

Elaboração de técnicas de modelagem 3D de estruturas geológicas e produção de modelo por manufatura aditiva

Danilo Polly^{1,2}, Laureana S.B. Fontolan¹, Marcelo F. Oliveira¹

{danilo.polly, laureana.fontolan, marcelo.oliveira}@cti.gov.br

**¹Laboratório Aberto de Impressão 3D/Divisão de Tecnologia para
Produção e Saúde - LAprint/DITPS
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP**

**²Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas – Campinas/SP**

Abstract.

The geology handles wide dimensions, which can lead its visualization overwhelming to the human scale. This work's goal is to propose and analyze a method for modeling tridimensional geological structures, using open-source software and use them with additive manufacturing to make the study more facilitated. With Blender, the modeling utilized raster and vector images to build São Paulo's relief surface and its corresponding subsurface hydrographic basin. Thereafter, the models were 3D printed using SLS technology. The methodology allowed the creation of two models that fit together and show with clarity the relief and the basin.

Resumo.

A geologia lida com grandes dimensões, o que pode tornar a sua visualização inacessível à escala humana. O objetivo deste trabalho é propor e analisar uma metodologia para a modelagem de estruturas geológicas tridimensionais, utilizando software livre e utilizá-las em processo de manufatura aditiva para facilitar o estudo de estruturas geológicas. A modelagem no Blender utilizou imagens rasterizadas e vetorizadas para criar a superfície de relevo e subsuperfície correspondentes à bacia hidrográfica de São Paulo. Em seguida, os modelos foram impressos com a tecnologia SLS. A metodologia permitiu a criação de dois modelos que se encaixam, mostrando o relevo e a bacia hidrográfica com clareza.

1. Introdução

A manufatura aditiva (MA) é uma técnica de prototipagem rápida que permite a produção de modelos tridimensionais a baixo custo [1], tornando mais acessível a concretização de *designs* criados em ambiente virtual. Peças fabricadas por MA permitem uma interação física com um objeto de estudo, promovendo maior poder de análise, mas também aumentam o engajamento de alunos como forma complementar de ensino [2].

O emprego de *softwares* livres democratizou o *design for additive manufacturing* (DFAM), sendo o conjunto de técnicas, ferramentas e materiais para otimizar a produção de peças com o uso da MA [3]. Como exemplo de *software* livre, o Blender possui um conjunto completo de ferramentas de modelagem 3D [4], mas também é apoiado pela comunidade, com *add-ons* que o complementam. O BlenderGIS é uma destas adições, que permite importar ao ambiente de trabalho do Blender, diversos tipos de dados de sistemas de informação geográfica (GIS) [5]. Um conjunto de dados disponível é a topografia da Terra adquirida pela missão espacial SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e disponibilizada pela OpenTopography [6].

Utilizando os dados de elevação do relevo é possível criar modelos virtuais que podem ser transpostos para a realidade utilizando técnicas de MA [7]. Porém, o relevo é apenas a parte visível da informação de uma região. Assim, com ajuda de dados subsuperficiais convertidos em mapas de contorno [8], também é possível criar modelos tridimensionais produzidos por MA [9]. Ao sobrepor as duas informações, é possível criar modelos tridimensionais que demonstram dois tipos de estruturas em um único sólido.

Com os dados SRTM obtidos em forma de imagem rasterizada e os dados subsuperficiais, este trabalho buscou sobrepor os dois tipos de imagens e criar técnicas para a modelagem tridimensional da bacia hidrográfica de São Paulo, utilizando software livre, e analisar a produção de modelo físico por manufatura aditiva.

2. Metodologia

O contorno estrutural do embasamento da bacia de São Paulo publicado em [8], foi vetorizado e salvo em formato SVG, utilizando o editor de imagens vetoriais *open-source*, Inkscape. O arquivo foi importado ao modelador 3D, Blender, e obteve-se objetos do tipo curva, que foram convertidos em objetos do tipo malha com vértices interligados por arestas. A partir destes dados, foram realizadas as principais etapas apresentadas na figura 1.

2.1 Criação do Relevo e Georreferenciamento

Foi criado um mapa utilizando o *add-on* BlenderGIS e selecionada a região com as coordenadas da imagem dos contornos [8]. A aproximação do mapa foi escolhida como a mais próxima possível, que englobasse toda a região da bacia hidrográfica. A partir do mapa e novamente com o *add-on*, foi obtido o mapa de elevação SRTM daquela região. O mapa foi criado como um plano, possuindo quatro vértices que o definiam. Por ser um objeto do tipo malha, foi possível criar subdivisões no plano, onde cada face é dividida em quatro outras faces menores. As subdivisões foram criadas com o modificador *Subdivision Surface*, selecionando o modo *Simple* e com 9 níveis. Para deformar o plano com base na imagem de elevação SRTM, foi criado o modificador *Displace*, selecionando a textura como sendo a imagem obtida anteriormente. Com o objeto das curvas selecionado, foi feito o georreferenciamento utilizando as transformações, translação, rotação e escala, de modo a alinhar os rios presentes tanto na curva quanto no relevo.

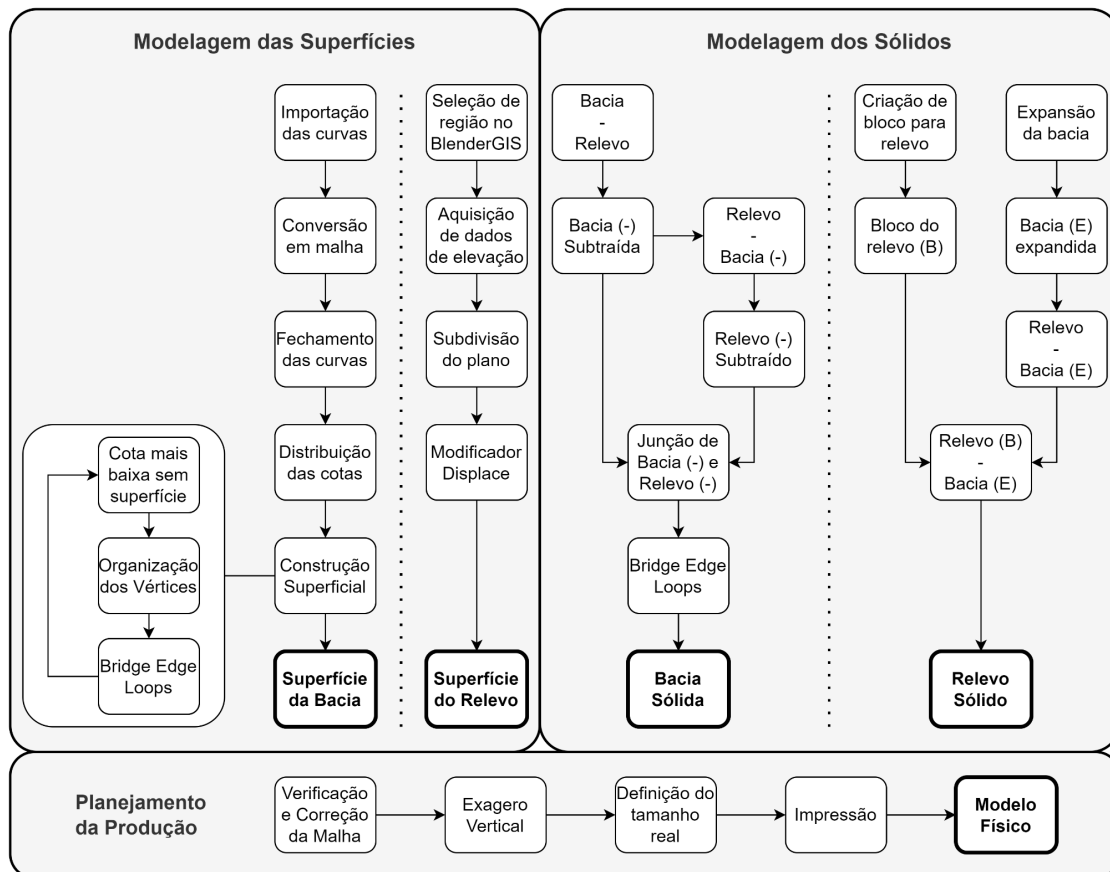


Figura 1 - Fluxograma indicando a metodologia adotada, com os processos de modelagem e produção dos modelos.

2.2 Interpolação dos Contornos

Algumas curvas não possuíam um contorno fechado devido a falta de informação da imagem. Dada esta limitação, os contornos foram fechados de duas formas. A primeira considerou dois vértices que estavam próximos mas cujas arestas definidas por eles demonstravam visualmente, uma tendência a se encontrarem. Nos casos onde os contornos não demonstravam um caminho que pudesse conectá-los, foram criados caminhos interpolados, onde o início e fim do novo traçado foram conectados às curvas desconexas de forma que eles ficassem tangentes às curvas.

2.3 Criação da Superfície da Bacia

Todas as curvas quando importadas ao Blender estavam situadas na mesma altura. Assim, o objeto que continha todas elas foi fracionado utilizando a ferramenta *Separate By Loose Parts*, para que cada contorno fosse um objeto, e assim, eles foram transladados para suas cotas como definido na imagem de contornos. Para criar a superfície, partiu-se da cota mais baixa, onde o seu contorno foi fechado com uma superfície plana. Este método foi repetido para cada cota de menor elevação que estava

isolada dentro de outra cota. A fim de criar as superfícies que ligam as cotas, foi utilizada a abordagem *bottom-up*, partindo da cota inferior para a superior. Cada objeto que já possuía uma superfície foi mesclado com o contorno superior e criou-se uma nova superfície entre as linhas de contorno utilizando duas técnicas que se baseiam na função *bridge edge loops*.

A primeira técnica utilizou a ferramenta de maneira automática e determinada pelo algoritmo. Então, selecionados os segmentos nos quais queria-se criar superfícies, a ferramenta foi executada com os parâmetros padrão. Para a segunda, antes de executar o *Bridge Edge Loops*, foi necessário reorganizar os segmentos de forma que o par de contornos trabalhado tivesse o mesmo número de vértices, e ajustar a densidade deles em regiões de perfil côncavo-convexo, como visto na figura 2.

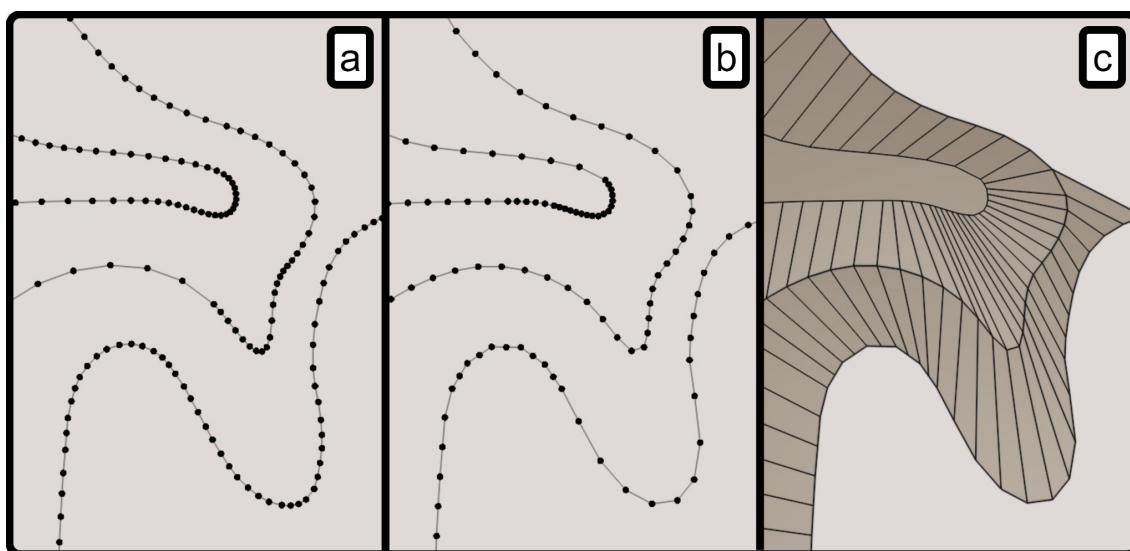


Figura 2 - Exemplo de construção de superfície utilizando a segunda técnica. Em (a), apresentam-se os vértices da curva convertida em malha. Em (b), os vértices foram reorganizados. Em (c), a superfície foi criada com a ferramenta *Bridge Edge Loops*.

2.4 Criação dos Sólidos

Para eliminar sobreposições entre as superfícies do relevo e da bacia, uma série de etapas foi realizada para preparar o sólido. Primeiramente, para a bacia hidrográfica, uma cópia da superfície do relevo foi feita e a direção das normais foi invertida. Um modificador de operação booleana de subtração foi adicionado de modo que removesse toda malha da bacia que estivesse acima do relevo, devido à direção das normais.

Para o relevo, foi necessário isolar apenas a região da bacia. Para isso foram selecionados todos os vértices da superfície da bacia, já sem as regiões de interseção do relevo, e com ajuda da ferramenta *Select Boundary Loop*, restaram-se selecionados os vértices que contornam as superfícies do objeto trabalhado. Com a nova seleção, eles foram copiados e separados, criando-se outro objeto. Nele, foram selecionados todos os vértices e uma ação de extrusão foi realizada no eixo vertical, nos dois sentidos de modo

que ultrapassassem a altura mínima e máxima do relevo. Além disso, foi verificado que as normais apontassem para fora, e um modificador de operação booleana de subtração foi feito, retirando do relevo, a superfície circundante da bacia recém-criada. Com isso, foram obtidas duas superfícies alinhadas e, para torná-las em um sólido, as duas tiveram seus modificadores aplicados e os objetos mesclados em um único. Com ele, as duas superfícies foram conectadas utilizando as mesmas técnicas apresentadas na no processo de suas criações e, conseqüentemente, criaram contornos alinhados verticalmente. Além disso, a malha foi verificada de maneira geral e corrigida de modo a criar um sólido fechado, além de excluir regiões não conectadas à peça principal.

Para construir a base onde o sólido da bacia hidrográfica foi encaixado, uma cópia do relevo foi feita e seus vértices mais externos foram selecionados com a ferramenta *Select Boundary Loops*. Com o contorno do relevo selecionado, foi feita uma extrusão na direção vertical no sentido da cota mais baixa, e 10 metros abaixo dela. O novo conjunto de vértices formando o contorno da peça foi ligado por uma face, tornando o objeto, um sólido fechado. Criou-se uma cópia da superfície da bacia e nela, todas as faces foram selecionadas e aplicada a ferramenta *Shrink/Fatten*, para introduzir uma tolerância no encaixe da bacia. Depois, foi aplicado um modificador de operação booleana de subtração ao sólido do relevo, retirando dele, a região da bacia. Por motivos estéticos, foi criado um sólido de corte com bordas arredondadas para adicionar esta característica à base e limitar a região do sólido do relevo com base no tamanho da bacia. A base foi finalizada aplicando os modificadores booleanos e verificando e corrigindo a malha, obtendo dois sólidos complementares como na figura 3.

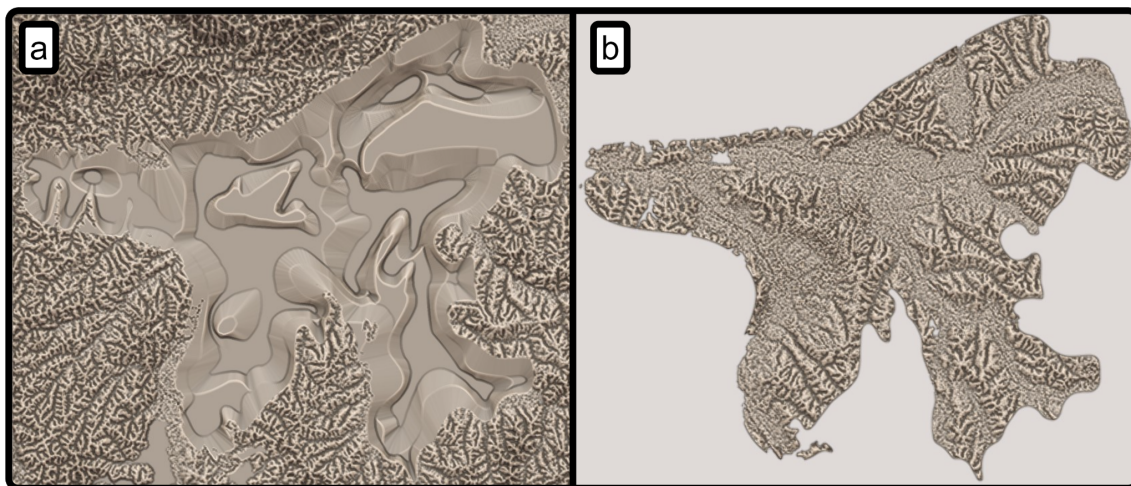


Figura 3 - Sólidos complementares. (a) representa o relevo sem a bacia, e (b), a bacia com o relevo delimitado por ela.

A fim de tornar os detalhes do relevo e da bacia mais evidentes, foi feito um exagero vertical, aplicando uma escala de 7 vezes nos dois sólidos, levando em conta o mesmo ponto de referência.

2.4 Planejamento da Produção

Para a produção da peça por manufatura aditiva, foi selecionada a técnica de SLS (Selective Laser Sintering), utilizando a máquina Sinterstation HiQ, com material poliamida-12. A base foi transformada em escala de modo que a maior extensão tivesse 150 mm, e a mesma razão de proporção foi aplicada aos outros eixos e ao sólido da bacia hidrográfica. Além disso, foi modelado um sólido para ser subtraído da base, de forma booleana, para minimizar a quantidade de material na produção. Finalmente, a base e a bacia foram orientadas a 30 graus em relação aos dois eixos horizontais, e produzidas com potência do laser a 12 W e altura de camada de 0,1 mm.

3. Resultados e Discussões

Para que a elevação do relevo fosse visível, a qualidade da deformação depende de uma alta densidade de vértices no plano. Assim, foi escolhido realizar 9 níveis de subdivisão, de forma que não houvesse um número muito grande de vértices, mas que ainda tivesse uma boa definição do relevo. Inicialmente o trabalho fora realizado com 12 subdivisões, mas as operações levaram muito tempo para serem processadas, ou por muitas vezes travaram o computador ou o Blender.

Ao realizar o georreferenciamento foi notado que o posicionamento das curvas dos rios em cima do relevo não foi exato, pois as curvas são construídas com dados coletados manualmente, e o mapa obtido pelo BlenderGIS tem erros de projeção. Além disso, a falta de exatidão dos dados junto da interpolação para fechar contornos, criou regiões na superfície da bacia hidrográfica que se sobrepunham e passavam em altura, do relevo. Foi por este motivo que a bacia foi cortada com o relevo, para preservar os dados SRTM, como visto na figura 4.

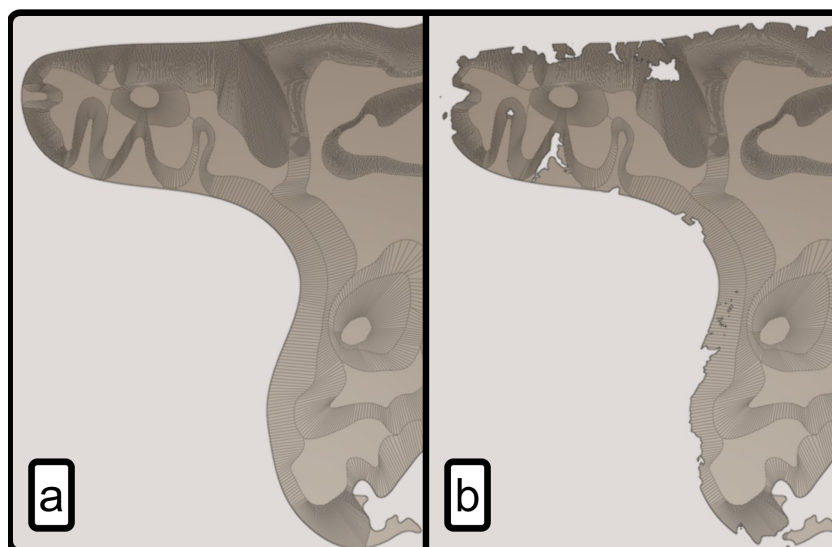


Figura 4 - Superfície da bacia original (a), e aplicada operação booleana de subtração (b).

A título de comparação, as duas técnicas de criação de superfícies foram utilizadas, uma em cada metade da bacia hidrográfica. Na metade mais ao norte foi utilizada a primeira, gerando superfícies compostas de faces triangulares, o que acarretou em artefatos visuais que se concretizaram na impressão do modelo. Estes artefatos ocorreram quando vários triângulos compartilharam o mesmo vértice, principalmente quando havia uma grande discrepância entre a quantidade de vértices dos dois contornos. Também foram verificados artefatos quando, em determinadas regiões, as curvas apresentaram perfis côncavos ou convexos em relação ao contorno no qual seria ligado. Assim, com a segunda técnica, ajustou-se a densidade de vértices, deixando mais densas as regiões convexas e menos densas as côncavas. Assim, foi possível mitigar estes problemas e gerar contornos mais suaves, tanto na visualização tridimensional no Blender, quanto na impressão do modelo. A aplicação do exagero vertical tornou mais visíveis os artefatos visuais. A, também mostrou artefatos em regiões em que a segunda técnica de criação de superfícies foi aplicada. Ao analisar a malha, foi possível identificar que nas regiões onde isso ocorreu, foram também áreas em que a operação booleana atuou, modificando a malha a ponto de gerar os artefatos, que foram amplificados pelo exagero vertical.

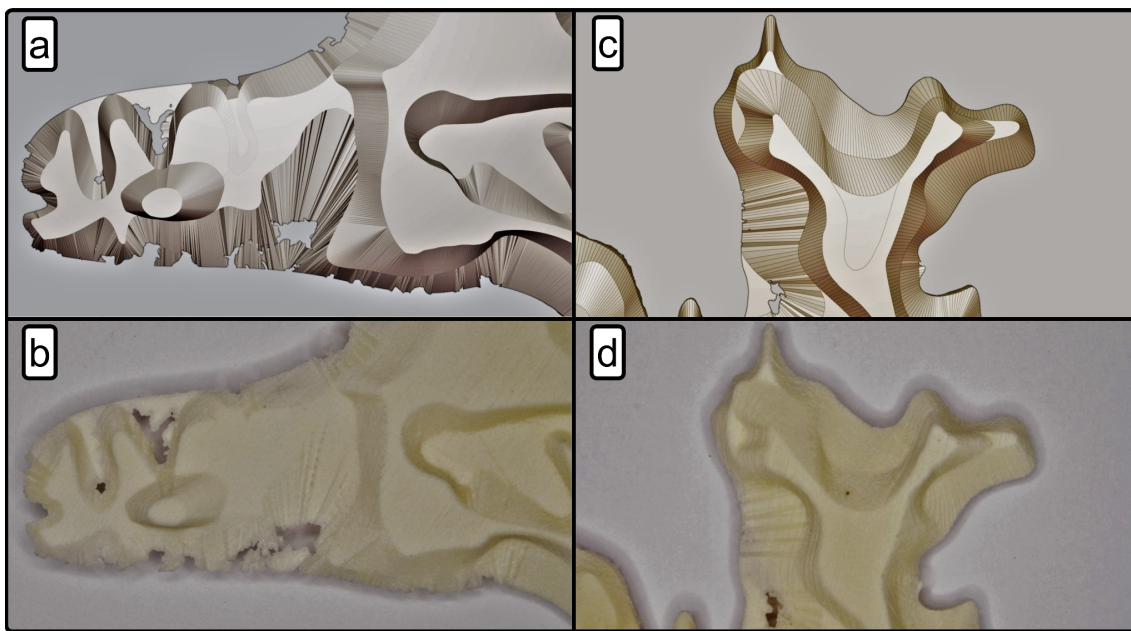


Figura 5 - Comparação entre o modelo virtual (a, c) e real (b, d). As figuras a e b mostram o resultado da modelagem da superfície realizada pela técnica 1. As figuras c e d mostram o resultado pela técnica 2.

Ao criar o sólido da bacia hidrográfica, a operação booleana alterou a malha de diferentes maneiras. Primeiramente, foram criadas várias porções desconectadas do sólido principal, que foram excluídas na maior parte por serem muito pequenas em relação ao todo. Quanto às regiões em que a exclusão geraria uma área plana grande no sólido do relevo, estas foram conectadas novamente, criando uma malha nas regiões mais próximas e tornando-a mais grossa para que não ficasse muito frágil, ou nem fosse impressa dependendo da escala. Outras alterações incluíram, porções onde a malha não

estava fechada, degradação da malha preparada com a segunda técnica de criação de superfície (como percebido nas figuras 5c e 5d), e o aparecimento de regiões onde a espessura do sólido era quase nula.

A produção dos modelos foi bem sucedida e com detalhamento suficiente para visualizar as regiões com menor variação de amplitude no relevo. Para o modelo da bacia, a operação booleana gerou áreas pequenas que aparentaram certa fragilidade, mas que ainda sim foram reproduzidas e mantidas conectadas. A inserção de uma tolerância para o encaixe das peças foi essencial, e o resultado foi melhor identificado na metade da bacia em que foi utilizada a segunda técnica para a construção da superfície. Na outra metade, os artefatos gerados pelos triângulos e piorados com o exagero vertical, impediram o encaixe preciso, mas ainda permitindo que ele fosse feito.



Figura 6 - Resultado final do modelo produzido por MA em Poliamida-12.

4. Conclusão

O conjunto montado com dimensão total de 150x125x27 mm, com o exagero vertical de 7 vezes evidenciou até os detalhes mais finos do relevo, mostrando que a técnica permitiu reproduzir de maneira tridimensional e em escala, um modelo do relevo e bacia hidrográfica de São Paulo. Assim, demonstrou-se que com o auxílio de ferramentas open-source, como os programas citados, e a manufatura aditiva, foi possível criar modelos físicos do relevo e da curva de nível. A metodologia adotada criou superfícies interpoladas linearmente entre dois contornos, o que gerou um contorno com efeito degrau. Como forma de melhoria, seria possível interpolar os contornos no Inkscape ou trabalhar com os parâmetros da ferramenta *Bridge Edge Loops* no Blender.

5. Agradecimentos

Agradeço ao orientador Marcelo F. Oliveira pelos ensinamentos e treinamentos em manufatura aditiva, principalmente na conquista dos melhores resultados na produção de peças. À co-orientadora Laureana S. B. Fontolan, sou grato pela transmissão de conhecimento sobre as ferramentas de código aberto, pela construção de experiência em MA, e pela melhoria contínua de processos. Expando meu agradecimento para todos os integrantes do Laboratório Aberto de Impressão 3D (LApri) e da Divisão de Tecnologias para Produção e Saúde (DITPS) pela troca de conhecimentos multidisciplinares, e ao professor Celso D. R. Carneiro por fornecer materiais e conhecimento, essenciais para este trabalho. Por fim, agradeço à comissão PIBIC e ao CNPQ pela oportunidade de participar do programa de iniciação científica.

6. Referências

- [1] GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B. (2015) Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer
- [2] COLORADO, H.A., MENDOZA, D.E. & VALENCIA, F.L. A Combined Strategy of Additive Manufacturing to Support Multidisciplinary Education in Arts, Biology, and Engineering. J Sci Educ Technol 30, 58–73 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09873-1>
- [3] THOMPSON, M. K., et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Annals, 65(2), 737–760. doi:10.1016/j.cirp.2016.05.004
- [4] BLENDER FOUNDATION. Blender. Disponível em: <<https://www.blender.org>>. Acesso em: 3 Agosto 2022.
- [5] DOMLYSZ. BlenderGIS. Disponível em: <<https://github.com/domlysz/BlenderGIS>>. Acesso em: 9 Agosto 2022.
- [6] NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. OpenTopography. Disponível em: <<https://www.opentopography.org>>. Acesso em: 9 Agosto 2022.
- [7] HASIUK, F., & HARDING, C. (2016). Touchable topography: 3D printing elevation data and structural models to overcome the issue of scale. Geology Today, 32(1), 16–20. doi:10.1111/gto.12125
- [8] HASUI, Y. & CARNEIRO, C.D.R. - 1980 - Origem e evolução da bacia sedimentar de São Paulo. In: Mesa Redonda: Aspectos Geológicos E Geotécnicos Da Bacia Sedimentar De São Paulo, São Paulo, 1980, p. 5-14. (Publicação Especial SBG)
- [9] CARNEIRO, C. D. R., et al, Three-dimensional physical models of sedimentary basins as a resource for teaching-learning of geology. Terrae Didatica, Campinas, SP, v. 14, n. 4, p. 379–384, 2018. DOI: 10.20396/td.v14i4.8654098