

PROCESSO DE CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA: UMA REVISÃO

Guilherme Cortelini da Rosa¹, Marcelo André Toso², Rafael Crespo Izquierdo³

Resumo: O presente trabalho tem como proposta um estudo descritivo de revisão acerca da conformação eletromagnética, suas propriedades, máquinas. 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 em que não existe contato entre a peça e uma ferramenta, tendo como características bom acabamento e alta produtividade. A bobina atuadora, que conforma o material, 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 predefinidas. 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 desses campos gera força eletromagnética que conforma o material. Esta revisão compõe a fase informacional em que o objetivo é entender o funcionamento da conformação eletromagnética. Está é uma tecnologia em desenvolvimento potencial que pode gerar produtos e processos inovadores.

Palavras-chave: Conformação eletromagnética. Máquina. Conformação por alta energia. Projeto conceitual. Fabricação por deformação eletromagnética.

1 INTRODUÇÃO

Diferente das tecnologias convencionais para conformação dos metais, em que 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). Essa 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. Por meio 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 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. Isso ocorre porque esse processo oferece alta

1 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. guilherme.rosa@univates.br

2 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. marcelo.toso@univates.br

3 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. rafael.izquierdo@univates.br

velocidade de conformação que aumenta a conformabilidade desses materiais, ao contrário dos processos usuais de conformação com velocidades muito baixas, em que 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, utilizando para isso 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 esse 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 desse material em carrocerias de automóveis. Essa é a razão mais convincente para considerar a utilização de um processo de conformação em alta velocidade.

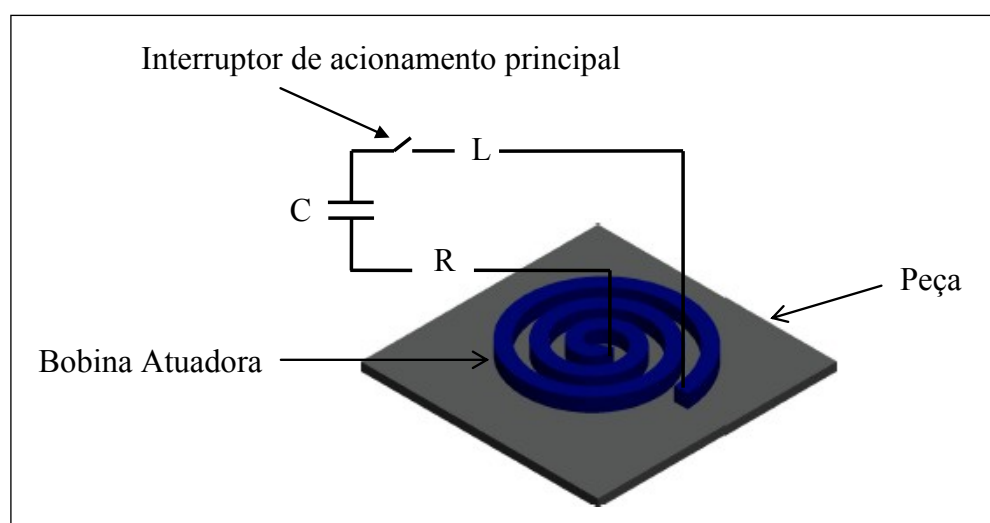
2 ASPECTOS DO PROCESSO

A conformação eletromagnética acontece devido ao descarregamento da energia armazenada no capacitor ou banco de capacitores sobre uma bobina atuadora, utilizando para isso um interruptor de acionamento principal.

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, em que uma chapa de alumínio é fixada muito próxima a uma bobina que está conectada a um banco de capacitores por meio de um interruptor de descarga.

A conformação eletromagnética utiliza um intenso campo eletromagnético que atua na peça muito próxima a ser conformada. Pela 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 isso, 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 Figura 1.

Figura 1: Modelo de um sistema para conformação eletromagnética

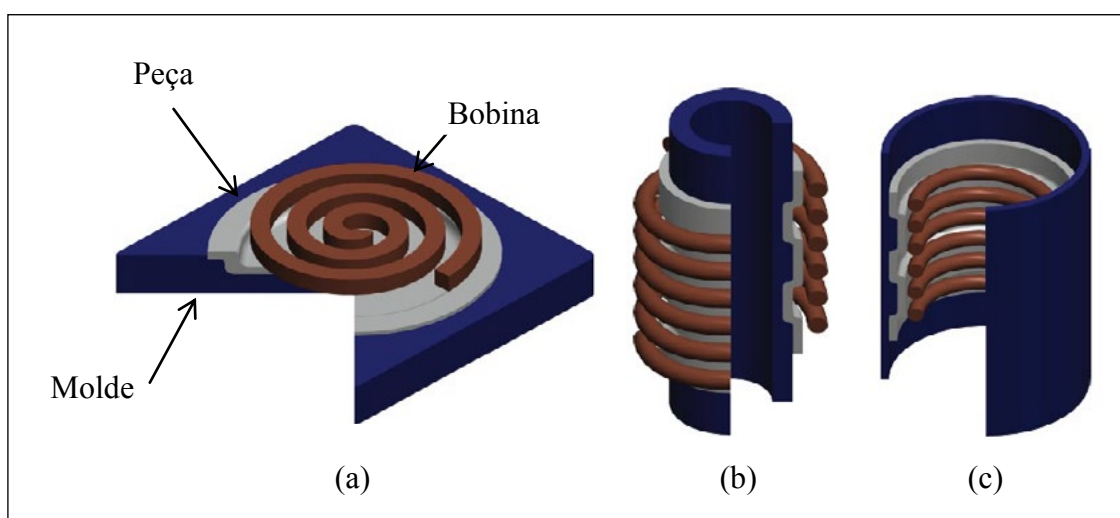


Quando esse descarregamento acontece, a corrente flui sobre a bobina atuadora produzindo um campo eletromagnético transiente em sua vizinhança, que, por sua vez, induz *eddy* correntes na peça que será conformada, conhecidas também como correntes de *Foucault* ou correntes parasitas.

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. Essa 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 à grande quantidade de energia cinética. Já na conformação convencional é limitada em velocidade por peças móveis – isso permite que ocorra um aumento da ductilidade do material.

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 para expansão de tubos. Para conformação de chapas é utilizada uma bobina espiral plana. Na Figura 2 identificam-se os principais tipos de bobinas:

Figura 2: Tipos de bobinas: em (a) conformação de chapas; em (b) compressão de tubos e em (c) expansão de tubos

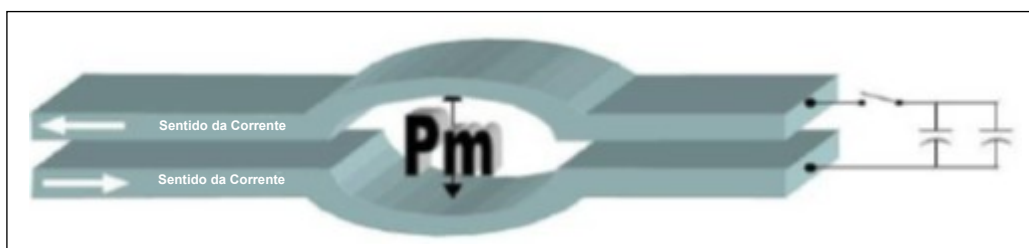


3 HISTÓRICO DA CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

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 3.

Figura 3: Saliência criada entre as barras de cobre devido aos campos eletromagnéticos opostos



Fonte: Zittel (2010).

A partir dessas experiências iniciais, foi possível utilizar essas 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 4). Com isso, 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 4: Primeira bobina atuadora de compressão

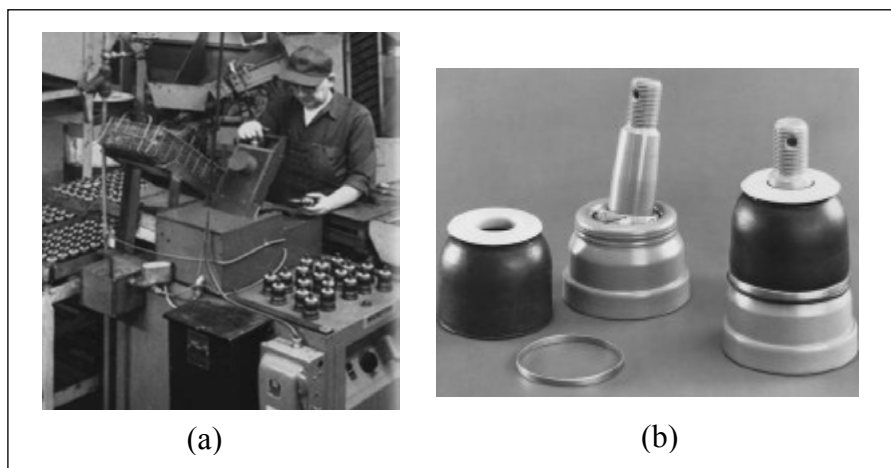


Fonte: Zittel (2010).

4 MÁQUINAS 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 5. Esse equipamento era muito primitivo, mas produziu equipamentos confiáveis para a indústria automotiva por muitos anos.

Figura 5: Em (a): primeira máquina para conformação eletromagnética; em (b): anéis de retenção conformados, unindo a capa neoprene em uma junta homocinética



Fonte: Zittel (2010).

Existem limitações práticas e econômicas na utilização do processo de conformação eletromagnética. A pressão eletromagnética que pode ser gerada teoricamente pode ser a 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.

5 APLICAÇÕES DA CONFORMAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

De acordo com Golowin et al. (2007), o processo de conformação possui alta velocidade e oferece vantagens sobre a conformação tradicional, não sendo, com a alta velocidade e a alta taxa de deformação, a conformação da peça limitada pelas restrições de uma conformação tradicional. É possível alcançar limites de ductilidade superiores ao processo de conformação quase-estática. Outra vantagem é que esse processo possibilita um processo de manufatura muito mais ágil.

Conforme Zittel (2010), nesse 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 6, em que rolos anodizados para instrumentos médicos foram expandidos utilizando a conformação eletromagnética em um molde.

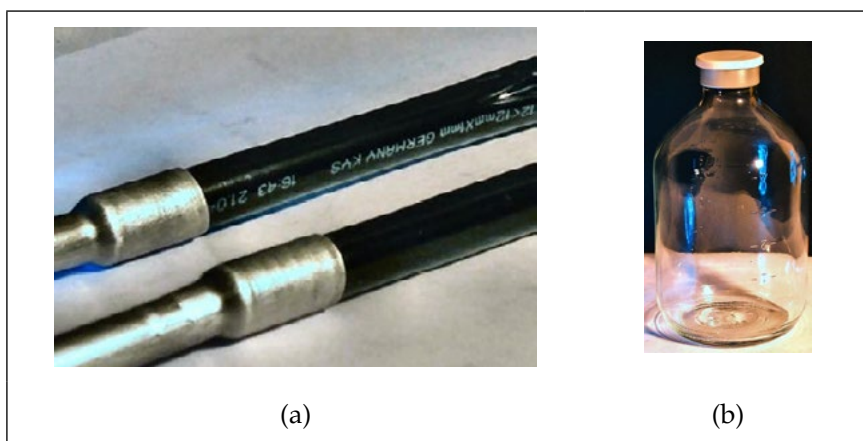
Figura 6: Rolos anodizados expandidos em um molde



Fonte: Zittel (2010).

Segundo Schafer et al. (2009), 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. Esse processo não apresenta desalinhamento longitudinal ou radial quando utilizado para unir metal com mangueiras de borracha (FIGURA 7a). Como nessa 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 7b).

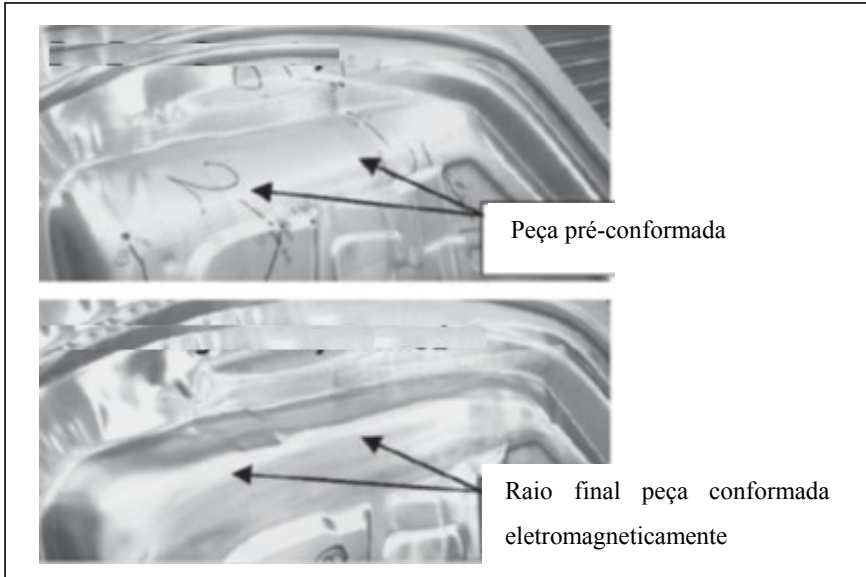
Figura 7: Em (a) união de aço em mangueiras de borracha; (b) união de tampa esterilizada em uma garrafa de vidro



Fonte: Schafer et al. (2009).

Bobinas atuadoras planas são utilizadas para conformação de chapas contra moldes. Experimentos na conformação de painéis automotivos (FIGURA 9) 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 9: Painel automotivo conformado convencionalmente e conformado eletromagneticamente para obter a forma final

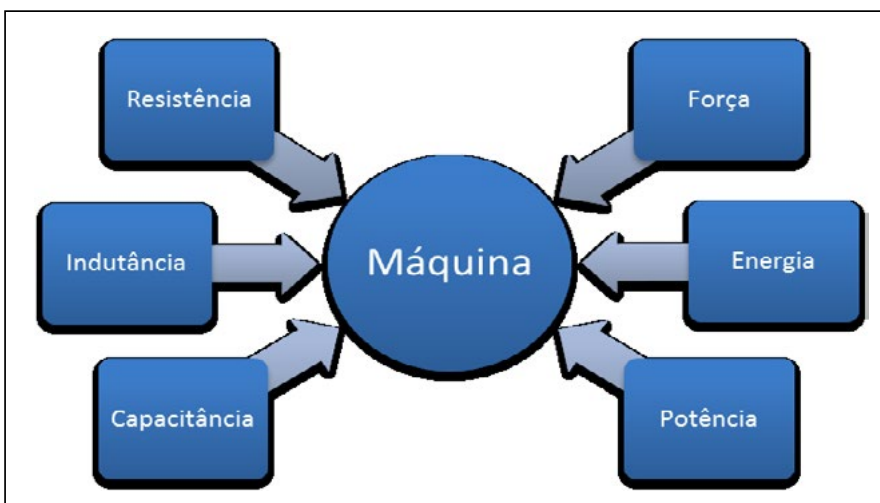


Fonte: Azab et al. (2003).

6 RESULTADOS

A partir da análise das informações encontradas foi possível identificar (figura 10) os parâmetros da máquina para conformação eletromagnética. Esses parâmetros de limites, força, energia e potência são análogos ao processo elétrico.

Figura 10: Parâmetros da máquina para conformação eletromagnética



Assim, a partir da determinação da força necessária para conformação de uma peça, pode-se 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 essa conformação.

A máquina é composta por três partes principais: armazenamento e controle da energia; bobina atuadora e estação de trabalho. Na Tabela 1 são apresentados as principais partes da máquina e seus principais itens e características.

Tabela 1: 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 à bobina atuadora e dá formato à peça quando necessário |

A bobina atuadora não deve ser constituída de material com alta permeabilidade, pois nesse tipo de aplicação, devido à 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.

7 CONCLUSÕES

Esta revisão sobre a conformação eletromagnética possibilitou verificar as geometrias que podem ser feitas, ou materiais que normalmente não possuem alta conformabilidade, mas tem seu valor aumentado em função da alta velocidade.

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.

REFERÊNCIAS

AZAB, E. A.; GARNICH, M.; KAPOOR, A. Modeling of the Electromagnetic Forming of Sheet Metals: State-of-the-Art and Future Needs. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003.

GOLOWIN, S.; et al. *Application of a Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Processing of Sheet Metal*. ASM International, 2007.

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

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.

SCHÄFER, R.; PASQUALE, P.; KALLEE, S. **Industrial Application of the Electromagnetic Pulse Technology**. PST products GmbH, Alzenau, Germany, 2009.

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.

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