

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EVANDRO PAESE

**CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE CHAPAS FINAS
USANDO BOBINA ESPIRAL PLANA: MODELAGEM COM
ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO**

Porto Alegre

2014

EVANDRO PAESE

**CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE CHAPAS FINAS
USANDO BOBINA ESPIRAL PLANA: MODELAGEM COM
ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia: Dispositivos Eletromagnéticos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto P. Homrich

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Porto Alegre

2014

EVANDRO PAESE

**CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE CHAPAS FINAS
USANDO BOBINA ESPIRAL PLANA: MODELAGEM COM
ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO**

Esta tese foi julgada adequada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Roberto P. Homrich, UFRGS

Doutor pela UNICAMP – Campinas, SP, BRASIL

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

PhD pela Cardiff University – Cardiff, País de Gales, GB.

Prof. Dr. Flávio José Lorini, UFRGS

PhD pelo Politecnico Di Milano, Milão, Itália.

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro, UFRGS

PhD pela GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS, Alemanha.

Prof. Dr. Luís Alberto Pereira, UFRGS

PhD pela Universität Kaiserslautern – Kaiserslautern, Alemanha.

Prof. Dr. Martin Geier, UNISINOS

Doutorado pela UFRGS, Porto Alegre, RS, BRASIL.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Agosto de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Foram muitos, os que me ajudaram a concluir este trabalho. Meus sinceros agradecimentos:

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

A minha família, pelo estímulo na continuidade de minha formação.

Ao professor amigo e orientador Dr. Roberto P. Homrich pela oportunidade de desenvolver este trabalho e conduzir seu desenvolvimento, com muita sabedoria, dedicação exemplar a orientação e paciência durante minhas dificuldades.

Ao professor amigo e co-orientador Dr. Rodrigo Rossi pela sua implacável participação na orientação deste trabalho. Sua energia e vasto conjunto de idéias foi uma fonte de inspiração constante para o desenvolvimento deste assunto fascinante.

Ao professor amigo e co-orientador Dr. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa pelo acolhimento no IST-Lisboa, ajuda na preparação dos experimentos, com muita sabedoria, dedicação exemplar a orientação e paciência durante minhas dificuldades e insistência.

Jamais esquecerei meus orientadores, pois seus incentivos e orientações foram fundamentais para terminar esta pesquisa.

Ao professor e amigo Dr. Martin Geier pela sua ajuda na realização dos experimentos, pelas sugestões e discussões dos resultados e principalmente pela amizade criada durante este trabalho.

Aos engenheiros Márcio de Rossi e Márcio Migliavacca pela doação de componentes para a realização deste trabalho.

As empresas Paese Comércio de Ferragens Ltda, Ensinger do Brasil Ltda e Robert Souza Indústria e Serviços Ltda pela doação de componentes ou serviços para realização deste trabalho.

Aos membros da comissão de avaliação pela disposição em avaliar este trabalho e por suas valiosas sugestões de melhorias.

Ao CNPq pela provisão da bolsa de doutorado sanduíche no IST.

A todos que de alguma forma, direta ou indiretamente colaboraram na conclusão deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho trata de uma modelagem eletromagneticamente acoplada e fracamente acoplada ao problema mecânico do processo de conformação eletromagnética (EMF). Este usa bobina espiral plana, aplicada na deformação de chapas finas e planas para obter geometrias finais rasas. Um método de solução numérica é usado para o problema eletromagnético, o qual foi desenvolvido no *software Matlab* e utiliza o *software Abaqus/Explicit* para verificação da geometria deformada após a aplicação da força transiente de origem eletromagnética. O método foca especificamente no cálculo da densidade de fluxo magnético em pontos específicos usando a lei de *Biot-Savart* e análise do circuito que modela o processo de conformação eletromagnética, sendo que as indutâncias deste circuito são calculadas e fazem o acoplamento entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Os cálculos das correntes de descarga e induzidas e perfil da força de origem eletromagnética são realizados para o instante inicial, sem considerar o movimento da chapa. O perfil da força de origem eletromagnética ao longo da chapa é calculado para diversos instantes, sendo este um dos dados de entrada no *software Abaqus/Explicit* através de uma sub-rotina acessível ao usuário (VDLOAD) obtendo-se a geometria da chapa deformada. A rotina de cálculo discretiza o problema eletromagnético como um sistema de equações diferenciais ordinárias (ODE) para calcular a corrente de descarga da bobina atuadora e as induzidas na chapa metálica. Experimentos, sem chapa acoplada, e com chapa fixa ou deformando foram realizados com a aquisição da corrente de descarga, medição da densidade de fluxo magnético, velocidade de deformação e geometria da chapa deformada, demonstrando uma boa correlação com o método de cálculo proposto. O presente trabalho fornece importantes informações para o projeto de sistemas de conformação eletromagnética sem a necessidade de uma função da corrente de descarga como dado de entrada para solução do problema eletromagnético.

Palavras-chaves: Conformação eletromagnética (EMF); Bobina espiral plana; Acoplamento eletromagnético.

ABSTRACT

This thesis deals with modeling and numerical simulation electromagnetically coupled and loosely-coupled to the mechanical problem for process of the electromagnetic forming. This uses flat spiral coil, applied to the deformation of thin and flat sheet metal to obtain shallow end geometries. This method uses a numerical solution to the electromagnetic problem, which was developed in the software Matlab and uses the software Abaqus/Explicit for verification of the deformed geometry after applying of the transient force of origin electromagnetic. The method focuses specifically on the calculation of the magnetic flux density at specific points using the Biot-Savart law and circuit analysis that modeling of electromagnetic forming process and the inductances of this circuit are calculated and couple the electric and magnetic phenomena. Calculations of discharge and induced currents, profile force of origin electromagnetic are performed for the initial time, without considering the motion of the sheet metal. The profiles force of origin electromagnetic along the sheet metal is calculated for several instants, which are input data in software Abaqus/Explicit using a user-routine (VDLOAD) obtaining the deformed geometry of the sheet metal. The calculation routine discretizes the electromagnetic problem as a system of ordinary differential equations (ODE) to calculate the discharge current of the actuator coil and induced currents in the metal sheet. Experiments without coupled sheet metal, and fixed or deforming sheet metal were performed with the acquisition of the discharge current, measurement of magnetic flux density, velocity of movement and deformation geometry of the sheet metal, demonstrating a good correlation with the proposed method of calculation. This study provides important information for the design of the electromagnetic forming systems without the need for a function of discharge current as input for solution of the electromagnetic problem.

Keywords: Electromagnetic forming (EMF); Flat spiral coil; Electromagnetic coupling.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	19
1.2	TEMA	25
1.2.1	Delimitação do Tema.....	25
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	26
1.4	OBJETIVO GERAL.....	27
1.4.1	Objetivos Específicos.....	27
1.5	JUSTIFICATIVA	28
1.6	METODOLOGIA.....	30
1.7	RESULTADOS ESPERADOS	31
1.8	HISTÓRICO DO GRUPO DE PESQUISA.....	32
2	REVISÃO DA LITERATURA	34
2.1	HISTÓRICO	34
2.2	CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS	39
2.3	O PROCESSO DE CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	41
2.3.1	Circuito Elétrico de Representação do Sistema EMF	42
2.3.2	O Problema Magnético do Processo EMF	43
2.4	ANÁLISE DO PROBLEMA MECÂNICO	54
2.4.1	Caracterização do Comportamento Mecânico do Alumínio A1050 Utilizando-se Barra de <i>Hopkinson</i>	57
2.5	MÉTODOS DE ANÁLISE DO PROCESSO EMF	61
2.5.1	Forte Acoplamento	62
2.5.2	Totalmente Desacoplado	65
2.5.3	Fracamente Acoplado	68
2.6	APLICAÇÕES DA CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	79
2.7	EQUIPAMENTO PARA CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	82
3	PROPOSTA DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO PROCESSO EMF	86
3.1	DISCRETIZAÇÃO E SIMPLIFICAÇÕES	90
3.2	LEI DE <i>BIOT-SAVART</i> APLICADA AO CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR UMA ESPIRA CIRCULAR	93
3.3	CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS PRÓPRIAS E MÚTUAS DO SISTEMA DE EMF.....	96
3.4	EFEITO PELICULAR (<i>SKIN EFFECT</i>).....	98
3.5	FORÇA ELETROMAGNÉTICA	98
3.6	COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ALUMÍNIO A1050 SEGUNDO MODELO DE <i>JOHNSON-COOK</i>	100
3.7	PARÂMETROS DO PROBLEMA ELETROMAGNÉTICO E MECÂNICO	103
3.7.1	Características da Máquina SMU1500 e Geometria da Espira Atuadora e Chapa Metálica	103
3.7.2	Implementação do Modelo de Elementos Finitos no <i>Abaqus/Explicit</i>	108
3.8	MÉTODO DE MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO USANDO BOBINA EXPLORATÓRIA.....	111

3.9 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA E TEMPO DE DEFORMAÇÃO DA CHAPA METÁLICA	114
4 RESULTADOS	116
4.1 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NA DIREÇÃO DE Z	116
4.2 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NA DIREÇÃO RADIAL	119
4.3 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE DESCARGA	119
4.4 MAGNITUDE DA CARGA DE ORIGEM ELETROMAGNÉTICA AO LONGO DE UMA LINHA ...	124
4.5 COMPARAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO COM E SEM CHAPA ACOPLADA	126
4.6 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE DEFORMAÇÃO DA CHAPA METÁLICA ACOPLADA	128
4.7 PERFIS DA CHAPA METÁLICA DEFORMADA PARA VÁRIOS INSTANTES DE TEMPO.....	130
5 CONCLUSÃO.....	136
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	140

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Fluxograma da interação entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos no modelo fracamente acoplado.	30
Figura 2 Diferentes tipos de bobinas eletromagnéticas para os processos EMF (HARVEY, 1958).	36
Figura 3 Vista esquemática em corte de uma bobina de pressão eletromagnética uniforme. O enrolamento primário tem várias voltas no plano entrando na página (GOLOWIN et al., 2007).	37
Figura 4 Tipos de deformações na grade de círculos (LANGE, 1994).	40
Figura 5 Diagrama limite de conformação típico (WAGONER, 2001).	41
Figura 6 Esquema elétrico do sistema de conformação eletromagnética (PAESE et al., 2011).	42
Figura 7 Ilustração da Lei de <i>Biot-Savart</i> (HAYT, 2010).	48
Figura 8 O fluxo magnético total enlaça todas as N espiras.	49
Figura 9 Porção de um enrolamento mostrando os enlaces parciais de fluxo (HAYT, 2010).	51
Figura 10 Fluxo magnético produzido pela bobina um que envolve as espiras da bobina dois (EDMINISTER, 2006)	51
Figura 11 Força entre dois condutores retos paralelos no ar (KRAUS, 1981).	53
Figura 12 Comparação entre os modelos de <i>Takatsu et al.</i> e <i>Steinberg</i> para tensão versus deformação verdadeira nos modelos de plasticidade usados para simulações de abaulamento de chapas de alumínio (FENTON, 1998).	56
Figura 13 Comparação entre a lei logarítmica usada por <i>Takatsu et al.</i> e a lei <i>Hollomon</i> para o encruamento por deformação (SIDDIQUI, 2009).	57
Figura 14 Esquema simplificado da barra de <i>Hopkinson</i> de propulsão eletromagnética (SILVA, 2013).	58
Figura 15 Curva tensão versus deformação verdadeiras para o chumbo puro obtido para diferentes taxas de deformação (SILVA, 2008).	59
Figura 16 Máquina de ensaios de compressão com <i>came</i> acionada por atuador eletromagnético (SILVA, 2013).	59
Figura 17 Comportamento mecânico da liga de alumínio A1050 obtido através de ensaios em uma máquina de ensaio de compressão com <i>came</i> atuada eletromagneticamente: (a) de perfil logístico; (b) de perfil raiz (SILVA, 2013).	60
Figura 18 Pressão magnética no tubo (BENDJIMA, 1997).	63
Figura 19 Comparação dos perfis de deformação experimentais de (TAKATSU et al., 1988) e calculados por (FENTON, 1998).	64
Figura 20 Acoplamento de fenômenos multi-físicos propostos por (CONRAUX et al., 2006).	64
Figura 23 Fluxograma do método de análise do processo EMF fracamente acoplado eletromagnético-mecânico (SIDDIQUI, 2009).	69
Figura 24 Velocidade de deformação axial em diferentes posições: (a) velocidade durante o período de carregamento da pressão magnética; (b) velocidade durante o período de deformação da chapa metálica; (c) distribuição da pressão magnética no espaço e	

tempo; (d) perfis de deformação da chapa em diferentes instantes de tempo (WANG et al., 2006).	71
Figura 25 Comparação da distribuição de velocidades para diferentes energias de descarga (RISCH et al., 2004).	72
Figura 26 Fluxograma do algoritmo de cálculo (MERICHEDE, 2000).	73
Figura 27 Distribuição da pressão e da deformação da chapa metálica (RISCH et al., 2004).	75
Figura 28 Bobina atuadora de geometria dupla (OLIVEIRA et al., 2005).	76
Figura 29 Perfil da corrente medida na bobina atuadora e perfil efetivo utilizado na modelagem (OLIVEIRA et al., 2005).	77
Figura 30 Aplicações da conformação eletromagnética (VOHNOUT, 1998; KLEINER, 2005).	79
Figura 31 Eixo usado no Boeing 777 mostrando o seu comportamento quando submetido a um teste de torque até a falha (ZITTEL, 2010).	80
Figura 32 Conformação de um recipiente em um ambiente limpo e tubos que foram anodizados antes da deformação (ZITTEL, 2010).	81
Figura 33 Influência das irregularidades na superfície da peça de trabalho (ZITTEL, 2010).	81
Figura 34 Peça utilizada em células de combustível conformada por processo EMF (GOLOWIN et al., 2007).	82
Figura 35 Estação de trabalho industrial de um processo EMF para montagem de filtros de óleo (ZITTEL, 2010).	83
Figura 36 Montagem e característica de descarga de um interruptor de descarga para processo EMF (WELLEMAN, 2006).	85
Figura 37 Representação esquemática do circuito elétrico, da máquina SMU1500 e da matriz de conformação eletromagnética (PAESE et al., 2014).	87
Figura 38 Representação esquemática das etapas de análise eletromagnética e simulação mecânica do processo EMF.	89
Figura 39 Circuito discretizado de acoplamento entre os fenômenos elétricos e magnéticos do sistema EMF.	90
Figura 40 Representação de uma espira circular para cálculo do vetor densidade de fluxo magnético em um ponto p usando-se a lei de <i>Biot-Savart</i>	93
Figura 41 Bobina espiral plana usada nesta análise: (a) Simplificada; (b) Real.	96
Figura 42 Comportamento mecânico da liga de alumínio A1050 obtido pela equação (46) para <i>came</i> do tipo logística.	102
Figura 43 Interpolação do comportamento mecânico do alumínio A1050 usando <i>came</i> do tipo logística para o modelo <i>Johnson-Cook</i>	102
Figura 44 Geometria e dimensões da espira atuadora.	104
Figura 45 Medição experimental da corrente de descarga com a espira atuadora conectada e sem chapa metálica acoplada para $U=100$ J: (a) osciloscópio; (b) interpolação realizada no <i>software Matlab</i>	107
Figura 46 Geometria da ferramenta para conformação eletromagnética de chapas metálicas finas usando espira plana.	108
Figura 47 Geometria do modelo de EF no <i>Abaqus/Explicit</i> para simulação de livres abaulamentos por processo EMF.	109
Figura 48 Modelo constitutivo do alumínio A1050 proposto por (TAKATSU et al., 1988).	111
Figura 49 Ferramenta para EMF e a bobina exploratória durante as medições da tensão induzida na mesma e corrente de descarga da SMU 1500.	113
Figura 50 Ilustração de detalhes internos e imagem da ferramenta EMF na máquina SMU1500 com os dispositivos de medição.	115
Figura 51 Densidade de fluxo magnético por ampère no plano da bobina atuadora ($z=0$) na direção do eixo z	117

Figura 52	Densidade de fluxo magnético no plano da chapa metálica por ampère na direção do eixo z	118
Figura 53	Densidade de fluxo magnético gerado pelas espiras da discretização da chapa metálica no plano das mesmas por ampère na direção do eixo z	118
Figura 54	Componente radial da densidade de fluxo magnético por ampère (T/A) para diferentes distâncias entre a bobina atuadora e a chapa metálica.	119
Figura 55	Corrente de descarga na bobina atuadora (i_a) e maior induzida no anel 44 (i_{44}) da discretização da chapa metálica, correspondente a um raio do anel ($r=22,25$ mm) juntamente com as medições experimentais para uma energia de $U=500$ J.....	121
Figura 56	Força eletromagnética máxima: (a) força gerada pela SMU1500 para uma energia de $U=1$ kJ; (b) força gerada pelo sistema EMF analisado por (PAESE et al., 2014) para uma energia de $U=3,4$ kJ	122
Figura 57	Profundidade pelicular (<i>skin depth</i>) calculada versus frequência das correntes induzidas e máxima força eletromagnética obtida, para uma energia constante de $U=3,4$ kJ (PAESE et al., 2014).	123
Figura 58	Perfis da magnitude da carga de origem eletromagnética por unidade de comprimento para vários instantes de tempo da corrente de descarga, sendo incluso o perfil para o instante de máxima corrente de descarga ($t=7,2$ μ s).	125
Figura 59	Densidade de fluxo magnético calculado para energia de $U=1000$ J para o instante de máxima corrente de descarga ($t=7,2$ μ s): (a) sem chapa metálica acoplada; (b) com chapa metálica acoplada.	126
Figura 60	Densidade de Fluxo Magnético na Direção Radial Calculado e Experimental com e sem Chapa Metálica Acoplada para Energia $U=320$ J para o instante de máxima corrente de descarga ($t=7,2$ μ s).....	128
Figura 61	Tempos de Deformação da Chapa Metálica para energias: (a) $U=500$ J; (b) $U=700$ J; (c) $U=1000$ J; (d) $U=1500$ J.	129
Figura 62	Velocidade e posições instantâneas da chapa metálica para dois locais e energia $U=1500$ J: (a) posição $x=0$ (centro da chapa metálica ou posição onde a força de origem eletromagnética é igual a zero); (b) posição $x=27,25$ mm (posição onde a força origem eletromagnética é máxima).	130
Figura 63	Previsões obtidas do <i>Abaqus/Explicit</i> da geometria deformada da chapa metálica (espessura de 1 mm) em diferentes instantes de tempo para energia $U=1000$ J....	131
Figura 64	Geometria deformada experimental e simulação da chapa metálica deformada (espessura de 1 mm) para energias de $U=500$, 1000 e 1500 J.....	132
Figura 65	Geometria simulada e experimental da chapa metálica deformada (espessura de 1 mm) para energia $U=1820$ J.	133
Figura 66	Geometrias experimentais deformadas livremente da chapa metálica para diversas energias (U).	134
Figura 67	Corrente de descarga na bobina atuadora (i_a) e maior induzida no anel $n=44$ (i_{44}) da discretização da chapa metálica, correspondente a um raio do anel ($r=22,25$ mm) juntamente com as respectivas medições experimentais para energias de $U=1000$ e 1500 J.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Valores das constantes do modelo de caracterização mecânica da liga de alumínio A1050, com validade para $\varepsilon \leq 2,5$ e $\dot{\varepsilon} \leq 3000 \text{ s}^{-1}$, proposto por (SILVA, 2013) ...	61
Tabela 2 Valores das constantes para o Alumínio A1050 ajustado ao modelo de <i>Johnson-Cook</i>	102
Tabela 3 Parâmetros da Espira Atuadora e Matriz	104
Tabela 4 Parâmetros da Chapa Metálica	105
Tabela 5 Especificações da Máquina EMF (SMU1500)	105
Tabela 6 Parâmetros da Ferramenta de EMF	107
Tabela 7 Parâmetros da Bobina Exploratória	113
Tabela 8 Especificações técnicas dos componentes eletrônicos usados na medição de velocidade de deformação da chapa metálica	115

LISTA DE ABREVIATURAS

ABB: *Asea Brown Boveri*

ALE: *Arbitrary Lagrangian Eulerian*

CALE: 2D ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*)

CPS4R: Elementos de malha do tipo com quatro nós bi-linear (plano de tensões)
quadrilátero com integração reduzida

EASMS: *Electromagnetically Assisted Sheet Metal Stamping*

EMF: *Electromagnetic forming*

EF: Elementos Finitos

GTO: *Gate-Turn Off-Thyristor*

IGCT: *Integrated Gate Controlled Thyristor*

IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor*

IST: Instituto Técnico Superior

MHD: *Magneto Fluid Dynamics or Hydromagnetics*

ODE: *Ordinary Differential Equations*

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

SCR: *Silicon Controlled Rectifier*

SMU1500: Máquina de conformação eletromagnética fabricada pela *Poynting GmbH*

(<http://www.poynting.de/en/>)

VDLOAD: Sub-rotina definida pelo usuário no *software Abaqus/Explicit*

LISTA DE SÍMBOLOS

A Constante do material que esta relacionada com a tensão de escoamento do modelo de *Johnson-Cook*

A_a Área da seção transversal da bobina atuadora [m^2]

\mathbf{B} Vetor densidade de fluxo magnético elementar [T]

B Constantes relacionada ao encruamento do material devido à deformação do modelo de *Johnson-Cook*

B_θ Densidade de fluxo magnético na direção circunferencial [T]

B_r Densidade de fluxo magnético na direção radial [T]

B_z Densidade de fluxo magnético na direção axial [T]

C Capacitância [μF]

C Constante que está relacionada com a velocidade de deformação do material do modelo de *Johnson-Cook*

d Distância entre a chapa e a bobina atuadora [m]

D Densidade do fluxo elétrico [C/m^2]

D_0 Diâmetro externo da bobina atuadora [m]

E Campo elétrico [N/C]

U Energia armazenada no banco de capacitores [J]

\mathbf{F} Vetor força eletromagnética elementar [N]

f_0 Frequência de ressonância [Hz]

f_d Frequência amortecida [Hz]

f_{zi} Força de origem eletromagnética entre a bobina atuadora e anel i da discretização da chapa metálica [N]

H Intensidade do campo magnético [A/m]

i_a Corrente na bobina atuadora [A]

i_i Corrente induzida no anel i da discretização da chapa metálica [A]

$i_{\theta eq}$ Soma equivalente das correntes induzidas na chapa metálica [A]

\mathbf{J} Vetor densidade de corrente elementar [A/m²]

J Densidade de corrente [A/m²]

l Comprimento dos segmentos da bobina [m]

L Indutância própria [H]

L_a Indutância própria da bobina atuadora [H]

L_{am} Indutância própria total do circuito RLC primário [H]

L_i Indutância própria do anel i da discretização da chapa metálica [H]

$L_{eq}(z)$ Indutância equivalente da chapa metálica [H]

m Constante que está relacionada com o amaciamento térmico do material do modelo de *Johnson-Cook*

M Indutância mutua [H]

M_{ij} Indutâncias mútuas entre os anéis da discretização da chapa metálica [H]

M_{ii} Indutâncias própria dos anéis da discretização da chapa metálica [H]

n Coeficiente de endurecimento em deformação ou coeficiente de encruamento

N Número de espiras da bobina atuadora

N_e Número de espiras da bobina exploratória

P Passo da bobina atuadora [m]

P_{zi} Magnitude da carga por unidade de comprimento de origem eletromagnética no anel i da discretização da chapa metálica [N/m]

r_a	Resistência da bobina atuadora [Ω]
r_{am}	Resistência total do circuito RLC primário [Ω]
r_{eq}	Resistência equivalente da chapa metálica [Ω]
r_i	Resistência do anel i da discretização da chapa metálica [Ω]
s	Espessura da chapa [m]
S	Área de uma superfície [m^2]
S_e	Área da bobina exploratória [m^2]
T_0	Temperatura de referência do material do modelo de <i>Johnson-Cook</i> [$^{\circ}C$]
T_f	Temperatura de fusão do material do modelo de <i>Johnson-Cook</i> [$^{\circ}C$]
t	Tempo [s]
V_0	Tensão carregada no banco de capacitores [V]
v	Volume elementar [m^3]
ε	Deformação verdadeira
ε_1	Deformação principal na direção 1
ε_2	Deformação principal na direção 2
ε_3	Deformação principal na direção 3
$\bar{\varepsilon}$	Deformação verdadeira efetiva
σ	Tensão na qual se inicia a deformação plástica do material encruado [MPa]
σ_0	Tensão na qual se inicia a deformação plástica do material (resistência ao escoamento) [MPa]
ε_i	Deformação plástica inicial, normalmente igual a zero
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação do material (velocidade de deformação) [s^{-1}]
$\dot{\varepsilon}_0$	Constante que tem função de normalização da velocidade de deformação [s^{-1}]
σ_1	Tensão principal na direção 1 [MPa]

σ_2	Tensão principal na direção 2 [MPa]
σ_3	Tensão principal na direção 3 [MPa]
α	Constante de proporcionalidade da tensão
α_N	Fator de amortecimento ou frequência de Neper [rad/s]
β	Constante de proporcionalidade da deformação
η	Fator de eficiência
μ	Coefficiente de atrito entre chapa e ferramenta
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
Φ	Fluxo magnético [Wb]
λ	Enlaces de fluxo [Wb]
δ	Profundidade de penetração da densidade de fluxo magnético [m]
ρ_e	Densidade em volume de cargas elétricas livres [C/m ³]

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O processo de conformação de chapas consiste em transformar uma chapa de trabalho plana em uma peça tridimensional com geometria definida pelo projeto da ferramenta. Este é um dos processos mais usados para fabricação de peças tridimensionais a partir de chapas planas. Pode também produzir peças com excelente relação entre tamanho e peso em altas taxas de produção e baixo custo. A espessura da parede de peças obtidas por conformação é na maior parte igual à espessura da chapa plana.

Tradicionalmente este processo é realizado em máquinas complexas, especialmente projetadas, caras, de alta complexidade mecânica e com sofisticados sistemas de controle fluido-mecânicos. Além disto, usam-se ferramentas complexas compostas de punções e matrizes, extratores, sujeitadores, molas, bases, colunas guia, espigas, extratores, etc. As velocidades de fabricação estão em constante estudo para melhorar a produtividade e qualidade do produto. Observe-se que o acabamento na conformação depende de uma série de fatores como acabamento prévio da matéria prima e da ferramenta, lubrificante empregado, folgas no ferramental, etc. Os tempos de troca de ferramental e ajustes para produção também são longos e devem ser reduzidos.

A indústria automotiva ou aeronáutica atualmente necessita produzir peças com maior resistência, mais complexas e de menor peso. Peças fabricadas em ligas de aço de alta resistência e em ligas leves, como de alumínio e de magnésio, são desenvolvidas para reduzir o peso e conseqüentemente reduzir o consumo de combustíveis. Entretanto, os processos tradicionais apresentam limitações tecnológicas, principalmente com relação a conformabilidade para estes materiais e a crescente demanda por peças complexas. Juntos, estes fatores têm pressionado as tecnologias de conformação de chapas ao seu limite.

Muitos métodos de manufatura foram desenvolvidos para aumentar a conformabilidade na conformação de chapas, tais como materiais com melhores características, controle ativo da força do sujeitador ou aplicação da força de sujeitação em múltiplos pontos com diferentes intensidades controlando ativamente o fluxo de material na entrada da matriz (*active drawbead*), lubrificação e otimização da geratriz. Estes podem ser aplicados juntos ou individualmente (SHANG, 2006).

Técnicas de alta velocidade geralmente são aplicadas onde os métodos convencionais de conformação falham. Examinando-se as possibilidades tecnológicas atuais de deformação em alta velocidade, tem-se um grupo de processos que diferem quanto à fonte de energia utilizada para obtenção de altas velocidades. Os mais comuns são os métodos que utilizam explosivos, conformação pneumático-mecânica, conformação eletro-hidráulica e conformação eletromagnética. Durante estes processos, a peça a ser deformada é submetida a uma elevada energia cinética no início do processo, e a deformação é principalmente devido a efeitos da inércia causada pela alta velocidade (KAMAL, 2005; SIDDIQUI, 2009).

Um sistema de conformação eletromagnético (EMF - *Electromagnetic Forming*) é essencialmente um sistema de indução mútua entre uma bobina atuadora e uma peça condutora a ser deformada. Este processo baseia-se em uma força repulsiva gerada pelos campos magnéticos opostos em condutores adjacentes. Vários estudos têm se baseado nesta premissa, mas a maioria deles envolve situações de deformação de peças tubulares por solenóides, enquanto poucos estudos têm analisado deformação de chapas por bobinas espirais planas (CORREIA et al., 2008; MERICHED, 2000; TAKATSU et al., 1988; XU et al., 2010). A principal razão para esta limitação é que a EMF de peças planas geralmente envolve áreas maiores do que as aplicações de tubo, exigindo assim pulsos de energia consideravelmente mais elevados (HARTMANN, 2006).

Um sistema de conformação de chapas metálicas eletromagneticamente assistido (EASMS) foi apresentado por (SHANG, 2006) o qual tem como objetivo aumentar a conformabilidade do material a ser deformado aplicando pulsos eletromagnéticos em regiões estratégicas da chapa metálica, controlando a deformação da mesma. Este incluiu bobinas atuadoras no sujeitador de uma ferramenta convencional controlando o fluxo do material na entrada da matriz. Desta forma, pode-se obter uma distribuição mais uniforme da deformação da chapa e excessivas deformações que levam a falha podem ser evitadas. Este método pode aumentar a conformabilidade do material, mas deve-se ter cuidado de onde e como aplicar as forças eletromagnéticas. Este método foi aplicado por (SHANG, 2011) com a introdução de bobinas atuadoras na parte de baixo de um punção convencional para comparação da altura de conformação obtida pelo método convencional e assistido eletromagneticamente.

A conformação em alta velocidade é um processo, onde as velocidades de deformação da peça de trabalho tipicamente excedem 100 m/s. Este método inclui técnicas que usam processos baseados em energia química, mecânica ou elétrica para deformar a peça de trabalho em altas velocidades. Estas técnicas são distintas dos métodos convencionais de deformação dos metais, pois a peça de trabalho é acelerada a uma velocidade elevada, sendo a energia cinética da peça deformando significativa (KAMAL, 2005).

O processo EMF parece ter algumas vantagens que faz do mesmo uma atrativa alternativa em relação aos processos convencionais ou até mesmo em relação a outros processos a alta velocidade apresentados anteriormente:

- Os processos convencionais de conformação a velocidade típica de deformação é da ordem de 0,1 m/s, enquanto que no processo de conformação eletromagnética a velocidade pode alcançar algumas centenas de metros por segundo. Como o processo de deformação ocorre na ordem de centenas de micro segundos, isso possibilita ciclos de trabalho curtos (KAMAL, 2005; MOTOASCA, 2003);

- Segundo (MOTOASCA, 2003), em oposição aos sistemas convencionais na conformação eletromagnética não há contato mecânico com a peça não havendo necessidade de lubrificantes, sendo assim, um processo mais limpo. Como a energia é transferida por campo eletromagnético, este processo pode funcionar no ar ou até mesmo no vácuo, enquanto os outros processos de alta velocidade necessitam de um líquido (eletro-hidráulico, ou alguns sistemas a explosivos) ou gás (outros sistemas a explosivos) para transferência da energia. A pressão na peça é quase uniforme na conformação eletromagnética sendo exercida em cada ponto da superfície da peça. Chapas de alumínio não encruadas podem ser deformadas perto de 100% sem falha, pelo incremento na conformabilidade devido à alta velocidade, enquanto em sistemas convencionais o mesmo material falha com 20 – 40% de deformação;
- Apenas um lado da ferramenta (matriz) é necessário para conformar em alta velocidade. A chapa metálica só tem contato com um lado da ferramenta, sendo que o outro lado só está sujeito à pressão magnética. Isso evita uma série de problemas relacionados com a ferramenta, por exemplo, as tolerâncias, usinagem e alinhamento entre punção e matriz e com relação ao acabamento superficial da peça conformada (GOLOWIN et al., 2007);
- Os sistemas de EMF possuem vantagens em relação ao peso da ferramenta e equipamentos onde são usadas. Uma vez que as forças estáticas são menores, os sistemas EMF possuem menor tamanho quando comparados aos sistemas convencionais de conformação. O conjunto ferramenta e suporte necessitam apenas ser suficientes para acelerar e desacelerar a chapa metálica, estes têm tipicamente uma massa baixa (GOLOWIN et al., 2007);

- O impacto em alta velocidade entre a geratriz metálica e uma matriz rígida com determinada característica superficial pode proporcionar a conformação desta característica na chapa, proporcionando textura, cortes, ou os dois ao mesmo tempo. O impacto causa uma boa precisão dimensional na peça formada e todo o processo EMF é passível de integração com outros processos ou automação (GOLOWIN et al., 2007);
- As tolerâncias dimensionais podem ser melhoradas, pois o processo EMF torna mínimo, ou mesmo pode eliminar o retorno elástico. O enrugamento também pode ser eliminado devido à deformação em alta velocidade, visto que a mudança de direção da tensão para compressão no embutimento convencional, o qual causa enrugamento, é diminuída ou eliminada (DEHRA, 2006; IRIONDO, 2007; KAMAL, 2005; SHANG, 2006; SIDDIQUI, 2009);
- A principal vantagem da conformação eletromagnética é a sua maior controlabilidade e repetibilidade entre os processos à alta velocidade, com um equipamento relativamente simples. Neste processo o aumento da temperatura no sistema é relativamente pequeno e a deformação ocorre praticamente à temperatura ambiente. Isso significa que as distorções devido ao calor são evitadas e manipulação da peça acabada torna-se mais simples (MOTOASCA, 2003).

Entretanto segundo (MOTOASCA, 2003), o processo EMF apresenta também algumas desvantagens:

- Necessita de precauções especiais de segurança devido à alta tensão de operação, e o equipamento necessário ainda é caro;
- Na prática, a sua aplicação é ainda restrita à formas bastante simples e pouco profundas, e há limitações de tamanho para a peça a ser moldada;

- Apenas uma pequena parcela da energia é utilizada para a deformação plástica, resultando num processo com baixa eficiência;
- O tempo de vida da ferramenta é reduzido devido às sucessivas cargas termomecânicas;
- Apenas materiais com boa condução de eletricidade pode ser deformado diretamente. Para materiais não condutores ou com baixa condutividade é necessário uma peça intermediária com boa condutividade para realizar a conformação.

As bobinas atuadoras comumente utilizadas na conformação de chapas metálicas planas têm formato espiral plano ou algum formato semelhante para induzir corrente na chapa metálica. Existem duas limitações importantes de bobinas de EMF tradicionais. Em primeiro lugar, a distribuição da pressão eletromagnética não é uniforme, o que limita o tipo de peças que podem ser conformadas. Em segundo lugar, as pressões eletromagnéticas que podem ser produzidas são limitadas pela robustez da bobina, que por sua vez depende do material que é usado na construção da matriz, e não são tão elevadas como as obtidas por bobinas de compressão de tubos.

Atualmente o processo EMF é utilizado principalmente com ligas de alumínio ou de cobre, mas esta tecnologia tem sido aplicada também a ligas de magnésio, o qual tem baixa densidade, alta resistência mecânica e baixa conformabilidade. A causa da formação de falhas em tubos de liga de magnésio AZ31 durante EMF para pulsos de tensões diferentes tem sido investigada por (WANG et al., 2010). Este também demonstrou que o limite de conformação à temperatura ambiente da liga de magnésio pode ser alcançado com energias de entrada adequadas.

No processo EMF os fenômenos mecânicos e eletromagnéticos são fortemente inter-relacionados, e a deformação da chapa metálica afeta as indutâncias próprias e mútuas, a

densidade de fluxo magnético e, conseqüentemente, as forças de origem eletromagnética desenvolvidas. Uma abordagem aproximada e mais fácil de ser realizar é tratar o processo como um problema de fraco acoplamento, desprezando a influência da deformação da chapa metálica no campo magnético e parâmetros do sistema, e em seguida aplicar as forças geradas pelo campo eletromagnético no problema mecânico (MAMALIS et al., 2006; MERICHED, 2000).

De fato, a análise e modelagem do processo de EMF requerem conhecimento prévio em áreas interdisciplinares, envolvendo eletromagnetismo, dinâmica da deformação de chapas metálicas, viscoplasticidade de materiais e métodos numéricos avançados para lidar com acoplamento de equações não-lineares. Isso o torna difícil para divulgar e, portanto, impede a implementação e desenvolvimento desta tecnologia, tanto em ambientes acadêmicos como industriais. Análise do processo de EMF é uma tarefa muito complexa e é um assunto de estudos recentes, bem como suas possíveis aplicações e potencialidades que este processo pode oferecer, onde os métodos convencionais de conformação falham.

1.2 TEMA

O tema deste trabalho consiste na modelagem e simulação numérica do processo de conformação eletromagnética de chapas finas usando bobina espiral plana. A modelagem é totalmente acoplada elétrico-magnética e fracamente acoplada com o problema mecânico, sendo o perfil da força de origem eletromagnética calculado para vários instantes e aplicado à chapa para obtenção da deformação plástica da mesma.

1.2.1 Delimitação do Tema

O processo de EMF é uma tarefa desafiadora para análise, devido à exigência de modelagem simultânea da interação dos fenômenos eletromagnéticos, mecânicos e térmicos, entretanto o processo de EMF pode ser considerado como uma combinação de dois

fenômenos físicos principais, ou seja, problema eletromagnético e deformação mecânica da chapa. A força mecânica de origem eletromagnética depende basicamente da intensidade da corrente de descarga, do acoplamento eletromagnético entre a bobina atuadora e a chapa metálica a ser deformada e da densidade do fluxo magnético gerado na interface bobina-chapa.

Este trabalho trata da modelagem numérica do processo EMF, para a conformação de chapas com bobina espiral plana, considerando fraco acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos. Nesta abordagem fracamente acoplada, o problema eletromagnético e o problema mecânico são tratados de forma independente. Os fenômenos magnéticos são descritos pelas equações *Biot-Savart* e o problema elétrico é descrito por teoria de circuitos, sendo os dois fenômenos acoplados pelas indutâncias. O movimento da chapa metálica sendo deformada é negligenciado, e o problema eletromagnético é resolvido por métodos numéricos implementados no *software Matlab*, para obtenção da pressão mecânica na chapa.

O problema mecânico, entretanto é resolvido usando métodos de elementos finitos através do *software Abaqus/Explicit*, o qual usa um algoritmo de solução adequado a problemas dinâmicos, sendo a pressão introduzida no *software* através de uma sub-rotina (VDLOAD) acessível ao usuário (HIBBITT, 2011). Neste modelo não será considerado o problema térmico, visto que este tem pouca influência no resultado de acordo com experimentos já realizados por (PAESE, 2010).

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Os processos de conformação estão em constante desenvolvimento visando atender aos requisitos de peças com melhor acabamento, maior conformabilidade efetiva possibilitando geometrias mais complexas, menores pesos com o emprego de ligas com maior

resistência mecânica, altas taxas de produção e menor custo. O problema de pesquisa desta tese questiona: como desenvolver um novo modelo de análise do processo de EMF que possa contribuir para o desenvolvimento do processo, no projeto de equipamentos e maior aplicação deste processo no âmbito industrial? Uma contribuição para solução deste problema será apresentada considerando-se contribuir com os métodos que consideram fraco acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos.

1.4 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um novo modelo de análise numérica do processo de conformação eletromagnética de chapas finas planas usando bobina espiral, considerando-se a simplificação de fraco acoplamento entre os dois principais fenômenos envolvidos no processo: eletromagnético e mecânico.

1.4.1 Objetivos Específicos

O principal objetivo deste trabalho é propor uma metodologia numérica de análise do processo EMF, configurado com uma bobina espiral plana como atuador em contraste com outros já apresentados (MERICHEDE, 2000; TAKATSU et al., 1988; XU et al., 2010), os quais são dependentes dos parâmetros da corrente de descarga como entrada. Nestes trabalhos os parâmetros como a indutância e resistência do circuito de descarga, são introduzidos por meio de medições experimentais ou usando-se uma curva da corrente de descarga específica. No método proposto esses parâmetros são calculados numericamente prevendo a indutância e resistência que é refletida ou transmitida ao circuito primário de descarga quando a chapa metálica a ser deformada é acoplada ao sistema EMF.

As correntes de descarga (bobina atuadora) e induzidas (chapa metálica) são numericamente calculadas pela solução de um sistema acoplado de equações diferenciais ordinárias (ODE). Esta é a principal diferença quando se compara este procedimento com os

outros da literatura, especialmente em análises do processo EMF como, por exemplo, em (AL-HASSANI, 1975; CORREIA et al., 2008; MERICHED, 2000; TAKATSU et al., 1988; XU et al., 2010), os quais precisam informar a função da corrente de descarga como entrada, sendo esta hipotética ou medida experimentalmente, para posteriormente calcular a força de origem eletromagnética.

A pressão mecânica devido às forças de origem eletromagnética ao longo da chapa para diversos instantes, obtida da solução do problema eletromagnético, é um dos parâmetros de entrada do problema mecânico. A deformação da chapa metálica é obtida através de simulação numérica no *software Abaqus/Explicit*.

Abaqus/Explicit é um *software* de elementos finitos capaz de simular eventos transitórios, como a pressão gerada no processo EMF. Neste *software* a sub-rotina VDLOAD acessível ao usuário é usada para descrever a variação da magnitude da carga distribuída como função da posição e tempo, com o objetivo de comparar a geometria simulada a obtida experimentalmente. A definição do tempo inicial e passo para a introdução de um novo perfil de pressão na sub-rotina VDLOAD também é definido neste estudo através da medição experimental da velocidade média de deformação da chapa e tempo total de deformação da mesma.

1.5 JUSTIFICATIVA

Durante as últimas décadas, uma necessidade crescente de produzir componentes de alta resistência de forma mais econômica em relação aos processos convencionais tem causado um interesse renovado no processo de conformação eletromagnética.

A busca de vantagens competitivas está levando muitas empresas a investir no desenvolvimento de novas técnicas aplicadas ao processo de conformação. A conformação

eletromagnética tem grandes potenciais em processos específicos destas indústrias, principalmente onde os processos convencionais falham.

O recente interesse no entendimento do processo EMF tem sido estimulado também pelo desejo de se utilizar mais o alumínio na indústria automobilística e aeronáutica. O processo de conformação eletromagnética é relativamente bem desenvolvido na compressão ou expansão de peças tubulares. Já o problema de conformação de chapas através de bobinas espirais planas é pouco desenvolvido.

O modelo simplificado sem nenhum acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos desenvolvido por (PAESE et al., 2011) já demonstrou ser útil para análise do processo EMF. Esta nova proposta analisa o problema considerando fraco acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos, podendo agora confrontar de forma quantitativa os resultados experimentais.

Devido à complexidade do modelo totalmente acoplado, este necessita de grande trabalho computacional, e é frequente a utilização de *softwares* de elementos finitos capazes de analisar problemas multi-física. A modelagem numérica-computacional de problemas compostos por mais de um dos campos da física, inter-relacionados e de atuação simultânea, frequentemente necessita de abordagem numérica, pois resultados analíticos não são possíveis sem se fazer diversas simplificações. O modelo com fraco acoplamento parece ser um método adequado para solução de problemas de EMF sem a utilização de pacotes totalmente fechados de *softwares* comerciais.

A proposta de modelagem desenvolvida neste trabalho serve como base para o projeto e seleção de vários componentes do sistema de EMF. Além disso, outra característica especial do modelo proposto é a possibilidade de alterar os parâmetros do processo e identificar facilmente as suas influências sobre a pressão de origem eletromagnética.

1.6 METODOLOGIA

A metodologia adotada para análise da interação entre o problema eletromagnético e mecânico é mostrada esquematicamente na Figura 1. Esta é baseada num modelo fracamente acoplado entre os problemas eletromagnético e mecânico, usando-se as etapas descritas abaixo:

- Definição da geometria e levantamento das variáveis eletromagnéticas e elétricas envolvidas no processo;
- Análise do problema eletromagnético;
- Obtenção do perfil da força de origem eletromagnética ao longo da chapa metálica para diversos instantes, a qual será usada como um dos parâmetros de entrada do problema mecânico juntamente com o comportamento do material a ser deformado quando submetido a altas taxas de deformação;
- Comparação da geometria obtida na simulação com experimental.

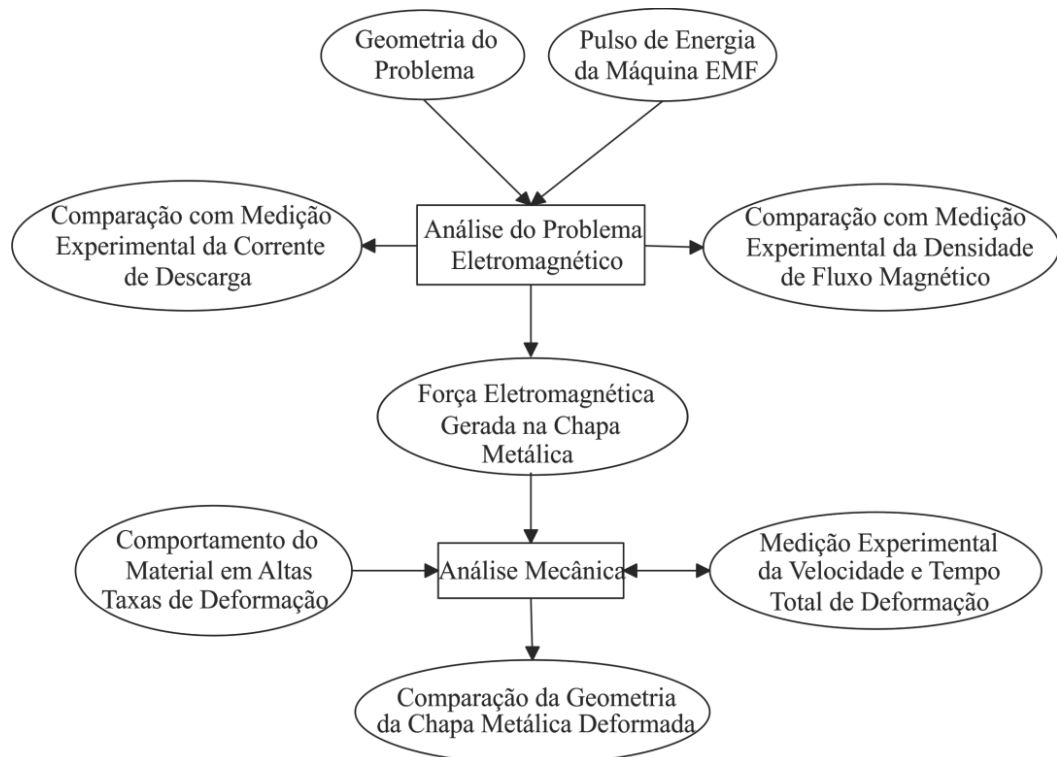


Figura 1 Fluxograma da interação entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos no modelo fracamente acoplado.

1.7 RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados esperados com o desenvolvimento deste trabalho relacionado ao desenvolvimento do processo de conformação eletromagnética são:

- Desenvolver uma metodologia de análise numérica do processo EMF aplicado a chapas metálicas finas, usando atuador eletromagnético em formato espiral;
- O problema eletromagnético é resolvido através de um algoritmo próprio desenvolvido no *software Matlab*. Este método de análise é diferente dos modelos já apresentados na literatura, necessitando apenas como entrada os dados mostrados na Figura 1;
- Implementação no *software Abaqus/Explicit* de uma sub-rotina VDLOAD capaz de descrever o perfil da carga distribuída, gerada no processo EMF em função do raio da chapa metálica e do tempo da corrente de descarga;
- Confecção de um dispositivo de conformação eletromagnética com bobina espiral plana para realização de experimentos, com o objetivo de validar o modelo proposto;
- Medição experimental da densidade de fluxo magnético na direção radial e comparação com obtido no modelo numérico com e sem chapa metálica (chapa fixa);
- Medição experimental da corrente de descarga sem chapa metálica para obtenção da indutância e resistência interna da máquina de conformação eletromagnética (SMU 1500). A corrente de descarga é ainda medida com a chapa metálica deformando e fixa, sendo esta comparada com obtida pelo modelo eletromagnético, o qual despreza o movimento da chapa metálica;
- Medição da velocidade média de deformação da chapa metálica e tempo total de deformação, com o objetivo de verificar a influência da inércia na deformação e

definição do tempo para introdução de um novo perfil de pressão na sub-rotina VDLOAD;

- Comparação das deformações obtidas experimentalmente com a obtida na simulação numérica realizada no *software Abaqus/Explicit*.

O método numérico de análise do processo de EMF pode fornecer uma maior compreensão de um processo que ainda é considerado complexo para uso em escala industrial. Este também torna-se importante para a concepção de dispositivos, tais como bobinas atuadoras, matrizes, definição dos capacitores, chave principal de acionamento, bem como a identificação de parâmetros e sua influência no processo EMF.

Por se tratar um processo de conformação extremamente rápido, o dispositivo poderá ser usado em trabalhos futuros relacionados à velocidade de conformação dos materiais, ou até mesmo, sistemas híbridos que utilizam conformação convencional e eletromagnética juntos.

1.8 HISTÓRICO DO GRUPO DE PESQUISA

O estudo do tema teve início em 2009, com o projeto e construção de um dispositivo laboratorial mediante doações de empresas e de recursos próprios, o qual possibilitou diversas publicações e a cooperação internacional com o Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST). O dispositivo laboratorial desenvolvido em 2009 apresenta baixa frequência (cerca de 1 kHz), devido a utilização de capacitores não apropriados para a aplicação em conformação eletromagnética, assim consequentemente apresentou baixa eficiência. Isso pode ser comprovado com um modelo simplificado de análise do problema eletromagnético. Este considerava nenhum acoplamento entre fenômenos eletromagnéticos e mecânicos.

Até o presente momento, com o uso do equipamento simples construído com algumas doações de empresas e recursos próprios e com cooperação internacional com o Instituto

Superior Técnico de Lisboa (IST), o qual possui uma máquina comercial de conformação eletromagnética fabricada pela *Poynting GmbH* (<http://www.poynting.de/en/>), pode-se já realizar as seguintes publicações:

- Participação e publicação de dois artigos em congresso – *4th International Conference on High Speed Forming* – Columbus, Ohio, USA – 2010;
- Submissão de artigo ao periódico *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Aprovado em Agosto/2011;
- Submissão de artigo ao periódico *Applied Mathematical Modelling*. Aprovado em Maio/2014;
- Submissão de artigo ao periódico *Applied Mechanics and Materials*. Aprovado em Fevereiro/2014.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo desta seção é apresentar um breve histórico e estado da arte do processo de conformação eletromagnética, aplicado a chapas planas e finas com bobina atuadora em formato espiral. Um detalhamento do processo de embutimento e as principais variáveis envolvidas neste processo também são apresentadas nesta seção. Esta revisão concentra-se principalmente nos métodos de análise dos fenômenos eletromagnéticos e mecânicos envolvidos no processo EMF.

2.1 HISTÓRICO

Os efeitos de campos eletromagnéticos em condutores foi uma das descobertas durante a introdução da eletricidade na indústria. Estes condutores podem ser movidos ou deformados por força de origem eletromagnética, sendo que ambos os efeitos (movimento e deformação) têm sido estudados por seus aspectos positivos e negativos, desde que a primeira máquina elétrica foi posta em funcionamento. No funcionamento de máquinas elétricas, a força de origem eletromagnética produz apenas movimento, já a deformação plástica de partes da máquina não é desejada. Por outro lado, em outras aplicações como o processo EMF, a deformação é o efeito desejado da força de origem eletromagnética, sendo que o movimento da peça acontece devido à deformação da mesma.

A aplicação do processo EMF já tem sido estudada desde o início do século XX, mas devido a limitações técnicas dos componentes usados no sistema e falta de melhores condições computacionais para análise numérica do problema, esta técnica de deformação em alta velocidade foi deixada de lado durante décadas (MOTOASCA, 2003; ZITTEL, 2010).

No início de 1960, um intenso campo eletromagnético foi usado em pesquisas de fusão nuclear. As altas correntes necessárias para gerar os campos de alta intensidade foram produzidas pela descarga de vários capacitores em paralelo conectados a uma bobina. Barras

de cobre paralelas foram utilizadas para transportar as altas correntes do banco de capacitores para a bobina. Estas correntes elétricas podiam atingir centenas de milhares ou até um milhão de ampères, causando forças opostas entre os condutores capazes de deformar as barras de ligação (ZITTEL, 2010).

Uma idéia surgiu para usar estas forças para realizar um trabalho útil. O sistema de barras foi transformado em uma bobina atuadora e uma peça metálica foi inserida nesta bobina para ser deformada. A interação do campo produzido pela bobina e aquele produzido pela corrente induzida exerceria pressão sobre a peça a ser deformada. Os resultados destes experimentos foram suficientes para continuar o desenvolvimento do processo de EMF e do equipamento utilizado (ZITTEL, 2010).

A primeira introdução de equipamentos de EMF na indústria foi em 1964 na *General Motors* para a fixação de coifas em juntas homocinéticas através da compressão de um anel metálico. A máquina era tecnicamente primitiva comparada aos equipamentos utilizados atualmente. No entanto, se mostrou confiável produzindo componentes para a indústria automotiva. Esta máquina foi especialmente útil para os engenheiros entenderem o que poderia ser feito com o processo EMF ou como projetar o equipamento. Esta também serviu como base de dados para melhorar o processo e o equipamento utilizado. Nos dez anos seguintes de evolução dos equipamentos de EMF, estes foram suficientes para o equipamento ser introduzido como uma das 28 estações de uma linha automatizada de produção (ZITTEL, 2010).

Dependendo da disposição e da geometria da bobina e peça a ser deformada, diferentes aplicações do processo EMF são possíveis: compressão e expansão de componentes tubulares ou conformação de chapas planas em peças tridimensionais, de acordo com a Figura 2.

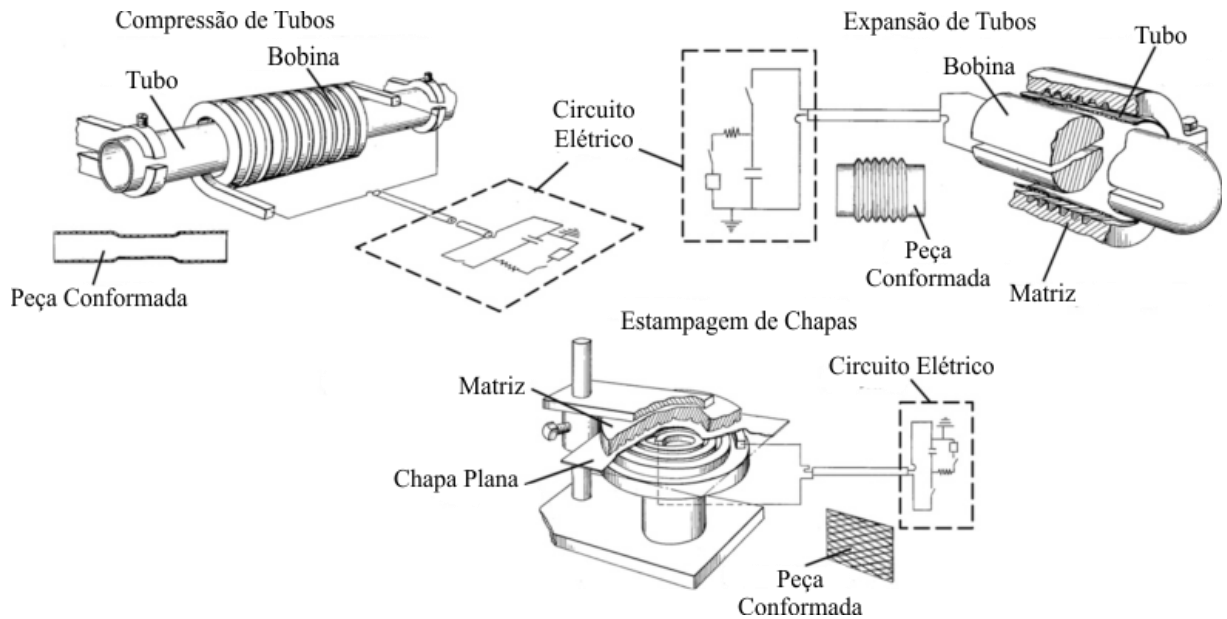


Figura 2 Diferentes tipos de bobinas eletromagnéticas para os processos EMF (HARVEY, 1958).

De acordo com (BELYY, 1977) tubos com um diâmetro entre 30 mm a 2 m com espessuras de até 5 mm podem ser conformados. Para conformação de chapa, bobinas atuadoras espirais planas são utilizadas. Neste processo, a área da peça a ser deformada depende da capacidade de energia da máquina e varia entre 10^{-4} até $0,02 \text{ m}^2$ e da espessura da chapa pode ser de até 5 mm. É bastante difícil criar um campo de pressão uniforme sobre toda a área da peça de trabalho. Durante o processo de EMF de chapas plana a força de origem eletromagnética na parte central do indutor é zero, e a peça a ser deformada não está sujeita à pressão na zona central sobre a área limitada a $(0,5-6) \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Um novo conceito de um atuador eletromagnético para conformação de chapas planas que desenvolve pressão uniforme foi desenvolvido na *Ohio State University* por Dr. Glenn Daehn para conformação de placas usadas em células a combustíveis. A Figura 3 mostra uma vista esquemática em corte desta bobina de pressão uniforme. Quando o banco de capacitores é descarregado, a corrente flui através da bobina primária, sendo que esta encontra-se bem isolada do condutor exterior. O condutor exterior e a chapa metálica formam um circuito fechado, e os fluxos de corrente induzida através dele geram forças repulsivas entre a chapa e

a bobina primária, pois as correntes são opostas. Uma vez que o caminho da corrente induzida envolve completamente a bobina, existe pouca perda da energia do fluxo magnético e, portanto, melhor eficiência (GOLOWIN et al., 2007; KAMAL, 2005).

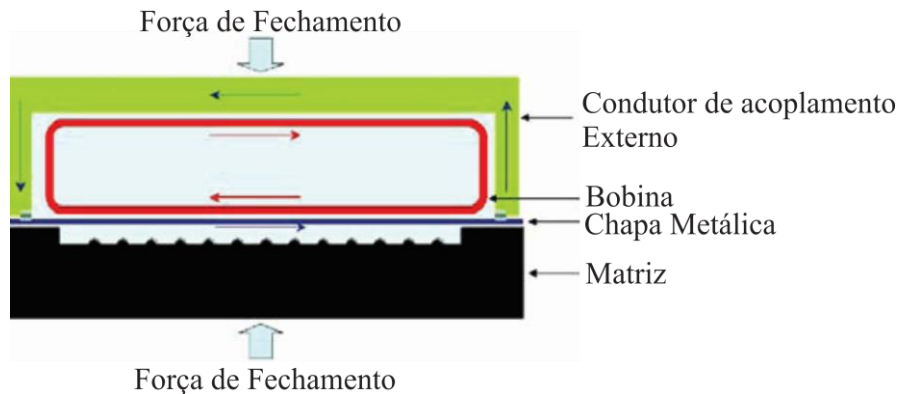


Figura 3 Vista esquemática em corte de uma bobina de pressão eletromagnética uniforme. O enrolamento primário tem várias voltas no plano entrando na página (GOLOWIN et al., 2007).

Durante os últimos anos, algumas análises numéricas têm sido realizadas do processo de EMF aplicado a chapas. Primeiramente, (TAKATSU et al., 1988) descreveu as equações básicas para simular o abaulamento livre de uma chapa plana por força de origem eletromagnética. Uma análise conjunta do circuito, densidade de fluxo magnético e equações dinâmicas da deformação plástica da peça foram realizadas para uma configuração axi-simétrica e posterior solução numérica. Além disso, na sua aproximação numérica, este considera a interação entre a densidade de fluxo magnético e a evolução da deformação da peça.

Um código bi-dimensional foi desenvolvido por (FENTON, 1998) o qual usa diferenças finitas para simular numericamente o processo EMF com um acoplamento completo entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos. No entanto, este usa uma lei de endurecimento do material a ser deformado independente da taxa de deformação.

Com o desenvolvimento de pacotes comerciais de elementos finitos, uma abordagem foi proposta por (OLIVEIRA et al., 2005). A modelagem numérica do processo EMF exige a

solução simultânea das equações eletromagnéticas, mecânicas e térmicas. Nesta análise os efeitos térmicos foram desconsiderados, assumido-se ser um problema adiabático. Os fenômenos eletromagnéticos transitórios envolvidos no processo EMF, foram simulados em um pacote comercial de *software* de elementos finitos (*ANSYSEMAG 5.7*). O comportamento mecânico do sistema foi modelado utilizando *LS-DYNA* versão 950, o qual é um programa de análise dinâmica explícito. A estratégia nesta modelagem do processo de EMF é o de desenvolver uma interface entre os códigos individuais de cada pacote. A deformação é prevista a partir do código estrutural e então usada para atualizar o modelo eletromagnético.

Um modelo totalmente acoplado foi proposto por (STIEMER et al., 2006) para simular o processo de EMF. Este permite simulações precisas do processo de EMF de chapas, mas os modelos mais simplificados também geram bons resultados como os apresentados por (CORREIA et al., 2008; IMBERT, 2004; SIDDIQUI, 2009; SIDDIQUI et al., 2009; WANG et al., 2006). Nestes modelos simplificados, o processo de EMF de chapas planas é tratado como dois problemas independentes: um problema eletromagnético e um problema mecânico. Por exemplo, a distribuição da pressão magnética é estimada a partir da solução do problema eletromagnético, sendo esta utilizada como uma carga no problema mecânico. O problema mecânico é então resolvido através de um código comercial de elementos finitos.

Nos trabalhos de (CORREIA et al., 2008; SIDDIQUI, 2009; SIDDIQUI et al., 2009) o código de cálculo da pressão magnética que atua sobre a chapa metálica foi introduzido através de uma sub-rotina acessível ao usuário *VDLOAD*. Simulações numéricas do problema mecânico foram realizadas usando o *software* de elementos finitos *Abaqus/Explicit* para verificação da geometria deformada.

No presente trabalho o problema eletromagnético é modelado e resolvido numericamente com algoritmo próprio no *software Matlab* sendo que, os fenômenos elétricos e magnéticos são totalmente acoplados pelas indutâncias do sistema EMF, e a pressão de

origem eletromagnética é introduzida via sub-rotina de usuário VDLOAD no *software Abaqus/Explicit* para comparação da geometria obtida por simulação com a experimental. Os resultados obtidos da solução do modelo eletromagnético, corrente de descarga, densidade de fluxo magnético também são confrontados com resultados experimentais.

2.2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

A conformação de chapas metálicas é o método mais comum de fabricação de peças na indústria automotiva, por sua alta taxa e baixo custo de produção. Segundo (LANGE, 1994), embutimento é um processo no qual uma geratriz plana é conformada em uma determinada forma entre uma matriz e um punção para formar um componente oco em uma ou mais etapas, sem alteração da espessura da chapa. Nos processos convencionais de embutimento a matriz é usada para definir a forma externa e o punção possui a forma interna da peça. Geralmente, há um terceiro componente da ferramenta, chamado de sujeitador, o qual é usado para pressionar a geratriz contra o topo da matriz e controlar o fluxo do material na entrada da matriz.

Segundo (VOHNOUT, 1998), o processo convencional de embutimento é essencialmente um processo de controle de posição. Durante o processo o punção move-se para uma determinada posição até que a peça seja totalmente formada. Na prática, o sujeitador deve apertar a geratriz antes que o punção inicie a deformação da chapa. Desde que a força necessária não seja diretamente controlada, a máquina e o controle que são requeridos neste processo são bastante simples. As máquinas utilizadas no embutimento mais comuns são mecânicas e relativamente simples e de baixo custo. As máquinas hidráulicas são mais caras, mas podem controlar de forma independente a velocidade e posição do punção durante o processo de embutimento, beneficiando de forma positiva o processo.

Para (SHANG, 2006), na conformação de chapas metálicas, a deformação predominante é de tração na direção radial e compressão na direção tangencial. Sem a utilização de sujeitador, a região de deformação é livre, e a chapa é tão fina que é fácil de formar rugas. Com o uso de sujeitadores, parte da geratriz é suficientemente segura minimizando a formação de rugas na peça.

Segundo (WAGONER, 2001) o diagrama limite de deformação é para análise da conformabilidade nos processos de conformação de chapas. Nesta técnica, uma grade de círculos é marcada na geratriz, estes irão mudar sua forma depois da deformação. A maior e menor deformação podem ser medidas pela comparação da grade antes e depois da operação de conformação. Este método pode melhorar o entendimento das falhas na conformação de chapas metálicas e promover uma base para solução desses problemas.

Segundo (LANGE, 1994), os círculos têm deformações diferentes baseadas no tipo de carga. A Figura 4 mostra a relação entre a deformação do círculo e o tipo de tensão presente no mesmo.

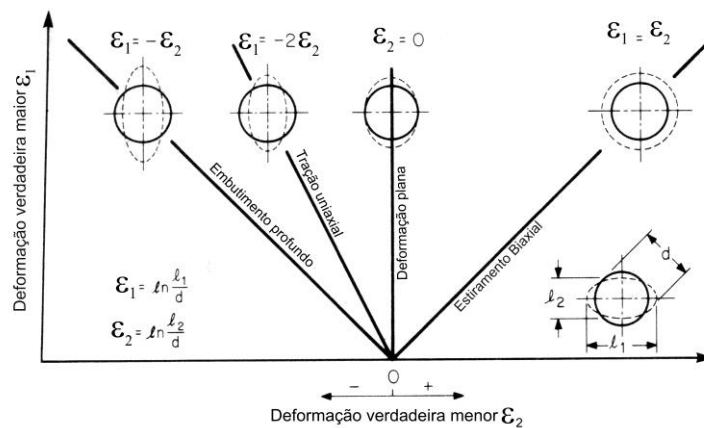


Figura 4 Tipos de deformações na grade de círculos (LANGE, 1994).

Segundo (WAGONER, 2001), o limite de conformação da chapa é definido para o momento em que um afinamento da chapa inicia durante sua conformação, isso irá conduzir a chapa a ruptura. Para analisar a conformação de uma chapa, deformações perto das falhas ou

em pontos suspeitos são medidas e comparadas ao diagrama limite de conformação. Se as deformações estão perto da curva de falha, provavelmente o material se romperá durante o processo de conformação. A Figura 5 mostra um diagrama limite de conformação típico. Neste diagrama, pode-se constatar que quanto mais alta estiver a curva no eixo da maior deformação melhor será o material para conformação. O diagrama também mostra que o endurecimento por deformação tem grande influência nas deformações máximas e o menor limite de deformação ocorre no estado plano de tensões, no qual, a menor deformação é zero.

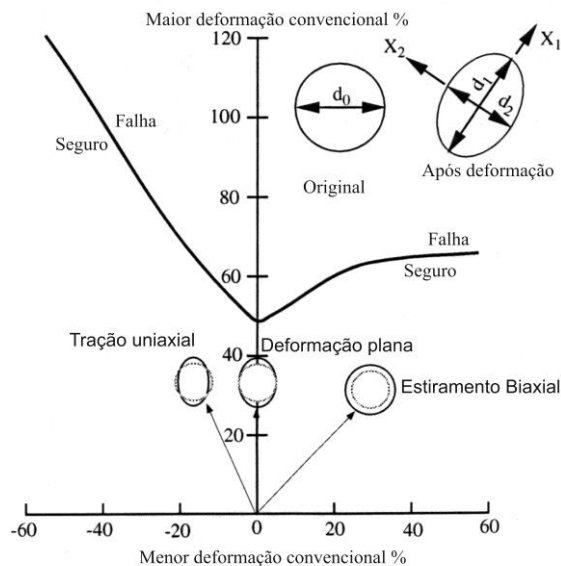


Figura 5 Diagrama limite de conformação típico (WAGONER, 2001).

2.3 O PROCESSO DE CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

O princípio da conformação eletromagnética de forma simples consiste de um atuador condutivo, usualmente um solenóide ou espiral plana fabricado em cobre ligado em série com um banco de capacitores carregados por um circuito de alta tensão. Os capacitores são descarregados na bobina atuadora, causando um grande transiente de corrente na ordem de dezenas de kA durante um intervalo de micro segundos (usualmente inferior a 150 μ s). Isso produz uma densidade de fluxo magnético transiente, o qual induz correntes parasitas no

material a ser deformado. O campo magnético na bobina atuadora e o gerado pela corrente induzida na chapa são repulsivos resultando em um pulso de pressão de origem eletromagnética, o qual é responsável pela deformação plástica da chapa.

A maior parte das análises de processos EMF são relacionadas à compressão e expansão de tubos por bobinas do tipo solenóide e há poucos trabalhos relacionados a conformação de chapas planas por bobinas do tipo espiral plana (MERICHEDE, 2000; TAKATSU et al., 1988).

2.3.1 Circuito Elétrico de Representação do Sistema EMF

Segundo (TAKATSU et al., 1988), basicamente, um sistema de EMF é um circuito de descarga de um banco de capacitores que consiste na unidade de pulso do sistema, linhas de conexão, um dispositivo de acionamento principal (interruptor) e uma bobina atuadora acoplada magneticamente à chapa metálica a ser deformada. Uma representação do sistema é mostrada esquematicamente na Figura 6.

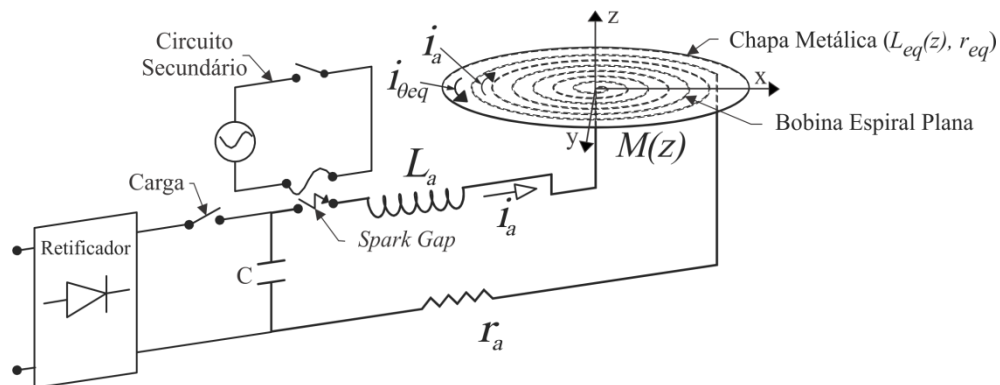


Figura 6 Esquema elétrico do sistema de conformação eletromagnética (PAESE et al., 2011).

As equações (1) e (2) descrevem o circuito elétrico que representa o sistema EMF.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + M(z) \frac{di_{\theta eq}}{dt} + i_{\theta eq} \frac{dM(z)}{dz} \frac{dz}{dt} + r_a i_a + \frac{1}{C} \int i_a dt = 0 \quad (1)$$

$$L_{eq}(z) \frac{di_{\theta eq}}{dt} + i_{\theta eq} \frac{dL_{eq}(z)}{dz} \frac{dz}{dt} + M(z) \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dM(z)}{dz} \frac{dz}{dt} + r_{eq} i_{\theta eq} = 0 \quad (2)$$

onde:

C é a capacitância;

L_a é a indutância do circuito de descarga;

r_a é a resistência do circuito de descarga;

$M(z)$ é a indutância mútua entre a bobina e a chapa metálica;

i_a é a corrente na bobina atuadora;

$i_{\theta eq}$ é a soma equivalente das correntes induzidas na chapa metálica;

$L_{eq}(z)$ é a indutância equivalente da chapa metálica;

r_{eq} é a resistência equivalente da chapa metálica.

As condições iniciais para equações (1) e (2) são as seguintes:

$$i_a = 0, \quad L_a \frac{di_a}{dt} = V_0, \quad i_{eq} = 0 \quad (3)$$

onde:

V_0 a tensão inicial no banco de capacitores.

A indutância própria da chapa metálica $L_{eq}(z)$ e a mútua $M(z)$ não são constantes, e variam com a deformação da chapa metálica. Esta variação altera as forças de eletromagnéticas desenvolvidas sobre a peça em deformação.

2.3.2 O Problema Magnético do Processo EMF

A densidade de fluxo magnético transiente gerado pela bobina atuadora penetra na chapa metálica induzindo correntes parasitas no seu interior. Devido à corrente induzida ser contrária a variação da de descarga, uma força magnética é produzida entre a bobina atuadora e a chapa metálica. O cálculo da densidade de fluxo magnético é baseado nas equações quase-estacionárias de *Maxwell*, sendo que a chapa é tratada como não magnética. As equações fundamentais da densidade de fluxo magnético no interior de um meio condutor são as seguintes:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e \quad (7)$$

onde:

\mathbf{H} é a intensidade do campo magnético;

\mathbf{J} é a densidade de corrente;

\mathbf{E} é o campo elétrico;

\mathbf{B} é a densidade do fluxo magnético;

\mathbf{D} é a densidade do fluxo elétrico;

ρ_e que é a densidade em volume de cargas elétricas livres;

t é o tempo.

Como consequência da equação (4), pode-se obter a equação de continuidade do fluxo de corrente (conservação da carga elétrica) para um meio homogêneo e isotrópico:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (8)$$

Os campos nas equações de *Maxwell* estão interligados pelas seguintes equações constitutivas:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (10)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (11)$$

onde:

μ é a permeabilidade magnética do meio;

σ é a condutividade elétrica do meio;

ε é a permissividade elétrica (ou permeabilidade dielétrica) do meio;

\mathbf{v} é a velocidade do meio onde o campo é difundido.

Na equação (10) a velocidade \mathbf{v} do material condutor é medida em relação a um sistema de coordenadas inercial em que todas as quantidades do campo são medidas. Esta também é assumida independentemente especificada como função do espaço e do tempo.

A densidade de força eletromagnética \mathbf{F} na chapa metálica para $\mu=\mu_0$ (material da chapa a ser deformada é não magnético) é dada por:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (12)$$

Assumindo que o material seja isotrópico e homogêneo (isto significa que μ e σ não são funções do espaço, mas podem ser funções do tempo) e, após algumas manipulações matemáticas das equações (4) a (11), pode-se escrever uma equação vetorial em termos da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} (WOODSON, 1968):

Usa-se a equação (10) para eliminar \mathbf{E} de (5):

$$\frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{J} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (13)$$

Usa-se equação (9) para eliminar \mathbf{H} de (4):

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (14)$$

Combinando-se as equações (13) e (14), pode-se obter:

$$\frac{1}{\mu\sigma} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (15)$$

Usando-se a identidade vetorial (16) e (6) pode-se reescrever o primeiro termo do lado esquerdo da equação (15) para obter a expressão desejada, envolvendo uma única variável dependente, a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} .

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} \quad (16)$$

$$-\frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (17)$$

Esta equação calcula a distribuição da densidade de fluxo magnético em um meio condutor. Esta inclui tanto os efeitos da densidade de fluxo magnético variável no tempo

quanto o movimento do material. Considerando uma análise simplificada o movimento da peça pode não ser considerado, e a equação de difusão da densidade de fluxo magnético reduz-se a:

$$-\frac{1}{\mu\sigma}\nabla^2\mathbf{B}+\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}=0 \quad (18)$$

Para o caso em que tanto a bobina em espiral como a chapa metálica são tratadas como axissimétricas, a equação (18) pode ser escrita em coordenadas cilíndricas (r, θ, z) , sendo que a densidade de fluxo magnético tem componente radial $B_r=B_r(r,z,t)$, componente axial $B_z=B_z(r,z,t)$ e circunferencial $B_\theta=0$.

$$-\frac{1}{\mu\sigma}\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}-\frac{1}{r^2}\right)B_r+\frac{\partial B_r}{\partial t}=0 \quad (19)$$

$$-\frac{1}{\mu\sigma}\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)B_z+\frac{\partial B_z}{\partial t}=0 \quad (20)$$

A densidade de corrente tem componente circunferencial, e das equações (8) e (9) pode-se obter:

$$J_\theta=\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial B_r}{\partial z}-\frac{\partial B_z}{\partial r}\right) \quad (21)$$

A partir da equação (12), pode-se escrever as equações para cálculo das componentes da força eletromagnética na direção axial e radial.

$$f_r=J_\theta\cdot B_z \quad (22)$$

$$f_z=-J_\theta\cdot B_r \quad (23)$$

O vetor de potencial magnético pode ser obtido da combinando a equação (6) com o resultado de que a divergência do rotacional de qualquer campo vetorial é zero obtêm-se:

$$\nabla\cdot\nabla\times\mathbf{A}=0 \quad (24)$$

$$\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A} \quad (25)$$

onde:

\mathbf{A} é o vetor potencial magnético.

Combinando-se as equações (4), (9) e (25), obtém-se:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (26)$$

Resolvendo-se (26) para \mathbf{A} , obtém-se:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J} dv}{R} \quad (27)$$

Combinando-se as equações (25) e (27), pode-se obter a lei de *Biot-Savart*.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{a}_R}{R^2} dv \quad (28)$$

onde:

$$\mathbf{a}_R = \frac{\mathbf{R}}{R} \quad (29)$$

$$R = \|\mathbf{R}\| \quad (30)$$

Pode-se utilizar a lei de *Biot-Savart* dada pela equação (28) para calcular as componentes da densidade de fluxo magnético da direção axial B_z e direção radial B_r . As componentes axiais e radiais podem ser calculadas em pontos específicos para posteriormente obter as indutâncias próprias e mútuas do sistema EMF e a força eletromagnética na direção axial (direção da deformação principal para problemas de EMF envolvendo chapas planas). Esta força é proporcional a componente B_r da densidade de fluxo magnético (PAESE et al., 2011).

Segundo (MERICHEDE, 2000) a discretização espacial da bobina atuadora e da chapa a ser deformada pode ser usada para calcular o vetor potencial magnético produzido por estas, através da aplicação da lei de *Biot-Savart*. O problema é transitório, e uma discretização no tempo também é necessária para a avaliação da densidade de fluxo magnético, das correntes na bobina atuadora e induzidas na chapa metálica e da força de origem eletromagnética que atuam sobre a peça a ser deformada em cada intervalo de tempo, ou seja, na análise dinâmica

do processo. Esta última governa o movimento da chapa metálica, pois efetua o seu deslocamento, velocidade e aceleração em cada intervalo de tempo.

Considerando-se uma corrente I fluindo em um vetor de comprimento diferencial $d\mathbf{l}$ do filamento, conforme mostrado na Figura 7, a lei de *Biot-Savart* é dada pela equação (31) sendo a direção do vetor densidade de fluxo magnético normal ao plano que contém o filamento diferencial e a linha que liga o filamento ao ponto p (HAYT, 2010).

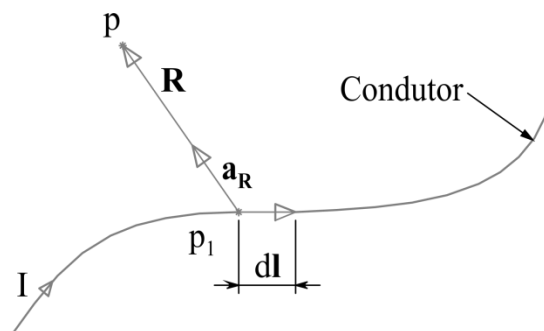


Figura 7 Ilustração da Lei de *Biot-Savart* (HAYT, 2010).

Usando a equação (28), e considerando a corrente I que flui em uma linha o cálculo do vetor de densidade de fluxo magnético num ponto genérico p , representado sob a forma vetorial, é dado como:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} d\mathbf{l} \times \mathbf{a}_R \quad (31)$$

onde:

\mathbf{B} é Vetor densidade de fluxo magnético;

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo;

I é a corrente elétrica no condutor;

$d\mathbf{l}$ é o vetor diferencial de comprimento do condutor;

R é a distância entre o elemento $d\mathbf{l}$ e o ponto p ;

\mathbf{a}_R é o vetor unitário na direção e sentido do vetor \mathbf{R} .

Segundo (KRAUS, 1981) o fluxo magnético é uma medida da quantidade de magnetismo, levando em conta as linhas de força e a magnitude da densidade de fluxo magnético, sendo definido pela equação (32).

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (32)$$

onde:

Φ é o fluxo magnético;

\mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético;

$d\mathbf{S}$ é o vetor infinitesimal, cujo magnitude é a área do elemento diferencial de S e a direção é normal à superfície.

A indutância é o parâmetro que relaciona uma tensão com uma corrente variável no tempo, sendo que o cálculo das indutâncias mútuas e próprias pode estabelecer os acoplamentos magnéticos entre o circuito primário e secundário do sistema de EMF mostrado na Figura 6. Estas são responsáveis pelo acoplamento entre os fenômenos elétricos e magnéticos do sistema EMF, sendo que as correntes de descarga e induzidas na chapa irão depender destes parâmetros (PAESE et al., 2014).

Para definir indutância, é necessário também introduzir o conceito de enlace de fluxo. Considera-se um solenóide com N espiras no qual uma corrente I produz um fluxo total Φ . Admitindo-se que este fluxo total Φ envolve cada uma das N espiras, o enlace de fluxo é definido como o produto do número de espiras N pelo fluxo Φ envolvendo cada uma delas. Para uma única espira, o enlace de fluxo é igual ao fluxo concatenado (HAYT, 2010).

$$\lambda = N\Phi \quad (33)$$

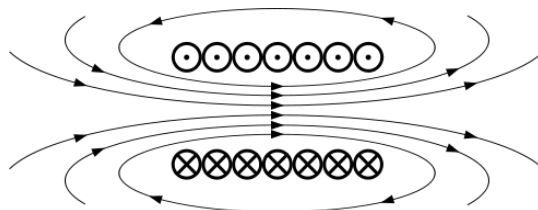


Figura 8 O fluxo magnético total enlaça todas as N espiras.

Indutância ou auto-indutância pode ser definida como a razão entre o total de enlases de fluxo e a corrente que os produz.

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\lambda}{I} \quad (34)$$

onde:

λ é o enlace de fluxo magnético;

Φ é o fluxo magnético que enlaça as N espiras;

N é o número de espiras;

I é a corrente na bobina.

A corrente I na bobina de N espiras da Figura 8 produz um fluxo total Φ que atravessa o enrolamento inteiro e enlaça a corrente N vezes. O enlace total de fluxo magnético é λ , onde neste momento considera-se que Φ envolve todas as espiras. Esta definição é válida para meios magnéticos lineares com permeabilidade constante como o ar, de modo que o fluxo seja proporcional à corrente. Em meios ferrosos, onde a permeabilidade não é constante, a indutância é definida como a relação entre a variação infinitesimal do enlace de fluxo e a variação infinitesimal da corrente (KRAUS, 1981).

A expressão (34) considera que o fluxo magnético no interior da bobina enlaça igualmente todas as espiras da mesma. Esta é uma boa aproximação para bobinas de muitas espiras enroladas uma encostada a outra.

Em um enrolamento real há um espaçamento entre as espiras e nem todas enlaçam o mesmo fluxo magnético, conforme mostra a Figura 9. Os enlases de fluxo não são mais o produto do fluxo pelo número total de espiras. Para se obter o total de enlases de fluxo, deve-se verificar espira por espira da bobina. Desta forma o total de enlases de fluxo para uma bobina de N espiras é dado por:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad (35)$$

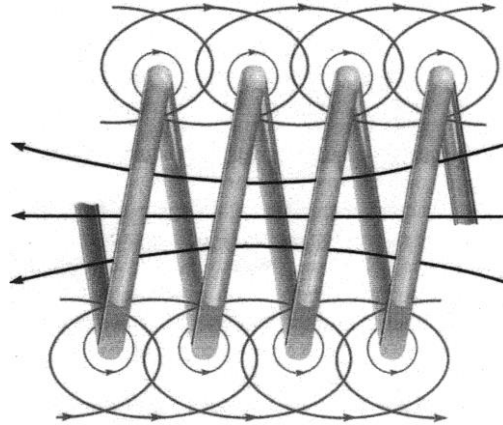


Figura 9 Porção de um enrolamento mostrando os enlaces parciais de fluxo (HAYT, 2010).

Segundo (NILSSON, 2003), quando há um campo magnético que age sobre dois ou mais circuitos diferentes, a tensão induzida no segundo ou mais circuitos está relacionada a uma corrente no primeiro circuito através de um parâmetro chamado indutância mútua entre o primeiro circuito e os demais ou vice-versa. A Figura 10 mostra que uma parcela Φ_{12} de fluxo magnético total, produzido pela corrente I_1 nas espiras da bobina N_1 , que envolve as espiras da bobina N_2 .

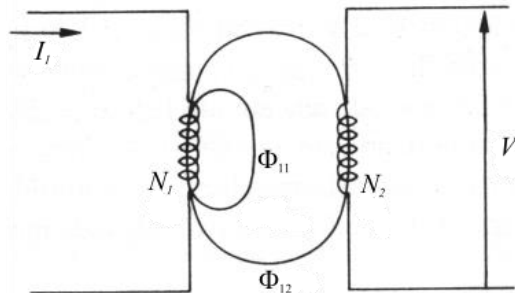


Figura 10 Fluxo magnético produzido pela bobina um que envolve as espiras da bobina dois (EDMINISTER, 2006)

Segundo (HAYT, 2010), define-se indutância mútua entre os circuitos 1 e 2, M_{12} , em termos dos enlaces mútuos de fluxo magnético. A indutância mútua depende da interação magnética entre as duas correntes nas espiras.

$$M_{12} = \frac{N_2 \cdot \Phi_{12}}{I_1} \quad (36)$$

onde:

M_{12} é a indutância mútua;

Φ_{12} é o fluxo magnético produzido por I_1 que enlaça o caminho da corrente filamentar I_2 ;

N_2 é o número de espiras do circuito 2;

I_1 é a corrente no circuito 1.

Com apenas uma das correntes, a energia total armazenada no campo magnético é calculada em função de uma indutância própria. Se ambas as correntes I_1 e I_2 possuem valores diferentes de zero, a energia total é uma função das duas indutâncias próprias e da indutância mútua. Utilizando-se a energia mútua armazenada em um campo magnético a equação (36) pode ser escrita como:

$$M_{12} = \frac{1}{I_1 I_2} \int_{vol.} (\mu_0 H_1 H_2) dV \quad (37)$$

onde:

H_1 é o campo magnético gerado por I_1 com $I_2=0$;

H_2 é o campo gerado por I_2 com $I_1=0$;

A troca dos índices não muda o valor da indutância mútua, pois não altera o lado direito da equação (37).

$$M_{12} = M_{21} \quad (38)$$

Segundo (NILSSON, 2003), a indutância mútua pode ser escrita em função das indutâncias próprias dos enrolamentos envolvidos.

$$M_{12} = k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (39)$$

onde:

k é chamado de coeficiente de acoplamento magnético.

Este coeficiente de acoplamento deve ser compreendido entre 0 e 1. Se $k=0$, significa que os dois enrolamentos não têm nenhum fluxo magnético em comum, ou seja, $\Phi_{12}=0$. Quando $k=1$, os fluxos $\Phi_{11}=0$ e $\Phi_{22}=0$. Isso significa que todo o fluxo que atravessa o enrolamento um também atravessa o enrolamento dois e vice-versa. Isso é uma situação ideal que é impossível de acontecer na prática. A Figura 11 mostra dois condutores retos paralelos, no ar e separados por uma distância R .

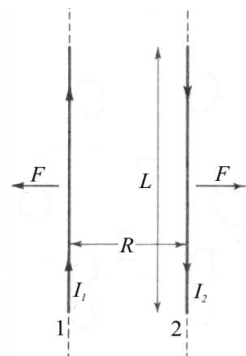


Figura 11 Força entre dois condutores retos paralelos no ar (KRAUS, 1981).

Segundo (KRAUS, 1981) considera-se que o condutor 1 conduz uma corrente I_1 e o condutor 2, uma corrente I_2 no sentido oposto, as linhas de fluxo geradas pelo condutor 1 estão para dentro da página na região do condutor 2, causando assim, uma repulsão entre os condutores. Se as correntes estiverem no mesmo sentido os condutores seriam atraídos. A força num comprimento L do condutor é calculada pela equação (40).

$$F = I_2 B \int_0^L dL = I_2 BL \quad (40)$$

onde:

F é a força no comprimento L do condutor 2;

I_2 é a corrente no condutor 2;

B é a densidade de fluxo magnético no condutor 2 produzido pela corrente I_1 do condutor 1;

L é o comprimento do condutor 2.

2.4 ANÁLISE DO PROBLEMA MECÂNICO

A determinação do comportamento do material durante a conformação dos metais tem sido motivo de pesquisas a várias décadas. Além de pesquisas ao nível da microestrutura, efeitos de encruamento em função de variáveis independentes são de especial interesse para engenheiros no projeto de processos de conformação. Especialmente, o comportamento do material para diferentes velocidades de deformação é necessário como dados de entrada em *softwares* de análise de EF aplicados aos processos de conformação em alta velocidade. Estes dados, por sua vez, são uma condição prévia e obrigatória para uso industrial de tais processos. Isso resulta em elevadas demandas dos sistemas de medição e estratégia de avaliação do comportamento da tensão de escoamento para altas taxas de deformação (KLEINER, 2006).

Segundo (KLEINER, 2006) há algumas dificuldades para determinação das tensões de escoamento durante testes de alta velocidade de deformação:

- Alterações contínuas da taxa de deformação durante o teste;
- Forças de inércia não homogêneas;
- Aumento da temperatura devido a condições adiabáticas.

Estes efeitos provocam uma deformação não uniforme devido a diferentes níveis de tensão na amostra, o que é agravado em caso de presença de atrito devido ao contato, portanto, a determinação da tensão de escoamento baseada exclusivamente em variáveis mensuráveis como força conduz a erros inevitáveis.

Devido ao processo de EMF ser aplicado a materiais com uma elevada condutividade elétrica, como as ligas de alumínio ou de cobre, um aquecimento adiabático da amostra devido às perdas elétricas pode ser reduzido de forma significativa. Além disso, o cálculo da densidade de fluxo magnético é simplificado, devido à ausência de ferromagnetismo.

Uma simplificação do modelo constitutivo de (STEINBERG, 1980) foi usada por (FENTON, 1998) em uma simulação do processo EMF usando código CALE. O modelo de resistência foi usado utilizando-se valores constantes para a resistência ao escoamento e módulo de cisalhamento que não eram funções da temperatura ou da pressão, como a relação padrão de *Steinberg* permite. A equação (41) representa o modelo constitutivo de *Steinberg* e a equação (42) foi usada por *Fenton* já com os parâmetros substituídos na mesma em MPa.

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \beta (\varepsilon + \varepsilon_i) \right]^n \quad (41)$$

$$\sigma = 93(1 + 125\varepsilon)^{0,1} \quad (42)$$

onde:

σ : é a tensão na qual se inicia a deformação plástica do material encruado;

σ_0 : é a tensão na qual se inicia a deformação plástica do material (resistência ao escoamento);

n : é o coeficiente de endurecimento em deformação ou coeficiente de encruamento;

ε_i : é a deformação plástica inicial, normalmente igual a zero;

Segundo (STEINBERG, 1980) o modelo da equação (41) pode ser usado para deformações em alta velocidade e descreve modificações para os modelos elástico-plásticos tradicionais. O subscrito 0 refere-se ao estado ($T = 300\text{K}$, $P = 0$, $\varepsilon = 0$), onde T e P são a temperatura e pressão respectivamente.

Um modelo para considerar o efeito da taxa de deformação sobre as propriedades do material submetido a altas velocidades de deformação também foi usado por (TAKATSU et al., 1988). A equação (43) descreve o endurecimento do material em deformação e inclui uma dependência logarítmica da mesma com a velocidade de deformação ou taxa de deformação.

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n + \sigma_1 \varepsilon^m \log \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}} \right) \quad (43)$$

onde:

σ_0 , n , m e σ_l são constantes do material;

ε é a deformação plástica;

$\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação plástica (velocidade de deformação).

A equação com as constantes já substituídas em MPa para alumínio A1050 no estado recozido é dada por:

$$\sigma = 118\varepsilon^{0,27} + 15,7\varepsilon^{0,54} \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}}\right) \quad (44)$$

A tensão inicial de escoamento do material usada na simulação com código CALE foi definida como 93 MPa, para se aproximar do modelo utilizado por *Takatsu et al.* em suas análises numéricas. O modelo de *Takatsu et al.* incluía a sensibilidade à taxa de deformação. A Figura 12 mostra como a equação (44) é afetada pela taxa de deformação. A máxima taxa de deformação usada é de 6000 s^{-1} , e o comportamento foi determinado a partir da análise com código CALE (FENTON, 1998).

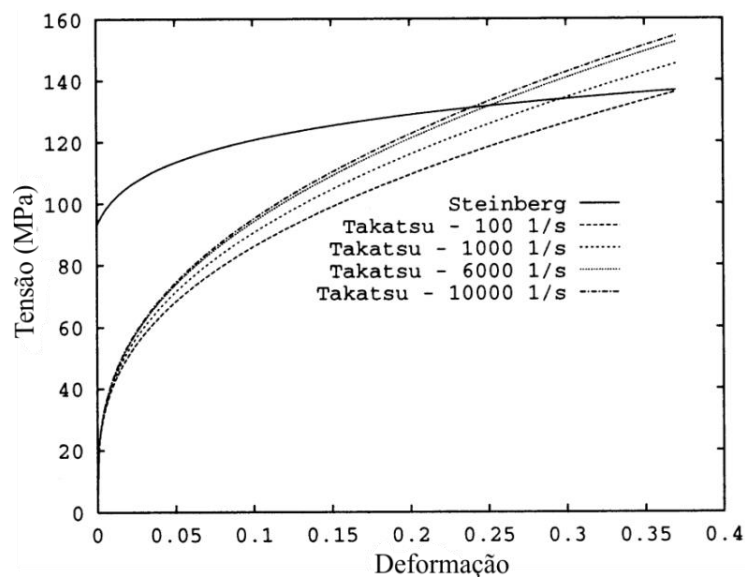


Figura 12 Comparação entre os modelos de *Takatsu et al.* e *Steinberg* para tensão versus deformação verdadeira nos modelos de plasticidade usados para simulações de abaulamento de chapas de alumínio (FENTON, 1998).

O modelo de endurecimento por encruamento dado pela lei de *Hollomon*, o qual é usada em situações de deformação quase-estática foi comparado por (SIDDQUI, 2009). Este foi utilizado nos cálculos do *software Abaqus/Explicit*. A lei *Hollomon* clássica é dada pela equação (45).

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n \quad (45)$$

O coeficiente de encruamento n é 0,27 e a tensão de escoamento σ_0 do material é igual a 118 MPa de acordo com o usado por (TAKATSU et al., 1988). Com este conjunto de valores das constantes da equação (45), a Figura 13 apresenta a comparação entre a lei logarítmica usada por (TAKATSU et al., 1988) e a clássica lei de *Hollomon* de encruamento causado por deformação plástica do material.

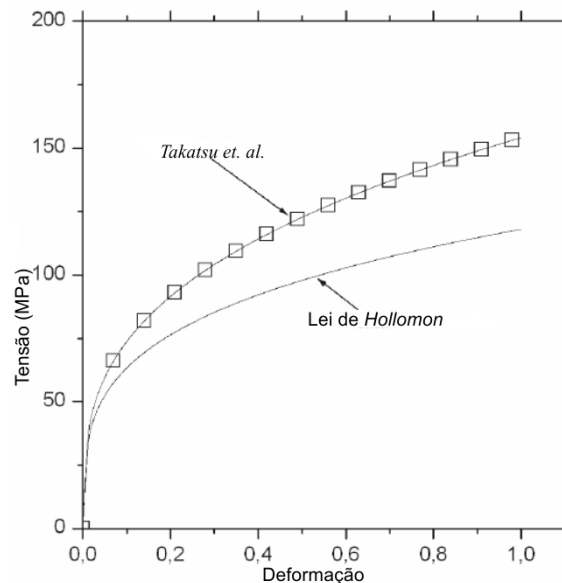


Figura 13 Comparação entre a lei logarítmica usada por *Takatsu et al.* e a lei *Hollomon* para o encruamento por deformação (SIDDQUI, 2009).

2.4.1 Caracterização do Comportamento Mecânico do Alumínio A1050 Utilizando-se Barra de *Hopkinson*

A barra *Hopkinson* é um dispositivo usado para realizar a caracterização mecânica de materiais submetidos a altas taxas de deformação. Esta comumente usa um vaso de alta

pressão e válvulas para controlar a pressão de disparo. Segundo (FIELD et al., 1994), a colisão da barra chamada de martelo ou projétil contra a barra incidente gera uma onda de tensão de compressão, que é parcialmente transmitida ao longo da amostra, colocada no meio entre barra incidente e a barra transmissora, fazendo com que ela se deforme. Através da análise da onda de tensão em conjunto com a medição das deformações nas barras incidente e transmissora, por meio de sensores de deformação *strain-gauges*, é possível determinar a curva tensão versus deformação do material em teste (SILVA, 2008).

A Figura 14 mostra um esquema simplificado da barra de *Hopkinson* de propulsão eletromagnética. A barra projétil é acelerada por intermédio de um atuador eletromagnético contra a barra incidente com velocidades típicas na faixa de 2,5 a 25 m/s. Esta usa uma série de bobinas atuadoras para acelerar a barra do martelo, combinando o princípio da relutância e indução magnética para acelerar a mesma.

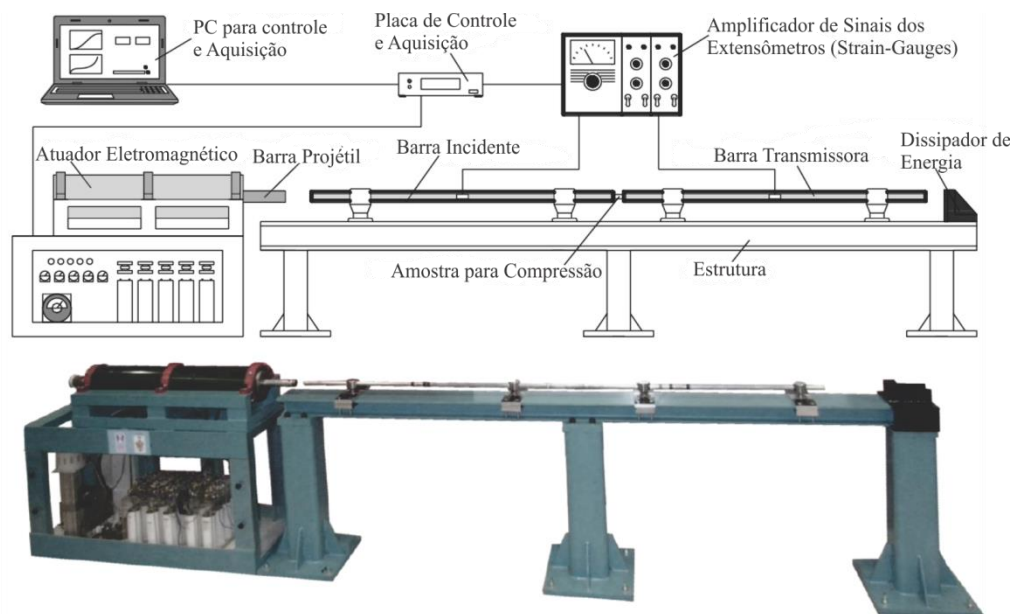


Figura 14 Esquema simplificado da barra de *Hopkinson* de propulsão eletromagnética (SILVA, 2013).

A Figura 15 mostra alguns resultados de caracterização de materiais em uma barra de *Hopkinson*. As curvas de tensão versus deformação do chumbo, mostradas na Figura 15 foram obtidas em uma barra de *Hopkinson* acionada eletromagneticamente para altas taxas de

deformação, entre 200 a 3000 s^{-1} , e por meio de medições quase-estáticas realizadas em uma prensa hidráulica CNC totalmente instrumentada para as medições.

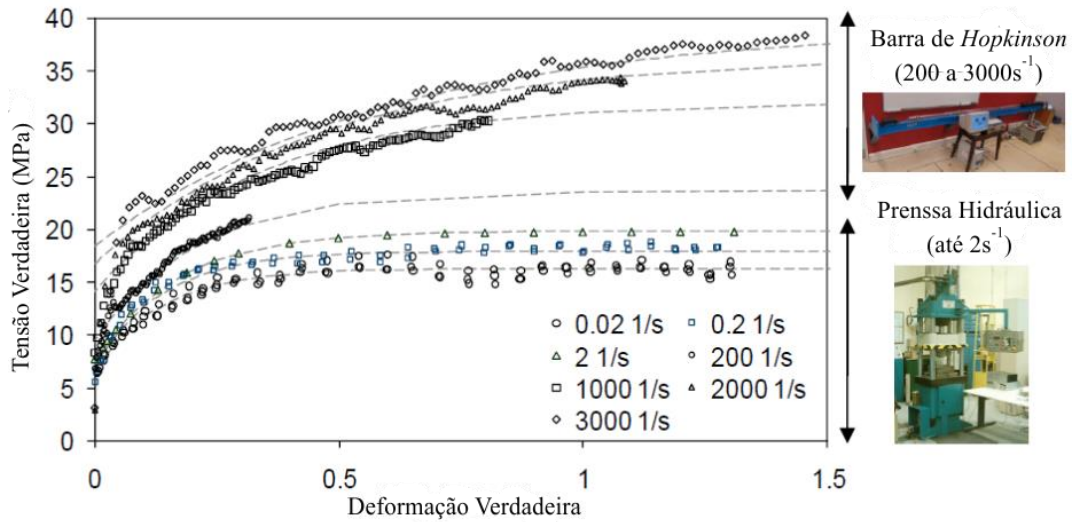


Figura 15 Curva tensão versus deformação verdadeiras para o chumbo puro obtido para diferentes taxas de deformação (SILVA, 2008).

Ensaio de compressão com o alumínio A1050 para velocidades de deformação elevadas foram realizadas por (SILVA, 2011) usando uma máquina de ensaios, cujo princípio de funcionamento é baseado numa *came* com atuação eletromagnética, a qual permite reproduzir a assinatura de vários processos de fabricação em uma grande faixa de velocidades de deformação. A Figura 16, mostra um esquema simplificado do princípio de funcionamento da máquina de ensaios de compressão com *came* acionada por atuador eletromagnético.

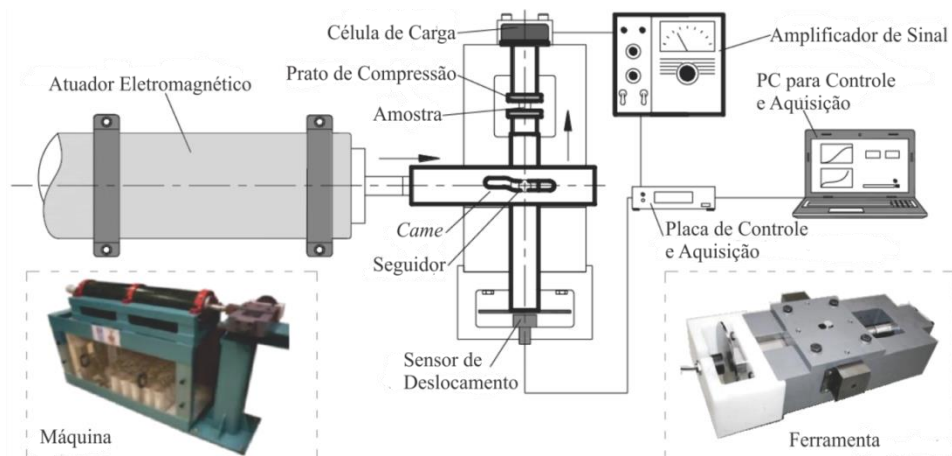


Figura 16 Máquina de ensaios de compressão com *came* acionada por atuador eletromagnético (SILVA, 2013).

Segundo (SILVA, 2013) o perfil da *came* com o perfil de uma curva logística traduz numa evolução linear da velocidade de deformação com a extensão, a relação entre a velocidade do atuador e a velocidade imposta ao prato de compressão permite obter uma assinatura linear da velocidade de deformação com a extensão durante a totalidade do ensaio de compressão. A alteração da *came* com o perfil de uma curva logística para uma *came* com o perfil de uma curva tipo raiz, é possível mudar a assinatura linear da velocidade de deformação com a extensão para uma assinatura em que a velocidade de deformação é constante, tal como se verifica na barra de *Hopkinson*.

A Figura 17(a) mostra perfis experimentais da velocidade de deformação versus a extensão obtida por (SILVA, 2013) nos ensaios de compressão alumínio A1050 realizados em uma máquina com *came* logística atuada eletromagneticamente. A Figura 17(b) apresenta ensaios semelhantes com *came* de perfil tipo raiz.

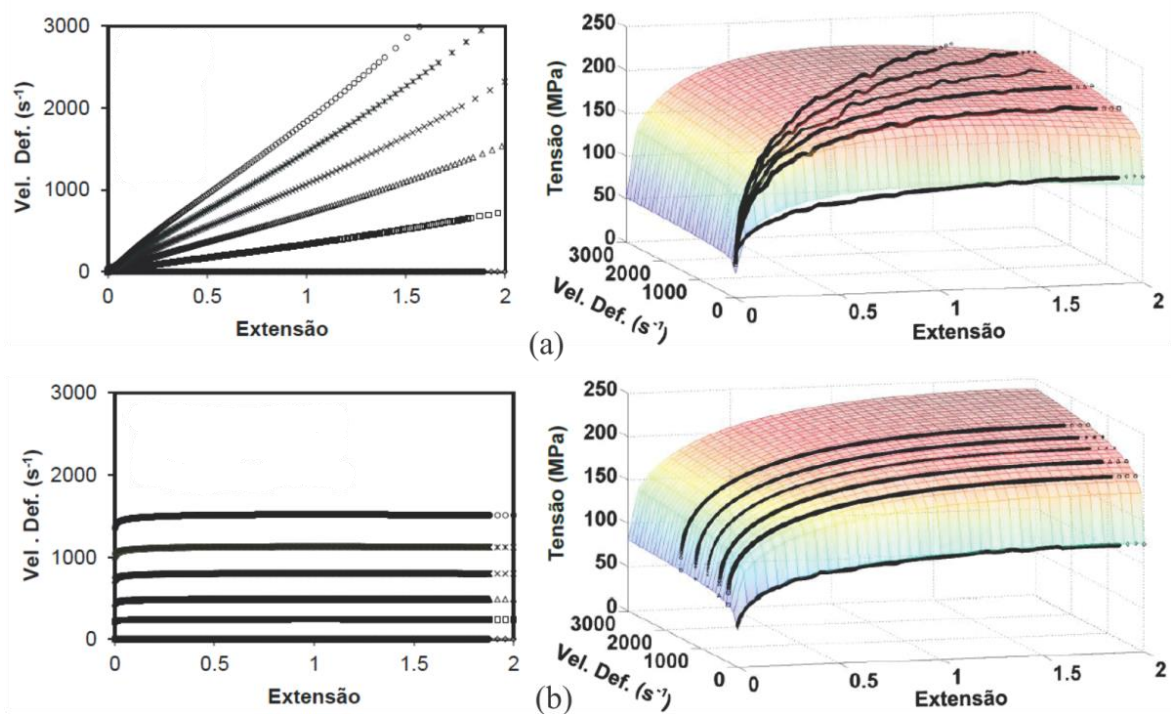


Figura 17 Comportamento mecânico da liga de alumínio A1050 obtido através de ensaios em uma máquina de ensaio de compressão com *came* atuada eletromagneticamente: (a) de perfil logístico; (b) de perfil raiz (SILVA, 2013).

Um ajuste dos pontos experimentais foi proposto por (SILVA, 2013) (curvas um preto mostradas nas superfícies tridimensionais da Figura 17) dado pela equação (46) em que as constantes dependem do material e devem ser determinadas através de ensaios experimentais de caracterização mecânica.

$$\sigma = \left[A + e^{m\varepsilon} \varepsilon^n \right] \left[B + C \ln \left(D + \dot{\varepsilon} \right) \right] \quad (46)$$

As constantes A , B , C , D , m e n do modelo foram ajustadas através de um procedimento computacional e o resultado deste ajuste é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 Valores das constantes do modelo de caracterização mecânica da liga de alumínio A1050, com validade para $\varepsilon \leq 2,5$ e $\dot{\varepsilon} \leq 3000 \text{ s}^{-1}$, proposto por (SILVA, 2013)

	Máquina de Ensaio	A	B (10^2)	C	D (10^2)	m	n
A1050	<i>Came Logística</i>	0,22	1,34	12,5	0,008	-0,24	0,36
	<i>Came Raiz</i>	0,45	0,76	13	0,4	-0,19	0,38

Fonte: (SILVA, 2013).

2.5 MÉTODOS DE ANÁLISE DO PROCESSO EMF

A análise do processo EMF é uma tarefa desafiadora, devido à complexa interação entre os fenômenos envolvidos. Devido à exigência de solução por métodos numéricos, há algumas décadas, embora a física destes fenômenos já fosse bem entendida, foi difícil analisar com precisão estes processos complexos altamente dinâmicos.

Considerando apenas os dois principais fenômenos envolvidos, eletromagnético e mecânico, há duas abordagens para analisar o processo EMF e um terceiro que considera também os fenômenos térmicos: forte acoplamento entre problemas eletromagnéticos, mecânicos e térmicos; totalmente desacoplado entre os problemas eletromagnéticos e mecânicos; fracamente acoplado entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos (nos dois últimos métodos o problema térmico é desconsiderado) (SIDDIQUI, 2009). Estas abordagens são discutidas em detalhes nesta seção.

2.5.1 Forte Acoplamento

Na análise com forte acoplamento ou totalmente acoplado, os fenômenos eletromagnéticos, mecânicos e térmicos são totalmente acoplados e calculados em cada elemento do sistema. A descrição matemática completa dos efeitos presentes no processo EMF é bastante complicada, e a solução do problema apresenta dificuldades para convergir, devido ao custo computacional elevado para resolver as equações inter-relacionadas (SIDDIQUI, 2009; XU et al., 2010).

Para esta estratégia de análise pode-se citar o trabalho de (BENDJIMA, 1997). Este desenvolveu uma modelagem de EF bi-dimensional para análise da expansão de tubos por EMF. As duas equações que analisam o campo magnético transitório e a dinâmica da deformação plástica são resolvidas simultaneamente usando EF e *Runge-Kutta*, respectivamente. A força eletromotriz induzida, devido ao movimento da deformação do tubo é considerada. As correntes parasitas, a densidade de força magnética, deslocamento radial e velocidade do tubo são calculados e realizadas simulações de EF multi-física. A Figura 18 mostra os resultados obtidos da pressão magnética calculada usando integração da densidade de força eletromagnética gerada no tubo e a medida. Esta última é determinada pela medição da densidade de fluxo magnético no espaço entre a bobina e o tubo; por outro lado a medição da densidade de fluxo magnético durante a expansão tubo envolve alguns erros. Esta medição é realizada usando-se bobinas exploratórias, as quais são de difícil construção, gerando erros devido à imprecisão no cálculo da área da bobina exploratória e a medição da densidade de fluxo magnético tem que ser feita com o tubo fixo sem deformar, sendo que este é alto, na ordem de alguns Teslas gerando interferências na medição experimental, além da imprecisão na posição onde a bobina exploratória é fixada no tubo.

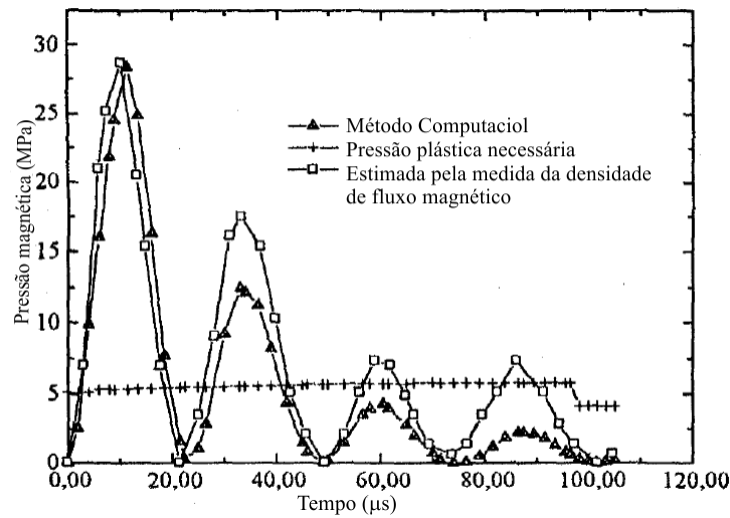


Figura 18 Pressão magnética no tubo (BENDJIMA, 1997).

Um código bi-dimensional de diferenças finitas foi desenvolvido por (FENTON, 1998). Este é um ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*) 2D para simulação computacional de problemas dinâmicos como o processo EMF. O código CALE ("*C*" *Programming Arbitrary Lagrangian Eulerian*) também é um código para simulação MHD (Magneto-hidrodinâmica) e foi desenvolvido no *Lawrence Livermore National Laboratory*. Este código tem capacidade para analisar operações de deformação (limitado a configurações 2D axialmente simétricas e estado plano de tensões). A taxa de deformação tem efeito significativo sobre o comportamento do material, mas devido a simplificações, uma lei de endurecimento independente desta taxa foi usada. O código CALE usa um valor constante para a resistência ao escoamento e módulo de cisalhamento, independentes da temperatura ou da pressão o que é permitido na relação publicada por (STEINBERG, 1980).

A Figura 19 apresenta uma comparação dos dados experimentais de (TAKATSU et al., 1988) com os obtidos por (FENTON, 1998). Esta mostra o perfil de deformação em pontos específicos do tempo. A deformação experimental tende a ficar menor que a deformação calculada. Esta diferença é visível observando-se os perfis de deformação de 135 μs e justificada pelo método utilizado para disparar a fotografia.

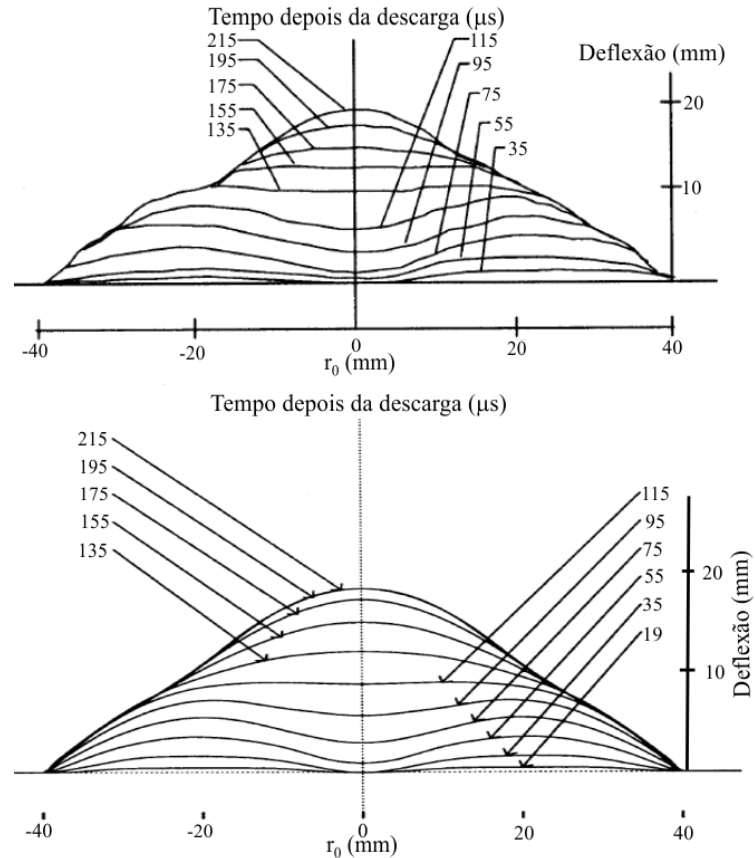


Figura 19 Comparação dos perfis de deformação experimentais de (TAKATSU et al., 1988) e calculados por (FENTON, 1998).

Segundo (SIDDIQUI, 2009) nos últimos anos, as análises 3D totalmente acopladas surgiram em *softwares* comerciais e automaticamente desenvolveram os mesmos. Com base no método de EF têm-se os exemplos: *PAMSTAMP* (simulação de conformação de chapas), *SYSMAGNA* (simulação eletromagnética). O acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos, térmicos e mecânicos é mostrado na Figura 20.

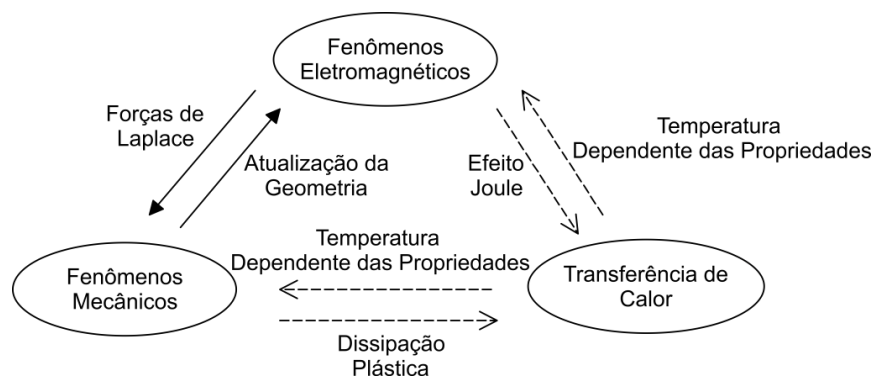


Figura 20 Acoplamento de fenômenos multi-físicos propostos por (CONRAUX et al., 2006).

Como, no caso do *software PAMSTAMP*, um módulo de eletromagnetismo foi desenvolvido para *LS-DYNA* por (EPLATTENIER et al., 2009). O acoplamento de fenômenos multi-física é idêntico ao proposto por (CONRAUX et al., 2006).

2.5.2 Totalmente Desacoplado

O método mais simples é a abordagem totalmente desacoplada. Com base nos parâmetros do equipamento e geometria do problema, os parâmetros do circuito elétrico são calculados. As equações são escritas sem considerar a deformação e velocidade da chapa deformando durante o processo (SIDDIQUI, 2009). A solução das equações é realizada utilizando uma análise numérica ou soluções analíticas para geometrias específicas. As forças de origem eletromagnética que atuam na chapa metálica são calculadas para o instante inicial sem considerar a deformação. A máxima força gerada pode posteriormente ser transferida, como dado de entrada para o problema mecânico, de modo a simular a deformação da chapa metálica. Um método numérico simplificado de análise do problema eletromagnético, considerando apenas o campo gerado pela bobina atuadora foi desenvolvido por (PAESE et al., 2011). Neste, o perfil da força de origem eletromagnética ao longo do raio da chapa metálica foi calculado apenas para o instante de máxima corrente de descarga. A Figura 21 mostra o perfil da força de origem eletromagnética e a densidade de fluxo magnético na direção radial ao longo do raio para diversas espessuras da chapa metálica. Este modelo foi validado apenas com a medição da corrente de descarga sendo, portanto uma simplificação e um modelo numérico totalmente desacoplado. Além disso, este modelo numérico pode ser usado para uma bobina com alta densidade de espiras como as usadas por (AL-HASSANI, 1975) ou bobinas com espiras espaçadas como as usadas por (PAESE et al., 2011).

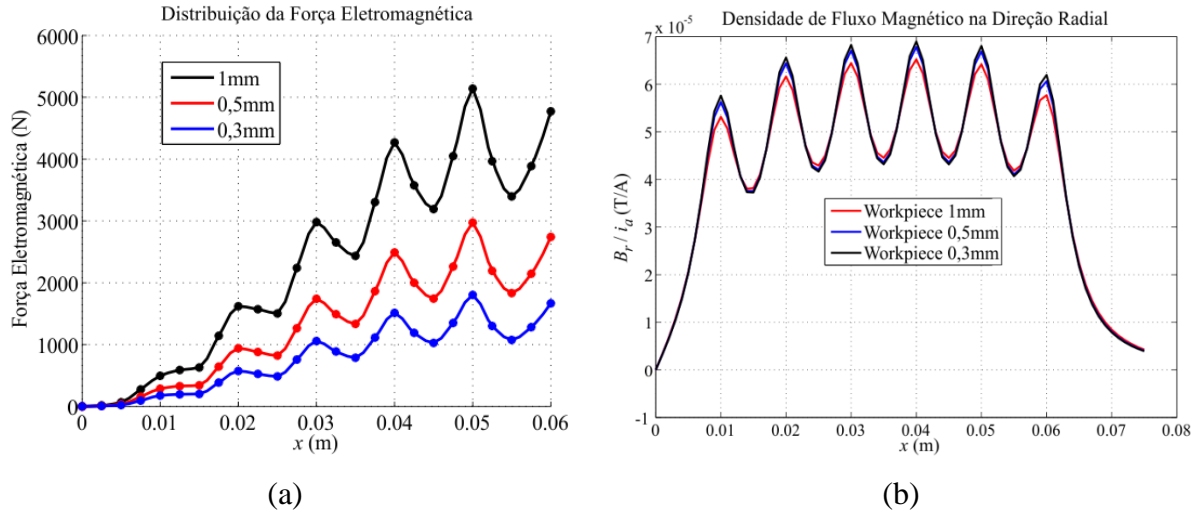


Figura 21 Distribuição ao longo do raio para várias espessuras de chapas metálicas: (a) força de origem eletromagnética produzida por bobina espiral plana com condutores espaçados; (b) densidade de fluxo magnético na direção radial (PAESE et al., 2011).

Uma equação analítica foi determinada por (AL-HASSANI, 1975) para calcular a distribuição da pressão eletromagnética causada por bobinas do tipo espira plana em chapas metálicas. Várias geometrias foram analisadas e a distribuição de pressão na direção axial (P_r) e intensidade do campo magnético na direção radial (H_r) gerados por uma bobina do tipo espiral plana são calculados, respectivamente pelas equações (47) e (48).

$$P_r = \frac{\mu_0 I^2 N^2}{2\pi^2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-2gr}{g^2 + a_2^2 - r^2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{-2gr}{g^2 + a_1^2 - r^2} \right) \right]^2 \quad (47)$$

$$H_r = \frac{IN}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-2gr}{g^2 + a_2^2 - r^2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{-2gr}{g^2 + a_1^2 - r^2} \right) \right] \quad (48)$$

onde:

I é a corrente de descarga do circuito primário;

N é o número de espiras da bobina em espiral plana por unidade de comprimento radial;

g é a distância entre a bobina e a chapa metálica;

a_1 é a distância do centro da bobina até a primeira espira da bobina;

a_2 é a distância do centro da bobina até a espira mais externa;

r é o raio da espira;

μ_0 é a permeabilidade magnética do meio.

A equação (47) foi baseada em um modelo totalmente desacoplado, sendo uma aproximação que pode ser usada somente para situações em que os condutores possuem pequena secção transversal e quando a distância entre os condutores é pequena comparada com a distância entre bobina e superfície da chapa metálica. Assim a equação (47) é obtida considerando o grupo de condutores como um grande condutor transportando uma corrente de NI por unidade de comprimento. Além disso, a equação de (AL-HASSANI, 1975) necessita como dado de entrada a curva de corrente que precisa ser obtida experimentalmente ou é conhecida como base nos parâmetros do circuito de descarga acoplado a chapa metálica. Isso dificulta o uso desta equação, pois a cada mudança da geometria da chapa metálica uma nova curva de corrente de descarga precisa ser determinada, visto que o acoplamento entre a chapa metálica e a bobina atuadora altera a impedância do circuito primário de descarga, devido à impedância refletida ou transmitida do circuito secundário (chapa metálica) para o circuito primário (bobina e máquina EMF). Um exemplo de comparação entre as previsões da equação analítica (47) e resultados experimentais para uma bobina em espiral é mostrado na Figura 22. A distribuição da pressão magnética obtida analiticamente tem boa concordância com as medições experimentais. A medição experimental envolvia o uso de uma placa de aço com uma matriz de pequenos furos idênticos e chanfrados, apertando a chapa de alumínio entre a bobina e placa. A altura h de cada uma das deformações da chapa de alumínio mostrou ser aproximadamente proporcional à pressão de origem eletromagnética produzida. Outro método indireto convenientemente utilizado para estimar a distribuição da pressão de origem eletromagnética fazia uso de uma bobina exploratória para medir a intensidade do campo magnético em várias posições ao longo da espira plana com e sem chapa metálica. A

distribuição da pressão de origem eletromagnética foi obtida a partir do quadrado do sinal de saída da bobina exploratória.

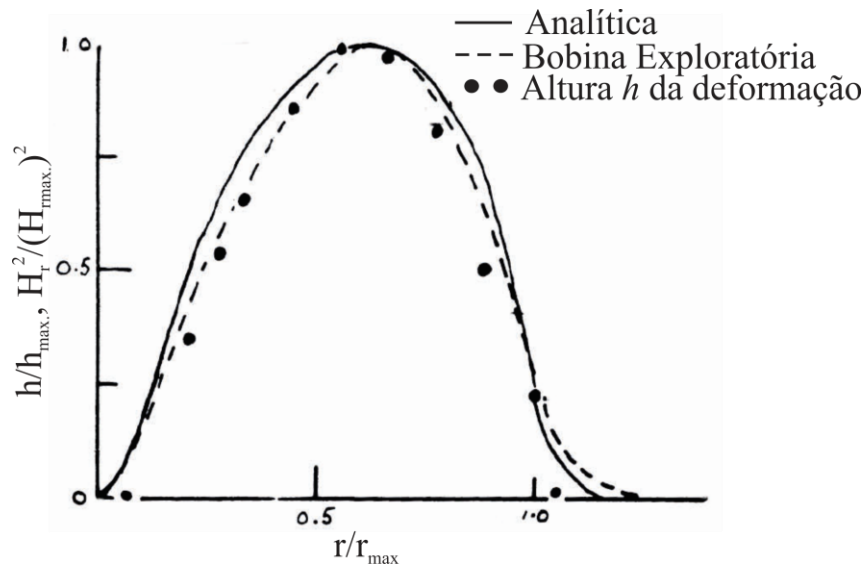


Figura 22 Distribuição da pressão de origem eletromagnética produzida por bobina espiral plana com alta densidade de condutores (AL-HASSANI, 1975).

2.5.3 Fracamente Acoplado

No processo EMF, os fenômenos mecânicos e eletromagnéticos estão relacionados, sendo que a deformação da chapa metálica afeta o campo magnético induzido e, conseqüentemente, as forças de repulsão de origem eletromagnética desenvolvidas pelo sistema. Uma aproximação, mas abordagem mais realizável é tratar o processo como fracamente acoplado entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos, desconsiderando a influência da deformação da chapa a ser conformada na evolução do campo magnético, e então, aplicar as forças geradas por este campo eletromagnético no problema mecânico. Este tipo de análise é mais fácil e requer menos tempo computacional e recursos comparado a modelos totalmente acoplados, com boa precisão para problemas axissimétricos (MAMALIS et al., 2006).

No método de fracamente acoplado, em cada passo de incremento do tempo, as forças de origem eletromagnética são calculadas por meio do modelo eletromagnético. As forças são, então, transferidas como uma entrada de pressão no modelo mecânico. Na análise mecânica, a deformação da chapa metálica é calculada, e a geometria da mesma é atualizada. A nova geometria atualizada a partir do modelo mecânico é utilizada para calcular as forças eletromagnéticas para os próximos passos de incremento do tempo. Este processo pode ser repetido iterativamente até o final do processo de deformação. Esta análise pode fornecer resultados precisos com um esforço computacional relativamente pequeno. No entanto, nesta abordagem de acoplamento fraco, os efeitos térmicos são desprezados, uma vez que o processo é assumido como um problema adiabático. A análise com fraco acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos é esquematizado na Figura 23.

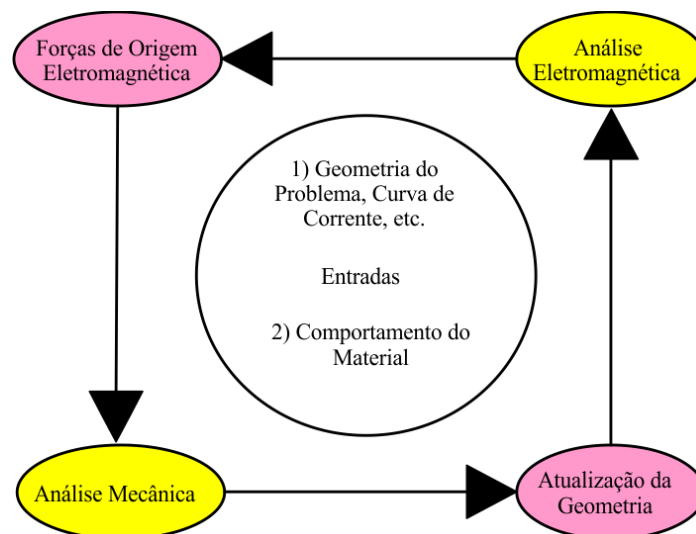


Figura 23 Fluxograma do método de análise do processo EMF fracamente acoplado eletromagnético-mecânico (SIDDIQUI, 2009).

A simplificação usada nesta proposta que não atualiza a geometria após cada pulso de pressão de origem eletromagnética é válida, pois a força de origem eletromagnética ocorre num intervalo de tempo muito curto em comparação com o tempo de deformação total e o efeito da velocidade da chapa metálica é menos importante do que em aplicações de EMF que envolvem compressão e expansão de tubos. Em outras palavras, a maior parte da deformação

da chapa resulta principalmente da força devido à inércia gerada pelo pulso de pressão de origem eletromagnética (WANG et al., 2006).

O impulso inicial e a velocidade axial de diferentes pontos são diferentes na área de deformação da chapa metálica, conforme mostrado na Figura 24(a). A região próxima da metade do raio se move primeiro devido à máxima pressão magnética nesta região da chapa metálica, mostrada na Figura 24(c). O centro da chapa, praticamente é conduzido pelo movimento dos arredores, movendo-se somente mais tarde por causa da ausência de pressão no centro. A Figura 24(b) mostra a velocidade axial até o tempo final de deformação da chapa para diferentes pontos da mesma. Na fase inicial de deformação, devido à inércia a velocidade da parte central se torna negativa. Posteriormente a este período inicial de deformação, os movimentos das partes adjacentes deformam também o ponto central, enquanto a inércia tende a deixar esta parte no estado estacionário inicial, sua velocidade impulsionada pelas partes adjacentes, vai ao máximo.

Após o tempo de carregamento, a chapa é ainda deformada em alta velocidade, indicando que a força de inércia tem contribuição importante no processo de EMF. No período da pressão magnética gerada pelo sistema EMF, apenas uma pequena parte da energia gerada pela pressão magnética se transforma em energia de deformação plástica, enquanto que a maioria se transforma em energia cinética. Após o período de carga, a energia cinética se transforma em energia de deformação plástica para realizar a deformação da chapa metálica (WANG et al., 2006).

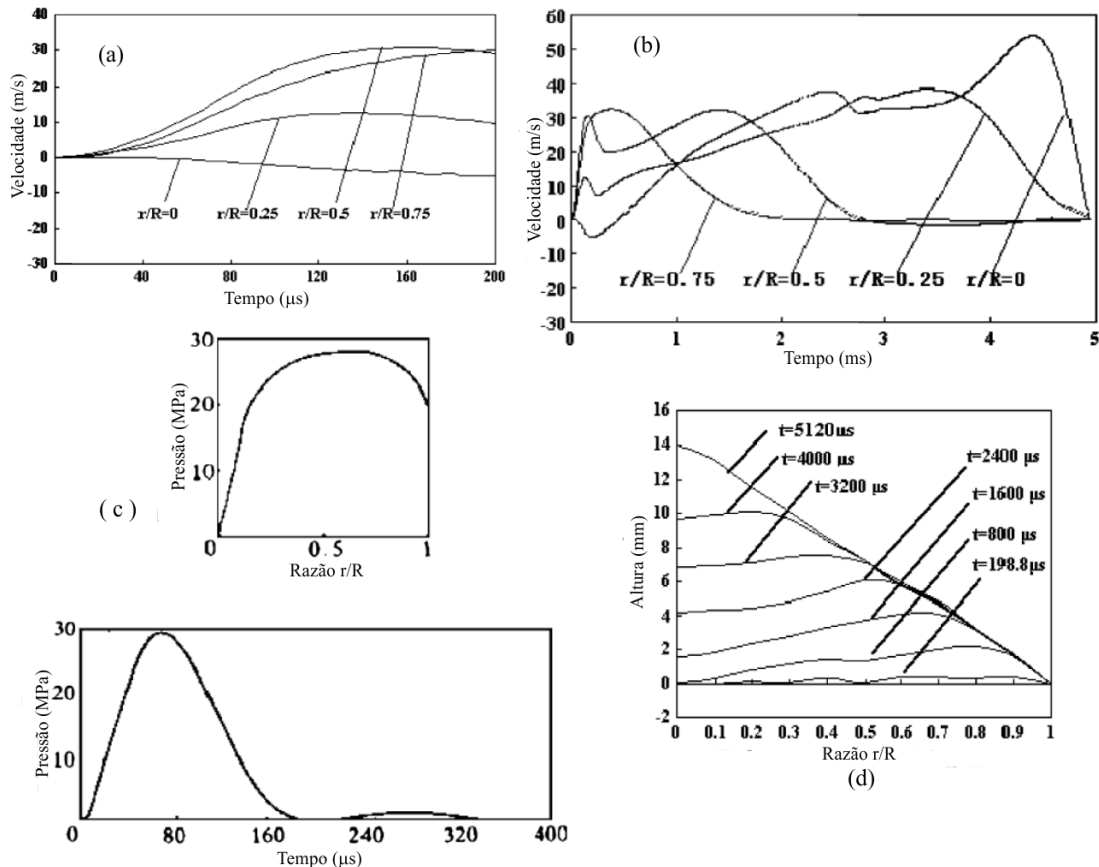


Figura 24 Velocidade de deformação axial em diferentes posições: (a) velocidade durante o período de carregamento da pressão magnética; (b) velocidade durante o período de deformação da chapa metálica; (c) distribuição da pressão magnética no espaço e tempo; (d) perfis de deformação da chapa em diferentes instantes de tempo (WANG et al., 2006).

O uso de *softwares* comerciais de EF também foi usado por (RISCH et al., 2004) para demonstrar a deformação da chapa metálica em processos EMF e os efeitos causados pela interação das operações de deformação com a matriz. Durante a primeira fase de deformação, a chapa passa por um processo de deformação livre. Tal como mostrado na Figura 27, a chapa metálica tem uma velocidade muito alta, especialmente na área central onde se pode atingir até 300m/s. Isto significa que chapa tem energia cinética muito alta neste local. No caso da deformação em uma matriz, essa energia é transferida para o molde quando o movimento da chapa atinge a superfície do molde. Isto causa efeitos indesejáveis, tais como:

- A geração de uma distribuição não homogênea da velocidade na chapa;
- Ressalto na peça deformada devido à energia cinética.

A geração de uma distribuição de velocidade em diferentes áreas da chapa pode causar um ressalto na peça deformada se uma matriz é utilizada para obter a geometria desejada. Esse efeito é mostrado na Figura 25.

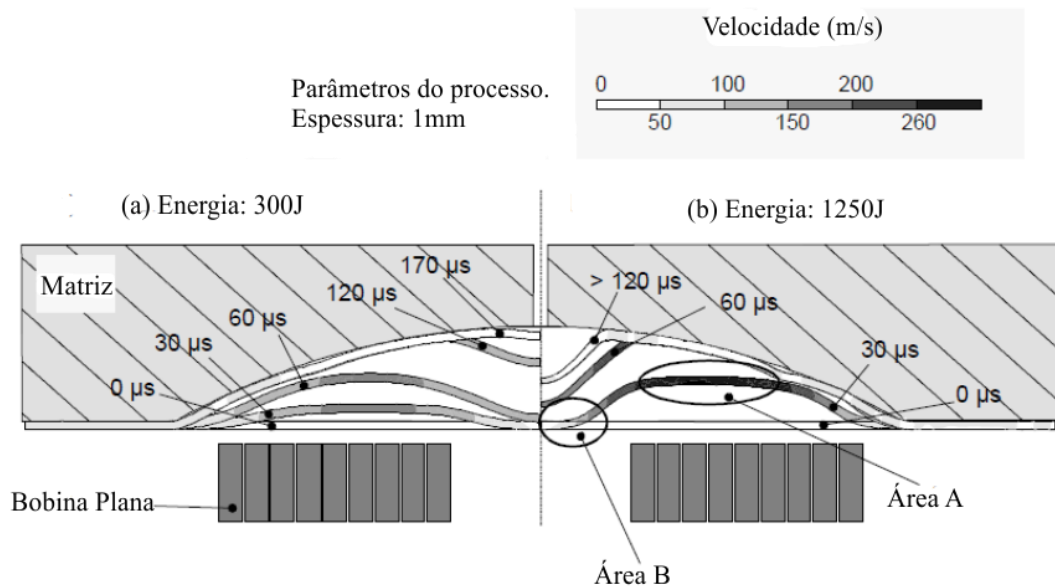


Figura 25 Comparação da distribuição de velocidades para diferentes energias de descarga (RISCH et al., 2004).

Para o caso da maior de descarga Figura 25(b), a área A da chapa, onde a pressão é máxima, tem uma velocidade muito elevada, enquanto a área B continua na sua posição inicial. Em seguida, a área A atinge a base da matriz tornando a chapa mais rígida devido à deformação e amortecendo a energia cinética da mesma, fazendo com que esta área tenha uma rápida desaceleração causando um ressalto no centro da chapa deformada.

Contrariamente, no caso mostrado na Figura 25(a), uma menor energia de descarga influencia o processo de deformação de uma forma positiva. Como resultado da energia mais baixa, a velocidade de deformação é, no geral, menor. Além disso, a distribuição de velocidades é mais homogênea o que permite uma melhor utilização das forças de inércia, durante um período maior de tempo do processo. Assim, a chapa é menos endurecida nas fases intermédias, e esta atinge a geometria da matriz sem apresentar ressalto no centro da mesma.

Um dos primeiros trabalhos a utilizar este método fracamente acoplado foi apresentado por (TAKATSU et al., 1988). Este descreve as equações básicas para simular o problema eletromagnético e aplica a pressão gerada sobre a chapa metálica. As equações dinâmicas que descrevem a deformação plástica da chapa metálica são usadas para atualização da geometria da mesma. (MERICHEDE, 2000) também utilizou este método para desenvolver um código para simular o processo EMF de chapas metálicas finas usando bobina espiral. Este código foi baseado no trabalho apresentado por (TAKATSU et al., 1988) sendo o fluxograma do algoritmo apresentado na Figura 26.

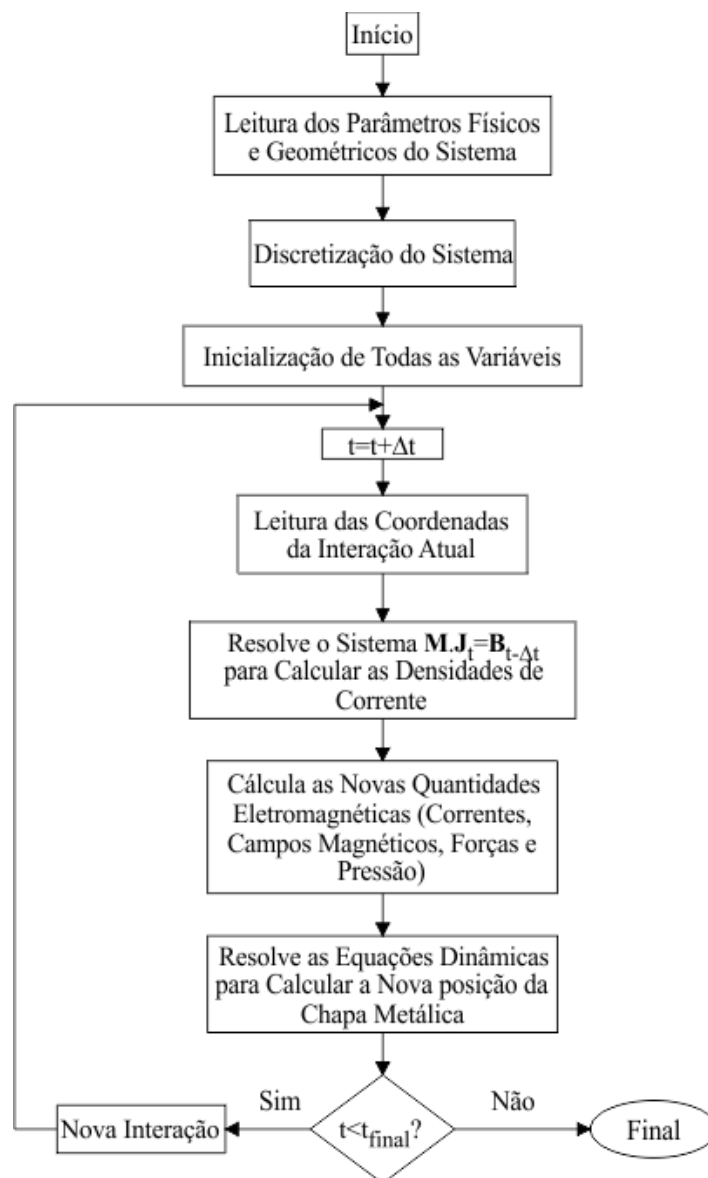


Figura 26 Fluxograma do algoritmo de cálculo (MERICHEDE, 2000).

No fluxograma da Figura 26, a matriz quadrada \mathbf{M} depende de fatores geométricos e condutividades do sistema EMF. A sua dimensão é igual ao número de discretizações elementares da bobina e chapa metálica e representa fisicamente a matriz de resistências, indutâncias e capacitâncias do sistema. O vetor \mathbf{J}_t é o vetor desconhecido de densidades de corrente do sistema EMF discretizado e $\mathbf{B}_{t-\Delta t}$ é um vetor dependente das densidades de corrente calculadas no instante $t-\Delta t$ e da tensão instantânea aplicada. A solução deste sistema, em cada incremento de tempo possibilita calcular as densidades de corrente em cada anel da discretização do sistema EMF. A densidade de fluxo magnético na chapa metálica poderia então ser calculada analiticamente possibilitando calcular a força eletromagnética elementar, usando a equação (49).

$$d\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} dv \quad (49)$$

onde:

\mathbf{F} é o vetor das forças eletromagnéticas elementares;

\mathbf{J} é o vetor das densidades de corrente elementares;

\mathbf{B} é o vetor das densidades de fluxos magnéticos elementares;

v é o volume elementar.

Este método fracamente acoplado pode ser considerado mais preciso do que o anterior sem nenhum acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos. Este método leva em consideração as interações entre a força de origem eletromagnética e a deformação da chapa metálica.

Com o desenvolvimento dos *softwares* de elemento finitos (EF), (KLEINER, 2006) propuseram a combinação de dois códigos comerciais de EF para simular processos de EMF na expansão e compressão de tubos. Uma sub-rotina acessível ao usuário foi implementada no *software* comercial *MARC* para simular o comportamento dinâmico do problema e atualizar a

geometria para um novo cálculo, sendo que o código de EF para solução da parte eletromagnética foi desenvolvido pelos autores.

Dois códigos de EF também foram combinados por (RISCH et al., 2004), a fim de simular o processo EMF de chapas planas usando bobina atuadora em formato espiral. Os modelos tratados são considerados axissimétricos. A análise mecânica é realizada com o *software* comercial de EF *MARC*, enquanto que a análise eletromagnética é realizada com o *software* livre *FEMM*. A pressão que atua sobre chapa devido ao campo magnético é calculada com *FEMM* e esta é utilizada como dado de entrada na análise mecânica. Os dois códigos EF trocam dados a cada passo de cálculo. Estes passos são repetidos até que a densidade de fluxo magnético cai próximo de zero na chapa deformada. A pressão de origem eletromagnética na chapa metálica depende do local, bem como do tempo, o que revela a complexidade para se analisar o processo de EMF. Um resultado desta simulação fracamente acoplada é vista na Figura 27.

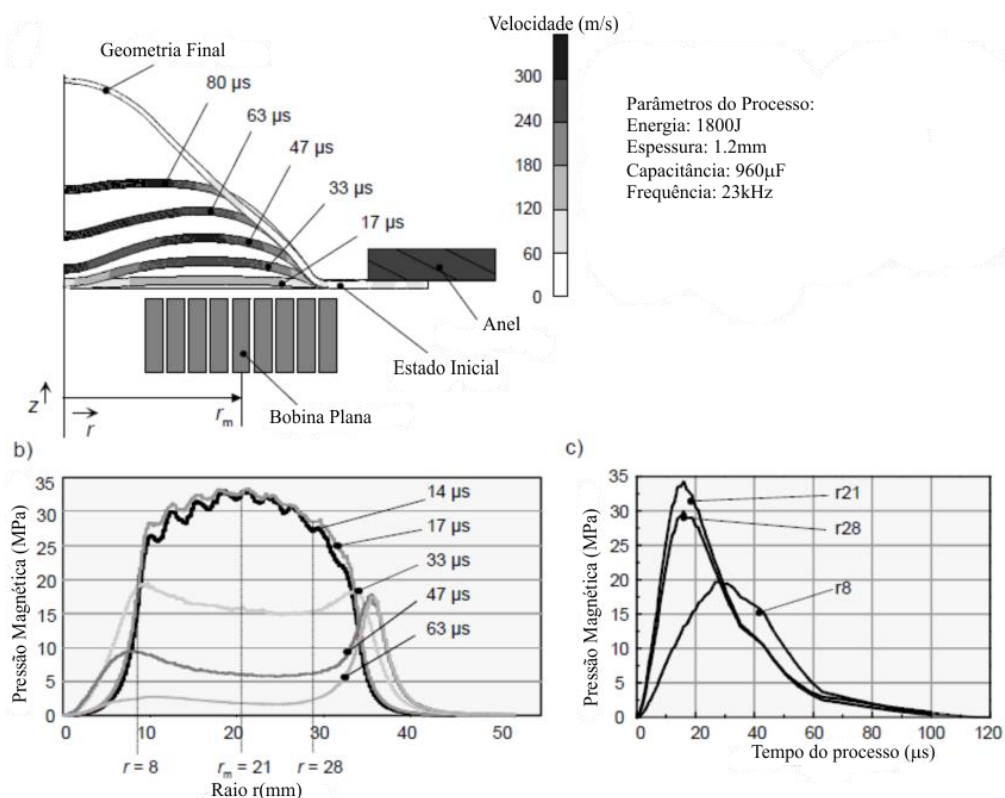


Figura 27 Distribuição da pressão e da deformação da chapa metálica (RISCH et al., 2004).

A Figura 27 mostra a influência do movimento da chapa metálica sobre a pressão de origem eletromagnética gerada na superfície da chapa. Durante a primeira fase, a pressão máxima é atingida na posição r_m , do raio da bobina atuadora, onde o movimento é iniciado. Em contraste com isto, não há pressão no centro da bobina. Nas fases seguintes, a deformação continua, mas a pressão é reduzida, devido à densidade de fluxo magnético ser menor com o afastamento da chapa metálica. Deve mencionar-se que a pressão diminui de forma muito mais rápida que a corrente de descarga na bobina atuadora, já que a densidade de fluxo magnético na superfície da chapa metálica também diminui com o afastamento da mesma da bobina atuadora. Devido à força de inércia, a chapa continua deformando, sendo que esta atua principalmente na área do r_m , arrastando a parte central ($r < r_m$) na direção da base da cavidade. Este efeito provoca uma forte aceleração do centro da chapa metálica, que resulta em uma grande deformação no centro. Após a chapa metálica se afastar da influência do campo magnético gerado pela bobina atuadora, apenas a força de inércia atua sobre a mesma (RISCH et al., 2004).

O fraco acoplamento também foi usado por (OLIVEIRA et al., 2005) para simular o processo EMF de chapas planas. Este combinou o *software* comercial ANSYS para simular os fenômenos transientes do campo eletromagnético com o *software* LS-DYNA para modelar o comportamento termo-mecânico da chapa. Um pequeno passo ($6 \mu s$) foi usado no *software* LS-DYNA para atualização da geometria. A geometria da bobina atuadora do tipo dupla é mostrada na Figura 28.

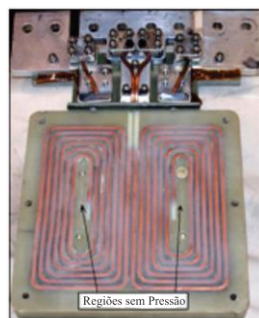


Figura 28 Bobina atuadora de geometria dupla (OLIVEIRA et al., 2005).

Segundo (OLIVEIRA et al., 2005) para aumentar a eficiência do modelo, um perfil idealizado da corrente elétrica foi adotado. A Figura 29 mostra uma curva típica da corrente medida e o perfil correspondente idealizado. A corrente cresce em uma taxa elevada para cerca de 95 kA e depois decai exponencialmente. Durante rampa de subida a chapa metálica é afastada da bobina atuadora, resultando numa diminuição da força de deformação. Conseqüentemente, a análise eletromagnética foi realizada somente até 78 μ s, pois após este instante a chapa já se afastou da bobina e a chapa se deforma por inércia, ou seja, após este tempo a maior parte da força de origem eletromagnética já foi transferida para chapa metálica. Assim, para o problema mecânico, a força gerada pela bobina atuadora é assumida para decair para zero de forma linear com o tempo 78-100 μ s, e é eficazmente removida do restante da simulação, como mostrado na Figura 29, visto que a densidade de fluxo magnético no perfil deformado da chapa é muito pequeno devido ao afastamento da mesma da bobina atuadora, e conseqüentemente a força de origem eletromagnética é muito pequena, além disso, a corrente de descarga também é menor contribuindo para uma pressão menor sobre a chapa.

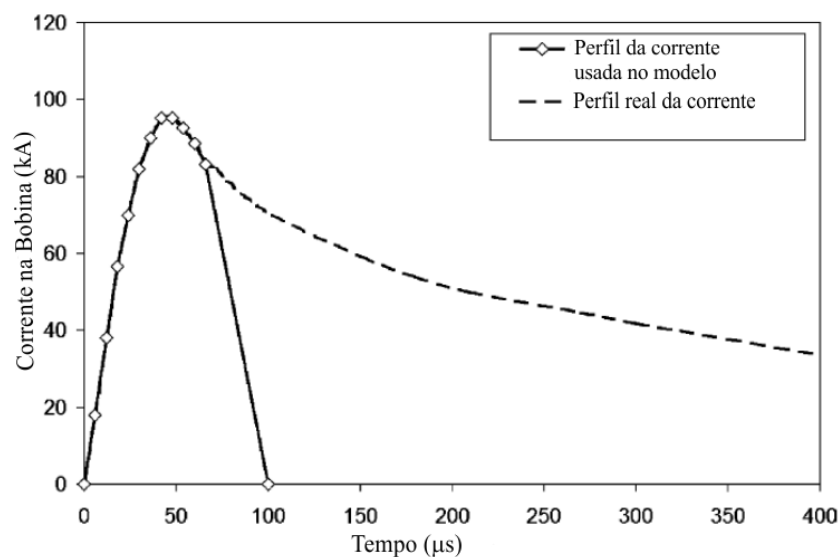


Figura 29 Perfil da corrente medida na bobina atuadora e perfil efetivo utilizado na modelagem (OLIVEIRA et al., 2005).

Um método de diferenças finitas foi usado por (SIDDIQUI, 2009) para resolver as equações eletromagnéticas. A pressão que atua sobre a chapa metálica devido à força de origem eletromagnética foi estimada desprezando a influência da velocidade da chapa metálica a sobre o campo eletromagnético. Em seguida, esta pressão foi tratada como uma carga no problema mecânico, o qual é resolvido através de simulação numérica no *software* comercial de EF *Abaqus/explicit*. Neste, uma sub-rotina definida pelo usuário VDLOAD é usada para descrever a variação da magnitude da carga distribuída em função da posição e tempo, considerando também a superfície não uniforme da chapa em deformação. O código de diferenças finitas é, então, atualizado para incorporar as modificações da geometria e realizar uma nova análise do problema eletromagnético.

Nos primeiros modelos desenvolvidos, os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos foram tratados individualmente, sem qualquer acoplamento. Estes modelos são mais simples, e fornecem uma descrição aproximada do processo de EMF, pois o perfil de pressão na chapa metálica é somente levado em consideração no instante de máxima corrente de descarga.

Assim, as técnicas de fraco acoplamento são muito precisas e relativamente simples quando comparadas a técnicas de forte acoplamento. O acoplamento entre os dois problemas é levado em conta, e os parâmetros do problema mecânico ou eletromagnético são então recalculados a cada passo de tempo se necessário.

Segundo (SIDDIQUI, 2009) um modelo fracamente acoplado pode ser usado para simular o processo de EMF com suficiente precisão. A principal vantagem da utilização deste método é a sua eficiência no custo computacional necessário para convergência. As previsões numéricas obtidas por este método têm boa concordância com os resultados experimentais. A modelagem do processo de EMF por este método é capaz de levar em conta a deformação dinâmica da chapa metálica.

Além disso, os modelos totalmente acoplados são uma extensão do modelo fracamente acoplado. Nestes normalmente um *software* de EF multi-física acopla os fenômenos eletromagnéticos, mecânicos e térmicos, e as suas saídas são acopladas em cada passo de um novo cálculo, atualizando a geometria deformada da chapa metálica (SIDDIQUI, 2009).

2.6 APLICAÇÕES DA CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Segundo (KAMAL, 2005) o processo de conformação eletromagnética é utilizado desde os anos 60, mas não ainda extensivamente. É comum utilizar este processo em conformação de peças com simetria de revolução, usando atuadores de expansão ou compressão. As aplicações mais comuns são em montagens de componentes tubulares em peças coaxiais. O método é também usado com menos frequência na conformação de chapas planas para formar conchas rasas, utilizando bobinas espirais planas. A Figura 30 mostra as várias aplicações da conformação eletromagnética. Uma recente e híbrida aplicação, que utiliza bobinas incorporadas junto ao punção também é mostrada de forma esquemática.

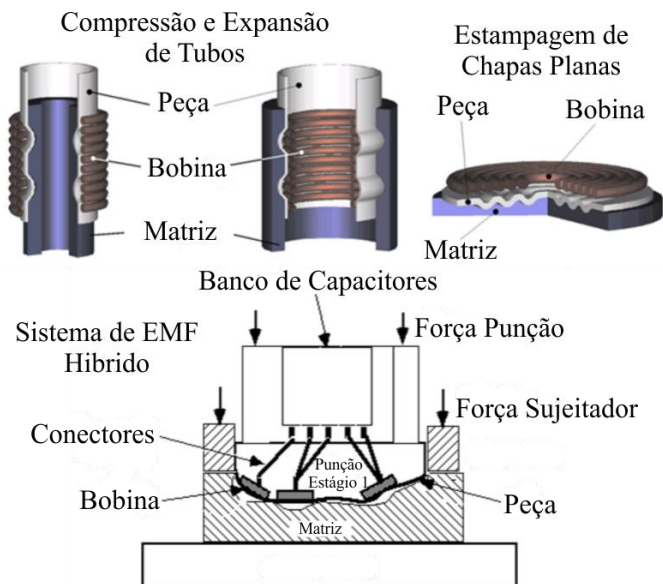
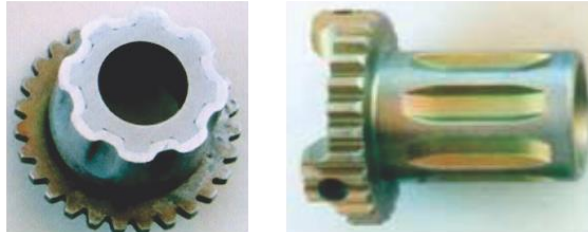


Figura 30 Aplicações da conformação eletromagnética (VOHNOUT, 1998; KLEINER, 2005).

Uma recente aplicação industrial da conformação eletromagnética é mostrada na Figura 31. O eixo de levantamento dos painéis das asas no Boeing 777 é fabricado através de conformação eletromagnética após sua anodização. Este modo de fabricação mostrou resistência superior na junção do que o material do tubo quanto submetido a um teste de torque (KAMAL, 2005).



Tubo de torque do Boing 777 depois de um teste destrutivo. Este mostra que a junção realizada por impacto através do processo EMF, é mais resistente que o tubo de alumínio de alta resistência da série 2000.



Peça de aço com perfil par junção com o tubo de torque.



Tubo de torque montado por impacto por processo EMF.

Figura 31 Eixo usado no Boeing 777 mostrando o seu comportamento quando submetido a um teste de torque até a falha (ZITTEL, 2010).

Uma vez que o campo magnético pode se estabelecer através de materiais não condutores, é possível trabalhar revestimentos não-metálicos. A Figura 32, mostra uma aplicação na indústria farmacêutica. Além disso, não há nenhum contato mecânico entre a ferramenta de conformação e a peça de trabalho, e os contatos são apenas entre a peça e a matriz. Isso faz com que este processo seja aplicado com sucesso à peças que antes da operação de conformação ou de montagem sejam submetidas a pinturas ou revestimentos anodizados como mostrado na Figura 32.

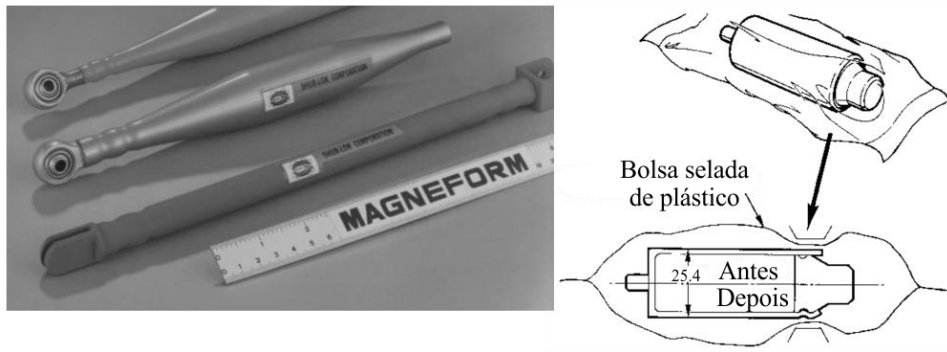


Figura 32 Conformação de um recipiente em um ambiente limpo e tubos que foram anodizados antes da deformação (ZITTEL, 2010).

Segundo (ZITTEL, 2010), além de ser um bom condutor elétrico, a peça de trabalho deve apresentar um continuidade. A corrente induzida em uma peça de trabalho cilíndrica flui ao redor da circunferência. Conseqüentemente, se o tubo possuir uma fenda através do seu comprimento, como mostrado na Figura 33(a), esta interfere no fluxo de corrente, reduzindo e distorcendo as forças de conformação. A Figura 33(b) mostra uma peça de trabalho tubular contendo algumas furações. Tais irregularidades são menores e não interferem seriamente no fluxo de corrente, sendo estas aceitáveis. Ranhuras profundas na extremidade do tubo, tais como as mostradas na Figura 33(c), interferem no fluxo de corrente e produzem variação na pressão sobre a peça de trabalho.

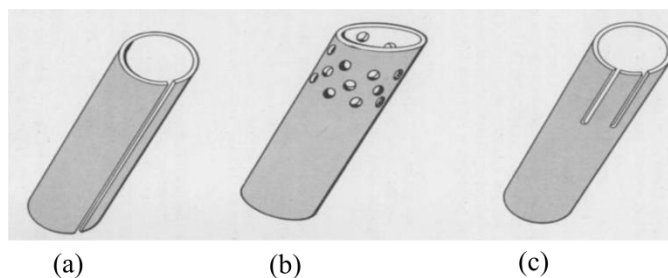


Figura 33 Influência das irregularidades na superfície da peça de trabalho (ZITTEL, 2010).

A Figura 34 mostra um exemplo de aplicação do processo EMF na conformação de uma chapa de aço inoxidável 316L usando uma bobina atuador de pressão uniforme. Esta foi

desenvolvida na *Ohio State University* por Dr. Glenn Daehn, e a energia de descarga é igual a 7,2 kJ, sendo a mesma conformada por impacto contra uma matriz.



Figura 34 Peça utilizada em células de combustível conformada por processo EMF (GOLOWIN et al., 2007).

2.7 EQUIPAMENTO PARA CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A função do equipamento de conformação eletromagnética é produzir um alto pulso de corrente em uma bobina atuadora, a qual irá gerar um intenso campo magnético próximo à chapa a ser deformada, acelerando-a para o interior de uma matriz. Os dispositivos mais críticos do equipamento utilizado no processo EMF são: banco de capacitores, interruptor principal de acionamento, bobina atuadora e fonte de tensão para carga dos capacitores. Outros dispositivos de controle podem ser adicionados ao sistema, como automatizadores do processo: resistores de descarga, interruptores secundários, controlador lógico programável, reles, etc. A Figura 35, mostra um equipamento típico de EMF para aplicações industriais integrado a outros processos de manufatura.



Figura 35 Estação de trabalho industrial de um processo EMF para montagem de filtros de óleo (ZITTEL, 2010).

Da mesma forma que nos equipamentos convencionais de conformação mecânica, na conformação eletromagnética o equipamento utilizado possui parâmetros ou partes que são críticos para obtenção da geometria final da peça. No caso do processo EMF, além dos parâmetros como geometria, propriedades mecânicas dos materiais, velocidades envolvidas, são também muito importantes os parâmetros elétricos envolvidos. O banco de capacitores é uma das partes mais importantes e mais caras do dispositivo. Eles devem resistir à alta tensão e corrente, juntamente com 70 a 90 % de tensão reversa. Sua função é armazenar carga da fonte de alimentação e, em seguida, rapidamente descarregá-la através da bobina atuadora (MARTEL, 2007).

Segundo (MARTEL, 2007) uma das partes mais complicadas do dispositivo utilizado no processo de EMF é o interruptor principal de descarga do banco de capacitores na bobina atuadora. Este deve ser capaz de chavear correntes da ordem de centenas de kA repetidamente sem significativo desgaste ou solda. É fundamental que os contatos deste interruptor não se toquem durante o acionamento do mesmo e que os contatos sejam fabricados com materiais

de alto ponto de fusão, como tungstênio. Isso evita um desgaste prematuro ou soldagem do mesmo.

Duas possibilidades de chaveamento sem contato são os faiscadores (*spark-gap*) e as chaves de estado sólido para aplicações de descarga pulsada. Ambos são interruptores de controle de alta tensão (unidades a centenas de kV) e que suportam altas correntes de pico (kA). Estes devem também ser capazes de suportar altas taxas de crescimento da corrente, na ordem de kA/ μ s. Os faiscadores podem ser sujeitos a condições adversas mais críticas (pico de corrente e corrente reversa), mas precisam ser alimentados com fluxo de gás sem umidade, principalmente quando são usados em altas tensões, operando com pressões em torno de 2 atm. A chave de estado sólido é um dispositivo que apresenta melhor operacionalidade, mas a sua tecnologia de desenvolvimento não é simples, diferentemente dos faiscadores que podem ser feitos sem grandes dificuldades.

Segundo (WELLEMAN, 2006), os dispositivos semicondutores para aplicações pulsadas podem ser divididos em *turn-on* e *turn-off*. Os dispositivos *turn-on* são tiristores (*Silicon Controlled Rectifier* - SCR) e no grupo de dispositivos *turn-off* encontram-se os GTOs (*Gate-Turn Off-Thyristor*), IGCT (*Integrated Gate Controlled Thyristor*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Para unidades de alta energia usadas em curtos pulsos de descarga, como as usadas no processo EMF é mais comum a tecnologia de tiristores.

Para o processo EMF a utilização chaves de descarga de um banco de capacitores é comum, visto que a alta energia armazenada tem que ser descarregada em um tempo muito curto. O capacitor pode ser descarregado completamente, isso significa que os dispositivos com alta capacidade de chaveamento são selecionados em primeiro lugar, pois nenhuma característica de desligamento é necessária (WELLEMAN, 2006). A Figura 36 mostra uma chave de estado sólido utilizada em processo de EMF para 21 kV em corrente contínua, 70 kA/direta e 30 kA/reversa desenvolvida pela ABB (*Asea Brown Boveri*). Esta pode ser

utilizada com taxas de repetição de até um acionamento por minuto, e pode suportar taxa de crescimento da corrente de descarga igual a $9 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

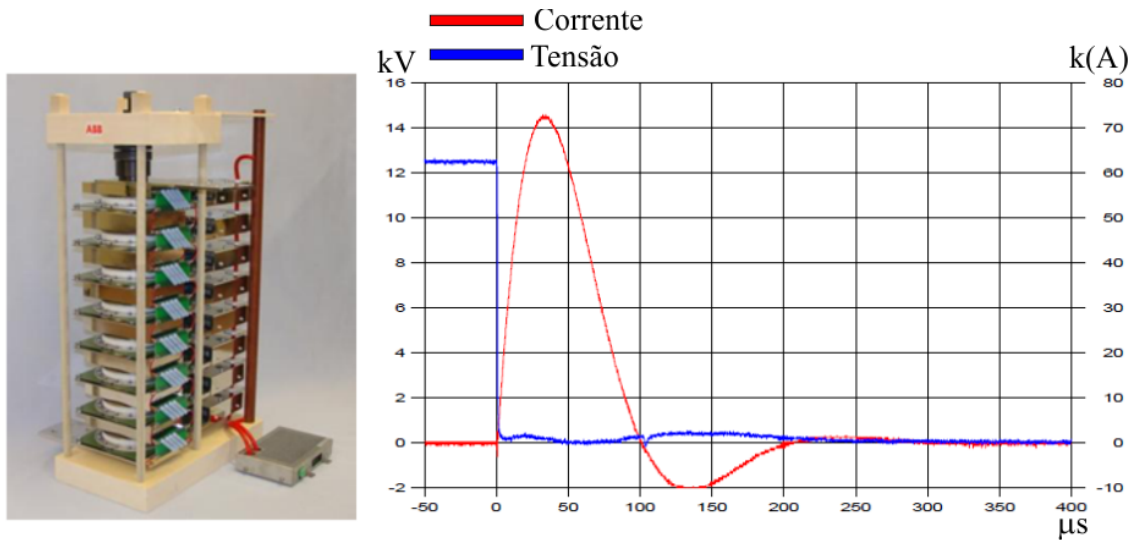


Figura 36 Montagem e característica de descarga de um interruptor de descarga para processo EMF (WELLEMAN, 2006).

3 PROPOSTA DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO PROCESSO EMF

No capítulo anterior, pode-se descrever o processo de EMF e mostrar seus potenciais para sua industrialização. Vantagens foram observadas, sendo que as principais incluem: conformabilidade efetiva melhorada, melhor controlabilidade entre os processos de conformação em alta velocidade, aplicação em peças com acabamento final realizado antes da sua conformação, aplicação em sistemas híbridos e a sua aplicação na conformação de ligas metálicas leves, como alumínio.

Baseado na da literatura disponível há um grande número de possibilidades de modelagem numérica do processo de EMF. A modelagem numérica pode fornecer a compreensão dos fenômenos envolvidos e prever a influência dos parâmetros mais significativos no processo de EMF. No entanto, o processo envolve um estudo complexo de fenômenos eletromagnéticos e mecânicos. Modelos sem nenhum acoplamento, fracamente acoplados e fortemente acoplados foram desenvolvidos.

Métodos simplificados, seguindo a proposta de fraco acoplamento, podem apresentar bons resultados com boa concordância entre as previsões numéricas e os resultados experimentais. A modelagem com forte acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos, mecânicos e térmicos do processo, são complexos e envolvem o uso de *softwares* comerciais de EF que possuam análise multi-física.

Neste trabalho adotou-se a abordagem de fraco acoplamento para análise do processo EMF baseado nos resultados experimentais de um modelo simplificado sem nenhum acoplamento desenvolvido por (PAESE et al., 2011). Nesta abordagem, os fenômenos eletromagnéticos foram acoplados, mas a força de origem eletromagnética foi calculada de maneira simplificada, considerando-se apenas a densidade de fluxo magnético gerado pela espira atuadora na espessura média da chapa metálica a ser deformada, mais ainda o modelo foi validado apenas com a medição experimental da corrente de descarga, sendo que a força

de origem eletromagnética foi avaliada apenas qualitativamente verificando-se a deformação em experimentos realizados com três espessuras de chapas metálicas.

O problema eletromagnético do processo EMF pode ser modelado por um circuito elétrico, o qual é mostrado na Figura 37. Aplicando a lei de *Kirchhoff*, pode-se escrever as equações (1) e (2), que descrevem os circuitos elétricos primário e secundário acoplados do sistema de EMF da Figura 37.

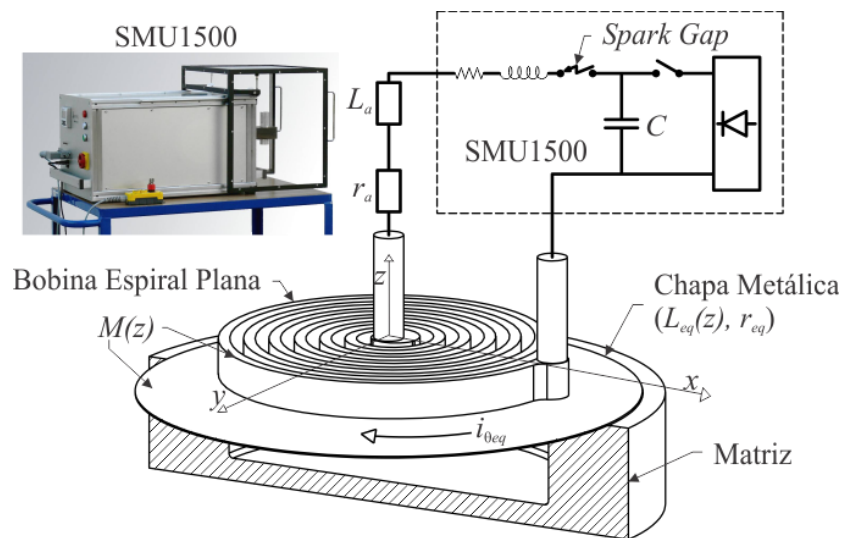


Figura 37 Representação esquemática do circuito elétrico, da máquina SMU1500 e da matriz de conformação eletromagnética (PAESE et al., 2014).

O sistema de equações (1) e (2) representam o modelo contínuo do sistema EMF da Figura 37. Infelizmente esse sistema de equações não-lineares não possui solução analítica. O método proposto neste trabalho discretiza a bobina e a chapa metálica em vários anéis elementares e concêntricos, assim são possíveis de determinar a indutância própria de cada elemento, as indutâncias mútuas com a bobina atuadora e as indutâncias mútuas entre os anéis da chapa metálica discretizada. Portanto, o modelo matemático contínuo do sistema EMF é substituído por um modelo aproximado discretizado, o qual dará origem a um conjunto de equações diferenciais ordinárias (ODE) acopladas.

Como será mostrado nas próximas seções, usando este método pode-se prever o efeito na corrente de descarga (bobina atuadora), devido à indutância e resistência transmitidas ou

refletidas para o primário pelos circuitos secundários acoplados quando a chapa metálica é acoplada ao sistema EMF. Note-se que a indutância e resistência refletidas são somente devido à existência da indutância mútua, isto é, se a bobina atuadora e a chapa metálica são desacopladas, $M(z)$ torna-se igual a zero. As indutâncias que acoplam o problema elétrico-magnético discretizado são calculadas usando-se o cálculo da densidade de fluxo magnético em pontos específicos através da lei *Biot-Savart* e o sistema ODE é resolvido por métodos numéricos no *software Matlab*. Os resultados obtidos a partir da solução do problema eletromagnético, tais como, densidade de fluxo magnético, correntes de descarga e induzidas nos circuitos secundários, força e pressão de origem eletromagnética são então exportadas para o problema mecânico. O *software Abaqus/Explicit* é usado na simulação mecânica para determinação da deformação plástica da chapa metálica e posterior comparação aos resultados experimentais. O fluxograma da Figura 38 representa esquematicamente as etapas do processo de modelagem e solução numérica do problema eletromagnético e simulação mecânica da deformação da chapa metálica, sendo que algumas etapas experimentais são usadas como dados de entrada do modelo ou validação do mesmo. Este fluxograma mostra todas as etapas de cálculo, dados de entrada necessários, resultados obtidos ou dados de saída e quais destes são medidos experimentalmente para validação do modelo eletromagnético proposto. Cada uma destas etapas é descrita nas próximas seções e os resultados mostrados e analisados no próximo capítulo juntamente com os resultados experimentais.

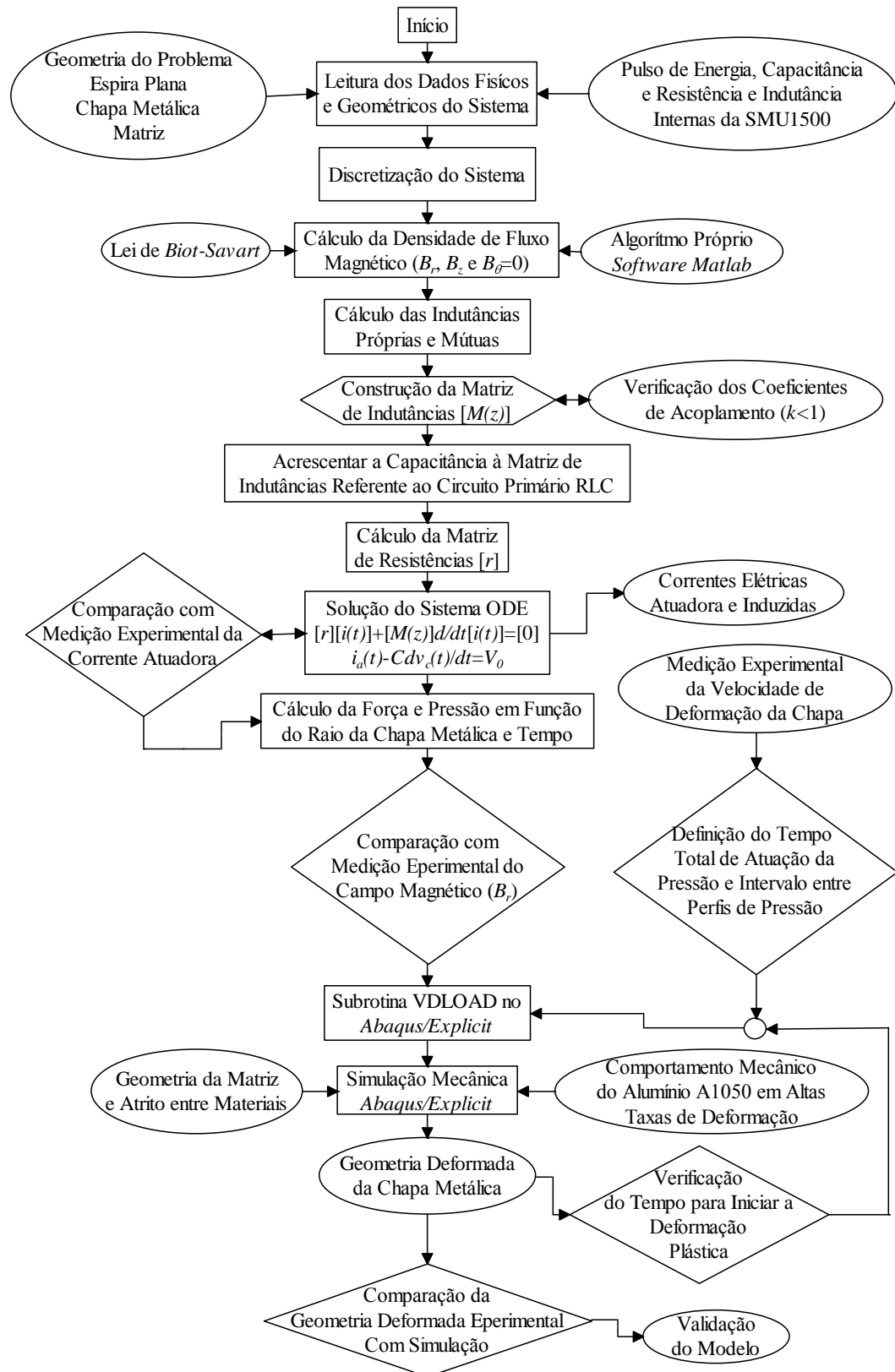


Figura 38 Representação esquemática das etapas de análise eletromagnética e simulação mecânica do processo EMF.

3.1 DISCRETIZAÇÃO E SIMPLIFICAÇÕES

Para analisar o problema eletromagnético do processo EMF a bobina espiral plana é simplificada, sendo considerada como axissimétrica, ou seja, esta é aproximada a N anéis condutores concêntricos elementares. Os cálculos também utilizam um método baseado na discretização da chapa metálica em n anéis condutores elementares axissimétricos e calcula a corrente induzida e a força eletromagnética na superfície de cada condutor, considerando que a corrente induzida e a força eletromagnética é uniforme no interior ou na superfície de cada elemento, respectivamente. Um modelo esquemático do circuito que representa o sistema EMF analisado é mostrado na Figura 39.

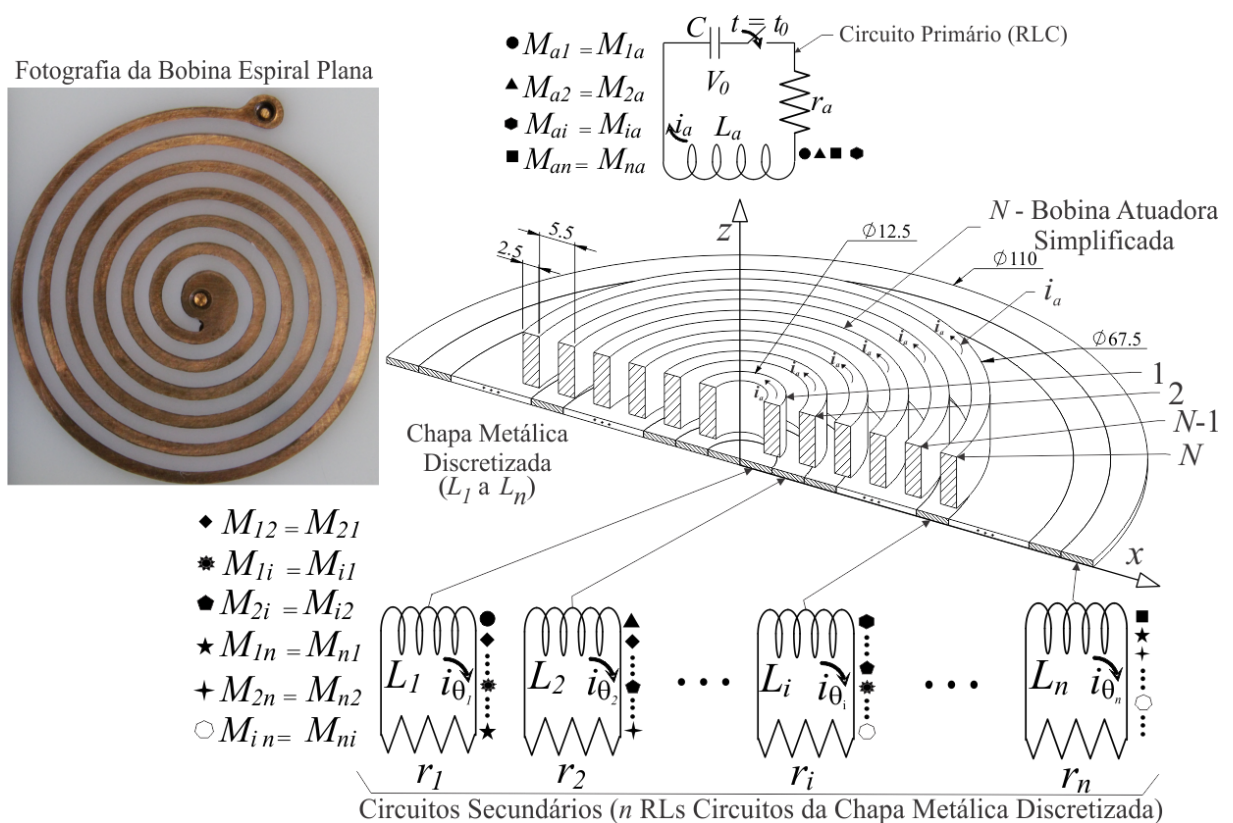


Figura 39 Circuito discretizado de acoplamento entre os fenômenos elétricos e magnéticos do sistema EMF.

Desprezando a interação da densidade de fluxo magnético com a deformação plástica da chapa metálica, pode-se considerar inicialmente indutâncias mútuas constantes entre chapa

metálica e a bobina atuadora durante o processo de deformação, sendo que isso é uma simplificação das equações (1) e (2). Uma vez que a força eletromagnética é muito rápida em comparação com o tempo da deformação da chapa metálica, esta simplificação é válida (CORREIA et al., 2008; IMBERT, 2004; WANG et al., 2006; XU et al., 2010).

Uma das características importantes do circuito RLC é o fato de que a eficiência do acoplamento entre os enrolamentos é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Consequentemente, as componentes da densidade de fluxo magnético B_z e B_r , as quais alteram as indutâncias de circuito da Figura 39 e força eletromagnética em cada um dos n elementos da discretização da chapa metálica, respectivamente, diminuindo muito as correntes induzidas e força eletromagnética nos n elementos.

Para um instante de tempo de 100 μ s da evolução do processo (MANEA, 2002) verificou que, as diferenças na intensidade do campo magnético em relação à chapa fixa são apenas significativas, se a velocidade da chapa é da ordem de 10^7 m/s ou mais. Além disso, as diferenças diminuem com a diminuição do tempo de evolução do processo. Na conformação eletromagnética, o processo de deformação ocorre num intervalo de tempo na ordem de centenas de μ s e as velocidades de deformação são da ordem de até 10^3 m/s, ou seja, bem abaixo do valor para o qual o termo velocidade da chapa torna-se significativo na evolução do campo magnético. Assim, a consideração inicial de chapa fixa para o cálculo da densidade de fluxo magnético, indutâncias, correntes induzidas, e força de origem eletromagnética é uma boa aproximação.

Nesta análise, devido a simplificações, despreza-se a variação das indutâncias mútuas durante deformação, assim o problema elétrico transiente pode ser separado em um circuito RLC primário acoplado com n RLs secundários. Esta separação pode ser representada pelo conjunto de ODE da equação (50), a qual é obtida pela aplicação da lei de *Kirchhoff* para os circuitos acoplados mostrados na Figura 39 (PAESE et al., 2014).

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & r_a & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & r_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & r_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_a \\ i_{\theta 1} \\ i_{\theta 2} \\ \vdots \\ i_{\theta n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_a & M_{a1} & M_{a2} & \cdots & M_{an} \\ 0 & M_{1a} & L_1 & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ 0 & M_{2a} & M_{21} & L_2 & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & M_{na} & M_{n1} & M_{n2} & \cdots & L_n \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_c \\ i_a \\ i_{\theta 1} \\ i_{\theta 2} \\ \vdots \\ i_{\theta n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

onde:

$i_a(t)$ é corrente de descarga na espira atuadora;

L_a é a indutância própria total do circuito primário (espira atuadora e unidade de pulso);

r_a é a resistência elétrica total do circuito primário (espira atuadora e unidade de pulso);

C : Capacitância da unidade de pulso;

$v_c(t)$ é o potencial elétrico no banco de capacitores;

M_{ai} são as indutâncias mútuas entre espira atuadora e os n circuitos RLs da Figura 39;

r_i são as resistências elétricas do n circuitos RLs;

$i_{\theta i}$ são as correntes induzidas nos n circuitos RLs;

L_i são as indutâncias próprias nos n circuitos RLs;

M_{ij} para $(i \neq j)$ são as indutâncias mútuas entre os n circuitos RLs;

V_0 é o potencial elétrico inicial no banco de capacitores.

Para as condições iniciais, $t = 0s$, as correntes de descarga e induzidas são iguais a zero ($i_a, i_{\theta 1}, \dots, i_{\theta n} = 0$) e $v_c = V_0$.

Este método de discretização da chapa metálica assume que as correntes induzidas são uniformemente distribuídas na secção transversal dos filamentos elementares de corrente e é semelhante ao apresentado em trabalhos anteriores relacionados a sistemas de lançamento eletromagnético (HE et al., 1989; SHOUBAO et al., 2011).

A técnica de cálculo das indutâncias da equação (50), baseia-se no cálculo da densidade de fluxo magnético B_z em pontos específicos pela aplicação da lei de *Biot-Savart* e

assim obter as indutâncias próprias e mútuas do circuito que modela o sistema de EMF. Assim, as correntes de descarga e induzidas são calculadas através da solução do conjunto de (ODE), sendo que estas dependem da energia armazenada no banco de capacitores, das indutâncias e das resistências elétricas. Os dois últimos parâmetros do circuito dependem da geometria do problema.

3.2 LEI DE *BIOT-SAVART* APLICADA AO CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR UMA ESPIRA CIRCULAR

As componentes da densidade de fluxo magnético produzido por uma espira circular de raio r mostrada na Figura 40 pode ser calculadas pela aplicação da lei de *Biot-Savart*.

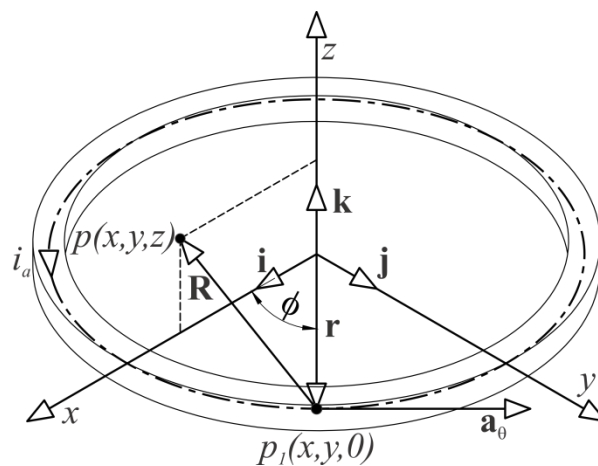


Figura 40 Representação de uma espira circular para cálculo do vetor densidade de fluxo magnético em um ponto p usando-se a lei de *Biot-Savart*.

Usando a equação (28) e considerando a corrente fluindo em uma linha i_a , o cálculo do vetor de densidade de fluxo magnético em um ponto genérico p , representada sob a forma vetorial, é obtido por:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i_a}{4\pi R^2} d\mathbf{l} \times \mathbf{a}_R \quad (51)$$

Para pontos $p(x,y,z) \in \mathcal{R}^3$ no espaço, a densidade de fluxo magnético pode ser determinada matematicamente pelas equações (52), (53) e (54) em uma sistema de coordenadas cilíndricas (BALDAN et al., 2004; HOMRICH, 2001; PAESE et al., 2011).

$$B_r = \frac{\mu_0 i_a z r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\left[x^2 + y^2 + z^2 + r^2 - 2r(x \cos \phi + y \sin \phi) \right]^{3/2}} d\phi \quad (52)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 i_a z r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\left[x^2 + y^2 + z^2 + r^2 - 2r(x \cos \phi + y \sin \phi) \right]^{3/2}} d\phi \quad (53)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 i_a r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r - (y \sin \phi + x \cos \phi)}{\left[x^2 + y^2 + z^2 + r^2 - 2r(x \cos \phi + y \sin \phi) \right]^{3/2}} d\phi \quad (54)$$

onde o ângulo α é calculado por:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (55)$$

Nas equações (52), (53) e (54) ϕ é o ângulo entre o vetor raio \mathbf{r} do condutor circular e o vetor unitário na direção x . Para casos particulares em que ponto p está sobre o eixo z , $p(0,0,z)$, as equações (52) (53) (54) podem ser simplificadas e assim obtêm-se:

$$B_r = \frac{\mu_0 i_a z r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\left[z^2 + r^2 \right]^{3/2}} d\phi \quad (56)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 i_a z r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\left[z^2 + r^2 \right]^{3/2}} d\phi \quad (57)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 i_a r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r}{\left[z^2 + r^2 \right]^{3/2}} d\phi \quad (58)$$

Resolvendo as integrais das equações (56), (57) e (58), verifica-se que para estes pontos particulares tem-se apenas componentes da indução magnética na direção de z . Para componente na direção de z verifica-se que r e z não variam com ϕ e podem ser retirados da integral, assim as equações (56) e (57) são iguais a zero, e a equação (58) reduz-se a uma simples equação:

$$B_z = \frac{\mu_0 i_a r^2}{2(z^2 + r^2)^{3/2}} \quad (59)$$

Para todos os outros pontos fora do eixo z , a solução pode ser encontrada, mas em termos de integrais elípticas de primeira e segunda ordem e são dadas por (SMYTHE, 1989):

$$B_r = B_0 \frac{1}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(k) \frac{1-\eta^2-\beta^2}{Q-4\eta} + K(k) \right] \quad (60)$$

$$B_z = B_0 \frac{\gamma}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(k) \frac{1+\eta^2+\beta^2}{Q-4\eta} - K(k) \right] \quad (61)$$

Onde B_0 é a densidade de fluxo magnético na direção z no centro da espira; de outra forma, $z=0$ na equação (59), assim obtêm-se:

$$B_0 = \frac{i_a \mu_0}{2r} \quad (62)$$

$K(k)$ e $E(k)$ são integrais elípticas completas de primeira e segunda ordem, as quais podem ser obtidas a partir de tabelas de matemática como as encontradas em (DWIGHT, 1957) ou *softwares* de matemática, e os termos η , β , γ , Q e k são calculados por:

$$\eta = \frac{x}{r} \quad (63)$$

$$\beta = \frac{z}{r} \quad (64)$$

$$\gamma = \frac{z}{x} \quad (65)$$

$$Q = \left[(1+\eta)^2 + \beta^2 \right] \quad (66)$$

$$k = \sqrt{\frac{4\eta}{Q}} \quad (67)$$

A equação que matematicamente representa o componente B_θ existe, mas por causa da configuração geométrica do problema, a qual é axissimétrica, a integral da equação (53) é igual a zero.

3.3 CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS PRÓPRIAS E MÚTUAS DO SISTEMA DE EMF

A bobina espiral plana da Figura 41(b) é simplificada conforme mostrado na Figura 41(a), na qual flui a mesma corrente i_a em cada espira circular. Apenas o fluxo magnético (Φ) na direção z passa perpendicularmente através das espiras circulares.

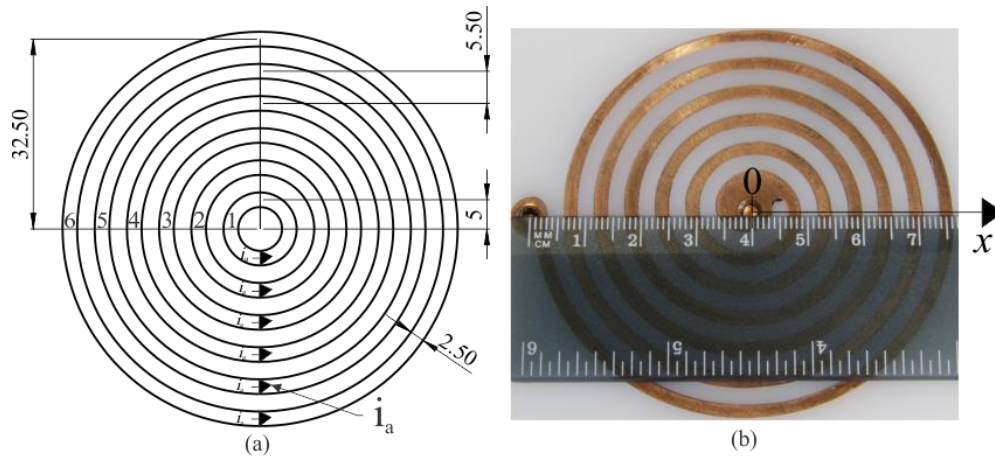


Figura 41 Bobina espiral plana usada nesta análise: (a) Simplificada; (b) Real.

Considerando-se que a mesma corrente i_a flui em cada um dos seis anéis concêntricos e coplanares da Figura 41(a), apenas o fluxo magnético na direção z concatena os anéis da espira atuadora, assim a indutância própria da mesma pode ser calculada por:

$$L_a = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi_i}{i_a} \quad (68)$$

onde N é o número de anéis ou espiras e

$$\frac{\Phi_i}{i_a} = \int_s \frac{\mathbf{B}}{i_a} \cdot d\mathbf{s}_i = \int_s \frac{B_{zi}}{i_a} ds_i \quad (69)$$

onde

Φ_i/i_a é o fluxo magnético produzido pela corrente i_a em cada enésimo anel i da bobina atuadora, sendo que o somatório representa o fluxo concatenado total da mesma;

s_i é a área da superfície do enésimo anel i que é percorrido na sua circunferência pela corrente i_a ;

B_{zi} é a densidade de fluxo magnético em cada ponto do enésimo anel i .

As indutâncias mútuas entre a espira atuadora e os enésimos condutores elementares i da discretização da chapa metálica pode ser calculada por:

$$M_{ai} = \frac{\Phi_{ai}}{i_a}; (i = 1, 2, \dots, n) \quad (70)$$

onde:

Φ_{ai}/i_a é o fluxo magnético produzido por i_a no enésimo condutor circular elementar i da discretização da chapa metálica;

As indutâncias próprias dos n condutores circulares elementares da discretização da chapa metálica e as indutâncias mútuas entre seus n condutores circulares elementares pode ser calculada por:

$$M_{ij} = \frac{\Phi_{ij}}{i_{\theta i}}; (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n) \quad (71)$$

onde:

$\Phi_{ij}/i_{\theta i}$ é o fluxo magnético produzido pela corrente $i_{\theta i}$ (condutor elementar i) que concatena um outro condutor elementar j da discretização da chapa metálica. Além disso, $M_{ij}=M_{ji}$ e M_{ii} são as indutâncias próprias dos condutores elementares da discretização da chapa metálica (L_i).

O sistema de equações diferenciais ordinárias (50) é resolvido utilizando método explícito *Runge-Kutta* no *software Matlab* (função ODE45) (MOLER, 2004), obtendo-se a corrente de descarga na bobina atuadora, as correntes induzida em cada elemento n da chapa metálica discretizada e a tensão no banco de capacitores, em função do tempo.

3.4 EFEITO PELICULAR (*SKIN EFFECT*)

A difusão do campo magnético em um condutor resulta em uma distribuição da densidade de corrente não uniforme, o que é conhecido como efeito pelicular. Esta é a tendência das correntes em alta frequência e o fluxo magnético penetrarem na superfície de um condutor apenas até a uma profundidade limitada. A penetração do campo magnético δ na chapa metálica varia com a frequência f da corrente induzida, com a condutividade elétrica σ , e a permeabilidade magnética μ , de acordo com a equação (72).

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mu\pi f\sigma}} \quad (72)$$

O efeito pelicular tem que ser considerado em problemas eletromagnéticos de alta frequência, onde a corrente elétrica tende a fluir na superfície do condutor. Para efeitos de projeto, δ deve ser tão próximo quanto possível da espessura da chapa metálica, a fim de aumentar a eficiência da força mecânica de origem eletromagnética localizada nas camadas superficiais da chapa metálica (WHEELER, 1942).

Se o efeito pelicular é muito pequeno em relação à espessura da chapa metálica, a densidade de correntes induzidas na superfície da peça é muito alta e, impede a penetração do campo magnético. Se o efeito pelicular é maior que a espessura da chapa metálica, grande parte do campo magnético atravessa a peça, reduzindo a eficiência do processo.

3.5 FORÇA ELETROMAGNÉTICA

Considerando a Figura 37, que representa o modelo contínuo do sistema EMF, o processo de indução da corrente e da força eletromagnética na chapa metálica pode ser considerado como um processo de penetração do campo magnético no interior da chapa metálica, que é representado pela equação da difusão (18). No entanto, neste modelo discreto proposto a componente axial da força eletromagnética f_z é calculada na superfície da chapa

metálica, e o cálculo das correntes induzidas é efetuado utilizando as indutâncias, as quais acoplam os fenômenos elétricos e magnéticos. A força mecânica axial de origem eletromagnética f_{zi} que é gerada pelo sistema eletromagnético acoplado no enésimo condutor circular i da chapa metálica discretizada pode ser calculada usando-se as equações (23) e (52). Assim, considerando-se uma corrente concentrada em uma linha, fluindo em cada anel da discretização da chapa metálica, tem-se:

$$f_{zi} = \left[\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{B_{ri}}{i_{\theta i}} \right) i_{\theta i} \right) + \left(\frac{B_r}{i_a} \right) i_a \right] i_{\theta i} C_i \quad (73)$$

onde:

(B_r/i_a) é a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela espira atuadora na direção radial;

$(B_{ri}/i_{\theta i})$ é a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela enésima espira i da discretização da chapa metálica na direção radial;

$i_{\theta i}$ é a corrente induzida no enésimo anel i da chapa metálica discretizada;

i_a é a corrente de descarga na bobina atuadora;

C_i é o comprimento do enésimo anel i da chapa metálica discretizada.

Este método considera que a densidade da corrente elétrica na área transversal (A_i) do anel discretizado da chapa metálica é constante, portanto:

$$i_{\theta i} = J_{\theta i} A_i \quad (74)$$

De acordo a equação (51), o vetor densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , em especial a componente B_r , diminui por uma razão ao quadrado com o aumento da distância entre a bobina atuadora e a chapa metálica, assim a força eletromagnética é também dependente desta distância. Na equação (73) a componente da densidade de fluxo magnético na direção radial leva em consideração a contribuição da densidade de fluxo magnético gerado pela bobina atuadora e pelas correntes induzidas na chapa metálica, sendo que esta a densidade de fluxo

magnético na direção radial gerado pelas correntes induzidas nos anéis da discretização da chapa metálica soma-se a densidade de fluxo magnético gerado pela espira atuadora aumentando a força eletromagnética.

3.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ALUMÍNIO A1050 SEGUNDO MODELO DE *JOHNSON-COOK*

O modelo de *von Mises* para o valor instantâneo da tensão necessária para continuar deformando plasticamente o material (curva tensão verdadeira-extensão-velocidade de deformação) é dado pela equação (75) (JOHNSON, 1983).

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - T_h^m] \quad (75)$$

$$T_h = \frac{(T - T_0)}{(T_f - T_0)} \quad (76)$$

onde:

σ é a tensão instantânea verdadeira para continuar a deformação plástica do material;

ε é a deformação plástica do material;

$\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação do material (velocidade de deformação);

$\dot{\varepsilon}_0$ é uma constante que tem função de normalização da velocidade de deformação;

T_0 é a temperatura de referência do material;

T_f é a temperatura de fusão do material;

A é uma constante do material que esta relacionada com a tensão de escoamento;

B e n são as constantes relacionadas ao encruamento do material devido à deformação;

C é uma constante que está relacionada com a velocidade de deformação do material;

m é uma constante que está relacionada com a diminuição da dureza do material devido ao aumento da temperatura.

O primeiro termo entre colchetes representa a tensão instantânea verdadeira em função da deformação para $\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)=1$ e $T_h^m=0$. O termo no segundo e terceiro colchetes representam o efeito da taxa de deformação e temperatura, respectivamente. O modelo *Johnson-Cook* é muito utilizado em *softwares* de simulação numérica, desde que estes incorporem os efeitos combinados da extensão, velocidade de deformação e temperatura em seus códigos, como é o caso do *software Abaqus/Explicit*. O modelo de *Johnson-Cook* é um modelo Rígido-Viscoplástico que pode ser simplificado para condições isotérmicas, sendo o caso do processo EMF, como já observado por (PAESE et al., 2014) em experimentos realizados na máquina SMU1500, resultando na equação (77).

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \quad (77)$$

O modelo proposto por (SILVA, 2013) foi ajustado ao modelo de *Johnson-Cook* isotérmico através de um procedimento computacional no *software Matlab* (ferramenta *sftool*) e o resultado deste ajuste é mostrado na Tabela 2, considerando *came* do tipo logística, a qual possui assinatura linear da velocidade de deformação com a extensão, sendo estas as constantes de caracterização do alumínio A1050 no *software Abaqus/Explicit*. A Figura 42 mostra o modelo proposto por (SILVA, 2013), o qual usa a equação (46) com as constantes para a *came* do tipo logística.

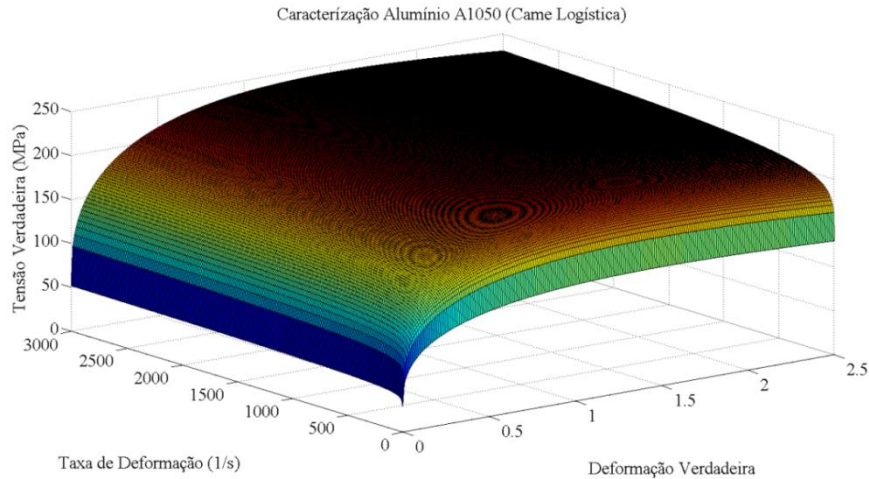


Figura 42 Comportamento mecânico da liga de alumínio A1050 obtido pela equação (46) para *came* do tipo logística.

Tabela 2 Valores das constantes para o Alumínio A1050 ajustado ao modelo de *Johnson-Cook*.

	A (10^6)	B (10^6)	C	n	$\dot{\epsilon}_0$
A1050 (<i>Came</i> logística)	24,76	184,2	0,06	0,13	813

Fonte: *Matlab* (ferramenta *sftool*)

A Figura 43 mostra o ajuste para o modelo de *Johnson-Cook* isotérmico do comportamento mecânico do alumínio A1050. Este foi obtido no *software Matlab*, usando a curva obtida por (SILVA, 2013) para *came* do tipo logística, sendo o valor da correlação ao quadrado (R^2) igual a 0,879.

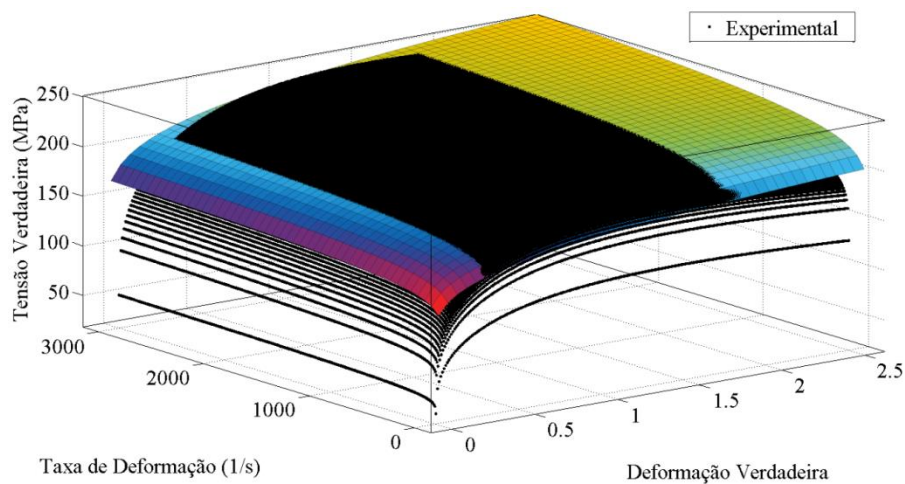


Figura 43 Interpolação do comportamento mecânico do alumínio A1050 usando *came* do tipo logística para o modelo *Johnson-Cook*.

3.7 PARÂMETROS DO PROBLEMA ELETROMAGNÉTICO E MECÂNICO

Como discutido anteriormente o processo EMF é complexo e envolve a deformação plástica de uma chapa metálica, resultante da interação do campo eletromagnético gerado pela bobina atuadora com a chapa metálica. Esta análise pode permitir a otimização ou prever os parâmetros necessários para se obter uma deformação específica da chapa metálica, melhorando assim as possibilidades de aplicação deste processo no âmbito industrial. O objetivo é desenvolver um modelo numérico simples, mas preciso que possa simular a deformação de chapas metálicas pelo processo EMF. O problema eletromagnético do processo EMF já foi resolvido nos itens anteriores, sendo agora necessário modelar o problema mecânico. Nesta etapa optou-se por usar o *software* comercial *Abaqus/Explicit*, o qual utilizará como entrada as curvas de pressão de origem eletromagnética versus raio da chapa metálica e tempo da corrente de descarga, obtidas pelo algoritmo próprio desenvolvido no *software Matlab*, conforme fluxograma da Figura 38. Os resultados numéricos obtidos para a deformação da chapa metálica serão comparados com os experimentais, para validação do modelo eletromagnético proposto neste trabalho, juntamente com a medição da corrente de descarga, velocidade de deformação e da densidade de fluxo magnético na direção radial.

3.7.1 Características da Máquina SMU1500 e Geometria da Espira Atuadora e Chapa Metálica

O projeto da espira atuadora deve ser baseado na idéia de que possa transferir o máximo de energia armazenada no banco de capacitores para a chapa metálica em forma de deformação plástica da mesma. O projeto da espira atuadora pode parecer simples, mas existem vários fatores complicadores, sendo que as principais questões envolvem a seleção dos materiais e geometria da mesma. Esta é sujeita a mesma pressão de origem eletromagnética que a chapa metálica sofre, além disso, na espira é importante também a

componente da força eletromagnética na direção radial da mesma, devido à densidade de fluxo magnético B_z . A espira deve resistir a elevadas forças eletromagnéticas e aquecimento sem falha mecânica. Deste modo, uma combinação de materiais é normalmente aplicada utilizando-se cobre para as espiras da bobina para garantir uma alta condutividade elétrica e um polímero de engenharia (Poliacetal-Ensinger TECAFORM) para isolamento e proporcionar rigidez mecânica. A bobina utilizada neste trabalho é do tipo espiral plana com apenas uma camada, sendo a mesma aplicada à conformação de chapas metálicas planas e finas. Esta é baseada em termos de dimensões à bobina utilizada por (CORREIA et al., 2008; SIDDIQUI, 2009; TAKATSU et al., 1988). A Tabela 3 resume os parâmetros geométricos e físicos da espira atuadora utilizada neste trabalho e a Figura 44 mostra o desenho desta espira.

Tabela 3 Parâmetros da Espira Atuadora e Matriz

	Parâmetros	Valor
Bobina espiral plana	Número de espiras (N)	6
	Diâmetro externo (D_0)	67,5 mm
	Passo (P)	5,5 mm
	Seção transversal (A_a)	20 mm ²
	Indutância própria (L_a)	0,92 μ H (calculada)
	Condutividade	59,5 MS
	Resistência Elétrica (r_a)	0,597 m Ω (calculada)

Fonte: Autor.

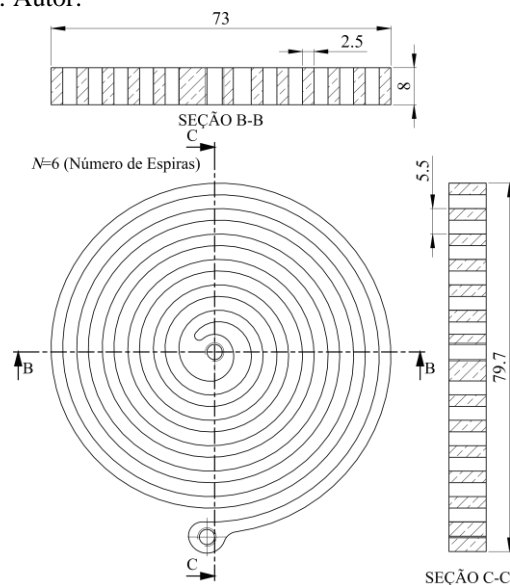


Figura 44 Geometria e dimensões da espira atuadora.

Para validar o método de cálculo da força de origem eletromagnética, a qual será usada como um dos parâmetros de entrada do problema mecânico, alguns experimentos de livre abaulamento foram realizados com discos de alumínio A1050. A Tabela 4 resume os parâmetros geométricos e físicos da chapa metálica utilizada neste trabalho. Nestes experimentos a corrente de descarga da máquina SMU1500 foi medida com um osciloscópio.

Tabela 4 Parâmetros da Chapa Metálica

	Parâmetros	Valor
Chapa Metálica (A1050)	Diâmetro	110 mm
	Espessura	1 mm
	Discretização no Raio (n)	110 (<i>Abaqus e Matlab</i>)
	Discretização na Espessura	4 (Somente para o <i>Abaqus</i>)
	Condutividade	36 MS
	Densidade	2750 kg/m ³
	Módulo de Elasticidade	80,7 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,33

Fonte: Autor.

A Tabela 5 mostra as principais especificações da máquina de conformação eletromagnética utilizada neste trabalho, fabricada pela Poynting GmbH (<http://www.poynting.de/en/>) que faz parte do laboratório de Engenharia Mecânica do IST (Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa).

Tabela 5 Especificações da Máquina EMF (SMU1500)

	Parâmetros	Valor
SMU1500	Máxima Energia (U)	1500 J
	Capacitância (C)	60 μ F
	Máxima Tensão (V_0)	7,1 kV
	Máxima Corrente de Descarga (i_a)	80 kA
	Frequência de Curto Circuito	60 kHz
	Taxa de Carregamento	0,6 kJ/s
	Chave Principal de Descarga	<i>Spark Gap</i>
	Controle	CLP
	Intervalo do <i>Setup</i> de Energia	0,02 kJ
Medição da Corrente de Descarga (i_a)	Conector BNC (20 mV/kA)	

Fonte: Manual da máquina SMU1500.

A máquina de conformação eletromagnética possui resistência e indutância internas, as quais foram determinadas através da medição experimental da corrente de descarga com a bobina espiral plana usada neste trabalho em série e sem chapa metálica acoplada. A presença de uma chapa metálica acoplada altera consideravelmente a resistência e indutância do circuito primário devido à resistência e indutância refletidas ou transmitidas ao primário pela presença dos circuitos secundários acoplados (chapa metálica discretizada). A Figura 45 mostra a medição da corrente de descarga sem chapa metálica acoplada e a interpolação realizada no *software Matlab* (ferramenta *cftool*), usando-se a equação característica de descarga de um circuito RLC dada pela equação (78). Os valores obtidos por método computacional de interpolação são $r_{am}=13,74 \text{ m}\Omega$ e $L_{am}=1,043 \text{ }\mu\text{H}$, com correlação ao quadrado (R^2) igual a 0,9915, sendo estes os valores totais (resistência e indutância internas da SMU1500 somadas as referentes à bobina atuadora) presentes no circuito primário RLC sem chapa metálica acoplada. Deve-se somar aos valores calculados da indutância própria L_a e da resistência elétrica r_a da espira atuadora, calculadas pelo modelo proposto, até que se atinja os valores totais, pois estes valores de resistência e indutância totais do circuito RLC desacoplado estão presentes no circuito primário também quando uma chapa metálica é acoplada ao sistema EMF.

$$i_a(t) = \left(\frac{2U}{C}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{C}{L_{am}}\right)^{\frac{1}{2}} e^{\left(\frac{-r_{am}}{2L_{am}}\right)t} \text{sen} \left[\left(\frac{1}{CL_{am}} - \left(\frac{r_{am}}{2L_{am}}\right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} t \right] \quad (78)$$

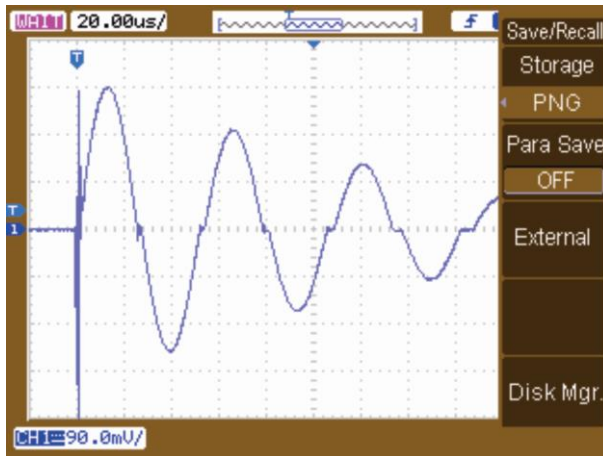
onde:

C é a capacitância e igual a $60 \text{ }\mu\text{F}$ (especificação da SMU1500);

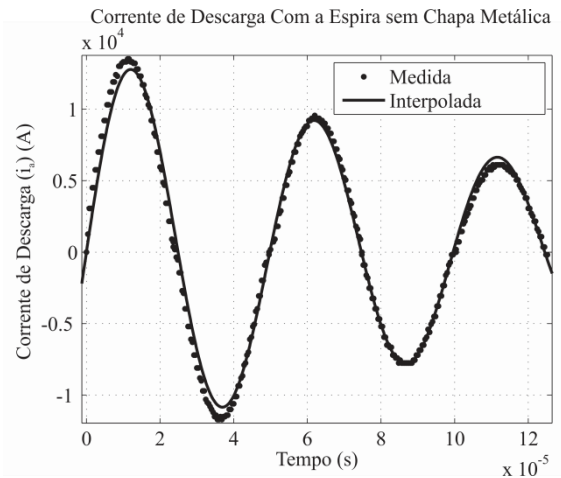
U é a energia armazenada no capacitor;

L_{am} é a indutância total do circuito RLC primário (indutância interna da SMU1500 somada à indutância própria da espira atuadora L_a) sem chapa metálica acoplada;

r_{am} é a resistência elétrica total do circuito RLC primário (resistência interna da SMU1500 somada à resistência da espira atuadora r_a) sem chapa metálica acoplada.



(a)



(b)

Figura 45 Medição experimental da corrente de descarga com a espira atuadora conectada e sem chapa metálica acoplada para $U=100$ J: (a) osciloscópio; (b) interpolação realizada no software Matlab.

A Tabela 6 resume os principais parâmetros geométricos e físicos da ferramenta de EMF e a Figura 46 mostra o projeto da mesma, sendo que esta foi desenvolvida durante a tese de doutorado para utilização na máquina SMU1500.

Tabela 6 Parâmetros da Ferramenta de EMF

	Parâmetros	Valor
Ferramenta EMF	Diâmetro da Cavidade	80 mm
	Profundidade da Cavidade	39,85 m
	Material da Cavidade da Matriz	Poliacetil
	Material da Cavidade da Espira	Poliacetil
	Coefficiente de Atrito (Al/Poliacetil)	0,55
	Força do Sujeitador	-15760 N
	Distância entre Espira e Chapa Metálica	2,5 mm

Fonte: Autor.

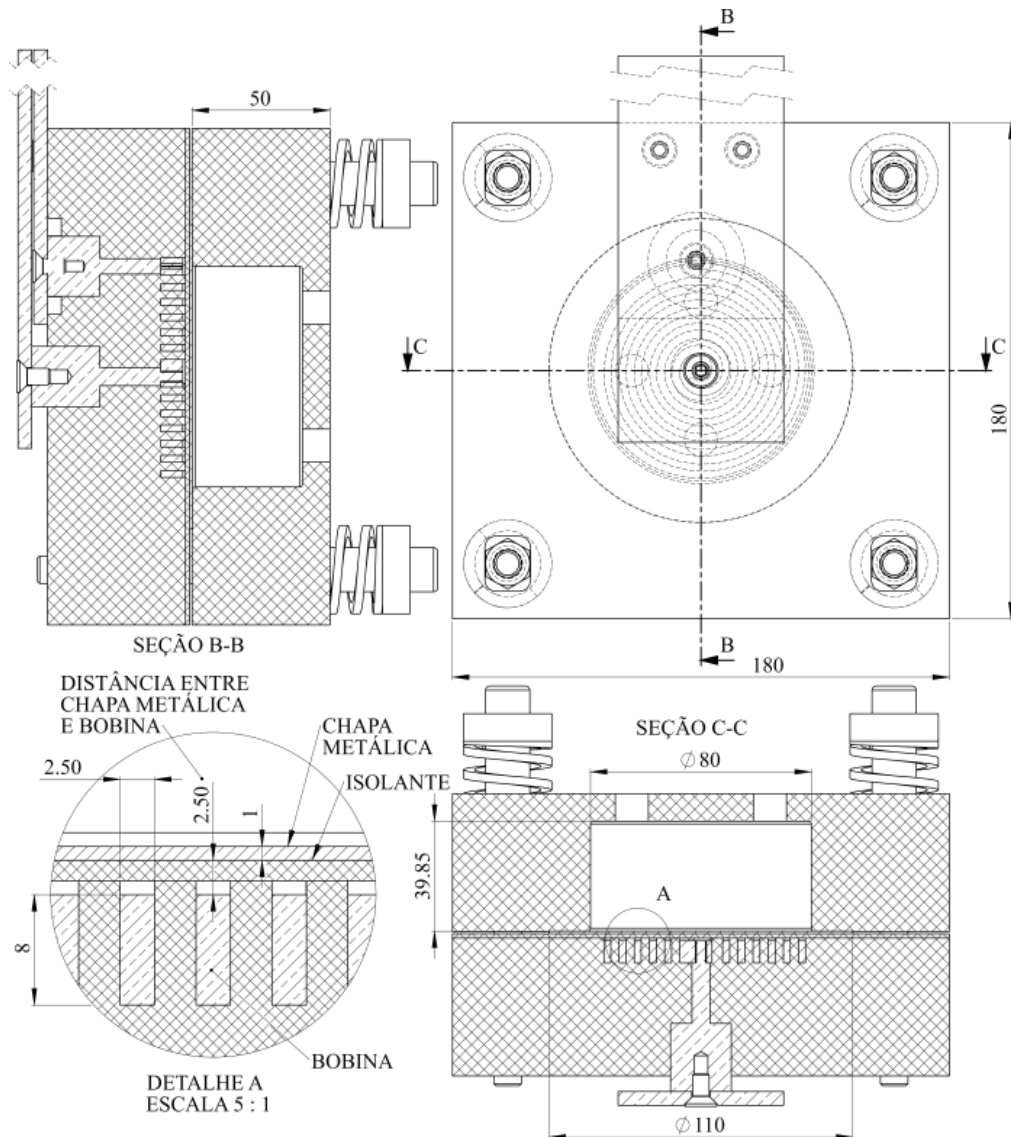


Figura 46 Geometria da ferramenta para conformação eletromagnética de chapas metálicas finas usando espira plana.

3.7.2 Implementação do Modelo de Elementos Finitos no *Abaqus/Explicit*

Neste estudo, consideram-se o problema eletromagnético e o mecânico do processo EMF como dois problemas independentes. O método numérico apresentado anteriormente resolve o problema eletromagnético sem a necessidade da corrente de descarga como parâmetro de entrada, obtendo a pressão que atua sobre chapa metálica, devido à força de origem eletromagnética. Em seguida, o perfil da pressão para vários instantes de tempo é

utilizada como carga no problema mecânico para obter a deformação da chapa metálica no *software Abaqus/Explicit*. Neste a subrotina VDLOAD é usada para descrever a variação da magnitude da pressão em função da posição e tempo da corrente de descarga. A malha utilizada no *software Abaqus/Explicit* possui elementos com largura idêntica a utilizada na discretização da chapa metálica na solução do problema eletromagnético, assim cada um dos elementos recebe a força de origem eletromagnética dada pela equação (73). A Figura 47 e a Tabela 4 mostram a forma e o tamanho destes elementos da discretização no *Abaqus/Explicit*, respectivamente.

Devido à simplificação adotada, considerando o problema como simétrico, as simulações de elementos finitos foram realizadas considerando-se simetria axial, ou seja, com z como eixo de simetria. Esta simplificação é usada por causa da distribuição simétrica das forças de origem eletromagnética adotada na solução do problema eletromagnético e reduz o custo de processamento sem afetar os resultados de forma significativa. A Figura 47 mostra a geometria do modelo de EF no *Abaqus/Explicit*.

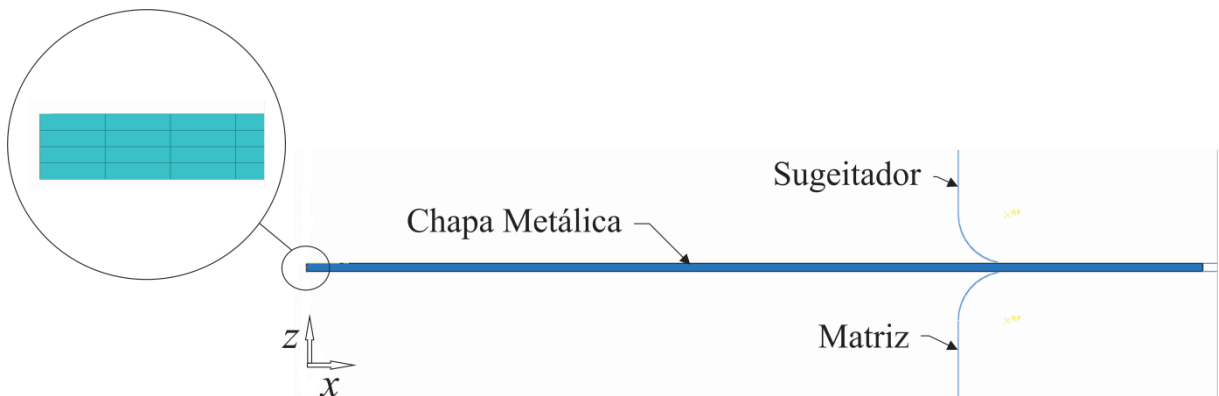


Figura 47 Geometria do modelo de EF no *Abaqus/Explicit* para simulação de livres abaulamentos por processo EMF.

No modelo EF proposto neste trabalho, a chapa metálica é considerada como um elemento plano axissimétrico deformável, enquanto que a matriz e o sujeitador são modelados utilizando-se elementos analíticos rígidos. A malha da chapa metálica foi gerada com

elementos do tipo CPS4R, que é do tipo com quatro nós bi-linear (plano de tensões) quadrilátero com integração reduzida (HIBBITT, 2011). A espessura da chapa metálica é igual a 1 mm, assim utilizou-se quatro elementos através da espessura da mesma. Ao longo do comprimento radial da chapa metálica (eixo x), utilizou-se um total de 110 elementos, mesmo que para a análise eletromagnética proposta neste trabalho. Um modelo dinâmico com tempo de integração explícito (*Abaqus/Explicit*) é utilizado na simulação de deformação da chapa metálica. O tempo do processamento da simulação é fixado em 300 μ s conforme dados dos experimentos de medição de velocidade média e tempo de deformação da chapa metálica, os quais serão apresentados no próximo capítulo de resultados obtidos. Nas simulações, são necessárias condições de contato entre a matriz e a chapa metálica bem como entre a chapa metálica e o sujeitador. O coeficiente de atrito utilizado entre o alumínio e o poliacetal é mostrado na Tabela 6, segundo (OBERG et al., 2008).

A pressão de origem eletromagnética atua sobre a superfície da chapa metálica na direção do eixo z causando deformação, ao mesmo tempo em que a força do sujeitador tem a função de segurar a chapa metálica evitando o enrugamento da mesma. A intensidade da pressão de origem eletromagnética é alterada na subrotina VDLOAD a cada 1 μ s do tempo de descarga da corrente na espira atuadora, desde o início da descarga até o final do primeiro período da mesma. Neste instante conforme será demonstrado no próximo capítulo, a chapa metálica se afasta da espira atuadora o que diminui muito a intensidade da força de origem eletromagnética e o restante da deformação é causado por inércia da mesma, visto que o modelo de EF também incorpora o efeito da aceleração gravitacional para baixo, conforme acontece no processo de conformação real.

O comportamento constitutivo (relação entre tensão, deformação e taxa de deformação) para a maioria dos metais muda qualitativamente a altas taxas de deformação. Para altas taxas de deformação, a sensibilidade da taxa de deformação do material aumenta

acentuadamente. Para entender melhor a alta velocidade do processo de deformação e levar em conta o fenômeno dinâmico (dependência da taxa de deformação), foram comparados diferentes modelos para o alumínio A1050. A Figura 48 mostra o modelo proposto por (TAKATSU et al., 1988), este mostra uma maior dependência da tensão verdadeira para causar deformação plástica com a deformação (encruamento) e taxa de deformação que o modelo proposto por (SILVA, 2013), mas este não realizou experimentos em sua caracterização. O modelo escolhido para caracterização do alumínio A1050 neste trabalho é o proposto por (SILVA, 2013), interpolado para a o modelo de *Johnson-Cook*, como demonstrado nos itens anteriores, sendo que este apresenta pouca dependência do material com relação à taxa de deformação.

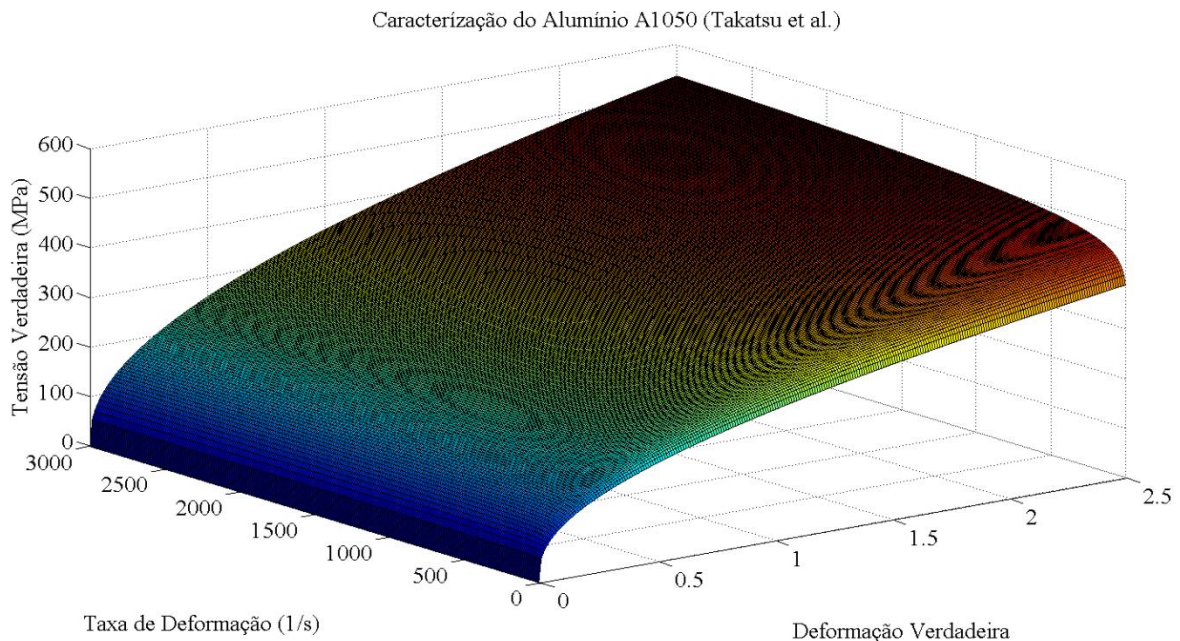


Figura 48 Modelo constitutivo do alumínio A1050 proposto por (TAKATSU et al., 1988).

3.8 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO USANDO BOBINA EXPLORATÓRIA

A força de origem eletromagnética é diretamente proporcional a densidade de fluxo magnético da direção radial (B_r), conforme mostra a equação (73), portanto esta é uma

variável importante a ser mensurada experimentalmente para validação do modelo eletromagnético proposto, pois este pode prever a densidade de fluxo magnético gerado pela bobina atuadora que é dependente da corrente de descarga e para o caso de chapa metálica acoplada ao sistema este também é dependente da corrente induzida na chapa metálica a ser deformada, de acordo com a equação (79).

$$B_{r(b,c)i} = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{B_{ri}}{i_{\theta i}} \right) i_{\theta i} \right) + \left(\frac{B_r}{i_a} \right) i_a \quad (79)$$

onde:

$B_{r(b,c)i}$ é a densidade de fluxo magnético produzido pela bobina atuadora e chapa metálica acoplada na direção radial;

(B_r/i_a) é a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela espira atuadora na direção radial;

$(B_{ri}/i_{\theta i})$ é a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela i ésima espira i da discretização da chapa metálica na direção radial;

$i_{\theta i}$ é a corrente induzida no i ésimo anel i da chapa metálica discretizada;

i_a é a corrente de descarga na bobina atuadora.

Com esta medição é possível a comparação da densidade de fluxo magnético calculado com o medido experimentalmente, assim a corrente induzida e força no i ésimo elemento da discretização da chapa metálica pode ser validada de forma indireta. A Figura 49 mostra a bobina exploratória sendo usada na medição da tensão induzida na mesma, durante o disparo da máquina SMU1500. A medição da forma de onda desta tensão induzida habilita o cálculo do fluxo magnético no ponto de medição, através da integração deste sinal de tensão. O sensor conhecido como bobina exploratória foi construído no IST e suas características geométricas são resumidas na Tabela 7, sendo a área e número de espiras do mesmo

conhecido, pode-se determinar a densidade de fluxo magnético no ponto de medição usando-se as equações (80) a (83).

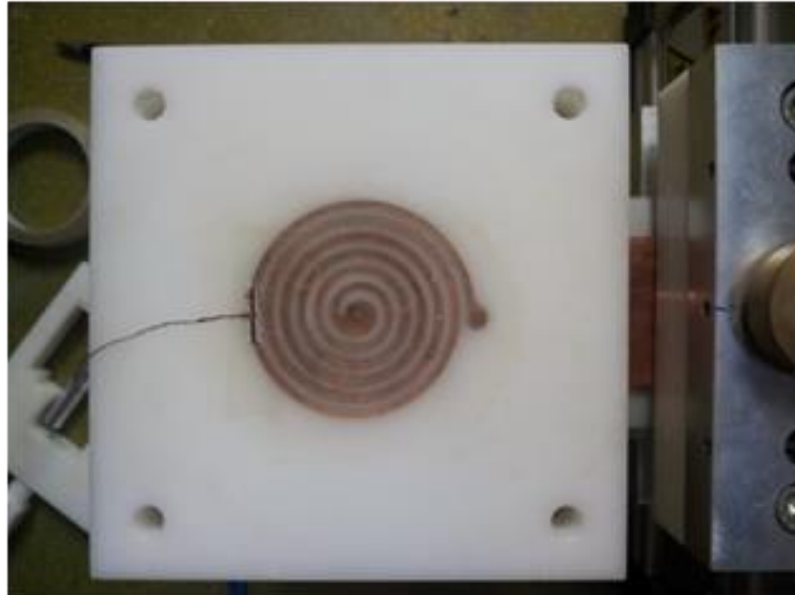


Figura 49 Ferramenta para EMF e a bobina exploratória durante as medições da tensão induzida na mesma e corrente de descarga da SMU 1500.

Tabela 7 Parâmetros da Bobina Exploratória

	Parâmetros	Valor
Bobina Exploratória	Diâmetro do fio	0,1007 mm
	Área da Bobina (S_e)	1,97 μm^2
	Material	Cobre AWG38
	Número de Espiras (N_e)	4

Fonte: Autor.

$$v_e(t) = -N_e \frac{d\Phi}{dt} \quad (80)$$

$$\Phi = -\frac{\int_0^{t_{lam}} v_e(t) dt}{N_e} \quad (81)$$

$$\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = B_r S_e \quad (82)$$

$$B_r = \frac{\Phi}{S_e} \quad (83)$$

onde:

$v_e(t)$ é a tensão induzida na bobina exploratória devido ao campo gerado pela sistema EMF;

N_e é o número de espiras da bobina exploratória;

t_{lam} é o tempo em que a corrente de descarga (i_a) é máxima;

S_e é a área da bobina exploratória.

O sinal de tensão induzida na bobina exploratória medido com osciloscópio é integrado numericamente no *software Matlab* para cálculo da densidade de fluxo magnético na direção radial utilizando-se algoritmo próprio.

3.9 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA E TEMPO DE DEFORMAÇÃO DA CHAPA METÁLICA

A medição experimental da velocidade média de deformação da chapa em experimentos de abaulamento livre para diferentes energias foi realizada através de lasers emissores e fotodiodos receptores, conforme mostra a Figura 50. Esta também mostra as distâncias que estes emissores e receptores foram posicionados para verificar o tempo em que a chapa deformando impede a passagem de luz desligando o receptor, desta forma pode-se calcular a velocidade média de deformação que é dada pela distância da chapa até o receptor dividido pelo tempo adquirido no osciloscópio em que o receptor é desligado pelo impedimento da passagem de luz devido à chapa deformando. As principais especificações técnicas dos componentes utilizados são resumidas na Tabela 8.

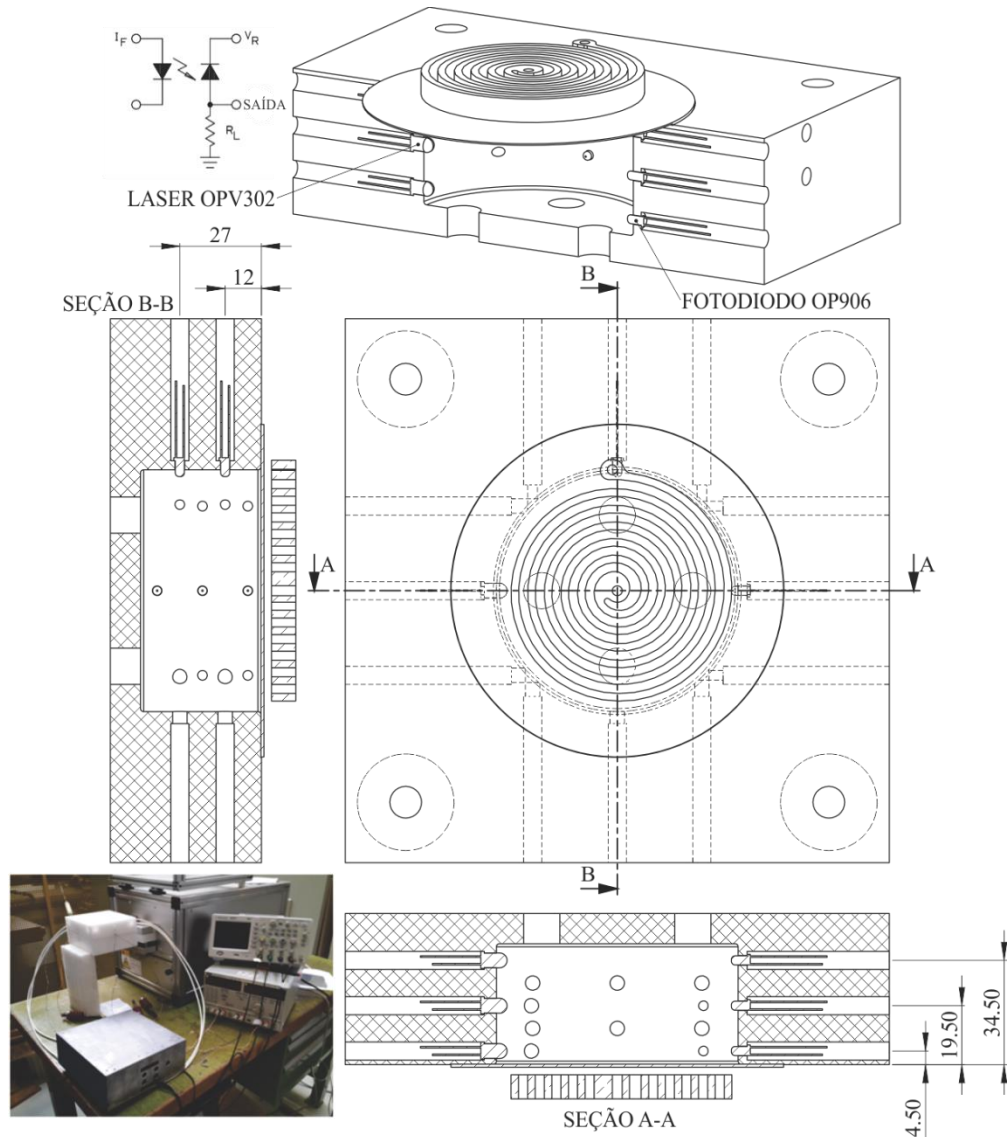


Figura 50 Ilustração de detalhes internos e imagem da ferramenta EMF na máquina SMU1500 com os dispositivos de medição.

Tabela 8 Especificações técnicas dos componentes eletrônicos usados na medição de velocidade de deformação da chapa metálica

	Parâmetros	Valor
Laser (OPV302)	Comprimento de Onda	850 nm
	Potência	1,5 mW
	Corrente Direta (I_F)	7 mA
Fotodiodo (OP906)	Tempo de Subida	5 ns
	Tempo de Queda	5 ns
	Comprimento de Onda	850 nm
	Tensão Reversa (V_R)	20 V

Fonte: Catálogos técnicos OPV302 e OP906.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e obtidos das análises numéricas do problema eletromagnético e mecânico, juntamente com comparações entre estes resultados. Este também mostra indicações para o projeto de máquinas e ferramentas aplicadas ao processo EMF, mostrando a influência dos principais parâmetros na pressão de origem eletromagnética e deformação final da chapa metálica.

4.1 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NA DIREÇÃO DE Z

Considerando a análise numérica para o modelo simplificado da bobina atuadora mostrada na Figura 41(a), e aplicando-se a lei de *Biot-Savart*, dada pela equação (54) para a componente da densidade de fluxo magnético na direção do eixo z , obtem-se o gráfico mostrado na Figura 51, a qual mostra a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerada no plano da bobina atuadora ($z=0$) na direção do eixo z . Por simetria, a densidade de fluxo magnético é considerada a mesma em toda a extensão circular, e cada ponto do gráfico leva em consideração a soma da influência das seis espiras da bobina atuadora. Os pontos no interior de cada fio das seis espiras são desconsiderados, porque, de acordo com a equação (51), o diferencial da densidade de fluxo magnético tende a infinito nesses pontos ($R \rightarrow 0$). Como \mathbf{B} é inversamente proporcional à distância R^2 (equação (51)) os valores mais elevados de \mathbf{B} são próximos aos condutores. A densidade de fluxo magnético por ampère mostrado na Figura 51 é usada para calcular a indutância própria da bobina atuadora, usando-se a equação (68). A densidade de fluxo magnético na direção z inverte o seu sinal do lado externo de cada anel da bobina atuadora, e devido a este motivo, as contribuições negativas dos anéis menores (internos) invertem o sinal da densidade de fluxo magnético para alguns pontos onde a posição x é maior do que o raio do terceiro anel da bobina atuadora. A densidade de fluxo magnético se torna totalmente negativa no lado de fora do maior anel (sexto anel) da bobina

atuadora, e tende a zero quando a posição x aumenta, isto é, para os pontos distantes da mesma.

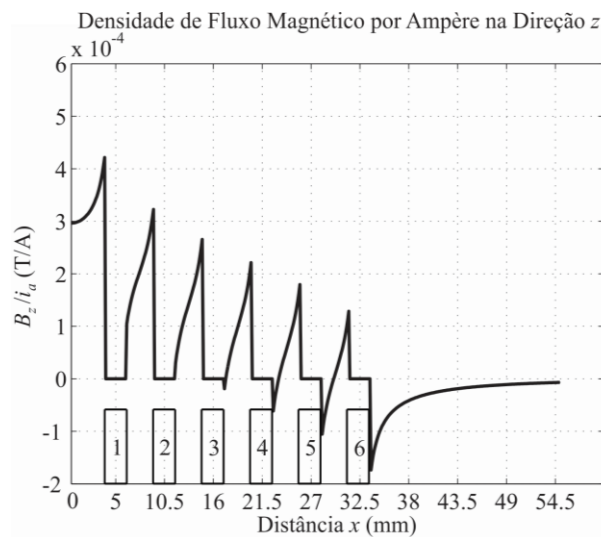


Figura 51 Densidade de fluxo magnético por ampère no plano da bobina atuadora ($z=0$) na direção do eixo z .

A chapa metálica é discretizada em condutores circulares elementares e coaxiais (L_1, L_2, \dots, L_{110}) conforme mostrado na Figura 39, sendo que L_1 e L_{110} são os diâmetros dos anéis interno e externo, respectivamente. A Figura 52 mostra a razão da densidade de fluxo magnético por ampères gerado pela bobina atuadora no plano da chapa metálica na direção do eixo z . Esta figura também considera a soma da contribuição da densidade de fluxo magnético por ampère de cada anel da bobina atuadora, mas no plano da chapa metálica ($z=0$), assim a distância R , mostrada na Figura 40 nunca é igual a zero, e todos os pontos ao longo da posição x podem ser computados. Além disso, para pequenas distâncias entre a bobina atuadora e a chapa metálica a densidade de fluxo magnético é ligeiramente maior e os valores negativos são devido à mesma razão explicada na Figura 51. Esta densidade de fluxo magnético é usada para calcular as indutâncias mútuas entre a bobina atuadora e cada um dos enésimos (n) condutores circulares individuais da discretização da chapa metálica (L_n), utilizando-se a equação (70).

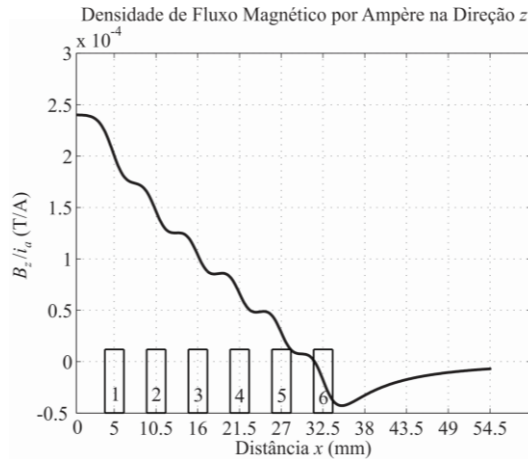


Figura 52 Densidade de fluxo magnético no plano da chapa metálica por ampère na direção do eixo z.

As indutâncias mútuas entre os n anéis da discretização da chapa metálica e suas próprias são calculadas utilizando-se a densidade de fluxo magnético produzido por estes anéis no plano da chapa. A Figura 53 mostra a densidade de fluxo magnético na direção do eixo z para a menor, intermediária e maior espira da discretização da chapa metálica. Cada espira da discretização possui uma curva como as mostradas na Figura 53, sendo que estas são usadas para os cálculos destas indutâncias, pela aplicação da equação (71).

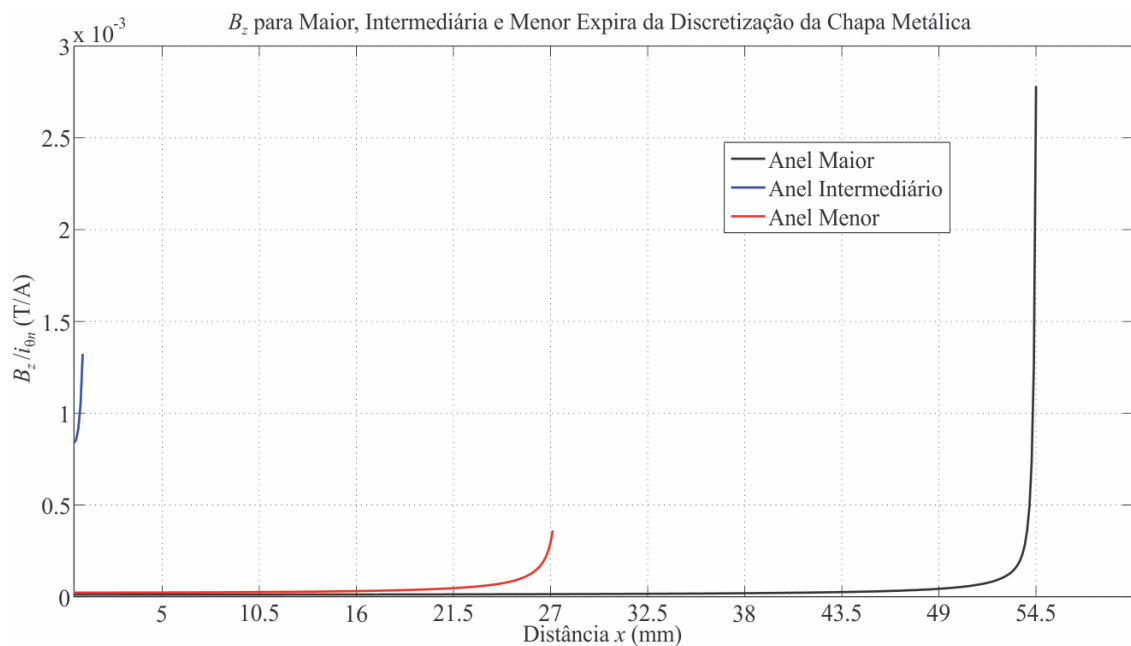


Figura 53 Densidade de fluxo magnético gerado pelas espiras da discretização da chapa metálica no plano das mesmas por ampère na direção do eixo z.

4.2 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NA DIREÇÃO RADIAL

A Figura 54 mostra a componente radial da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela espira atuadora. Note-se que esta razão depende da distância entre a espira atuadora e a chapa metálica, assim a força que é diretamente proporcional ao B_r terá valores elevados apenas para as pequenas distâncias (PAESE et al., 2014; WANG, 2010). Conforme a equação (51), a densidade de fluxo magnético é inversamente proporcional à distância R^2 , a qual depende das coordenadas x , y e z da Figura 40, apresentando assim picos próximos aos condutores da bobina atuadora e caindo muito com o afastamento da chapa metálica. Estes picos são mais visíveis quando a distância z é menor, pois ($R \rightarrow 0$) e a diferencial da densidade de fluxo magnético, calculada pela equação (51) tende ao infinito.

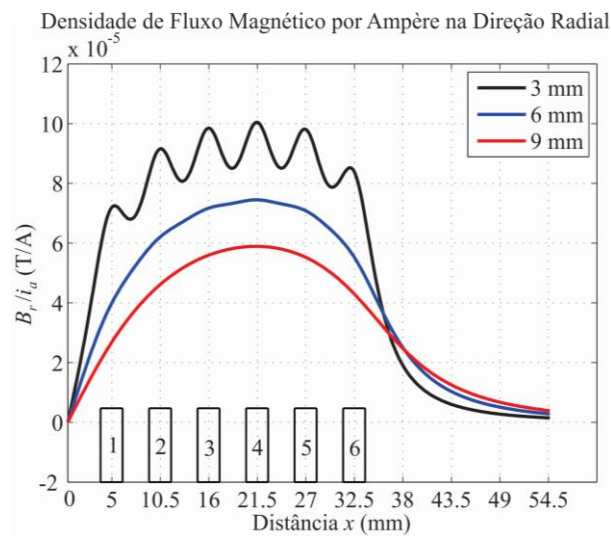


Figura 54 Componente radial da densidade de fluxo magnético por ampère (T/A) para diferentes distâncias entre a bobina atuadora e a chapa metálica.

4.3 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE DESCARGA

Para validar o método de cálculo da força de origem eletromagnética, a qual será usada como um dos parâmetros de entrada do problema mecânico, alguns experimentos de

livre abaulamento ou com chapa fixa e sem a mesma acoplada foram realizados com discos de alumínio A1050, medindo-se a corrente de descarga (i_a).

A máquina de conformação eletromagnética SMU1500 possui uma conexão para medição da corrente de descarga, com a especificação mostrada na Tabela 5. A Figura 55 mostra uma comparação da corrente de descarga (i_a) calculada e experimental e a maior induzida (i_{44}) correspondente ao anel com raio $r=22,25$ mm na discretização da chapa metálica, para uma energia de $U=500$ J. Um comportamento RLC subamortecido do processo de descarga é observado, ou seja, a corrente oscila e decresce sua amplitude de oscilação exponencialmente, sendo que a taxa de decréscimo é imposta pelo valor do coeficiente de amortecimento (frequência de Neper), e é também claro que o acoplamento entre chapa e bobina atuadora altera a impedância do RLC acoplado. Além disso, constata-se que a corrente de descarga, com a chapa metálica deformando tem picos mais baixos do que o caso onde a chapa é acoplada, mas é mantida fixa impedindo a deformação da mesma, mas esta tendência muda após o terceiro pico positivo da corrente de descarga. Esta mudança ocorre porque como a chapa metálica se deforma, e se afasta da bobina de atuadora diminuindo o acoplamento eletromagnético, e, portanto a corrente de descarga tende a diminuir coeficiente de amortecimento. Da mesma forma, isso explica um menor coeficiente de amortecimento da corrente de descarga para o caso onde não há chapa metálica acoplada. O mais importante é verificar que a corrente de descarga calculada correlaciona-se razoavelmente bem com a corrente de descarga medida até o primeiro período, tanto para chapa metálica deformando, ou para o caso de chapa fixa (sem deformar), indicando que as simplificações propostas neste modelo numérico são consistentes, pois como será mostrado mais adiante na simulação mecânica, a chapa inicia a sua deformação efetivamente num tempo maior que um período da corrente de descarga, quando esta inicia sua deformação efetiva e continua por efeitos da inércia por um período muito maior que o tempo de descarga da corrente elétrica na espira

atuadora. Além disso, a pressão gerada pela força de origem eletromagnética é muito menor devido ao afastamento da chapa metálica, causando um baixo acoplamento. Na legenda da Figura 55 as duas primeiras curvas se referem aos valores calculados pelo modelo proposto para corrente de descarga e maior induzida respectivamente, sendo as seguintes referentes às medições experimentais da corrente de descarga com chapa metálica deformando, fixa sem poder deformar e sem a mesma acoplada, respectivamente.

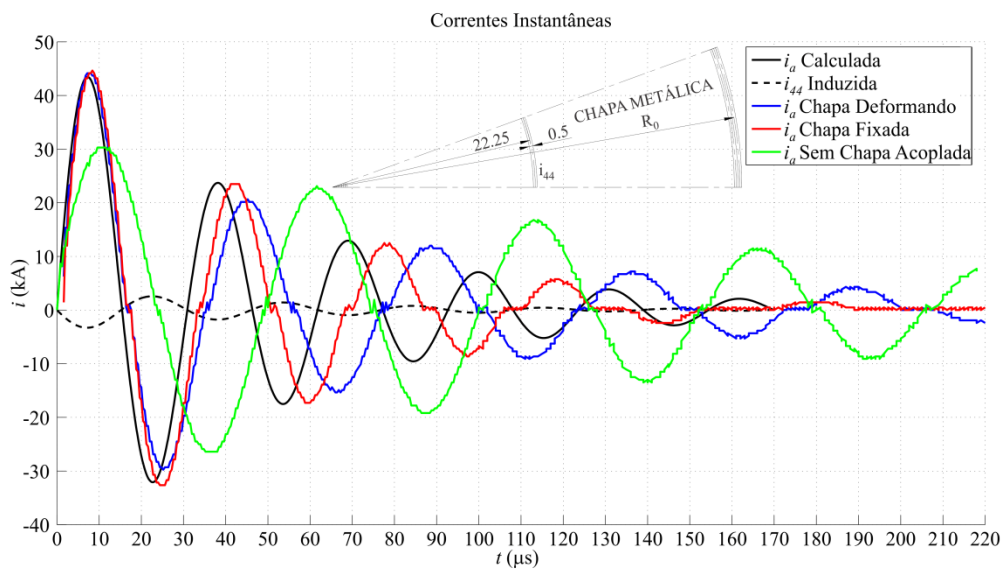


Figura 55 Corrente de descarga na bobina atuadora (i_a) e maior induzida no anel 44 (i_{44}) da discretização da chapa metálica, correspondente a um raio do anel ($r=22,25$ mm) juntamente com as medições experimentais para uma energia de $U=500$ J.

Em contraste a outros trabalhos, este método numérico proposto não utiliza uma função ou medição experimental da corrente de descarga, a qual neste método é determinada pela solução das equações diferenciais ordinárias (EDOs) da equação (50). O coeficiente de amortecimento e a frequência de ressonância não são calculadas, mas estas dependem da resistência e indutância equivalentes dos circuitos secundários transmitidas, ou refletidas, para o circuito primário do sistema EMF acoplado. Estas parcelas adicionam-se à resistência e indutância do circuito primário (RLC) e alteram a curva da corrente de descarga, quando a chapa metálica é acoplada ao sistema de EMF.

As diferenças entre corrente de descarga medida com chapa deformando e calculada pode ser explicada pelas simplificações do modelo, o qual considera apenas a resistência e indutância equivalentes do circuito primário antes da deformação da chapa metálica acoplada. Estas são compostas pela resistência e indutância do circuito primário RLC e resistências e indutâncias dos circuitos secundários da Figura 39, vistas pelo circuito primário. Já as diferenças entre corrente de descarga experimental com chapa fixa e calculada pelo modelo podem ser explicadas pelas simplificações feitas em relação à geometria real do problema, mas mesmo assim os picos possuem uma boa correlação até o instante em que a força de origem eletromagnética é importante para o processo.

A diferença de fase ideal entre a corrente de descarga e induzidas para se obter uma maior força de origem eletromagnética de repulsão deve ser igual a 180° , isto é, as correntes induzidas na chapa metálica devem estar defasadas da corrente de descarga da bobina atuadora por um ângulo de 180° . No entanto isso nem sempre acontece, como é o caso mostrado na Figura 56(b), onde devido às especificações do sistema EMF analisado (PAESE, E et al., 2014) o atraso das correntes induzidas está distante da condição ideal, e isso pode causar uma força de atração (negativa) após a força de repulsão (positiva). Já para o caso da máquina SMU1500 a defasagem é ideal e a força de origem eletromagnética é sempre de repulsão (positiva), conforme mostrado na Figura 56(a).

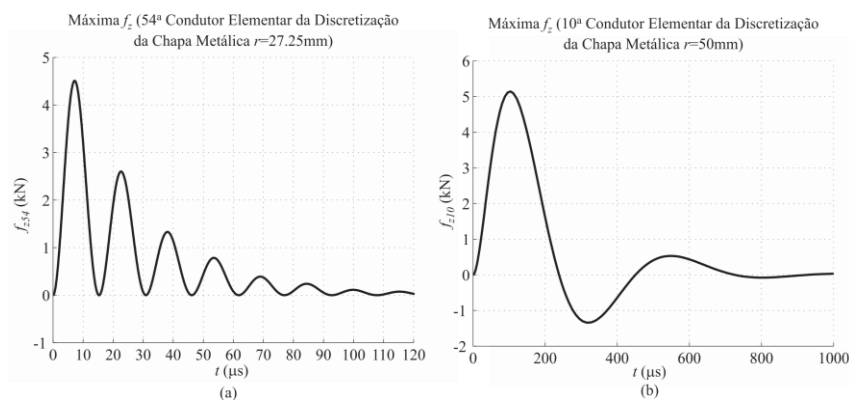


Figura 56 Força eletromagnética máxima: (a) força gerada pela SMU1500 para uma energia de $U=1$ kJ; (b) força gerada pelo sistema EMF analisado por (PAESE et al., 2014) para uma energia de $U=3,4$ kJ

A Figura 57 mostra a profundidade pelicular (curva vermelha) versus frequência das correntes induzidas nos condutores circulares elementares da discretização da chapa metálica, e a máxima força eletromagnética na chapa metálica (curva verde) para uma energia constante de 3,4 kJ, ou seja, C varia de $100 \mu\text{F}$ até $8600 \mu\text{F}$ variando-se o potencial elétrico para manter constante a energia. As frequências das correntes induzidas são obtidas a partir da equação (50) usando-se técnicas numéricas a partir dos gráficos das correntes induzidas em função do tempo. Nota-se que o desempenho do processo EMF está relacionado com a frequência da corrente de descarga e a melhor eficiência é observada para baixas capacitâncias e alta tensão. Esta combinação gera uma corrente de descarga com maior frequência e, conseqüentemente, uma maior força de origem eletromagnética é gerada pelo processo EMF e está também relacionada com a profundidade pelicular que tem valores mais baixos para frequências mais altas. A condição ideal é quando a totalidade da densidade de fluxo magnético, que penetra na chapa metálica é protegida pelas correntes induzidas (efeito pelicular), isto é, a profundidade pelicular deve ser tão próxima quanto possível da espessura da chapa metálica. Se a frequência f é extremamente elevada, a profundidade pelicular será menor que a espessura da chapa metálica limitando a profundidade de penetração das correntes induzidas e conseqüentemente diminuindo o desempenho do processo EMF causando um efeito de aquecimento na chapa metálica ao invés de deformação na mesma.

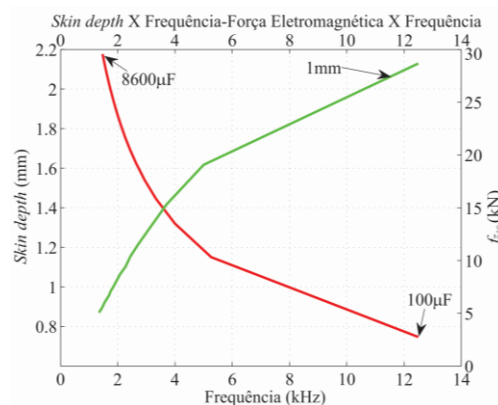


Figura 57 Profundidade pelicular (*skin depth*) calculada versus frequência das correntes induzidas e máxima força eletromagnética obtida, para uma energia constante de $U=3,4$ kJ (PAESE et al., 2014).

4.4 MAGNITUDE DA CARGA DE ORIGEM ELETROMAGNÉTICA AO LONGO DE UMA LINHA

A Figura 58 mostra a distribuição da magnitude da carga de origem eletromagnética por unidade de comprimento para vários instantes de tempo da corrente de descarga, sendo esta igual em toda a extensão circular dos anéis da discretização da chapa metálica e calculada pela equação .

$$P_{zi} = \frac{f_{zi}}{(x_{i+1} - x_i)} \quad (84)$$

onde:

f_{zi} é a força de origem eletromagnética no i -ésimo condutor circular i da discretização da chapa metálica;

$(x_{i+1} - x_i)$ é o comprimento na direção do eixo x de cada condutor circular da chapa metálica discretizada (tamanho do elemento da malha).

Os maiores valores ocorrem onde existem espiras da bobina atuadora e os menores ocorrem entre as espiras da mesma. Isso mostra a correlação com a densidade de fluxo magnético na direção radial mostrada na Figura 54, a qual é utilizada no cálculo da força axial. Pode-se verificar também que uma melhor distribuição da carga é possível para espiras atuadoras com pequenos passos, mas isso enfraquece a matriz onde a mesma é encaixada para possuir rigidez durante a conformação da chapa metálica, e a deformação plástica da chapa metálica inicia fora do centro onde a força de origem eletromagnética é igual a zero, sendo a parte central deformada por inércia. A Figura 58 inclui os perfis da magnitude da carga para alguns instantes iniciais, máximo e para os outros picos de força mostrados na Figura 56(a). Os perfis da magnitude da carga de origem eletromagnética da Figura 58 são o principal dado de entrada do problema mecânico, sendo que estes são programados no *software Abaqus/Explicit* através da subrotina VDLOAD, gerando curvas da magnitude da carga versus tempo e posição sobre a chapa metálica.

Pode-se também verificar na Figura 58 que a magnitude da carga de origem eletromagnética é proporcional a energia armazenada no banco de capacitores (U). Esta conclusão mostra que a energia que é transformada em deformação da chapa metálica é dependente das características da máquina de EMF, tais como capacitância, indutância, resistência elétrica e tensão, os quais alteram a curva de descarga da corrente elétrica e independe da energia armazenada, assim o rendimento da máquina parece ser igual para todas as energias disponíveis na SMU1500.

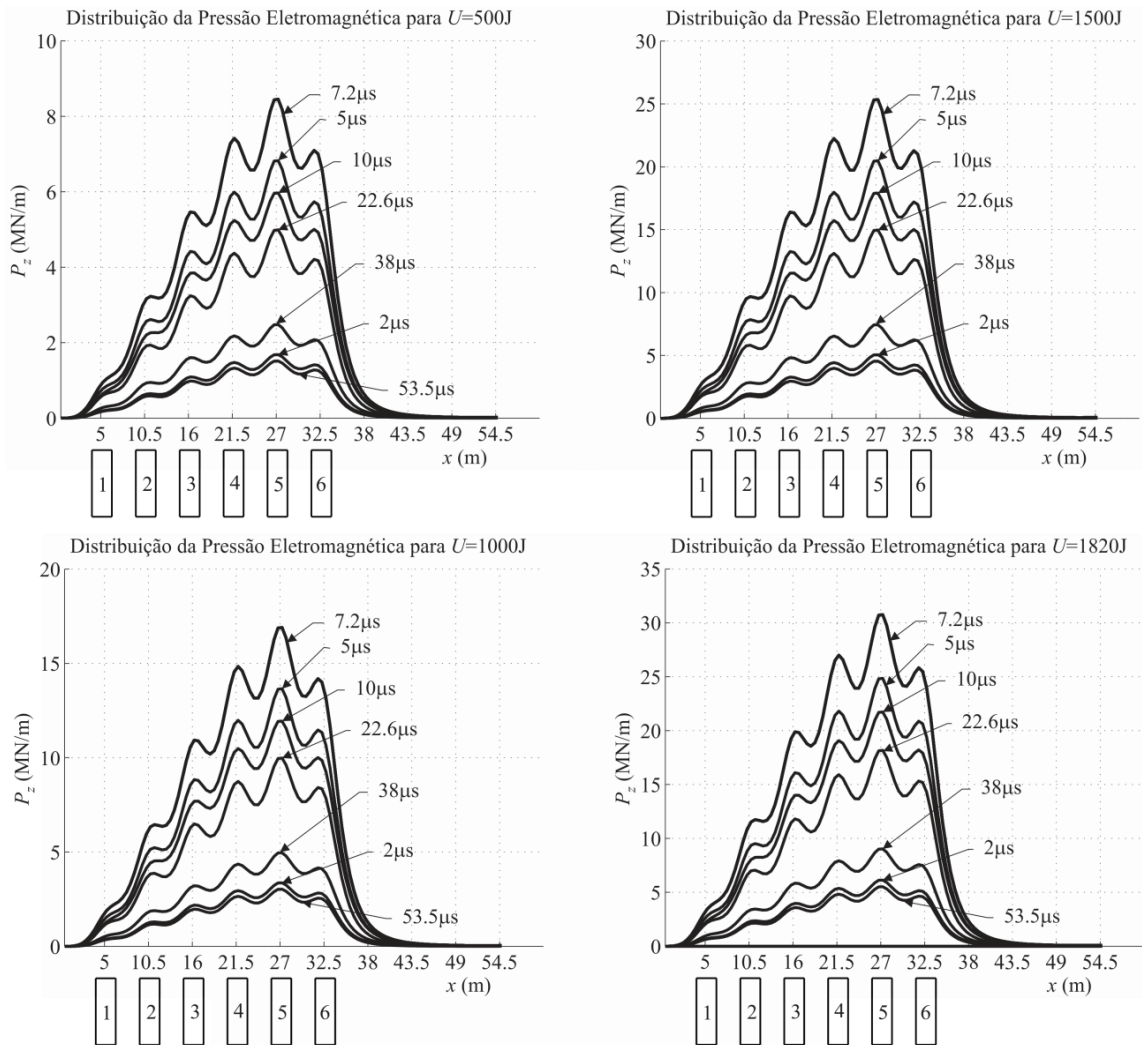


Figura 58 Perfis da magnitude da carga de origem eletromagnética por unidade de comprimento para vários instantes de tempo da corrente de descarga, sendo incluso o perfil para o instante de máxima corrente de descarga ($t=7,2\ \mu\text{s}$).

4.5 COMPARAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO COM E SEM CHAPA ACOPLADA

A Figura 59 mostra a distribuição da densidade de fluxo magnético calculado na distância referente à superfície da chapa metálica. Quando a chapa metálica é acoplada a bobina atuadora, a componente radial da densidade de fluxo magnético aumenta significativamente e a componente axial diminui. Isso concorda com os resultados apresentados por (TAKATSU et al., 1988).

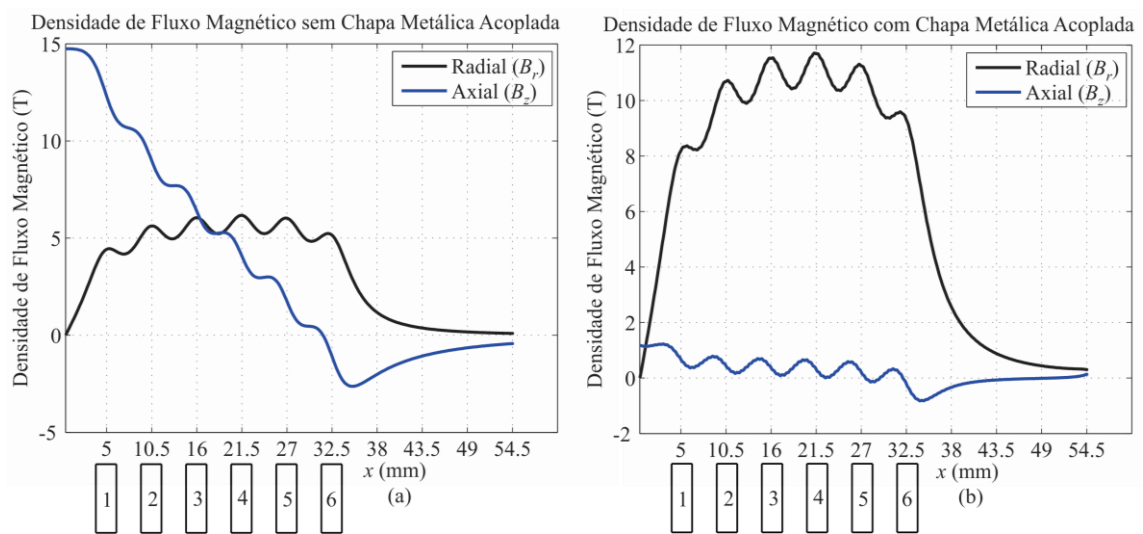


Figura 59 Densidade de fluxo magnético calculado para energia de $U=1000$ J para o instante de máxima corrente de descarga ($t=7,2 \mu s$): (a) sem chapa metálica acoplada; (b) com chapa metálica acoplada.

A componente radial é obtida pela equação (79) já a componente axial é dada pela equação (85).

$$B_{z(b,c)i} = - \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{B_{zi}}{i_{\theta i}} \right) i_{\theta i} \right) + \left(\frac{B_z}{i_a} \right) i_a \quad (85)$$

onde:

$B_{z(b,c)i}$ é a densidade de fluxo magnético produzido pela bobina atuadora e chapa metálica acoplada na direção axial;

(B_z/i_a) é a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela espira atuadora na direção axial;

$(B_{zi}/i_{\theta i})$ é a razão da densidade de fluxo magnético por ampère gerado pela enésima espira i da discretização da chapa metálica na direção axial;

$i_{\theta i}$ é a corrente induzida no enésimo anel i da chapa metálica discretizada;

i_a é a corrente de descarga na bobina atuadora.

A Figura 60 mostra a densidade de fluxo magnético na direção radial, sendo que os pontos representam os valores experimentais obtidos usando-se bobinas exploratórias, juntamente com o calculado (linha cheia). Cabe ressaltar que os sensores foram construídos manualmente sendo que as diferenças entre os valores medidos e experimentais mostrados na Figura 60 são toleráveis para este tipo de medição devido às dificuldades para se construir este tipo de sensor com precisão quanto à geometria do mesmo (área interna da bobina exploratória) bem como dificuldades no seu posicionamento na bobina atuadora como já foi exposto por (BENDJIMA, 1997) durante sua medição usando também bobinas exploratórias. A medição foi realizada com baixa energia ($U=320$ J), visto que o uso de tensões elevadas poderia danificar as bobinas exploratórias.

Pode-se perceber que densidade de fluxo magnético gerado com a chapa metálica acoplada é maior que o caso sem a mesma acoplada. Esta é uma das grandes vantagens do modelo proposto neste trabalho. Este pode perceber as resistências e indutâncias refletidas ou transmitidas dos circuitos secundários (RLs) para o circuito primário RLC, quando a chapa metálica é acoplada ao sistema ou há uma mudança na espessura da mesma. Isso é feito pelo modelo desenvolvido sem a necessidade da curva da corrente de descarga como dado de entrada, como acontece em outros trabalhos similares já publicados.

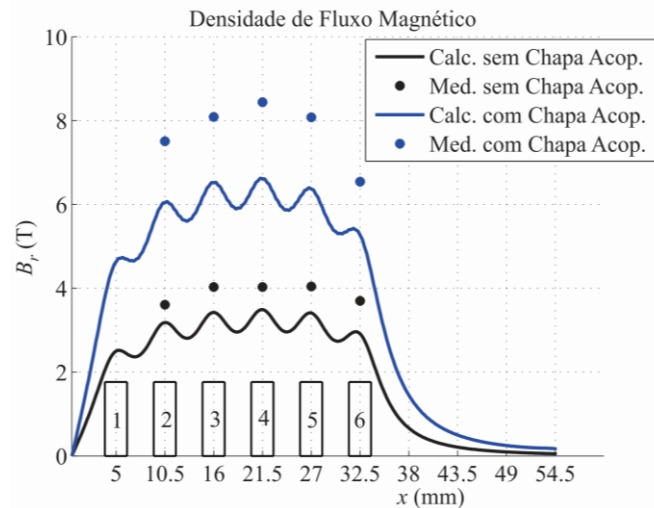


Figura 60 Densidade de Fluxo Magnético na Direção Radial Calculado e Experimental com e sem Chapa Metálica Acoplada para Energia $U=320$ J para o instante de máxima corrente de descarga ($t=7,2 \mu\text{s}$).

4.6 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE DEFORMAÇÃO DA CHAPA METÁLICA ACOPLADA

A Figura 61 mostra as medições feitas no IST para energias de $U=500, 700, 1000$ e 1500 J, usando-se o dispositivo mostrado na Figura 50. Pode-se perceber a diferença no tempo de desligamento dos sensores, o qual é maior para menores energias o que resulta em velocidade média menor durante a deformação da chapa metálica, mais ainda, pode-se verificar que a velocidade média é maior no início e esta vai diminuindo com a evolução da deformação. Esta técnica só permite o cálculo da velocidade média da chapa.

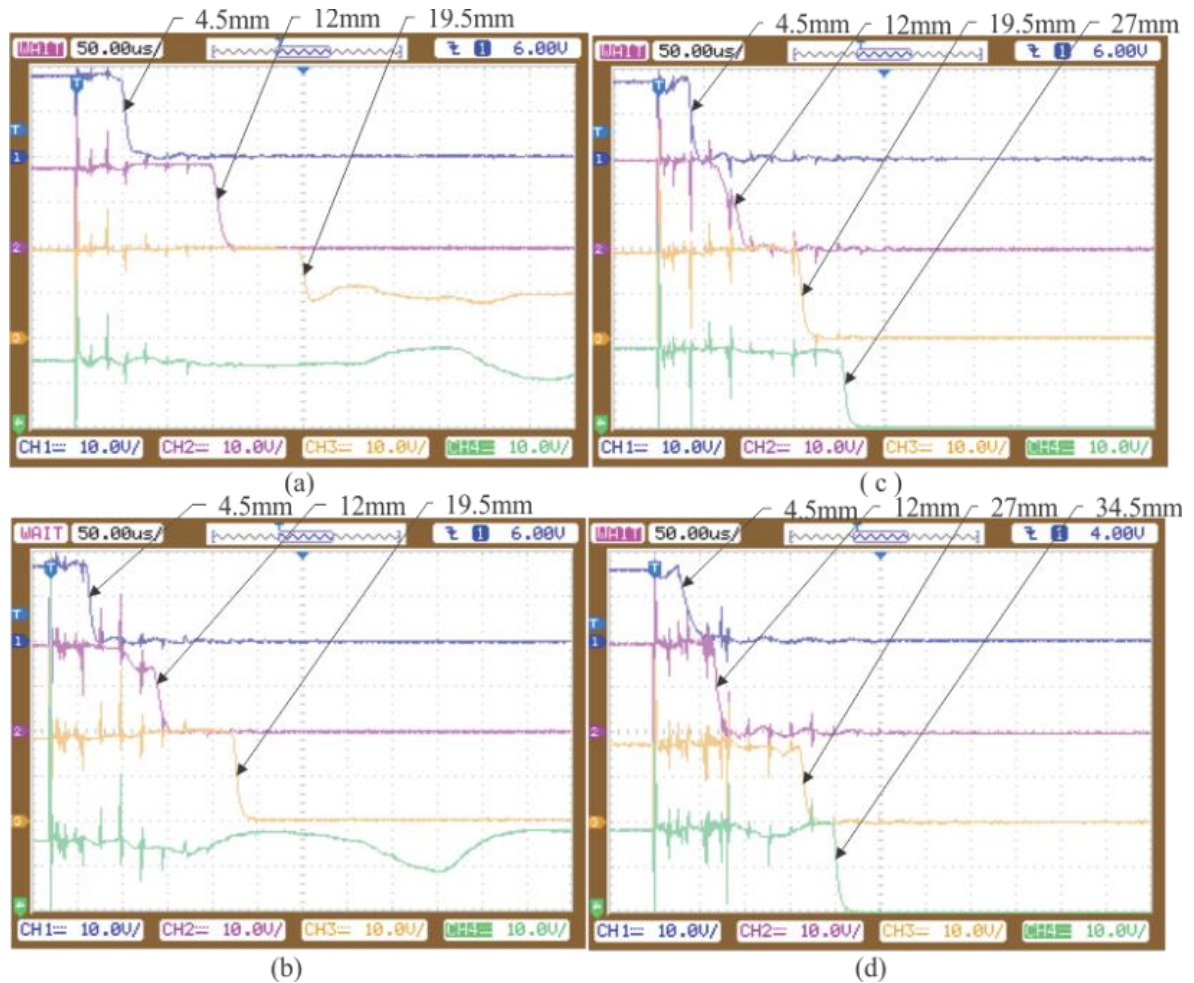


Figura 61 Tempos de Deformação da Chapa Metálica para energias: (a) $U=500$ J; (b) $U=700$ J; (c) $U=1000$ J; (d) $U=1500$ J.

A Figura 62 mostra a velocidade e deslocamento instantâneos da chapa metálica, obtida da simulação no *software Abaqus/Explicit* para duas posições da mesma em função do tempo. Pode-se verificar que o centro da chapa não se movimenta inicialmente concordando com os resultados da Figura 58 que mostram que a carga é zero no centro, já para a posição onde a pressão é máxima a velocidade aumenta muito rápido inicialmente. A curva de velocidade poderia ser obtida derivando-se o deslocamento, sendo que para os casos abaixo esta técnica foi realizada a fim de comprovar os resultados obtidos para velocidade, além disso, as discontinuidades das curvas de velocidade são devido ao intervalo de tempo em que o cálculo da mesma é realizado pelo *software Abaqus/Explicit* não ser constante.

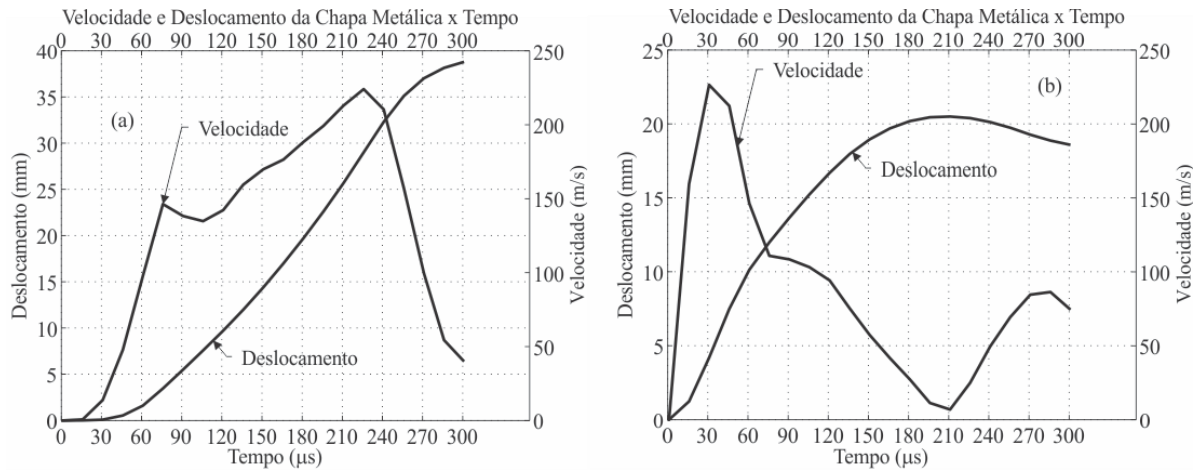


Figura 62 Velocidade e posições instantâneas da chapa metálica para dois locais e energia $U=1500$ J: (a) posição $x=0$ (centro da chapa metálica ou posição onde a força de origem eletromagnética é igual a zero); (b) posição $x=27,25$ mm (posição onde a força origem eletromagnética é máxima).

4.7 PERFIS DA CHAPA METÁLICA DEFORMADA PARA VÁRIOS INSTANTES DE TEMPO

O *software Abaqus/Explicit* foi utilizado na simulação do problema mecânico, conforme fluxograma da Figura 38, sendo o principal dado de entrada do problema mecânico a carga de origem eletromagnética por unidade de comprimento obtida pelo método numérico de solução do problema eletromagnético proposto neste trabalho. As coordenadas geométricas atualizadas da chapa metálica deformada em diferentes instantes de tempo previstas pelo *Abaqus/Explicit* são mostradas na Figura 63. Pode-se observar que a maior parte da deformação da chapa metálica ocorre devido à inércia, pois o pico da carga de origem eletromagnética ocorre no instante de $7,2 \mu\text{s}$ (Figura 56a) e a deformação inicia em aproximadamente em $15 \mu\text{s}$. Ainda mais não há carga no centro da chapa metálica como mostrado na Figura 58 e toda a deformação desta região ocorre devido à inércia em um tempo muito maior que o pico da corrente de descarga. Estes resultados concordam com os apresentados por (SIDDIQI, 2009; WANG et al., 2006).

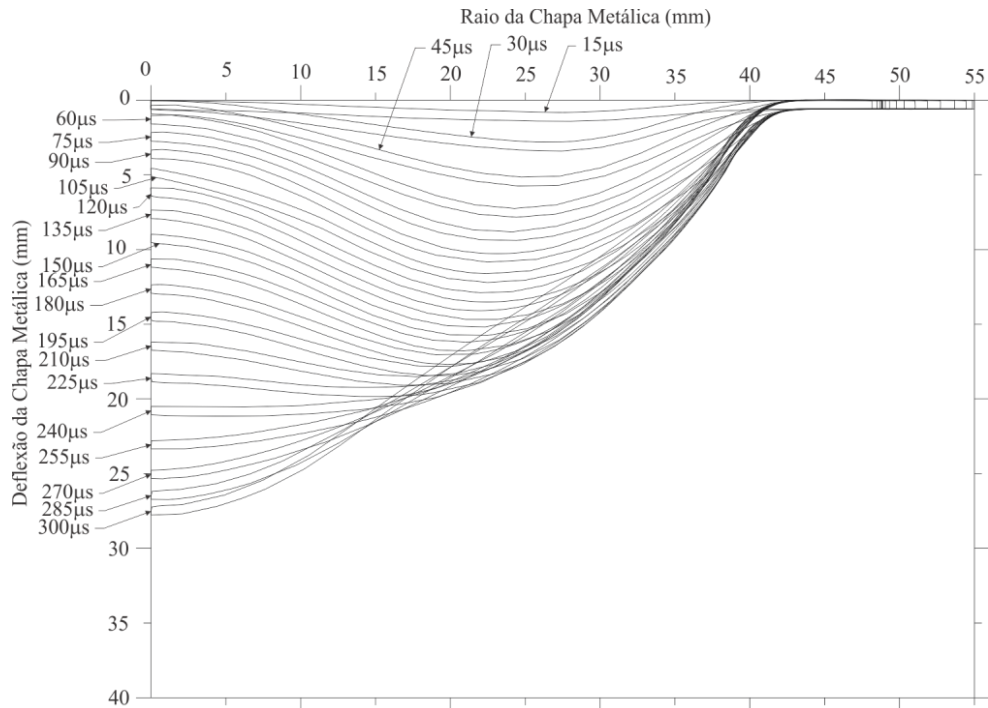


Figura 63 Previsões obtidas do *Abaqus/Explicit* da geometria deformada da chapa metálica (espessura de 1 mm) em diferentes instantes de tempo para energia $U=1000$ J.

A Figura 64 mostra uma comparação da geometria obtida da simulação no *software Abaqus/Explicit* e a obtida experimentalmente na SMU1500. A geometria experimental foi obtida através do corte central da chapa metálica deformada e posterior digitalização da mesma. Pode-se verificar que uma correlação razoável entre a geometria experimental e a simulada, sendo que as diferenças podem ser explicadas devido às simplificações adotadas na solução do problema eletromagnético e mecânico. Outro motivo para as diferenças se deve ao fato da chapa se movimentar entre a matriz e sujeitador e o atrito entre a chapa metálica, sujeitador e matriz ser um fator determinante no resultado final da deformação. O fator de atrito utilizado nas simulações foi o mesmo para todas as energias de descarga, mas como a chapa se movimenta este valor induz erros na simulação, pois o comportamento do contato é diferente para cada energia utilizada. A ferramenta utilizada neste trabalho foi construída no início deste trabalho, com a experiência já adquirida pelo grupo de pesquisa antes do período de sanduíche no IST, sendo que este problema não foi levado em consideração devido a este

processo ser relativamente novo até mesmo no âmbito acadêmico, não sendo possível realizar a fixação da chapa metálica entre a matriz e sujeitador devido a limitações técnicas da ferramenta já construída antes do sanduíche. Em futuros trabalhos este deve ser um parâmetro importante no projeto da ferramenta, garantido que a chapa metálica não deslize entre a matriz e sujeitador, melhorando o resultado da simulação e comparações com resultados experimentais.

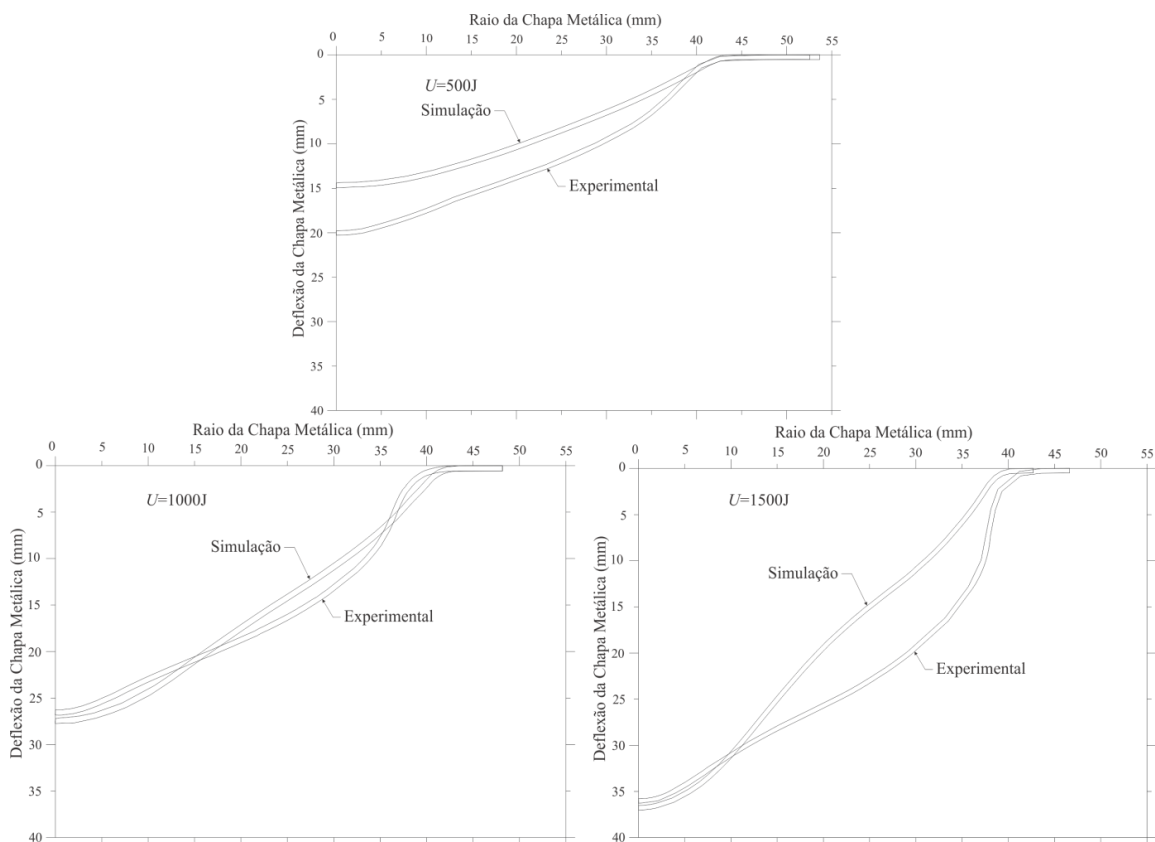


Figura 64 Geometria deformada experimental e simulação da chapa metálica deformada (espessura de 1 mm) para energias de $U=500$, 1000 e 1500 J.

A Figura 65 mostra a chapa metálica deformada com energia $U=1820$ J, a qual bate no fundo matriz que possui profundidade de 40 mm e assim o centro não é deformado, pois quando a mesma bate na parte inferior da matriz esta é amortecida e faz com que parte da energia cinética faça o centro que depende de inércia retorne e não atinja o fundo da matriz, como mostrado na Figura 65, a qual mostra a geometria deformada experimentalmente e

simulada no *software Abaqus/Explicit*. Para esta energia a corrente de descarga atinge um pico de 80 kA.

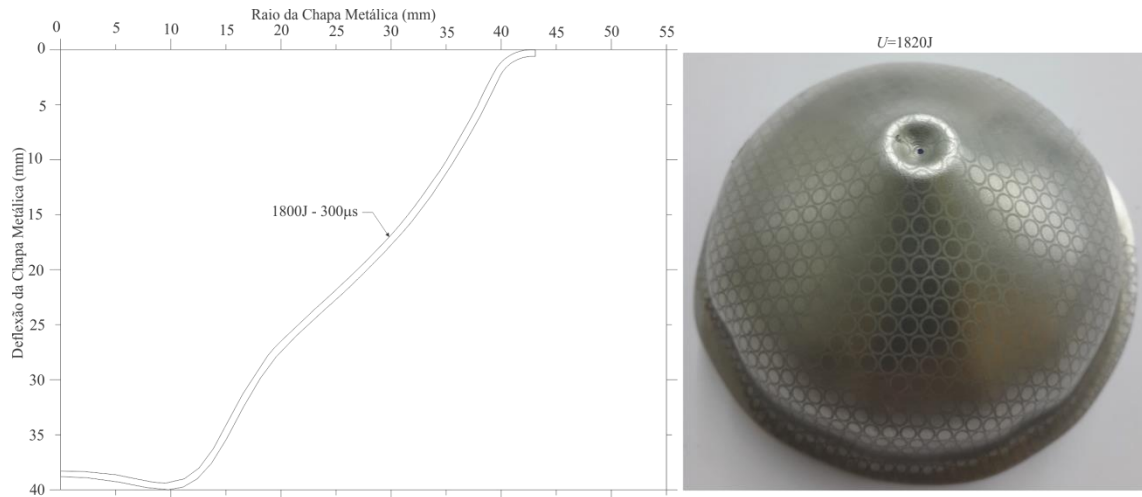


Figura 65 Geometria simulada e experimental da chapa metálica deformada (espessura de 1 mm) para energia $U=1820$ J.

A Figura 66 mostra os resultados experimentais da deformação da chapa metálica (A1050 com espessura de 1 mm) para diferentes energias (U). Note-se que as deformações das chapas metálicas não são uniformes, sendo que isso se deve a distribuição de força de origem eletromagnética não ser constante ao longo do raio da mesma, como a força é igual a zero no centro da mesma a deformação inicia na posição onde a força é maior (Figura 63) e o centro é deformado por forças de inércia devido ao rápido pulso da carga por unidade de comprimento de origem eletromagnética. Na Figura 66 as chapas metálicas são deformadas livremente e pode-se verificar que todas possuem o mesmo perfil de deformação, sendo que maiores energias causam uma maior altura final. Os círculos foram quimicamente gravados nas chapas para uma futura verificação dos limites de deformação e comparação das deformações experimentais com as obtidas por simulação no *software Abaqus/Explicit*.

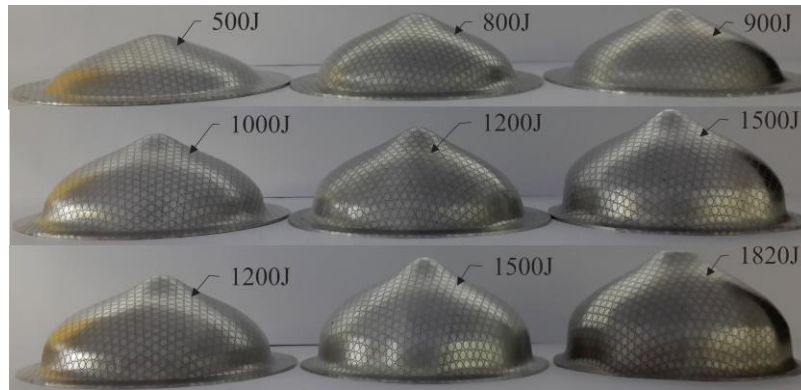


Figura 66 Geometrias experimentais deformadas livremente da chapa metálica para diversas energias (U).

A Figura 67 mostra a corrente de descarga e maior induzida para energias $U=1000$ e 1500 J, sendo que pode-se verificar que as medições experimentais e calculadas possuem uma correlação razoável para o primeiro período, sendo este intervalo de tempo importante para o cálculo da carga por unidade de comprimento de origem eletromagnética, pois após este tempo a inércia rege a deformação plástica da chapa metálica. As diferenças entre experimental e calculado após o primeiro período se deve ao afastamento da chapa metálica devido à deformação da mesma e assim a curva da corrente de descarga se aproxima ao caso em que a chapa não é acoplada, como mostrado na Figura 55.

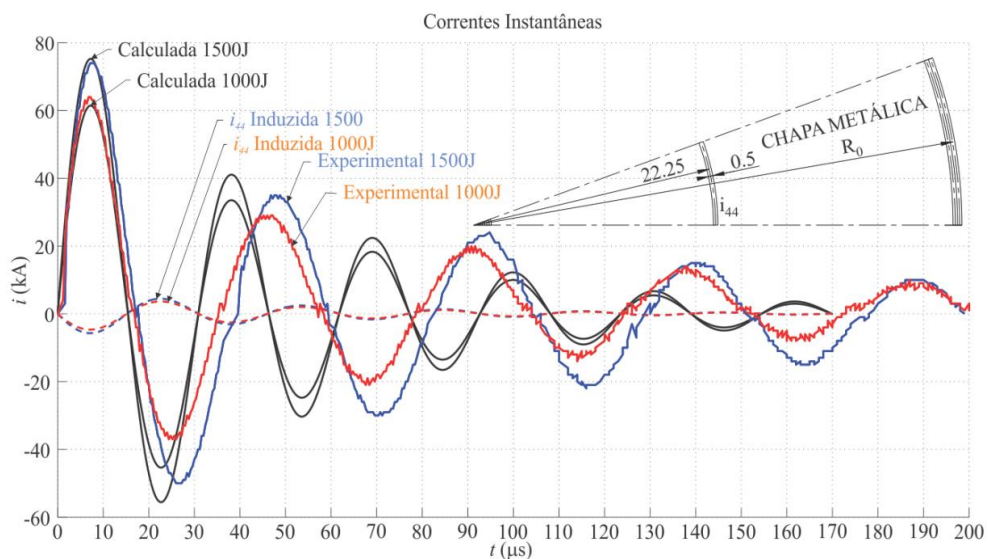


Figura 67 Corrente de descarga na bobina atuadora (i_a) e maior induzida no anel $n=44$ (i_{44}) da discretização da chapa metálica, correspondente a um raio do anel ($r=22,25$ mm) juntamente com as respectivas medições experimentais para energias de $U=1000$ e 1500 J.

Neste capítulo, ferramentas numéricas foram usadas para a previsão dos efeitos de vários parâmetros do processo EMF. Os resultados obtidos são relativamente satisfatórios quanto à comparação com as experiências realizadas, e esta proposta de análise pode ser utilizada no projeto de ferramentas ou máquinas de EMF. Esta também pode contribuir para o entendimento do processo e para a sua implementação na indústria. As previsões que foram apresentadas permitem demonstrar como os parâmetros do processo EMF interferem na energia que é transformada em deformação efetiva da chapa metálica. Isso também pode contribuir na divulgação deste processo na indústria.

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi desenvolvida uma análise numérica inovadora do problema eletromagnético de processos de EMF de chapas planas e finas, utilizando bobina atuadora espiral plana. Este método é totalmente acoplado elétrico-magnético e utiliza fraco acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos, o qual pode fornecer resultados precisos com pouco custo computacional. Este estudo é resultado da continuidade da Dissertação de Mestrado (PAESE, 2010), a qual verificou a viabilidade técnica para utilização industrial deste processo de conformação. Esta análise do processo EMF fornece uma base de dados que possibilita auxílio no projeto de ferramentas ou máquinas de EMF.

A partir da revisão da bibliografia, foram introduzidos conceitos básicos sobre a modelagem deste processo, destacando as formas de análise do mesmo: totalmente desacoplado, fracamente acoplado e forte acoplamento entre os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos. Neste trabalho optou-se pela análise com fraco acoplamento, visto que o modelo simplificado totalmente desacoplado já produz resultados relativamente precisos (PAESE et al., 2011). Com esta nova análise será possível verificar o quanto a inércia é importante na deformação da chapa metálica e realizar uma melhor validação do modelo eletromagnético proposto.

O método usado neste trabalho apresenta uma metodologia numérica de análise do processo EMF em contraste com outros já apresentados (AL-HASSANI, 1975; MERICHED, 2000; SIDDIQUI, 2009; TAKATSU et al., 1988; XU et al., 2010) os quais são dependentes da curva da corrente de descarga, como dado de entrada. Neste método proposto os parâmetros são numericamente calculados determinando as resistências e indutâncias que são refletidas ou transmitidas ao circuito primário de descarga quando uma chapa metálica a ser deformada é acoplada ao sistema EMF ou até mesmo quando a espessura da mesma é alterada, apenas devido à estratégia de solução adotada. Neste trabalho as indutâncias próprias

e mútuas são numericamente calculadas e estas são responsáveis pelo acoplamento eletromagnético entre a bobina atuadora e a chapa metálica. Assim, a corrente de descarga (bobina atuadora) e induzidas (chapa metálica) são numericamente calculadas na solução do sistema acoplado de equações diferenciais ordinárias (ODE). O método apresentado neste trabalho é capaz de prever o comportamento eletromagnético da máquina de EMF antes desta ser construída, sendo uma importante ferramenta de auxílio ao projeto da mesma.

Os cálculos das indutâncias próprias e mútuas foram verificados pela comparação da corrente de descarga calculada e experimental, as quais mostraram boa correlação durante o primeiro período da curva de descarga para os casos de chapa fixa ou deformando, sendo que após este tempo a deformação da chapa metálica continua, mas devido à inércia.

O método proposto demonstra para diferentes instantes e posições como os parâmetros da máquina e ferramenta de conformação eletromagnética, tais como capacitâncias, resistências e indutâncias, as quais dependem da geometria e propriedades da bobina atuadora e da chapa metálica influenciam na força de origem eletromagnética.

A simulação da deformação da chapa metálica obtida no *software Abaqus/Explicit* mostrou boa correlação em comparação com experimentos de livre abaulamento, o que indica que as simplificações assumidas são efetivas. Este método contribui também para uma melhor compreensão da física envolvida no processo de EMF e também fornece recomendações para o projeto de bobinas atuadoras adequadas para produzir distribuições de carga por unidade de comprimento específica, e também sobre a eficiência da unidade de pulso. Demonstrou-se que as unidades de pulso com baixa capacitância e alta tensão são mais eficientes na transmissão das forças de origem eletromagnética.

Como resultado deste trabalho, juntamente com as variáveis que são usadas na validação do modelo, tem-se:

- Projeto e fabricação de uma ferramenta para conformação eletromagnética de chapas metálicas planas e finas, a qual foi utilizada na validação do modelo de análise proposto neste trabalho;
- Um método de análise inovador de problemas de EMF aplicado a chapas, mas que pode ser expandido para compressão e expansão de tubos, desde que sejam problemas axialmente simétricos;
- Previsão da corrente de descarga e induzidas na chapa metálica, sendo que a primeira foi comparada com a adquirida experimentalmente, possuindo boa correlação;
- Previsão da densidade de fluxo magnético com ou sem chapa metálica acoplada, sendo que a componente na direção radial (B_r) foi mensurada experimentalmente usando-se bobina exploratória, apresentando uma boa correlação com o calculado por este método;
- Previsão da carga por unidade de comprimento de origem eletromagnética, a qual é o principal dado de entrada do problema mecânico;
- Medição experimental da velocidade média de deformação da chapa metálica, a qual fornece informações sobre o passo de atualização da carga por unidade de comprimento na análise do problema mecânico e tempo total de simulação no *software Abaqus/Explicit*;
- Comparação da geometria deformada experimentalmente com a obtida na simulação numérica no *software Abaqus/Explicit*, as quais mostraram uma boa correlação;
- A carga por unidade de comprimento de origem eletromagnética, a qual mostrou ser proporcional a energia armazenada no banco de capacitores (U), o que mostra que a quantidade da energia que é transformada em deformação mecânica é

sempre igual para qualquer energia e depende apenas da configuração da máquina de EMF e da geometria da ferramenta e chapa metálica a ser deformada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar qual é o rendimento do processo de conformação eletromagnética, ou seja, verificar qual é a parcela de energia armazenada no banco de capacitores que é transformada em deformação mecânica na chapa metálica;
- Programar o código desenvolvido no *software Matlab* em linguagem *Fortran*, usada na programação da VDLOAD, assim a solução poderia ser obtida somente com o uso do *software Abaqus/Explicit* além da possibilidade de atualização da geometria a cada instante de cálculo;
- Verificar se este processo pode realmente incrementar a conformabilidade efetiva do alumínio A1050, como é já mencionado em literatura e qual é o aumento desta conformabilidade em relação aos métodos convencionais de conformação. Os círculos gravados quimicamente nas chapas metálicas deformadas seriam usados para determinar as deformações experimentais para comparação com diagrama limite de conformação;
- Verificar a influência da alta corrente induzida na chapa metálica durante sua deformação na caracterização do material, o que poderia também explicar as diferenças entre os dados experimentais e simulações;
- Construção de uma nova ferramenta que não possibilite a movimentação da chapa metálica entre a matriz e o sujeitador durante a deformação da mesma, assim as comparações entre deformação experimental e simulação poderia ser melhorada, eliminando-se esta variável do processo. Além disso, a correlação entre os dados experimentais e simulados poderia ser melhorada.

REFERÊNCIAS

- AL-HASSANI, S. Magnetic pressure distributions in sheet metal forming. In: CONFERENCE ON ELECTRICAL METHODS OF MACHINING, FORMING AND COATING, 1975, Manchester. **Proceedings...** Manchester: Manchester Institute of Science and Technology, 1975. p. 1–10.
- BALDAN, C. A. et al. Fast Single Layer Cylindrical and Helicoidal Coil With Voids Between Turns Electromagnetic Field Calculation to Be Used in Superconducting Current Limiter Simulator for Design Purpose. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, New York, v. 14, n. 2, p. 823–826, Jun. 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1324919>>. Acesso em: 03 Jun. 2009.
- BELYY, L. V.; FERTIK, S. M.; KHIMENKO, L. T. **Electromagnetic Metal Forming Handbook**. A TRANSLAT ed. Columbus, Ohio: Department of Materials Science and Engineering - Ohio State University, 1977.
- BENDJIMA, B.; SRAIRI, K.; FELIACHI, M. A coupling model for analysing dynamical behaviours of an electromagnetic forming system. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 33, n. 2, p. 1638–1641, Mar. 1997. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=582584>>. Acesso em: 30 Aug. 2012.
- CONRAUX, P. et al. 3D finite element modeling of electromagnetic forming process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED FORMING (ICHSF), 2., 2006, Dortmund. **Proceedings...** Dortmund: Institut für Umformtechnik, 2006. p. 73–82.
- CORREIA, J. P. M. et al. A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process. **International Journal of Mechanical Sciences**, Aberdeen, v. 50, n. 10-11, p. 1466–1475, Sept. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740308001355>>. Acesso em: 18 May 2012.
- DEHRA, M. S. **High Velocity Formability and Factors Affecting it**. 2006. 314 p. Dissertation (Graduate Program in Materials Science and Engineering) – The Ohio State University, Columbus, 2006.
- DWIGHT, H. R. **Tables of Integrals and Other Mathematical Data**. 3rd. ed. New York: The Macmillan Company, 1957.
- EDMINISTER, J. A. **Teoria e Problemas de Eletromagnetismo**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2006.

EPLATTENIER, P. L. et al. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations. In: INTERNATIONAL LS-DYNA USERS CONFERENCE, 9., 2009, Livermore. **Proceedings...** Columbus: The Ohio State University, 2009. p.1–8.

FENTON, G. K.; DAEHN, G. S. Modeling of electromagnetically formed sheet metal. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 75, n. 1-3, p. 6–16, 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013697002872>>. Acesso em: 2 Sept. 2014.

FIELD, J. E. et al. Experimental methods at high rates of strain. **Le Journal de Physique IV**, Les Ulis, v. 04, n. C8, p. C8–3–C8–22, 1994. Disponível em: <<http://www.edpsciences.org/10.1051/jp4:1994801>>. Acesso em: 2 Jan. 2014.

GOLOWIN, S. et al. Application of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Processing of Sheet Metal. **Journal of Materials Engineering and Performance**, New York, v. 16, n. 4, p. 455–460, 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11665-007-9085-4>>. Acesso em: 18 Maio 2012.

HARTMANN, W.; ROMHELD, M.; DONNER, A. A 100 kJ Pulse Unit for Electromagnetic Forming of Large Area Sheet Metals. In: CONFERENCE RECORD OF THE INTERNATIONAL POWER MODULATOR SYMPOSIUM, 27., 2006, Crystal City. **Electronic Proceedings...** New York: IEEE, 2006 v. 39, p.577–581. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5625906>>. Acesso em: 18 May 2012.

HARVEY, G. W.; BROWER, D. F. GENERAL DYNAMICS CORPORATRON. **Metal Forming Device and Method**. US-Patent Nr. 2976907, 28 Aug. 1958, 28 Jul. 1978.

HAYT, W. H. J.; BUCK, J. A. **Engineering Electromagnetics**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

HE, J. et al. Concerning the design of capacitively driven induction coil guns. **IEEE Transactions on Plasma Science**, New York, v. 17, n. 3, p. 429–438, 1989. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=32251>>. Acesso em: 18 Jan. 2012.

HIBBITT, D. **Abaqus/Explicit Finite Element Computer Program, Theory Manual**. Version 6.11-PR3. Pawtucket: Karlsson and Sorensen Inc., 2011.

HOMRICH, R. P.; RUPPERT, E. F.; PINATTI, D. G. Helicoidal single-layer cylindrical coil self-inductance evaluation: a didactic method. **IEEE Transactions on Education**, New York, v. 44, n. 2, p. 202–208, 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=925853>> Acesso em: 20 Jan. 2013

IMBERT, J. M. Numerical Study of Damage Evolution and Failure in an Electromagnetic Corner Fill Operation. In: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, 2012, Columbus.

Electronic Proceedings... New York: API, 2004. v. 712, p.1833–1838. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.1766799>>. Acesso em: 20 Aug. 2012.

IRIONDO, E. **Electromagnetically impulsed springback calibration**. 2007. 282 p. Dissertation in Engineering – The University of the Basque Country, Bilbao, 2007.

JOHNSON, G. R.; COOK, W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS, 7., 1983, Hague. **Proceedings...** Hague: International Ballistics Society, 1983. p. 541–547.

KAMAL, M. **A uniform Pressure Electromagnetic Actuator for Forming Flat Sheets**. 2005. 261 p. Dissertation (Graduate Program in Materials Science and Engineering) – The Ohio State University, Columbus, 2005.

KLEINER, M.; BEERWALD, C.; HOMBERG, W. Analysis of Process Parameters and Forming Mechanisms within the Electromagnetic Forming Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Dortmund, v. 54, n. 1, p. 225–228, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607600894>>. Acesso em: 20 Aug. 2012.

KLEINER, M.; BROSIUS, A. Determination of Flow Curves at High Strain Rates using the Electromagnetic Forming Process and an Iterative Finite Element Simulation Scheme. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Dortmund, v. 55, n. 1, p. 267–270, 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607604132>>. Acesso em: 28 Aug. 2012.

KRAUS, J. D.; KEITH, R. C. **Electromagnetics**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1981.

LANGE, K. **Handbook Of Metal Forming**. 3rd ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1994.

MAMALIS, G. et al. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet using a grooved die: Numerical modeling. **The Physics of Metals and Metallography**, New York, v. 102, n. S1, p. S90–S93, 2006. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1134/S0031918X06140237>>. Acesso em: 18 May 2012.

MANEA, T. E.; VERWEIJ, M. D.; BLOK, H. The Importance of the velocity term in the Electromagnetic Forming Process. In: GENERAL ASSEMBLY OF THE INTERNATIONAL UNION OF RADIO SCIENCE, 27., 2002, Maastricht. **Proceedings...** Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. p. 112–115.

MARTEL, D.; BULTMAN, J. **Electromagnetic Metal Forming Machine**. Detroit: McGraw-Hill, 2007.

MERICHEDE, A.; FELIACHI, M.; MOHELLEBI, H. Electromagnetic forming of thin metal sheets. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 36, n. 4, p. 1808–1811, 2000. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=877796>>. Acesso em: 10 Dec. 2012.

MOLER, C. B. **Numerical Computing with MATLAB**. 2nd ed. New York: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.

MOTOASCA, T. E. **Electrodynamics in Deformable Solids for Electromagnetic Forming**. 2003. 236 p. Dissertation in Engineering – Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2003.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Eléctricos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

OBBERG, E. et al. **Machinery's Handbook**. 28th. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

OLIVEIRA, D. A. et al. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: Free-form and cavity fill experiments and model. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 170, n. 1-2, p. 350–362, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605005650>>. Acesso em: 18 May 2012.

PAESE, E. **Estampagem Eletromagnética de Chapas Finas: Viabilidade Técnica**. 2010. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PAESE, E. et al. Simplified Mathematical Modeling for an Electromagnetic Forming System with Flat Spiral Coil as Actuator. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 324–331, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jbsmse/v33n3/a08v33n3.pdf>>. Acesso em: 18 May 2012.

PAESE, E. et al. A coupled electric-magnetic numerical procedure for determining the electromagnetic force from the interaction of thin metal sheets and spiral coils in the electromagnetic forming process. **Applied Mathematical Modelling**, p. 1–26, 2014. No prelo. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307904X14002947>>. Acesso em: 6 Jun. 2014.

PAESE, E. et al. An Analysis of Electromagnetic Sheet Metal Forming Process. **Applied Mechanics and Materials**, Switzerland, v. 526, p. 9–14, 2014. Disponível em: <<http://www.scientific.net/AMM.526.9>>. Acesso em: 3 Sept. 2014.

RISCH, D. et al. On the Significance of the Die Design for Electromagnetic Sheet Metal Forming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED FORMING (ICHSF), 1., 2004. Dortmund. **Proceedings...** Dortmund: Institut für Umformtechnik, 2004. p.191–200.

SHANG, J. **Electromagnetically Assisted Sheet Metal Stamping**. 2006. 226 p. Dissertation (Graduate Program in Materials Science and Engineering) – The Ohio State University, Columbus, 2006.

SHANG, J.; DAEHN, G. Electromagnetically assisted sheet metal stamping. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 211, n. 5, p. 868–874, 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610000786>>. Acesso em: 21 May 2012.

SHOUBAO, L. et al. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun. **IEEE Transactions on Plasma Science**, New York, v. 39, n. 1, p. 382–389, 2011. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5466061>>. Acesso em: 26 Aug. 2013.

SIDDIQUI, M. A. **Numerical Modeling and Simulation of Electromagnetic Forming Process**. 2009. 213 p. Dissertation in Engineering – Université de Strasbourg, Strasbourg, 2009.

SIDDIQUI, M. A. et al. Electromagnetic forming process: estimation of magnetic pressure in tube expansion and numerical simulation. **International Journal of Material Forming**, Strasbourg, v. 2, n. 1, p. 649–652, 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12289-009-0431-y>>. Acesso em: 26 Aug. 2012.

SILVA, C. M. A. **Caracterização Mecânica e à Fractura de Materiais Aplicada a Processos De Deformação Plástica e Corte**. 2013. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, 2013.

SILVA, C. M. A.; ROSA, P. A. R.; MARTINS, P. A. F. Electromagnetic Compressive Split Hopkinson. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED FORMING (ICHSF), 3., 2008. Dortmund. **Proceedings...** Dortmund: Institut für Umformtechnik, 2008. p. 45–54.

SILVA, C. M. A.; ROSA, P. A. R.; MARTINS, P. A. F. Electromagnetic Cam Driven Compression Testing Equipment. **Experimental Mechanics**, New York, v. 52, n. 8, p. 1211–1222, 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11340-011-9576-y>>. Acesso em: 30 May 2014.

SMYTHE, W. R. **Static and Dynamic Electricity**. 3rd ed. New York: Taylor & Francis, 1989.

STEINBERG, D. J.; COCHRAN, S. G.; GUINAN, M. W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 51, n. 3, p. 1498–1504, 1980. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/JAPIAU/v51/i3/p1498/s1&Agg=doi>>. Acesso em: 30 Aug. 2012.

STIEMER, M. et al. Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Hoboken, v. 68, n. 13, p. 1301–1328, 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/nme.1738>>. Acesso em: 18 May 2012.

TAKATSU, N. et al. High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force. **JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry**, Tokyo, v. 31, n. 1, p. 142–148, 1988. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.Journalarchive/jsmec1988/31.142?from=CrossRef>>. Acesso em: 1 Sept. 2012.

VOHNOUT, V. J. **A Hybrid Quasi-static/Dynamic Process for Forming Large Sheet Metal Parts From Aluminum Alloys**. 1998. 212 p. Dissertation (Graduate Program in Materials Science and Engineering) – The Ohio State University, Columbus, 2006.

WAGONER, R. H.; CHENOT, J. L. **Metal forming analysis**. New York: Cambridge University Press, 2001.

WANG, L. et al. Numerical simulation of the electromagnetic sheet metal bulging process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, New York, v. 30, n. 5-6, p. 395–400, 2006. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00170-005-0094-x>>. Acesso em: 18 May 2012.

WANG, Z.; WANG, Z.; PIAO, F. Cause of crack formation of magnesium alloy tube during electromagnetic forming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2., 2010, Chengdu. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. V5–387–V5–389.

WELLEMAN, A.; FLEISCHMANN, W. High Power Semiconductor Device and Solid State Switches for Pulsed Discharge Applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED FORMING (ICHSF), 2., 2006, Dortmund. **Proceedings...** Dortmund: Institut für Umformtechnik, 2006. p. 239–248.

WHEELER, H. A. Formulas for the Skin Effect. **Proceedings of the IRE**, New York, v. 30, n. 9, p. 412–424, 1942. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1694542>>. Acesso em: 18 May 2012.

WOODSON, H. H.; MELCHER, J. R. **Electromechanical Dynamics, Part II: Fields, Forces, and Motion**. Cambridge, Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc., 1968.

XU, D. et al. Calculation of electromagnetic force in electromagnetic forming process of metal sheet. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 107, n. 12, p. 124907-1–124907-7, 2010. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/JAPIAU/v107/i12/p124907/s1&Agg=doi>>. Acesso em: 18 May 2012.

ZITTEL, G. A Historical Review of High Speed Metal Forming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED FORMING (ICHSF), 4., 2010, Columbus. **Proceedings...** Columbus: The Ohio State University, 2010. p.2–15.