



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



Planejamento de Processo em Manufatura Aditiva utilizando a estrutura de dados DCEL

Process Planning in Additive Manufacturing using the DCEL data structure

Alan Jun Kowa Onnoda (orientado) *, Rodrigo Minetto (orientador) †, Neri Volpato ‡, Ricardo Dutra da Silva §

RESUMO

O planejamento de processo em Manufatura Aditiva consiste em gerar instruções para a impressão de uma peça tridimensional a partir de um modelo computacional. O objetivo deste projeto é auxiliar os processos de planejamento, como o fatiamento e o cálculo de suporte, fornecendo informações topológicas do modelo a ser impresso. A peça é representada computacionalmente por uma malha de triângulos não conectados, o que gera dificuldades em cálculos do planejamento. Portanto, optou-se pela utilização da estrutura de dados Doubly Connected Edge List (DCEL), que permite interligar a malha e extrair as informações relevantes sobre a topologia da malha. A plataforma utilizada para implementar e testar esta estrutura de dados é o software RP3, desenvolvido pelo Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. As melhorias desenvolvidas possibilitam a utilização de informações sobre adjacência nos triângulos e evitam redundância de vértices na malha por todo o processo de planejamento.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. topologia 3D. estrutura de dados DCEL.

ABSTRACT

The Additive Manufacturing process planning consists in generating printing instructions of a tridimensional piece based on a digital geometric model. The objective of the research is to auxiliate the process of planning, in the slicing and support calculation, providing topological information of the model to be printed. The piece is digitally represented by a non-connected triangle mesh. Therefore, the use of the data structure Doubly Connected Edge List (DCEL) was chosen, as it permits the mesh interconnection, allowing the extraction of relevant information about the mesh topology. The platform used to implement and to test the data structure is the software RP3, developed by the Additive Manufacturing and Tooling Group (NUFER) of the Federal University of Technology - Paraná (UTFPR). The developed enhancements made possible the utilization of information about triangle adjacencies and avoided the mesh's vertice redundancy during the planning process.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D topology. DCEL data structure.

* Engenharia da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná; ✉ alanjun@outlook.com.

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; ✉ rodrigo.minetto@gmail.com.

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; ✉ nvolpato@gmail.com.

§ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; ✉ ricardodutra@gmail.com.

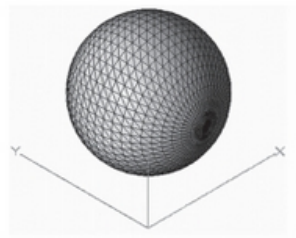


1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por Manufatura Aditiva, geralmente conhecido como impressão 3D, consiste na adição sucessiva de material na forma de camadas para produzir uma peça tridimensional a partir de um modelo geométrico computacional (VOLPATO; DA SILVA, 2017). Antes da impressão em si, um planejamento do processo deve ser feito, com o intuito de gerar as instruções de como a máquina deve imprimir a peça. O modelo de entrada é normalmente obtido por arquivos nos formatos Stereolithography (STL) ou 3D Manufacturing Format (3MF), tornando-se necessário então uma conversão das informações armazenadas nos arquivos para a linguagem utilizada pelas impressoras.

Tanto os arquivos no formato STL quanto os de formato 3MF servem para armazenar informações que representam a superfície tridimensional através de triângulos, formando uma malha do modelo, como pode ser visto na Fig. 1. Esta malha é utilizada para o planejamento do processo de fabricação, que consiste em diversas partes: como divisão do modelo em camadas (fatiamento), cálculo de estruturas de suporte, planejamento de trajetórias de preenchimento e geração de código de máquina.

Figura 1 – Esfera representada por uma malha triangular



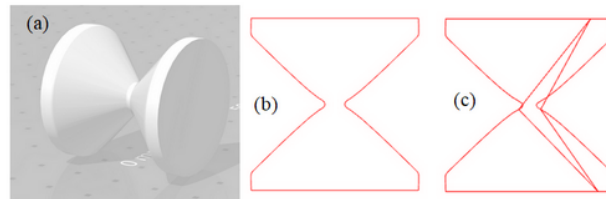
Fonte: VOLPATO E DA SILVA (2017).

A malha 3D é representada por um conjunto de triângulos não estruturados/conectados, com informações a respeito das coordenadas de cada vértice. Ou seja, a peça é formada por uma lista de triângulos que estão no mesmo espaço cartesiano, porém não há nenhuma conexão explícita, apenas vértices que compartilham a mesma coordenada quando um triângulo é adjacente a outro. Então, apesar dos arquivos representarem corretamente modelos tridimensionais, sua simplicidade gera dificuldades quando o planejamento de impressão é feito apenas com base nessa estrutura da malha .

Na etapa de fatiamento, por exemplo, utiliza-se uma lista de triângulos que são cortados por um dado plano horizontal, com o intuito de formar contornos 2D horizontais, que representam cada camada da peça. A intersecção de triângulos-plano forma diversos segmentos desconectados, sendo necessários conectá-los usando a informação de seus pontos finais. Todo este processo de fatiamento (MINETTO et al., 2017) pode resultar em erros de arredondamento que produzem contornos mal-formados, como exemplifica a Fig. 2. Os segmentos são criados desconectados pois não há informação que ligue um triângulo a outro se eles forem vizinhos, o que faz com que cada triângulo precise ter sua intersecção calculada de forma individual e isolada no plano.

Outra dificuldade identificada é no cálculo da estrutura de suporte. Em algumas formas de impressão 3D, as camadas são construídas de baixo para cima, então em peças cujas bases não sustentam uma parte superior é necessário a criação de suporte para que o material impresso seja depositado corretamente. A maneira com que se identifica quais partes necessitam deste apoio é uma comparação camada a camada por meio de operações Booleanas, identificando quais áreas de cada camada são sobressalentes à camada inferior. Apesar deste método ser efetivo, diversos detalhes como diferenças pequenas entre camadas que podem ser desconsideradas e o

Figura 2 – Modelo computacional de uma ampulheta (a), camada gerada pelo fatiamento correto (b) e camada formada com erros na ligação entre segmentos(c)



Fonte: Autoria própria (2020).

número de cálculos em uma peça podem tornar o método custoso computacionalmente. Uma alternativa proposta para o cálculo do suporte seria utilizar a malha de triângulos: primeiro identifica-se quais triângulos estão suspensos e depois calcula-se o volume de suporte necessário utilizando uma projeção. Porém, um requisito é unir os volumes de triângulos adjacentes, para formar uma única estrutura de suporte em cada área. Novamente, a falta desta informação de vizinhança entre os triângulos dificulta o processamento.

Portanto, para resolver estas dificuldades, foi proposto representar a topologia da malha utilizando a estrutura de dados Doubly Connected Edge List (DCEL) (BERG, 2008). Essa estrutura de dados permite uma manipulação eficiente das informações topológicas na malha de triângulos por armazenar e interligar as faces, vértices e arestas.

Logo, o objetivo desta pesquisa é extrair e armazenar informações dos modelos computacionais por meio de cálculos e algoritmos, com foco nas informações sobre adjacência entre cada triângulo da malha. Assim, auxiliando todo o planejamento da impressão 3D por meio de conceitos de topologia geométrica.

2 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA

O desenvolvimento do projeto foi realizado no software de planejamento de processo Rapid Prototyping Process Planning (RP3), desenvolvido pelo Núcleo de Manufatura Aditiva de Ferramental (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (VOLPATO; FOGGIATTO, 2009). O software é desenvolvido por alunos da universidade, sendo aprimorado com novas funções constantemente.

O formato de arquivo STL foi desenvolvido pela 3D Systems como um padrão nativo de seu software, o Stereolithography CAD. O arquivo descreve a superfície de uma geometria tridimensional simples, estruturada por pontos cartesianos agrupados de três a três para formar triângulos. Um triângulo é formado pelos seus três vértices e sua normal.

O formato 3MF foi desenvolvido por um consórcio de mesmo nome, formado por diversas empresas e indústrias interessadas na impressão 3D. A sua malha é armazenada em dois agrupamentos: um contendo vértices e outro com triângulos. Os vértices são pontos no espaço cartesiano como no STL e cada triângulo indica, na lista de vértices, quais fazem parte da sua estrutura. Esse método de armazenamento já evita redundância quando um ponto é compartilhado por diversos triângulos.

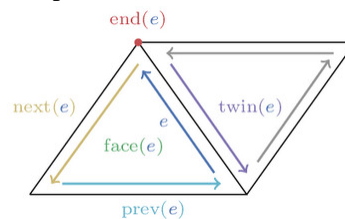
Durante o desenvolvimento da pesquisa optou-se por utilizar o formato 3MF para gerar a topologia da peça, justamente por declarar triângulos e vértices separadamente. Porém o processamento com STL é sem dúvidas possível também, já que existem métodos de conversão de um formato para o outro.

A peça em 3MF é composta por diversos arquivos Extensible Markup Language (XML), compactados no formato ZIP. O software que utiliza os dados do arquivo precisa de uma análise sintática (parsing) para retirar as

informações necessárias. A malha 3D de uma peça é dividida em duas listas: uma de coordenadas cartesianas que representam os vértices, e outra de triângulos, que indicam quais três vértices fazem parte de cada um. Uma vez que se extrai as informações é possível recriar e visualizar a peça no RP3 ou em softwares similares.

A estrutura de dados Doubly Connected Edge List (DCEL) permite interligar os triângulos das peças, desta maneira, obtendo informações topológicas, como as adjacências de cada triângulo por exemplo. Uma malha DCEL é composta por um agrupamento de estruturas chamadas de half-edge (meia-aresta). A Fig. 3 mostra um exemplo de malha, pela imagem nota-se que uma aresta foi dividida em duas half-edges, chamada e e $\text{twin}(e)$. Cada face triangular é formada por três arestas orientadas de forma anti-horária.

Figura 3 – Exemplo da estrutura DCEL em dois triângulos



Fonte: (ZÖNNCHEN; KÖSTER, 2018)

Uma half-edge e tem os seguintes atributos de referência: origem, aresta gêmea ($\text{twin}(e)$), face incidental ($\text{face}(e)$), próxima edge ($\text{next}(e)$) e edge anterior ($\text{prev}(e)$). A origem é o ponto em que a half-edge se inicia, lembrando que o sentido das half-edges em uma face tem que ser sempre anti horária. A referência $\text{twin}(e)$ aponta para a half-edge que se encontra na mesma aresta que e , obrigatoriamente sendo orientada no sentido oposto. A face incidente é a face que está à esquerda da half-edge enquanto as half-edges próxima e anterior são referências para as outras half-edges da face, sempre seguindo o sentido da face. No caso do triângulo, a próxima edge e a anterior compõem o triângulo completo. A Fig. 3 mostra um exemplo da estrutura completa, onde a half-edge principal é o segmento de reta e .

A construção da malha DCEL de uma peça necessita da lista de vértices e da lista de triângulos, que são fornecidas pelo arquivo 3MF neste caso. A cada triângulo da lista cria-se suas respectivas half-edges de um vértice ao outro, interligando-as com os atributos de próxima edge, edge anterior e face incidente, seguindo a orientação anti-horária. Em seguida, verifica-se se quantos vértices do triângulo atual já foram usados na criação de outras half-edges. Se um vértice já foi utilizado significa que o triângulo compartilha aquele ponto com outro triângulo já instanciado. Se dois vértices ou mais vértices já foram utilizados e já existem half-edges interligando estes pontos, significa que um ou mais triângulos vizinhos já foram instanciados, nesse caso é necessário declarar a relação de half-edges gêmeas entre a face atual e a face que foi criada anteriormente. Por fim, se existem dois ou mais vértices utilizados, porém não há half-edge entre eles, significa que ainda falta declarar o triângulo que ocupará aquele espaço na estrutura.

A facilidade de acessar informações topológicas da malha DCEL se dá pelo fato de que tudo está interconectado. A malha pode ser percorrida usando as operações mostradas na Fig. 3. Um exemplo prático seria descobrir quais são todas as faces adjacentes do triângulo que $\text{edge}(e)$ faz parte: percorre-se cada half-edge pertencente ao triângulo, utilizando $\text{next}(e)$ e $\text{prev}(e)$, e a face incidente da twin de cada aresta é um triângulo adjacente, ou seja: $\text{face}(\text{twin}(e))$, $\text{face}(\text{twin}(\text{next}(e)))$ e $\text{face}(\text{twin}(\text{prev}(e)))$.

Uma vez definidos os objetivos da implementação da malha DCEL, a preocupação se torna em como o RP3 deve conseguir assimilar e utilizar a estrutura. Até então, o software armazenava apenas uma lista de triângulos, realizando o planejamento do processo de impressão usando a malha simples, onde cada triângulo possui seus

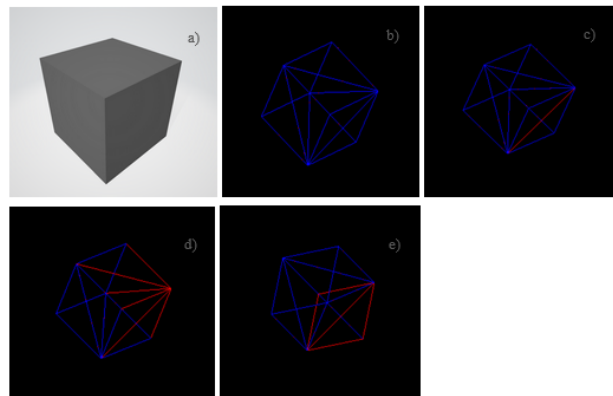


três vértices e a única conexão entre as faces era o valor numérico de cada ponto. Assim, duas mudanças foram necessárias: primeiro, adaptar como a estrutura é representada no RP3 e segundo, modificar como o programa utiliza as informações da estrutura. No primeiro caso, optou-se por armazenar uma lista de vértices, uma de triângulos e uma de half-edges, onde os vértices têm as coordenadas numéricas, enquanto as outras duas listas apenas usam referências e ponteiros. No segundo caso, o programa pode utilizar a lista de triângulos como vinha fazendo, buscando os valores numéricos nos vértices, e, se for necessário informações de topologia, ele pode utilizar as half-edges em conjunto.

3 RESULTADOS

Um dos objetivos da implementação é conseguir conectar os vértices, arestas e triângulos umas às outras, portanto foram feitos testes para verificar esta conectividade entre as estruturas. A Fig. 4 (a) mostra o modelo de um cubo convertido para a malha DCEL em azul (b), e alguns exemplos desses testes. A verificação da conectividade é feita indicando partes da malha a partir de uma half-edge inicial indicada em vermelho (c). O primeiro teste na Figura 4 (d) é uma indicação de todas as arestas ligadas ao vértice de origem da half-edge selecionada, isto é feito percorrendo half-edges que estão no mesmo triângulo e mudando a face utilizando a half-edge gêmea quando necessário, todas as arestas estarão identificadas quando a aresta inicial for indicada pela segunda vez. A Fig. 4 (e) indica os triângulos adjacentes da aresta inicial, para isso, indica-se as duas faces incidentes da aresta, uma de cada half-edge.

Figura 4 – Modelo 3D de um cubo (a), malha DCEL criada a partir do cubo (b), seleção de uma half-edge do cubo em vermelho (c), teste para indicar todas as arestas ligadas à origem da half-edge selecionada (d) e teste para indicar todos os triângulos adjacentes à half-edge selecionada (e)



Fonte: Autoria própria (2021).

Uma vez que estes testes foram feitos, pode-se comparar com o que seria necessário fazer para obter as mesmas informações na malha simples. No caso de identificar as arestas que partem do mesmo ponto de origem (semelhante a Fig. 4 (d)): seria necessário percorrer todos os triângulos na lista da malha procurando aqueles que compartilham o mesmo valor de vértice. No caso de identificar os triângulos adjacentes a partir de uma face inicial (Fig. 4 (e)): seria semelhante ao primeiro teste, porém, desta vez, a procura deve ser em pares de vértices semelhantes de cada triângulo. Ter que percorrer a lista inteira de triângulos toda vez que fosse necessário identificar adjacências tornavam inviável métodos que utilizam esta informação.

Outro resultado importante de se considerar é como as informações da malha são armazenadas. Na estrutura de malha anterior, cada triângulo instanciava três pontos individuais, o que gerava repetição nos triângulos



adjacentes um ao outro. O modelo computacional do cubo da Fig. 4 indica que cada face é composta por dois triângulos, então o cubo inteiro é formado por 12 triângulos. Na malha anterior, a estrutura era formada por 36 pontos, 3 para cada triângulo. Na malha DCEL o número de pontos foi reduzido para 8, pois os triângulos podem apontar para pontos já instanciados. Considerando que existem modelos com centenas e milhares de triângulos, esta economia de dados é bem positiva para o processamento computacional.

4 CONCLUSÕES

A implementação da malha DCEL no software RP3 demonstra que é possível armazenar o modelo computacional das peças já fornecendo informações que podem auxiliar todo o processo de planejamento da Manufatura Aditiva. O escopo deste projeto ficou apenas na implementação da malha no programa, justamente pela malha afetar quase todas as funcionalidades de um planejador de Manufatura Aditiva. Mesmo assim, os testes realizados permitem identificar uma grande flexibilidade de se conseguir informações da malha, principalmente no quesito de adjacências de triângulos.

Agora que é possível utilizar a estrutura nova no RP3, a questão se torna em como as novas informações podem melhorar as diversas partes do processamento. Uma mudança que já está sendo implementada é no fatiamento, quando conecta-se os segmentos dos contornos 2D com auxílio das adjacências da malha. Outra implementação que está sendo considerada é o cálculo de suporte com o auxílio das normais de cada triângulo, que em conjunto com as adjacências, permitem calcular a inclinação das faces da peça por toda sua superfície. Enfim, considerando que o objetivo da nova estrutura de dados é fornecer novas ferramentas para melhorar e resolver problemas no processamento de peças no RP3, conclui-se que esta etapa do desenvolvimento foi um sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica concedida ao projeto e aos professores Rodrigo Minetto, Neri Volpato e Ricardo Dutra da Silva pela orientação. Agradecimentos também a Luis Felipe Moro Coelho e a Henrique Romaniuk Ramalho pela colaboração durante o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

- BERG, M. et al. **Computational Geometry: Algorithms and Applications**. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2008.
- MINETTO, R. et al. An Optimal Algorithm for 3D Triangle Mesh Slicing. Atlas, 2017.
- VOLPATO, N.; DA SILVA, J.V.L. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Blucher, 2017.
- VOLPATO, N.; FOGGIATTO, J. A. The Development of a Generic Rapid Prototyping Process Planning System. **4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP)**, Leiria, Portugal, p. 381–387, 2009.
- ZÖNNCHEN, B.; KÖSTER, G. A Parallel Generator for Sparse Unstructured Meshes to Solve the Eikonal Equation. **Journal of Computational Science**, São Paulo, 2018. Disponível em: [🔗](#).