.....	58
3.5.3.3 Pós-processamento	58

3.6 Solução implícita versus solução explícita.....	59
3.7 O software stampack.....	61
4. METODOLOGIA	65
4.1 Bases de dados experimentais.....	66
4.1.1 Experimento realizado	66
4.1.2 A modelagem do freio de estampagem	72
4.2 Utilização do software stampack	73
4.2.1 Importação da figura.....	74
4.2.2 Configuração das variáveis	74
4.2.3 Resultados da simulação	78
5. DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO PREDITIVA GERAL (EPG).....	79
5.1 Validações do modelo em elementos finitos	80
5.2 Definição das variáveis.....	84
5.3 Definições dos π -termos.....	84
5.4 Obtenção das equações componentes	86
6. RESULTADOS OBTIDOS.....	103
6.1 Validação das equações com os dados experimentais.....	104
6.2 Desenvolvimento do aplicativo para cálculo	106
6.2.1 Escolha da plataforma e linguagem de programação.....	107
6.2.2 Apresentação do aplicativo	107
7. CONCLUSÕES	109
7.1 Conclusões sobre a pesquisa.....	110
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do freio de estampagem no processo, (CADELL R.M, HOSFORD W.F, 2000)	12
Figura 2 – Imagem da deformação da chapa em função da penetração do freio, (KEELER, 2000)	20
Figura 3 – Chapa se movendo em um freio retangular, (KEELER, 2000)	21
Figura 4 – Ilustração do freio de estampagem, (ZHIHENG, 2011)	22
Figura 5 – Testes com os resultados experimentais de Nine (1978) e com os analíticos de Stoughton (1988), disponíveis em Guo <i>et al.</i> (2000)	23
Figura 6 – Peça tracionada com detalhe da estricção do material	26
Figura 7 – (A) Prensa Hidráulica com carga nominal máxima de 5000kN; (B) Prensa mecânica com carga nominal máxima de 35000kN [Schuler, Inc.]	27
Figura 8 – Prensa mecânica de ação simples [Schuler, Inc.]	27
Figura 9 – Prensa mecânica de dupla ação [Schuler, Inc.]	28
Figura 10 – (A) Rugas no flange (B) Rugas laterais, (REDDY, 2012)	29
Figura 11 – (A) Freio de estampagem e a matriz antes do contato. (B) Freio de estampagem e a matriz em contato, (ALEKSANDROVIC, 2011)	29
Figura 12 – Diagrama de flexão e flexão inversa em um freio de estampagem	30
Figura 13 – Gráfico Tensão x Deformação, (MELCONIAN, 2008)	35
Figura 14 – Diagrama tensão deformação, para determinação da tensão limite convencional de elasticidade (σ_e)	36
Figura 15 – Determinação de K e n	38
Figura 16 – Curvas das leis de encruamento de Ludwik- Nadai e Voce em um gráfico de Tensão x Deformação para uma aço - FePO3_A, (STAMPACK®)	38
Figura 17 – Corpos de prova para realização de testes para determinar a anisotropia do material	40
Figura 18 – Representação das tensões hidrostáticas em um corpo	42
Figura 19 – Representação gráfica do efeito Bauschinger	43
Figura 20 – Malha triangular plana, (SOUZA, 2003)	50
Figura 21 – Diferentes tipos de elementos finitos, (SOUZA, 2003)	51
Figura 22 – Graus de liberdade. A) graus de liberdade de um ponto; B) graus de liberdade de um corpo rígido	52
Figura 23 – Passos para solução em Elementos Finitos	53
Figura 24 – Discretização de diferentes sólidos e estruturas com o MEF, (ONÂTE, 2009)	54
Figura 25 – Exemplos de peças discretizadas	55
Figura 26 – Relação de aspecto de elementos retangulares	55
Figura 27 – Força externa aplicada na mola	56
Figura 28 – Fases do MEF	58
Figura 29 – Aplicações do método explícito e método implícito	60
Figura 30 – Visão global da simulação em EF, (STAMPACK®)	63
Figura 31 – Prensa-chapas segurando a chapa metálica que será estampada, (NINE, 1978)	66
Figura 32 – Aparato com freios rolantes, (NINE, 1978)	66
Figura 33 – Esquema de montagem dos freios rolantes, (NINE, 1978)	67

Figura 34 – Esquema de montagem dos freios rolantes, (NINE, 1978)	67
Figura 35 – Aparato utilizado na montagem dos freios de estampagem, (NINE, 1978)	69
Figura 36 – Freio de estampagem desenhado no software SolidEdge ST5	71
Figura 37 – Aplicações do STAMPACK®	72
Figura 38 – Imagem do freio de estampagem importada para o software STAMPACK®	73
Figura 39 – Malha não estruturada discretizada por erro cordal	74
Figura 40 – Malha estruturada retangular	74
Figura 41 – Freio de estampagem discretizado	75
Figura 42 – Valores das propriedades mecânicas da chapa metálica, adotados em uma simulação típica (STAMPACK®)	76
Figura 43 – Pró-processamento do freio de estampagem	77
Figura 44 – Geometria dos freios de estampagem	80
Figura 45 – Gráfico da Força de retenção do freio (N) x Tempo(s), em uma simulação feita no STAMPACK®	82
Figura 46 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 2$	92
Figura 47 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 3$	93
Figura 48 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 4$	94
Figura 49 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 5$	95
Figura 50 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 6$	96
Figura 51 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 7$	97
Figura 52 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 8$	98
Figura 53 – Gráfico com resultado das simulações para $\pi 1 \times \pi 9$	99
Figura 54 – Interface do Aplicativo “Drawbead Calc”	105
Figura 55 – Análise de sensibilidade da FR em relação a cada parâmetro presente na EPG elaborada	108
Figura 56 – Análise de sensibilidade da FR em relação a cada parâmetro presente na EPG elaborada	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos propostos para a FR e FP, de acordo com Xu <i>et al.</i> (1998), <i>apud</i> Duarte (2007)	18
Tabela 2 – Geometrias das seções de freios mais usuais. a) Semicircular; b) Retangular; c) Triangular d) Trapezoidal; e) Assimétrica – XU <i>et al.</i> , 1998 <i>apud</i> DUARTE, 2007 (adaptado)	31
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos experimentos, (NINE, 1978)	68
Tabela 4 – Forças de retenção dos freios para chapas de aço, (NINE, 1978).....	70
Tabela 5 – Forças de retenção dos freios para chapas de alumínio, (NINE, 1978).....	70
Tabela 6 – Parâmetros utilizados experimentalmente, (NINE 1978)	81
Tabela 7 – Resultados obtidos para validação do modelo utilizado nas simulações com o STAMPACK®	82
Tabela 8 – Natureza de cada parâmetro	83
Tabela 9 – Descrição dos π -termos.....	84
Tabela 10 – Valores adotados para cada parâmetro.....	86
Tabela 11 – Valores simulados	87
Tabela 12 – Obtenção dos pontos para os π -termos	89
Tabela 13 – Intervalo de validade de cada parâmetro	91
Tabela 14 – Validação das EPGs obtidas, com os dados experimentais	101
Tabela 15 – Parâmetros utilizados para o teste da EPG	102
Tabela 16 – Comparativo dos resultados obtidos or meio da simulação em EF e calculados pela EPG	103
Tabela 17 – Comparativo dos limites de validade dos π - termos da EPG de Duarte (2007) e de Melconian (2014)	110

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

EF	Elementos Finitos
EPG	Equação Preditiva Geral
FP	Força do Prensa- Chapas
FR	Força de Retenção do Freio
MEF	Método dos Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

E	Modulo de Young
ε	Deformação
F	Força Aplicada
k	Constante de proporcionalidade do material
Δx	Variação de comprimento
K	Modulo de encruamento
n	Expoente de encruamento
σ	Tensão mecânica
σ_e	Tensão limite convencional de elasticidade
σ^y	Tensão de escoamento final
σ^e	Tensão de escoamento inicial do material
Δr	Anisotropia planar
r	Anisotropia transversal
σ_m	Tensão Hidrostatica
σ_p	Tensão de proporcionalidade
π_i	Pi-termo
$r_{0}, r_{45} e r_{90}$	Coefficiente de Lankford
$\{F\}$	Matriz coluna com todas as cargas nodais
$\{U\}$	Matriz de rigidez da estrutura
$[K]$	Matriz coluna com todos os deslocamentos nodais
v	Velocidade
v_s	Velocidade de propagação do some m um material
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Massa especifica
R_m	Raio da matriz
R_d	Raio do Freio
c	Folga horizontal entre o freio e a chapa
C_a	Constante em Função dos Grupos de Variáveis Adimensionais
t	Espessura da chapa
h	Penetração
m	Atrito