

GERENCIAMENTO DA SEGURANÇA DO TRABALHO E SAÚDE EM INSTALAÇÕES DE MANUFATURA ADITIVA

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

SILVA; Leandro Cardoso da ¹, BATALHA; Gilmar Ferreira ², PERES; Lucas Salomão ³

RESUMO

RESUMO O uso de tecnologias de fabricação aditiva tem o potencial de transformar o processo de produção industrial moderna, mas também traz novas implicações para fabricantes e seus funcionários. Essas implicações incluem riscos de segurança potenciais associados a instalações de produção, aos equipamentos e também aos materiais de fabricação aditiva. A introdução de recursos da manufatura aditiva pode ser particularmente complexa nas instalações de produção existentes, com práticas estabelecidas de gerenciamento de segurança. Esta pesquisa discute questões de segurança do trabalho na manufatura aditiva, com foco específico em questões de segurança associadas ao metal na manufatura aditiva. Para isso, identifica as principais fontes de risco associadas à fabricação aditiva e, em seguida, apresenta uma metodologia para estabelecer um sistema de gerenciamento de segurança ou modificar um sistema existente antes da introdução de capacidades da manufatura aditiva. A pesquisa conclui com recomendações sobre o desenvolvimento de avaliações de segurança para operações da manufatura aditiva. **ABSTRACT** The use of additive manufacturing technologies has the potential to transform the modern industrial production process, but it also has new implications for manufacturers and their employees. These implications require safety risks associated with production facilities, equipment and also with additive manufacturing materials. The introduction of additive manufacturer features can be particularly complex in existing production facilities, with safety management practices. This research discusses safety issues in additive manufacturing work, with a specific focus on safety issues applicable to additive manufacturing metal. To do this, identify as the main sources of risk associated with additive manufacturing and then present a methodology for setting up a safety management system or modifying an existing system before introducing the use of additive manufacturing. A survey completed with recommendations on the development of safety estimates for additive manufacturing operations. Keywords: Safety. Additive Manufacturing. Metal. Modern Industry. **INTRODUÇÃO** Embora a impressão 3D para aplicações de consumo seja realidade para alguns setores, a Manufatura Aditiva (MA) já é uma realidade na produção industrial moderna. Indústrias de todos os segmentos, incluindo eletrônicos, de joias e de serviços de saúde, automotivo, aeroespacial e de defesa, estão adotando rapidamente as tecnologias da Manufatura Aditiva para obter maior precisão na fabricação de ferramentas e peças. Como resultado, espera-se

¹ Universidade de São Paulo, lcdasilva@usp.br

² Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

³ ArcelorMittal Tubarão, lucas.peres@arcelormittal.com.br

que o mercado industrial global de tecnologias de impressão 3D aumente a Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR - Compound Annual Growth Rate) em mais de 29% nos próximos anos (MARKETS AND MARKETS, 2020). Uma aplicação industrial importante e crescente para as tecnologias da Manufatura Aditiva está na área de fabricação de aditivos de metais industriais. A impressão 3D em metal industrial é particularmente adequada para a produção eficiente de peças de precisão de alto valor, sendo estas mais leves e mais fortes do que peças similares produzidas usando métodos de produção convencionais. De acordo com a edição de 2016 do Relatório WOHLERS ASSOCIATES, fonte líder de informações sobre tendências da Manufatura Aditiva, o crescimento da impressão 3D em metal industrial é uma das principais impulsionadoras do crescimento geral da fabricação de aditivos industriais. Enquanto as impressoras 3D de metal industriais representavam apenas 7% de todas as impressoras 3D industriais enviadas globalmente em 2015, esse segmento representa o subconjunto de mais rápido crescimento da Manufatura Aditiva do mercado de impressoras de fabricação. Figura 1: Exemplo de peças de metal industrializadas no processo de Manufatura Aditiva (Fonte: <https://www.3dnatives.com/en/bmw-additive-manufacturing190420184/>). A Manufatura Aditiva é amplamente definida como um “processo de união de materiais para produzir partes dos dados do modelo 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição à subtração de metodologias de manufatura e de fabricação formativas (ISO, 2016). As tecnologias de Manufatura Aditiva podem, teoricamente, ser empregadas em praticamente qualquer tipo da operação de produção. Sua aplicação mais eficiente até o momento, no entanto, tem sido na produção de componentes e peças de baixo volume em máquinas que incorporam materiais de alto custo. A combinação desses fatores geralmente resulta em produtos que têm valor de mercado suficiente para compensar o investimento de capital significativo em equipamentos da Manufatura Aditiva e recursos de prototipagem necessários (FRAZIER, 2014). Alguns exemplos específicos de aplicações atuais da indústria da tecnologia em Manufatura Aditiva incluem: Tabela 1: Aplicações de tecnologia da Manufatura Aditiva (Fonte: Autor). **à Aeroespacial e defesa** - produção de componentes em motores e sistemas de combustível, fornecendo peso e alternativas mais fortes em relação às peças fabricadas convencionalmente. **à Automotivo** - uso por Fabricantes de Equipamentos Originais (OEM - Original Equipment Manufacturer) para prototipagem, acelerando a introdução de novas e inovadoras tecnologias automotivas. **à Assistência médica** - criação de próteses e implantes personalizados, bem como fabricação de tecidos e órgãos. **à Moda** - produção de joias e outros itens de moda, compostos por materiais de alto valor e projetos complexos. Pode-se esperar que a lista de possíveis aplicações da Manufatura Aditiva na indústria aumente na medida em que os produtores se tornam mais experientes em seu uso, bem como mais confortáveis para explorar todo o potencial da tecnologia.

METODOLOGIA A pesquisa apresenta uma metodologia para estabelecer um sistema de gerenciamento de segurança do trabalho, ou modificar um sistema existente, antes da introdução de capacidades da manufatura aditiva. **Manufatura Aditiva** Na manufatura aditiva em metais, os componentes são criados a partir de pó e luz de laser. Existem, atualmente, dois processos mais conhecidos nesse sentido: o LMF (*Laser Metal Fusion*) - também chamado de impressão 3D metálica, cria a peça camada por camada a partir de um pó - e LMD (*Laser Metal Deposition*) - gera um banho de fusão na superfície do componente, na qual um material aditivo metálico é aplicado continuamente em forma de pó e,

¹ Universidade de São Paulo, lcdasilva@usp.br

² Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

³ ArcelorMittal Tubarão, lucas.peres@arcelormittal.com.br

então, é derretido (A VOZ DA INDÚSTRIA, 2018). **Segurança do trabalho associada à Manufatura Aditiva de metais** Embora a fabricação aditiva possa fornecer benefícios significativos em aplicações industriais, sua introdução também traz consigo novas preocupações quanto à segurança potencial das atividades relacionadas à produção através da tecnologia de Manufatura Aditiva. Esse é especialmente o caso das atividades envolvendo componentes e peças metálicas, que frequentemente utilizam ligas metálicas novas e inovadoras para as quais poucas informações de segurança podem estar disponíveis. As preocupações de segurança relacionadas ao metal usado na tecnologia da Manufatura Aditiva geralmente podem ser categorizadas em uma das áreas descritas nas seções a seguir:

1. **Materiais** O metal em pó usado na fabricação aditiva é tipicamente microscópico em tamanho, e sua partícula é pequena (100 microns ou menos). Mesmo sob condições de uso antecipado, esse tamanho reduzido aumenta o risco de exposição biológica, seja por contato direto com a pele, ou por inalação ou ingestão. O contato direto a essa substância pode levar a irritações e erupções cutâneas. As consequências para a saúde relacionadas à exposição a longo prazo por inalação ou ingestão são amplamente conhecidas. Além disso, a infiltração de metal em pó no ar pode contribuir para a criação de uma atmosfera potencialmente explosiva dentro do ambiente de produção. **Figura 2: Exemplo de cuidados na Manufatura Aditiva** (Fonte: <https://legacy-uploads.ul.com/wp-content/uploads/2016>)
2. **Equipamento** Independentemente do tipo de processo empregado, a produção de metal pela tecnologia de Manufatura Aditiva envolve o uso de metais potencialmente reativos a pó, que podem inflamar, ou explodir sob condições padrão de produção. Equipamentos ou recipientes de pó metálico, ou repositórios que não estão aterrados ou isolados de descarga eletrostática, podem estar vulneráveis a um evento estático, o que pode resultar em incêndio ou explosão. Além disso, certos processos de produção utilizando a tecnologia em Manufatura Aditiva dependem do uso de gases como argônio ou nitrogênio, o que pode deslocar o oxigênio disponível nas proximidades, causando asfixia devido ao gás inerte e, conseqüentemente, privando os operadores de ar respirável.
3. **Instalações** Em ambientes de fabricação, o espaço físico pode ser alto. Nestes casos, o equipamento de produção costuma ser fortemente agrupado para maximizar a utilização do espaço e aumentar a eficiência da produção. Entretanto, esse arranjo pode impedir o fluxo de ar limpo em toda a instalação de produção. Essa consequência pode ser exacerbada pela ausência de sensores para monitorar níveis de oxigênio, ou para detectar a presença de gases potencialmente perigosos. Como observado anteriormente, a presença de equipamentos e dispositivos eletromecânicos pode aumentar o risco de faíscas, resultando em um evento eletrostático que pode levar a um incêndio ou explosão.
4. **Considerações adicionais** Outra questão relacionada às instalações diz respeito à movimentação e ao descarte de materiais potencialmente perigosos. Práticas inadequadas de manuseio podem resultar em vazamento ou derramamento de pó de metal da matéria-prima, expondo desnecessariamente os trabalhadores a possíveis consequências para a saúde. O descarte inadequado de materiais derramados, ou suprimentos de limpeza, também pode ameaçar a qualidade da água, fluxos de resíduos e vida aquática.

Regulamentos e normas da Manufatura Aditiva Característica de muitas novas tecnologias, o desenvolvimento de regulamentos e normas aplicáveis à Manufatura Aditiva atrasou sua implantação real. Parte da explicação para essa lacuna é que novos regulamentos e normas geralmente se baseiam em experiência com a

¹ Universidade de São Paulo, lcdasilva@usp.br

² Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

³ ArcelorMittal Tubarão, lucas.peres@arcelormittal.com.br

aplicação e uso real da tecnologia e processos. Contudo, ao mesmo tempo, a aplicação da Manufatura Aditiva aos materiais e processos ainda está evoluindo e se expandindo na medida em que os profissionais se tornam mais familiarizados com a tecnologia. Esta realidade da produção através da tecnologia da Manufatura Aditiva complica ainda mais a compreensão dos requisitos e diretrizes que precisam ser desenvolvidos. Apesar dessas restrições, vários esforços de desenvolvimento de padrões relacionados à Manufatura Aditiva estão em andamento. Até o momento, a *ASTM International* e a Organização Internacional de Padronização (ISO) têm sido o principal foco das atividades de desenvolvimento de normas da Manufatura Aditiva. Em 2013, o Comitê ASTM F 42 e o Comitê Técnico ISO 261 publicaram um “Plano Conjunto para Padrões de Fabricação de Aditivos Desenvolvimento”, que mapeia uma estrutura para o desenvolvimento de padrões da Manufatura Aditiva (ASTM INTERNATIONAL, 2016). Juntos e individualmente, ASTM e ISO publicaram, pelo menos, 14 padrões diferentes da Manufatura Aditiva, abordando terminologia e formatos de dados, materiais e testes, com mais padrões em desenvolvimento. Esforços adicionais de desenvolvimento de normas sobre a tecnologia da Manufatura Aditiva foram realizados por outros grupos, incluindo o British Standards Institute (BSI), que publicou várias normas sobre a Manufatura Aditiva, e com várias outras em desenvolvimento, e a Association of German Engineers (VDI), que publicou a VDI 3405 no final de 2014 (THE ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS, 2016). Finalmente, existe o projeto SASAM da União Europeia (a Ação de Suporte para Padronização em manufatura aditiva), que criou, em 2015, seu próprio roteiro para as atividades de padronização da Manufatura Aditiva. Para usar os EUA como exemplo, os regulamentos federais de segurança aplicáveis incluem leis de segurança do trabalho promulgadas pela Segurança e Saúde Ocupacional Administração (OSHA). O transporte e manuseio de materiais potencialmente perigosos são abordados nos regulamentos da OSHA e no Departamento de Transporte (DoT). Requisitos relacionados à geração, transporte, tratamento, armazenamento e disposição de resíduos perigosos são tratados nos regulamentos por Agências de Proteção Ambiental. Algumas regulamentações estaduais dos EUA, na Califórnia, podem aplicar requisitos de segurança diferentes ou mais rigorosos às Atividades relacionadas à Manufatura Aditiva. Assim, enquanto os regulamentos e normas de segurança específicos para a fabricação aditiva ainda não surgiram, a conformidade com os requisitos de aplicação geral regulamentos de segurança não é opcional para produtores que utilizam a Manufatura Aditiva. O não cumprimento da segurança e regulamentos pode resultar em multas e penalidades criminais ou civis e potencialmente levar ao encerramento das instalações da Manufatura Aditiva. **RESULTADOS E DISCUSSÃO** Conforme discutido anteriormente, a maioria dos problemas de segurança nas instalações da Manufatura Aditiva pode ser categorizada em uma das três áreas: materiais, equipamentos e instalações. Portanto, o desenvolvimento de um plano eficaz de gerenciamento de segurança da Manufatura Aditiva lida com riscos de segurança em cada uma dessas áreas, envolvendo um processo que: 1. Identifica os perigos; 2. Avalia a gravidade e a probabilidade de ocorrência de cada perigo; 3. Identifica medidas de controle para eliminar completamente ou mitigar a níveis razoáveis os efeitos de cada perigo; e 4. Avalia regularmente a conformidade com o plano de gerenciamento de segurança. As seções a seguir discutem cada etapa com mais detalhes. **Identificação dos perigos na segurança** Os riscos de segurança específicos da Manufatura Aditiva incluem incêndio,

¹ Universidade de São Paulo, lcdasilva@usp.br

² Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

³ ArcelorMittal Tubarão, lucas.peres@arcelormittal.com.br

explosão e potencial toxicidade. Ações específicas que podem ser tomadas para identificar esses perigos, inclui: **Tabela 2: Identificação de perigos** (Fonte: Autor). **à Materiais** - identificação dos perigos de toxicidade, combustibilidade, instabilidade e reatividade associados ao processamento e manuseio de materiais da manufatura aditiva antecipados. **à Equipamento** - identificação de possíveis fontes de emissões, riscos de ignição e radiação. **à Instalações** - identificação dos riscos de incêndio, explosão, toxicidade e meio ambiente no projeto da instalação, incluindo armazenamento, manuseio e descarte de materiais, instalações de fabricação e suas conexões. **Avaliação da probabilidade e da gravidade de cada perigo** A avaliação da probabilidade e potencial gravidade de cada perigo é analisado nos esforços para abordá-los. Algumas perguntas a serem feitas sobre cada perigo identificado são: • Qual é a probabilidade de ocorrência para um risco de segurança identificado? • O perigo tem potencial para ferir trabalhadores ou danificar bens? • O perigo pode resultar em um desligamento completo ou parcial das correntes de operações? • Quais são as outras maneiras pelas quais o perigo pode afetar o conjunto do negócio? • Qual seria o custo estimado para remediar danos atribuíveis ao perigo? **Identificação de métodos para prevenir ou mitigar os efeitos de cada perigo** O próximo passo em um plano de gerenciamento de segurança da Manufatura Aditiva é desenvolver as medidas de controle específicas, que podem ser implementadas para evitar riscos de ocorrer ou mitigar seus efeitos potenciais. Uma abordagem típica incluiria (em ordem decrescente de eficácia): 1) eliminação; 2) substituição; 3) controles de engenharia; 4) controles administrativos; e 5) equipamentos de proteção individual. Algumas ações específicas que podem ser tomadas incluem: **Tabela 3: Ações específicas** (Fonte: Autor). **à Materiais** - busca por métodos de otimização dos materiais da Manufatura Aditiva para segurança e desempenho. **à Equipamento** - identificação de métodos para prevenir, proteger ou suprimir as consequências de emissões ou ignição, como sistemas inertes para diminuir a probabilidade de combustão, ou sistemas de contenção ou extinção de pressão. **à Instalações** - identificação de métodos para prevenir, proteger ou suprimir as consequências de incêndio ou explosão ou toxicidade, através da instalação de sistemas de extinção, ou incorporando alívio ou isolamento de explosão considerados no projeto da instalação. **Avaliação contínua da conformidade** Por fim, um plano de gerenciamento de segurança eficaz incorpora avaliações regulares para verificar a validade continuada do plano e ajudar a garantir a conformidade. Ações específicas podem incluir: **Tabela 4: Ações específicas de conformidade** (Fonte: Autor). **à Materiais** - realização de avaliações rotineiras de materiais de fornecedores para verificar a conformidade com os contratos especificações e aderência contínua às melhores práticas de segurança de materiais. **à Equipamento** - garantia de que o equipamento de produção AM seja certificado quanto à conformidade com as operações em ambientes, como locais perigosos e atmosferas potencialmente explosivas. **à Instalações** - avaliação da conformidade do layout da instalação e das práticas operacionais para conformidade com a segurança no local de trabalho regulamentos. **Figura 3: Exemplo de avaliadores no processo de manufatura aditiva de metais** (Fonte: <https://legacy-uploads.ul.com/wp-content/uploads/2016>). **CONCLUSÃO** A Manufatura Aditiva e a Manufatura Aditiva de Metais, em particular, têm o potencial de transformar a produção industrial, o desenvolvimento e a fabricação de produtos, componentes e peças de alta qualidade, além de introduzir produtos inovadores no mercado de

¹ Universidade de São Paulo, lcdasilva@usp.br

² Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

³ ArcelorMittal Tubarão, lucas.peres@arcelormittal.com.br

uma maneira mais eficiente e econômica. Ao mesmo tempo, considerações de segurança relacionadas aos materiais e equipamentos utilizados na produção da Manufatura Aditiva são essenciais para ajudar a garantir a saúde e o bem-estar dos. Uma segurança sistemática da Manufatura Aditiva e o plano de gerenciamento podem fornecer uma estrutura para identificar riscos potenciais, bem como desenvolver estratégias para minimizar ou eliminar seus riscos e impacto. Os serviços de segurança de instalações da Manufatura Aditiva foram projetados para ajudar os usuários da tecnologia a gerenciar os riscos inerentes à produção e a alcançar a conformidade com requisitos regulamentares e padrões da indústria.

REFERÊNCIAS A VOZ DA INDÚSTRIA. **Que tal aplicar a manufatura aditiva em metais na sua indústria?** 2018. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/inova-o/que-tal-aplicar-manufatura-aditiva-em-metais-na-sua-ind-stria>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

ASTM INTERNATIONAL. **Joint Plan for Additive Manufacturing Standards Development.** 2016. Disponível em: <www.astm.org/COMMIT/AM_Standards_Development_Plan_v2.docx>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2020.

FRAZIER, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2020.

ISO. **Additive manufacturing - General principles - Terminology.** 2016. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2020.

MARKETS AND MARKETS. **Industrial 3D Printing Market by Offering (Printers, Materials, Services, Software), Application (Tooling, Heavy Equipment & Machinery, Robotics), Process, Technology, Industry (Aerospace & Defense, Automotive), and Geography - Global Forecast to 2023.** Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/industrial-3d-printing-market-160028620.html?gclid=CNz6nvawis4CFRjAhgodw9YLzA>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

THE ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS. **VDI-Standard: VDI 3405**, website of The Association of German Engineers. 2016. Disponível em: <http://www.vdi.eu/nc/guidelines/vdi_3405-additive_fertigungsverfahren_grundlagen_begriffe_verfahrensbeschreibungen>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

WOHLERS ASSOCIATES. **Wohlers Report 2016: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry.** 2016. Disponível em: <<https://wohlersassociates.com/2016report.htm>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança. Manufatura Aditiva. Metal. Indústria Moderna.

¹ Universidade de São Paulo, lcdasilva@usp.br

² Universidade de São Paulo, gfbatalh@usp.br

³ ArcelorMittal Tubarão, lucas.peres@arcelormittal.com.br