

## Algoritmo do ponto mais próximo para otimização de rota alternada em manufatura aditiva por extrusão

### Nearest Neighbor algorithm for alternate tool-path optimization in extrusion additive manufacturing

Francisco Cardoso Becheli<sup>1</sup>, Neri Volpato<sup>2</sup>, Ricardo Dutra da Silva<sup>3</sup>, Rodrigo Minetto<sup>4</sup>

#### RESUMO

No processo de manufatura aditiva por extrusão de material, após as etapas de fatiamento e preenchimento, que determinam os locais em que o material será depositado, a rota percorrida pelo bico de extrusão precisa ser determinada. A rota é constituída por trechos de contornos e de preenchimento, a serem depositados nessa ordem por questões de processo. Esta rota deve, na medida do possível, ser minimizada, diminuindo o tempo de transição entre trechos de deposição e, conseqüentemente, o tempo de impressão da peça. Este estudo aborda uma estratégia de otimização de rota alternada, isto é, que possibilita misturar a deposição de trechos de contornos e de preenchimento, em oposição a não alternada, que imprime todos os contornos para só depois imprimir os de preenchimento. Isto é feito a partir de um pré-processamento de dados que relaciona diferentes tipos de trechos em uma estrutura de dados, permitindo a impressão alternada. Os resultados mostraram que a otimização alternada apresenta melhorias significativas na redução da distância das rotas, mantendo sua performance computacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** manufatura aditiva; otimização de rota; otimização alternada.

#### ABSTRACT

In the additive manufacturing process through material extrusion, after the slicing and filling stages that determine where the material will be deposited, the path taken by the extrusion nozzle needs to be determined. This path consists of segments of contours and filling, to be deposited in that order for process-related reasons. This path should be minimized as much as possible, reducing the transition time between deposition segments and consequently, the printing time of the part. This study addresses an alternate route optimization strategy, which allows for alternating the deposition of contour segments and filling segments, as opposed to non-alternate strategies that print all the contours before printing the filling segments. This is achieved through a data preprocessing step that relates different types of segments in a data structure, enabling alternate printing. The results have shown that alternate optimization provides significant improvements in route distance reduction while maintaining computational performance.

**KEYWORDS:** additive manufacturing; tool-path optimization; alternate optimization.

## INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente (VOLPATO, 2017). Para que isto seja possível, existem diversas etapas no processo de criação de uma peça, como cálculos de suporte, fatiamento e preenchimento, e por fim, a obtenção da rota de impressão. Inicialmente, as etapas de fatiamento e preenchimento

<sup>1</sup> Bolsista da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: franciscobecheli@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9611294977552737.

<sup>2</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: nvolpato@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8414652619232683.

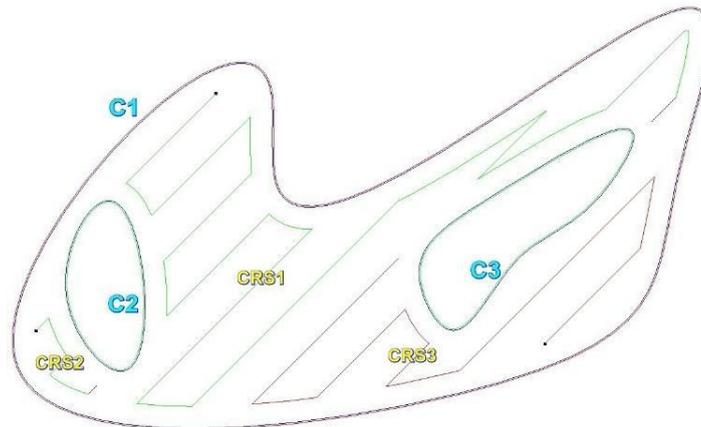
<sup>3</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Informática (DAINF). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: rdsilva@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8512085741397097.

<sup>4</sup> Orientador, Docente no Departamento Acadêmico de Informática (DAINF). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: rminetto@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8366112479020867.

determinam a divisão da peça em camadas e os trechos onde será depositado material em cada uma dessas camadas, respectivamente.

Durante o cálculo de preenchimento, as diferentes áreas da peça a serem impressas são delimitadas por trechos denominados de contornos (Cs) e trechos de preenchimento contínuos de varredura (CRSs - *continuous raster segments*), como ilustra a Figura 1. Então, a etapa de obtenção da rota é responsável por determinar a ordem de impressão destes trechos de deposição.

Figura 1 – Exemplo de áreas da peça



Fonte: Autoria própria (2023).

Os Cs são caracterizados por serem polígonos fechados e, portanto, possuírem pontos inicial e final de impressão iguais, e por envolverem os CRSs, que são trechos abertos responsáveis por preencher as áreas delimitadas pelos contornos. Portanto, para que seja depositado material em um CRS, deve-se assegurar que todos os contornos relacionados com o trecho já tenham sido depositados (VOLPATO; ZANOTTO, 2019).

São chamados de “*jumps*” os deslocamentos do bico de extrusão da impressora onde não há deposição de material, isto é, a navegação entre os trechos de deposição. Para um processo mais eficiente, deve-se minimizar a distância percorrida em *jumps*, visando diminuir o tempo final de impressão. Uma das estratégias para otimizar essa rota de impressão é aplicar o método guloso, que, após o fim da deposição de um trecho, executa um *jump* para o trecho mais próximo ainda não depositado. Adicionalmente, geralmente as estratégias imprimem todos os Cs da camada primeiro e, em seguida, todos os CRSs, de forma a assegurar que os CRSs sejam impressos após todos os Cs a eles relacionados. Esta ordem de impressão caracteriza a estratégia como não alternada, ou seja, obrigatoriamente deposita material sobre todos os Cs antes de imprimir os CRSs.

Este estudo aborda uma evolução dessa estratégia gulosa, que implica em implementar o método de deposição alternado, permitindo a impressão de CRSs após a deposição de todos os Cs relacionados a ele, e não somente após a impressão de todos os Cs da camada. A ideia é intercalar a impressão de Cs e CRSs, e realizar a comparação com a antiga estratégia gulosa.

## MÉTODO

O sistema de pré-processamento de dados proposto por Weller et al. (2021), divide os contornos de cada camada em ilhas. Cada ilha pode possuir múltiplos Cs, e sempre possuirá um C mais externo que contém o restante dos Cs internos. Adicionalmente, este C mais externo pode ser comum a múltiplas ilhas, como é o caso da Figura 1, onde C1 é o contorno mais externo de ambas as ilhas, geradas por C2 e C3. Para relacionar os CRSs a estas mesmas ilhas, foi adicionada uma etapa ao pré-processamento, que a partir das ilhas já criadas, mapeia também os CRSs. Para isso, basta obter o contorno mais externo de cada ilha e verificar se cada CRS da camada está contido nesta ilha através de um algoritmo *Point In Polygon* (PIP). Se esse for o caso, logo, ele pertence a esta ilha, podendo potencialmente pertencer a múltiplas ilhas. O processo está exposto no Algoritmo a seguir.

---

### Algoritmo 1: MAPEAMENTO

---

**Entrada:** Vetor de ilhas  $I$  da camada, Vetor de CRSs *Rasters* da camada  
**Saída:** Vetor de ilhas  $I$  com CRSs mapeados

```

1 início
2   para cada ilha  $\in I$  faça
3      $C_{\text{externo}} \leftarrow \text{CONTORNOMAISEXTERNO}(\text{ilha})$ 
4     para cada  $R \in \text{Rasters}$  faça
5       se  $R$  está contido em  $C_{\text{externo}}$  então
6         ilha.rasters.Inclua( $R$ )
7       fim
8     fim
9   fim
10 fim
```

---

Fonte: Autoria própria (2023).

Após o mapeamento de todos os CRSs às ilhas, o método guloso foi modificado para permitir a impressão de CRSs antes do término de todos os contornos da camada, desde que todos os contornos de todas as ilhas das quais aquele CRS pertence já tenham sido depositados. Para isso, após a impressão de um trecho, o algoritmo busca normalmente o trecho mais próximo. Caso este seja um C, não há restrição alguma e o trecho é impresso, mas caso seja um CRS, o algoritmo busca todas as ilhas as quais o trecho está relacionado e então, para cada ilha, confere se todos os Cs da ilha já foram depositados. Em caso positivo, o CRS está liberado para ser o próximo trecho a ser depositado e, caso contrário, o algoritmo continua buscando o próximo trecho de menor distância. O processo foi resumido nos Algoritmos a seguir.

---

### Algoritmo 2: TRECHO MAIS PRÓXIMO PERMITIDO

---

**Entrada:** Vetor de trechos de deposição  $T$ , Tamanho do vetor  $n$ , Ponto anterior  $p$   
**Saída:** Trecho permitido  $t$  mais próximo a  $p$

```

1 início
2   para  $i = 1$  até  $n$  faça
3      $t \leftarrow \text{TRECHOMENORDISTÂNCIA}(T, p)$ 
4     se  $t$  é Contorno então
5       retorna  $t$ 
6     fim
7     se  $t$  é CRS então
8       se  $t$  é permitido então
9         retorna  $t$ 
10      fim
11    fim
12  fim
13 fim
```

---

Fonte: Autoria própria (2023).

---

**Algoritmo 3:** GULOSOINTERCALADO

---

**Entrada:** Vetor de trechos de deposição  $T$ , Tamanho do vetor  $n$

**Saída:** Vetor ordenado de trechos de deposição  $TO$

```
1 início
2   p ← PontoInicial
3   para i = 1 até n faça
4     t ← TRECHOMAIAPRÓXIMOPERMITIDO(T, p)
5     TO.Inclua(t)
6     p ← PontoFinalDoTrecho
7   fim
8   retorna TO
9 fim
```

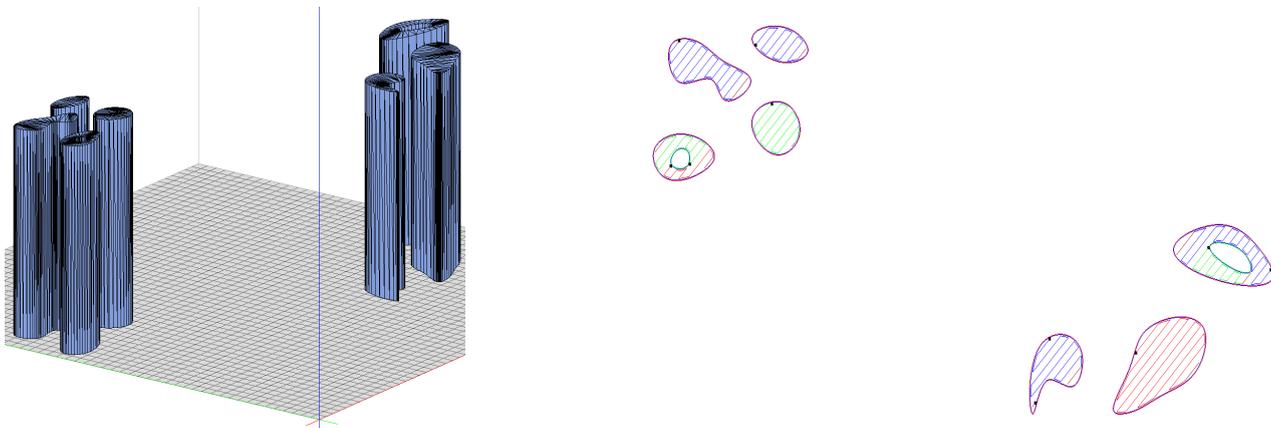
---

Fonte: Autoria própria (2023).

## EXPERIMENTO

O estudo foi inteiramente realizado no software Rapid Prototyping Process Planning (RP3) em linguagem C++ orientada a objetos, desenvolvido pelo Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) da UTFPR-CT. Após a implementação do código no software, foram realizados testes em 8 diferentes peças a fim de comparar as distâncias da rota entre os algoritmos gulosos não alternado e alternado. Adicionalmente, foi impressa a peça da Figura 2 com 5mm de altura com ambas as estratégias a fim de observar na prática o resultado do estudo.

Figura 2 – Peça teste impressa (peca4.stl)



Fonte: Autoria própria (2023).

## RESULTADOS

Estão expostos na Tabela 1 as peças utilizadas nos testes e suas respectivas distâncias de rota de *jumps*, bem como o ganho percentual do algoritmo alternado em relação ao não alternado.

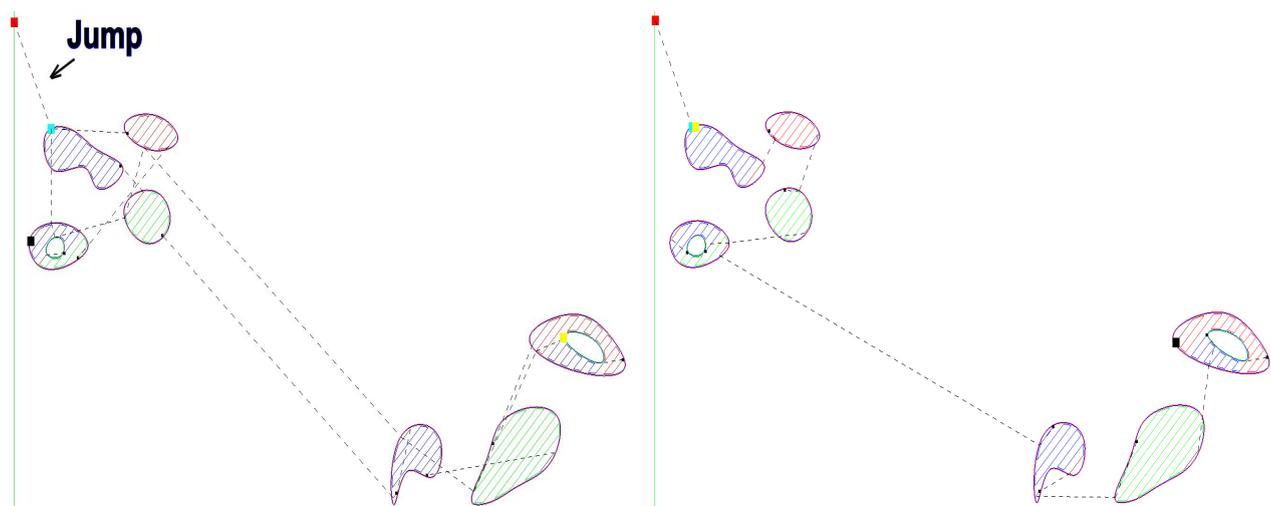
Tabela 1 – Distâncias de rota dos algoritmos.

Peça	Distância (m) Não alternado	Distância (m) Alternado	Ganho (%)
peca1.stl	357,363	225,614	36,87%
peca2.stl	189,810	156,814	17,38%
peca3.stl	201,304	138,140	31,38%
peca4.stl	304,706	168,609	44,67%
peca5.stl	373,902	339,861	9,10%
peca6.stl	330,189	237,806	27,98%
peca7.stl	358,459	219,406	38,79%
peca8.stl	555,243	369,420	33,47%

Fonte: Autoria própria (2023).

Com a estratégia não alternada, a máquina levou 10 minutos e 30 segundos para imprimir a peça da Figura 2. Já com a estratégia alternada, a máquina levou 10 minutos e 4 segundos para realizar a impressão. Considerando que a maior parte deste tempo representa a deposição de material, idêntica para ambas as estratégias, foram poupados 26 segundos apenas com a melhoria da rota de reposicionamento do bico, um resultado expressivo para uma peça tão pequena (4,13% de redução de tempo). A Figura 3 apresenta uma camada da rota calculada pelo algoritmo do ponto mais próximo não alternado e pelo alternado, respectivamente, onde fica evidente a menor distância percorrida em *jumps* (linhas tracejadas) que resultou no ganho de tempo dessa peça.

Figura 3 – Exemplo de rota não alternada e alternada



Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através dos testes, é possível concluir que a otimização alternada é mais eficiente que a não alternada para todo tipo de peça, com ganhos percentuais de distância muito expressivos. Isso se deve ao fato de que é possível depositar material sobre CRSs antes do término da impressão de todos os contornos de uma camada, considerando que geralmente há um CRS muito mais próximo do ponto final de impressão de um contorno do que um próximo contorno.

Fica evidente a melhoria proporcionada pelo método alternado, que permite a impressão dos CRSs logo após o fim da deposição do contorno de sua respectiva ilha, que geralmente está muito mais próximo do que o próximo contorno, simplificando muito a rota, como visto na Figura 3.

## Agradecimentos

Agradecimentos aos professores Rodrigo Minetto, Neri Volpato e Ricardo Dutra da Silva pela orientação fornecida no estudo ao longo do período, e a Eduardo Hungria pelos testes de impressão realizados. Agradeço também à Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica concedida.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

WELLER, T. R. et al. A framework for tool-path airtime optimization in material extrusion additive manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 67, p. 101999, fev. 2021.

VOLPATO, N.; ZANOTTO, T. T. Analysis of deposition sequence in tool-path optimization for low-cost material extrusion additive manufacturing. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 101, n. 5–8, p. 1855–1863, 2019.