



DESENVOLVIMENTO DA MANUFATURA ADITIVA DE FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM E FORJAMENTO NA INDÚSTRIA 4.0

FREDERICO LAGO SILVA – frederico.lago.silva@usp.br
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP – SÃO CARLOS – EESC

GUSTAVO COSTA CARVALHO – gustavo.costa.carvalho@usp.com
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP – SÃO CARLOS – EESC

PEDRO LIMA AUTRAN DOURADO – pedro.dourado@usp.br
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP – SÃO CARLOS – EESC

RAFAEL CORSI ZUCHERATO – rafael.zucherato@usp.br
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP – SÃO CARLOS - EESC

IRIS BENTO DA SILVA - ibs@sc.usp.br
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP – SÃO CARLOS - EESC

Área: 1. GESTÃO DA PRODUÇÃO)

Sub-Área: 1.1 - GESTÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Resumo: A GLOBALIZAÇÃO TEM SIDO O MAIS IMPORTANTE VEÍCULO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NO MUNDO, DE MODO QUE A NECESSIDADE DE PRODUÇÃO EXIGE O SURGIMENTO DE NOVAS TECNOLOGIAS. A MANUFATURA ADITIVA VEM SE DIFUNDINDO E CARREGA UM ENORME POTENCIAL DE SUPRIR A URGÊNCIA POR NOVAS TECNOLOGIAS. ESTE ARTIGO VISA COMPREENDER O FUNCIONAMENTO DA MANUFATURA ADITIVA DE MODO A ENTENDER A EVOLUÇÃO DA VIABILIDADE DO PROCESSO NA INDÚSTRIA 4.0. A PARTIR DA REVISÃO E COMPARAÇÃO DE LITERATURA DA ÁREA JÁ EXISTENTE, ALÉM DE DEBATES COM ESPECIALISTAS, BUSCA-SE OBTER UMA PERSPECTIVA DO CAMPO NO CONTEXTO ATUAL E FUTURO. ESPERA-SE COMPREENDER OS MÉTODOS ATUAIS E ATRAIR CONHECIMENTO PARA PROSPECTAR O FUTURO DO PROCESSAMENTO INTRODUZIDO NA REALIDADE DA INDÚSTRIA 4.0.

Palavras-chaves: ESTAMPAGEM. FORJAMENTO. INDÚSTRIA 4.0. FERRAMENTAS. MANUFATURA ADITIVA. DESENVOLVIMENTO.

Development of Additive Manufacturing of Stamping and Forging Tools in Industry 4.0

Abstract: GLOBALIZATION HAS BEEN THE MOST IMPORTANT VEHICLE FOR TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT IN THE WORLD, IN A WAY THAT THIS DEMAND FOR GROWTH REQUIRES THE EMERGENCE OF NEW TECHNOLOGIES. ADDITIVE MANUFACTURING IS SPREADING AND CARRIES AN ENORMOUS POTENTIAL TO SUPPLY THE URGENCY OF NEW TECHNOLOGIES. THIS ARTICLE INTENDS TO UNDERSTAND HOW THE ADDITIVE MANUFACTURING WORKS AND SEE THE PROGRESS OF THE VIABILITY OF THE PROCESS IN THE INDUSTRY 4.0. BASED ON STATE OF THE ART, COMPARISON OF THE EXISTING INFORMATION ON THE AREA AND SPECIALISTS OPINIONS, THIS PAPER LOOKS FORWARD TO GAIN A GOOD PERSPECTIVE ON THE FIELD IN CURRENT AND FUTURE DAYS. IT IS EXPECTED TO UNDERSTAND THE NOWADAYS METHODS AND GAIN KNOWLEDGE TO PREDICT THE FUTURE OF THIS PROCESS IN THE INDUSTRY 4.0 REALITY.

Keywords: STAMPING. FORGING. INDUSTRY 4.0. TOOLS. ADDITIVE MANUFACTURING. DEVELOPMENT.

1. Introdução

A indústria 4.0 é caracterizada por ter um impacto mais profundo e exponencial, e pode ser definida por um conjunto de tecnologias que permitem a fusão do mundo físico, digital e biológico. Existem seis princípios para o desenvolvimento e implantação da Indústria 4.0: operação em tempo real, virtualização, descentralização, orientação a serviços e modularidade. Cada um desses princípios são fundamentais para empresas e países entrarem neste novo método industrial e tecnológico. Assim, a adaptação para novos negócios serão necessárias, e com tendências de exigências cada vez maiores, segundo Periad (2018), como é o caso de processos de conformação, como estampagem e forjamento.

O conceito de manufatura aditiva consiste em fabricar peças a partir da adição de material em uma superfície plana de acordo com um arquivo projetado em CAD. Esse processo também pode resultar em protótipos rápidos para testes com consumidores, além de permitir produção de peças funcionais nas especificações, propriedades desejadas e pré-definidas no projeto. O procedimento é feito em máquinas comumente chamadas de impressoras 3D e, geralmente, processam filamentos poliméricos termoplásticos que são fundidos e depositados para que se solidifiquem em camadas que constroem a peça em um modelo bottom-up (CAMPBELL, 2011).

Essa característica ligada à produção de peças metálicas por manufatura aditiva torna possível que esse meio de produção auxilie em outros meios, como no forjamento e estampagem, nos quais as matrizes possam exigir certa complexibilidade referentes à geometria, de modo que a utilização da manufatura aditiva para esse fim possa facilitar e melhorar esses processos de conformação de materiais.

A construção de ferramentas de conformação exige conhecimentos como transferência de calor (MUVUNZI, 2017). É notória a necessidade de se compreender suas principais funções, bem como o modo como são produzidas. O tipo de manufatura utilizada em suas confecções torna-se, assim, um importante fator para o seu uso, uma vez que suas propriedades devem satisfazer mecanicamente as condições a estas que serão submetidas.

As definições fundem-se de modo a buscar aplicações ao estudo do desenvolvimento da manufatura aditiva das ferramentas de estampagem e forjamento na indústria 4.0. Assim, este inserto desponta-se a revelar e desenvolver o uso da tecnologia utilizada pela indústria 4.0, cabendo de estudo à ferramentas de estampagem e forjamento.

2. Método de Pesquisa

Para o desenvolvimento do estudo, foi necessário selecionar um método que se alinhe às ideologias do projeto, isto é, algum embasamento que justifique as definições escolhidas. O método utilizado foi a análise do estado da arte, por meio do Google acadêmico e *Web of Science*, no qual pesquisou-se os temas abordados no artigo, coletando, assim, um conjunto de estudos realizados anteriormente a fim de se obter definições do assunto sem divergências.

O tema Manufatura Aditiva de Ferramentas de Estampagem e Forjamento na Indústria 4.0 é escasso, fazendo-se necessidade de dividir os temas em fragmentos. Assim, pesquisou-se, separadamente, os temas Manufatura Aditiva, Ferramentas de Estampagem, Ferramentas de Forjamento e Indústria 4.0.

Foi coletada uma amostra de artigos para cada um dos quatro temas citados. Com o conjunto de artigos lidos, pôde-se construir conclusões e definições dos temas, os quais posteriormente foram alinhados e interligados de modo a permitir discussões sobre o desenvolvimento da manufatura aditiva de ferramentas de estampagem e forjamento na indústria 4.0.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Estampagem

Estampagem consiste em operações de corte e conformação de materiais metálicos planos, a fim de conferir a forma e a precisão desejada, sem a presença de defeitos. Podem ser estampagem de corte (ou puncionamento), na qual o material é estampado em ferramentas de corte e é necessário o rompimento por cisalhamento; por conformação, na qual o material é conformado plasticamente a fim de se obter o formato final desejado; por repuxo, na qual o material sofre um estiramento, ou seja, sua espessura diminuída desejada; por dobramento, na qual o material, geralmente uma chapa fina, é dobrada até se atingir a forma desejada (KRELLING, 2019).

O projeto das ferramentas de estampagem depende de muitos fatores, tais como o tipo do material da matéria-prima, sua espessura, tolerâncias admitidas pelo produto final, entre outros. Devido a isto, existem vários tipos de ferramentas, alguns exemplos são: Ferramentas para trabalho peça a peça, na qual só é possível realizar a operação por cada golpe da prensa; Ferramentas progressivas, na qual a chapa entra em banda, com alimentação automática a partir de bobines ou manual a partir de tiras, entre uma matriz superior e inferior e vai sendo alvo de sucessivas operações de corte, dobragem ou estampagem até à obtenção de uma peça

terminada; Ferramentas transfer, são compostas por várias ferramentas que executam individualmente uma determinada operação, e que se encontram montadas em sequência normalmente sobre uma base comum; entre outros como colunas de guiamento, estruturas, molas helicoidais, etc.

3.2. Forjamento

Forjamento é um processo de conformação de metais sob esforços de compressão de tal modo a este tomar forma da matriz desejada. O forjamento pode ser em matriz aberta; na qual o material é conformado entre matrizes planas ou de formato simples, que normalmente não se tocam. É usado geralmente para fabricar peças grandes, com forma relativamente simples; e forjamento de matriz fechada, na qual o material é conformado entre duas metades de matriz que possuem, gravadas em baixo-relevo, impressões com o formato que se deseja fornecer à peça. A deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada ou semi-fechada, permitindo assim obter peças com tolerâncias dimensionais menores (FORJAMENTO, 2009).

Existem três tipos martelos de forjamento, de queda-livre, Este equipamento consiste de uma base que suporta colunas, nas quais são inseridas as guias do suporte da ferramenta, e um sistema para a elevação da massa cadente até a altura desejada, mecanismo de elevação é geralmente acionado por um pedal, de maneira a deixar livres as mãos do operador para a manipulação da peça; martelo de dupla ação, neste equipamento, a massa cadente é conectada a um pistão contido em um cilindro no topo do martelo. O pistão é acionado geralmente por vapor ou ar comprimido; martelo de contra-golpe, caracteriza-se por duas massas que se chocam no meio do percurso com a mesma velocidade, sendo que a massa superior é acionada por um sistema pistão-cilindro (PAIVA, 2019).

3.3. Indústria 4.0

A indústria 4.0, ou a chamada quarta revolução industrial, é a denominação dada para a evolução dos meios de fabricação onde a tecnologia de informação e o avanço de técnicas de manufatura seja utilizado para melhor aproveitamento dos setores econômicos e que afetem de maneira produtiva o cotidiano da população de maneira geral. O principal foco dessas mudanças é promover a integração dos âmbitos físicos, digitais e biológicos da maneira mais produtiva para isso. Existem também, seis princípios para o desenvolvimento e

implementação da indústria 4.0, que são: operação em tempo real, virtualização, descentralização, orientação a serviços e modularidade (PERIAD, 2018)

- Operação em tempo real: Consiste na capacidade de acompanhar a produção em tempo real, tendo como base a Internet das Coisas, uso de dados e gestão instantânea;
- Virtualização: É feito um layout da fábrica de maneira virtual, por meio de sensores que são dispostos nos módulos e permitem monitoramento remoto dos processos. Neste modo também, pode-se realizar simulações do processo para que erros ao longo do processo sejam evitados;
- Descentralização: As máquinas fornecem informações sobre seus ciclos de trabalho, facilitando os processos e tomadas de decisões por sistemas cyber-físicos;
- Modularidade: A indústria passa a se planejar conforme a demanda. São feitos módulos de produção, o que permite maior flexibilidade, além de poder criar-se métodos de vendas individuais dos produtos, não mais apenas o produto completo.

Para isso, são utilizados alguns exemplos como referência tais como a manufatura aditiva, a *internet* das coisas, a inteligência artificial, a biologia sintética e os sistemas ciber-físicos. Cada um desses conceitos ajuda a ilustrar os tipos de mudanças que a indústria 4.0 propõe com evolução dos meios de fabricação.

- *Internet* das coisas (IoT): Esse conceito é definido pela interação de objetos inanimados com os sistemas nos quais estão inseridos por meio da troca de dados pela rede, tornado sua função, além de mecânica, também inteligente dentro do contexto aplicado;
- Inteligência Artificial (IA): É tratada como IA sistemas computacionais que tentam simular o mecanismo de raciocínio por meio da interpretação comparativa de diversas entradas para a obtenção de uma única saída coerente com o contexto do sistema a qual o *software* está submetido;
- Biologia Sintética: É um conceito que se afasta um pouco do ambiente fabril pois está ligado ao desenvolvimento de tecnologias e mecanismos ligados a sistemas químicos ou biológicos como o desenvolvimento de enzimas, sistemas genéticos ou mesmo a manipulação de sistemas biológicos;

- Sistemas Cyber-Físicos: É o conceito que define a integração e comunicação de sistemas físicos e digitais, de tal modo que cada um destes influencie no outro complementando informações agregando valor em forma de performance e produtividade. Serve, como exemplo, pensar em simulações que imitam a atuação de determinado objeto, que por sua vez, devolve para o *software* variáveis, que não são contabilizadas na simulação, tornando as duas partes cada vez mais verossímeis e eficazes a cada interação;
- A manufatura aditiva também é um exemplo do desenvolvimento na tecnologia na indústria 4.0 e será discutida mais a fundo.

3.4. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA) é um meio de fabricação baseado na adição de material para a formação de uma determinada geometria. Essa adição pode ser feita tanto por elementos fundidos, como no caso de polímeros, mas também pode utilizar de meios térmicos para sinterizar material em forma de pó como é feito em particulados metálicos, cerâmicos e também poliméricos.

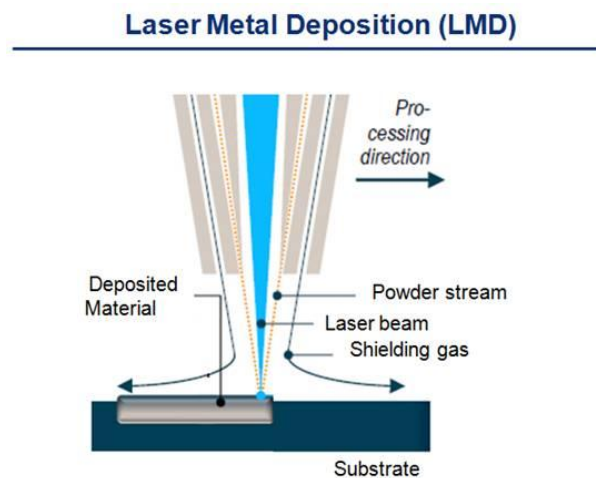
A fabricação de peças por manufatura aditiva é feita a partir de um desenho digital em CAD que define as geometrias e dimensões e que são convertidas em coordenadas para que a máquina opere na construção a partir de um plano referenciado. Isso permite que formas complexas sejam obtidas de maneira mais simples, pois existem menos limitações em relação a moldes e matrizes. Um dos grandes diferenciais desse processo é a obtenção de peças nas quais são necessários poucos ou nenhum processos posteriores. Esse tipo de processo é denominado *Near Net Shape (NNS)* e proporciona agilidade e produtividade de processos de fabricação.

Especialmente para componentes metálicos existem dois tipos de processos de MA que são utilizados. O primeiro é conhecido por *Laser Metal Fusion (LMF)* e é baseado na sinterização metálica camada por camada do pó metálico que é espalhado e compactado uniformemente em uma câmara por meio de um *laser* de alta frequência (MOWER, 2016).

Outro método disponível é o *Laser Metal Deposition (LMD)* que se define pela deposição constante do pó metálico que entra em contato com o *laser* de alta frequência onde é instantaneamente fundido e depositado na geometria da peça desejada (DUDA, 2016).

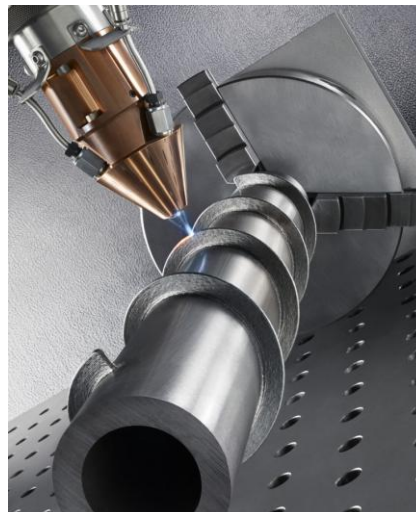
O processo de *Laser Metal Deposition* é ilustrado pela figura 1 e pela figura 2.

FIGURA 1 – Laser Metal Deposition. Fonte: <https://www.lasertoday.com/2016/05/laser-metal-deposition-laser-metal-fusion-comparison-of-processes-their-uses/>



Ambos os métodos são capazes de produzir peças complexas, e apresentam uma peculiaridade quanto a propriedade mecânica, visto que a fabricação por esse método não proporciona linhas de fluxo na configuração granular do material, diferente de peças conformadas, mas ainda assim proporciona ao material uma anisotropia no sentido favorável a solicitação devido à configuração lamelar da peça (MURR, 2012).

FIGURA 2 – Laser Metal Deposition. Fonte: <https://www.lasertoday.com/2016/05/laser-metal-deposition-laser-metal-fusion-comparison-of-processes-their-uses/>



4. Discussão

A partir das pesquisas feitas, pode-se obter as propriedades necessárias para a manufatura de ferramentas tanto de estampagem, quanto de forjamento. Nestas, é ideal a

obtenção de alta dureza, elevada tenacidade, resistência à fadiga, alto limite de escoamento, alta resistência mecânica a quente e boas tolerâncias contra oscilações térmicas (GARRIDO, 2019).

Definida estas propriedades, nota-se que há uma necessidade de definir os materiais das ferramentas de conformação, ao passo que se estabelece os materiais que podem ser obtidos pelo processo de manufatura aditiva, uma vez que as propriedades dos materiais obtidos por esse processo ainda são delimitadas.

Pesquisou-se quais materiais seriam ideias para a manufatura e uso das ferramentas de estampagem e/ou forjamento, tais como aços com boa presença de Cromo, Molibdênio, Tungstênio e Vanádio. Assim, faz-se necessário avaliar os materiais que são compatíveis com a tecnologia de impressão 3D e, ao mesmo tempo, que satisfaçam às condições mecânicas ditas em que uma ferramenta de conformação necessita.

Dentre os materiais que são compatíveis com a viabilidade da impressão 3D, alguns são mais adequados para esse tipo de produção, como Aços, Alumínio, Bronze, Prata, Ouro e Platina. Todavia, dentre esses, apenas aços são condizentes com os requisitos exigidos em ferramenta de conformação.

Dessa forma, as pesquisas indicaram que os aços AISI O1, AISI W2, AISI D3, Maraging, AISI M2, AISI H12 e AISI H11 poderiam ser utilizados na manufatura aditiva para a fabricação de ferramentas de estampagem e forjamento. Entretanto, o enfoque do projeto do desenvolvimento da manufatura aditiva dessas ferramentas foi em matrizes. Logo, compreendeu-se que haveria necessidade de focar em propriedades como alta dureza e alto limite de escoamento, características essas que podem ser obtidas pelo aço Maraging.

Com a ferramenta e o material escolhido, o próximo passo foi determinar o tipo de manufatura aditiva que deveria ser utilizada no processo. Anuiu-se, então, o *LMD (Laser Metal Deposition)* por apresentar capacidade de produzir peças maiores e resistentes. Por ser um processo de MA metálica, a peça impressa apresentará uma anisotropia quanto ao comportamento mecânico. Essa propriedade provê uma dualidade, visto que a resistência na solicitação na direção de forjamento e estampagem são atendidas, mas pode existir uma desvantagem quanto a esforços cisalhantes. Esse é o tipo de afirmação que não pode ser feito sem a execução de testes práticos para avaliar de fato a influências desses tipos de choques em matrizes impressas de conformação.

Não obstante das escolhas, é inerente a importância de se manter alinhado a manufatura aditiva desses componentes com a indústria 4.0 (I.4.0).

Alguns dos princípios da indústria 4.0 estão dissolvidos às características da manufatura aditiva. A modularidade permite, de certa forma, maior flexibilidade industrial, o que se adapta ao conceito de manufatura aditiva, sendo capaz de ser um processo que pode ser único, isto é, podendo não necessitar de processos posteriores de fabricação, tendo em vista a capacidade de produzir peças *near net shape*, que poderia extinguir, por exemplo, usinagem, o que permite menos gasto com operadores, máquinas e energia.

Ademais, a MA também permite operação em tempo real. Os *softwares* utilizados para a impressão 3D permitem controle do processo e fornecem informações de produção das peças que outros métodos de fabricação não fornecem com tanta precisão, sejam eles relacionados à temperatura, tempo e velocidade de produção.

5. Conclusão

Ao expor os princípios das áreas estudadas, indústria 4.0 e manufatura aditiva, acredita-se que é possível desenvolver a impressão 3D de metais para a manufatura de matrizes de conformação.

Contudo, para que esse processo seja possível, é preciso que as tecnologias envolvidas evoluam ao ponto de que as necessidades de projeto sejam atendidas, ou seja, possibilitar estudos práticos que supram a necessidade de avaliar a viabilidade deste procedimento.

Referências

- PERIAD, C. V. *Indústria 4.0 ou a 4ª Revolução Industrial*. 2018. Disponível em: <<http://www.sobreadministracao.com/industria-4-0-4-revolucao-industrial/>>. Acesso em: 23 março de 2019.
- CAMPBELL, T.; WILLIAMS, C.; IVANOVA, O.; GARRETT, B. *Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Outubro, 2011.
- KRELLING, A. *Estampage*. Instituto federal de Santa Catarina, 2019.
- PAIVA, M. C. *Forjamento*. Disponível em: <<https://burocracismo.wordpress.com/2009/08/28/forjamento/>>. Acesso em: 05 de maio de 2019.
- GARRIDO, L. *Matrizes para forjamento*. 2014 Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1234104/>>. Acesso em: 06 de junho de 2019.
- DUDA, T. RAGHAVAN, L. V. *3D Metal Printing Techlogy*. IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier, 2016.
- LAWRENCE E. MURR, EDWIN MARTINEZ, KRISTA N. AMATO, SARA M. GAYTAN, JENNIFER HERNANDEZ, DIANA A. RAMIREZ, PATRICK W. SHINDO, FRANK MEDINA, RYAN B. WICKER. *Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science*. 2012. 1Department of Metallurgical and Materials Engineering, The University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968 USA .2. W. M. Keck Center for 3D Innovation, The University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968 USA.
- MOWER, T. M., LONG, M. J. *Mechanical Behavior of Additive Manufacture, Powder-Bed Laser-Fuser Materials*. Volume 651 Material Science and engineering, M.I.T. Lincoln Laboratory, 244 Wood Street, Lexington, MA 02420, USA 2016.
- MUVUNZI R., DM DIMITROVA, S MATOPEA, TM HARMSB, *Heat transfer in a hot stamping process: a review*. R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering, 2017.