

## DESENVOLVIMENTO DE CABEÇOTE PARA IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO FILAMENTOS CONTÍNUOS EM COMPÓSITOS (COMMINGLED)

Vinicius Romão Cruz<sup>1</sup> (IC), Antônio C. Ancelotti Júnior (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Filamento Commingled. Laminação composta. Manufatura aditiva.

### Introdução

A crescente demanda por materiais de alta resistência, durabilidade e leveza na indústria moderna tem cada vez mais impulsionado a pesquisa em materiais compostos (notáveis por sua relação resistência mecânica–peso) e, por conseguinte, seus métodos de fabricação. Observando-se os métodos tradicionais de fabricação composta em carbono como o *Hand Layup* ou a infusão por vácuo, fica nítido que tais processos tornam-se cada vez mais custosos e demorados à medida que aumentamos o nível de complexidade da peça. Neste contexto, a manufatura aditiva surge como uma alternativa para buscar uma linha de produção cada vez mais otimizada e eficiente. O presente trabalho tem como tema o desenvolvimento de um cabeçote que fará parte de um sistema maior: uma impressora 3D que compacta e deposita filamentos *Commingled* em ambiente controlado, buscando então utilizar como matéria prima a fibra de carbono na manufatura aditiva. Para tal, justifica-se a necessidade de criar um sistema capaz de fundir adequadamente o conjunto fibra de vidro/poliamida (GF/PA) e fibra de carbono/poliéster éter cetona (CF/PEEK), mantendo o sistema na temperatura e pressão adequada, e após, garantir sua deposição no ambiente de impressão.

### Metodologia

A metodologia empregada no desenvolvimento do cabeçote seguiu uma vertente de projeto iterativo, fundamentada em ciclos pré-estabelecidos e replicáveis de: 1) prototipagem, 2) ensaios experimentais 3) análises de modo de falha e 4) otimizações.

O primeiro protótipo idealizado, constitui-se de 5 roldanas fixas e buscava-se em primeira instância atingir a temperatura ideal para a união da matriz e das fibras, dependendo inteiramente do atrito gerado entre o carbono e o cabeçote. Para tal desenhou-se um conjunto cabeçote-roldanas que fosse capaz de guiar a fita de *commingled* apenas com a força de contato entre o cabeçote e a mesa,

dependendo inteiramente do atrito para compactação da matriz e fibra. Ainda em ambiente CAD notou-se por simulações no próprio AutoDesk Fusion que a manufatura em aço carbono permitiria que a peça atingisse sem problemas a temperatura desejada.

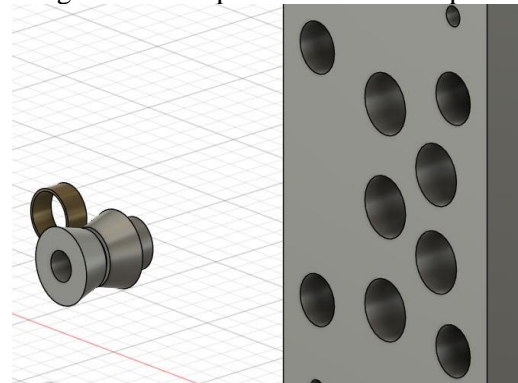
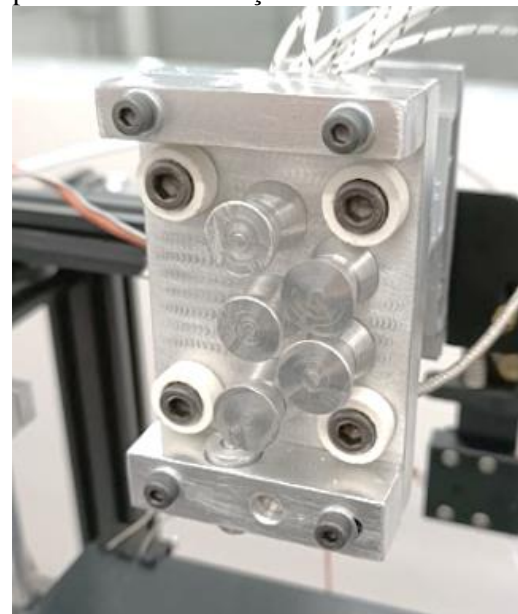


Figura 1 – Partes do cabeçote de roldanas fixas: Base, Roldana e Anel conector.

Embora este arranjo tenha atingido a estabilidade térmica desejada, observou-se que a compactação do produto não era constante e o mecanismo como um todo apresentava problemas de obstrução de fluxo na extrusão.



**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

Figura 2 – Primeiro protótipo: cabeçote com roldanas fixas.

Visando contornar tais percalços desenvolveu-se uma segunda versão em ambiente CAD, substituindo-se as roldanas fixas por um sistema de quatro polias rotativas em aço carbono, sobre uma base com as mesmas dimensões do primeiro protótipo. Para garantir sua rotatividade, as roldanas foram fabricadas sobre rolamentos de esferas e dispostas em pares para promover uma compactação do filamento *commingled* de maneira semelhante à laminação mecânica. Contudo, os ensaios de validação térmica evidenciaram que a propagação de calor por condução resultava na dilatação dos rolamentos e em sua subsequente falha por emperramento.

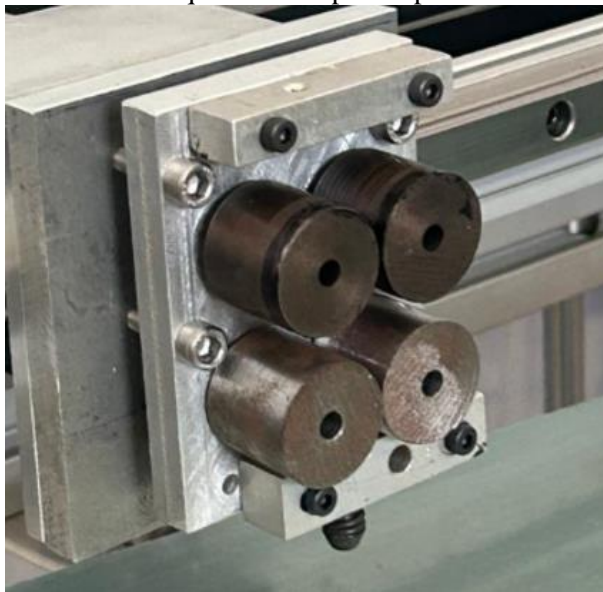


Figura 3 – Segundo protótipo: cabeçote com roldanas movimentadas por rolamentos.

Frente à falha funcional causada pela dilatação do rolamento, constou-se uma terceira adaptação ao sistema existente: a substituição dos rolamentos em esferas por buchas de bronze, material selecionado por sua capacidade de operação em temperaturas elevadas e sua capacidade de exercer a função do rolamento se prensado ao sistema com a devida tolerância dimensional. Para esta versão do cabeçote, substitui-se também o material das roldanas para aço inox, tendo em vista que o aço carbono apresentou rápida oxidação quando submetido a sua elevada temperatura de trabalho. Ainda em ambiente CAD, estipulou-se as cotas necessárias para que esta versão do cabeçote também se integrasse nos suportes já existentes da impressora. Desenhou-se, gerando desenho técnico em A4 para posterior manufatura a base do

cabeçote, as roldanas, as buchas e eixos, o bico depositor e as suportagens.

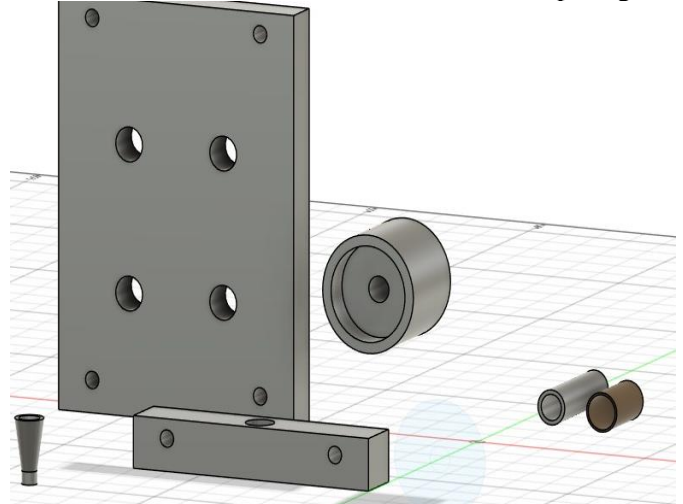


Figura 4 – Terceiro protótipo: componentes em ambiente CAD.

Agora, com os rolamentos em bronze e as roldanas em aço carbono o cabeçote por meio de seus termopares foi capaz de realizar uma extrusão do material de forma contínua. Para testes futuros de pressão de compactação, adaptou-se a base do cabeçote com um sistema parafuso que permite o controle preciso da distância entre as roldanas, permitindo assim que o operador varie controladamente a distância central entre os pares da polia e, assim, calibre a pressão empregada na fibra.



Figura 5 – Terceiro protótipo: cabeçote com roldanas em inox e sistema de calibragem fina

### Resultados e discussão

A avaliação experimental seguiu cronologicamente e os

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

resultados obtidos em cada protótipo foram os princípios que nortearam o reprojeto subsequente. O primeiro protótipo, baseado em roldanas fixas, mostrou-se inviável operacionalmente. O atrito estático no sistema de guiagem não foi capaz de sozinho realizar a compactação necessária para o filamento carbono, mesmo com a temperatura atingindo o valor ideal para o material. As amostras obtidas apresentaram, em sua maioria, uma ausência de consolidação do compósito, caracterizado por alta porosidade entre matriz e fibra.

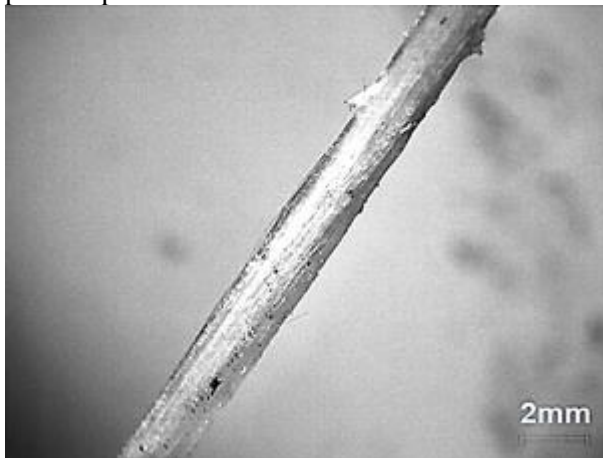


Figura 6 – Microscopia Óptica do filamento *commingled* após ser sujeito à aquecimento e tensão pelo cabeçote.

O protótipo seguinte buscava sanar o problema do atrito, introduzindo um sistema de roldanas móveis montadas sobre rolamentos de esferas. Contudo, este protótipo falhou prematuramente durante o ensaio de aquecimento, seu travamento consta como falha crítica para um funcionamento contínuo em uma impressora 3D funcional. Como resultados deste protótipo, antes do emperramento completo da fita nas roldanas, obtivemos um conjunto matriz/fibra inconsistente no quesito impregnação ao longo do produto, as áreas de melhor impregnação, porém, apresentaram uma compactação efetiva de aproximadamente 30%-40% de acordo com a micrografia realizada (Figura 7). Tal resultado, porém não é constante ao longo das fibras e mostra somente a capacidade potencial do mecanismo.

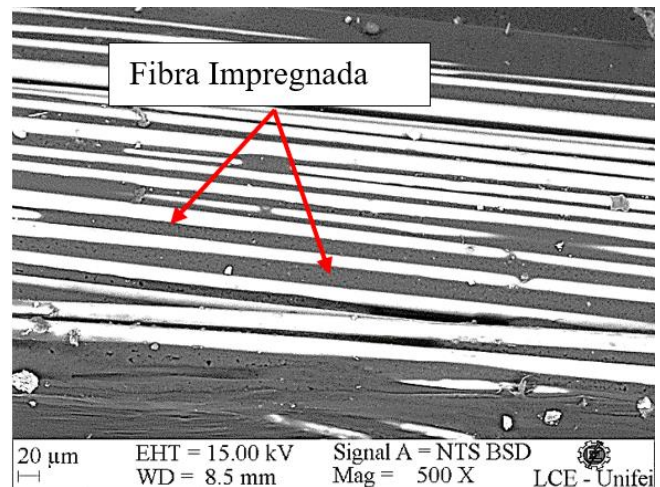


Figura 7 – Microscopia Eletrônica de Varredura do filamento *commingled* após impregnação do segundo protótipo de cabeçote.

O terceiro e último protótipo, objeto central do estudo apresentado, apresentou avanço significativo. A substituição de rolamentos por buchas de bronze reduziu o emperramento do sistema, porém vale destacar que à medida que se aumentava a temperatura da peça, o sistema começou a apresentar dificuldades de movimento, tornando o fluxo de extrusão não contínuo. Observou-se também que, ainda que o sistema fosse capaz de atingir a temperatura almejada, a falta de isolamento térmico e o tempo pequeno de contato entre o conjunto fibra-matriz e a peça projetada culminaram no filamento não ser capaz de alcançar sua temperatura de impregnação da matriz e consolidação do filamento.

A amostra resultante deste terceiro protótipo apresentou compactação superior às amostras anteriores, porém ainda em um nível não satisfatório, apresentando regiões onde a matriz não foi impregnada corretamente. Uma análise quantitativa da micrografia (Figura 8) por processamento de imagem estima que a porosidade (vazios) nessas áreas críticas alcança aproximadamente 50%-60%, um aumento substancial quando comparado com o segundo protótipo, porém ainda não ótimo.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

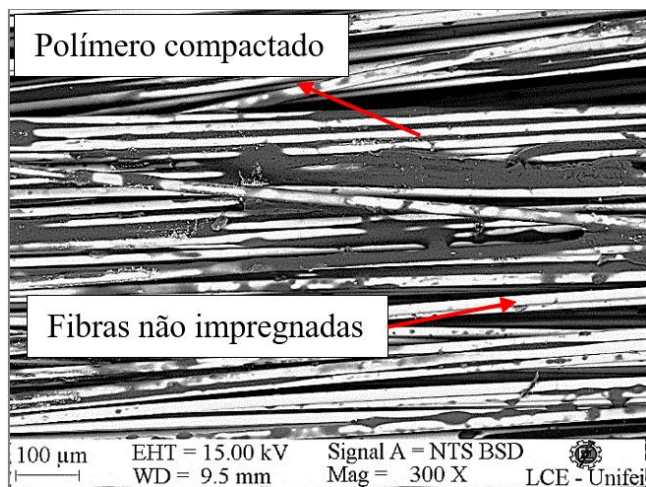


Figura 8 – Microscopia Eletrônica de Varredura do filamento *commingled* após impregnação do terceiro protótipo de cabeçote.

### Conclusões

O presente trabalho exposto teve como objetivo o desenvolvimento e a validação de um cabeçote para impressão 3D para processamento de filamentos carbono *commingled*.

Através da metodologia de protótipos empregada, foi possível superar grande parte dos desafios de projeto descritos, culminando em um protótipo funcional capaz de compactar os laminados de poliamida e PEEK.

Os resultados obtidos apresentam evolução expressiva desde os estágios iniciais, validando a arquitetura do sistema de laminação e a capacidade do cabeçote de extrudar o material de estudos, constando apenas alcançar um fluxo contínuo de deposição de material impregnado, tendo em vista os resultados subótimos em seções específicas da amostra resultado.

Conclui-se então que o projeto, em seu estado atual, necessita de ajustes para atingir o resultado almejado. Para a continuidade da pesquisa, duas diretrizes principais são propostas inicialmente: A melhoria do isolamento térmico do sistema de laminação, permitindo que a propagação de calor dos componentes motrizes seja suficiente para que o conjunto *commingled* atinja estabilidade térmica em sua temperatura de impregnação. Em segunda via, sugere-se o redesenho da zona de fusão, permitindo que o filamento percorra um maior caminho sob temperatura elevada até sua deposição final. Um maior tempo de trabalho permitirá que o calor atinja homogeneamente toda a resina, permitindo que o processo de impregnação ocorra em sua totalidade, para

todo o material depositado.

### Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa e desenvolvimento que possibilitou a concepção deste trabalho de Iniciação Científica.

Expresso também minha mais profunda gratidão ao meu professor e orientador Prof. Dr. Ancelotti, pela paciência, conhecimento compartilhado ao longo de meus anos de graduação e principalmente pela oportunidade.

Estendo meus agradecimentos à Universidade Federal de Itajubá, pela excelente estrutura oferecida e por proporcionar o ambiente ideal para minha formação profissional, acadêmica e pessoal.

### Referências

- SAPUAN, S. M. (ed.). **Fiber reinforced composites**: constituents, compatibility, perspectives, and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
- DI BENEDETTO, R. M. et al. 3D-printed thermoplastic commingled composites: an overview of materials, systems and processes. Itajubá: NTC – Composite Technology Center, UNIFEI, 2025.
- Di Benedetto R. M. et al. Impact Energy Absorption Capability of Thermoplastic Commingled Composites. *Compos Part B Eng.* 2019.
- Long AC, Wilks CE, Rudd CD. Experimental characterisation of the consolidation of a commingled glass/polypropylene composite. *Compos Sci Technol.* 2001;61(11):1591-1603.
- LIN, H. H.; RANGANATHAN, S.; ADVANI SG. Consolidation of Continuous Fiber Systems. In: *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing - Composite Materials Series*, V.10. ; 1994:320-369