

DESAFIOS DA MANUFATURA ADITIVA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS

Lúcio Roberto de Menezes

Júlia Souza Abrão

Igor Cesar de Carlos Rosa

Leonardo da Silva Alves

Thiago Querino

Bruno Souza Abrão

Mayara Fernanda Pereira

Arthur Alves Fiocchi

Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1O, Uberlândia-MG, Brasil, 38400-902.

lucio.menezes@ufu.br; julia.abrao@ufu.br; igor_cesarcr@ufu.br; leonardoalves@ufu.br; tquerino@ufu.br; bruno.abrao@ufu.br; mayara.pereira@ufu.br; arthurfiocchi@ufu.br.

Resumo: A manufatura aditiva (AM) de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras contínuas (CFRP) despertou industrialmente, segundo estudo bibliométrico competindo com tradicionais tecnologias de fabricação de compósitos, com destaque nas indústrias aeroespacial, automotiva, esportiva e médica. As vantagens residem na fabricação de geometrias complexas multiescala e multimaterial com elevado desempenho mecânico por densidade relativa sem a necessidade de moldes e ferramentais. A presente pesquisa apresenta e discute a AM CFRP destacando as três tecnologias pioneiras. A pesquisa abrangeu os diferenciais tecnológicos, materiais (matriz e reforço), softwares e processos de deposição, fundamentada principalmente nas respectivas patentes e artigos científicos. As resistências à tração foram comparadas entre polímeros e CFRP. Também foram identificados os desafios de aumentar a fração volumétrica de fibras (V_f) acima de 50 %, melhorar adesão matriz/reforço, aumentar a compactação, reduzir porosidade e aprimorar a distribuição das fibras contínuas (CF). A resistência à tração de peças obtidas por AM CFRP alcançou 900 MPa com V_f próximas a 30 % para Nylon (PA) reforçado com CF e fibras descontínuas (DF) de carbono, representado 75 % da resistência de peças fabricadas por filament winding (FW). Sistemas de deposição com mais graus de liberdade são necessários para alcançar a deposição verdadeiramente tridimensional. Diversos polímeros termoplásticos (TP), PLA, PA e PEEK, e termofixos (TS) epoxídicos de engenharia podem ser associadas as fibras de basalto, vidro, aramida e carbono puxando o desenvolvimento de novos materiais com vistas a desempenho mecânico com maior custo relativo (Fibra de carbono e PEEK) ou custo-benefício (fibra de vidro e PA). Perspectivas futuras contemplam aumentar a rigidez estrutural e os graus de liberdade (DOF) das impressoras. Não obstante, o desenvolvimento de softwares CAD-CAE-CAM voltados à AM CFRP, orientação tridimensional da FC, melhoria do controle termodinâmico, minimização de defeitos com monitoramento e controle de processo e associação da AM com a manufatura subtrativa (MS) no contexto da manufatura híbrida (HM).

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Compósitos; Fibras contínuas; Extrusão de material; Resistência mecânica

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (*additive manufacturing* - AM) é classificada em sete categorias segundo ISO/ASTM 52900:2021, sequencialmente *binder jetting* (BJT), *directed energy deposition* (DED), *material extrusion* (MEX), *material jetting* (MJT), *powder bed fusion* (PBF), *sheet lamination* (SHL) e *vat photopolymerization* (VPP), e pode ser definida como processos de adição tridimensional de materiais a partir de informação digital 3D. De acordo com Dickson *et al.* (2017) e Brenken *et al.* (2018) a MEX é a mais difundida por apresentar menores custos de equipamentos, matérias-primas, produção e gerar menos resíduos.

Segundo Adumitroaie *et al.* (2019) a MEX de compósitos reforçados com fibras contínuas (*continuous fiber-reinforced polymer* - CFRP) permitiu novos caminhos para fabricação de peças de alto desempenho mecânico com elevada relação resistência mecânica por densidade relativa. O reforço da matriz termoplástica (*thermoplastic* - TP) com fibras contínuas (*continuous fiber* - CF) melhora as propriedades mecânicas e físico-químicas do CFRP (Markforged, 2023; Anisoprint 2023; Arevo, 2023).

Adumitroaie *et al.* (2019) propuseram na Fig. 1 tecnologias de AM CFRP associadas a pré-condição da CF e sua integração com a matriz polimérica. Em (a) a CF é previamente impregnada com TP para formar o CFRTTP, sendo a matriz fundida no bocal de extrusão. Em (b) as CF virgens são impregnadas com TP no bocal. Em (c) a CF é inserida na matriz TP previamente depositada e refundida. Em (d) há coextrusão, na qual a CF pré-impregnada com matriz termofixa

(*thermoset* - *TS*) sofre revestimento de uma segunda matriz *TP* no bocal, com posterior extrusão e deposição seletiva do compósito de matriz *TP* e *TS* reforçado com *CF* (*CFRTSTP*).

De acordo com Zhang *et al.* (2019), a *CFRP AM* com matérias-primas filamentosas (feixe de fibras contínuas impregnadas com polímeros) não requer alterações complexas no cabeçote de extrusão típico do *Fused Filament Fabrication (FFF)* ou *Fused Deposition Modelling (FDM)* englobadas pela *MEX*. As tecnologias possibilitam impressões 3D multiescala e multimaterial em impressoras de bancada até o *Big Area Additive Manufacturing (BAAM)*.

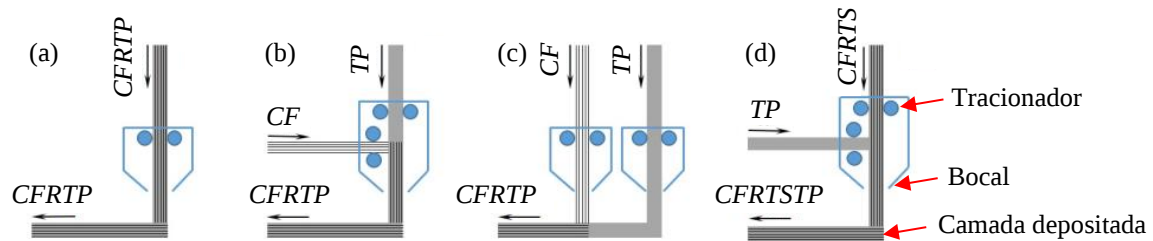


Figura 1. Diferentes sistemas de *AM CFRP*: (a) *CF* pré-impregnada com *TP* formando o compósito *CFRTTP*, (b) *CF* impregnadas com *TP* no bocal, (c) bocal duplo com *CF* inserida na camada de *TP*, (d) coextrusão de filamento bimatrix (*CFRTSTP*) (adaptado de Adumitroaie *et al.*, 2019)

Quanto as propriedades mecânicas, Brenken *et al.* (2018) organizaram os resultados publicados com reforços de fibras contínuas (*CF*) e descontínuas ou segmentadas ou picadas (*DF*), concluindo que a *MEX* com reforço *DF* não é capaz de alcançar o desempenho das ligas de alumínio aeronáutico. Por outro lado, a Markforged (2023) afirma que seu material de fibra de carbono com reforço híbrido de *DF* e *CF* tem propriedades mecânicas comparáveis a liga aeronáutica de Al 6061-T6.

Apesar do aumento de resistência mecânica dos *AM CFRP* frente aos polímeros com reforços descontínuos ou sem reforços, as tecnologias atuais de *AM CFRP* ainda produzem peças com defeitos críticos, resultando em desempenhos mecânicos inferiores aos alcançados nas tradicionais tecnologias de fabricação de materiais compósitos (*traditional technology of composite materials* - *TTCM*). São exemplos de defeitos a porosidade e textura superficial tipo “escada” (Van der Kluft *et al.*, 2016); fração volumétrica de fibras (*fiber volume fraction* ou *fiber volume ratio* - *V_f*) da ordem de 30,0 % nos sistemas de *AM* de bancada, onde o desejável é *V_f* superior a 50,0 %, tal como alcançável nas *TTCM* (Brenken *et al.*, 2018). Outros parâmetros críticos da *CFRP AM* são o controle térmico, largura do cordão ou filamento depositado, espessura efetiva da camada e tempo de extrusão entre camadas e cordões adjacentes (Ning *et al.*, 2016).

Menezes (2023) realizou um estudo bibliométrico, apresentado na Fig. 2, sobre *CFRP AM* e *TTCM* como *filament winding (FW)*, *automated tape lay-up (ATL)* e *automated fiber placement (AFP)* que, segundo Frketic *et al.* (2017), são processos de referências nos setores industriais aeronáutico e automobilístico. Segundo Mark *et al.* (2020a), até o presente momento, não há tecnologia comercial ou experimental de *AM CFRP* que tenha alcançado o desempenho mecânico das *TTCM* devido a menor *V_f* e defeitos no compósito.

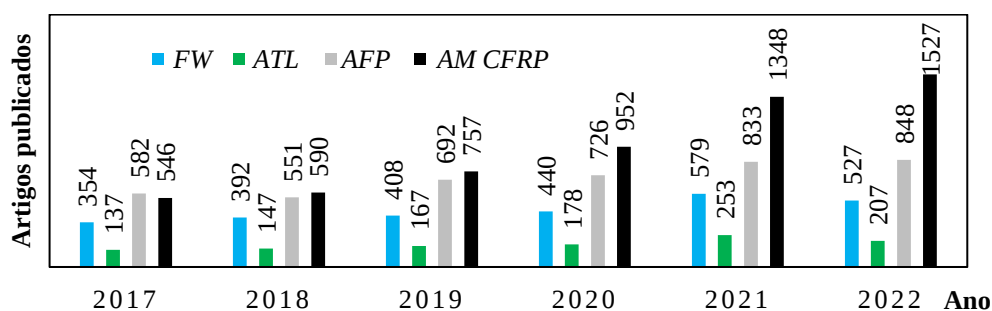


Figura 2. Estudo bibliométrico sobre *AM CFRP* e *TTCM*. Artigos publicados de 2017 a 2022 na base de dados *Science Direct*. Palavras-chave: *filament-winding (FW)*, *automated tape lay-up (ATL)*, *automated fiber placement (AFP)* e *additive manufacturing continuous fiber reinforced polymer (AM CFRP)* (Menezes, 2023)

Verifica-se na Figura 2 o menor crescimento relativo de publicações relacionadas a *FW* e *ATL*, que pode ser atribuído às limitações tecnológicas no atendimento de projetos que exijam geometrias complexas com elevada curvatura que não são viáveis nesses processos dadas as seções transversais das fitas das matérias-primas compósitas e as cinemáticas das deposições (Armijo *et al.*, 2017). Por outro lado, Menezes (2023) apontou crescimento da *AM CFRP* e *AFP*, sendo esta menos significativa. Segundo Gardiner (2020) o futuro da manufatura de compósitos compreende a *AM CFRP* e *AFP*, destacando que a sinergia entre essas tecnologias reduziu 40,0 % da massa de um componente automotivo e dispensou a fabricação de moldes e ferramental com expressiva redução de custo.

Rosa *et al.* (2023) complementam que resultados ainda melhores são alcançados quando a AM é associada a usinagem ou manufatura subtrativa (*subtractive manufacturing* - SM). Esse encadeamento ou alternância de processos aditivos e subtrativos, tipicamente em um mesmo equipamento ou célula de manufatura, é definido como manufatura híbrida (*hybrid manufacturing* - HM). A HM concilia a liberdade geométrica da deposição seletiva multiescala e multimaterial da AM com a correção das tolerâncias dimensionais e geométricas da SM que pode implicar na melhoria das propriedades do material e da peça. Os resultados da HM não são alcançados isoladamente por AM e SM.

Zhang *et al.* (2019) ressaltam a importância de padronização e normatizações para os processos da AM CFRP. Rosa *et al.* (2019) reforçam sobre a necessidade de padronização dos ensaios de caracterização das matérias-primas e peças poliméricas e compósitas fabricadas por AM, especialmente aquelas com estruturas tridimensionais de preenchimento.

A variabilidade dos resultados publicados, não obstante a anisotropia das peças compósitas obtidas por MA, demanda uma complexa e sinérgica metodologia de projeto, fabricação e inspeção que retardam a disseminação e elevam o custo da AM CFRP, afirmam Zhang *et al.* (2019).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DAS TECNOLOGIAS PRECURSORAS DA MANUFATURA ADITIVA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS (CFRP)

Ao longo do presente trabalho, a manufatura aditiva de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas (AM CFRP) é apresentada sob a forma de uma revisão bibliográfica em termos dos principais diferenciais tecnológicos desenvolvidos pelas três empresas de maior destaque no seguimento.

2.1. Markforged®

A Markforged® foi pioneira no mercado de impressoras de bancada com sistema cartesiano de coordenadas na MEX de CFRP em 2014 (CIMM, 2014; Adumitroaie *et al.*, 2019). A tecnologia foi denominada de *push-pultrusion*, pois o filamento compósito é submetido a dois estados de tensão; compressão na alimentação ou realimentação do filamento ao cabeçote, e tração na extrusão após ser cisalhado (Mark *et al.*, 2020a). O bom desempenho do corte pelo cisalhador e da extrusão do compósito dependem do diâmetro do filamento e suas propriedades, sendo limitado às matérias-primas de terceiros (Mark *et al.*, 2015). Os materiais disponíveis são PA (poliamida ou Nylon®) reforçada com microfibras (DF) de carbono (Onyx®), PA, PEI de ultradesempenho (ULTEM), TPU e PLA; as CF são carbono, vidro, aramida (Kevlar®) e vidro de alta resistência mecânica e ao calor (HSHT) (Markforged, 2023).

Segundo Dickson *et al.* (2017) o processo de extrusão emprega dois cabeçotes independentes (Fig. 3), um responsável por extrusão de TP e outro para o filamento de CF pré-impregnado de TP. A lâmina é responsável pelo cisalhamento da fibra. O canal de extrusão de CF é cilíndrico e não apresenta restrição no orifício de saída para reduzir atrito e aderência de TP e perda de impregnação das FC, possuindo arredondamento da aresta para reduzir a curvatura e guiar a CF na deposição (Mark *et al.*, 2020a). O bocal de deposição do cabeçote de polímero tem orifício convergente com a finalidade de restringir o fluxo de TP. O componente 3D é criado pela alternância de deposições de TP e CFRP por meio dos dois extrusores.

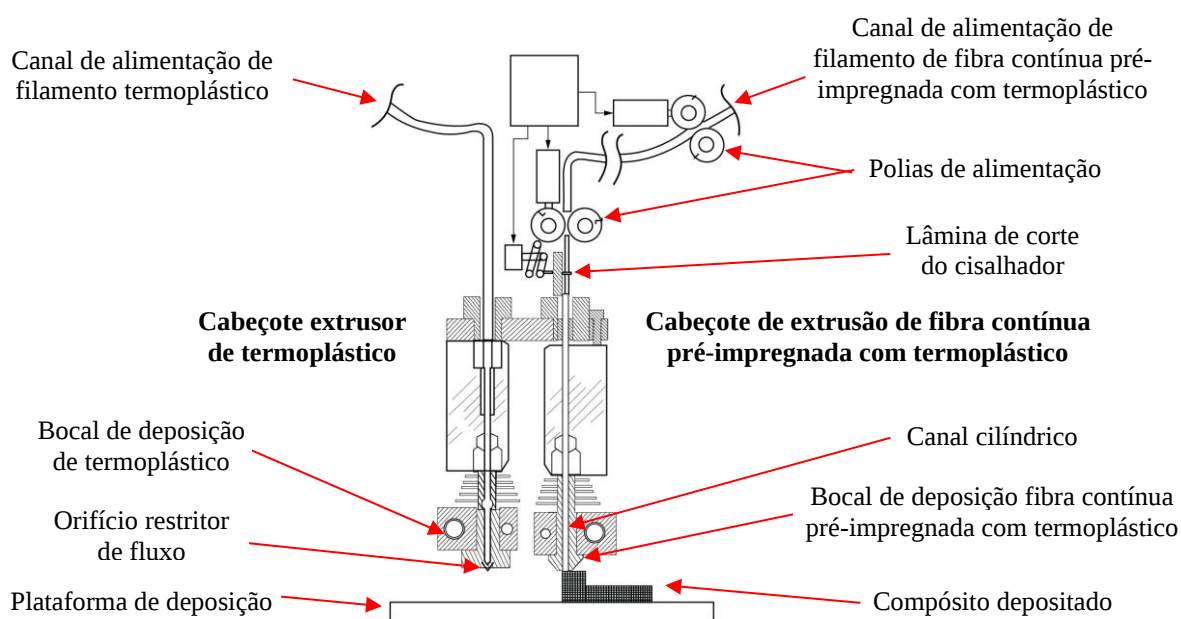


Figura 3. Desenho esquemático da patente dos cabeçotes de extrusão da Markforged® (adaptado de Mark *et al.*, 2020a)

A plataforma de deposição da MarkOne® não tem controle de aquecimento (Dickson *et al.*, 2017), por outro lado, plataformas aquecidas minimizam contração e desprendimento indesejado do impresso (De Backer *et al.*, 2020).

Van der Klift *et al.* (2016) avaliaram o desempenho da impressora MarkOne® com a realização de ensaio mecânico de tração uniaxial de corpos de prova. O padrão de preenchimento concêntrico foi adotado com CF de carbono e matriz de PA com V_f de 34,5 %. Dez camadas foram depositadas, sendo as duas primeiras e as duas últimas integralmente de TP. O resultado médio de resistência à tração foi de 464,4 MPa com V_f de 18,0 %.

Segundo Dutra *et al.* (2019) o *software* Eiger® restringe a deposição de CF nas duas camadas iniciais e finais, ou seja, apenas TP pode ser depositado naquelas camadas. Além disso, o *software* não permite alterar o planejamento da deposição do reforço das cinco primeiras e cinco últimas camadas. Nas camadas nas quais pode-se alterar o planejamento da deposição do reforço, as descontinuidades ou pontos de corte da CF podem ser remanejados para regiões de menor solicitação mecânica, mas também, alternadas entre as camadas subjacentes para que não se tornem concentradores de tensões. Na Figura 4, a sigla L22 indica a edição do planejamento de percurso de camadas sequenciais, TP06, TP08 e TP10 definem os pontos de maior solicitação mecânica, enquanto os círculos vermelhos indicam o posicionamento alternado dos pontos de corte da fibra localizados em regiões de menores solicitações mecânicas (Mark *et al.*, 2020b).

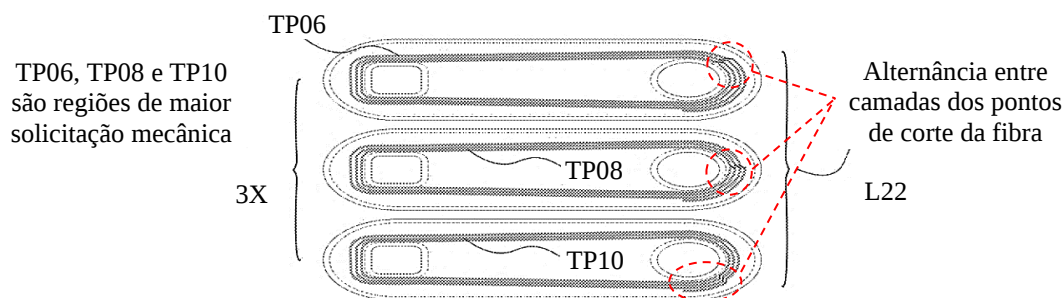


Figura 4. Planejamento do percurso de deposição e corte do reforço para otimização no desempenho mecânico (adaptado de Mark *et al.*, 2020b)

Dickson *et al.* (2017) também avaliaram o desempenho de corpos de prova produzidos na MarkOne®. Inicialmente verificaram a resistência à tração de peças de matriz de PA reforçada com CF de vidro, Kevlar® e carbono nos padrões de preenchimento concêntrico e unidirecional. No padrão unidirecional não foram depositadas fibras de carbono devido à limitação de curvatura imposta pela rigidez das fibras. Os diâmetros dos filamentos de CF foram 0,30 mm para vidro e Kevlar® e 0,35 mm para carbono. Os corpos de prova apresentaram oito camadas de CFRP intercaladas por polímeros, equidistantes entre as camadas de polímero de forma espelhada a partir da camada intermediária. O compósito que apresentou maior resistência à tração foi o reforçado com carbono, alcançando valor médio de 216 MPa, com V_f de 11,0 %. As espessuras das camadas depositadas com fibras de carbono foram de 125 μ m, aproximadamente 35,0 % do diâmetro inicial do filamento dada a compressão imposta pelo processo.

Segundo Mark *et al.* (2020b), o padrão de preenchimento concêntrico é o mais indicado para AM CFRP, pois uma menor quantidade de cordões é necessária para o preenchimento das camadas, em razão da melhor distribuição de tensões no compósito, para os casos de carregamentos de tração e flexão. Na Fig. 5 é apresentada uma ampliação do bocal ilustrando as diferentes possibilidades de seção transversal do cordão do compósito compactado na extrusão. A razão altura/largura preferida é de aproximadamente 1/9. À medida que o achatamento se intensifica ocorre a redução de vazios, bem como o reagrupamento das fibras entre os cordões adjacentes. Todavia, quanto maior a compactação, maior a rigidez exigida da impressora 3D.

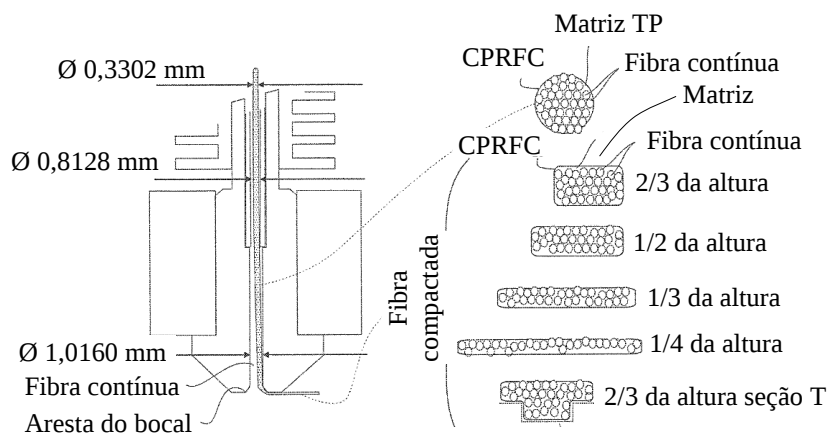


Figura 5. Diferentes possibilidades de remodelagem por compressão do filamento de CPRFC na extrusão (adaptado de Mark *et al.*, 2020b)

Na segunda parte da pesquisa de Dickson *et al.* (2017) foram alcançadas V_f de 33,0 % no padrão isotrópico considerada insuficiente por falta de compactação, ocasionando porosidade.

Iragi *et al.* (2019) avaliaram o desempenho da impressora MarkTwo®, tecnologia sucessora da primeira versão da impressora, por meio dos mecanismos de falha e a resistência à tração de corpos de prova impressos somente com CF de carbono e matriz de PA. A matéria-prima apresentou V_f de 33,9 % e 0,2 % de vazios e a peça impressa V_f de 31,4 % e 7,5 % de vazios. A resistência à tração média foi de 905,3 MPa com comportamento frágil e deformação de 1,27 %, mecanismo de falha predominante por delaminação. Análises qualitativas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram os modos de falha, indicados na Fig. 6, denominados de fratura da matriz (*matrix fracture*), arrancamento de fibras (*fibre pull-out*), ruptura de fibras (*fibre breakage*) e residual de matriz à fibra (*matrix residues*), revelando adesão entre matriz e reforço. Os pesquisadores também relataram que a delaminação é influenciada pelas temperaturas de extrusão e transição vítrea (T_g) do TP. Temperaturas de processamento acima do T_g favorecem difusão e formação de interfaces interconectadas.

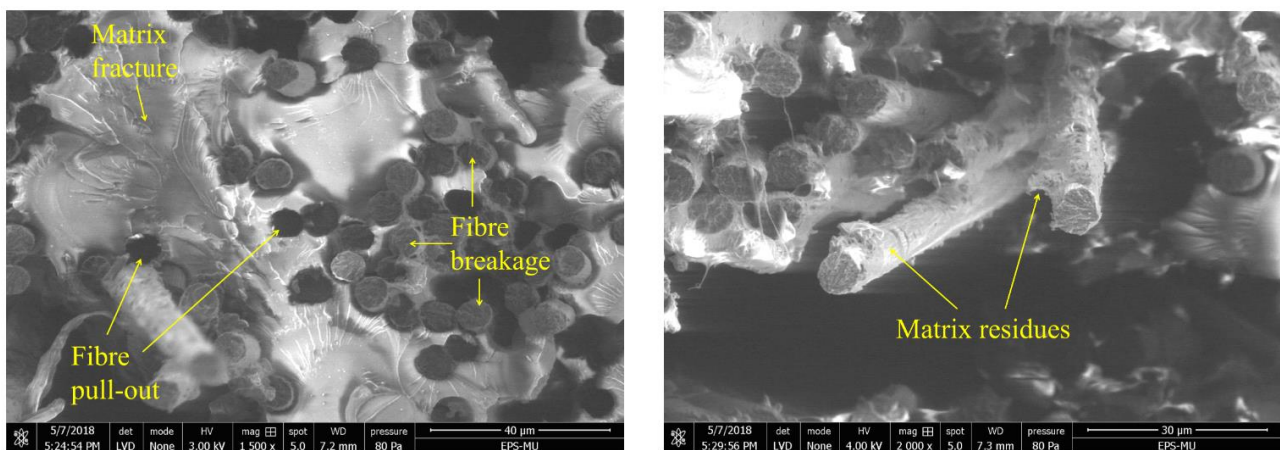


Figura 6. Mecanismos de falha à tração de CPRFC de carbono e matriz TP de PA por MA no sistema MarkTwo®. À esquerda arrancamento (*fibre pull-out*) e ruptura (*fibre breakage*) das FC com fratura da matriz (*matrix fracture*) e à direita a presença de resíduos de TP (*matrix residues*) na superfície das FC de carbono (Iragi *et al.*, 2019)

De Backer *et al.* (2020) relataram que zona de deposição pode ser reaquecida acima da T_g por fonte de calor externa para melhorar o interfaceamento por difusividade. Quanto ao estado de tensão imposto às fibras na saída do bocal pela compressão e arredondamento da aresta (Fig. 7), os autores apontaram a correlação com a V_f e acabamento da deposição. Quanto menor o raio da aresta, melhor a distribuição do reforço na matriz e maior a rugosidade, e *vice-versa*.

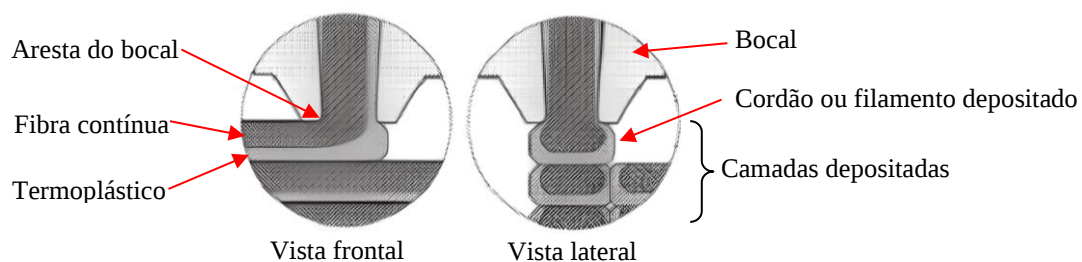


Figura 7. Efeito do arredondamento da aresta do bocal em corte (adaptado de De Backer *et al.*, 2020)

2.2. Anisoprint®

A tecnologia da Anisoprint® baseia-se na coextrusão de TP e pré-impregnado de CF com bimatriz de TS e TP (Adumitroaie *et al.*, 2019). As matérias-primas conciliam a resistência mecânica dos TP com a molhabilidade e adesão dos TS, com redução do tempo de fabricação e facilidade de manuseio e armazenamento que não são típicos de pré-impregnados com TS. As CF disponíveis são de carbono ou basalto com matriz TS e TP para coextrusão são PETG ou PA (Anisoprint, 2023). O processo de revestimento ou impregnação das CF com TS e TP ocorre antes da AM. O feixe de fibras é guiado por meio de polias através de estágios que impregnam as fibras primeiro com TS catalisada e depois com TP por fusão em câmara aquecida. O ciclo térmico polimeriza completamente o TS que fica envolvido por TP. Quando o filamento bimatriz é reaquecido no bocal de extrusão acima da T_g e T_m para fundir o revestimento de TP do pré-impregnado, a exposição ao calor não deve degradar TS.

Armijo *et al.* (2017) relataram que o maior desempenho mecânico por densidade relativa de *CFRP* está diretamente relacionado a maior molhabilidade e impregnação das fibras pela matriz. Por outro lado, quanto menor a molhabilidade, maiores são os defeitos como o arrancamento de fibras e nucleação de trincas nos vazios. Os autores complementam que em métodos de deposição à 90°, na mudança abrupta de direção da fibra, ocorre a exposição das fibras, uma vez que o *TP* fundido impulsiona o reforço contínuo para a região superior do cordão no ponto de deposição, consequentemente, provocando o emaranhamento entre as fibras, perda de molhabilidade, danos ou até mesmo a fratura da fibra, além de irregularidades no acabamento.

Apesar da menor viscosidade dos *TS* em comparação aos *TP* que favorece a impregnação e adesão e às *CF*, conforme Azarov *et al.* (2019), os filamentos pré-impregnados com *TS* demandam condições especiais de armazenamento, apresentam menor prazo de validade demandam polimerização e possuem baixa deformabilidade, enquanto os *TP* são mais plásticos e resistentes, contudo, requerem maiores pressões para impregnar as fibras. Segundo Armijo *et al.* (2017) os *TS* epoxídicos garantem adesão matriz/reforço para aplicações até 100 °C, mas possuem rigidez e resistência a tração inferior aos *TP* de engenharia.

O cabeçote de extrusão da Anisoprint®, apresentado na Fig. 8, contém uma unidade de aquecimento, dois bocais de extrusão e três canais de entrada de matéria-prima, dois para *TP* e um para fibra pré-impregnada de *TS* e *TP*. As matérias-primas de *TP* e de fibra pré-impregnada entram na câmara de fusão por cima, com saída única no bocal de coextrusão coaxialmente alinhado ao canal de alimentação do pré-impregnado. O canal de alimentação de *TP* na zona quente direciona o *TP* fundido para revestir o pré-impregnado, permitindo controlar a *Vf* na impressão. O diâmetro do bocal de extrusão do compósito é menor do que o diâmetro de entrada do canal de alimentação de pré-impregnado na câmara de fusão para controlar a eficiência da coextrusão. O maior diâmetro de entrada cria uma zona de menor pressão permitindo que o excesso de *TP* fundido escape por esta abertura que interrompe mecanicamente a conexão entre a câmara de fusão e o canal de alimentação do pré-impregnado. A abertura impede que o *TP* se solidifique e bloqueie o escoamento do pré-impregnado. O mecanismo de corte é composto por duas lâminas semicirculares situadas entre a câmara de fusão e o sistema mecânico de polias de alimentação. A força de cisalhamento depende do tipo e densidade da fibra, sendo de aproximadamente 17 N para carbono 200 TEX (Azarov *et al.*, 2020a).

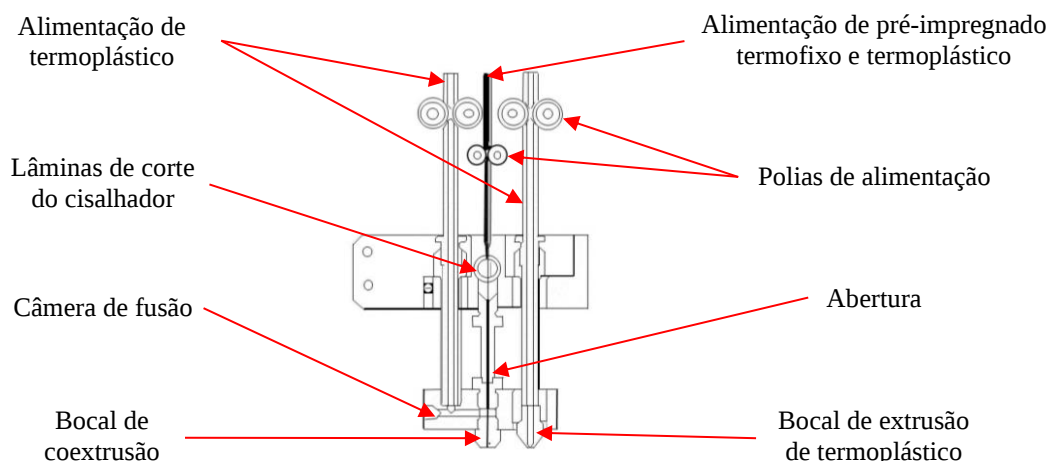


Figura 8. Vista frontal em corte do cabeçote de coextrusão da Anisoprint® (adaptado de Azarov *et al.*, 2020a)

Um dos maiores benefícios do cabeçote de coextrusão reside na dosagem de deposição do *TP* e do filamento pré-impregnado que permite distribuir o reforço com controle da *Vf* de acordo com planejamento de projeto para cada camada, reduzindo os defeitos localizados devido a sobreposição de *CF* (Vialva, 201; Azarov *et al.*, 2020b).

Quando o processo de deposição de *FC* pré-impregnada não permite modificar a *Vf*, de acordo com Mark *et al.* (2020b) há a necessidade de planejar o padrão de deposição para evitar a sobreposição da *CF* na mesma camada do *CFRP*. O padrão de deposição com três intersecções pontuais gera defeitos (Fig. 9 esquerda) que, consequentemente, demandará deposição subsequente apenas de *TP* para homogeneização da espessura da camada.

Uma das técnicas descritas por Mark *et al.* (2020b) para evitar a sobreposição localizada de três *CF* é mostrada na imagem central na Fig. 9, consistindo na mudança do padrão triangular para o padrão “estrela de Davi”, o qual desloca um dos cordões (99Z3-1) para que apenas dois cordões se sobreponham localizadamente. Outras opções indicadas nas imagens à direita na Fig.9 consideram a alternância de padrões de deposição com no máximo duas intersecções de *FC* na mesma camada, com alteração do padrão de deposição a cada nova camada controlando, portanto, a espessura da camada e evitando defeitos localizados.

Adumitroaie *et al.* (2019) avaliaram o desempenho da impressora de bancada ComposerA4® cartesiana com três *DOF*. Corpos de prova de matriz *TP* de ácido polilático (*PLA*) com temperatura de fusão (*Tm*) de 180 °C, matriz *TS* epoxídica com *Tg* de 67 °C e reforço de 1 000 *CF* de carbono foram impressos com temperatura de extrusão de 210 °C, velocidade de impressão de 200 mm/min, preenchimento sólido e orientação unidirecional das fibras. Os resultados mostraram *Vf* de

27,0 % e resistência à tração de 750 MPa. O pré-impregnado permaneceu seis segundos na câmara de fusão do extrusor, promovendo fusão do *TP*, sem perda de massa e com redução de porosidade. A compactação do filamento compósito, inicialmente de seção circular, ocorreu com aplicação de força normal do bocal de extrusão, produzindo uma seção transversal elíptica do cordão depositado. O filamento compósito bimatriz apresentou perda de massa do *TS* acima de 4,0 % quando exposto momentaneamente a 350 °C ou longos períodos à 250 °C.

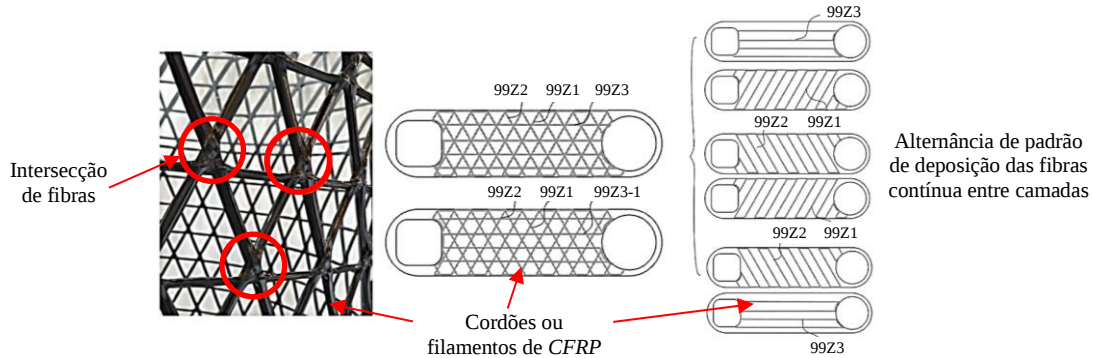


Figura 9. Esquerda: defeitos por sobreposição de *CF* em estruturas reticuladas de *AM CFRP* (Vialva, 2019). Centro e Direita: estratégias de deposição que contornam a ocorrência de três intersecções localizadas de *CFRP* que provocam defeitos (Mark *et al.*, 2020b)

2.3. Arevo®

A tecnologia desenvolvida pela Arevo® adota extrusão associada a braço robótico com seis *DOF*, onde o *TP* é fundido por meio de energia térmica advinda de *LASER* direcionado a zona de deposição, assim, a extrusão é assistida por *directed energy deposition (DED)*. O sistema é dotado de rolo para compactar, moldar e consolidar o depositado de *continuous carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP)* (Zhang *et al.*, 2019; Arevo 2023). Conforme a patente da Arevo, o sistema AQUA® permite utilizar qualquer matriz *TP* e reforço contínuo, pois a fusão é realizada por *DED* (Armijo *et al.*, 2017).

Segundo Armijo *et al.* (2017), a deposição com braço robótico, representada na Fig. 10, possibilita três *DOF* de translação e três *DOF* de rotação, proporcionando a deposição em qualquer ângulo e direção, correspondendo a verdadeira definição de impressão 3D. O filamento compósito pré-impregnado com *TP* semicristalino (*PAEK, PEK, PEEK, PEKK, PA*) e diferentes reforços (carbono, vidro, aramida ou nanotubos de carbono) é alimentado do carretel integrante do sistema móvel. O feixe de fibras pode compreender entre 1 000 e 24 000 fios individuais paralelos. O tracionador conduz a matéria-prima do carretel (320) através do canal (328) direcionando-o à plataforma de impressão (350) passando pelo sistema de corte das fibras (330). O *LASER* é focalizado para fundir parcialmente o pré-impregnado na porção em contato com a camada antecessora, de tal modo que ocorra a difusão entre camadas adjacentes. O rolo compressor remodelador exerce pressão suficiente para que a largura do cordão depositado tenha pelo menos cinco vezes à altura da camada e possui livre rotação no sentido de deposição.

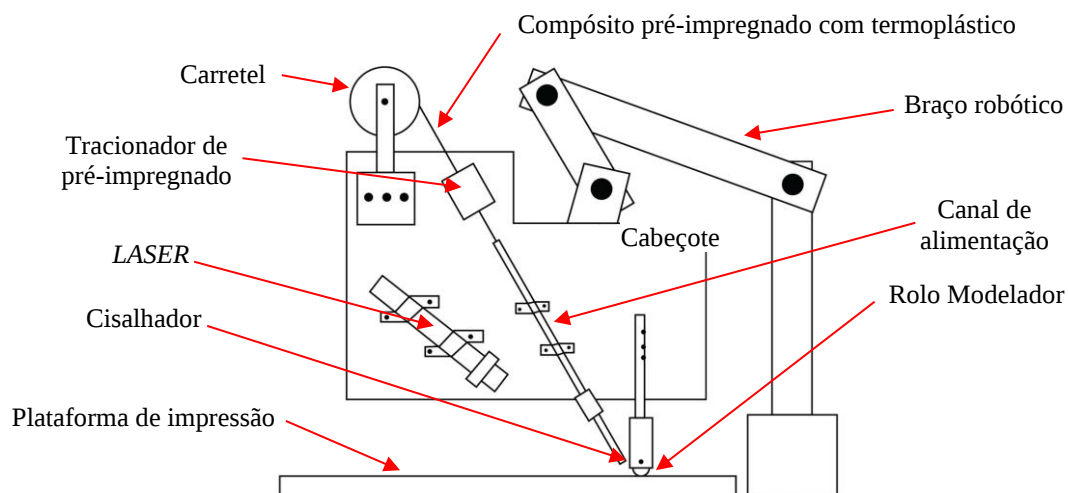


Figura 10. Representação do sistema de *AM CFRP* assistido por *DED* em braço robótico da Arevo® (adaptado de Armijo *et al.*, 2017)

Zhang *et al.* (2019) avaliaram a resistência à tração de corpos de prova desenvolvidos com tecnologia Arevo®. O pré-impregnado avaliado foi de matriz de poli (éter-éter-cetona) (PEEK) reforçado com CF de carbono com V_f de 50,0 % e 2,0 % de porosidade. A resistência à tração média das peças foi de 1 420 MPa para padrão de preenchimento unidirecional e espessura de 1,5 mm, com 0,02 % de porosidade dada a compactação da deposição. Para avaliar a influência do padrão de preenchimento na resistência a tração, os autores fabricaram outros corpos de prova com 4 mm de espessura alternando o padrão unidirecional das camadas ($-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$), denominado de *quasi-isotropic (QI)*. A peça alcançou resistência à tração média de 479 MPa com vazios na ordem de 0,63 %. Portanto, peças mais porosas e menos resistentes foram obtidas no padrão unidirecional *QI*. A redução na resistência foi consequência do aumento de porosidade devido a variação geométrica do cordão depositado que dificultou a adesão das camadas. Ademais, quanto maior o volume de impressão, maiores porosidades e defeitos são introduzidos na peça.

A preferência pelo PEEK semicristalino se deve as suas excelentes propriedades mecânicas e físico-químicas (Lu *et al.*, 2019). Segundo Reese e Bheda (2017), a plataforma de impressão para polímeros de engenharia como o PEEK deve ser aquecida e revestida com polímero resiliente de alta temperatura de fusão, por exemplo poli-imida (PI), para evitar distorções geométricas e descolamento involuntário.

3. DISCUSSÃO

A AM CFRP despertou industrialmente a partir de 2015 e vem evoluindo visando superar o desempenho mecânico das estabelecidas tecnologias automatizadas de fabricação de compósitos, como o FW, ATL e AFP. Os resultados demonstram aumento gradual da resistência à tração, porém aquém dos valores alcançados para o FW, processo tradicional de referência de resistência à tração, todavia limitado quanto a complexidade geométrica alcançável e dependente de moldes e ferramentais.

Na Figura 11 são apresentados os desempenhos à tração de TP processados via FFF, dos mesmos TP aplicados a matriz de CFRP em diferentes tecnologias de AM por extrusão com diferentes V_f , e de compósito obtido via FW. Os valores foram extraídos de revisão bibliográfica como resultado da pesquisa de Menezes (2023).

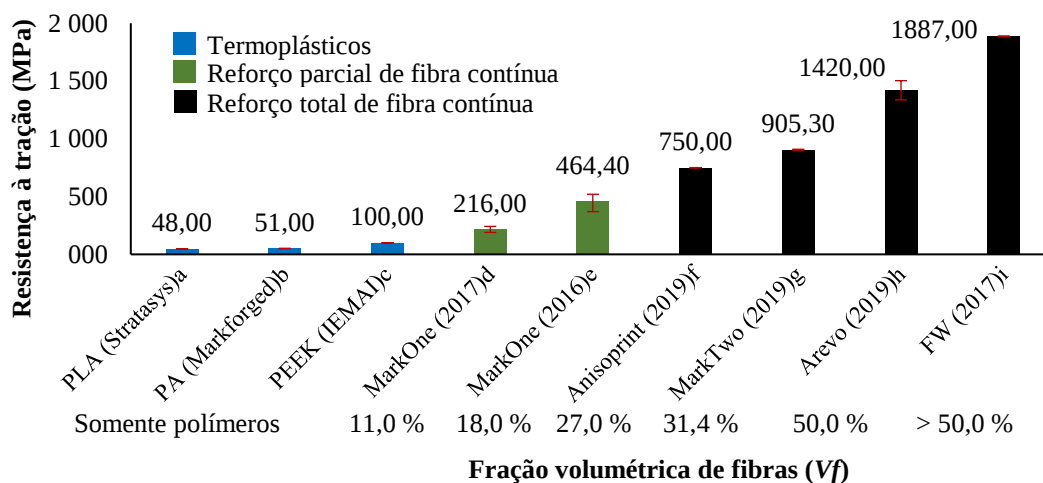


Figura 11. Comparativo da resistência à tração de peças poliméricas e compósitas: (a) Stratasys® (2018); (b) Markforged® (2019); (c) IEMAI (2020); (d) Dickson *et al.* (2017); (e) Van Der Klift *et al.* (2016); (f) Adumitroaie *et al.* (2019); (g) Iragi *et al.* (2019); (h) Zhang *et al.* (2019); (i) Minsch *et al.* (2017) (Menezes, 2023)

Análises comparativas mostraram que a Markforged® e a Anisoprint® alcançaram V_f próximas a 30,0 % e resistência à tração 50,0 % inferior ao FW em impressoras cartesianas de bancada. Estas empresas também possuem impressoras de maior volume de impressão para aplicação industrial, porém com mesmos resultados dos modelos de menor tamanho quanto a resistência mecânica. A Arevo® dispõe de impressoras baseadas em robôs industriais com mais *DOF*, maior volume de impressão e dotadas de sistema de compactação do cordão depositado, alcançando 50,0 % de V_f , resistência à tração 50,0 % superior a Markforged® e a Anisoprint® e 75,0 % da resistência à tração do FW.

As impressoras Markforged® e Anisoprint® baseadas no sistema cartesiano de três *DOF* de translação ortogonais entre si limitam a deposição à 90° em relação à plataforma, induzindo a segregação da matriz do reforço dado o atrito da fibra com a aresta do bocal que geram defeitos como: (a) fratura das fibras, (b) menor V_f , (c) porosidade, (d) áreas ricas em fibras e (e) outras ricas em TP. Além disso, a menor eficiência térmica, a menor compactação da deposição e menor rigidez das impressoras de bancada também contribuem para as menores resistências à tração do CFRP. Por outro lado, o sistema com mais *DOF* da Arevo® permite variar o ângulo de deposição e possui sistema específico de compactação que aumenta a V_f , reduz os defeitos e, portanto, melhora a resistência à tração, com resultados mais próximos ao FW.

Os requisitos de engenharia dos bocais de impressão para *AM CFRP* consideram, por um lado, arestas arredondadas para não fraturar as fibras na abrupta mudança de direção (90°) em detrimento da compactação, por outro, raios menores geram maiores *Vf* e cordões mais homogêneos. Dada a abrasividade dos filamentos compósitos, os bocais devem ser resistentes a abrasão para suportar as condições tribológicas em temperaturas que podem superar os 500 °C. Os materiais típicos são os aços ferramenta, aço rápido, metal duro, cerâmicas e diamante, podendo também ser aplicado revestimentos típicos das ferramentas de usinagem, por exemplo, *TiC*, *TiNC*, *TiAl* e *DLC*.

Quanto a dependência tecnológica, apenas a Anisoprint® demonstra oferecer melhor controle sobre os parâmetros de deposição com *software* mais configurável e com sistema (*software* e *hardware*) aberto para processar matérias-primas de terceiros. O sistema Aqua® da Arevo® também libera o uso de qualquer polímero ou fibra. Se por um lado essa liberdade abre portas para o desenvolvimento tecnológico, as empresas que restringem a matéria-prima facilitam a aplicação por oferecerem materiais e parâmetros validados, resultando tipicamente em maior custo relativo.

Diante da aplicação industrial dessas tecnologias em áreas que agregam muito valor aos componentes compósitos e por se tratar de processos de MA relativamente recentes e de custo elevado, poucos resultados são encontrados na literatura. Exemplos são quadro de bicicleta (Arevo, 2023), suporte de assento aeronáutico (Anisoprint, 2023), dispositivo de içamento (Markforged, 2023).

Há muito segredo industrial e pouco recurso humano especializado nas cadeias de desenvolvimento de produto e de manufatura. Soma-se ainda a dificuldade de caracterização das propriedades mecânicas dos *AM CFRP* com resultados que possam ser aplicados na fase de projeto nos *softwares* de engenharia CAD-CAE para otimização de desempenho do componente.

A Markforged® emprega *TP* com reforço híbrido de *CF* e *DF* (*chopped*, *segmented* ou *descontinuous fiber - DF*). A Anisoprint® aposta em matéria-prima bimatriz com *CF* pré-impregnadas com *TS* e *TP* e coextrusão com adição seletiva de *TP* para controlar a *Vf* com redução de defeitos localizados. A Arevo®, todavia, investiu no auxílio de fonte de calor LASER direcionada a interface de deposição para fundir a matriz *TP*, no maior controle do ângulo e compactação da deposição. As principais vantagens são peças compósitas com maior *Vf*, melhor adesão por difusão entre camadas adjacentes e cordões e redução dos defeitos de deposição, resultando em maior resistência à tração.

De forma geral, as vantagens em comum das tecnologias de *AM CFRP* residem no aumento do desempenho mecânico com redução de massa de peças com geometrias multiescala e multimaterial mais complexas, com redução do tempo de fabricação, sem o uso dos tradicionais moldes e ferramentais típicos das tecnologias estabelecidas de processamento de polímeros e compósitos.

Os desafios a serem superados, por outro lado, englobam: (a) o desenvolvimento de novos materiais, aditivos e processos de impregnação e funcionalização das fibras com vistas ao interfaceamento mecânico e químico entre as fases de matriz e reforço, (b) melhora da rigidez das impressoras, (c) elaboração de normas para *AM CFRP* quanto aos parâmetros de fabricação e caracterização de propriedades mecânicas e físico-químicas, (d) desenvolvimento de *softwares* CAD-CAE-CAM que integram todas as fases das cadeias de projeto, manufatura e inspeção (monitoramento e controle de processo), (e) controle termodinâmico do processo, (f) aumento da taxa de deposição, (g) redução da porosidade, (h) aumento da compactação, (i) aumento da *Vf*, (j) controle da orientação de deposição verdadeiramente tridimensional do reforço contínuo, (k) planejamento do padrão de deposição e sobreposição da *CF* para redução de defeitos, (l) introdução de mais *DOF* dos sistemas de deposição, (m) melhora das tolerâncias dimensionais e geométricas das peças impressas, (n) projetos de cisalhadores para diferentes materiais, formatos e dimensões do *CFRP* ou *CF*, (o) formação de recursos humanos e (p) serviços de pós-venda como manutenção, peças de reposição e treinamentos.

A complexidade para alcançar a impressão 3D de componentes de *CFRP* isentos de danos críticos com densidade de *CF* superior a 50,0 % é, portanto, um grande desafio científico e tecnológico que demanda sinergia de diversas áreas do conhecimento. Além dos desafios mecânicos, eletrônicos, elétricos e de *softwares* há o desafio do planejamento e otimização da deposição do reforço e da matriz, orientando a *CF*, selecionando o melhor local para localizar os cortes das fibras. Idealmente a peça deveria ser manufaturada tridimensionalmente de forma contínua, sem interrupção das fibras com distribuição não apenas entre camadas, mas sim de forma verdadeiramente tridimensional. As tecnologias da Markforged® e Anisoprint® ainda possuem interfaces entre camadas limitadas pela resistência do *TP* ou adesividade *TP*/fibra em decorrência dos menores *DOF* dos processos. Esse raciocínio também se aplica de certa forma a Arevo®, contudo a maior liberdade de deposição permite envolver camadas com *CF* em diversos padrões para que a peça alcance maior desempenho mecânico.

As tecnologias empregam diferentes estratégias para reduzir os defeitos e concentradores de tensão. Quanto maior a complexidade geométrica da peça, mais *DOF* são necessários, assim como aumenta-se a complexidade do planejamento de deposição seletiva, aumenta-se os parâmetros de deposição e de orientação do cabeçote à superfície.

Quanto a redução do efeito escada típico da deposição camada a camada, remoção de defeitos superficiais e a promoção da qualidade com tolerâncias dimensionais (tipicamente IT4 e IT5 para *MEX*) e geométricas mais estreitas, a associação com *SM*, por exemplo, é uma rota viável que vem sendo aplicada aos materiais metálicos dentro do contexto da *HM*. Entretanto, a *HM* é incipiente para peças poliméricas e compósitas, assim como em uniões de dissimilares (metal-polímero, cerâmica-polímero, compósito-metal, compósito-cerâmica etc.) manufaturadas aditivamente. Quando processos aditivos e subtrativos são encadeados ou alternados em um mesmo equipamento ou célula de manufatura tem-se, então, processos híbridos. Os resultados da *HM* são surpreendentemente superiores aos processos individuais aditivos

e subtrativos, embora a *HM* seja tecnologicamente mais complexa, abrindo uma vasta área de investigação que expande a fronteira do conhecimento dos processos de fabricação, exemplificando um dos grandes desafios da recém-nascida manufatura avançada dentro da Indústria 4.0.

4. CONCLUSÃO

- As resistências à tração alcançadas pelas três principais tecnologias comerciais de manufatura aditiva (MA) de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras contínuas (*AM CFRP*) ainda não superaram os resultados obtidos nas tradicionais tecnologias de fabricação de materiais compósitos (*TTCM*).
- *Filament winding* (FW), *automated tape lay-up* (ATL) e *automated fiber placement* (AFP) possuem limitações no desenvolvimento de geometrias complexas e as publicações não acompanharam o crescimento nos últimos cinco anos em *AM CFRP*.
- Os sistemas de deposição dotados de mais graus de liberdade (*DOF*), auxílio de *directed energy deposition* (*DED*) e compactação da deposição proporcionam maior fração volumétrica de fibra (*V_f*), reduzindo a segregação e defeitos críticos com expressivo aumento da resistência à tração.
- Matérias-primas filamentosas de compósitos bimatriz são mais sujeitas a degradação térmica do termofixo (*TS*) na *AM CFRP*.
- O sistema de coextrusão permite variar a proporção de matriz *TP* e *CFRP*, possibilitando o planejamento da deposição seletiva com controle da *V_f* que reduz os defeitos como, por exemplo, porosidade, sobreposição de fibras e concentradores de tensões. Além disto, a rigidez estrutural, o raio de desvio da fibra na saída dos bocais e a compactação têm fortes influências na *V_f* e na resistência à tração dos componentes de *CPRFC* fabricados por MA.
- São necessárias normatizações para padronizar ensaios de caracterização de matérias-primas e de peças impressas.
- A *AM CFRP* é carente de *softwares CAD-CAE-CAM* integrados.
- A manufatura híbrida (*HM*) que associa *AM* e manufatura subtrativa (*SM*) promete solucionar as limitações dos processos individuais, promovendo tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas e remoção de defeitos críticos para alcançar geometrias mais complexas, mais resistentes e mais leves.
- Os resultados da *HM* são superiores aos processos individuais aditivos e subtrativos, embora a *HM* seja tecnologicamente mais complexa, abrindo uma vasta área de investigação que expande a fronteira do conhecimento dos processos de fabricação exemplificando um dos desafios da manufatura avançada da Indústria 4.0.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo fomento através do projeto APQ-01759-17, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU/UFU), o Laboratório FEMEC Maker/UFU, o Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM/UFU), o Laboratório de Atrito e Desgaste (LTAD/UFU), Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM/UFU), o LAPROSOLDA/UFU, o Laboratório de Equipamentos Multiusuários do Pontal (LEMUP/UFU), a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC/UFU), o Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (CINTESP.br/UFU), o Centro Nacional de Tecnologia (CNT/UFU), a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a todos que ajudaram direta e indiretamente.

6. REFERÊNCIAS

- Adumitroaie, A. *et al.*, 2019. Novel continuous fiber bi-matrix composite 3D printing technology. *Materials*, Vol. 12.
- Anisoprint. 2023. Aircraft seat support. Disponível em: <https://anisoprint.com/cases/aircraft-seat-support/>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- Arevo. 2023. AQUA SYSTEM. Disponível em: <https://arevo.com/products/aqua?lang=en>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- Armijo, A. *et al.*, 2017. Method and apparatus for additive manufacturing using filament shaping. *Arevo Inc.* US 2017/0274585 A1, 28 mar. 2017, 28 set. 2017.
- ASTM. ISO52900:2021: Additive manufacturing – General principles - Terminology. United States of America: ASTM, 2021.
- Azarov, A. V. *et al.*, 2019. Composite reinforcing thread, prepreg, tape for 3D printing and installation for preparing same. *Limited Liability Company Anisoprint*. EP 3 450 486 A1, 28 mar. 2017. 6 mar. 2019.
- Azarov, A. V. *et al.*, 2020a. Print head for additive manufacturing of articles. *Limited Liability Company Anisoprint*. US 2020/0114578 A1, 20 dez. 2017. 16 abr. 2020a.
- Azarov, A. V. *et al.*, 2020b. Production of articles made of composite materials by 3D printing method. *Limited Liability Company Anisoprint*. EP 3 693 151 A1, 20 dez. 2017. 12 ago. 2020b.
- Brenken, B. *et al.*, 2018. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: a review. *Additive Manufacturing*, Vol. 21, p. 01-16.

- CIMM., 2014. Impressoras 3D inovam para atender demanda. *Centro de Inovação Metal Mecânica*. https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/11452-impressoras-3d-inovam-para-atender-demanda#
- De Backer, W., Van Tooren, M., Bergs, A., 2020. Systems and methods for printing 3-dimensional objects from thermoplastics. *University of South Carolina and Tighitco Inc.* US 2020/0047402 A1, 13 ago. 2019. 13 fev. 2020.
- Dickson, A. N. *et al.*, 2017. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Journal of Additive Manufacturing*, Vol. 16.
- Dutra, T. A. *et al.*, 2019. Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Erketic, J. *et al.*, 2017. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 14, p. 69-86, 2017.
- Gardiner, G., 2020. Future composite manufacturing - AFP and Additive Manufacturing. *Composite World*. <<https://www.compositesworld.com/articles/future-composite-manufacturing---afp-and-additive-manufacturing>>
- IEMAI. 2020. PEEK Technical datasheet (TDS). Disponível em: https://www.iemai3d.com/wp-content/uploads/2020/12/PEEK_TDS.pdf, acessado em: 16 nov. 2022.
- Iragi, M. *et al.*, 2019. Ply and inter-laminar behaviors of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates: effects of processing conditions and microstructure. *Journal of Additive Manufacturing*, Vol. 30.
- Lu, C. *et al.*, 2019. The optimization of process parameters and characterization of high-performance CF/PEEK composites prepared by flexible CF/PEEK plain weave fabrics. *Polymers*, Vol. 11.
- Mark, G. T. *et al.*, 2015. Three-dimensional printer with composite filament fabrication. *Markforged Inc.* US 9 156 205 B2. 18 dez. 2014. 13 out. 2015.
- Mark, G. T. *et al.*, 2020a. Apparatus for fiber reinforced additive manufacturing. *Markforged Inc.* US 10 611 082 B2, 28 fev. 2017. 07 abr. 2020a.
- Mark, G. T. *et al.*, 2020b. Multilayer fiber reinforcement design for 3D printing. *Markforged Inc.* US 10 696 039 B2, 09 nov. 2017. 30 jun. 2020b.
- Markforged. 2019. Material datasheet: composites. Watertown, Massachusetts, 15 abr. 2019, p. 1-2.
- Markforged. 2023. Carbon Fiber: The backbone of aluminum-strength composite parts. Disponível em: <https://markforged.com/materials/continuous-fibers/continuous-carbon-fiber>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- Markforged. 2023. Wärtsilä. Disponível em: <https://markforged.com/resources/case-studies/w%C3%A4rtsil%C3%A4-case-study>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- Menezes, L. R. De., 2023. Desenvolvimento de filamento compósito de matriz termoplástica de PLA com reforço híbrido de fibras curtas de carbono e contínuas de Kevlar29 para aplicação na Manufatura Aditiva por Extrusão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- Minsch, N. *et al.*, 2017. Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies. *Journal of Procedia CIRP*, Vol. 66, p. 125–130.
- Rosa, I. C de C. *et al.*, 2019. Method for considering the real area moment of inertia in bending tests of extruded PLA parts with different infill percentages. *International Congress of Mechanical Engineering COBEM*, ABCM, Uberlândia, Brazil.
- Rosa, I. C. de C. *et al.*, 2023. Panorama da manufatura híbrida de polímeros e compósitos poliméricos associando técnicas aditivas e subtrativas. *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF*, ABCM, Brasília, Brasil.
- Stratasys. 2018. PLA: Economy thermoplastic for Stratasys F123 Series Printers. Disponível em: https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/fdm-materials/pla/mss_fdm_pla_0118a.pdf?v=48df1c, acessado em: 16 nov. 2022.
- Van Der Klift, F. *et al.*, 2016. 3D Printing of continuous carbon fibre reinforced thermoplastic (CFRTP) tensile test specimens. *Journal of Composite Materials*, Vol. 6.
- Vialva, T., 2019. Anisoprint brings continuous fiber 3D printing technology to the UK. *3D Printing Industry*. <<https://3dprintingindustry.com/news/anisoprint-brings-continuous-fiber-3d-printing-technology-to-the-uk-161772>>
- Zhang, D. *et al.*, 2019. Reliable optimized structures with high performance continuous fiber thermoplastic composites from additive manufacturing (AM). *Proceedings SAMPE Conference*. Charlotte, EUA.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

CHALLENGES OF ADDITIVE MANUFACTURING OF POLYMERIC COMPOSITES REINFORCED WITH CONTINUOUS FIBERS

Lucio Roberto de Menezes
Júlia Souza Abrão
Igor Cesar de Carlos Rosa
Leonardo da Silva Alves
Thiago Querino
Bruno Souza Abrão
Mayara Fernanda Pereira
Arthur Alves Fiocchi

Faculty of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 10, Uberlândia-MG, Brasil, 38400-902.

lucio.menezes@ufu.br; julia.abrao@ufu.br; igor_cesarcr@ufu.br; leonardoalves@ufu.br; tquerino@ufu.br; bruno.abrao@ufu.br; mayara.pereira@ufu.br; arthurfiocchi@ufu.br.

Abstract. Additive manufacturing (AM) of composites of polymeric matrices reinforced with continuous fibers (CFRP) has awakened industrially, according to a bibliometric study, competing with traditional technologies for manufacturing composites, with emphasis on aerospace, automotive, sports and medical industries. The advantages reside in the manufacture of complex multiscale and multimaterial geometries with high mechanical performance due to relative density without the need for molds and too. This research presents and discusses AM CFRP, highlighting the three pioneering technologies. The research covered the technological differentials, materials (matrix and reinforcement), software and deposition processes, based mainly on the respective patents and scientific articles. Tensile strengths were compared between polymers and CFRP. The challenges of increasing the fiber volumetric fraction (V_f) above 50%, improving matrix/reinforcement adhesion, increasing compaction, reducing porosity and improving the distribution of continuous fibers (CF) distribution were also identified. The tensile strength of parts obtained by AM CFRP reached 900 MPa with V_f close to 30% for Nylon (PA) reinforced with CF and discontinuous carbon fibers, representing 75% of the strength of parts manufactured by filament winding (FW). Deposition systems with more degrees of freedom are needed to achieve truly three-dimensional deposition. Several thermoplastic polymers (TP), PLA, PA and PEEK, and engineering epoxy thermosets (TS) can be associated with basalt, glass, aramid and carbon fibers, leading to the development of new materials with a view to mechanical performance at a higher relative cost (carbon fiber and PEEK) or cost-effective (fiberglass and PA). Future prospects include increasing structural stiffness structure and degrees of freedom (DOF) of printers. However, the development of CAD-CAE-CAM software aimed at AM CFRP, three-dimensional guidance of FC, improvement of thermodynamic control, minimization of defects with process monitoring and control, and association of AM with subtractive manufacturing (MS) in the context of hybrid manufacturing (HM).

Keywords: Additive manufacturing. Composites. Continuous fibers. Material Extrusion. Mechanical strength.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.