

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO CONCEITUAL DE UMA MÁQUINA PARA CONFORMAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA

por

Guilherme Cortelini da Rosa
Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2012

PROJETO CONCEITUAL DE UMA MÁQUINA PARA CONFORMAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA

por

Guilherme Cortelini da Rosa
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Lorini

Co-orientador: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos, PGTEMA / PUCRS

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, PPGEE / UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro, PROMEC / UFRGS

Prof. Ph. Dr. Francis Henrique Ramos França
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 31, Julho de 2012

A vida é como andar de bicicleta. Para manter o equilíbrio, é preciso se manter em movimento.
(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a minha noiva Scheila por sempre estar presente e pelo apoio durante todo este período.

A minha família, principalmente meus pais Niwton Soares e Vera Cortelini, a minha Irmã Rossana e minha avó Ola pelo apoio incondicional em toda minha vida.

Ao professor amigo e orientador Dr. Lorini e ao professor amigo e coorientador Dr. Joyson pelo apoio, incentivo, orientação e oportunidade de realização deste trabalho.

A comissão de avaliação, professor Dr. Carlos Alexandre, professor Dr. Roberto Petry e professor Dr. José Mazzaferro pelas valiosas sugestões de melhorias.

Aos amigos que auxiliaram na realização deste projeto: Joyson; Martin; Ortiz; Roberto; Evandro; que sempre estiveram dispostos a auxiliar quando precisei.

Ao casal Euzineri e Vicente pelo companheirismo desde o início do mestrado.

Aos amigos que fiz durante estes dois anos: Adelano; Marcelo Toso; Rafael Crespo; Luis; Odair; Eduardo; Anselmo; Patric; Marcos Rijo; Fábio; Geferson; Guilherme; Marchiori; Marcelo Souza; Guilherme Vargas; André; Tiago; Everton Silva; Jeferson. Cito aqui alguns, mas aqueles que não foram lembrados também sintam-se agradecidos!

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Gostaria de lembrar uma pessoa que sempre foi amigo e um exemplo a ser seguido em minha vida, meu avô Euzébio (em memória).

E agradeço ao Pai, pois “minha força e vitória é Jesus”.

RESUMO

O presente trabalho tem como proposta o projeto conceitual para construção do protótipo de máquina para conformação eletromagnética. Por definição conformação eletromagnética é o uso de um intenso campo eletromagnético para comprimir ou expandir peças de geometrias diversas dentre elas plana e circular. É um processo de conformação em alta velocidade onde não existe contato entre a peça e uma ferramenta, tendo como características bom acabamento e alta produtividade.

A máquina é constituída por três partes principais: unidade de energia, bobina atuadora e estação de trabalho. A unidade de energia consiste em um banco de capacitores de alta voltagem que é carregado por uma fonte de alta tensão, o controle da máquina; bomba de vácuo; sistema de refrigeração e um interruptor de descarga principal que não pode exercer contato mecânico devido às altas correntes para que não ocorra soldagem dos terminais.

A bobina atuadora é feita com material de alta condutividade elétrica e converte a corrente elétrica em pressão eletromagnética. A geometria da bobina deve ser adequada para a obtenção de peças metálicas de forma controlada para obtenção de geometrias pré-definidas. No instante em que a corrente dos capacitores é descarregada na bobina, um campo eletromagnético é gerado e induz correntes de *Foucault* na peça criando um campo eletromagnético com sentido contrário. A oposição destes campos gera força eletromagnética que conforma o material.

A estação de trabalho é o local onde o material é inserido ou aproximado da bobina, podendo ser manual ou semi-manual. Para dar rigidez à bobina é necessário utilizar uma matriz feita de material que possua bom isolamento elétrico, priorizando a eficiência energética.

Para este projeto será utilizada a metodologia de desenvolvimento de projeto baseada no método denominado desdobramento da função qualidade (QFD) onde gerar-se uma lista de requisitos contendo as especificações de projeto para esta máquina. Ao término da fase informacional inicia a fase conceitual onde o objetivo é gerar um conceito de máquina para conformação eletromagnética que poderá ser fabricada potencializando o desenvolvimento de produtos e processos inovadores, entre eles, os processos de conformação híbrida.

Palavras-chave: conformação eletromagnética; máquina para conformação eletromagnética; conformação por alta energia; projeto conceitual; fabricação por deformação eletromagnética.

ABSTRACT

The paper proposes a conceptual design to construction of an electromagnetic forming device. By definition electromagnetic forming is the use of an intense electromagnetic field used to compress or expand several geometries workpieces like flat or circular geometries. Is a high speed forming process where don't exist mechanical contact between workpiece and tool. With characteristics like good finishing and high productivity.

The machine is divided in three main parts: the energy storage, electromagnetic forming coil and work station. The energy storage is a capacitor bank charged for a high voltage power supply; the machine control; vacuum pump, refreshing system and a main switch discharge that can't exert mechanical contact.

The electromagnetic forming coil is made from a high electrical conductivity material and converts electrical current on electromagnetic pressure. The electromagnetic coil geometry is adequate for each workpiece in a controlled manner to obtain preset geometries. At time that the energy storage on capacitor bank is discharged on electromagnetic forming coil creating an electromagnetic field that induces *Foucoult* currents on work piece creating an electromagnetic field with opposite direction. The opposition of those electromagnetic fields forming the workpiece.

The work station is where the workpiece is inserted or approximated on the electromagnetic forming coil, it can be manual or automated. To the rigidity of electromagnetic forming coil is necessary use an insulated material, giving priority for energetic.

To do this work will be used the methodology for design development focused on quality function deployment (QFD) to obtain a list with the specification for this conceptual design. The end of informational phase begins the conceptual phase where the objective is create a concept that can be fabricated developing new products and innovator process that use the hybrid forming.

Keywords: electromagnetic forming, electromagnetic forming machine, high pulse forming, conceptual design, electromagnetic manufacturing.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objetivo Geral	3
1.3	Objetivos Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Aspectos do Processo de Conformação Eletromagnética.....	5
2.1.1	Conformabilidade utilizando conformação em alta velocidade	9
2.2	História da Conformação Eletromagnética.....	10
2.3	Primeiros Equipamentos para Conformação Eletromagnética	11
2.4	Capacitores e Banco de Capacitores.....	12
2.4.1	Capacitância.....	14
2.4.2	Capacitor de Placas Paralelas	14
2.4.3	Capacitor Cilíndrico	15
2.4.4	Capacitor Esférico	16
2.4.5	Carregamento de um Capacitor	17
2.4.6	Capacitores Conectados em Paralelo.....	18
2.4.7	Capacitores Conectados em Série.....	19
2.5	Bobina Atuadora e Concentrador de Campo	20
2.6	Interruptor de Acionamento Principal	23
2.7	Aplicações da Conformação Eletromagnética.....	27
2.7.1	Conformação Eletromagnética de Tubos	31
2.7.2	Conformação Eletromagnética de Chapas.....	35
2.8	Estado da Técnica.....	36
3	PROJETO INFORMACIONAL	44
3.1	Identificação do problema	47

3.2	Levantamento e análise dos parâmetros de projeto	48
3.3	Unidade de armazenamento de energia	52
3.3.1	Capacitores	52
3.3.2	Fonte de alta tensão	52
3.3.3	Controle	52
3.3.4	Interruptor de acionamento principal	53
3.4	Bobina atuadora	53
3.5	Estação de trabalho	54
3.6	Material da peça a ser conformada	55
3.7	Sistema de Refrigeração	55
3.8	Aplicação do método QFD	55
3.9	Síntese das necessidades.....	57
4	PROJETO CONCEITUAL.....	61
4.1	Seleção.....	61
4.2	Geração do conceito	62
4.3	Seleção dos capacitores	65
4.4	Seleção do interruptor de acionamento principal	69
4.5	Sistema de Refrigeração	70
4.6	Controle	73
4.7	Conceito Final	75
5	DISCUSSÕES	80
6	CONCLUSÕES	82
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	83
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Bancada de testes [Paese, 2010].	3
Figura 2.1 – Princípio funcional de um motor elétrico [Halliday, 2009].	5
Figura 2.2 - Esquema da conformação eletromagnética [Golovashchenko, 2007].	6
Figura 2.3 - Caminhos para corrente induzida em um tubo [Zittel, 2010].	7
Figura 2.4 - Saliência criada entre as barras de cobre devido aos campos eletromagnéticos opostos [Zittel, 2010].	10
Figura 2.5 - Primeira bobina atuadora de compressão [Zittel, 2010].	11
Figura 2.6 - Em (a): primeira máquina para conformação eletromagnética; em (b): anéis de retenção conformados, unindo a capa neoprene em uma junta homocinética [Zittel, 2010]. ..	11
Figura 2.7 - Corrente de descarga na bobina atuadora [Zittel, 2010].	13
Figura 2.8 - Linhas de campo elétrico entre placas de um capacitor de placas paralelas [Tipler e Mosca, 2009].	14
Figura 2.9 - Superfície gaussiana distante das extremidades do capacitor cilíndrico [Tipler e Mosca, 2009].	15
Figura 2.10 - Cargas nas placas de dois capacitores em paralela [Tipler e Mosca, 2009].	19
Figura 2.11 - Cargas nas placas de dois capacitores em série [Tipler e Mosca, 2009].	19
Figura 2.12 - Diferentes tipos de bobinas para conformação eletromagnética [Psyk et. al, 2011].	20
Figura 2.13 - Concentrador de campo [Plum, 1993].	21
Figura 2.14 - Interruptor de acionamento principal [Paese, 2010].	24
Figura 2.15 - Interruptor principal [Martel e Bultman, 2007].	25
Figura 2.16 - Interruptores semi-condutores montados na planta de energia [Neugebauer et. al, 2006].	26
Figura 2.17 - Semicondutores conectados em série e paralelo [Wellemann, 2008].	26
Figura 2.18 - Comparação entre a conformação tradicional e a alta velocidade [Golowin, 2007].	27
Figura 2.19 - Modelo esquemático para bobina com pressão uniforme [Golowin, 2007].	28
Figura 2.20 - Rolos anodizados para instrumentos médicos expandidos em um molde [Zittel, 2010].	28
Figura 2.21 – União de aço em mangueiras de borracha [Schafer, Pasquale e Kalee, 2009]. ..	32

Figura 2.22 - União de materiais dissimilares para estruturas de assentos para ônibus e aviões [Schafer, Pasquale e Kalee, 2009].	32
Figura 2.23 - União de uma tampa de alumínio esterilizada em uma garrafa de vidro [Schafer, Pasquale e Kalee, 2009].	33
Figura 2.24 - União de anéis de alumínio em borracha [Kalee, et. al, 2009].	33
Figura 2.25 - Conformação de tubos com diferentes tamanhos de tubos [1- bobina; 2- tubo] [Song, et. al, 2004].	34
Figura 2.26 - Componente montado com conformação eletromagnética em um isqueiro descartável [Plum, 1993].	34
Figura 2.27 - Princípio da conformação de chapas [Psyk et. al, 2011].	35
Figura 2.28 - Painel automotivo conformado convencionalmente e conformado eletromagneticamente para obter a forma final [Azab et. al, 2003].	36
Figura 2.29 - Máquina da empresa MAGNEFORM [Browder, 1962].	37
Figura 2.30 - Máquina para conformação fabricada pela PST modelo PS16-10 [Kalee et. al, 2009].	37
Figura 2.31 - Bobina atuadora de cobre eletrolítico (a) e vista seccionada da matriz (b) [Geier et. al, 2010].	38
Figura 2.32 - Bancada para conformação eletromagnética de chapas de metal [Geier, 2010].	39
Figura 2.33 - Máquina para conformação eletromagnética [Martel e Bultman, 2007].	40
Figura 2.34 - Zona de conformação [Martel e Bultman, 2007].	41
Figura 2.35 - Barras de cobre para conexão dos capacitores [Martel e Bultman, 2007].	41
Figura 2.36 - Equipamento para conformação eletromagnética [Rajawat et. al, 2004].	42
Figura 2.37- Equipamento para conformação eletromagnética de componentes automotivos [Plum, 1993].	42
Figura 3.1 - Desdobramento da Função Qualidade [Baxter, 2008].	46
Figura 3.2 - Método utilizado no trabalho.	47
Figura 3.3 - Modelo de um sistema para conformação eletromagnética.	47
Figura 3.4 - Parâmetros da máquina para conformação eletromagnética.	49
Figura 3.5 - Exemplo de conformação híbrida em três passes, para conformar paines de porta de um automóvel [Daehn, 2006].	50
Figura 3.6 - Tipos de bobinas: em (a) Conformação de chapas; em (b) compressão de tubos e em (c) expansão de tubos.	54
Figura 3.7 - Vácuo gerado entre a peça e o molde	54

Figura 3.8 - Desdobramento da função qualidade (QFD).	56
Figura 3.9 - Análise das características da máquina.....	58
Figura 4.1 - Etapas do Projeto Conceitual.	62
Figura 4.2 - Conceito 01 de uma máquina para conformação eletromagnética.	62
Figura 4.3 - Conceito 02 de uma máquina para conformação eletromagnética.	63
Figura 4.4 - Conceito unidade de armazenamento.	64
Figura 4.5 – Metodologia para máquina para Conformação Eletromagnética.....	65
Figura 4.6- Descarga do capacitor no resistor.	68
Figura 4.7 - Energia em função da voltagem aplicada nos capacitores.....	69
Figura 4.8- Circuito RLC.	70
Figura 4.9- Gráfico corrente de descarga na bobina atuadora.....	71
Figura 4. 10- Diagrama de controle.....	75
Figura 4. 11- Conceito conformação de chapas	76
Figura 4. 12 - Estrutura.....	77
Figura 4. 13 – Unidade de armazenamento	78
Figura 4. 14- Conceito Final.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Condutividade elétrica de alguns matérias relevantes [Schäfer et. al, 2009].	9
Tabela 3.1 - Dados disponíveis sobre as máquinas comerciais para conformação eletromagnética.	48
Tabela 3.2 - Principais partes e itens.	51
Tabela 3.3 - Lista de requisitos para o projeto de uma máquina	58
Tabela 4.1 – Matriz de decisão para seleção do conceito.	64
Tabela 4.2 - Alguns capacitores disponíveis no mercado.	66
Tabela 4.3 - Características dos capacitores.	67
Tabela 4.4 - Matriz de decisão para seleção dos capacitores.	67
Tabela 4.5 – Alternativas de interruptores principais.	69
Tabela 4.6 – Principais componentes	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

I_u: Grau de importância para o consumidor

N_u: Necessidades do usuário

QFD: Desdobramento da Função Qualidade;

R_p: Requisitos de projeto

r_i: Grau de relacionamento

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [mm ²]
A	Área de transferência de calor [m ²].
C	Capacitância do banco de capacitores [μF]
c	Calor específico [Cal/g°C]
d	Diâmetro da peça [m]
\vec{E}	Campo elétrico [G]
f	Frequência de oscilação [Hz]
I	Corrente na bobina atuadora [A]
k	Coefficiente de transferência de calor [W/m ² K];
L	Indutância da bobina atuadora [H]
L	Comprimento de trabalho da peça (espessura da bobina) [m]
m	Massa [kg]
n	Número de espiras por unidade de comprimento [n/l]
Q	Quantidade de calor [cal];
q	Carga [C]
P _{mag}	Pressão magnética [Mpa]
R	Raio [m]
R	Resistência total do circuito [Ω]
R _{bob}	Resistência da bobina atuadora [Ω]
s	Espessura entre a bobina e a peça [m]
t	Tempo [s]
U	Energia armazenada no banco de capacitores [J]
V	Diferença de potencial elétrico no banco de capacitores [V]
ΔT	Variação da temperatura [K]
t	Constante de tempo [s]
α _N	Fator de amortecimento ou frequência de <i>Neper</i> [Hz]
w ₀	Frequência angular de ressonância [Hz]
w	Frequência angular
μ ₀	Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Diferente das tecnologias convencionais para conformação dos metais, onde se utilizam ferramentas punção-matriz em prensas, a conformação eletromagnética utiliza uma força eletromagnética para conformar o metal com uma alta velocidade.

A conformação eletromagnética é uma tecnologia relativamente nova, introduzida na indústria em 1964 na General Motors para montar o anel de retenção em uma junta homocinética automotiva [Tamhane et. al, 1997]. Esta nova tecnologia representa uma alternativa aos processos atuais, pois não existe contato com a peça durante a conformação, não existindo marcas de ferramenta. Para Zittel, 2010, utilizando a conformação eletromagnética pode-se realizar o acabamento prévio como pinturas ou revestimentos, não existindo zona termicamente afetada como, por exemplo, na união por solda. Através de ciclos muito rápidos com alta repetibilidade, é possível utilizá-la em linhas de produção, permitindo unir diferentes materiais e em diferentes seções, sem utilização de lubrificantes, sendo considerada uma tecnologia limpa.

Segundo Haiping e Chunfeng, 2008, houve um crescente aumento na busca por manufatura de materiais avançados com geometrias complicadas. Para Okoye et. al, 2006, a crescente necessidade de utilização de materiais como alumínio é a razão para o recente interesse da indústria automotiva e aeronáutica na conformação eletromagnética. Isto ocorre porque este processo oferece uma alta velocidade de conformação que aumenta a conformabilidade destes materiais, ao contrário dos processos usuais de conformação com velocidades muito baixas, onde ocorrem falhas.

A conformabilidade de alguns materiais impede a aplicação na fabricação de algumas peças. Segundo Tamhane et. al, 1997, a utilização de alumínio em carrocerias de automóveis pode reduzir drasticamente o seu peso, utilizado para isto a conformação eletromagnética. Como o alumínio possui condução elétrica, maior que a do aço, aumentando a eficiência do processo, ele é o candidato ideal para este tipo de tecnologia. Devido às dificuldades da conformação do alumínio, faz com que somente o alumínio mais conformável seja considerado, porém, melhorias na conformação de materiais, como a utilização da alta velocidade, permitem a aplicação deste material em carrocerias de automóveis. Esta é a razão

mais convincente para considerar a utilização de um processo de conformação em alta velocidade.

Os processos de conformação em alta velocidade são aqueles em que a velocidade do material excede 100 m/s [Daehn, 2006]. Segundo Tamhane, 1997, dentre os processos de conformação em alta velocidade que utilizam a energia armazenada em capacitores tem-se:

- Conformação eletro-hidráulica: a descarga do banco de capacitores é feita sobre dois eletrodos muito próximos submergidos em um fluido (água ou óleo). Este fluido é então vaporizado pelo curto circuito criando uma onda de choque, conformando a peça que está em contato com o fluido numa extremidade e na outra possui vácuo. Segundo o autor, este processo é uma variação da conformação utilizando explosivos com a variação da fonte de energia.
- Conformação eletromagnética: uma força mecânica de origem eletromagnética é utilizada para conformar o material quando um pulso de corrente passa através de uma bobina colocada muito próxima de uma peça. Esta corrente passando através da bobina provoca um campo eletromagnético induzindo correntes elétricas na peça tendo como consequência um campo magnético secundário. Como estes dois campos são repulsivos, ocorre a deformação na peça. Resultados obtidos com a conformação eletromagnética podem ser repetidos devido às características de descarga serem controladas pelos parâmetros elétricos do sistema e o controle preciso da carga do banco de capacitores.

A conformação eletromagnética pertence à família dos processos de conformação em alta velocidade. Segundo Tamhane et. al, 1997, a conformação eletromagnética tem a vantagem de não ser necessário o armazenamento de explosivos e a descarga pode ser altamente reproduzida sendo o método potencial para uso na produção em massa, consistindo, assim no único processo em alta velocidade que tem aceitação significativa na indústria [Zittel, 2010], sendo utilizado para compressão, expansão de peças tubulares, inclusive peças poligonais ou conformação de chapas.

As pesquisas sobre a conformação eletromagnética são geralmente voltadas para os potenciais de aplicação e a modelagem numérica, entretanto, poucos estudos são encontrados

na bibliografia sobre o projeto de máquinas para conformação eletromagnética, tanto para o uso industrial como para uso em laboratório. Um grande obstáculo para o desenvolvimento e investigação desta técnica está atrelado ao alto custo deste tipo de máquina.

Este projeto é fundamentado em resultados exploratórios experimentais, obtidos por uma bancada de testes, figura 1.1, desenvolvida na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com a parceria entre os laboratórios do Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial (GPF AI) e o Laboratório de Máquinas Elétricas Acionamentos e Energia Elétrica (LMEAE).

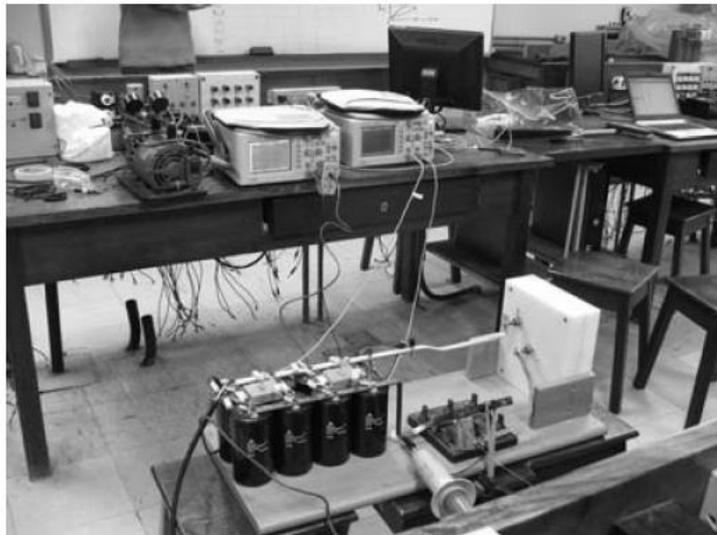


Figura 1.1- Bancada de testes [Paese, 2010].

1.2 Objetivo Geral

Projeto conceitual de uma máquina para conformação eletromagnética, podendo ser utilizada em âmbito industrial e/ou em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos conformados, tanto para conformação de chapas (repuxo), como para expansão ou compressão de tubos e geometrias diversas.

1.3 Objetivos Específicos

- Estabelecer uma metodologia ou sequenciamento de etapas para o projeto de máquina para conformação eletromagnética.
- Definir arquitetura básica de uma máquina para conformação eletromagnética.

- Conhecer melhor o potencial técnico de uma máquina para conformação eletromagnética para uso industrial.

1.4 Estrutura do Trabalho

Em linha com os objetivos deste trabalho, que possui como característica principal o projeto de uma máquina para conformação eletromagnética, segue-se então a metodologia sugerida por Pahl et. al, 2005, que propõe para as etapas iniciais do projeto: planejamento e esclarecimento da tarefa; projeto conceitual.

- **Planejamento e esclarecimento da tarefa:** destina-se a coleta de informações sobre o produto bem como as condicionantes existentes e sua relevância, resultando numa lista de requisitos;
- **Projeto Conceitual:** é a definição preliminar de uma solução, obtém-se um princípio de solução passível de avaliação com representação variada. Esta fase (conceitual) é dividida em diversas etapas de trabalho para assegurar a construção da melhor preliminar possível. As variantes devem ser avaliadas e as que não satisfazem as exigências da lista de requisitos devem ser eliminadas.

Este trabalho é apresentado em capítulos, cada um com seu respectivo desenvolvimento e comentários. Nos capítulos 2 e 3 é apresentado o planejamento e esclarecimento da tarefa. No segundo capítulo estão presentes as informações relativas a este projeto, bem como o estado da arte. Já no terceiro capítulo, a partir do processamento das necessidades e requisitos, utilizando o método de desdobramento da função qualidade (QFD), são geradas as especificações do projeto.

No quarto capítulo é apresentada a etapa conceitual deste projeto, e nos últimos capítulos a conclusão e as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo o esclarecimento da tarefa, também conhecido como projeto informacional, que consiste na coleta de informações sobre o produto a ser desenvolvido, identificando parâmetros que influenciam em seu desempenho para então originar as especificações do projeto em questão. No início desta fase informacional são apresentados alguns aspectos relevantes à conformação eletromagnética, uma pequena revisão histórica, componentes da máquina, algumas aplicações da conformação eletromagnética utilizada na indústria e o estado da arte contendo algumas informações sobre os equipamentos para conformação eletromagnética. A fase informacional é concluída no capítulo seguinte, onde o principal objetivo é montar a lista de requisitos para a máquina em questão.

2.1 Aspectos do Processo de Conformação Eletromagnética

Para facilitar a compreensão do funcionamento da conformação eletromagnética pode-se utilizar o princípio de funcionamento de um motor elétrico. Um motor elétrico simples consiste em uma bobina transportando corrente imersa em um campo magnético [Halliday, 2009], onde este campo magnético exerce uma força sobre o fio que está conduzindo corrente. Como a corrente inverte seu sentido ao percorrer a extensão da bobina, obtêm-se duas forças com sinais opostos como demonstrado na figura 2.1. Estas forças se combinam exercendo torque sobre a bobina racionando-a em torno de seu eixo central.

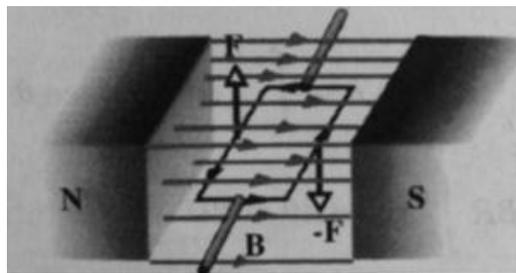


Figura 2.1 – Princípio funcional de um motor elétrico [Halliday, 2009].

Analogamente, a conformação eletromagnética acontece devido ao descarregamento da energia armazenada no capacitor ou banco de capacitores sobre uma bobina atuadora, utilizando para isto um interruptor de acionamento principal. Na bobina atuadora, devido à descarga da carga elétrica, é gerado um campo eletromagnético, que por sua vez, induz

correntes parasitas na peça que está muito próxima a sua vizinhança gerando outro campo eletromagnético, com sentido contrário e devido a esta oposição ocorre a conformação da peça.

Para Golovashchenko, 2007, a conformação eletromagnética é baseada na descarga da alta tensão de capacitores em uma bobina atuadora. Esta descarga gera um intenso campo eletromagnético e através da interação com uma peça metálica de material condutor, uma pressão devido a oposição eletromagnética é gerada para conformação de acordo com o esquema da figura 2.2.

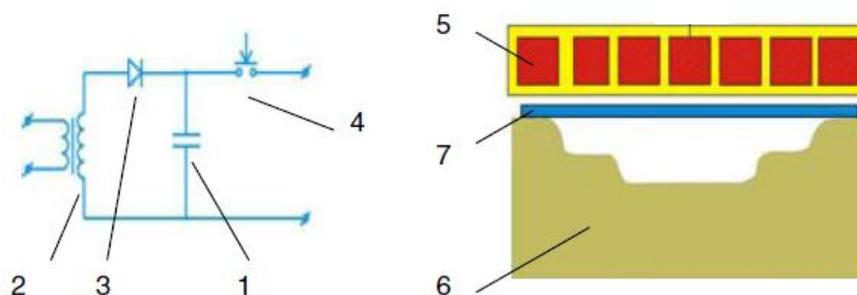


Figura 2.2 - Esquema da conformação eletromagnética [Golovashchenko, 2007].

A energia é acumulada no banco de capacitores (1) através do carregamento com uma fonte de alta tensão (2) e (3), com tensão variando entre 1 e 25 kV devido a variação do tempo de carregamento. Um interruptor com baixa indutância (4) é utilizado para descarregar a energia dos capacitores sobre a bobina (5).

Ainda segundo Golovashchenko, 2007, a eficiência do processo é melhor se a distância entre a bobina atuadora (5) e a peça (7) for a menor possível. Entretanto, a bobina deve ser montada em um material isolante para evitar curto-circuito de suas espiras.

A pressão que pode ser gerada por um campo eletromagnético pode ser muito alta, mas na prática, são limitadas pela resistência do material que é feita a bobina [Daehn, 2006], pois, deve-se considerar que a durabilidade da bobina ocorre de acordo com a terceira lei de Newton (ação = reação), ou seja, as forças necessárias para alcançar a deformação desejada na peça também atuam na bobina como forças de reação [Psyk et. al, 2011].

Segundo Takatsu et. al, 1988, um sistema de conformação eletromagnética é essencialmente um sistema de indução mútua composto de uma bobina atuadora e uma peça de trabalho, onde uma chapa de alumínio é fixada muito próxima a uma bobina que está conectada a um banco de capacitores através de um interruptor de descarga.

Uma máquina para conformação eletromagnética, segundo Zittel, 2010, utiliza o mesmo princípio da força, que é exercida em um condutor conduzindo corrente quando colocado em um campo eletromagnético ou quando colocado próximo de outro condutor conduzindo corrente. Assim, pode ser utilizado como meio de conformação, tanto para compressão, quanto para expansão de tubos ou conformação de chapas, com a diferença de que a força gerada deve ser suficiente para que exceda a resistência ao escoamento do material. Para nível de comparação o campo eletromagnético gerado pelo motor elétrico é cerca de 15 kG, já o gerado pela máquina precisa ser em torno de 300 kG.

Ainda segundo Zittel, 2010, este processo apresenta limitações práticas e econômicas, como características-chaves a ser destacadas como:

- Funciona melhor com materiais que apresentam alta condutividade elétrica como cobre, alumínio e aços que contenham baixa concentração de carbono. A resistividade do material determina a profundidade do campo eletromagnético e também a pressão eletromagnética atingível, como exemplo a resistividade do cobre eletrolítico $1,67e^{-8} \Omega.m$.
- A peça precisa ter um caminho contínuo por onde a corrente será induzida. Por exemplo, em um cilindro, flui ao redor da circunferência, se a peça tiver alguma fenda em seu caminho como na figura 2.3(a), irá reduzir e distorcer as forças de conformação. No caso de perfurações, como na figura 2.3(b) as distorções serão as mínimas possíveis, pois não interferem com o fluxo de corrente. Ranhuras profundas no final do tubo, como mostra a figura 2.3(c) tem grande interferência e não produz pressão uniforme.

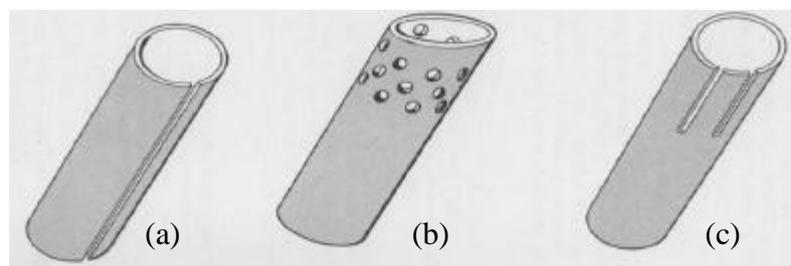


Figura 2.3 - Caminhos para corrente induzida em um tubo [Zittel, 2010].

O ajuste da peça e da bobina deve ser considerado, onde a distância entre elas é denominada *gap*. Quanto menor for o *gap* maior será a eficiência.

Ao contrário dos processos usuais, o metal toma forma após o término do impulso devido ao campo eletromagnético. Primeiramente, a peça é acelerada rapidamente ganhando grande energia cinética atingindo a plasticidade, resultando em contato entre a peça e o molde se houver, ou na união de peças. Por se tratar de um processo puramente eletromagnético, não é limitado em velocidade por peças móveis. As máquinas podem ser sincronizadas para serem utilizadas com grandes quantidades de repetições por minuto. Não sendo necessária a utilização de lubrificantes, uma vez que não existem partes deslizantes ou rotativas que gerem atrito, não necessitando de limpeza nas peças após operação.

Segundo Daehn, 2006, as técnicas de conformação em alta velocidade, como a conformação pela utilização de explosivos, a conformação eletromagnética e a conformação eletro hidráulica, são técnicas distintas das usuais. Isto porque, na conformação em alta velocidade, a peça é acelerada a uma alta velocidade ganhando grande quantidade de energia cinética. Pode-se exemplificar através da conformação de uma chapa utilizando eletromagnetismo, onde a mesma é desacelerada devido à deformação plástica quando encontra um obstáculo como uma matriz. Estas tecnologias são conhecidas há mais de 100 anos, pois são bem aproveitáveis, inclusive com materiais difíceis de conformar.

A conformação eletromagnética é uma técnica sem contato onde grandes forças são transmitidas para uma peça metálica com alta condutividade (tabela 2.1) devido à interação eletromagnética. Primeiramente, uma grande quantidade de energia, entre 5 a 200 kJ, é armazenada em um capacitor ou banco de capacitores, carregado por uma fonte de alta tensão [Daehn, 2006]. A energia armazenada é descarregada através de um interruptor de descarga e de um barramento de cobre com baixa impedância até a bobina atuadora. Esta corrente assume a forma de uma onda senoidal e pode ser entendida como um circuito Resistor-Indutor Capacitor (RLC). O pico de corrente ocorre com dezenas de microssegundos, isto cria um campo eletromagnético transiente na extremidade da bobina. O campo induz correntes parasitas, ou *eddy* correntes, em qualquer material condutivo metálico e em sua vizinhança, gerando um campo eletromagnético com sentido oposto, causando repulsão entre a bobina e a peça e produzindo tensão na peça que exceda à tensão de escoamento do material, causando deformação plástica e acelerando a peça a velocidades que excedem 100 m/s.

Tabela 2.1 - Condutividade elétrica de alguns matérias relevantes [Schäfer et. al, 2009].

Material	Condutividade Elétrica [$1\text{m}/\Omega\text{mm}^2$]= [10^6 S/m]
Cobre (Cu 99,9)	58,0
Alumínio (Al 99,9)	36,9
Alumínio (6082)	24 – 28
Magnésio (Mg 99,9)	22,7
Magnésio (AZ91)	6,6 – 7
Aço estrutural	9,3
Titânio (Ti 99,9)	2,56
Aço inoxidável 1.4301	1,6

2.1.1 Conformabilidade utilizando conformação em alta velocidade

De acordo com Daehn, 2006, as técnicas de conformação em alta velocidade são distintas das técnicas de conformação convencionais a partir da afirmação de que um corpo que está em movimento ou repouso tem a tendência de manter este movimento ou repouso, conforme a primeira lei de Newton.

Após uma peça ser lançada em alta velocidade, ela tentará manter sua velocidade de lançamento. Essa é a diferença básica entre a conformação convencional e a conformação em alta velocidade, pois as forças inercias podem ser ignoradas na convencional e são dominantes na alta velocidade.

Os efeitos inerciais tem grande importância nas operações de conformação eletromagnética e é a base para suas capacidades e limitações. Em alguns casos, a alta taxa de conformação faz com que seja possível a conformação de materiais que não poderiam ser conformados de maneira convencional [Browder, 1962].

Segundo Tamhane et. al, 1997, o principal fator controlador de uma possível falha na peça é o efeito inercial que pode ser muito maior nos processos em alta velocidade que nos processos de conformação quase-estáticos (processos convencionais). O efeito inercial ocorre devido à aceleração do material, oferecendo resistência à propagação da falha.

A mudança de clima e a diminuição dos recursos naturais são os dois desafios mais importantes na indústria manufatureira [Neugebauer et. al, 2011]. Como um dos principais

objetivos é reduzir os custos, uma abordagem promissora é a criação de projetos com baixo peso, incluindo a utilização de materiais mais leves e produtos semiacabados, explorando os efeitos da velocidade e utilizando-a como um parâmetro decisivo, oferecendo oportunidade para estender os limites do processo.

A conformação eletromagnética oferece vantagens sobre o processo de conformação convencional, porque uma alta velocidade é imposta à peça. Quando o metal se choca contra a matriz a máxima taxa de deformação aumenta, permitindo maior deformação plástica sem que ocorram falhas na peça [Martel e Bultman, 2007].

Segundo Rajawat et. al, 2004, com a conformação eletromagnética pode-se atingir alta conformabilidade do material sem que ocorram falhas, não existindo contato com a peça, com pequeno retorno elástico, controle preciso e é passível para uma possível automação.

2.2 História da Conformação Eletromagnética

A utilização da força mecânica de origem eletromagnética teve início no ano de 1920, sendo utilizada para elevar a tensão do metal até exceder a resistência ao escoamento e então deformá-lo permanentemente [Zittel, 2010]. Para tanto, são necessárias grandes correntes elétricas e campos eletromagnéticos. Os experimentos eram feitos a partir de um curto-circuito em grandes geradores rotativos, produzindo a corrente necessária, mas falhavam devido a diversos problemas.

No início de 1960, a empresa *General Atomic*, em *San Diego* na *Califórnia*, realizou experiências sobre a fusão nuclear, ionizando gás com um alto campo eletromagnético a partir da descarga de capacitores conectados em paralelo com uma bobina, utilizando barras de cobre para que a corrente fosse conduzida. Nessa experiência, observaram falhas ocorridas nas barras de cobre causadas pelas forças opostas geradas entre os condutores paralelos conduzindo corrente, como mostra a figura 2.4:

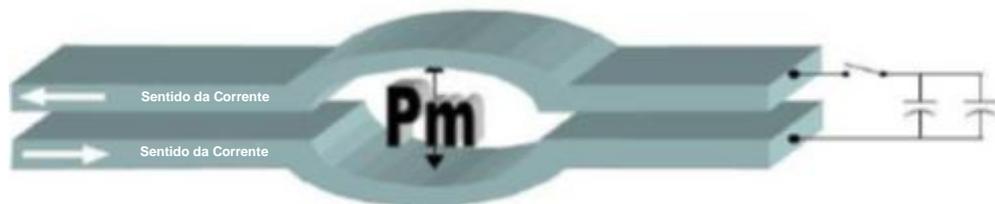


Figura 2.4 - Saliência criada entre as barras de cobre devido aos campos eletromagnéticos opostos [Zittel, 2010].

A partir destas experiências iniciais, foi possível utilizar estas forças então indesejadas para conformar peças metálicas. O sistema de barras de cobre foi transformado em uma bobina em que uma peça de metal condutivo foi utilizada (figura 2.5). Com isto, pode-se gerar pressão eletromagnética a partir das correntes induzidas na peça a partir do campo eletromagnético gerado pela descarga dos capacitores na bobina atuadora.



Figura 2.5 - Primeira bobina atuadora de compressão [Zittel, 2010].

2.3 Primeiros Equipamentos para Conformação Eletromagnética

O primeiro equipamento para conformação eletromagnética na indústria foi utilizado por volta de 1964 na fábrica da *General Motors* para colocação de capas de neoprene em junta homocinética de automóveis, utilizando anéis metálicos de retenção [Zittel, 2010] como mostra a figura 2.6. Este equipamento era muito primitivo, mas produziu equipamentos confiáveis para indústria automotiva por muitos anos.



(a)



(b)

Figura 2.6 - Em (a): primeira máquina para conformação eletromagnética; em (b): anéis de retenção conformados, unindo a capa neoprene em uma junta homocinética [Zittel, 2010].

Ainda de acordo com Zittel, 2010, para utilizar uma máquina de conformação eletromagnética em operações de manufatura, a máquina deve ser constituída por três partes principais:

1. **Armazenamento de energia e controle:** abriga o banco de capacitores, interruptores para o carregamento dos capacitores, fonte de alta tensão, interruptor para descarga do banco de capacitores, controle e interface homem máquina.
2. **Bobina atuadora:** utilizada para converter a descarga do banco de capacitores em pressão eletromagnética. Pode-se utilizar um concentrador de campo para adaptar a bobina para um tamanho específico na peça. A bobina atuadora depende da peça a ser conformada.
3. **Estação de trabalho:** local onde a peça é inserida na bobina atuadora com função de manter na posição de conformação e posteriormente remoção da peça, podendo ser algo simples com posicionamento manual, semi-manual ou totalmente automatizado em linhas de montagem.

Existem limitações práticas e econômicas na utilização do processo de conformação eletromagnética. A pressão eletromagnética que pode ser gerada teoricamente pode ser maior possível, mas é limitada na prática pelas características do material da bobina atuadora. O material da bobina deve ser um bom condutor elétrico e suportar as pressões requeridas pela conformação da peça, não apenas uma vez, mas várias vezes considerando sua fadiga.

O tamanho da peça a ser conformada determina o valor da máquina, assim, quanto maior o montante de energia necessário para a conformação eletromagnética, maior será o tamanho da bobina, podendo não tornar o processo atrativo economicamente. Para tanto, deve ser um equipamento que “se pague” em poucos anos ou para ser utilizado em processos que não possam ser executados de outra forma. Segundo o Zittel, 2010, aplicações são comumente utilizadas em montagem para componentes com área de até 10 polegadas e espessura de parede de 0,10 polegadas.

2.4 Capacitores e Banco de Capacitores

De acordo com Zittel, 2010, o banco de capacitores é carregado pela fonte de alta tensão, quando o banco de capacitores atinge a tensão determinada o interruptor que carrega é

então desligado para que seja acionado o interruptor de acionamento principal. A carga elétrica armazenada é então descarregada sobre a bobina, constituída uma corrente de formato sinusoidal amortecido como mostra a figura 2.7. Como se utiliza capacitores com alta voltagem, critérios com relação à segurança devem ser levados em conta como a rigidez dielétrica do meio, curto-circuito, etc. Como não existe contato físico entre bobina e peça, a peça move-se até que sua energia cinética seja dissipada. As forças resistentes são devidas à energia inercial e energia de deformação.

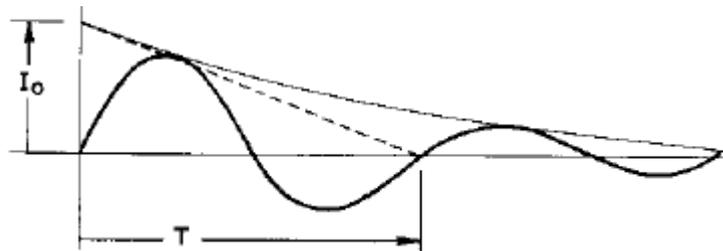


Figura 2.7 - Corrente de descarga na bobina atuadora [Zittel, 2010].

Quando a energia armazenada é descarregada sobre a bobina, a descarga é momentaneamente uma descarga oscilante, com uma forma de onda amortecida. A frequência é inversamente proporcional à raiz quadrada do produto da capacitância e da resistência elétrica da bobina e a taxa de diminuição da amplitude do pulso é proporcional à resistência elétrica da bobina.

A maior parcela de energia é fornecida pela primeira onda, as ondas em sequência transmitem menos energia para peça por causa de seu teor menor e também devido ao afastamento progressivo entre a bobina e a peça enquanto a conformação ocorre. Toda esta porção de energia que não é transferida para peça como energia cinética ou deformação aparece como aquecimento por efeito joule.

A duração da primeira onda em um pulso de pressão é inversamente proporcional à frequência de oscilação (f) conforme equação (2.1):

$$t_1 = \frac{1}{2f} \quad (2.1)$$

A duração da onda aumenta, então, com a ampliação da capacitância do banco de capacitores e com o espaçamento entre a bobina e a peça.

2.4.1 Capacitância

Quando um capacitor é carregado, seus condutores adquirem cargas iguais, mas com sinais opostos. Como estas placas são compostas de materiais condutores, elas constituem superfícies equipotenciais, ou seja, qualquer ponto sobre sua superfície tem o mesmo potencial elétrico [Tipler e Mosca, 2009]. Como existe uma diferença de potencial V entre os dois condutores. A razão da carga q pela diferença de potencial V entre os dois condutores é denominada capacitância C de acordo com equação (2.2):

$$C = \frac{q}{V} \quad (2.2)$$

2.4.2 Capacitor de Placas Paralelas

Este capacitor utiliza duas placas condutoras paralelas, que geralmente são finas folhas metálicas, separadas e isoladas uma da outra por um fino filme plástico. Este sistema permite grande área superficial em um espaço relativamente pequeno. Considerando d a distância entre as placas muito menor comparada ao comprimento e largura das placas se aplicada uma carga positiva $+Q$ em uma placa e uma carga negativa $-Q$ na outra como demonstrado na figura 2.8. As cargas irão atrair-se e se distribuir uniformemente nas superfícies das placas.

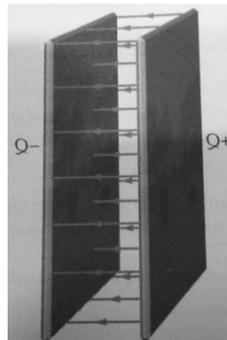


Figura 2.8 - Linhas de campo elétrico entre placas de um capacitor de placas paralelas [Tipler e Mosca, 2009].

Como as placas estão próximas, o campo elétrico \vec{E} é uniforme e sua magnitude dada pela equação 2.3:

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

A diferença de potencial (V) entre placas é igual à magnitude do campo elétrico multiplicado pela distância (d) entre as placas de acordo com as equações 2.4 e 2.5.:

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

$$V = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d = \frac{Qd}{A\epsilon_0} \quad (2.5)$$

Portanto a capacitância dos capacitores de placas paralelas é dada pela equação 2.6:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Qd/(\epsilon_0 A)} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.6)$$

A capacitância não depende nem da carga Q nem da diferença de potencial, ela é proporcional à área (A) e inversamente proporcional à distância (d) entre as placas, ou seja, depende do tamanho, forma e arranjo geométrico.

2.4.3 Capacitor Cilíndrico

Este capacitor consiste em um longo cilindro condutor de raio R_1 e uma casca condutora de raio R_2 de mesmo comprimento L , onde $R_1 < R_2 \ll L$. Considerando-se uma carga positiva $+Q$ no condutor interno e uma carga negativa $-Q$ no condutor externo, para definir a capacitância, será necessário calcular a diferença de potencial de acordo com a equação 2.7.:

$$V = |V_{R_2} - V_{R_1}| = - \int_{R_1}^{R_2} E_R dR \quad (2.7)$$

Escolhe-se como superfície gaussiana um cilindro de comprimento l e raio r localizados distante das extremidades dos condutores coaxiais de acordo com a figura 2.9.

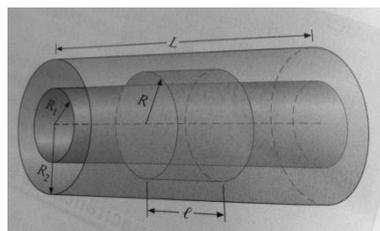


Figura 2.9 - Superfície gaussiana distante das extremidades do capacitor cilíndrico [Tipler e Mosca, 2009].

Da equação 2.7:

$$Q = \varepsilon_0 EA \quad (2.8)$$

Considerando a área da superfície gaussiana, equação 2.9:

$$A = 2\pi RL \quad (2.9)$$

Podemos determinar o campo elétrico \vec{E} conforme a equação 2.10:

$$\vec{E} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 RL} \quad (2.10)$$

Substituindo a equação 2.10 em 2.7 obtemos a equação 2.11:

$$V = |V_{R_2} - V_{R_1}| = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (2.11)$$

Utilizando a relação para capacitância obtem-se a equação 2.12 para o cálculo da capacitância para capacitores cilíndricos:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln(R_2 / R_1)} \quad (2.12)$$

A capacitância é proporcional ao comprimento dos cilindros, ou seja, depende de fatores geométricos.

2.4.4 Capacitor Esférico

O capacitor esférico consiste em duas cascas esféricas concêntricas de raios R_1 e R_2 . Neste caso, aplicando-se como superfície gaussiana uma esfera de raio R concêntrica as duas cascas obtendo-se a equação 2.13:

$$Q = \varepsilon_0 EA \quad (2.13)$$

Como a área da superfície gaussiana é a área da esfera 2.14:

$$A = 4\pi R^2 \quad (2.14)$$

Reescrevendo a equação 2.15:

$$Q = \varepsilon_0 E(4\pi r^2) \quad (2.15)$$

Determina-se o campo elétrico \vec{E} , equação 2.16:

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0(4\pi R^2)} \quad (2.16)$$

Substituindo a equação 2.16 em 2.7 obtem-se:

$$V = |V_{R_2} - V_{R_1}| = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R^2} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L} \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \quad (2.17)$$

Utilizando a relação para capacitância obtem-se a equação 2.18 para o cálculo da capacitância para capacitores cilíndricos:

$$C = \frac{Q}{V} = 2\pi\varepsilon_0 L \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (2.18)$$

2.4.5 Carregamento de um Capacitor

No momento em que um capacitor é carregado, elétrons são transferidos do condutor positivamente carregado para o condutor negativamente carregado, gerando uma deficiência de elétrons positivos no condutor positivamente carregado e o condutor negativo com excesso de elétrons. Esta transferência de carga entre os condutores carrega o capacitor, e assim, é realizado trabalho para carregar o capacitor e parte da carga é armazenada como energia potencial elétrica.

Considerando um capacitor totalmente descarregado, se (q) for a carga positiva transferida nos instantes iniciais do processo de carga do capacitor, a diferença de potencial (V) será definida pela equação 2.19:

$$V = \frac{q}{C} \quad (2.19)$$

Se pequena quantidade da carga positiva adicional (dq) for transferida do condutor negativo para o positivo através de um aumento potencial V , a energia potencial elétrica da carga e a capacitância aumentarão conforme a equação 2.20.

$$dU = Vdq = \frac{q}{C} dq \quad (2.20)$$

O aumento total da energia potencial (U) é dado pela integral de (dU) quando a carga aumenta de zero até o valor final, ou seja, o trabalho necessário para carregar plenamente o capacitor dado pela equação 2.21:

$$U = \int dU = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (2.21)$$

A parte mais importante e de maior custo da máquina são os capacitores, pois precisam resistir à alta tensão e corrente, tendo como função armazenar carga da fonte de alta tensão e então descarregar rapidamente sobre a bobina atuadora [Martel e Bultman, 2007].

Os capacitores apresentam grande variedade de tamanhos e formatos, com dois elementos básicos: dois condutores isolados. Os capacitores são uns dos principais e mais caros componentes da máquina, pois armazenam a energia (U) e descarregam rapidamente sobre a bobina atuadora. Um aspecto relevante é a resistência e indutância das conexões que devem ser as mais baixas possíveis para maximizar a eficiência do sistema [Tipler e Mosca, 2009].

Utilizando a definição de capacitância pode-se expressá-la em função de capacitância e voltagem como demonstrado na equação 2.22:

$$U = \frac{CV^2}{2} \quad (2.22)$$

Onde:

U: Energia armazenada no banco de capacitores [J];

C: Capacitância equivalente do Banco [F];

V: Tensão no Banco de capacitores [V];

2.4.6 Capacitores Conectados em Paralelo

Quando dois capacitores estão conectados com suas placas superiores ao mesmo fio condutor, apresentando um potencial em comum, da mesma maneira que as placas inferiores, diz-se que eles estão conectados em paralelo, pois compartilham uma diferença de potencial comum, como mostra a figura 2.10:

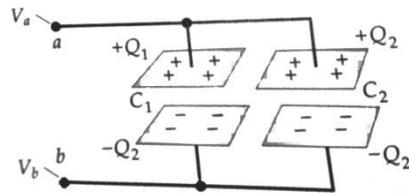


Figura 2.10 - Cargas nas placas de dois capacitores em paralelo [Tipler e Mosca, 2009].

A Carga total armazenada é dada pela equação 2.23:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1V + C_2V = V(C_1 + C_2) \quad (2.23)$$

A capacitância equivalente para associação de capacitores em paralelo 2.28:

$$C_{eq} = \frac{Q}{V} = \frac{Q_1}{V} + \frac{Q_2}{V} + \dots + \frac{Q_n}{V} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.24)$$

2.4.7 Capacitores Conectados em Série

Quando dois capacitores estão conectados de maneira que, a placa de um capacitor é conectada à placa de um segundo capacitor por um fio, sem junções, diz-se que estão conectados em série.

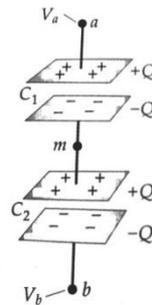


Figura 2.11 - Cargas nas placas de dois capacitores em série [Tipler e Mosca, 2009].

Considerando dois capacitores descarregados e conectados em série, quando começar o carregamento, elétrons serão bombardeados para placa superior de C1 e placa inferior de C2 com carga $-Q$. A placa superior de C1 terá carga $+Q$ que produz um campo elétrico que induz uma carga negativa igual em módulo $-Q$ na placa inferior de C1, sua carga vem de elétrons retirados da placa superior de C2. Portanto haverá uma carga $+Q$ na placa superior de C2. A diferença de potencial será a soma das diferenças de potencial elétrico, equação 2.25:

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \quad (2.25)$$

A capacitância equivalente para associação de capacitores em série, equação 2.30:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.26)$$

2.5 Bobina Atuadora e Concentrador de Campo

Dependendo do arranjo e da geometria da bobina e da peça, diferentes aplicações da conformação eletromagnética são possíveis, como por exemplo, a compressão e expansão de seções tubulares ou perfis ocos, bem como a conformação de chapas planas ou já conformadas [Psyk et. al, 2011], conforme a figura 2.12.

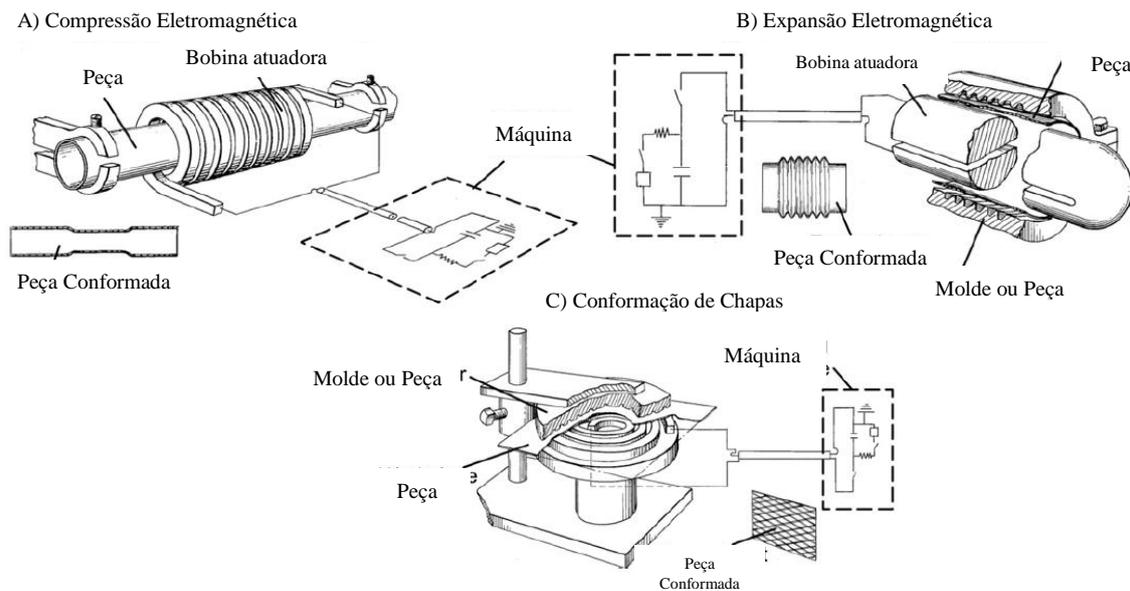


Figura 2.12 - Diferentes tipos de bobinas para conformação eletromagnética [Psyk et. al, 2011].

Segundo Kallee et. al, 2009, bobinas atuadoras e concentradores de campo são utilizados para focalizar a pressão eletromagnética nas peças de trabalho que devem ser de material condutivo. A bobina normalmente é constituída por um ou mais anéis feitos a partir de um material altamente condutivo. Um concentrador de campo é seccionado radialmente

pelo menos uma vez e é isolado contra a peça e a bobina, o diâmetro externo do concentrador é o mesmo diâmetro interno da bobina. A distância entre a bobina e o concentrador, conhecida como “gap” deve ser a menor possível.

Quando a corrente elétrica é transferida dos capacitores, a bobina induz correntes parasitas na parede do concentrador de campo que flui para sua superfície interna por meio da secção radial. O diâmetro interno do concentrador de campo é similar ao da peça, o comprimento do furo interior é normalmente menor do que a bobina atuadora provendo a concentração da pressão. Quando um concentrador de campo é utilizado, a pressão que a bobina tem que gerar é menor do que a pressão que age na peça. Comparando diretamente duas bobinas seu tempo de vida será maior.

O projeto de uma bobina atuadora é extremamente complexo, com material e construção extremamente críticos, pois devem suportar grandes quantidades de energia e pressões de até 340 MPa. As três primeiras características no projeto de uma bobina atuadora ou concentradores de campo segundo Plum, 1993, são:

- características elétricas;
- tamanho;
- resistência elétrica;

Os concentradores de campo são utilizados na conformação e operação de montagem de tubos e promovem conveniência, versatilidade, economia, eficiência e durabilidade. O concentrador tem seu diâmetro determinado pelo diâmetro da peça a ser conformada, ou da bobina quando um concentrador não é utilizado. A bobina recebe um suporte e uma estrutura isolante que são necessárias para segurança e eficiência conforme a figura 2.13.

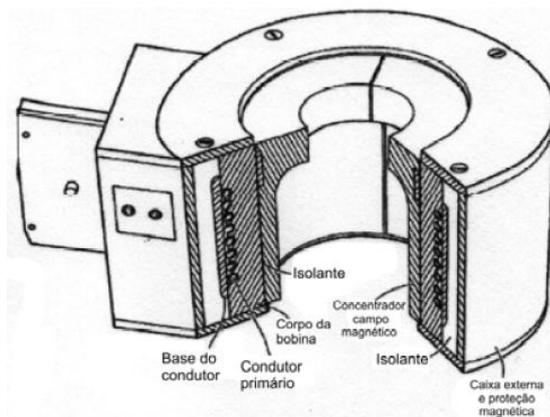


Figura 2.13 - Concentrador de campo [Plum, 1993].

As bobinas atuadoras precisam ser projetadas de tal maneira que sua indutância seja minimizada [Browder, 1962]. Quando um fio é enrolado em forma de bobina com N espiras introduzindo indutância nos circuitos elétricos, que é a capacidade de um dispositivo armazenar energia elétrica na forma de um campo magnético [Dorf, 2011], e seu valor é dado pela equação 2.27:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l + 0,42d} \quad (2.27)$$

Onde:

A: área da seção reta [m²];

l: comprimento [m];

μ_0 : permeabilidade magnética do vácuo [$4\pi \times 10^{-7}$ H/m].

Materiais com alta permeabilidade não podem ser utilizados neste tipo de aplicação por causa da alta densidade de fluxo necessária. Os campos eletromagnéticos somente podem ser formados a partir da utilização de materiais condutores de corrente. Estes materiais condutores não precisam estar conectados diretamente ao banco de capacitores, podem ser utilizados indutivamente acoplados, como em um concentrador de campo, que são utilizados para concentrar a corrente, e assim, concentrar forças em certa região da peça a ser trabalhada.

O circuito que caracteriza um dispositivo para conformação eletromagnética é um circuito RLC [Siddiqui, 2009] como visto anteriormente caracterizado pela equação diferencial 2.28:

$$i(t) = e^{\frac{-Rt}{2L}} \frac{V_0}{\omega L} \sin(\omega t) \quad (2.28)$$

Onde:

R: Resistência [m Ω];

C: capacitância [μ F];

I: indutância [H];

V_0 : Tensão [V];

ω : frequência angular [rad/s];

t: tempo [s].

A frequência angular, ω , do sistema é calculada a partir da equação 2.29:

$$w = \sqrt{w_0^2 - \alpha_N} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.29)$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.30)$$

$$\alpha_N = \frac{R}{2L} \quad (2.31)$$

Onde:

α_N : Fator de amortecimento ou frequência de *Neper*;

w_0 : Frequência angular de ressonância;

A resposta do circuito pode ser superamortecida ($w_0^2 < \alpha_N^2$), subamortecida ($w_0^2 > \alpha_N^2$) ou criticamente amortecida ($w_0^2 = \alpha_N^2$). Em casos superamortecidos e criticamente amortecidos o estado final é atingido rapidamente sem oscilação, para o caso subamortecido a resposta é periodicamente oscilatória. O Cálculo da pressão em função do tempo pode ser calculado pela equação 2.32:

$$P_{mag} = \frac{\mu_0 n^2}{2} e^{-\frac{Rt}{L}} \frac{V_0^2}{w^2 L^2} \sin^2(wt) \quad (2.32)$$

Onde:

P_{mag} : Pressão magnética [Mpa];

n : número de espiras por unidade de comprimento [n/l];

2.6 Interruptor de Acionamento Principal

Para que seja possível realizar o descarregamento da energia armazenada nos capacitores é necessária à utilização de um interruptor que seja eficiente na transmissão de altas correntes (centenas de kA). Este interruptor não pode exercer contato mecânico durante seu acionamento e devem ser fabricados, “preferencialmente, utilizando materiais com alto ponto de fusão, como tungstênio” [Paese, 2010], evitando o desgaste prematuro e soldagem dos terminais. Algumas alternativas tecnológicas podem ser utilizadas, como interruptores do tipo *spark gap*, *ignitoras*, *thyratrons* e interruptores mecânicos.

Segundo Browder, 1962, já na época em que foi escrito seu artigo eram utilizados em trabalhos experimentais interruptores do tipo spark gap, interruptores a vácuo e ignitores. Nos experimentos realizados naquela época, os interruptores do tipo ignitores foram os mais confiáveis e com maior tempo de vida para este propósito.

Primeiramente, descarta-se a utilização de interruptores de acionamento do tipo contadoras, pois altos níveis de corrente fluem de um eletrodo para o outro provocando desgaste prematuro e solda dos contatos. A pesquisa feita por Paese, 2010, levou a uma alternativa, como mostra a figura 2.14, onde um circuito secundário é utilizado para formar plasma entre os dois eletrodos. O plasma é formado por um fio de pequeno diâmetro de material condutível, este fio é evaporado por um curto circuito, e assim ocorre o acionamento do interruptor principal sem que ocorra o contato de seus eletrodos, podendo ser facilmente automatizada.

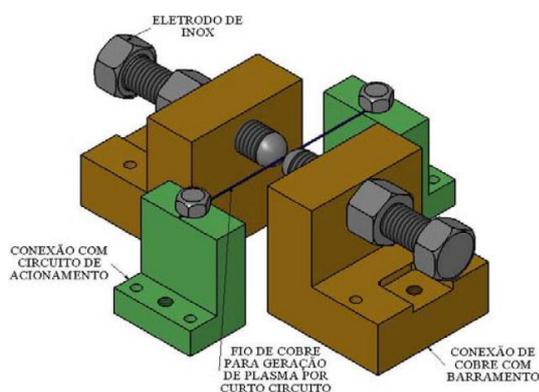


Figura 2.14 - Interruptor de acionamento principal [Paese, 2010].

Dois possíveis interruptores sem contato mecânico são o interruptor *spark-gap* e a válvula *thyatron*, ambos são interruptores de alta tensão controlados eletronicamente que suportam altos picos de corrente [Geier, et. al, 2010].

Para os autores Martel e Bultman, 2007, o interruptor é a parte mais complicada da máquina, pois precisa suportar alta tensão e ser capaz de suportar altas correntes, sem nenhum desgaste significativo ou solda de seus terminais. O interruptor proposto pelos autores, possui contatos de tungstênio montados sobre um mecanismo atuador (figura 2.15). Quando o interruptor está aberto possui uma distância de 25,4 mm entre seus contatos e quando está fechado 1,5 mm. Então quando o solenoide é ativado, os contatos começam a se fechar até que o ar entre eles diminua e os contatos conduzam.



Figura 2.15 - Interruptor principal [Martel e Bultman, 2007].

Os três principais tipos de interruptores disponíveis do tipo spark gap são:

- Passivos: possuem somente dois eletrodos e operam espontaneamente quando a voltagem aplicada excede a voltagem para auto condução.
- Interruptores acionados eletricamente: possuem três eletrodos e precisam de um circuito de disparo para iniciar a condução.
- Interruptores disparados por laser: consistem em dois eletrodos e uma lente que focaliza a radiação entre os dois eletrodos, gerando faíscas para acontecer a condução.

Interruptores semicondutores feitos a partir de pilhas de alta potência, possuem pico de corrente de 150 kA (Hartmann, 2006). Um projeto deve focar na integração segura do banco de capacitores com a bobina atuadora utilizando interruptores spark gap, *ignitrons* (Tubos de descarga com gás) e *thyristors* (interruptores semicondutores) [Neugebauer et. al, 2006]. As primeiras máquinas eram construídas utilizando interruptores spark gap e *ignitrons*, que apresentavam alguns inconvenientes como grande quantidade de manutenção e no caso *ignitrons* não necessitavam tanta manutenção, mas utilizavam como cátodo mercúrio que poderia contaminar e causar sérios danos. Interruptores semicondutores não precisam de manutenção, nem possuem o risco antes mencionado, antigamente possuíam parâmetros de performance fracos. Com o desenvolvimento de GCT- *Gate Commutated thyristors* (figura 2.16) foi possível melhorar as características de descarga deste tipo de interruptor.

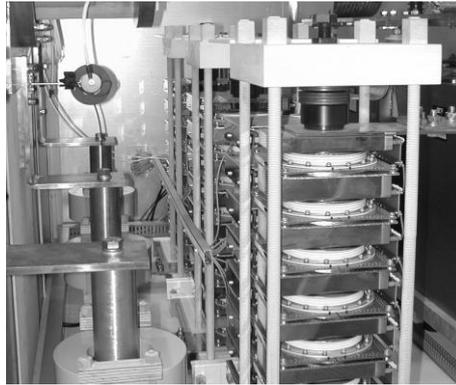


Figura 2.16 - Interruptores semi-condutores montados na planta de energia [Neugebauer et. al, 2006].

Interruptores semicondutores tiveram grande progresso nos últimos anos durante a última década, devido às capacidades de produzir dispositivos com tensão elevada e alta corrente [Wellemann, 2008]. Estes dispositivos semicondutores estão se tornando cada vez mais competitivos em relação às tecnologias mais utilizadas (*thyratrons*, *ignitrons*, *spark gaps*). Para aplicações com um alto pulso de descarga como a conformação eletromagnética utiliza-se a tecnologia do tipo *GTO-Tiristor* porque é a mais indicado, oferecem capacidade de descarga da corrente muito rápida, oferecem baixa indutância o que é necessário para este tipo de aplicação. A figura 2.17 ilustra um dispositivo projetado para 21 kV dc com 8 dispositivos conectados em série e conectados em paralelo para suportar um pulso de corrente de 210 kA, ou seja 70 kA por dispositivo com corrente reversa de até 30 kA.

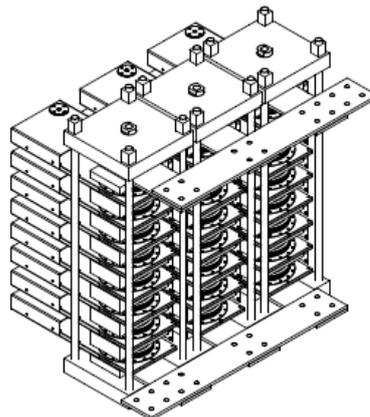


Figura 2.17 - Semicondutores conectados em série e paralelo [Wellemann, 2008].

A vida útil deste tipo de dispositivo é maior que 20.000 disparos e pode aumentar conforme a utilização de mais dispositivos em paralelo, pois a corrente seria dividida sobre estes dispositivos.

2.7 Aplicações da Conformação Eletromagnética

Com a utilização da conformação eletromagnética é possível transmitir para uma peça metálica um potente impulso através do campo eletromagnético [Browder, 1962]. De acordo com Golowin et. al, 2007, a conformação eletromagnética é uma técnica onde grandes forças são transmitidas para uma peça de material metálico e condutivo devido a interação eletromagnética. Este processo de conformação possui alta velocidade e oferece vantagens sobre a conformação tradicional, sendo que com a alta velocidade e a alta taxa de deformação a conformação da peça não é limitada pelas restrições de uma conformação tradicional. É possível alcançar limites de ductilidade superiores ao processo de conformação quase-estática. Outra vantagem é que este processo possibilita um processo de manufatura muito mais ágil.

A comparação entre o processo em alta velocidade e o processo de conformação tradicional utilizando prensa, punção e matriz é ilustrado na figura 2.18, na qual é possível observar que somente um dos lados da ferramenta é necessário para conformação com alta velocidade.

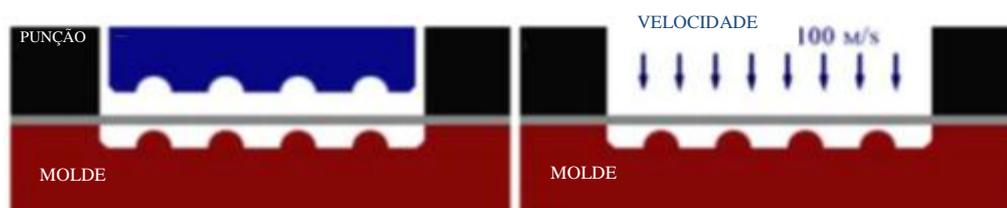


Figura 2.18 - Comparação entre a conformação tradicional e a alta velocidade [Golowin, 2007].

Ainda segundo os autores supracitados, os equipamentos para conformação eletromagnética podem ser uma pequena fração do tamanho do equipamento utilizado no processo convencional, já que não existem grandes forças estáticas. O ferramental utilizado e suportes precisam suportar a aceleração e desaceleração da peça. O impacto entre a peça e a matriz proporcionam boas dimensões na peça conformada e todo o processo pode ser automatizado.

Os autores fizeram experimentos para conformação de metal com baixa condutividade elétrica, para isto uma chapa de cobre com alta condutividade foi colocada entre a bobina e a chapa de aço inoxidável, atuando como condutor. As forças foram geradas entre a bobina e a chapa de cobre e entre a chapa de cobre e a chapa de metal não condutivo. As experiências foram realizadas utilizando uma bobina atuadora que proporciona pressão uniforme (figura

2.19) e velocidades maiores do que 100 m/s. Neste tipo de bobina, quando a energia do banco de capacitores é descarregada na bobina primária, que é isolada do canal condutor externo, este condutor e a peça formam um circuito fechado onde as correntes induzidas fluem. As forças repulsivas entre a corrente na bobina e as correntes induzidas causam na peça aceleração para fora da bobina.

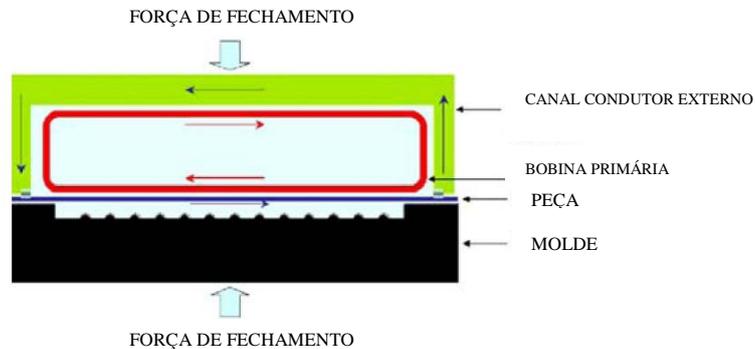


Figura 2.19 - Modelo esquemático para bobina com pressão uniforme [Golowin, 2007].

Como a bobina atuadora é repelida tanto pela peça como pelo canal condutor externo, pode-se eficientemente conformar aço inoxidável com velocidade maior que 200 m/s por uma distância de muitos milímetros.

Conforme Zittel, 2010, neste tipo de conformação não existe contato físico com a peça. O campo eletromagnético irá passar através de materiais não condutivos tornando possível o trabalho com containers não metálicos com aplicação na indústria farmacêutica. Uma vez que não existe contato mecânico entre a bobina atuadora e a peça, pode-se aplicar acabamento prévio antes da conformação, como demonstrado na figura 2.20, onde rolos anodizados para instrumentos médicos foram expandidos utilizando a conformação eletromagnética em um molde.



Figura 2.20 - Rolos anodizados para instrumentos médicos expandidos em um molde [Zittel, 2010].

Para conformação eletromagnética é necessário um sistema de alta frequência, pois se a frequência for muito baixa as correntes parasitas não serão induzidas na peça e a força que será desenvolvida será baixa. A frequência é diretamente relacionada com as características do circuito RLC e uma baixa capacitância e indutância favorecem uma alta frequência. Portanto, materiais com baixa condutividade demandam maior frequência para conformação, por isso metais como cobre e alumínio são mais indicados para utilização na conformação eletromagnética. Aços carbono podem ser conformados utilizando esta técnica, mas sempre prestando atenção na frequência. Já metais com baixa condutividade elétrica como, por exemplo, titânio ou aços autênticos são quase impossíveis de conformar diretamente por conformação eletromagnética.

Conforme os autores Schafer, Pasquale e Kallee, 2009, a frequência de descarga para uma máquina utilizada na conformação eletromagnética é governada pela indutância L e capacitância C do sistema. Consistindo no gerador de pulso, cabeamento, bobina e concentrador de campo, dada pela equação 2.33:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.33)$$

A tecnologia de conformação eletromagnética, segundo os autores supracitados, é um processo onde não existe contato entre a peça e uma ferramenta para que ocorra a conformação, solda e corte dos metais, utilizando a aplicação de um grande e rápido campo magnético.

Uma possível aplicação da tecnologia da conformação em alta velocidade é a fabricação de painéis de carroceria automotivos, devido sua baixa conformabilidade do alumínio com baixa velocidade (quase-estática), peças de alumínio tendem a falhar em cantos ou bordas quando submetidas ao processo de conformação convencional. Os painéis automotivos são muito maiores do que as peças submetidas ao processo de conformação eletromagnética [Tamhane, 2006].

Não existem limitações quanto ao tamanho das peças que podem ser feitas pelo processo de conformação eletromagnética, mas peças maiores exigem maior quantidade de energia, necessitando maior banco de capacitores e, conseqüentemente, maior custo [Schafer, Pasquale e Kallee, 2009]. Sendo então considerado processo de conformação híbrida, onde a conformação eletromagnética pode ser utilizada para áreas da peça que não podem ser

conformadas eletromagneticamente. Então peças semi-conformadas seriam submetidas ao processo de conformação a alta velocidade para completar o processo de conformação.

Segundo a Plum, 1993, existem alguns parâmetros que determinam a aplicabilidade da conformação eletromagnética:

- A conformação pode ser realizada através de um revestimento não metálico, pois o campo magnético permeia os não-condutores;
- Em comparação com os processos convencionais, o metal é acelerado rapidamente, ganhando certa quantidade de energia cinética movendo-se uma pequena distância durante o impulso. A conformação acontece após o termino deste impulso;
- Para que o processo ocorra de maneira eficiente os metais utilizados para conformação devem possuir alta condutividade elétrica como cobre, alumínio, aços baixo carbono, bronze e molibdênio. Materiais com resistividade elétrica menor que $15\mu\Omega$ são candidatos ideais;
- Metais que possuem baixa condutividade como aço inoxidável pode ser conformado utilizando grande quantidade de energia, ou um material intermediário que possua alta condutividade. Também é necessário que o equipamento opere com frequências entre 20 e 100 kHz, sendo um equipamento com maior custo;
- Não é necessária a utilização de lubrificante porque não existe atrito entre a bobina e a peça;
- Também não existe marca de contato de ferramenta nem é necessária a limpeza posterior da peça;
- Materiais que forem anodizados, banhados ou tiverem alguma preparação de sua superfície podem ser conformadas sem afetar as condições de sua superfície;
- O pico de pressão é limitado pelo material da bobina atuadora, pode-se aplicar pressões muito maior comparado aos processos de conformação convencionais;
- Na maioria dos processos de conformação eletromagnética os pulsos tem duração entre 10 e 100 μ s;
- Como o processo é elétrico e a energia é facilmente ajustada, o pulso eletromagnético pode ser controlado permitindo a repetibilidade da corrente. Se os parâmetros foram acertados para um processo particular, a única variável é o material;

- Neste processo o material é levado até sua região plástica de deformação, resultando em deformação permanente. Diferente dos processos convencionais o retorno elástico é eliminado;
- O processo de conformação eletromagnética aumenta o efeito de ductilidade porque não existem tensões mecânicas e atrito como nos processos convencionais;
- A máxima pressão que pode ser aplicada para compressão de tubos é de 340 Mpa;
- A velocidade representa uma limitação do processo, porque a conformação acontece muito rapidamente, não permitindo para embutimento profundo;
- O material em que a peça é conformada, material da matriz, não é um fator significativo no processo, mas precisa ser resistente o bastante para suportar o impacto da peça;
- Pode causar danos substanciais;
- O som é o resultado do rápido movimento da peça comprimindo o ar.

2.7.1 Conformação Eletromagnética de Tubos

Segundo Schafer, Pasquale e Kallee, 2009, a força produzida pelo campo eletromagnético conforma o tubo rapidamente, em questão de microssegundos, mas devido à inércia do tubo a conformação existe um retardo necessário para a acumulação de pressão. Enquanto esta pressão eletromagnética aumenta, alguns microssegundos irão passar antes que o primeiro deslocamento de material seja visível. Neste tempo, tensões internas são construídas dentro do tubo que primeiro deve superar a tensão de escoamento do material. Com a continuação do processo a taxa de redução do diâmetro é aumentada com a geometria final alcançada.

É possível estabelecer a correlação de que um deslocamento significativo da peça começa com 80% do máximo de corrente. A correlação entre frequência de descarga e graus de eficiência é causada por dois fundamentos:

- 1) Distância entre a bobina e a peça (*gap*): quando a distância aumenta mais que 1 mm grandes perdas podem ser identificadas. Por isto a maior porção da pressão magnética é aplicada na peça antes da distância se tornar maior que 1mm;

- 2) A máxima pressão é obtida quando a corrente induzida gera um campo eletromagnético da mesma magnitude do campo da bobina. Por exemplo, quando utilizado uma bobina com apenas uma volta a corrente induzida na peça deveria ser a corrente da bobina.

Segundo os autores citados anteriormente, a conformação eletromagnética oferece pressão uniforme ao redor de toda a circunferência sem nenhuma marca de ferramenta como resultante da utilização de um processo mecânico. Este processo não apresenta desalinhamento longitudinal ou radial quando utilizado para unir metal com mangueiras de borracha (figura 2.21).



Figura 2.21 – União de aço em mangueiras de borracha [Schafer, Pasquale e Kalee, 2009].

Ainda segundo os autores estima-se que o número de máquinas que seja utilizada na indústria esteja na faixa de 400 a 500 máquinas em todo o mundo, são utilizadas para unir materiais dissimilares como alumínio ou tubos de magnésio com aço ou incertos plásticos como assentos para carros e aviões (figura 2.22).



Figura 2.22 - União de materiais dissimilares para estruturas de assentos para ônibus e aviões [Schafer, Pasquale e Kalee, 2009].

Como nesta tecnologia não existe contato nem a utilização de consumíveis, pode-se utilizar em condições estéreis, como por exemplo, em tampas de alumínio para garrafas de remédio utilizadas na indústria farmacêutica (Figura 2.23).



Figura 2.23 - União de uma tampa de alumínio esterilizada em uma garrafa de vidro [Schafer, Pasquale e Kalee, 2009].

Utilizando esta tecnologia pode-se comprimir ou expandir estruturas tubulares, com a utilização ou não de uma matriz para assegurar tolerâncias geométricas. A união (figura 2.24) feita a partir do uso de um campo eletromagnético segundo Kalee, et. al, 2009, representa uma alternativa tecnológica e econômica à alternativa mecânica (convencional). A pressão de contato é aplicada sobre toda a circunferência sem tocar tubos ou anéis.



Figura 2.24 - União de anéis de alumínio em borracha [Kalee, et. al, 2009].

Segundo os autores Song et. al, 2004 dois fatores afetam a intensidade magnética no espaço entre a bobina e a peça. O primeiro são os parâmetros da bobina, relação entre altura e diâmetro (H/D), densidade da bobina e as dimensões da seção (altura e largura) do fio. O segundo é a posição relativa da peça e da bobina, tanto radialmente como axialmente. A posição radial é definida como “*gap*”, que é a distância entre a peça e a bobina.

Se a posição axial mudar entre a bobina atuadora e a peça, a distribuição do campo eletromagnético será diferente, e, conseqüentemente, a força na peça também. Na figura 2.25, observa-se que na conformação de tubos pode-se encontrar três modelos diferentes: um tubo menor que a bobina (a), tendo sua maior força no final do tubo; um tubo maior que a bobina (b), na qual a força mínima é perto do final do tubo; ou somente uma parte da bobina rodeada pelo tubo (c), na qual existe uma combinação de forças.

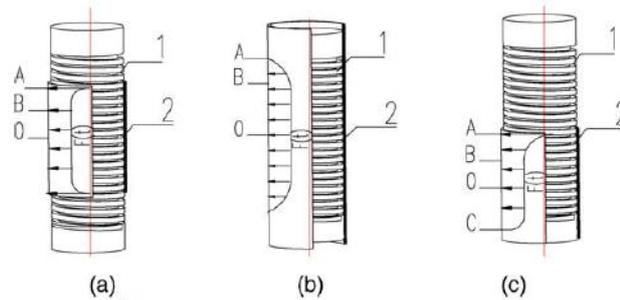


Figura 2.25 - Conformação de tubos com diferentes tamanhos de tubos [1- bobina; 2- tubo] [Song, et. al, 2004].

Em um processo de conformação convencional a força é exercida na peça através de uma matriz durante a conformação. No processo que utiliza um campo eletromagnético, considerado um processo de conformação com alta taxa de deformação, a inércia tem grande importância na ocorrência da deformação plástica.

Segundo Plum, 1993, na operação de compressão utilizando a conformação eletromagnética pode-se aplicar até uma pressão de 340 Mpa. Outro exemplo da conformação eletromagnética é a montagem do controle da altura de chama de um isqueiro com diâmetro de 3,18 mm e espessura de parede de 0,89 mm. Conformado no final do pavio como na figura 2.26.

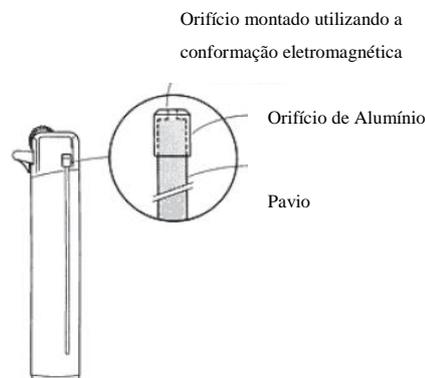


Figura 2.26 - Componente montado com conformação eletromagnética em um isqueiro descartável [Plum, 1993].

2.7.2 Conformação Eletromagnética de Chapas

Para Psyk et. al, 2011, para a realização do processo de conformação eletromagnética de chapas são utilizadas ferramentas em forma de bobina espiral plana. A chapa continua na posição inicial no começo do processo conforme a figura 2.27. Devido à aceleração, nos estágios da deformação foi observado um decrescimento da pressão devido ao aumento do “gap” (distância entre a peça e a bobina).

No momento em que a peça deixa a área de influência da bobina atuadora e o nível de pressão diminui para um valor negligenciável, o processo é continuado devido às forças inerciais, não podendo mais o movimento da peça ser influenciado.

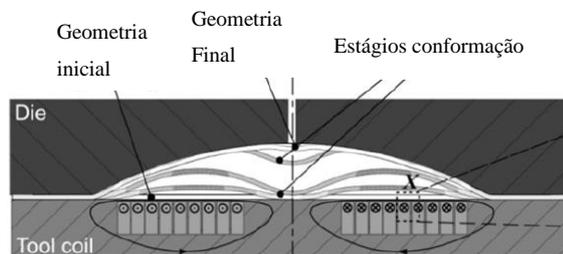


Figura 2.27 - Princípio da conformação de chapas [Psyk et. al, 2011].

A energia armazenada no banco de capacitores, ao fim do processo de conformação, é utilizada para mudar o formato da peça, entre este estágio, segundo Psyk et. al, 2011, existe uma complexa transferência de energia. Segundo Daube et. al, 1966 apud Psyk et. al, 2011, a energia armazenada no banco de capacitores conforme a equação 2.19, tem somente uma parcela transferida para a bobina. Perdas ocorrem devido ao aquecimento das conexões, interruptor principal de descarga, frações são perdidas também devido ao aquecimento da ferramenta e fugas de campo eletromagnético. Um sistema de resfriamento será necessário se a bobina aquecer demasiadamente [Sakaguchi, 2007]. O aquecimento da bobina pode ser calculado de acordo com a equação 2.34:

$$Q = I(t)^2 \cdot R_{bob} \quad (2.34)$$

Onde:

Q: Aquecimento pelo efeito Joule [J];

I: corrente que passa sobre a bobina atuadora [A];

R_{bob} : resistência da bobina atuadora [Ω];

t: tempo [t].

Bobinas atuadoras planas são utilizadas para conformação de chapas contra moldes. Experimentos na conformação de painéis automotivos (figura 2.28) com mais de um estágio. No primeiro estágio a peça é conformada convencionalmente e posteriormente atinge sua forma final utilizando a conformação eletromagnética, mostraram que a formabilidade do material é maior sobrepondo barreiras de ductilidade [Azab et. al, 2003].

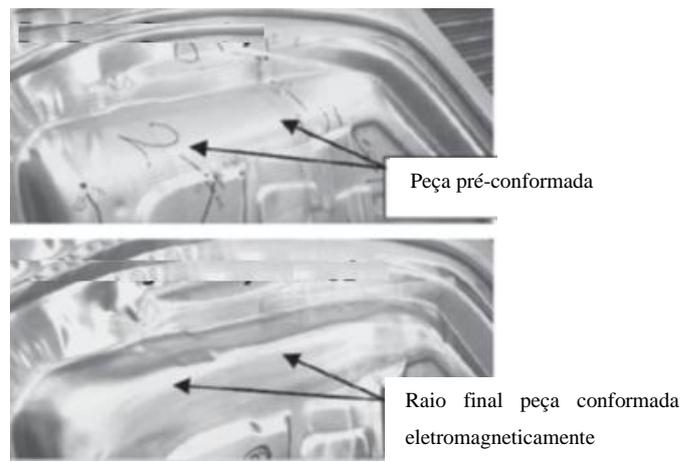


Figura 2.28 - Painel automotivo conformado convencionalmente e conformado eletromagneticamente para obter a forma final [Azab et. al, 2003].

2.8 Estado da Técnica

De acordo com Browder, 1962, equipamentos para conformação eletromagnética estavam disponíveis para indústria no mesmo ano em que seu artigo foi publicado, sendo utilizados para conformação de vasos de pressão. Para um equipamento destes os componentes mais importantes são: capacitores, que armazenam energia suficiente para as aplicações na conformação eletromagnética; interruptor, que necessita ser capaz de suportar tensões na ordem de 10 kV e correntes de milhares de amperes; bobinas atuadoras, que devem ser eficientes eletricamente, ao mesmo tempo em que suportar o mesmo impulso que elas proporcionam a peça por muitas operações. Na figura 2.29 é ilustrada uma máquina da empresa MAGNEFORM com capacidade de armazenamento de 6kJ, utilizada para conformação de tubos.

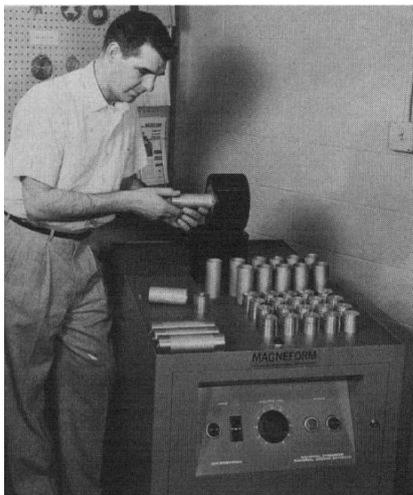


Figura 2.29 - Máquina da empresa MAGNEFORM [Browder, 1962].

Segundo Kallee et. al, 2009, as máquinas são constituídas por três partes principais: um gerador de pulso, a bobina atuadora, e, se necessário, um concentrador de campo. A figura 2.30 ilustra uma máquina fabricada pela PST Products modelo PS16-10 com capacidade de 16 kJ de energia com 10 kV.



Figura 2.30 - Máquina para conformação fabricada pela PST modelo PS16-10 [Kallee et. al, 2009].

A pressão eletromagnética necessária para conformar um material metálico está na faixa de 100 N/mm². Segundo o autor para que seja gerada esta pressão é necessário aplicar um pulso de corrente na ordem de 100kA a 1000kA. Esta energia é armazenada em um gerador de pulso ou unidade de energia, que será o termo utilizado nesta dissertação. Consiste basicamente no banco de capacitores, unidade de carregamento (fonte de tensão), e um interruptor principal para descarga de alta corrente.

Para a utilização desta máquina os autores sugerem os seguintes passos:

- A peça deve ser posicionada na bobina;
- A carga dos capacitores começa enquanto o interruptor de descarga principal da unidade de energia está aberto;
- Os capacitores devem alcançar a tensão selecionada em segundos;
- Quando a tensão for alcançada o interruptor de carga do banco de capacitores é aberto;
- O interruptor principal de descarga é então fechado, descarregando a energia armazenada no banco de capacitores à bobina atuadora, cessando após poucos ciclos de oscilação.

Segundo Geier et. al, 2010, de maneira simplificada, um sistema para conformação eletromagnética consiste em um banco de capacitores, uma bobina atuadora, um interruptor principal e a peça metálica a ser deformada. A máquina é composta por uma fonte de alta tensão, capacitores, conexões, interruptor de descarga principal. Em adição a estas características é desejável que a resistência e a indutância dos componentes seja a menor possível a fim de maximizar a eficiência do processo.

Ainda segundo os autores máquinas comerciais utilizam capacitores com baixa capacitância e alta tensão, isto é possível graças ao material isolante com que os capacitores são feitos. Na máquina proposta foram utilizados capacitores com baixa tensão selecionados com base no custo.

Esta máquina foi aplicada para conformação de chapas utilizando uma bobina espiral plana, usinada a partir de uma chapa de cobre altamente condutivo. Para que a bobina fosse isolada eletricamente e tivesse rigidez foi utilizado um bloco de poliacetal para servir de matriz conforme a figura 2.31.

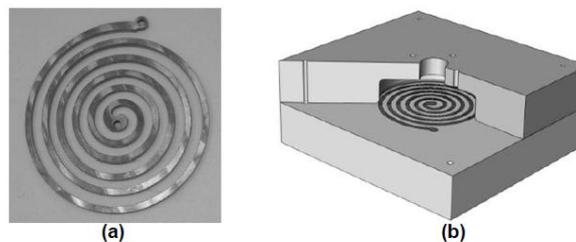


Figura 2.31 - Bobina atuadora de cobre eletrolítico (a) e vista seccionada da matriz (b) [Geier et. al, 2010].

Para realizar as conexões da máquina deveriam ser utilizados cabos coaxiais, que minimizariam a indutância. Devido ao custo elevado foram utilizadas barras de cobre com resistividade elétrica baixa, menor do que a da bobina atuadora. Foram utilizados resistores de 10 k Ω entre os terminais dos capacitores, equalizando a tensão aplicada e também servindo para descarregar os capacitores quando a máquina não estivesse sendo utilizada.

Todos os componentes foram montados sobre uma chapa de MDF, fixada com parafusos e pregos conforme a figura 2.32. Para o monitoramento e aquisição de dados foram utilizados voltímetro, resistor shunt e um osciloscópio.

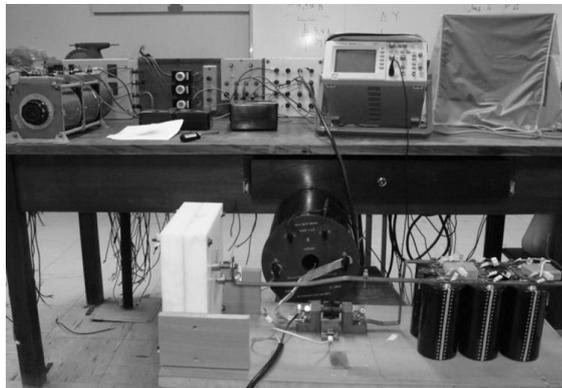


Figura 2.32 - Bancada para conformação eletromagnética de chapas de metal [Geier, 2010].

Os passos necessários para operação desta máquina segundo os autores serão descritos como:

- Checar se o sistema está energizado, e então desconectar ou descarregar se necessário;
- Posicionar a chapa na matriz, e fixar as duas partes da matriz com parafusos;
- Instalar o fio metálico no interruptor de descarga para gerar o plasma entre os condutores;
- Instalar o sistema de aquisição de dados e monitoramento e começar o carregamento dos capacitores com a energia necessária;
- Quando a carga dos capacitores estiver completa a fonte de alta tensão deve ser desconectada e então o circuito secundário do interruptor deve ser acionado.

De acordo com os autores foi possível confirmar que os componentes da máquina são submetidos à alta corrente e tensão reversa. Após 50 experimentos completados a máquina ainda encontrava-se operante, porém, foram possíveis identificar desgaste no interruptor *spark gap*, nas barras flexíveis de cobre para conexão e na bobina atuadora.

O propósito da máquina para conformação eletromagnética é produzir um alto pulso de corrente que cause uma grande força em uma peça metálica [Martel e Bultman, 2007]. Na figura 2.33 ilustra a máquina proposta pelos autores.



Figura 2.33 - Máquina para conformação eletromagnética [Martel e Bultman, 2007].

O gabinete da máquina abriga os capacitores, os relés, o controle e a fonte de alimentação. O painel frontal possui luzes para indicar o estado da máquina. Por razões de segurança a interface para o operador é montada em um pequeno console que é conectado ao CLP (Controlador Lógico Programável), e o painel de controle é conectado à máquina utilizando cabos de fibra ótica, provendo isolamento em caso de falhas.

A máquina é capaz de funcionar através de uma tomada convencional (parede) assegurando sua funcionalidade em diversos lugares. Também possui uma área enclausurada no topo da máquina (figura 2.34), onde a bobina atuadora e a matriz são acopladas às barras de cobre, tendo um sistema de travamento não permitindo o acesso do operador quando a máquina estiver carregada.



Figura 2.34 - Zona de conformação [Martel e Bultman, 2007].

O sistema de controle (CLP) controla os relés, as fechaduras de segurança, os interruptores de porta e a fonte de alimentação. A comunicação com o painel de controle é feita utilizando cabos de fibra ótica. As conexões da máquina foram feitas utilizando barras de cobre (fig 2.35) e cabos para conectar os capacitores às barras de cobre da zona enclausurada, com a menor distância possível para minimizar as perdas.



Figura 2.35 - Barras de cobre para conexão dos capacitores [Martel e Bultman, 2007].

O equipamento utilizado por Rajawat et. al, 2004, em sua pesquisa, possuía a unidade portátil apoiada sobre rodas e utilizava uma bobina de recolhimento para realizar medições da corrente na bobina atuadora que utilizava osciloscópio. Utilizava um banco de capacitores com $440 \mu\text{F}$ carregado com $2,5\text{kV}$. Após 200 disparos os principais problemas encontrados foram nos eletrodos da spark gap que sofreram certa erosão. Para os autores, a utilização de interruptores do tipo ignitron ajudaria a melhorar o desempenho do equipamento.



Figura 2.36 - Equipamento para conformação eletromagnética [Rajawat et. al, 2004].

Segundo Plum, 1993, a conformação eletromagnética pode utilizar equipamentos com alimentação manual ou com alimentação automatizada. Com um equipamento manual a produção é limitada pela velocidade que um operador pode colocar e retirar as peças. Para as operações de montagem e fixação da peça são utilizados materiais isolantes, situando a peça na posição adequada com respeito à bobina ou ao concentrador de campo. Uma variedade de dispositivos pode ser utilizada para segurar a peça durante a conformação conforme a figura 2.37 para montagem de componentes automotivos.



Figura 2.37- Equipamento para conformação eletromagnética de componentes automotivos [Plum, 1993].

Considera-se que, para a produção manual a taxa seja de 600 a 1200 peças por hora e para a produção automatizada pode-se chegar a 12000 operações por hora, porém as taxas altas são limitadas pela capacidade de carregamento do equipamento.

A carga dos capacitores deve ser em um intervalo menor que a taxa de repetição desejada. Máquinas comerciais tem sua fonte de energia entre 8 a 200 kJ. Cada capacitor é montado em uma barra de cobre ou cabo coaxial de baixa indutância. A energia armazenada é medida por um voltímetro, quando o ciclo de carga termina e o interruptor principal é acionado, acontece a descarga da energia no banco de capacitores. O sistema de energia é designado a ter baixa indutância para que o máximo de energia seja transferido para bobina atuadora durante o impulso.

3 PROJETO INFORMACIONAL

Inicia-se esta etapa com o desenvolvimento do projeto informacional, onde busca-se delimitar o problema a partir da coleta de informações para a identificação dos requisitos para elaboração do projeto da máquina, tendo como base o referencial levantado no capítulo anterior. Para a elaboração do projeto, utiliza-se a metodologia do Desdobramento da Função Qualidade (QFD), para auxiliar na criação de uma lista contendo os requisitos essenciais para o projeto de uma máquina para conformação eletromagnética.

Também é elaborada uma lista de requisitos que tem como meta traçar os objetivos e as condicionantes sob as quais os requisitos precisam ser destacados claramente [Pahl et. al, 2005], devendo ser desdobrados em:

- necessidades: devem ser satisfeitas sob qualquer circunstância;
- vontades: consideradas na medida do possível.

Os requisitos são formulados com aspectos:

- Quantitativos: informações sobre quantidade, número de peças, potência, vazão, etc..
- Qualitativos: informações sobre desvios admissíveis e requisitos especiais (resistente à corrosão, garantia contra choques, etc.).

A lista de requisitos no início do desenvolvimento representa uma tarefa preliminar e posteriormente uma tarefa sempre atualizada. Sua elaboração depende da qualidade e quantidade de subsídios e dados fornecidos. Para poder iniciar o desenvolvimento é necessário esclarecer as especificações das variáveis e dos atributos que:

- são essenciais para o conceito;
- influenciam o desdobramento;
- determinam o layout básico.

Para elaboração da lista de requisitos, será utilizado o método de desdobramento da função qualidade (QFD), onde as necessidades do usuário são convertidas em características do produto (Pahl et. al, 2005). A aplicação da metodologia de desdobramento em função da qualidade oferece vantagens como: elaboração melhorada da lista de requisitos; identificação de funções críticas do produto; definição de exigências técnicas críticas e identificação de componentes críticos.

A principal ferramenta do QFD é a casa da qualidade ou *House of Quality*. No telhado da casa são identificadas as relações recíprocas ou conflitos dos requisitos entre si (matriz de correlação) e no quadrado central as relações entre as vontades do cliente e os requisitos (matriz de relação).

Segundo Baxter, 2008, a casa da qualidade considera quatro etapas:

- 1ª Etapa - Conversão das necessidades do consumidor: o processo inicia listando todas as necessidades e as características técnicas necessárias para satisfazer as necessidades do consumidor. Avalia-se como cada parâmetro técnico se relaciona com as necessidades do consumidor. As relações podem ser positivas se contribuírem para satisfazer as necessidades do consumidor ou negativas se prejudicarem suas necessidades. Estabelece-se um grau de relacionamento conforme a fórmula:

$$r_i = N_u \cdot R_p \quad (3.1)$$

Onde N_u e R_p são as necessidades do usuário e os requisitos de projeto respectivamente.

- 2ª Etapa - Análise dos produtos concorrentes: é realizada através de uma avaliação dos consumidores com os produtos concorrentes, ou pela equipe técnica avaliando os produtos concorrentes de acordo com os requisitos técnicos de projeto.
- 3ª Etapa - Fixação de metas quantitativas: as metas são fixadas a partir da comparação com produtos concorrentes.
- 4ª Etapa - Priorização das metas: estabelecem-se prioridades para que os esforços do projeto sejam direcionados para pontos importantes. Os requisitos de projeto são quantificados através com cálculo dos valores de importância expressos pela fórmula 3.2 onde:

$$\sum_{i=1}^n I_u \cdot r_i \quad (3.2)$$

Onde I_u é o grau de importância para o consumidor e r_i é o grau de relacionamento.

Na figura 3.1 estão resumidas todas estas etapas do desdobramento da função qualidade:

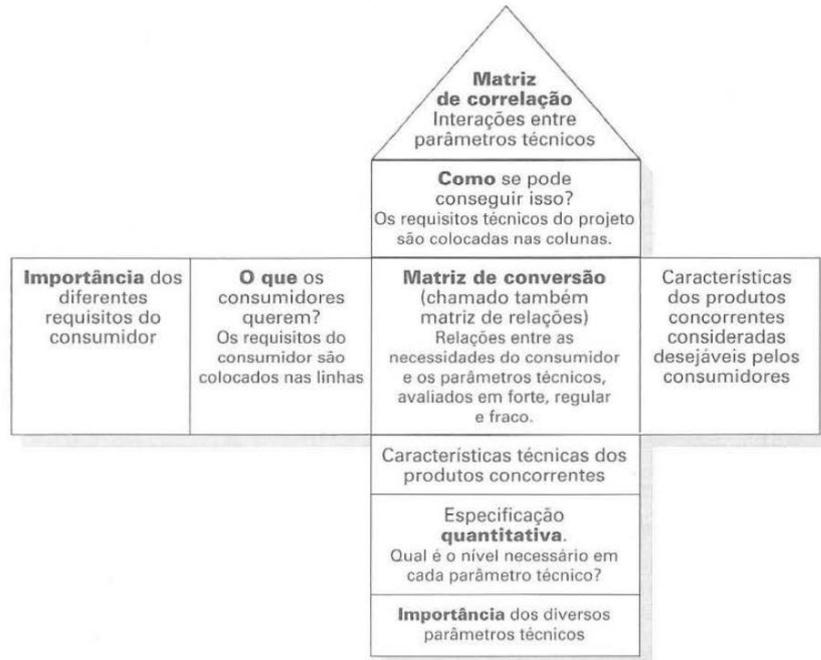


Figura 3.1 - Desdobramento da Função Qualidade [Baxter, 2008].

Estas etapas também são seguidas neste trabalho, que tem como projeto a elaboração de uma máquina para conformação eletromagnética direcionada para o desenvolvimento de produtos e processos inovadores. Os parâmetros levantados foram analisados e, mediante uma síntese destes dados coletados utilizando o método QFD, foram definidos os parâmetros definitivos para o desenvolvimento do projeto conceitual, estabelecidos conforme a figura 3.2.

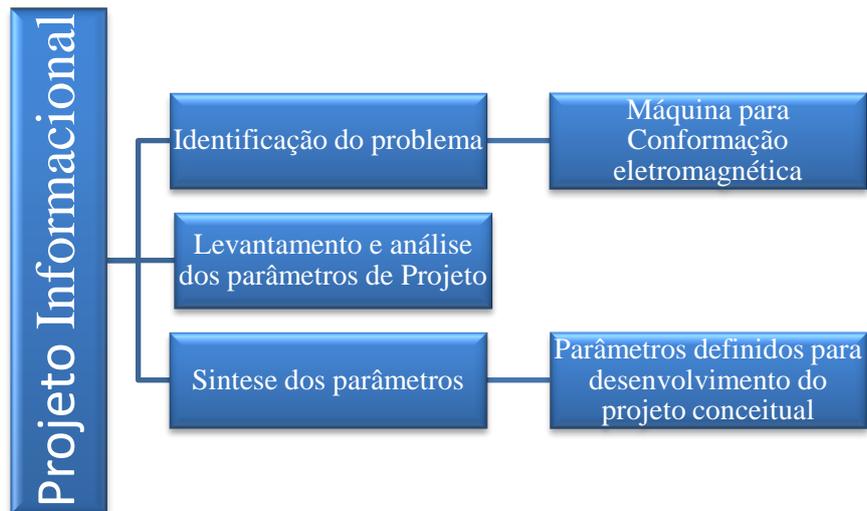


Figura 3.2 - Método utilizado no trabalho.

3.1 Identificação do problema

A conformação eletromagnética utiliza um intenso campo eletromagnético que atua na peça muito próxima a ser conformada. Através da interação eletromagnética é possível transmitir grandes forças para qualquer material que possua alta condutividade elétrica, como alumínio, cobre e aços com baixa concentração de carbono, etc.. Para isto, uma grande quantidade de energia é armazenada em um único capacitor, ou banco de capacitores, carregado por uma fonte de alta tensão. Após o carregamento dos capacitores a energia armazenada é descarregada rapidamente sobre a bobina conforme a figura 3.3:

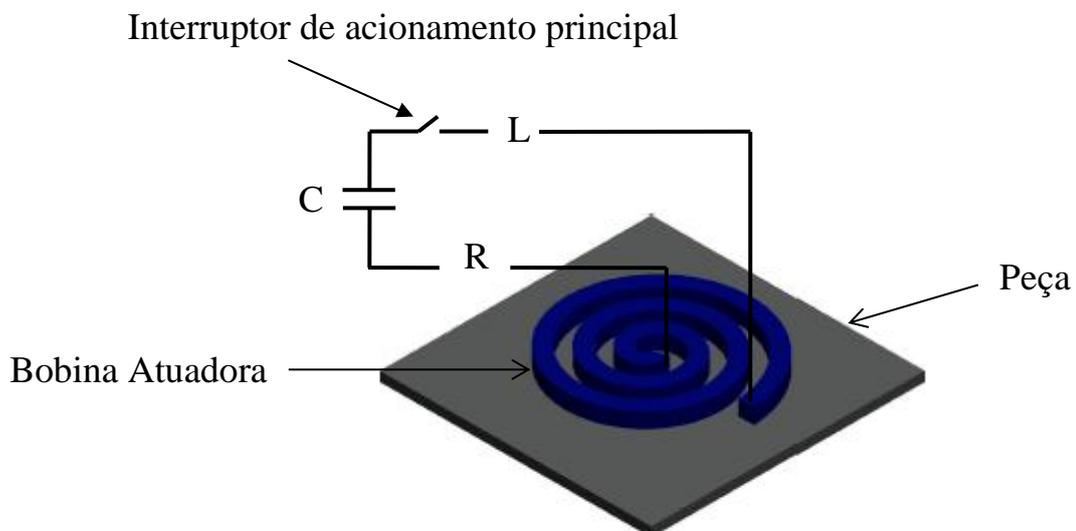


Figura 3.3 - Modelo de um sistema para conformação eletromagnética.

Quando este descarregamento acontece, a corrente flui sobre a bobina atuadora produzindo um campo eletromagnético transiente em sua vizinhança, que por sua vez induz *eddy* correntes na peça que será conformada, conhecidas também como correntes de *Foucault* ou correntes parasitas.

A corrente gerada na peça tem sentido oposto à produzida pela bobina, produzindo um campo magnético oposto, gerando repulsão entre a peça e a bobina, produzindo uma força eletromagnética conhecida como força de Lorentz. Esta força produz tensões na peça que quando excedem a tensão de escoamento do material causam deformação plástica e aceleram o metal a uma alta velocidade em um período de tempo muito curto (10 a 100 μ s). Primeiro a peça é acelerada devido a grande quantidade de energia cinética, já na conformação convencional é limitada em velocidade por peças móveis, isto permite que ocorra um aumento da ductilidade do material.

3.2 Levantamento e análise dos parâmetros de projeto

Esta é uma das primeiras etapas do projeto informacional que foi realizar uma pesquisa identificando as principais características de uma máquina para conformação eletromagnética em fabricantes deste tipo de máquina (três empresas na Alemanha: PST Technologies; Poynting; Magnet-Physik; e duas nos Estados Unidos da América Magneform e Esaform). A partir desta busca de informações pode-se montar a tabela 3.1, que contém as informações disponíveis sobre algumas máquinas comerciais.

Tabela 3.1 - Dados disponíveis sobre as máquinas comerciais para conformação eletromagnética.

Máq. Modelo	Tensão [kV]	Energia [kJ]	Dimensões [mm]	Pulsos por minuto
Ps32-16/25 – PST	16 até 25	8 até 32	800 x 1200	12
Ps96-16/25 – PST	16 até 25	48 até 96	1200 x 1600	12
Ps160-16/25 – PST	16 até 25	112 até 160	1600 x 2400	12
Poynting 01	Não esp.	3 até 54	Não esp.	Não esp.
Série M – Physik	Até 2	1 até 5	110 x 800	10
Série X – Physik	Até 3	8.5 até 50	1200 x 1600	Não esp.
Série C – Physik	Até 2	4 até 10	840 x 900	6

A partir da análise das máquinas disponíveis nesta tabela constata-se que a máxima energia disponível possuem variação de 1 até 160 kJ, isto devido a associação de capacitores para montagem do banco de capacitores. Pode-se considerar a possibilidade de em um único acionamento a conformação de múltiplas peças. Já a voltagem para o carregamento dos capacitores varia de 2000 V para máquinas com menor valor de energia armazenada e 25000 V para máquinas com maior capacidade de armazenamento. Outros dados como tipo de interruptor principal utilizado e detalhes sobre cabos e controle não estão disponíveis, o que é totalmente plausível já que são empresas e concorrem por um lugar no mercado.

Na figura 3.4 identificam-se os parâmetros da máquina para conformação eletromagnética. Estes parâmetros de limites, força, energia e potência são análogos ao processo elétrico.

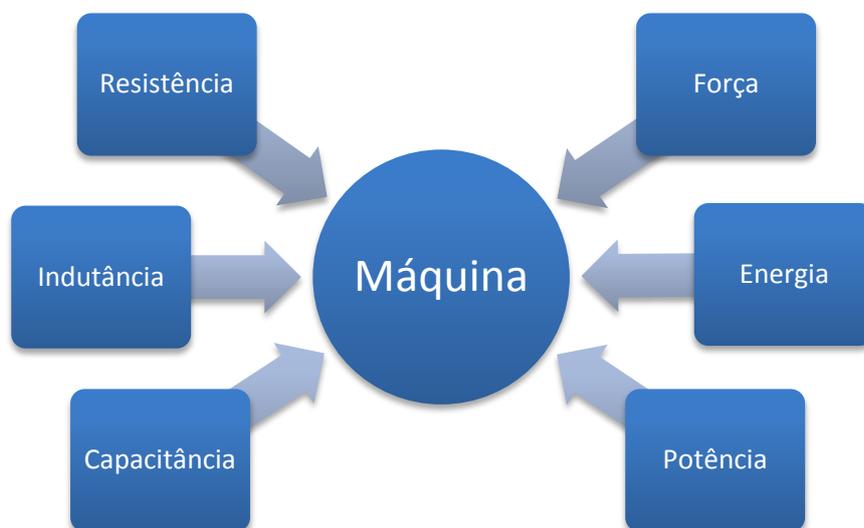


Figura 3.4 - Parâmetros da máquina para conformação eletromagnética.

Assim, a partir da determinação da força necessária para conformação de uma peça pode-se então determinar a energia que deve ser armazenada nos capacitores. Escolhendo uma situação limite máxima para força determina-se uma situação limite máxima para a energia que a máquina deve possuir para realizar esta conformação.

Uma situação interessante para a determinação seria a conformação de painéis internos de portas automotivas (figura 3.5), constituídos de alumínio, onde o emprego da conformação eletromagnética reduziria substancialmente as falhas devido a conformação difícil que este material apresenta quando submetido a conformação convencional.

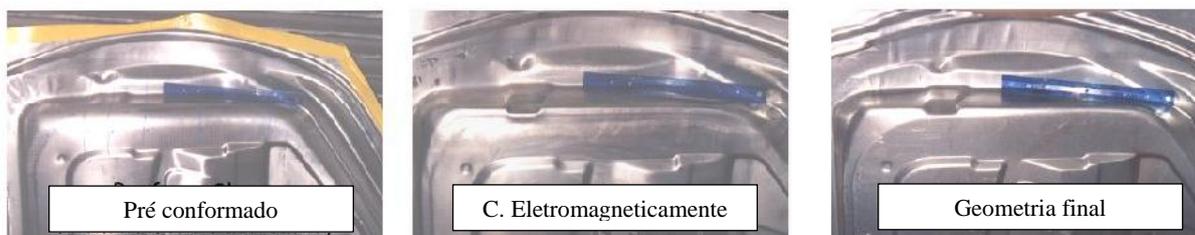


Figura 3.5 - Exemplo de conformação híbrida em três passes, para conformar painéis de porta de um automóvel [Daehn, 2006].

Para solucionar este problema a peça foi conformada convencionalmente e então conformada eletromagneticamente para atingir a forma desejada em duas operações discretas com energia de cerca de 36 kJ, mas poderia ser feita em uma operação. Pequenos impulsos para aproximar a forma final do material pode ser superior, então este tipo de investigação é totalmente empírica.

Percebe-se que este tipo de tecnologia apresenta ampla gama de situações a serem experimentadas, em outras palavras, a conformação eletromagnética necessita ainda que sejam feitas muitas investigações desde componentes pequenos até geometrias com tamanho mais extensivo e expressivo. Ainda não existe relação confiável entre o montante de energia e a geometria a ser conformada. Segundo Neugebauer, 2006, uma capacidade de armazenamento de 100 kJ é um bom parâmetro para investigações tecnológicas.

A partir disso, pode-se dizer que a quantidade de energia armazenada no banco de capacitores será por volta de 100 kJ, este valor é obtido a partir da associação de capacitores que possuam baixa capacitância e alta tensão, ou alta capacitância. Quanto à peça que poderá ser conformada, esta não necessita ser de geometria específica, pode ser de geometria circular no caso de tubos e geometria plana no caso de chapas, ou seja, este trabalho não é focado em apenas uma única geometria para conformação eletromagnética.

Pensando na seleção do capacitor ou banco de capacitores, parte-se da premissa de que a máquina para conformação eletromagnética deve ter capacidade de armazenamento de energia de 100 kJ, que seria a energia de uma máquina comercial de médio a grande porte. Arelada à energia que a máquina poderá utilizar está a tensão da fonte de alta tensão. Para esta primeira análise será utilizada uma fonte de alta tensão com 10000 V.

Para determinar a capacitância que o capacitor ou os capacitores do banco deverão ter, reescreveu-se a equação 2.22, para o cálculo da energia que pode ser armazenada no capacitor, em função da capacitância conforme a equação 3.3:

$$C = \frac{2 \cdot U}{V^2} \quad (3.3)$$

Dados utilizados:

Estima-se uma energia armazenada no banco de capacitores de 100000 J;

Tensão no banco de capacitores de 10000 V;

Definiu-se um valor de capacitância de 0,002 F ou 2000 μ F, este valor encontrado denota os valores de máquinas comerciais com baixa capacitância e alta tensão.

Como o circuito equivalente de um dispositivo para conformação eletromagnética é composto por um circuito RLC primário, constituído pela capacitância total do banco de capacitores, pelo indutor e pela resistência total contendo a bobina. Para a simulação da descarga do banco de capacitores é considerada somente a indutância e a resistência do banco de capacitores.

Outras informações sobre a máquina foram levantadas conforme citado no capítulo 2.3. A máquina é composta por três partes principais: armazenamento e controle da energia; bobina atuadora e estação de trabalho. Na tabela 3.2 são apresentados as principais partes da máquina e seus principais itens e características, que serão analisados posteriormente.

Tabela 3.2 - Principais partes e itens.

Parte	Item	Características
Armazenamento de energia e controle	Capacitor	Pode ser um único capacitor ou banco de capacitores.
	Fonte de alta tensão	Realizar o carregamento do capacitor ou capacitores.
	Interruptor de acionamento principal	Realiza a conexão entre o capacitor e a bobina atuadora.
	Controle	Realiza a interface entre o carregamento do capacitor e o acionamento da máquina, também deve controlar os dispositivos da máquina.
Bobina Atuadora	Com ou sem concentrador de campo	Converte a energia do capacitor em pressão eletromagnética.
Estação de Trabalho	Matriz	Local em que a peça é acondicionada próxima a bobina atuadora e dá formato à peça quando necessário.

3.3 Unidade de armazenamento de energia

Com base no item anterior e na revisão bibliográfica, são descritos cada um dos itens que fazem parte da máquina.

3.3.1 Capacitores

Os capacitores devem armazenar a carga da fonte de alta tensão sobre forma de energia, esta carga deve variar entre 5 e 200 kJ. Capacitores devem possuir alta capacitância e alta tensão, e isso é possível devido ao material isolante que os capacitores são feitos. Para realizar a conexão dos capacitores utiliza-se uma barra de cobre ou cabo coaxial de baixa indutância. A energia que os mesmos podem armazenar está atrelada diretamente à sua voltagem e capacitância, ou seja, quanto maior melhor.

3.3.2 Fonte de alta tensão

Componente necessário com o propósito de realizar o carregamento do capacitor ou banco de capacitores, onde um transformador eleva a tensão da linha para tensão requerida pelos capacitores. Sua capacidade controla o tempo de carga entre os ciclos de conformação. A tensão utilizada para fontes de alta tensão varia de 1 a 10kV.

3.3.3 Controle

O controle da máquina pode ser feito utilizando um controlador lógico programável (CLP), empregando um voltímetro e uma interface homem-máquina. As entradas do CLP são caracterizadas por emitirem informação ao circuito por meio de uma ação através de botoeiras ou de sensores. Já as saídas, são caracterizadas por receberem as ordens processadas e enviadas pelo comando elétrico e realizarem a ação desejada no circuito como sinais sonoros e luminosos.

3.3.4 Interruptor de acionamento principal

Na máquina existem pelo menos dois interruptores: um interruptor para o carregamento do banco de capacitores e outro interruptor de acionamento principal, para a descarga da energia do banco de capacitores na bobina atuadora. Este interruptor não deve ser único, pois para que seja possível realizar o descarregamento da energia armazenada nos capacitores é necessária a utilização de um interruptor que seja eficiente na transmissão de altas correntes sem exercer contato mecânico durante seu acionamento. Devem ser fabricados, preferencialmente, utilizando materiais com alto ponto de fusão, como o tungstênio, evitando o desgaste prematuro e soldagem dos terminais. Existem algumas alternativas tecnológicas que podem ser utilizadas, como os interruptores do tipo *spark gap*, *ignitrons*, *thyratrons* e interruptores mecânicos (Browder, 1962). O interruptor principal de acionamento deve possuir baixa indutância e suportar altos picos de corrente.

3.4 Bobina atuadora

Uma bobina atuadora é utilizada com a finalidade de converter a energia do banco de capacitores em trabalho, produzindo um campo magnético que conformará a peça. Deve ser fabricada a partir de um material com alta condutividade e que com capacidade de suportar as pressões requeridas para conformação da peça, portanto a pressão limite que pode ser gerada depende de seu material (forças de reação). Podem ser fabricadas pelo simples enrolamento de um fio condutivo ou pela usinagem de uma chapa de cobre eletrolítico em forma de espiral plana.

O projeto da geometria da bobina é uma importante consideração, assim como suas características. Para a conformação de perfis circulares são utilizadas bobinas helicoidais, tanto para compressão como expansão de tubos, e para conformação de chapas é utilizada uma bobina espiral plana. Na Figura 3.6 identifica-se os principais tipos de bobinas:

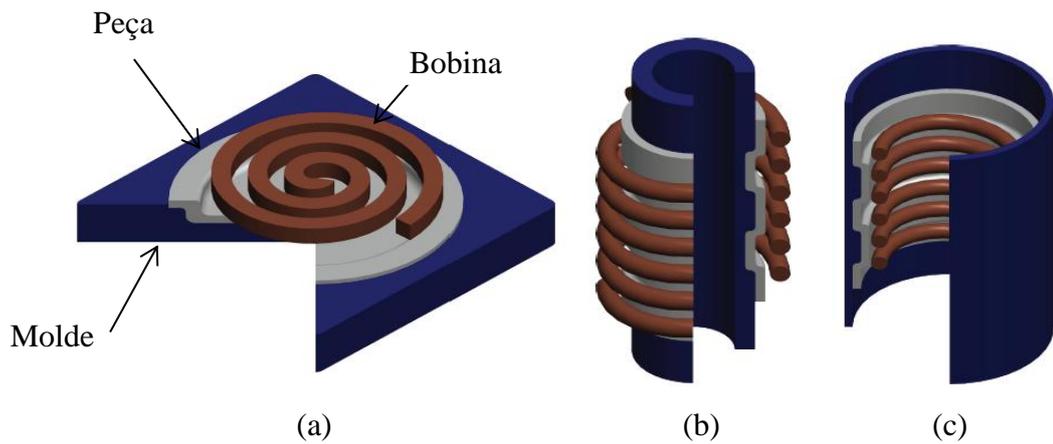


Figura 3.6 - Tipos de bobinas: em (a) Conformação de chapas; em (b) compressão de tubos e em (c) expansão de tubos.

A bobina atuadora não deve ser constituída de material com alta permeabilidade, pois neste tipo de aplicação, devido a alta densidade de fluxo necessária, campos eletromagnéticos somente podem ser formados a partir da utilização de materiais condutores de corrente. A eficiência do sistema aumenta se a distância entre a bobina e a peça for a menor.

3.5 Estação de trabalho

Na estação de trabalho o material é introduzido na bobina, no caso da conformação de tubos, ou aproximando-o, no caso da conformação de chapas. A estação de trabalho serve para manter a peça na posição correta. O material da matriz deve suportar o impacto da peça, e não deve ser um material condutor de corrente para aumentar a eficiência da máquina.

Na estação de trabalho, quando a máquina é utilizada para conformação de chapas com a utilização de um molde, a alta velocidade que a chapa atinge em contraste com o ar entre a chapa e o molde ocasionará um ruído muito alto, devido ao alto movimento da peça comprimindo o ar. Para que isto não ocorra, pode-se utilizar uma bomba de vácuo para retirar o ar contido nesta câmara, conforme esquema da figura 3.7.

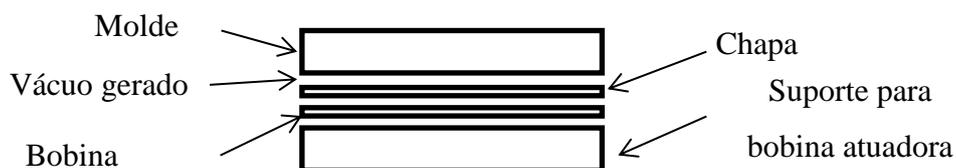


Figura 3.7 - Vácuo gerado entre a peça e o molde

3.6 Material da peça a ser conformada

O material da peça deve possuir alta condutividade elétrica como: cobre, alumínio, aços com baixa concentração de carbono, bronze e molibdênio. Para que ocorram com mais facilidade as correntes induzidas e, para se alcançar bons resultados, a resistividade do material deve ser menor que $15\mu\Omega$. Para materiais que possuam baixa condutividade, como o aço inoxidável, pode ser conformado utilizando grande quantidade de energia, ou um material intermediário que possua alta condutividade. Também é necessário que o equipamento opere com frequências entre 20 e 100 kHz, sendo um equipamento com maior custo.

3.7 Sistema de Refrigeração

Para este projeto é avaliada a utilização de um sistema de refrigeração para bobina atuadora, pois a energia armazenada no banco de capacitores tem somente uma parcela transferida para a bobina. Perdas ocorrem devido ao aquecimento das conexões e do interruptor principal de descarga. Frações são perdidas também devido ao aquecimento da ferramenta e fugas de campo eletromagnético.

3.8 Aplicação do método QFD

Conforme a metodologia descrita sobre o desdobramento da função qualidade (QFD), o projeto da máquina para conformação eletromagnética teve o seguinte desdobramento:

Determina-se o valor de importância de cada uma das necessidades do usuário (valor entre 1 para menos necessário e 5 para muito necessário), este valor é uma importância relativa do quanto cada necessidade vale para o consumidor. Na matriz de relação (quadro central) foi executado uma análise sobre como cada um dos requisitos de projeto relaciona-se com cada necessidade do consumidor. Para isto foi estabelecido um grau de relacionamento pode ser forte, médio ou fraco, caso exista. Por fim os requisitos de projeto são quantificados através do cálculo de seu grau de importância, desta maneira traduzindo as necessidades do usuário em requisitos mensuráveis de projeto.

Logo depois de realizadas estas etapas percebeu-se que esforços deveriam ser concentrados na energia armazenada nos capacitores, tensão utilizada na máquina, sistema de resfriamento, bomba de vácuo, sistema de controle, condutividade do material da bobina. Desta maneira pode-se montar uma lista de requisitos mais aprimorada que será vista ao final deste capítulo.

3.9 Síntese das necessidades

Para o projeto da máquina para conformação eletromagnética os resultados desta fase informacional são resumidos em um conjunto de exigências que o produto deve cumprir para satisfazer as necessidades. Conforme Kaminski, 2000 deve responder a seguinte questão: Qual é a necessidade a ser satisfeita?

Para facilitar a geração das especificações técnicas, o produto foi considerado como uma “caixa preta” que recebe entradas e produz saídas conforme a figura 3.9, e considerando o sistema completo foi criada uma tabela contendo a lista de requisitos tabela 3.3:



Figura 3.9 - Análise das características da máquina.

Tabela 3.3 - Lista de requisitos para o projeto de uma máquina

Requisitos para máquina de conformação eletromagnética	
Necessidade(N) Vontade (V)	Requisitos
N	<p>1. Funcional:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conformação de diversas geometrias (dependendo da bobina atuadora); • Bobina plana para conformação de chapas; • Bobina espiral para compressão ou expansão da seção radial de tubos;
N	<p>2. Interruptor de acionamento principal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deve ser eficiente na transmissão de altas correntes; • Deve suportar alta tensão (10kV); • Sem exercer contato mecânico; • Eletrodos com material com alto ponto de fusão. • Baixa indutância.
V	<p>3. Capacitores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Armazena e fornece a energia para realizar a conformação eletromagnética; • Sistema com alta frequência e capacitores favorecendo alta

	<p>frequência, com baixa capacitância e indutância;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energia armazenada entre 5 e 200 kJ.
N	<p>4. Fonte de Alta Tensão:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fornece a energia necessária para realizar o carregamento do banco de capacitores;
V	<p>5. Resistores de descarga:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realiza o descarregamento dos capacitores enquanto os mesmos não estiverem sendo utilizados;
V	<p>6. Bobina Atuadora:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material com alta condutividade elétrica, pois o campo magnético só pode ser formado a partir de materiais condutores de corrente, garantindo a eficiência do sistema; • Deve suportar a mesma força necessária para alcançar a deformação na peça (ação e reação); • A indutância deve ser mínima; • A pressão na prática deve ser limitada pela resistência do material, que é feita a bobina atuadora; • Material com boa resistência mecânica; • Deve ser montada sobre um material isolante para que não ocorra curto-circuito entre suas voltas
V	<p>7. Conexões:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baixa indutância; • Maximizando a eficiência.
N	<p>8. Controle lógico programável:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para realizar o controle do carregamento dos capacitores, acionamento do interruptor de descarga principal e relés.
V	<p>9. Matriz de conformação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precisa ser de material que suporte o impacto da peça;
V	<p>10. Bomba de vácuo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necessária para retirar o ar contido entre a cavidade e a peça para conformação de chapas.
N	<p>11. Fonte de alta tensão:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece a energia necessária para realizar o carregamento do banco de capacitores.
V	<p>12. Material da peça:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deve possuir alta condutividade; • Deve ter seu caminho contínuo; • O ajuste entre a peça e a bobina “gap” deve ser o menor possível.
N	<p>13. Dispositivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relés de segurança; • Botão de emergência; • Fechadura eletrônica.
V	<p>14. Sistema de refrigeração:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de refrigeração para bobina atuadora.

Neste capítulo o problema foi identificado e formulado em termos técnicos com a utilização do desdobramento da função qualidade e de lista de requisitos. Assim, pode-se refletir na solução para máquina de conformação eletromagnética que será abordada no próximo capítulo.

4 PROJETO CONCEITUAL

O quarto capítulo tem como objetivo apresentar um conceito para a máquina de conformação eletromagnética, sendo a fase onde o projeto ganha visibilidade, materializando o conceito através de um modelo virtual auxiliado por projeto assistido por computador, estabelecendo estruturas físicas e funcionais do conceito. Juntamente com as informações que se encontram no capítulo anterior, o esclarecimento da tarefa, projeto informacional, obteve-se um princípio de solução, que contemplasse as necessidades e especificações de projeto. Para os principais componentes da máquina será realizada uma avaliação das possibilidades existentes e, por fim, com a união destes componentes será gerado um conceito para a máquina para conformação eletromagnética.

4.1 Seleção

Conforme visto nos capítulos anteriores, a máquina para conformação eletromagnética necessita basicamente de: um capacitor ou banco de capacitores, uma fonte de alta tensão para seu carregamento, um interruptor principal de acionamento, bobina atuadora, um sistema de controle, uma estação de trabalho contendo uma matriz para conformação (caso necessário), dispositivos de segurança, conexões e a peça que será conformada podendo ser um tubo ou chapa.

A etapa do projeto conceitual é prevista para vir logo após a etapa de esclarecimento e “com os critérios de projeto definidos pela especificação de suas características será necessário conceber, inventar, adaptar, juntar e sintetizar soluções de sistemas que serão o produto final do projeto” (Kaminski, 2000).

Este não é um projeto evolutivo, uma vez que o dispositivo existente desenvolvido pela equipe de trabalho GPF AI e LAMEAE, não apresenta características para utilização na indústria, mas serviu como base para o desenvolvimento deste trabalho.

O projeto é um tanto restrito, pois não é possível a variação do conceito fonte de energia que deve utilizar o eletromagnetismo para que ocorra a conformação da peça, o que irá variar são os componentes necessários para que isto ocorra como interruptor de acionamento, capacitores, bobina atuadora, controle e fonte de tensão.

Assim definidos os parâmetros de projeto na fase informacional, partiu-se para as etapas que serão seguidas para o projeto conceitual, mostradas através da figura 4.1.



Figura 4.1 - Etapas do Projeto Conceitual.

4.2 Geração do conceito

Para o desenvolvimento de uma máquina para conformação eletromagnética, foram geradas duas alternativas figura 4.2 e 4.3 estas duas primeiras alternativas são apenas um conceito geral que serve como base para todo o desenvolvimento deste projeto, onde a máquina seria composta pelo gabinete inferior, como a unidade de armazenamento, e pelo gabinete superior, que conteria a unidade de trabalho, contendo um barramento de cobre para conexão da bobina atuadora que poderia ser de compressão, expansão de tubos e conformação de chapas e um painel de controle.

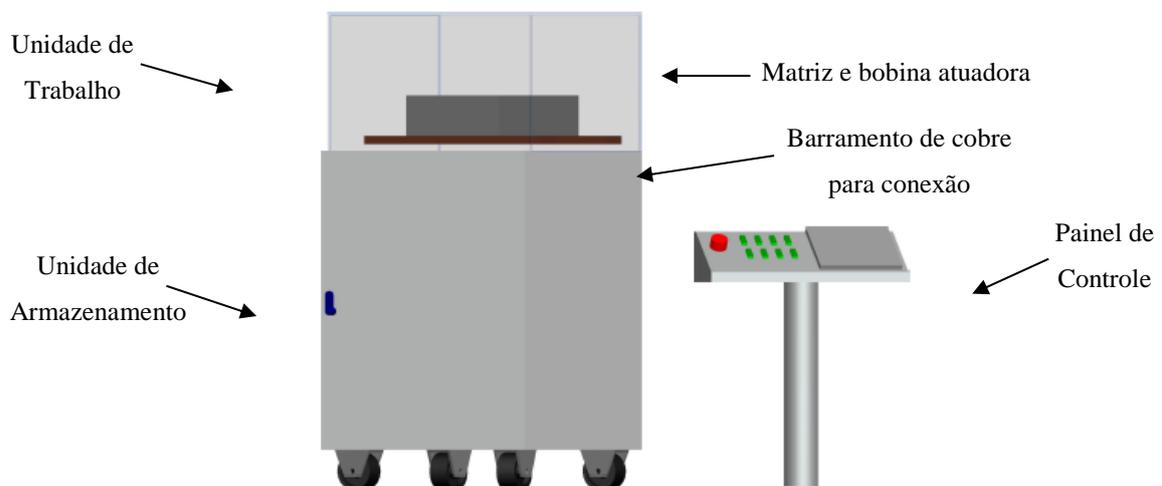


Figura 4.2 - Conceito 01 de uma máquina para conformação eletromagnética.

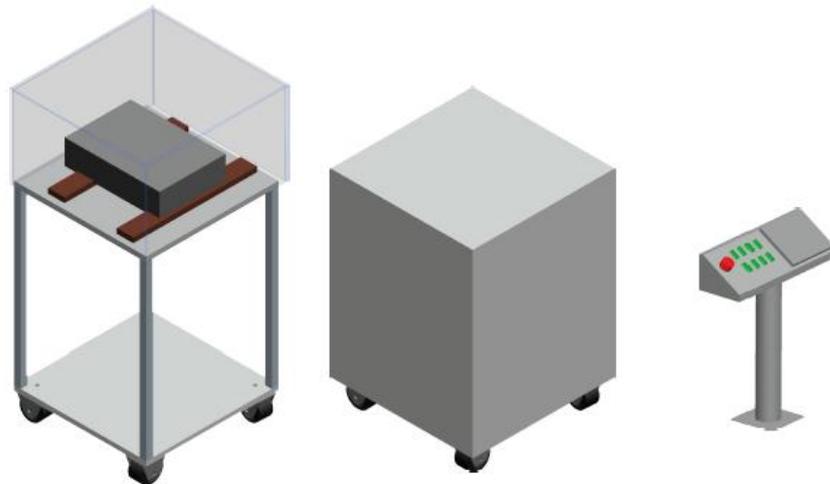


Figura 4.3 - Conceito 02 de uma máquina para conformação eletromagnética.

Estes conceitos foram baseados nas três partes principais da máquina, unidade de trabalho; armazenamento e controle; e a bobina atuadora. As duas alternativas geradas são muito semelhantes entre si, na primeira alternativa o sistema é um único sistema, na segunda alternativa o sistema é dividido em módulos um módulo para unidade de trabalho, outro para o armazenamento de energia.

No interior da unidade de armazenamento de ambas alternativas (figura 4.3) estariam os capacitores para formação do banco de capacitores, o interruptor de acionamento principal, bomba de vácuo, sistema de refrigeração e sistema de controle.

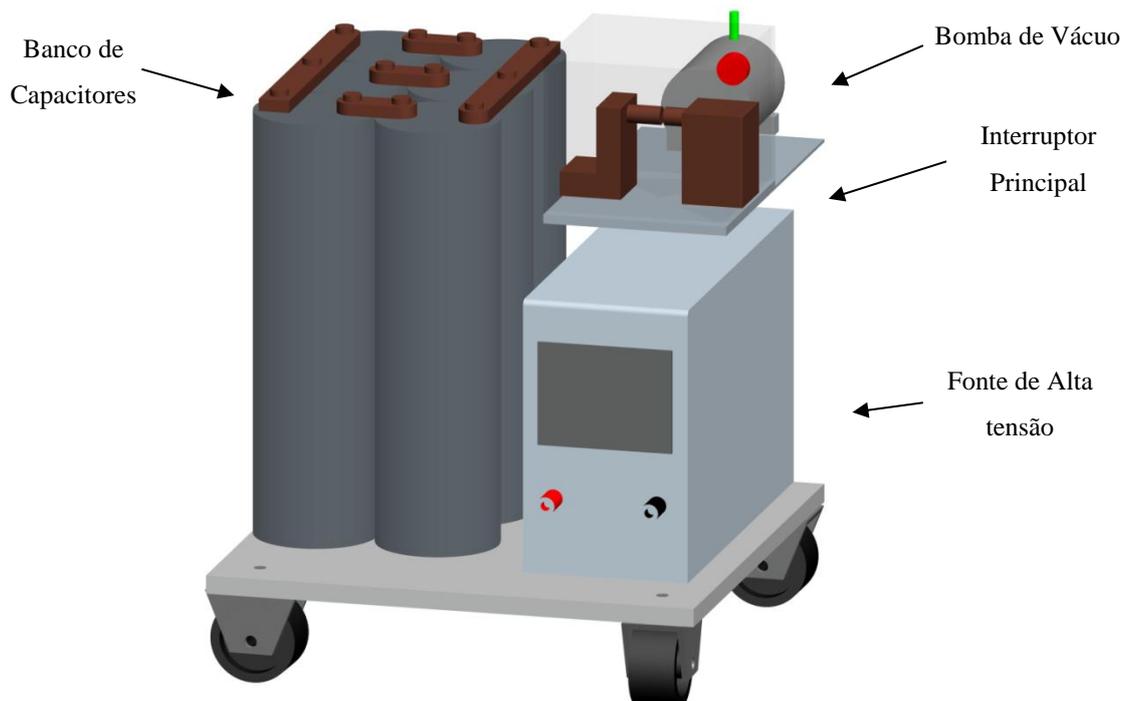


Figura 4.4 - Conceito unidade de armazenamento.

Os conceitos aqui apresentados comparados com as máquinas comerciais são de maneira qualitativa mais compactos, pretende-se utilizar um sistema para que seja feito o resfriamento da bobina atuadora e um sistema de vácuo para retirar o ar entre a bobina e o molde, diferenciais que não são encontrados nas máquinas comerciais. Para selecionar o conceito a ser utilizado neste projeto foi feita uma matriz de decisão conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Matriz de decisão para seleção do conceito

Atributo	Peso	Conceito 01		Conceito 02	
		nota	nxp	nota	nota
Funcional	0.3	5	1.5	5	1.5
Espaço Físico	0.2	4	0.8	2	0.4
nº componentes	0.2	4	0.8	3	0.6
Custo (qualitativo)	0.3	3	0.9	2	0.6
Total	1,0		4.0		3.1

A primeira alternativa servirá como base para o desenvolvimento do conceito, pois possui alguns pontos fortes como: um único módulo contendo todos os componentes, painel de controle separado da máquina. A partir da análise inicial deste primeiro conceito, foram selecionados os componentes para máquina. Para classificar as alternativas segundo os critérios de projeto foi utilizada a matriz de decisão, que tem como entrada os atributos (critérios de projeto) nas linhas e as alternativas desenvolvidas nas colunas. São atribuídos pesos a cada atributo, tendo sua importância relativa em função da nota atribuída (por exemplo, de 0 a 5) a cada alternativa proposta, tendo a avaliação relativa de cada uma para aquele atributo. Somando estas notas pelos seus pesos, obtêm-se os valores globais que permitem a classificação e seleção da melhor alternativa.

Para início da seleção dos componentes foi então criado um fluxograma contendo a metodologia para o projeto de uma máquina para conformação eletromagnética, conforme a figura 4.5.

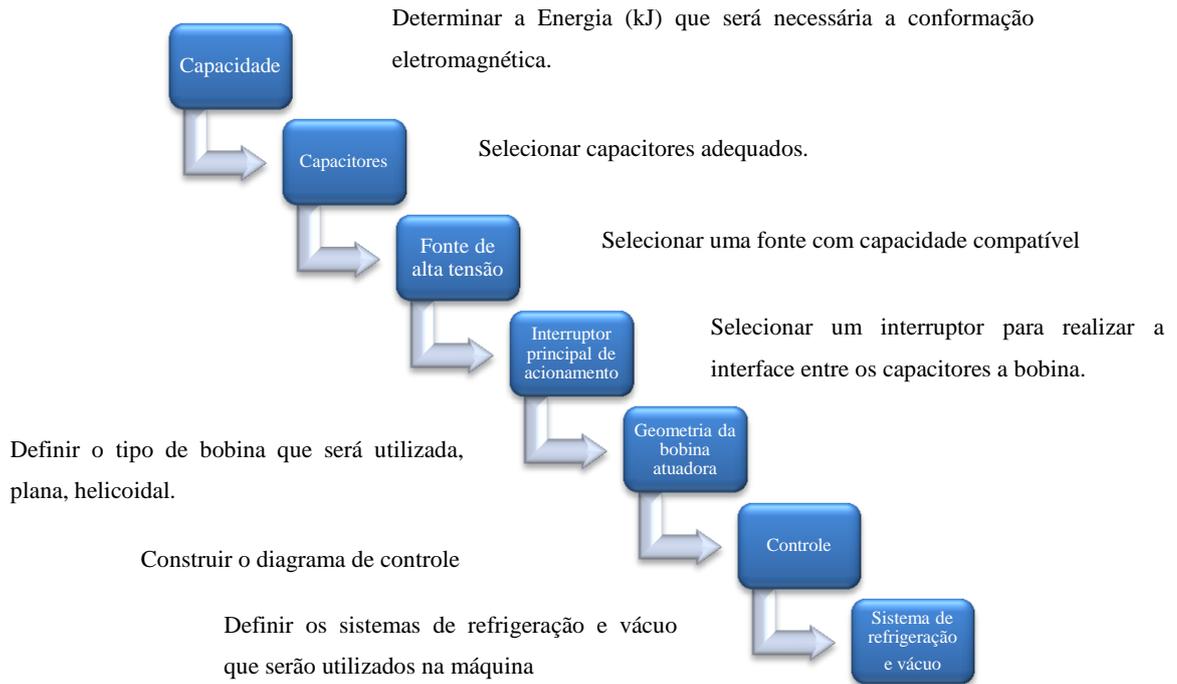


Figura 4.5 – Metodologia para máquina para Conformação Eletromagnética

4.3 Seleção dos capacitores

O parâmetro inicial para seleção dos capacitores é a energia total que os mesmos devem armazenar: 100 kJ para descarregar sobre a bobina atuadora durante o processo de conformação eletromagnética. O valor da energia depende da voltagem e da capacitância total do banco de capacitores, com a tensão máxima de 10 kV a capacitância total ficou na ordem de 0,002 F.

A partir deste valor definido, buscaram-se capacitores comerciais que satisfizessem esta necessidade. Na indústria brasileira não foram encontrados capacitores que tivessem alta tensão e baixa capacitância. Para este projeto foram selecionadas algumas alternativas de indústrias fabricantes de capacitores, conforme tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Alguns capacitores disponíveis no mercado.

Capacitor Modelo	Capacitância [μF]	Indutância [nH]	Tensão [kV]	Corrente [kA]	Dimensões [mm]	
3565CMF3408	4080	300	5.65	94	178 x 406 x 914	
4130CMF3120	1200	400	13	57	152 x 406 x 914	
3650CMF3480	4800	300	6.5	114	152 x 406 x 914	
3565CMF3816	8160	150	5.65	188	343 x 406 x 914	
3650CMF3750	7500	150	6.5	245	305 x 406 x 724	
32327	830	40	11	150	305 x 407 x 699	
32312	680	35	11	125	280 x 356 x 699	
32259	500	40	10	100	280 x 356 x 674	
3300CMX2222	22200	170	3.0	100	165 x 406 x 813	
3330CMX2205	20500	170	3.3	100	165 x 406 x 559	
3600CMX3550	5500	330	6.0	50	165 x 406 x 813	
3660CMX3500	5000	370	6.6	50	165 x 406 x 559	
3900CMX3250	2500	610	9.0	30	165 x 406 x 813	
4132CMX3115	1150	1190	13.2	20	165 x 406 x 559	

Fonte: catalogo *General Atomics*

Em uma primeira análise, já foi possível identificar que existem alternativas com alta capacitância e alta tensão, devido a utilização de um filme metálico como material dielétrico, que são adequados para este tipo de aplicação. Todos os capacitores da lista são projetados para operações com descarga da energia em milissegundos. Também percebe-se que a tensão da fonte de tensão deverá ser revista. Este fato de poder modificar o projeto sem fugir as especificações já determinadas, é o que torna a tarefa de projetar interessante, pois se pode “jogar” com determinados parâmetros para obter a melhor solução.

Para algumas alternativas de capacitores é necessário realizar certa associação (série, paralelo ou as duas). Já outras alternativas não empregam associação, podendo-se utilizar apenas um capacitor. Para facilitar a visualização destes detalhes foi criada a tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Características dos capacitores.

Capacitor Modelo	Associação	Capacitância [μ F]	Voltagem [kV]	Energia [kJ]	Quantidade Capacitores
3565CMF3408	-	4080	5.65	86	1
4130CMF3120	-	1200	13	101	1
3650CMF3480	-	4800	6.5	101	1
3565CMF3816	-	8160	5.65	130	1
3650CMF3750	-	7500	6.5	158	1
32327	S – P	1245	16.5	170	3
32312	S – P	1020	16.5	138	3
32259	S – P	750	15	85	3
3300CMX2222	-	22200	3.0	100	1
3330CMX2205	-	20500	3.3	112	1
3600CMX3550	-	5500	6.0	99	1
3660CMX3500	-	5000	6.6	109	1
3900CMX3250	-	2500	9.0	101	1
4132CMX3115	-	1150	13.2	100	1

A partir desta tabela identifica-se os diversos capacitores que podem ser utilizados, com ou sem associação entre os mesmos. Para decidir sobre qual capacitor seria utilizado foi montada uma matriz de decisão, utilizando como alternativas aqueles capacitores que tiveram a energia de armazenamento por volta de 100 kJ e uma tensão máxima menor que 10 kV conforme a tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Matriz de decisão para seleção dos capacitores.

Atributo	Peso	3300CMX2222		3650CMF3480		3600CMX3550		3900CMX3250	
		nota	nxp	nota	nota	nxp	nxp	nota	nxp
Energia	0.3	4	1.2	4	1.2	4	1.2	4	1.2
Tensão	0.2	5	1.0	2	0.4	2	0.4	1	0.2
Capacitância	0.2	5	1.0	2	0.4	3	0.6	1	0.2
Custo	0.3	2	0.6	2	0.6	2	0.6	2	0.6
Total	1,0		3.8		2.6		2.8		2.2

A partir dessa análise, pode-se definir que tipo de capacitor poderia ser utilizado, optando por um único capacitor com a possibilidade de armazenar 100 kJ com tensão máxima

de 3.0 kV, e pico de corrente de 100 kA, pode-se assim, dar continuidade a definição dos próximos componentes. Este tipo de capacitor possui resistores de descarga internos para fornecer uma maneira de descarregar o capacitor quando não estiver sendo utilizado. Possui como característica a constante de tempo de 10 segundos, o que possibilita determinar a resistência do capacitor, que não é fornecida pelo fabricante segundo a equação 4.1:

$$\tau = R \cdot C \quad (4.1)$$

Onde τ , R e C são a constante de tempo, resistência e Capacitância do capacitor respectivamente. Para este capacitor a resistência é 0,45 m Ω . A unidade de armazenamento tem o seguinte esquema demonstrado na figura 4.6 utilizando o software *Pspice* para demonstrar o descarregamento do capacitor sobre os resistores de descarga:

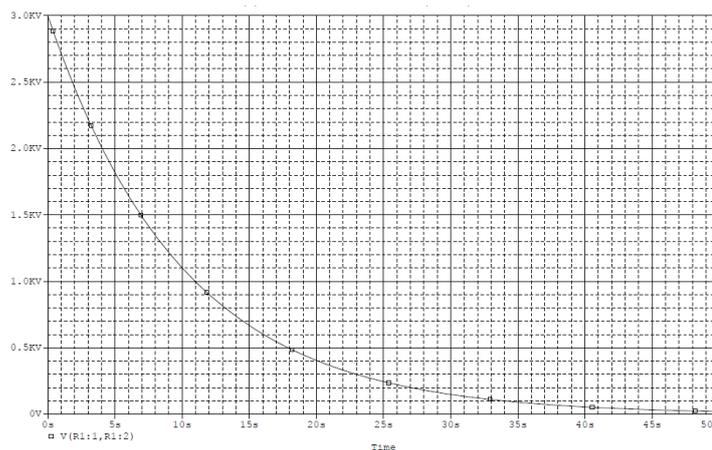


Figura 4.6- Descarga do capacitor no resistor.

Para unidade de armazenamento escolhida com 100 kJ de energia máxima, este valor de energia não é fixo em 100 kJ, varia conforme a tensão que é imposta no capacitor. Desta maneira pode-se avaliar a energia necessária para cada tipo de conformação (compressão, expansão, chapas), que é um dos objetivos desta máquina: verificar o intervalo de eficiência máxima de energia que deverá ser utilizado para cada tipo de perfil a ser conformado. Na figura 4.7 verifica-se a variação de energia em função da tensão aplicada à unidade de armazenamento.

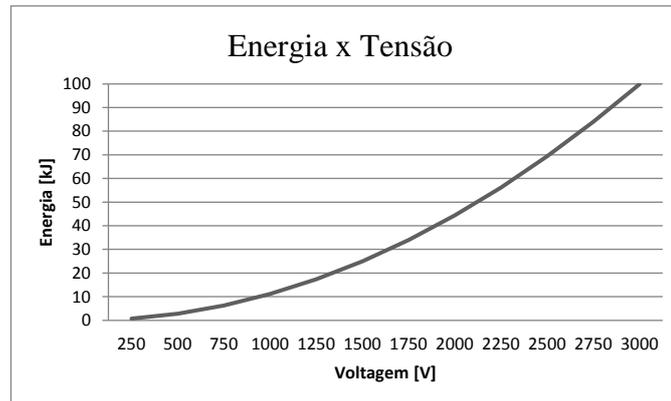


Figura 4.7 - Energia em função da voltagem aplicada nos capacitores.

Neste gráfico verifica-se que a energia varia em função da voltagem que o capacitor pode armazenar, lembrando que este capacitor não pode ser do tipo eletrolítico, pois seu isolamento é relativamente fraco e a inversão da tensão que pode danificar o capacitor.

4.4 Seleção do interruptor de acionamento principal

Para transmitir um alto pulso de corrente na ordem de milhares de amperes, algumas poucas alternativas estão disponíveis:

Tabela 4.5 – Alternativas de interruptores principais

Interruptor	Acionamento	Características
<i>Spark-gap</i>	Interruptor acionado eletricamente utilizando um circuito secundário de disparo, ou quando os dois eletrodos são aproximados até que ocorra a condução devido a diferença de potencial.	Suporta alta corrente e tensão, mas necessitam constantemente manutenção devido ao seu desgaste.
<i>Ignitron</i> ■	Válvula eletrônica de arco de mercúrio refrigerada a água, utiliza três eletrodos.	Utiliza como cátodo mercúrio que pode contaminar e causar sérios danos a saúde.
<i>Tiristor</i> ■	Possui três eletrodos como o <i>ignitron</i> , mas não necessita de refrigeração, não utiliza mercúrio utiliza um retificador controlado.	Possui capacidade reduzida de sobrecarga e sobrecorrente.
<i>GTO</i> (Gate- <i>Turn Off</i> <i>Thyristor</i>)	O circuito de disparo é formado por uma comporta (gate) que contém o cátodo, onde toda corrente do cátodo é transferida para a comporta rapidamente. Descargas de alta corrente em poucos segundos (μ s).	Utilizado para curtos pulsos de descargas com alta corrente, possui baixas perdas de condução, limitado pela temperatura atingida.

■Fonte: Say, 2004.

Dentre as alternativas disponíveis, a última discutida tem sido bastante utilizada para esta aplicação com bons resultados, esta alternativa foi a selecionada em função de suas características.

4.5 Sistema de Refrigeração

Considerando as características deste projeto trata-se da criação de uma máquina para conformação eletromagnética para avaliação de sua utilização na indústria, precisa-se estudar o efeito do aquecimento sobre a bobina atuadora, uma vez que devido a passagem da corrente I . Existe um aquecimento devido a resistência do condutor R durante o tempo que esta corrente flui sobre a bobina atuadora. Para determinar a corrente de descarga neste circuito, foi considerado um circuito de segunda ordem que é caracterizado pela soma do número de capacitores com o número de indutores, no caso da máquina para conformação eletromagnética foi considerado um capacitor (ou associação de capacitores), a indutância e resistência do sistema e da bobina atuadora conforme a figura 4.8.

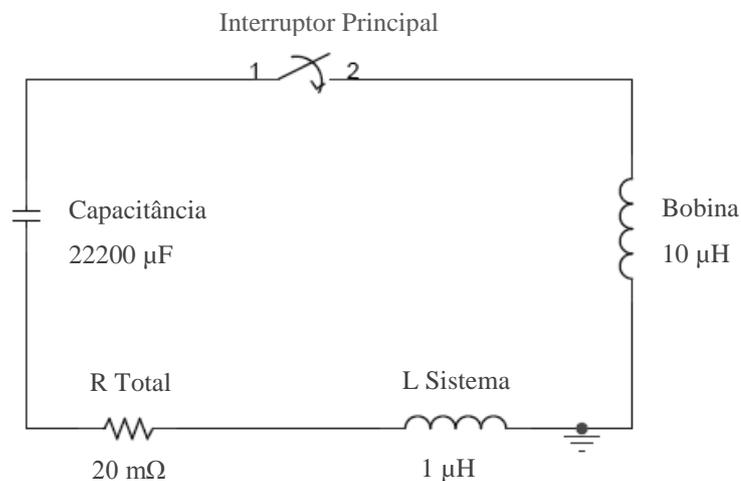


Figura 4.8- Circuito RLC.

A corrente de descarga foi simulada utilizando a equação 2.28 no *software matlab*, com resposta do circuito subamortecida pois w_0 (Frequência angular de ressonância) dada pela equação 2.30 é superior a α_N (Fator de amortecimento) dado pela equação 2.31. No gráfico da figura 4.9 podemos verificar que o pico de corrente acontece em poucos milissegundos com pico de corrente de aproximadamente 150kA.

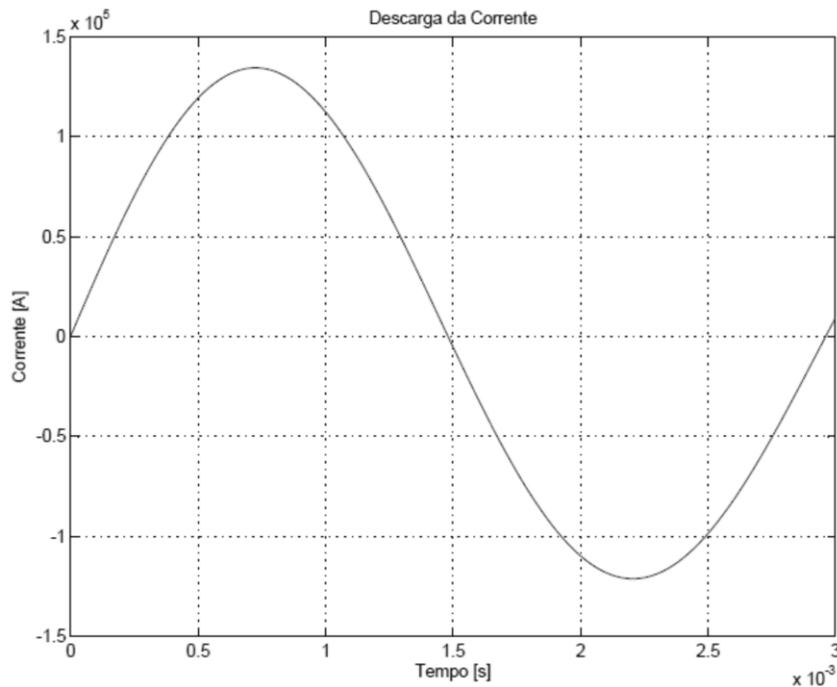


Figura 4.9- Gráfico corrente de descarga na bobina atuadora.

Utilizando a equação 2.34 para o cálculo da dissipação de energia, efeito joule, considerando a passagem de um pico de corrente na bobina atuadora, o sistema possui uma resistência total de 20 mΩ, este valor de resistência foi escolhido pois é um valor semelhante ao de uma bobina atuadora para conformação de chapas (aproximadamente 1,5 mΩ) somado a resistência do sistema (em torno de 18,5 mΩ).

Primeiro é necessário que a equação 2.34 seja integrada no intervalo de zero até o infinito, pois a descarga acontece em milissegundos.

$$P = \int_0^{\infty} Ri(t)^2 dt \quad (4.2)$$

Desta maneira estamos fazendo uma simplificação, pois assume-se que a descarga ocorre em menos de um segundo, aproximadamente 3 milissegundos.

Substituindo a equação (2.28) na equação (4.2) obtemos a equação (4.3):

$$P = \int_0^{\infty} R(Ie^{-\alpha t} \text{sen}(\omega t))^2 dt \quad (4.3)$$

Para determinar a variação de temperatura que ocorre na bobina em função do aquecimento por resistência foi utilizada a equação (4.4) fundamental da calorimetria:

$$Q = mc\Delta T \quad (4.4)$$

Onde:

Q: Quantidade de calor [cal];

m: Massa [g];

c: Calor específico [cal/g°C];

ΔT : Variação da temperatura [°C].

Igualando a equação (4.3) com a equação (4.4) obtemos a equação (4.5):

$$mc\Delta T = \int_0^{\infty} R(Ie^{-i\alpha t} \text{sen}(\omega t))^2 dt \quad (4.4)$$

Para determinar o aquecimento da bobina, isola-se o termo da variação de temperatura ΔT obtém-se o equação (4.5):

$$\Delta T = \frac{\int_0^{\infty} R(Ie^{-i\alpha t} \text{sen}(\omega t))^2 dt}{mc} \quad (4.5)$$

Portanto variação da temperatura em função da dissipação de energia, considerando massa aproximada de 1000 g, temperatura inicial da bobina atuadora ambiente em 20°C e calor específico do cobre de 0,092 cal/g°C obtemos:

$$\Delta T = \frac{\int_0^{\infty} 0,02(150000e^{-i\frac{0,02}{2.11.10^{-6}}t} \text{sen}\left(\sqrt{\frac{1}{11.10^{-6}} - \frac{0,02^2}{4(11.10^{-6})^2}}t\right))^2 dt}{1000.0,092} \quad (4.6)$$

Obtendo:

$$\Delta T \cong 75^{\circ}C$$

O valor obtido é apenas uma aproximação, mas visto que se a máquina for operada em ciclos contínuos gerará um significativo aquecimento após cada descarga, sendo acumulativos.

Devido a este inconveniente calculou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção entre um fluido, água que fluirá sobre o interior da bobina atuadora (cilindro oco) considerando a temperatura do cilindro como sendo a gerada pelo aquecimento devido a resistência elétrica. O fluxo de calor transferido a partir da convecção, q , é dado pela equação (4.7).

$$q = kA\Delta T \quad (4.7)$$

Onde:

k : coeficiente de transferência de calor [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];

ΔT : Variação da temperatura [K];

A : Área de transferência de calor [m^2].

Considerando a área interna por onde o fluido (água) irá passar no interior da bobina atuadora para que ocorra a sua refrigeração. Para este cálculo, será considerado um diâmetro interno de 20 mm e área de 0,000314 m^2 , coeficiente de transferência de calor por convecção considerando a água de 1000 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ e ΔT de 330°C obtemos:

$$q = 100 \text{ kcal/h}$$

Com este fluxo de calor pode-se então escolher um sistema de troca de calor adequado, neste caso um sistema adequado seria um radiador industrial, utilizando o ar forçado pelo lado das aletas através da utilização de uma ventoinha e um motor elétrico. Poucas empresas são especializadas neste tipo de equipamento.

4.6 Controle

O controle da máquina será feito utilizando um controlador lógico programável (CLP), utilizando um voltímetro e uma interface homem-máquina. As entradas do CLP são caracterizadas por emitirem informação ao circuito por meio de uma ação como botoeiras, sensores. Já as saídas, são caracterizadas por receberem as ordens processadas e enviadas pelo comando elétrico e realizarem a ação desejada no circuito como sinais sonoros e luminosos. O painel ficará disposto sobre um pedestal móvel.

Além disso, serão utilizados relés auxiliares para analisar as informações emitidas pelos elementos de entrada seguindo uma lógica de programação para que o comando elétrico (saída) apresente o comportamento final desejado.

Por se tratar de alta tensão, alguns itens de segurança deverão ser acoplados à máquina: 1) botão de emergência; 2) resistores de descarga, responsáveis pelo descarregamento dos capacitores quando não estão sendo utilizados; e 3) relés nas portas, para evitar que não ocorram disparos sem que todos os locais que coloquem em risco a vida do operador estejam devidamente fechados, como a porta da unidade de trabalho e a porta da unidade de armazenamento. Na Figura 4.10 ilustra-se um diagrama grafset contendo as entradas e saídas do controlador lógico programável.

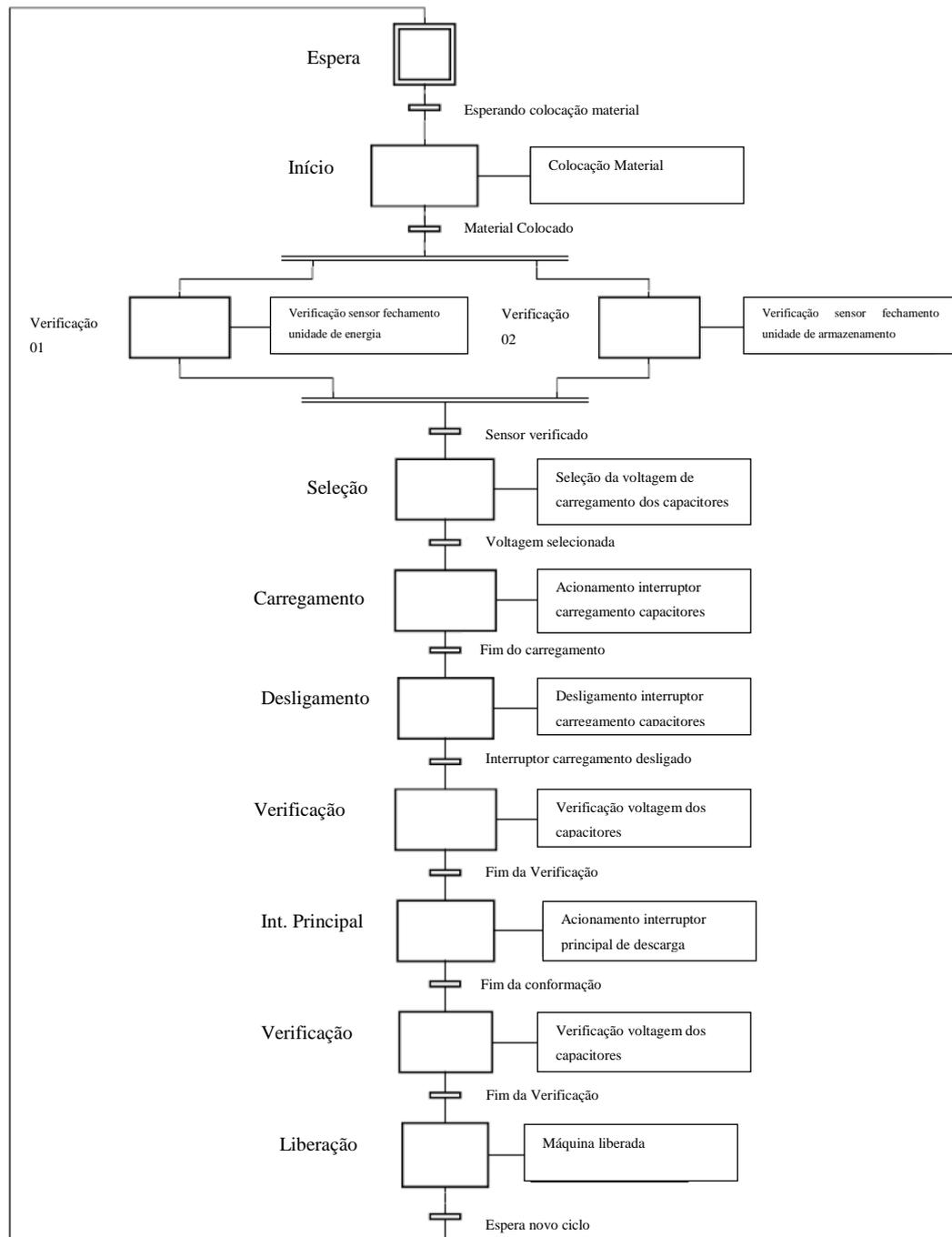


Figura 4. 10- Diagrama de controle

4.7 Conceito Final

Com relação às geometrias que a máquina poderá conformar, somente dependerá do projeto da bobina atuadora que será utilizada, uma vez que não é um projeto específico. Na

figura 4.11 ilustra-se o conceito para conformação utilizando um molde com uma geometria definida para conformação de um chapa.

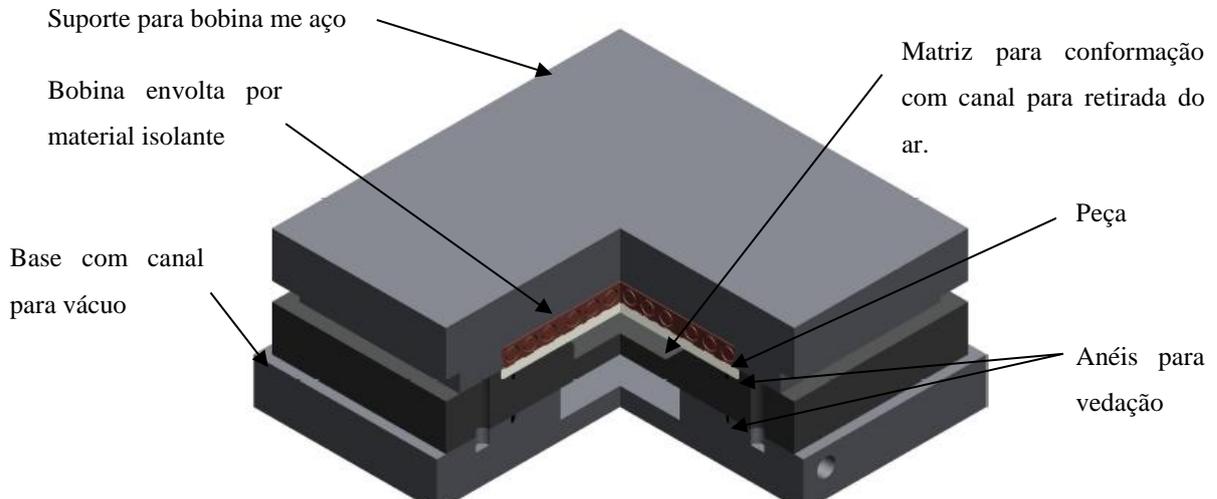


Figura 4. 11- Conceito conformação de chapas

No conceito proposto a base da matriz será a mesma para outros sistemas de conformação para chapas, pois ela possuirá um canal por vácuo que deve ser formado dentro da matriz de estampagem, uma vez que é um processo a alta velocidade e o ar entre a peça e a matriz gera um deslocamento de ar quando a peça é conformada gerando som característico alto. Para o selamento das camaras entre a base e a matriz e a peça e o molde são utilizados dois anéis para vedação confeccionados em borracha. A base da matriz possuirá diversos furos para o acoplamento com o restante da matriz. A bobina atuadora é envolta por um material isolante com boa resistência mecânica como o poliacetal evitando curto circuito das espiras e aumentando sua rigidez mecânica. Como citado anteriormente este tipo de máquina poderá ser utilizado para conformação de outros tipos de geometrias como, por exemplo, um tubo utilizando uma bobina atuadora externa. Com relação ao restante da máquina onde os componentes foram selecionados durante o desenvolvimento deste trabalho, a unidade de armazenamento teria o seguinte leiaute (figura 4.12).

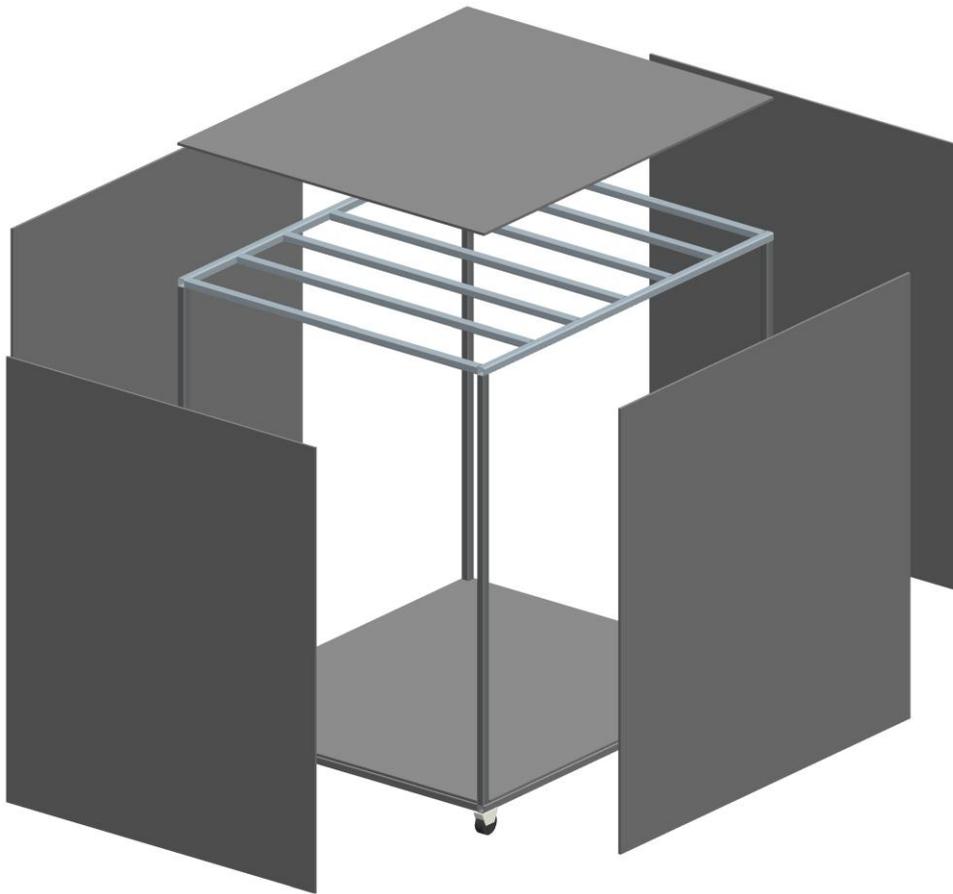


Figura 4. 12 - Estrutura

A estrutura seria composta por tubos de perfil quadrado em aço com 20 mm de largura com duas dimensões principais de 1000 mm e 800 mm, a estrutura seria parafusada. Para que os componentes sejam colocados no seu interior utilizar-se-á chapas de aço com espessura de 6 mm unidas utilizando parafusos. As laterais são formadas por painéis moveis, presos utilizando sistema de encaixe com trilho para que seja possível o acesso ao interior da máquina em todos os seus lados, também é utilizado jogo de rodízios com freio para movimentação.

No interior da máquina, que é a unidade de energia estão contidos o interruptor principal, fonte de tensão, capacitor, bomba de vácuo e controle (relés, etc.) conforme a figura 4.13.

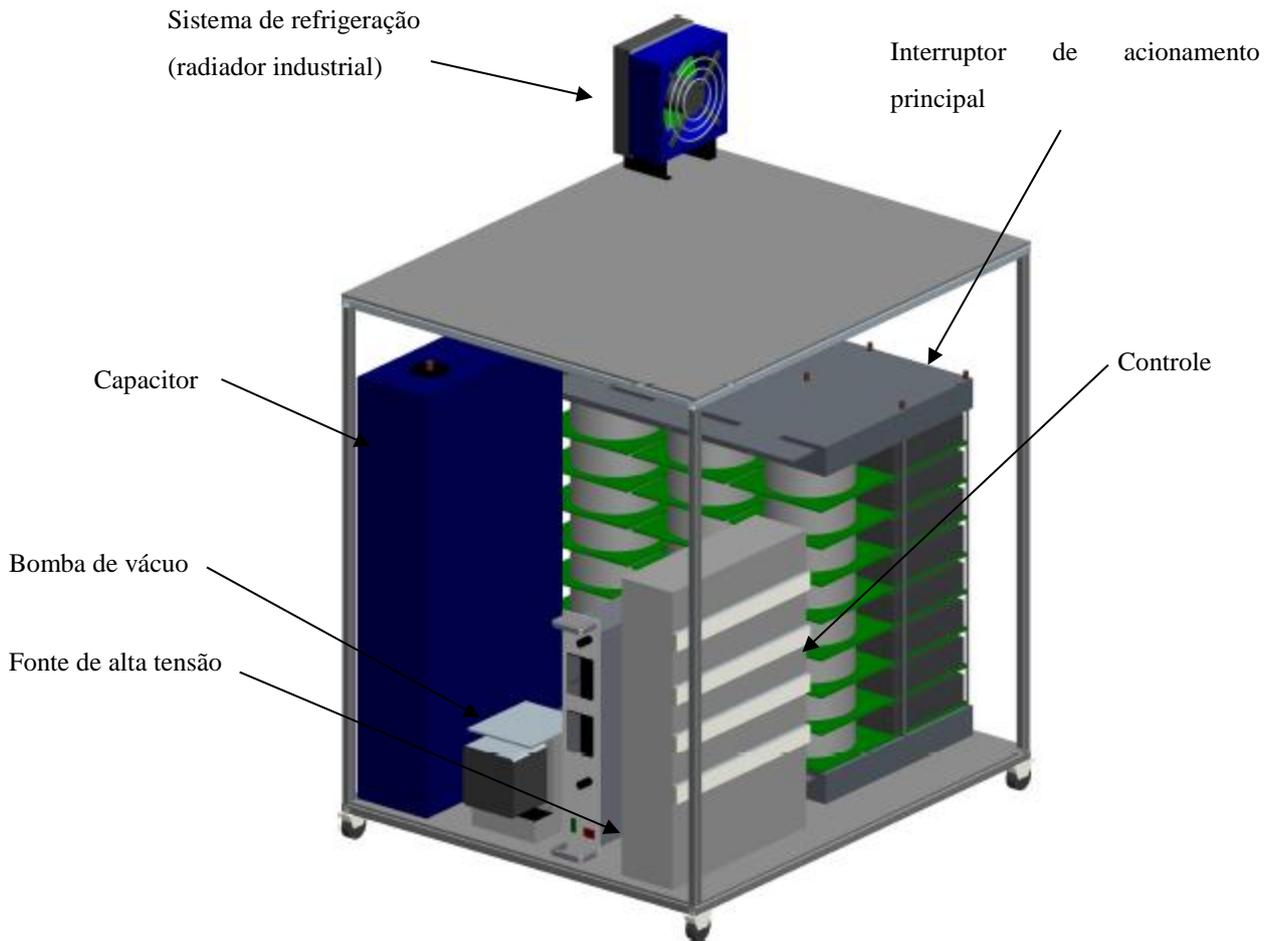


Figura 4. 13 – Unidade de armazenamento

Na parte superior da máquina estão a estação de trabalho, uma zona enclausurada possibilitando maior segurança ao operador e um painel de controle móvel conectado ao sistema da máquina utilizando cabo coaxial, pois possibilita maior segurança. Na figura 4.14 está disposto o conceito final destacando as principais medidas, a unidade de trabalho com 800 x 600 mm onde somente é necessário trocar o sistema que contém a bobina atuadora para mudar o tipo de peça que será conformada. E na tabela 4.6 estão listados os principais componentes deste conceito.

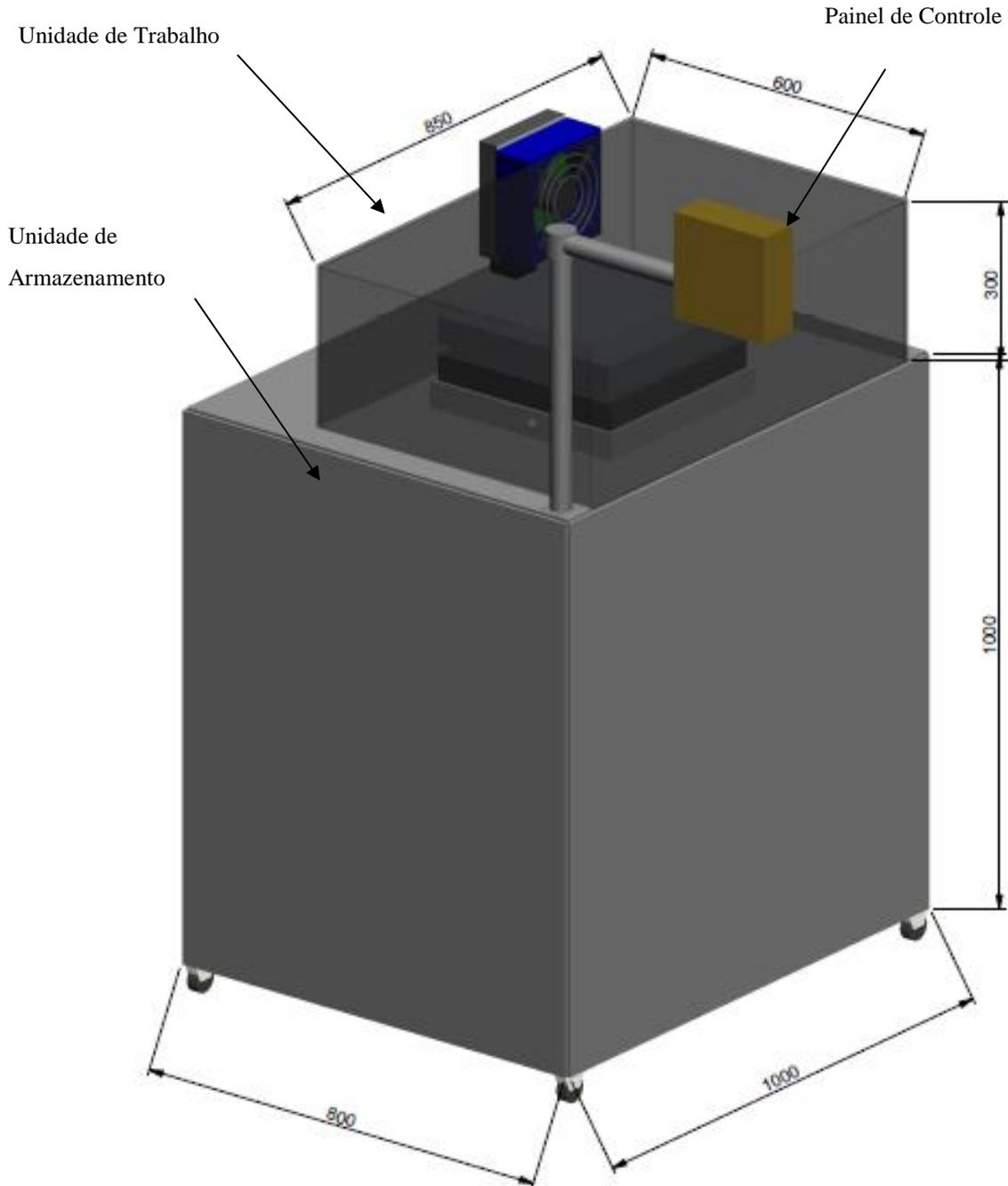


Figura 4. 14- Conceito Final

Tabela 4.6 – Principais componentes

Num.	Denominação
1	Interruptor acionamento principal
2	Fonte de alta tensão
3	Bomba de vácuo
4	Radiador Industrial
5	Controle
6	Estrutura
7	Estrutura acrílico (unidade trabalho)
8	Painel de controle

5 DISCUSSÕES

O propósito da máquina de conformação eletromagnética é produzir um pulso de corrente muito alto que gere um campo eletromagnético que produza uma força na peça a ser conformada acelerando-a a uma velocidade muito elevada, até que bata em uma matriz ou em outra peça ocorrendo à conformação. Este processo oferece vantagens sobre os processos convencionais devido à alta velocidade imposta na peça que esta sendo conformada.

A metodologia aqui apresentada para o projeto de uma máquina para conformação eletromagnética foi adequada detalha as etapas que devem ser seguidas para que a máquina seja projetada. Primeiramente deve-se identificar a capacidade necessária para está máquina, neste caso a capacidade é de 1 até 100 kJ de energia, deve-se então selecionar os capacitores para que seja possível armazenar este montante de energia, a fonte de alta tensão para realizar o carregamento destes capacitores, o interruptor de acionamento principal para realizar o descarregamento da carga elétrica armazenada nos capacitores na bobina atuadora, deve-se definir qual sistema de conformação será utilizado (chapas, expansão ou compressão), definir e construir um sistema que possibilite o controle desta máquina, considerando a utilização de dispositivos de segurança e por último definir os sistemas de refrigeração que será utilizado na bobina atuadora e o sistema de vácuo.

Para conectar o banco de capacitores ao interruptor principal, que será conectado a um barramento de cobre, e posteriormente para efetuar a conexão com bobina, serão utilizados cabos coaxiais devido a sua baixa indutância, o que minimizaria perdas, A estação de trabalho é o local onde o material a ser trabalhado é inserido na bobina com a utilização de uma matriz feita a partir de um bloco de material que possua alta rigidez dielétrica, que além de ser um bom isolante elétrico deve possuir resistência mecânica, pois servirá de apoio (rigidez) para bobina atuadora. A utilização de suportes para assegurar que a peça esteja na distância correta para que ocorra a conformação.

Neste projeto pretende-se utilizar um barramento de cobre tornando possível apenas à troca da matriz e bobina para que seja possível conformar outros tipos de peças.

Este projeto foi limitado apenas ao conceito do processo de conformação de chapas, mas como citado anteriormente dependendo exclusivamente do sistema de conformação (bobina, matriz, etc.) pode-se conformar outros tipos de geometrias. Possibilitando varias investigações neste ramo tecnológico.

A arquitetura básica aqui definida é viável, pode-se continuar com as etapas de projeto como projeto detalhado e otimização, desta maneira possibilitando investigações desta tecnologia. O sistema de refrigeração que assegurará a retirada de calor da bobina, encurtará o tempo entre os ciclos, uma vez que não será necessário esperar que a bobina retorne a temperatura ambiente para que ocorra o novo ciclo. Outro sistema interessante é o sistema para retirar o ar do interior da matriz de conformação, que além de evitar que o ar saia de maneira rápida devido a alta velocidade imposta a peça e auxilia na conformação gerando bom acabamento superficial e qualidade da peça. Estes dois sistemas são diferenciais em relação as máquinas comerciais pois não se encontra disponível com esta configuração.

A malha de controle apresentada neste trabalho para esta máquina pode ser implementado em qualquer controlador lógico programável.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para o projeto conceitual de uma máquina para conformação eletromagnética pode-se concluir que:

1. A metodologia proposta se mostrou adequada para o desenvolvimento do projeto conceitual para máquina de conformação eletromagnética, bem como verificar geometrias que podem ser feitas, ou materiais que normalmente não possuem alta conformabilidade, mas tem seu valor aumentado em função da alta velocidade.
2. Foi demonstrada a viabilidade técnica da configuração física e funcional proposta como ponto de partida para um projeto executivo detalhado, que permita a construção de um protótipo desta máquina visando produção em escala industrial.
3. Como consequência da viabilidade técnica demonstrada e se for construído um protótipo para testes, é possível potencialmente desenvolver projeto de novos produtos de interesse comercial, até mesmo a micro conformação.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Conforme apresentado nas discussões serão indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros, permitindo a continuidade deste processo que já vem se mostrando extremamente promissor:

1. O projeto conceitual é apenas uma das primeiras etapas de uma metodologia de projetos, então como primeiro trabalho futuro seria a continuação fazendo um projeto executivo detalhado e a construção de um protótipo para realização de testes que permitam uma otimização realística.
2. Dentro das pesquisas onde poderia se verificar mais profundamente como a temperatura influencia a bobina atuadora em ciclos contínuos, avaliar o quanto de energia é perdida nos capacitores e na bobina; verificar a variação da energia em função da geometria que se quer conformar eletromagneticamente, com pesquisas sobre processos inovadores utilizando a conformação híbrida.
3. Desenvolver uma metodologia que permita projeto rápido de diferentes ferramentas (bobina atuadora) para produção de diversas geometrias a serem conformadas eletromagneticamente com integração física e mecânica com a configuração básica deste protótipo.
4. Desenvolver um sistema de alimentação automático de peças a serem conformadas eletromagneticamente para aproveitar melhor o potencial de produtividade deste processo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azab, E. A.; Garnich, M.; Kapoor, A. **Modeling of the Electromagnetic Forming of Sheet Metals: State-of-the-Art and Futhure Needs.** Journal of Materials Processing Technology, 2003.

Baxter, M. **Projeto de Produto: Guia Prático do Design de Novos Produtos.** Editora Blucher, São Paulo, 2008.

Brower, D. F.; **Metalforming With Pulsed Fields.** Presented at soc. Automotive Eng. Meeting, New York, 1962.

Daehn, G. S. **High Velocity Metal Forming.** Plum, Metalworking: Sheet Forming, 2006, pp 405-418.

Dorf, C. R.; Svoboda, A. J. **Introdução aos Circuitos Elétricos.** 7ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2011.

Geier, M.; Paese, E.; Pacheco, J. L.; Homrich, R. P.; Ortiz, J. C. S. **Proposal For a Test Bench for Electromagnetic Forming of Thin Metal Sheets,** 4º International Conference on High Speed Forming, ICHSF, 2010.

Golovashchenko, S. F. **Metal Formability and Coil Design in Electromagnetic Forming.** ASM international, 2007.

Golowin, S.; Kamal, M.; Shang J.; Portier, J.; Daehn, G. S.; Bradley, R. J.; Newman, K. E.; Hatkevich, S. **Application of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Processing of Sheet Metal.** ASM International, 2007.

Haiping, Y.; Chunfeng, L. **Efects of Coil Length on Tube Compression in Electromagnetic Forming.** School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, 2007.

Halliday, D.; Resnick, R.; Jearl, W. **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo, Volume 3**, oitava edição, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2009.

Hartmann, W.; Römheld, M.; Donner, A.; **A 100 kJ Pulse Unit for Electromagnetic Forming of Large Area Sheet Metals**. 2º International Conference on High Speed Forming, ICHSF, 2006.

Incropera, F. P.; Witt, D. P.; Bergman, L. T.; Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Sexta edição, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2008.

Kallee, S.; Schäfer, R.; Pasquale, P. **Automotive Applications of Electromagnetic Pulse Technology (EMTP)**. PST products GmbH, Alzenau, 2009. <http://www.pstproducts.com>, ultimo acesso em 26/07/2011.

Kaminki, P. C. **Desenvolvendo Produtos com Planejamento, Criatividade e Qualidade**. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2000.

Mala, S. D. **Dissertation High Velocity Formability and Factors Affecting It**. School of The Ohio State University, Ohio, 2006.

Martel, D.; Bultman, J. **Electromagnetic Metal Forming Machine**. Lawrence Technological University, 2007.

Neugebauer, R.; Bouzakis, K. D.; Denkena, B.; Klocke, F.; Sterzing, A.; Tekkaya, A. E.; Whertheim R. **Velocity Effects in Metal Forming and Machining Processes**. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2011.

Neugebauer, R.; löschmann, F., Putz, M.; Koch, T.; Laux, G. **A Production-oriented Approach in Electromagnetic Forming of Metals Sheets**. 2º International Conference on High Speed Forming, ICHSF, 2006.

Okoye, C.; Jiang, J.; Hu, Z. **Application of electromagnetic-assisted stamping (EMAS) technique in incremental sheet metal forming**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006.

Paese, E. **Estampagem Eletromagnética de Chapas Finas: Viabilidade técnica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Paese, E.; Geier, M.; Pacheco, J. L.; Homrich, R. P.; Ortiz, J. C. S. **Mathematical Modeling of an Electromagnetic Forming System with Flat Spiral Coils as Actuator**. 4^o International Conference on High Speed Forming, ICHSF, 2010.

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H. **Projeto na Engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. Editora Blucher, São Paulo, 2005.

Plum, M. M. **Forming and Forging – Electromagnetic Forming**. Volume 14, 9^a edição, pp 1420-1439. ASM International, 1993.

Psyk, V.; Risch R.; Kinsey B. L.; Tekkaya, A. E.; Kleimer, M. **Electromagnetic Forming- A Review**. Journal of Materials Processing Technology 211, 787- 829, 2011.

Rajawat, R. K.; Desai, S. V., Kulkarni, M. R.; Rani, D.; Nagesh, K. V.; Sethi, R. C. **Electromagnetic Forming- A Technique With Potential Applications in Accelerators**. APAC, Gyeongju, Korea, 2004.

Sakaguchi, A. **Micro-Electromagnetic Formation Flight of Satellite Systems**. B. S. Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

Say, M. G. **Eletricidade Geral: Dispositivos e Aplicações**. 13^a Edição. Editora Hemus, São Paulo, 2004.

Siddiqui, A. M. **Numerical Modelling and Simulation of Electromagnetic Forming Process**. Institute de Mécanique des Fluides et del Solides, Strasbourg, 2009.

Schäfer, R.; Pasquale, P.; Kallee, S. **Industrial Application of the Electromagnetic Pulse Technology**. PST products Gmbh, Alzenau, Germany, 2009.

Schäfer, R.; Pasquale, P. **Material Hybrid Joining of Sheet Metals by Electromagnetic Pulse Technology**. PST products Gmbh, Alzenau, Germany, 2009.

Song, F. M.; Zhang, X.; Wang, Z.R., Yu, L.Z. **A Study of Tube Electromagnetic Forming**. Journal of Materials Processing Technology 151, p. 372-375, 2004.

Tamhane, A. A.; Padmanabhan M.; Fenton G.; Daehn G. S. **Opportunities in High-Velocity Forming of Sheet Metal**. The Ohio State University, Columbus OH, 1997.

Takatsu, N.; Kato, M.; Sato, K.; Tobe, T. **High Speed Forming of Metal Sheets by Electromagnetic Force**. J.S.M.E. International Journal, vol. 31, no. 1, 1988.

Tipler, P. A.; Mosca, G. **Física para Cientistas e Engenheiros – Eletricidade e Magnetismo**, Volume 2, Rio de Janeiro, 2009.

Wellemann, A.; Leutwyler, R.; Waldmeyer, J. **High Current, High Voltage Solid State Discharge Switches for Electromagnetic Launch Applications**. Electromagnetic Launch Technology , 14^o Symposium, 2008.

Zhang, Y.; Badu, S.; Daehn, G. S. **Impact Welding in a variety of Geometric Configurations**, ICHSF, 2010.

Zittel, G. **A Historical Review of High Speed Metal Forming**. International Conference on High Speed Forming (4: 2010 Mar. 09-10: Columbus USA) Proceedings. pp 2-15.