



CORONEL STORANI

Formulador de Doutrina de Logística
do Centro de Doutrina do Exército.

A REVOLUÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA: O IMPACTO DA IMPRESSÃO 3D NA LOGÍSTICA MILITAR EM CAMPANHA

INTRODUÇÃO

Os conflitos modernos, caracterizados pela sua assimetria, volatilidade e dispersão geográfica, impõem uma pressão sem precedentes sobre as operações logísticas militares. A tradicional “cauda logística” – a extensa e complexa rede de suprimentos que se

estende desde as bases industriais até a linha de frente – tornou-se um ponto de vulnerabilidade crítica. A capacidade de sustentar forças em Teatros de Operações (TO) distantes e, muitas vezes, hostis depende de uma cadeia de abastecimento que seja não apenas robusta, mas também ágil, resiliente e adaptável. Qualquer interrupção nessa cadeia, seja por ação inimiga, obsolescência de material ou simplesmente pela fricção da distância, pode comprometer a eficácia da missão e colocar vidas em risco.

A logística militar, definida por Martin Van Creveld em sua obra seminal *“Supplying War: Logistics from Wallenstein to Patton”*, é muito mais do que o mero transporte de bens; ela constitui a “arte e ciência de planejar e executar a movimentação e manutenção das forças”. Van Creveld (1977) postula que, historicamente, a capacidade de um exército projetar poder está diretamente limitada pela extensão e vulnerabilidade de sua cauda logística (*logistical tail*).

Fig 1 - Comboio militar de suprimento



Fonte: <https://www.eb.mil.br/web/noticias/w/sfgsfsggs>.

Cadeias de suprimentos longas e frágeis não apenas restringem o alcance e o ritmo das operações, mas também se tornam alvos estratégicos para o adversário, capazes de paralisar uma força combatente sem a necessidade de um confronto direto em larga escala. A teoria de Van Creveld sublinha a busca incessante por reduzir essa dependência, tornando a logística mais resiliente, ágil e integrada ao TO.

A logística militar convencional enfrenta gargalos intrínsecos, exacerbados pela natureza dos conflitos atuais. Longos prazos de entrega

para peças de reposição, especialmente para equipamentos mais antigos ou altamente especializados, podem deixar sistemas de armas críticos inoperantes por semanas ou meses. Os custos associados à manutenção de vastos estoques em múltiplos locais são proibitivos, e a previsão precisa da demanda em um ambiente de combate dinâmico é uma tarefa hercúlea. Além disso, a dependência de longas linhas de comunicação para o transporte de material torna a cauda logística um alvo atraente e vulnerável a ataques, sejam eles físicos ou cibernéticos, ameaçando a sustentabilidade das operações.

A resposta a esses desafios logísticos encontra um paralelo nos princípios da Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0. O conceito descreve a fusão de tecnologias digitais, físicas e biológicas, esmaecendo as fronteiras entre elas. Para o setor industrial e logístico, a Indústria 4.0 se traduz em sistemas ciberfísicos, nos quais a produção é conectada, inteligente e, crucialmente, descentralizada. Autores como Hermann, Pentek e Otto (2016)

identificam a descentralização como um pilar-chave, no qual a tomada de decisão e a produção podem ocorrer localmente, com base em dados em tempo real. Esse paradigma desafia o modelo de manufatura em massa centralizada, propondo uma rede de “fábricas inteligentes” (*smart factories*), capazes de produção flexível e personalizada, o que se alinha diretamente à necessidade militar de obter recursos no ponto de necessidade.

Fig 2 - Linha de impressoras industriais



Fonte: <https://www.stratasys.com/en/resources/resource-guides/3d-printing-buyers-guide/>.

“A vulnerabilidade das cadeias de suprimento constitui fator crítico da logística militar contemporânea.”

Nesse cenário desafiador, a Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, emerge como uma tecnologia disruptiva, com o potencial de redefinir o paradigma da logística de defesa. Conforme definido por Gibson, Rosen e Stucker em “*Additive Manufacturing Technologies*”, a MA é “um processo de união de materiais para fazer objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição às metodologias de manufatura subtrativa”¹ (Gibson et al., 2015).

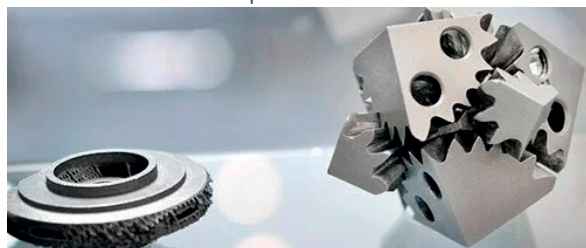
A principal característica disruptiva da MA não é apenas a capacidade de criar geometrias complexas, mas sua natureza de “produção sem ferramentas” (*tool-less production*). Isso elimina a necessidade de moldes, matrizes e ferramentais específicos, permitindo que um único equipamento produza uma variedade ilimitada de peças a partir de arquivos digitais. Essa capacidade de transformar “bits em átomos” no local e no momento desejado é o que posiciona a MA como a tecnologia habilitadora por

excelência para a descentralização da cadeia de suprimentos militar.

A impressão 3D permite a fabricação de objetos camada por camada a partir de um modelo digital, oferecendo a capacidade de produzir peças e componentes sob demanda, no local e no momento da necessidade. Essa capacidade de “teletransportar” projetos digitais e materializá-los no campo de batalha promete mitigar muitos dos problemas crônicos da logística tradicional, encurtando drasticamente as cadeias de suprimentos e aumentando a autonomia das unidades desdobradas.

O objetivo deste artigo é analisar as aplicações estratégicas da manufatura aditiva, destacando as vantagens inerentes e os desafios significativos da sua implementação na logística em cenários de conflito.

Fig 3 - Peças fabricadas em metal, usando a impressão 3D



Fonte: <https://protosul.com.br/impressao-3d-em-metal-na-tecnologia-fdm-o-melhor-custo-beneficio/>.

¹A manufatura subtrativa é o processo de fabricação que se caracteriza pela remoção de material de uma peça bruta ou bloco sólido para obter a geometria final desejada. Seria como esculpir uma forma a partir de um bloco cúbico de pedra ou como fabricar um parafuso utilizando um torno mecânico para desbastar um cilindro metálico.

“A produção descentralizada por manufatura aditiva aumenta a resiliência logística das forças.”

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE

A transição do conceito teórico para a aplicação prática da MA no ambiente militar consubstancia-se na análise de suas áreas de aplicação, nas vantagens estratégicas que oferece e nos desafios inerentes à sua implementação em larga escala. Conforme apontado por Gibson et al. (2021), a MA não é uma tecnologia monolítica, mas um conjunto de processos distintos, cada um com capacidades e materiais específicos, o que determina sua adequação a diferentes demandas operacionais.

Principais Tecnologias Relevantes para Aplicação Militar

A aplicação da impressão 3D nas Forças Armadas evoluiu de uma ferramenta de prototipagem rápida para uma capacidade de produção descentralizada e funcional. A

escolha da tecnologia de impressão é crucial e depende diretamente do requisito da peça: resistência mecânica, precisão dimensional, material ou velocidade de produção. As tecnologias mais proeminentes no contexto militar incluem:

Fused Deposition Modeling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF)

É a tecnologia mais comum e acessível. Utiliza um material termoplástico (como ABS, PLA, ou compósitos de alta resistência, como PEEK), aquecido e depositado por extrusão, camada por camada.

É a tecnologia mais acessível e difundida, ideal para aplicações de baixa criticidade em bases avançadas (*Forward Operating Bases*, no inglês FOB). É utilizada para a fabricação de ferramentas customizadas, gabaritos, suportes, peças de reposição para interiores de veículos e aeronaves (ex.: botões e tampas) e carcaças para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) de reconhecimento rápido.

Fig 4 - Impressoras 3D FDM em funcionamento



Fonte: https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/6nci3d/print_farm_under_construction/.

Stereolithography (SLA) e Digital Light Processing (DLP)

Utiliza uma fonte de luz (laser ou projetor) para curar (solidificar) resinas líquidas fotossensíveis, camada por camada.

Conhecida por sua altíssima precisão e excelente acabamento de superfície. É ideal para a produção de modelos médicos (ex.: planejamento cirúrgico a partir de tomografias),

protótipos de alta fidelidade para testes de encaixe e função, e componentes complexos que exigem detalhes intrincados, como moldes para fundição de peças metálicas. Inclui, por exemplo, moldes para estruturas com geometria específica voltadas à recepção ótima (suportes para antenas de detecção) ou para estruturas que varrem mecanicamente o solo (componentes de busca de minas).

Fig 5 - Impressora 3D industrial de SLA



Fonte: <https://pdf.directindustry.com/pt/viewerCatalog-en/massivit-3d/massivit-10000-10000-g/245676-1054286.html#open2624001>.

Selective Laser Sintering (SLS) e Multi Jet Fusion (MJF)

Utiliza um laser SLS ou um agente de fusão MJF para fundir (sinterizar) seletivamente partículas de um leito de pó, geralmente polímeros como o Nylon (PA12).

Permite a produção de peças robustas e duráveis, com propriedades mecânicas adequadas para uso final, sem a

necessidade de estruturas de suporte. É uma das tecnologias mais promissoras para a produção de peças funcionais, como componentes de armas, conectores duráveis e partes de equipamentos submetidos a estresse mecânico moderado, como caixas de equipamentos, peças de drones e componentes de veículos que precisam de durabilidade.

Fig 6 - Impressora 3D SLS industrial



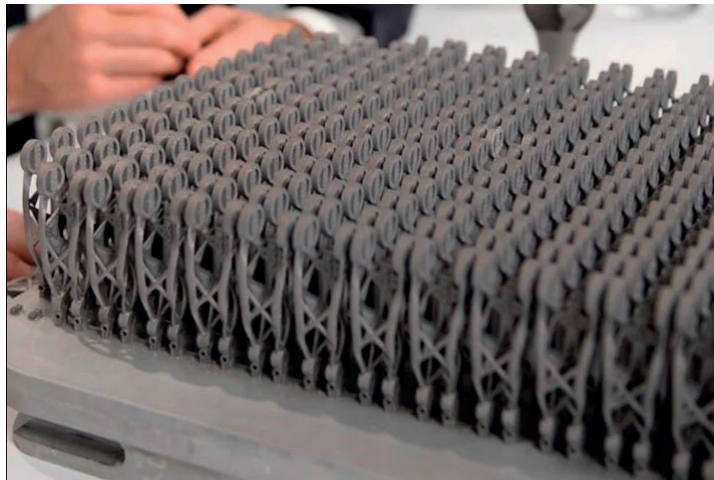
Fonte: <https://chanhontech.com/pt/Impressoras-3d/impressoras-3D-sls/S%C3%A9rie-403p/>.

“A impressão 3D amplia a prontidão operacional ao reduzir a indisponibilidade de equipamentos e aumentar a autonomia das unidades.”

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) / Selective Laser Melting (SLM)

É um sistema semelhante ao SLS, mas utiliza um laser de alta potência para fundir pós metálicos, como titânio, alumínio, aço inoxidável e ligas de Inconel².

Fig 7 - Lote de peças produzidas em série com impressão 3D DMLS



Fonte: <https://amsbrasil.com.br/impressora-3d-metal-dmls-tudo-sobre-a-tecnologia-mais-utilizada-por-grandes-empresas/>.

Electron Beam Melting (EBM):

Esse sistema utiliza um feixe de elétrons, em vez de um laser, para fundir o pó metálico. O processo ocorre em alto vácuo e a temperaturas elevadas, sendo ideal para o processamento de materiais reativos e propensos a tensões internas, como ligas de titânio (ex.: Ti6Al4V) e superligas à base de níquel.

A grande vantagem da EBM é a produção de peças com tensões residuais muito baixas, eliminando a necessidade de tratamentos térmicos pós-produção complexos. Isso a torna extremamente valiosa para a fabricação de componentes aeroespaciais críticos, como pás de turbina, componentes estruturais de aeronaves e implantes médicos personalizados — ortopédicos, dentários ou próteses de

Trata-se de uma das tecnologias de maior impacto estratégico, pois permite a impressão de peças metálicas de alta performance, críticas para a prontidão de sistemas de armas. As aplicações incluem a fabricação sob demanda de peças de reposição para motores de aeronaves, componentes estruturais para veículos blindados, e a otimização de peças existentes, tornando-as mais leves e resistentes por meio do design generativo³ — algo impossível com a manufatura tradicional.

quadril e joelho — nos quais a integridade do material é primordial.

Principais Áreas de Aplicação da Impressão 3D no Teatro de Operações

A impressão 3D tem demonstrado um vasto leque de aplicações no contexto militar, abrangendo desde a produção de componentes críticos até o suporte médico em campo. A capacidade de fabricar itens sob demanda e no local de necessidade constitui um diferencial estratégico que otimiza a prontidão operacional e reduz a dependência de longas cadeias de suprimentos.

Produção de Peças de Reposição e Componentes

Uma das aplicações mais significativas da impressão 3D na logística militar é a produção de peças de reposição e componentes. Isso

²Inconel é uma marca registrada da empresa *Special Metals Corporation*, que designa uma família de ligas de níquel-cromo de alta temperatura, também conhecidas como superligas à base de níquel. Essas ligas são especialmente desenvolvidas para manter excelentes propriedades mecânicas em temperaturas extremamente elevadas, nas quais materiais convencionais perdem resistência.

³Design generativo é uma metodologia de desenvolvimento de produtos que utiliza algoritmos computacionais, inteligência artificial e otimização matemática para explorar automaticamente múltiplas soluções de design, gerando geometrias otimizadas que atendem a restrições de engenharia — como resistência, peso, custo, fabricabilidade — sem intervenção manual em cada iteração.

inclui desde itens não críticos, como suportes e tampas, até peças mais complexas e de alto desempenho.

A Força Aérea dos EUA (FAEUA), por sua vez, tem explorado a impressão de peças de titânio para aeronaves avançadas, como o caça furtivo F-22 Raptor, demonstrando a capacidade de produzir componentes de alto desempenho.

Fig 8 - Peça impressa pela FAEUA em comparação com a instalada na aeronave



Fonte: <https://www.hill.af.mil/News/Article-Display/Article/1734175/first-metallic-3d-printed-part-installed-on-f-22/>.

O Exército dos EUA (EEUA), por exemplo, tem utilizado a manufatura aditiva para produzir tampas de veículos de combate, resolvendo problemas de peças obsoletas em poucos dias e a um custo muito baixo, o que representa economia de tempo e recursos significativos.

A Marinha Real Britânica também instalou oficinas de impressão 3D a bordo de navios, como o HMS Queen Elizabeth, possibilitando a fabricação de ferramentas e peças durante as missões, o que aumenta a autossuficiência em locais remotos.

As Forças de Defesa de Israel também utilizam a impressão 3D para fabricar peças destinadas aos carros de combate Merkava, reduzindo a dependência de fornecedores externos e melhorando a prontidão operacional.

Ferramentas e Gabaritos

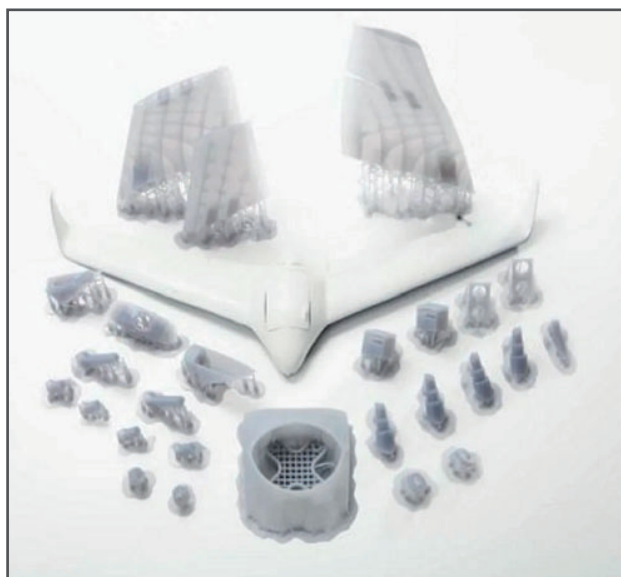
A fabricação de ferramentas e gabaritos customizados no local de operação é outra aplicação vital da impressão 3D. Essa capacidade permite que as equipes de manutenção acelerem reparos e manutenções, criando soluções específicas para problemas inesperados que surgem em campo. A agilidade na produção de

ferramentas personalizadas otimiza o tempo de inatividade dos equipamentos e aumenta a eficiência das operações de reparo.

Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP / Drones)

A impressão 3D possibilita a fabricação de drones inteiros ou de suas peças, permitindo uma rápida reposição e adaptação a missões específicas. Essa capacidade é crucial em cenários onde a perda de ARP é frequente e a necessidade de substituição imediata é elevada. A flexibilidade de design e a rapidez na produção de drones personalizados conferem uma vantagem tática significativa, permitindo que as forças militares respondam de forma ágil às demandas operacionais.

Fig 9 - Estrutura de SARP completamente impresso



Fonte: <https://3dprint.com/64039/mrb-1-3d-print-drone/>.

Aplicações Médicas

No campo da medicina militar, a impressão 3D tem promovido transformações significativas. Ela permite a criação de próteses personalizadas, guias cirúrgicos e modelos anatômicos para o planejamento de cirurgias em hospitais de campanha. O Centro Médico Nacional Walter Reed, dos EUA, por exemplo, utilizou a tecnologia para guias cirúrgicos, facilitando operações complexas em soldados feridos. A capacidade de produzir soluções médicas customizadas no ponto de atendimento melhora de forma expressiva os cuidados de saúde em campo e acelera a recuperação dos combatentes.

Construção e Infraestrutura

A impressão 3D vem sendo explorada para a construção de estruturas de concreto, como barreiras e abrigos, em zonas de conflito. O EEUA já experimentou essa tecnologia para a construção rápida de bases de campo e fortificações, como bunkers à prova de explosões. FAEUA, por meio do 175º Esquadrão de

Engenheiros Civis, está desenvolvendo uma Impressora 3D Expedicionária de Concreto para construir rapidamente infraestrutura fortificada, reduzindo a necessidade de mão de obra e o tempo de construção, além de oferecer maior proteção contra explosões e fragmentação. Essa inovação economiza tempo e material, além de aumentar a segurança das tropas.

Fig 10 - Impressora 3D tendo concreto como matéria prima



Fonte: <https://www.cimentoitambe.com.br/3d-casa-em-24-horas/>.

Treino e Simulação

Modelos impressos em 3D são utilizados para treinamentos, simulando condições de batalha ou reproduzindo réplicas de equipamentos inimigos. Os centros de treinamento de combate do EEUA, por exemplo, utilizam réplicas impressas de veículos inimigos para exercícios realistas, aprimorando a preparação dos soldados. Essa prática possibilita um treinamento mais eficaz e imersivo, preparando as tropas para os desafios do campo de batalha.

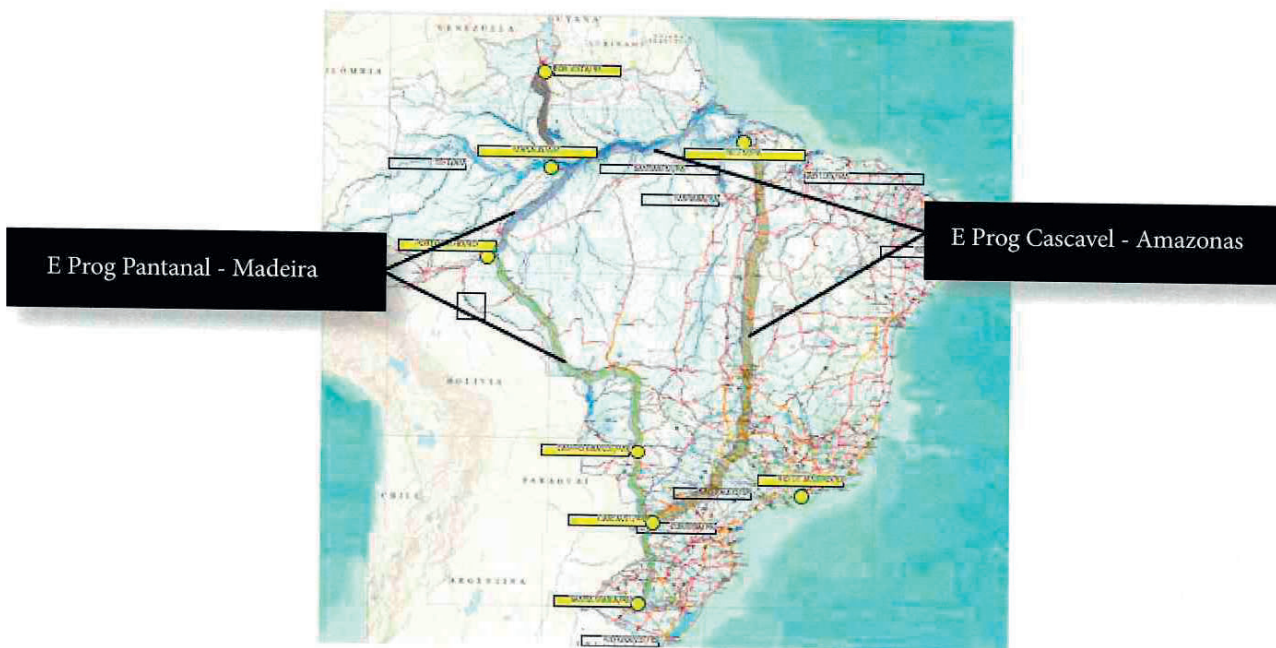
O Paradigma Logístico Tradicional: Desafios e Vulnerabilidades

A logística militar convencional opera sob um modelo de “estoque por precaução” (*just-in-case*). Peças sobressalentes, componentes

e suprimentos são adquiridos em massa e estocados em depósitos centrais, sendo transportados por longas e complexas cadeias de suprimento até a linha de frente. Embora testado pelo tempo, esse modelo apresenta fragilidades críticas:

- **Vulnerabilidade das linhas de suprimento:** rotas logísticas longas (terrestres, marítimas ou aéreas) são alvos prioritários para o inimigo e podem ser interrompidas por ações cinéticas ou por desastres naturais.
- **Custos elevados de estoque:** manter vastos inventários de peças, muitas das quais podem nunca ser utilizadas (obsolescência), gera um custo financeiro e de infraestrutura significativo.

Fig 11 - Rotas logísticas da Operação Roraima 2025



Fonte: Revista "Operação Roraima", do COLOG.

• **Lentidão na resposta:** o tempo entre a identificação de uma necessidade e a entrega da peça pode ser de dias, semanas ou até meses, resultando em equipamentos inoperantes (*downtime*) e na redução da prontidão da força.

• **Problemas de obsolescência:** para equipamentos antigos, peças de reposição podem não ser mais fabricadas, exigindo processos caros de "canibalização"⁴ de outras plataformas ou a fabricação por encomenda a custos exorbitantes. de outras plataformas ou a fabricação por encomenda a custos exorbitantes.

Manufatura Aditiva como Solução Disruptiva

A impressão 3D ataca diretamente esses pontos fracos ao introduzir um modelo de **fabricação no ponto de necessidade**. Em vez de mover peças, move-se a informação (o arquivo digital do projeto). As vantagens são transformadoras:

• **Redução da pegada logística:** menos necessidade de transporte e armazenamento de peças físicas. Um contêiner com uma impressora 3D e matéria-prima pode substituir um armazém de peças.

• **Aumento da prontidão operacional:** redução drástica do *downtime* dos equipamentos. Uma peça pode ser fabricada em horas, em vez de semanas.

Fig 12 - Contêiner de impressão 3D operando em Campanha (ilustrativa)



Fonte: o autor.

• **Autossuficiência e resiliência:** unidades desdobradas em locais remotos ganham autonomia para produzir seus próprios sobressalentes, reduzindo a dependência de bases longínquas.

⁴A canibalização é a remoção de peças funcionais de um equipamento inoperante para utilização em outro equipamento similar ainda em uso: prática comum em ambientes militares e industriais para a manutenção da disponibilidade operacional.

- **Combate à obsolescência:** peças de sistemas podem ser recriadas por engenharia reversa (escaneamento 3D) e impressas, estendendo a vida útil de equipamentos valiosos.
- **Otimização de design:** a manufatura aditiva permite a criação de peças mais leves, mais fortes e com geometrias complexas, impossíveis de serem obtidas com métodos tradicionais (manufatura subtrativa), otimizando o desempenho dos equipamentos.

Vantagens Estratégicas para a Logística de Defesa

A adoção da impressão 3D na logística militar e a integração das tecnologias citadas confere uma série de vantagens estratégicas e táticas, que transformam a forma como as operações são conduzidas e promovendo maior eficiência, agilidade e resiliência.

Redução Drástica da Dependência Logística (Supply Chain Compression)

A capacidade de fabricar uma peça em horas ou dias, no próprio TO ou em suas proximidades, mitiga a vulnerabilidade das longas e complexas cadeias de suprimentos. Isso reduz o tempo de espera (*lead time*) de meses para dias, um fator decisivo para a manutenção da prontidão.

Um dos maiores benefícios da impressão 3D é a capacidade de “imprimir em vez de esperar”. Em cenários de combate, em que cada hora conta, a agilidade na obtenção de uma peça de reposição pode significar a diferença entre um ativo operacional e um equipamento inativo. FAEUA, por exemplo, demonstrou a capacidade de produzir peças de titânio para caças furtivos em tempo recorde, um feito impensável com métodos convencionais. Similarmente, o Exército Britânico tem utilizado impressoras 3D em campo para fabricar peças de reposição para veículos e equipamentos, reduzindo o tempo de inatividade de semanas ou meses para horas.

Redução da Cauda Logística e Custos

A impressão significativamente 3D contribui para a redução da “cauda logística”, diminuindo a necessidade de manter grandes estoques de peças e componentes em depósitos e a dependência de transporte

de materiais por longas distâncias. A produção sob demanda minimiza custos de armazenamento, manuseio e transporte, liberando recursos financeiros e humanos que podem ser realocados para outras áreas críticas. Além disso, a capacidade de fabricar peças no ponto de uso também reduz a vulnerabilidade das cadeias de suprimentos a ataques e interrupções, tornando a logística mais enxuta e eficiente.

Aumento da Prontidão Operacional

Menos tempo com equipamentos parados à espera de peças significa maior disponibilidade de aeronaves, veículos e sistemas para o cumprimento da missão. A MA ataca diretamente o problema das peças obsoletas ou de difícil obtenção (*Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages - DMSMS*).

A rápida substituição de peças danificadas ou desgastadas garante que os ativos militares permaneçam em serviço por mais tempo, maximizando sua contribuição para a missão. Isso é particularmente crítico para equipamentos especializados ou antigos, cujas peças de reposição são difíceis de obter por meio dos canais de suprimento convencionais.

Produção Sob Demanda e Estoque Zero

A transição de um modelo *just-in-case* (grandes estoques preventivos) para um *just-in-time* (produção conforme a necessidade) reduz drasticamente os custos associados ao armazenamento, ao gerenciamento e ao transporte de estoques.

Complexidade sem Custo Adicional

Diferente da manufatura subtrativa, a MA não penaliza a complexidade geométrica. Isso permite a criação de peças otimizadas, mais leves e resistentes (com estruturas de treliça internas, por exemplo), melhorando o desempenho do equipamento sem aumento de custo.

Customização e Inovação em Campanha

A MA oferece uma flexibilidade sem precedentes para a customização e inovação no campo. A capacidade de modificar um projeto e imprimir uma solução adaptada a um problema específico encontrado no local permite que as forças militares respondam de forma criativa e eficaz a desafios inesperados.

Isso inclui a criação de ferramentas especializadas para reparos complexos, a adaptação de equipamentos para atender a requisitos de missão específicos ou até mesmo o desenvolvimento de novos componentes para aprimorar sistemas existentes. Essa inovação “no local” capacita os militares e aumenta sua adaptabilidade em ambientes dinâmicos e imprevisíveis.

“A incorporação da manufatura aditiva demanda ajustes à certificação, à segurança cibernética, à limitação de materiais e à capacitação de pessoal.”

Desafios, Limitações e o Caminho a Seguir

Apesar do imenso potencial da impressão 3D na logística militar, sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios e limitações significativos, que precisam ser superados para que a tecnologia atinja sua plena capacidade.

Certificação e Garantia de Qualidade

Um dos maiores desafios é garantir que as peças impressas em 3D atendam aos rigorosos padrões de segurança e desempenho exigidos para equipamentos militares. A questão da confiabilidade é crucial: como assegurar que uma peça fabricada aditivamente suportará as mesmas tensões e condições operacionais que uma peça usinada tradicionalmente?

Processos de certificação robustos, que incluem testes como escaneamento por raios X e tomografia computadorizada, são essenciais para validar a integridade estrutural e a qualidade dos materiais. A falta de padronização e de um arcabouço regulatório claro para a certificação de peças impressas em 3D ainda constitui uma barreira significativa à sua adoção generalizada.

Propriedade Intelectual e Segurança Cibernética

O “ativo” deixa de ser a peça física e passa a ser o arquivo digital (o *digital twin*). Proteger esses arquivos contra roubo, espionagem

ou sabotagem (como a alteração maliciosa de um arquivo para introduzir uma falha na peça) é uma preocupação de segurança primordial.

A digitalização dos processos de fabricação introduz novos riscos de segurança cibernética. A possibilidade de um adversário hackear os arquivos de design (CAD) e introduzir falhas invisíveis em uma peça impressa em 3D é uma preocupação séria, pois tais falhas poderiam comprometer a integridade estrutural ou o desempenho do componente, sendo extremamente difíceis de detectar por métodos de inspeção convencionais. A proteção da propriedade intelectual e a garantia da integridade dos dados de design são, portanto, aspectos críticos que exigem soluções robustas de segurança cibernética.

Limitações de Materiais e Escalabilidade⁵

Embora a gama de materiais compatíveis com a impressão 3D esteja em constante expansão, ainda é restrita em comparação com os materiais tradicionalmente utilizados na indústria de defesa. Materiais de alta performance, com propriedades mecânicas e térmicas específicas, podem ser difíceis de imprimir ou ainda não estar disponíveis para todas as tecnologias de MA. Além disso, a velocidade de impressão, embora tenha melhorado, pode não ser adequada para a produção em massa de grandes volumes de peças, limitando a escalabilidade da tecnologia para certas aplicações.

Cultura, Doutrina e Capacitação

A maior barreira pode não ser tecnológica, mas cultural. É preciso treinar engenheiros, técnicos e logísticos não apenas para operar as máquinas, mas para “pensar em aditivo”: identificar itens aprovados para impressão, redesenhar peças para otimização e integrar essa capacidade à doutrina logística e de manutenção. A capacitação de um número suficiente de militares e técnicos, com as habilidades necessárias para operar e gerenciar a tecnologia de impressão 3D em condições de combate, constitui um investimento significativo e uma limitação atual à sua ampla implantação.

⁵Escalabilidade designa a viabilidade técnica e econômica de um processo de manufatura aditiva — particularmente *Electron Beam Melting* (EBM) para implantes médicos e componentes militares — em expandir-se de prototipagem laboratorial para a produção em série, comprometer de precisão dimensional, biocompatibilidade, conformidade regulatória ou custos unitários. Ela é especialmente crítica em contextos de Defesa, nos quais soluções de prototipagem rápida devem transicionar para produção sustentável, capaz de atender a demandas operacionais crescentes, mantendo a qualidade e os padrões técnicos rigorosos.

Ambiente Operacional Qualificado

As impressoras 3D, especialmente as mais avançadas, frequentemente exigem um ambiente operacional controlado em termos de energia, temperatura e limpeza, para funcionar de forma otimizada. Em cenários de campo, onde as condições são, muitas vezes, adversas e imprevisíveis, manter esse ambiente ideal pode ser um desafio.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A impressão 3D, ou MA, emerge como uma tecnologia com imenso potencial transformador para a logística militar em cenários de conflito. Sua capacidade de produzir peças e componentes sob demanda, no local e no momento da necessidade, representa uma mudança de paradigma em relação aos modelos logísticos tradicionais. As vantagens são claras: maior agilidade e redução do tempo de resposta; diminuição da dependência de longas e vulneráveis cadeias de suprimentos; otimização de custos e estoques; aumento da disponibilidade operacional de equipamentos; e possibilidade de customização e inovação diretamente no campo de batalha. Em essência, a impressão 3D promove uma logística mais enxuta, ágil e resiliente, fundamental para as operações militares modernas.

Contudo, é crucial reconhecer que a tecnologia não é uma panaceia. Desafios

significativos persistem, especialmente no que tange à certificação e à garantia de qualidade das peças impressas, às limitações de materiais e à escalabilidade para produção em massa, à segurança cibernética dos arquivos de design e à necessidade de um ambiente operacional controlado, bem como de pessoal altamente qualificado. A superação desses obstáculos exige um planejamento cuidadoso, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, além da formulação de doutrinas e políticas que integrem a manufatura aditiva de forma eficaz às Forças Armadas.

Para o futuro, sugere-se que pesquisas continuem a explorar estudos de caso específicos, especialmente no contexto brasileiro, a fim de avaliar a viabilidade e o impacto da impressão 3D em diferentes cenários. O desenvolvimento de políticas de certificação adaptadas às Forças Armadas do Brasil e análises de custo-benefício para a produção de diferentes tipos de peças são passos essenciais. A impressão 3D é, sem dúvida, uma ferramenta estratégica fundamental para a evolução da logística de defesa, mas sua implementação bem-sucedida dependerá da capacidade de superar seus desafios inerentes e de um compromisso contínuo com a inovação e a adaptação.

REFERÊNCIAS

- Additive Manufacturing for Military Applications. **Nato Science & Technology Organization**, Neuilly-sur-Seine, França, 2018. Disponível em: <https://www.sto.nato.int/publications/Pages/publication.aspx?ID=36f2f45c-e58f-4378-b39f-b52e3e6027a0>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- ANÁLISE Detalhada sobre a Impressão 3D e o Seu Uso Militar. **Tucab**, 18 mar. 2025. Disponível em: <https://www.tucab.pt/pt/Noticias/Analise-Detalhada-sobre-a-Impressao-3D-e-o-Seu-Uso-Militar-B347>. Acesso em: 09 ago. 2025.
- B, Javier. Infografía: La impresión 3D en la industria de la defensa. **3DNatives**. 25 fev. 2024. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/es/infografi-a-impresion-3d-defensa-080220242/>. Acesso em: 10 ago. 2025.
- FIGUEIREDO, Marcus. Força Aérea dos EUA usa impressão 3D de concreto para melhorar a infraestrutura. **Manufatura Digital**. 22 abr. 2025. Disponível em: <https://www.manufaturadigital.com/forca-aerea-dos-eua-usa-impressao-3d/>. Acesso em: 07 ago. 2025.
- FIGUEIREDO, Marcus. Marinha Francesa valida tecnologia de manufatura aditiva DED da Meltio. **Manufatura Digital**. 19 jul. 2024. Disponível em: <https://www.manufaturadigital.com/marinha-francesa-tecnologia-da-meltio/>. Acesso em: 10 ago. 2025.
- FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 8 abr. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z>. Acesso em: 10 ago. 2025.

FREEMAN, Jon; PERSI PAOLI, Giacomo. Additive manufacturing and obsolescence management in the defence context. **RAND Corporation**, Santa Monica, 12 out. 2025. Disponível em: <https://www.rand.org/pubs/perspectives/PE171.html> . Acesso em: 11 ago. 2025.

GALÁN, José Javier; CARRASCO, Ramón Alberto; LATORRE, Antonio. Military Applications of Machine Learning: A Bibliometric Perspective. **Mathematics**, 22 abr. 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/9/1397>. Acesso em: 08 ago. 2025.

GERSTEIN, Daniel M.; LEIDY, Erin N. Emerging technology and risk analysis: additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, 15 fev. 2024 Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2984-1.html. Acesso em: 11 ago. 2025.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *Working Paper*, Technische Universität Dortmund. **Researchgate**, Jan. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review. Acesso em: 13 ago. 2025.

IMPRESSÃO 3D para equipamentos militares: rapidez e eficiência. **Supervivo**, 18 dez. 2024. Disponível em: <https://supervivo.pt/impressao-3d-para-equipamentos-militares-rapidez-eeficiencia/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

LIU, Pan et al. A Review of Additive Manufacturing of Metals: Opportunities, Challenges, and Applications. **Advanced Engineering Materials**, [s.l.], v. 23, n. 5, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adem.202001158>. Acesso em: 5 ago. 2025.

MEIER, Christoph et al. Physics-Based Modeling and Predictive Simulation of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Across Length Scales. **arXiv preprint**, Ithaca, NY, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2103.16982>. Acesso em: 13 ago. 2025.

NYMAN, H. J.; SARLIN, P. From Bits to Atoms: 3D Printing in the Context of Supply Chain Strategies. **ArXiv preprint**, 2013. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1306.4512>. Acesso em: 12 ago. 2025.

PAWLAK, R.; PLATEK, R. **Logistics in the Armed Forces: A Contemporary Theory**. Varsóvia: Military University of Technology, 2019.

TATHAM, P.; LOY, J. The Rise of Additive Manufacturing in Military Logistics: A Review and Research Agenda. **Journal of Military and Strategic Studies**, [s.l.], v. 18, n. 3, p. 1-25, 2018. Disponível em: <https://jmss.org/index.php/jmss/article/view/695>. Acesso em: 4 ago. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Department of Defense Additive Manufacturing Strategy**. Washington, D.C.: DoD, 2021. Disponível em: <https://www.cto.mil/dod-additive-manufacturingstrategy/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VAN CREVELD, M. **Supplying War: Logistics from Wallenstein to Patton**. Cambridge: Cambridge University Press, 1977.

YAMPOLSKIY, M. et al. Towards Security of Additive Layer Manufacturing. **ArXiv preprint**, 2015. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1602.07536>. Acesso em: 11 ago. 2025.

UNITED KINGDOM. World-leading 3D printer used by British Army in the field for first time. **GOV. UK**, 14 maio. 2024. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/news/world-leading-3d-printer-usedby-british-army-in-the-field-for-first-time>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SOBRE O AUTOR

O Coronel de Material Bélico R1 FABRICIO STORANI DE OLIVEIRA é Formulador de Doutrina do Centro de Doutrina do Exército. Foi declarado Aspirante a Oficial em 1993, pela Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN). Concluiu o mestrado em Operações Militares pela Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais em 2002, o curso de Logística pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 2007 e a especialização em Gestão da Segurança da Informação e Comunicações da Presidência da República (UNB/GSI-PR) em 2011. No meio acadêmico, possui graduação em Administração pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, mestrado em Engenharia de Produção pelo Centro Federal de Educação Celso Suckow da Fonseca e doutorado em Educação em Ciências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foi instrutor da Escola de Material Bélico de 2004 a 2009. (fabricio.storani@eb.mil.br).