



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LAURA COMASSIO CHUEIRI

Metodologias automatizadas para geração de modelos geométricos a partir de
nuvem de pontos: Estudo de caso

Uberlândia
Setembro/2025

LAURA COMASSIO CHUEIRI

Metodologias automatizadas para geração de modelos geométricos a partir de
nuvem de pontos: Estudo de caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel.

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientadora: Maria Cristina Vidigal de Lima

Uberlândia

Setembro/2025

LAURA COMASSIO CHUEIRI

Metodologias automatizadas para geração de modelos geométricos a partir de
nuvem de pontos: Estudo de caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel.

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientadora: Maria Cristina Vidigal de Lima

Uberlândia, 25 de setembro de 2025.

Banca Examinadora:

Professora Doutora Maria Cristina Vidigal de Lima
Faculdade de Engenharia Civil - UFU

Professor Doutor Jean Rodrigo Garcia
Faculdade de Engenharia Civil - UFU

Professora Doutora Vanessa Cristina de Castilho
Faculdade de Engenharia Civil - UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo incentivo e motivação nesta caminhada acadêmica, em especial à minha mãe Vanda, meus irmãos Mariana e Gustavo e ao meu pai Michel.

Agradeço imensamente à minha orientadora, Professora Macris, por me guiar durante a minha formação, e ao grupo de estudos GRVA, que me acolheu e tornou esta pesquisa possível.

Agradeço também, aos colegas de curso e de vida por todo apoio emocional ao longo dos anos.

RESUMO

Este trabalho aborda o desafio imposto pela carência de documentação de projeto, como plantas originais e desenhos "*as-built*", para barragens antigas como a Usina Hidrelétrica de Mascarenhas de Moraes (1957), situação que compromete a gestão de segurança e manutenção exigida pela legislação vigente. Reconhece-se a tecnologia *Scan-to-BIM* como uma solução para a engenharia reversa dessas estruturas, porém os métodos de modelagem manual são reconhecidamente laboriosos e as metodologias de automação presentes na literatura não abrangem estruturas geométricas de barragens. Propôs-se analisar metodologias de automação *Scan-to-BIM* e, a partir dessa análise, desenvolver e apresentar um fluxo de trabalho híbrido e otimizado para a reconstrução estritamente geométrica da barragem, buscando maior eficiência e precisão em comparação com abordagens manuais. Adota-se uma estratégia híbrida que correlaciona duas metodologias distintas a geometrias específicas: para o arco, de geometria contínua e extrudável, adapta-se a metodologia *Scan-to-BIM-to-Sim*, baseada na extração de seções transversais; para o vertedouro, de geometria segmentada e análoga a uma edificação, aplica-se a metodologia *Cloud2BIM*, focada na detecção de elementos (lajes, paredes, aberturas) por meio da análise de densidade de pontos. O principal resultado confirma que a geometria intrínseca do componente estrutural é o fator preponderante na seleção da técnica de automação mais adequada. A aplicação teórica da abordagem híbrida resultou na proposição de um fluxo de trabalho, o qual demonstra maior eficiência que a aplicação de um método único para a estrutura completa, ao direcionar a lógica de reconstrução mais apropriada para cada parte. Conclui-se que a abordagem híbrida constitui a estratégia mais eficiente e precisa para a reconstrução digital de barragens com geometrias complexas, servindo o fluxo de trabalho proposto como um guia metodológico que otimiza recursos, reduz a necessidade de intervenção manual e garante a geração de um modelo geométrico de alta fidelidade, fundamental para futuras análises de segurança, operação e manutenção.

Palavras-chave: *Scan-to-BIM*; automação na construção; Modelagem paramétrica; Usina hidrelétrica.

ABSTRACT

This work addresses the challenge posed by the lack of project documentation, such as original plans and "as-built" drawings, for old dams like the Mascarenhas de Moraes Hydroelectric Power Plant (1957), a situation that compromises the safety and maintenance management required by current legislation. Scan-to-BIM technology is recognized as a solution for the reverse engineering of these structures, however, manual modeling methods are notoriously laborious and the automation methodologies present in the literature do not cover the geometric structures of dams. It was proposed to analyze Scan-to-BIM automation methodologies and, from this analysis, to develop and present a hybrid and optimized workflow for the strictly geometric reconstruction of the dam, seeking greater efficiency and precision in comparison with manual approaches. A hybrid strategy is adopted that correlates two distinct methodologies to specific geometries: for the arch, with a continuous and extrudable geometry, the Scan-to-BIM-to-Sim methodology is adapted, based on the extraction of cross-sections; for the spillway, with a segmented geometry analogous to a building, the Cloud2BIM methodology is applied, focused on the detection of elements (slabs, walls, openings) through point density analysis. The main result confirms that the intrinsic geometry of the structural component is the overriding factor in the selection of the most appropriate automation technique. The theoretical application of the hybrid approach resulted in the proposal of a cohesive framework, which demonstrates greater efficiency than the application of a single method for the complete structure, by directing the most appropriate reconstruction logic for each part. It is concluded that the hybrid approach constitutes the most efficient and precise strategy for the digital reconstruction of dams with complex geometries, with the proposed workflow serving as a methodological guide that optimizes resources, reduces the need for manual intervention, and ensures the generation of a high-fidelity geometric model, fundamental for future safety, operation, and maintenance analyses.

Keywords: Scan-to-BIM; automation in construction; parametric modeling; hydroelectric power plant.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1.	Metodologia <i>Scan-To-BIM-To-Sim</i>	4
2.2.	Metodologia <i>Cloud2BIM</i>	9
3.	METODOLOGIA	18
3.1.	Abordagem para Modelagem da Usina Hidrelétrica Mascarenha de Moraes	18
3.2.	Aplicação do <i>Scan-to-BIM-to-Sim</i> em Geometrias Constantes	23
3.3.	Aplicação do <i>Cloud2BIM</i> para Geometrias Não Constantes	27
3.4.	Análise Comparativa e Justificativa da Abordagem Híbrida.....	32
4.	CONCLUSÃO	33
5.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	34
	REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

Após ocorrências no Brasil de acidentes de rompimento das barragens relacionados a projetos deficientes, operação inadequada e falta de fiscalização, surgiram projetos de lei para reforçar a efetividade da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (ELETROBRÁS FURNAS, 2023). Dessa forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) exige a criação do Plano de Segurança de Barragem (PSB) compatível com o tamanho e a complexidade da barragem. Esse plano deve garantir as condições adequadas de segurança da barragem (ANEEL, 2022).

A fase de operação e manutenção representa o período mais longo no ciclo de vida de grandes estruturas. Durante essa etapa, a adoção de ações planejadas permite que haja utilização da estrutura pelo maior tempo possível e nas melhores condições, minimizando os custos de manutenção (Borkowski, 2025). De acordo com Silva (2020), o Building Information Modeling (BIM) permite a consolidação e o tratamento de dados, capacitando os responsáveis pela gestão das infraestruturas a organizar e controlar as informações do seu ciclo de vida. Isso inclui a integração da gestão de diferentes sistemas internos, como manutenção, segurança, eficiência energética e fluxos de pessoas, em um modelo único. Torna-se evidente, portanto, o alinhamento entre as capacidades da metodologia BIM e as necessidades impostas pelas políticas governamentais. O desenvolvimento de um modelo de informação permite estruturar e gerenciar os dados essenciais à formulação de documentos tais como o PSB, facilitando a verificação dos critérios de segurança e o atendimento às exigências regulatórias de forma sistemática e documentada.

A gestão e manutenção de estruturas históricas, como barragens antigas, apresentam desafios únicos, devido à frequente ausência de documentação técnica. Em muitos casos, projetos e desenhos originais são inexistentes ou se perderam ao longo do tempo, tornando as abordagens tradicionais de manutenção e análise insuficientes. Essa carência de informações estimula os responsáveis pela conservação a adotar um processo de engenharia reversa para capturar a geometria e as condições atuais da estrutura.

Wang (2019) descreve o *Scan-to-BIM* como uma metodologia essencial que consiste em converter dados de levantamento tridimensional, como nuvens de pontos obtidas por laser scanning ou fotogrametria, em modelos BIM "*as-built*" (como construído). O objetivo é criar representações digitais precisas e abrangentes de estruturas existentes, o que é crucial para diversas aplicações, incluindo a redução de custos, o planejamento de projetos, a gestão de ativos, renovações e a otimização da manutenção. Este processo é reconhecido por ser exigente, demorado e frequentemente manual, dadas as complexidades da interpretação de grandes volumes de dados ruidosos, incompletos e sem informação semântica. As etapas gerais incluem a geração da nuvem de pontos, segmentação, classificação e, finalmente, a reconstrução e modelagem dos elementos 3D geométricos e semânticos, com um forte foco na automação através de *Machine Learning* e linguagens de programação visual para superar esses desafios (ROMAN, 2023).

A digitalização de ambientes construídos através de processos *Scan-to-BIM* enfrenta desafios significativos quando aplicada a grandes estruturas de engenharia (MACHER; LANDES; GRUSSENMEYER, 2017). Para essas estruturas, como barragens, que apresentam geometrias massivas, superfícies amplas que podem ser curvas ou inclinadas, e elementos estruturais é exigida uma abordagem de modelagem distinta. A volumetria dos dados de nuvem de pontos para estas estruturas é grande, e as metodologias precisam ser robustas para lidar com imperfeições, ruído e oclusões inerentes aos levantamentos em campo (FANG *et al.*, 2025). De acordo com Macher, Landes e Grussenmeyer (2017, p. 1) a automação do processo *Scan-to-BIM* para essas infraestruturas é crucial para superar a ineficiência e a propensão a erros das abordagens manuais, que demandam tempo e recursos consideráveis.

O problema abordado por este trabalho é a proposta para execução de uma reconstrução geométrica da Usina Hidrelétrica de Mascarenhas de Moraes a partir de uma nuvem de pontos. A execução desse processo, no entanto, é dificultada por desafios práticos significativos, incluindo o grande volume de dados da nuvem, que sobrecarrega softwares de modelagem como o Revit, e a ineficiência inerente ao processo de modelagem manual, que é demorado e exige ajustes constantes. Considerando que a literatura oferece soluções de automação que não abrangem estruturas como barragens, este estudo investiga e combina diferentes técnicas para propor um fluxo de trabalho otimizado e viável para o caso em questão.

1.1.Objetivos

Nesse contexto, considerando os desafios da digitalização de grandes infraestruturas, o objetivo geral deste trabalho é apresentar uma análise de metodologias automatizadas para a geração de modelos geométricos a partir de nuvens de pontos. O foco da pesquisa recai sobre a etapa de reconstrução geométrica, utilizando metodologias *Scan-to-BIM*, em detrimento da agregação de informações semânticas ao modelo BIM, buscando propor uma solução eficiente para a modelagem "as-is" (como está).

Como objetivo específico, o trabalho foca no desenvolvimento de um fluxo de trabalho (*framework*) para a barragem da Usina Hidrelétrica Mascarenhas de Moraes (UHMMO), localizada no município de Ibiraci – MG, operada pela empresa Eletrobrás Furnas. Dessa forma, almeja-se estabelecer um método que garanta um modelo digital satisfatório da barragem, suficiente para subsidiar futuras atividades de operação e manutenção e servir como base para aplicações BIM que visem o cumprimento das exigências governamentais e das necessidades de gestão do ativo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma revisão da literatura focada em metodologias de automação para o processo *Scan-to-BIM*. Inicialmente, realiza-se uma análise global dos principais algoritmos e abordagens documentados em artigos científicos, a fim de estabelecer um panorama do estado da arte na reconstrução geométrica a partir de nuvens de pontos. Posteriormente, a análise afunila-se para uma revisão detalhada de dois trabalhos que propõem metodologias distintas,

as quais as técnicas foram consideradas particularmente relevantes para a modelagem dos desafios geométricos específicos de uma barragem, como a extensão da estrutura e a qualidade da nuvem de pontos.

Devido às características trabalhosas e subjetivas da modelagem manual, as pesquisas têm se concentrado cada vez mais no desenvolvimento de técnicas automatizadas. A modelagem automatizada utiliza algoritmos para extrair informações de parâmetros geométricas a partir dos dados da nuvem de pontos, visando gerar um modelo BIM completo como resultado. Este método diferencia-se da modelagem manual, um processo demorado que envolve tarefas como ajustar primitivas geométricas aos dados ou criar modelos sólidos a partir de seções transversais ajustadas manualmente. Portanto, a modelagem manual e a automatizada são as duas abordagens principais para construir modelos geométricos a partir de dados de nuvem de pontos (TANG *et al.*, 2010).

O algoritmo RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) é reconhecido como uma técnica fundamental na reconstrução de modelos 3D a partir de nuvens de pontos, sendo empregado por diversos autores como base para a execução de modelagens (BASSIER; MATTHEUWSEN; VERGAUWEN, 2019). Sua principal função é a identificação robusta de primitivas geométricas, como planos e linhas, em dados de nuvens de pontos ruidosos e com *outliers* (ZBIROVSKÝ; NEŽERKA 2025). Analogamente, para grandes estruturas como pontes, o RANSAC é uma técnica comum para determinar equações de planos ou arestas dentro das nuvens de pontos, o que é necessário para a reconstrução geométrica de componentes estruturais (FANG, 2025). De forma similar, Mahmoud *et al.* (2025) utilizam a técnica de forma iterativa para identificar segmentos de linha que representam paredes e outros elementos formadores de espaço. Outro exemplo, Goebels (2021) utiliza uma versão modificada do RANSAC para encontrar planos que sustentam pontos de superestruturas, como pilares e cabos, em pontes, e para detectar superfícies planas de tabuleiros.

No âmbito de metodologias mais complexas, Goebels (2021), em seu estudo, descreve um método para a reconstrução 3D automática de pontes, utilizando nuvens de pontos de varredura a laser aerotransportada e plantas cadastrais. Essa abordagem emprega uma árvore de eixo medial modificada para aproximar decks de pontes com polígonos planares e detecta superestruturas como pilones e cabos com projeção de pontos e processamento de imagens para extrusão de contornos em sólidos 3D. Outro exemplo notável é estrutura "*Scan-to-BIM-to-Sim*" proposta por Fang *et al.* (2025) para pontes. Esta abordagem é concebida para lidar com dados de nuvem de pontos defeituosos (com obstruções e falhas) e integra a reconstrução de modelos geométricos, a visualização BIM e a análise estrutural, utilizando scripts Python para automatizar a transformação e integração de dados entre as nuvens de pontos, modelos BIM e modelos de simulação (FEM) (FANG *et al.*, 2025).

Considerando que a geometria de uma barragem inclui trechos de seção transversal não constante, também foram analisados trabalhos focados em geometrias complexas. Tais metodologias, geralmente aplicadas a edifícios, concentram-se na identificação de múltiplos planos de parede e aberturas, sendo relevantes para a adaptação proposta neste estudo.

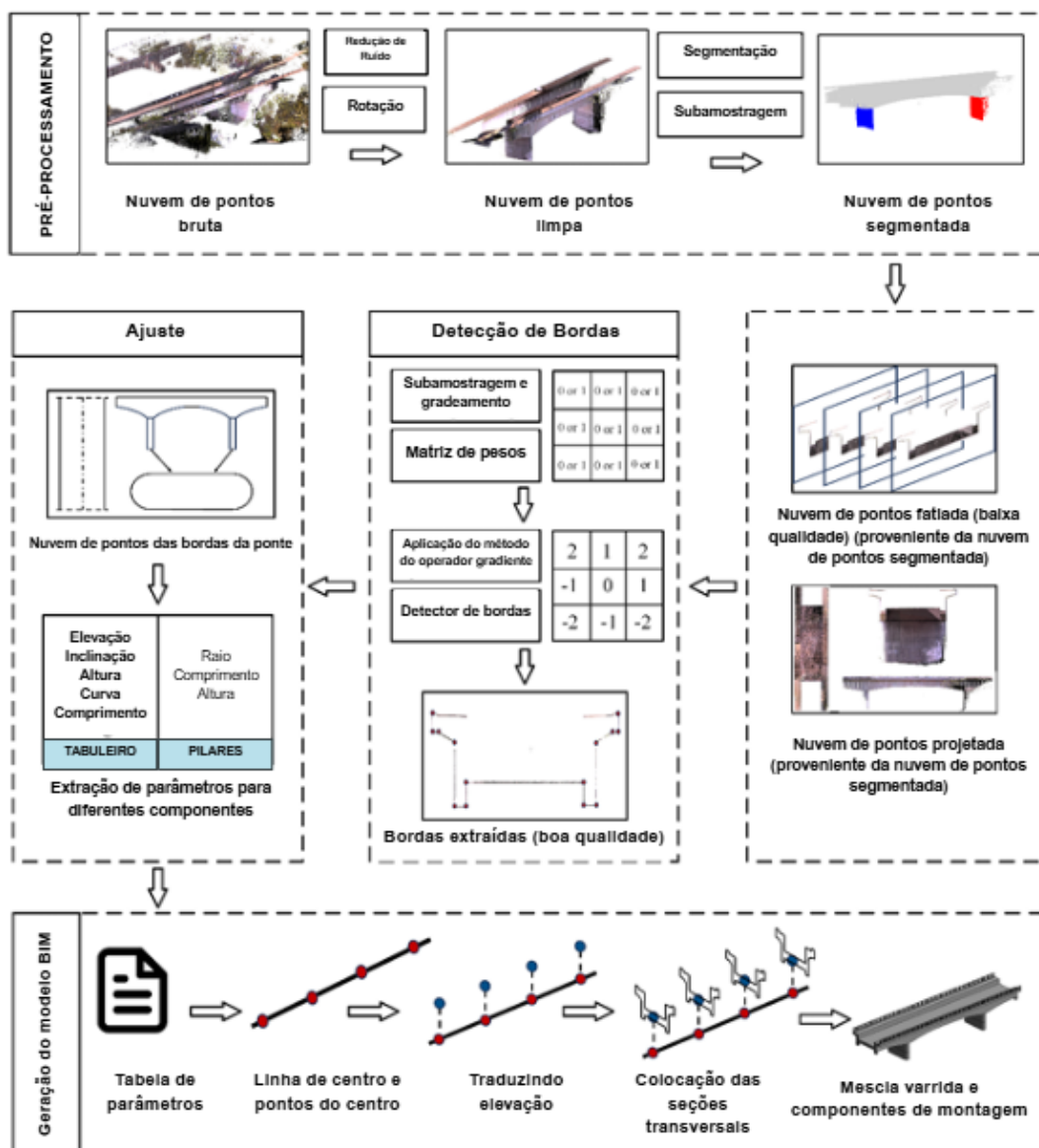
Nessa linha, o artigo de Zbirovský e Nežerka (2025) apresenta o *Cloud2BIM*, uma ferramenta de código aberto que automatiza a conversão de nuvens de pontos em modelos BIM no formato Industry Foundation Classes (IFC). A metodologia prioriza a captura da geometria dos elementos construtivos, empregando uma abordagem híbrida para a segmentação de paredes que acomoda diversas orientações e configurações. Outros trabalhos, como os de Bassier e Vergauwen (2020), focam na reconstrução não supervisionada de objetos de parede BIM, incluindo paredes retas, curvas e baseadas em polilinhas, e suas topologias em edifícios de múltiplos andares.

A partir da literatura analisada, observa-se que, embora existam diversas abordagens para a automação do processo *Scan-to-BIM*, há uma notável ausência de metodologias desenvolvidas especificamente para a reconstrução geométrica de barragens. Diante dessa lacuna, este trabalho propõe a adaptação e correlação de técnicas consolidadas para outras tipologias estruturais, como pontes e edifícios, em que as complexidades geométricas oferecem paralelos relevantes para os desafios encontrados na modelagem do objeto em estudo. As seções seguintes, portanto, apresentarão em detalhe as duas metodologias selecionadas, justificando a sua escolha para o estudo de caso.

2.1. Metodologia *Scan-To-BIM-To-Sim*

Conforme introduzido na análise panorâmica, o artigo “*Scan-to-BIM-to-Sim: Automated reconstruction of digital and simulation models from point clouds with applications on bridges*”, de Fang *et al.* (2025), foi publicado no volume 25 da revista *Results in Engineering*, no ano de 2025. Esse artigo propõe uma solução para duas limitações centrais das metodologias atuais: os altos custos e a baixa performance ao lidar com dados imperfeitos. A principal inovação da pesquisa é o desenvolvimento de um método de detecção de bordas, que aplica operadores de gradiente para extrair contornos precisos diretamente de nuvens de pontos de baixa qualidade. Essa técnica reduz a dependência de dados sem falhas e, consequentemente, de equipamentos de escaneamento de alto custo, que são barreiras significativas nos processos convencionais. Apesar de ser voltado para estruturas de pontes, será analisada a etapa de modelagem a partir da nuvem de pontos para futura correlação com a abordagem. O esquema resumido da metodologia de Fang *et al.* (2025) é apresentado na Figura 1:

Figura 1 - Estrutura resumo da metodologia para a reconstrução geométrica.



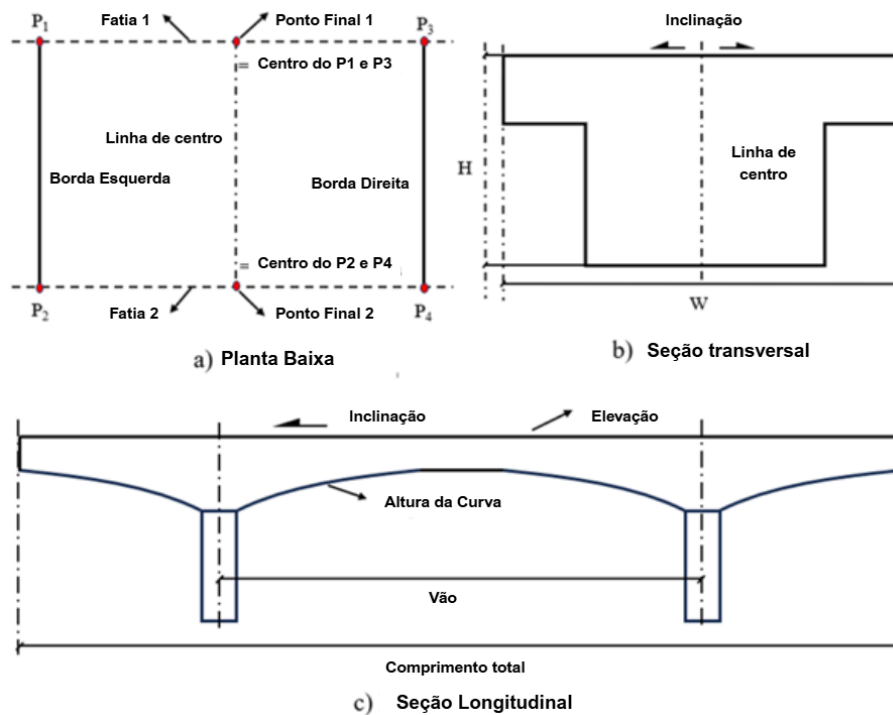
Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

Introduzindo o método, Fang *et al.* (2025) afirmam que os dados brutos obtidos do escâner a laser idealmente deveriam ser uniformes. Entretanto, as nuvens de pontos contêm vários defeitos como pontos incompletos, redundância e falta de homogeneidade, muitas vezes causados por obstruções no local, devido à vegetação. Portanto, é necessário pré-processar esses dados. Para automatização do processo de limpeza, a nuvem de pontos é inserida no software CloudCompare. No software, aplica-se a ferramenta SOR (*Statistical Outlier Removal*), que remove os pontos aleatórios e isolados que não pertencem a nenhuma superfície da ponte. Em seguida, é utilizada a ferramenta CSF (*Cloth Simulation Filter*) para remover os pontos do solo, separando a estrutura da ponte do terreno abaixo dela. Uma vez limpa, a nuvem de pontos é segmentada em seus componentes principais (tabuleiro, pilares, etc.).

A partir disso, a nuvem de pontos 3D é fatiada em três vistas 2D por meio de projeções, a fim de simplificar a análise. A planta baixa permite traçar o eixo central da ponte. A seção

longitudinal determina a elevação e a inclinação da ponte ao longo do seu comprimento. Já a seção transversal é usada para medir as dimensões dos componentes, como a largura do tabuleiro. A Figura 2 ilustra as projeções resultantes.

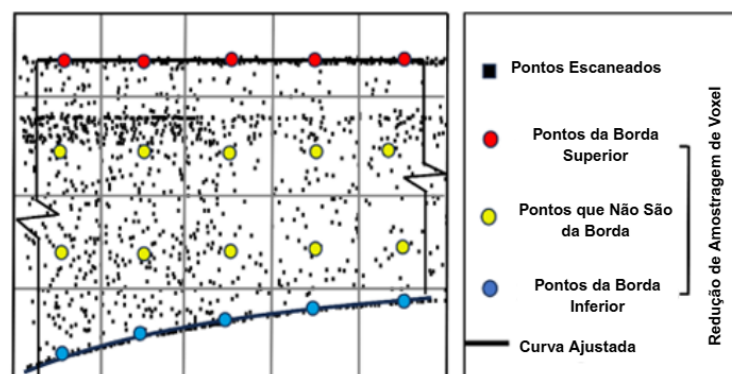
Figura 2 - Vistas 2D da ponte.



Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

Devido à desordem da nuvem de pontos na seção transversal, é necessário segmentar os pontos de contorno dos pontos internos da projeção. Para isso, aplica-se uma grade sobre a projeção 2D da nuvem de pontos. Todos os pontos que caem dentro de uma mesma célula da grade são substituídos por um único ponto: o centróide. Essa técnica reduz a quantidade de dados a serem processados, mas mantém a forma geométrica da estrutura, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3- Determinação do contorno da seção longitudinal

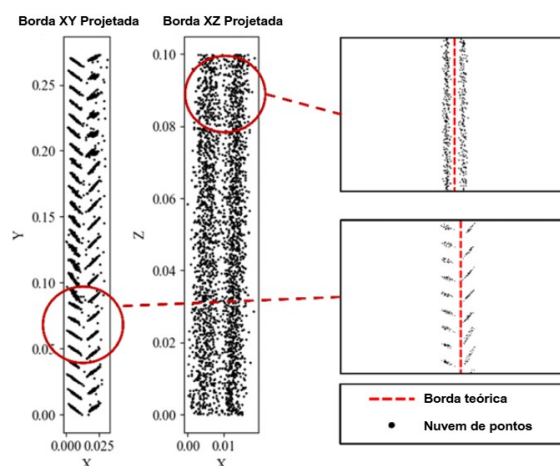


Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

A partir disso, os pontos que representam as bordas superior e inferior da vista longitudinal correspondem aos centróides localizados na primeira e na última linha da grade. Com as bordas extraídas, o passo final é "ajustar" (*fit*) linhas retas ou curvas a esses pontos, por meio de regressão linear. Na vista longitudinal, ajusta-se uma linha reta na borda superior para encontrar a inclinação e uma curva quadrática na borda inferior para definir a variação da altura da viga.

Quanto a extração dos parâmetros da seção transversal, reconhece-se que as nuvens de pontos de baixa qualidade resultam em bordas "espessas" ou em camadas, o que torna a extração de medidas diretas imprecisa (Figura 4).

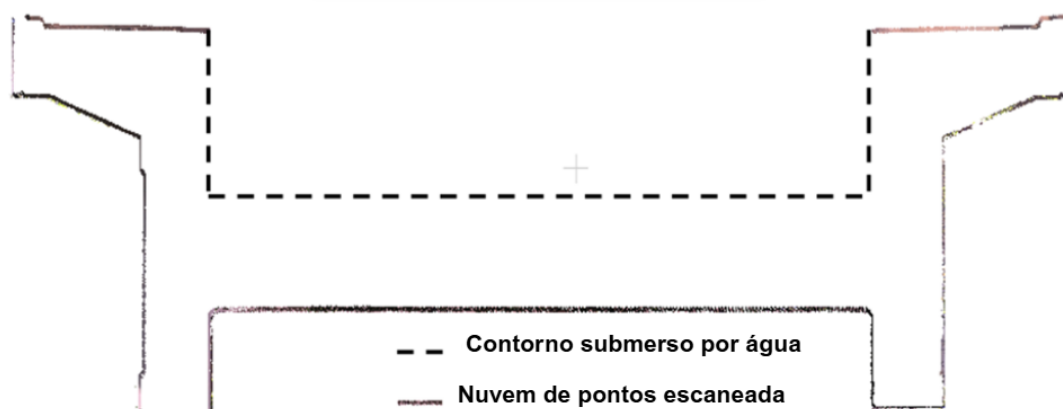
Figura 4 - Nuvens de pontos de baixa qualidade



Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

Na Figura 5 é mostrada a fatia da nuvem de pontos da seção transversal.

Figura 5 - Seção transversal da nuvem de pontos

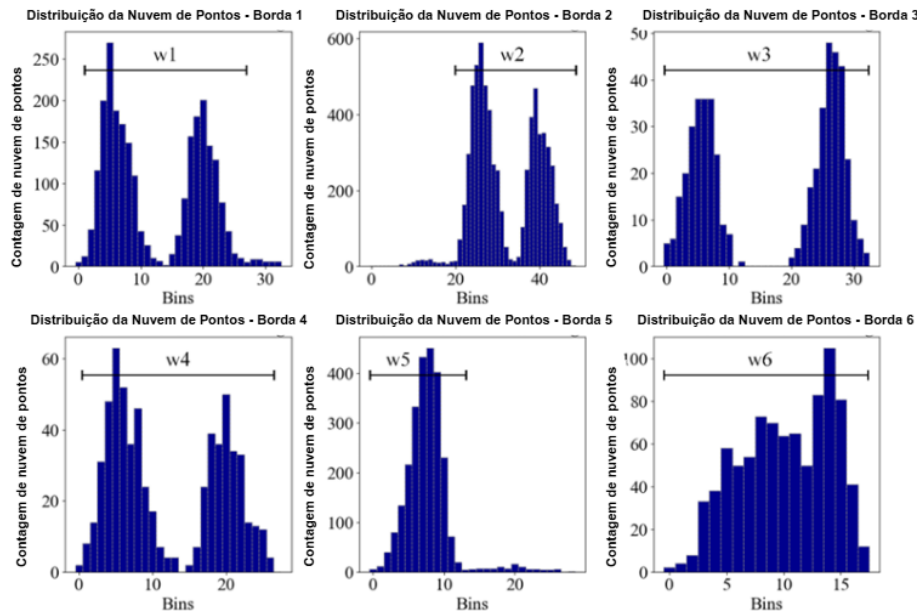


Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

A fim de extrair os parâmetros de bordas com nuvens de pontos de baixa qualidade na seção transversal, é utilizado um método baseado em histograma, em que é sobreposta uma grade sobre a projeção. Inicialmente é determinada a largura ideal "w" de cada célula da grade. Para isso, a nuvem de pontos da seção é dividida em "fatias" verticais (*bins*) de 1mm. Em seguida, o número de pontos em cada fatia é contado e plotado em um histograma. Como as bordas

verticais são espessas, elas aparecem no histograma como dois picos de concentração de pontos. A distância entre esses picos é dada como a largura da borda espessa. O tamanho da célula da grade, “w”, é então definido como a metade da largura média de todas as bordas verticais, de acordo com Figura 6.

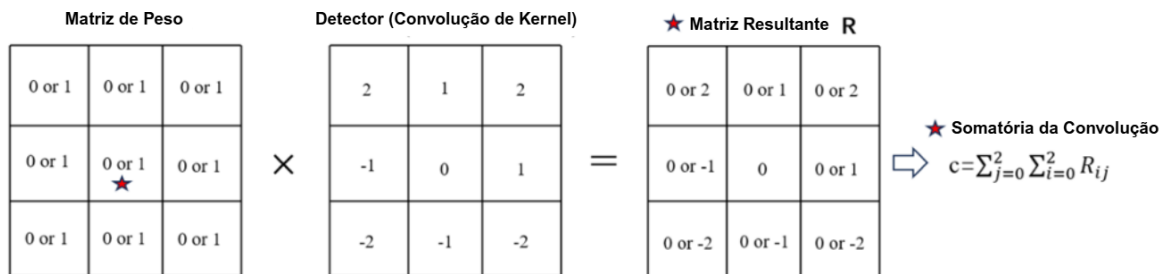
Figura 6 - Histograma de compartimentação da nuvem de pontos



Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

Com o tamanho da grade definida, um processo chamado convolução é usado para classificar cada célula. Para cada célula da grade de tamanho “w”, o sistema cria uma sub-grade de 3x3 ao seu redor. Para essa sub-grade, cria-se uma matriz de pesos na qual se atribui o valor 1 a cada célula vizinha que contém pontos e 0 àquelas que estão vazias. Essa matriz de pesos é multiplicada por uma matriz padrão, chamada *kernel* de convolução, para gerar uma soma de convolução para a célula central.

Figura 7 – Método de detecção de borda



Fonte: Adaptado de Fang *et al.* (2025)

A convolução sobrepõe as duas matrizes de dados e calcula a soma dos produtos de cada ponto de sobreposição, o resultado identifica diretamente o tipo de borda que a célula representa, conforme a Tabela 1. Valores divergentes dos mostrados são considerados ruído ou pontos internos.

Tabela 1 - Bordas conforme resultado

Soma	Borda
1	Esquerda
-1	Direita
5	Superior
-5	Inferior

Fonte: Autora (2025)

Para a extração da borda um simples algoritmo baseado em condicionais utiliza os resultados da convolução de cada sub-grade para identificar cada soma e extrair uma nova borda única e nítida. Após os contornos estarem definidos para a seção transversal, as funções primárias (como linhas retas) são ajustadas a cada segmento de borda extraído. Os pontos de interseção dessas linhas são calculados para determinar os "cantos" do perfil da seção. As distâncias horizontais e verticais entre esses pontos de canto são medidas para obter os parâmetros dimensionais da seção transversal da ponte.

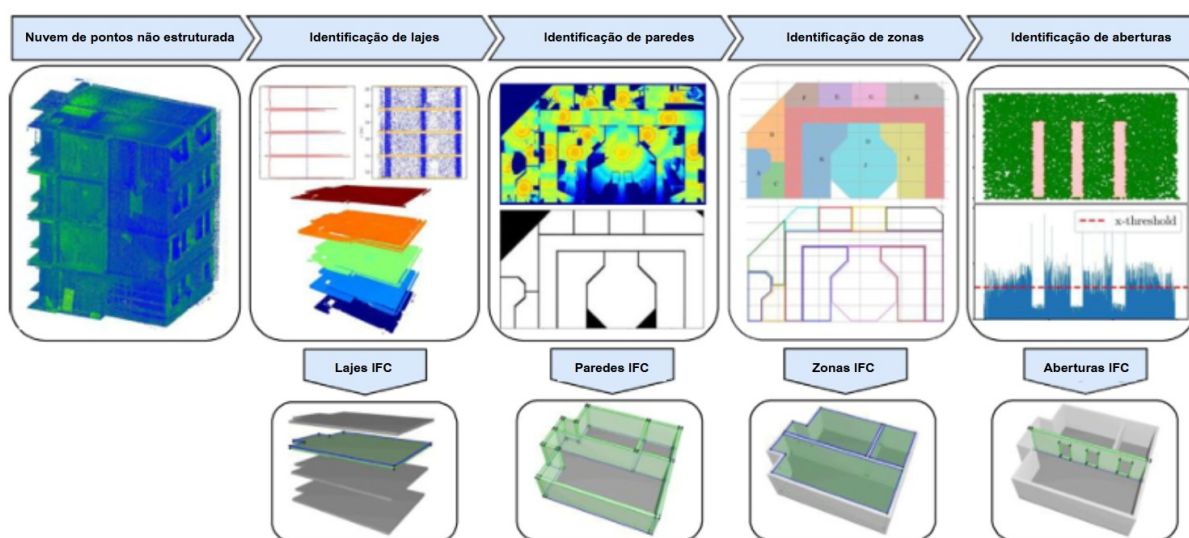
Uma vez definidos os parâmetros da ponte, a modelagem pode ser iniciada. Utiliza-se o software BIM Revit em conjunto com a ferramenta de programação visual Dynamo para a automação da modelagem. Primeiramente, desenha-se a linha de centro da ponte, que serve como caminho para a construção do modelo, por meio dos parâmetros de linha central extraídos no início do processo com a vista da planta baixa. Ao longo dessa linha, o *script* cria pontos em intervalos pré-definidos. A elevação (altura) de cada um desses pontos é ajustada de acordo com os parâmetros de elevação que foram extraídos da nuvem de pontos. Em cada um desses pontos, desenha-se uma seção transversal da ponte, criada a partir dos parâmetros detalhados (alturas, larguras, etc.) obtidos na análise anterior. O *script* no Dynamo utiliza a operação “*set element by parameters*” para ajustar as dimensões de cada seção transversal. Com todas as seções transversais 2D posicionadas e dimensionadas corretamente ao longo do eixo, o passo final é conectar uma seção à outra sequencialmente para gerar o modelo 3D sólido e contínuo da ponte. Esse processo é exemplificado na Figura 1.

2.2. Metodologia *Cloud2BIM*

O artigo “Open-source automatic pipeline for efficient conversion of large-scale point clouds to IFC format”, de Zbirovský e Nežerka (2025) foi publicado no volume 177 da revista *Automation in Construction*, no ano de 2025. No campo da digitalização da construção civil, a conversão de nuvens de pontos para modelos BIM (processo conhecido como *scan-to-BIM*) ainda é um processo predominantemente manual, caro e demorado. Os autores identificaram que as ferramentas existentes para automatizar essa tarefa enfrentavam desafios significativos, como a baixa eficiência computacional, a dificuldade em lidar com geometrias complexas (não ortogonais) e uma forte dependência de softwares comerciais e proprietários, o que limita o acesso e a inovação na área.

Diante desses obstáculos, o objetivo dos autores foi desenvolver o *Cloud2BIM*, um fluxo de trabalho totalmente automatizado, de código aberto e baseado em Python, que fosse eficiente e acessível. A ferramenta foi projetada para segmentar e classificar de forma inteligente os principais elementos estruturais de um edifício (como lajes, paredes e aberturas) diretamente da nuvem de pontos, além de definir zonas internas a partir das superfícies reais das paredes. Ao evitar técnicas computacionalmente pesadas e gerar um arquivo final no formato aberto IFC, o trabalho busca oferecer uma solução escalável e interoperável, capaz de processar grandes volumes de dados com velocidade e precisão. Embora também não seja orientada para barragens, a etapa de modelagem desta metodologia será analisada para futura correlação com o objeto de estudo. A Figura 8 ilustra a estrutura resumida da metodologia de Zbirovský e Nežerka (2025).

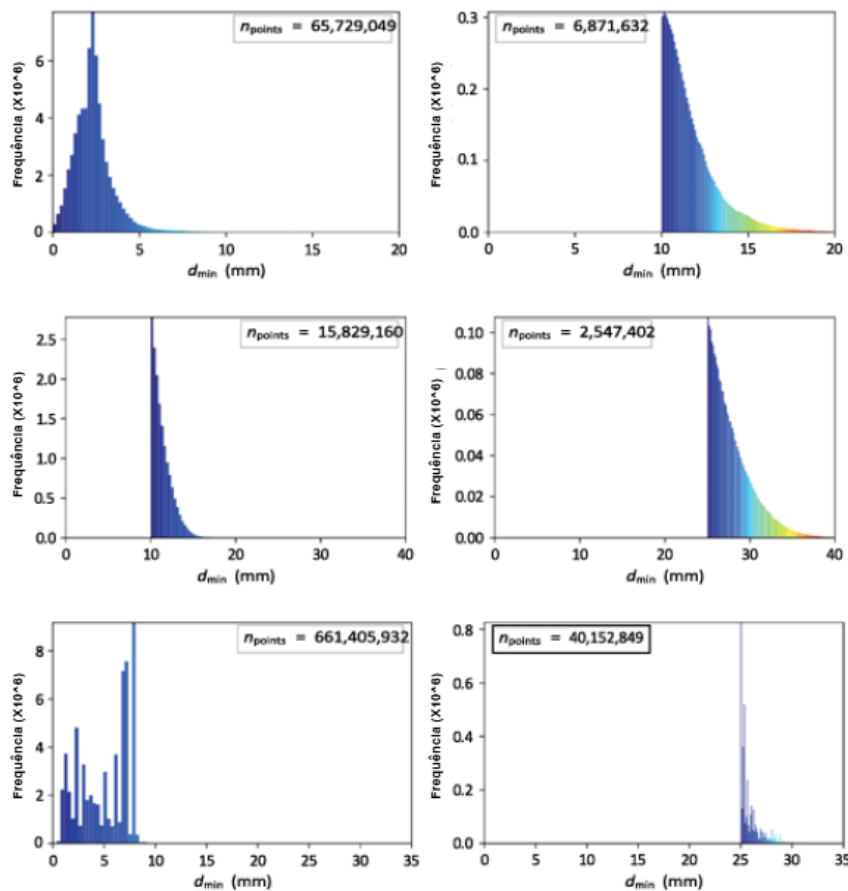
Figura 8 - Estrutura resumo da metodologia Cloud2BIM



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

De forma análoga a metodologia de Fang *et al.* (2025), realiza-se um pré-processamento da nuvem de pontos a fim de reduzir as demandas computacionais. Nessa etapa, os dados são diluídos com o software de código aberto CloudCompare. O programa seleciona pontos da nuvem original e garante que nenhum ponto na nuvem resultante esteja mais próximo de outro em uma distância (d_{\min}) especificada. À medida que a distância aumenta, menos pontos são retidos. Assim, reduz-se a quantidade de pontos (Figura 9).

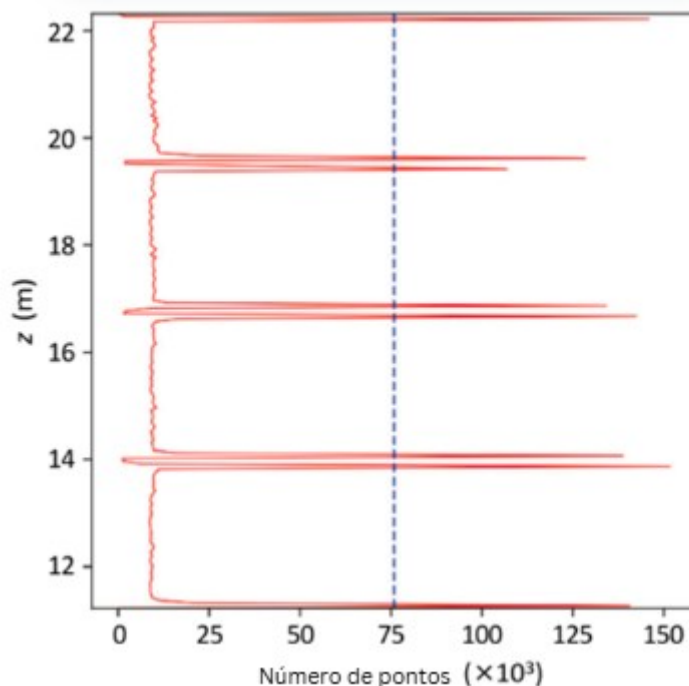
Figura 9 - Histograma de três conjuntos de nuvem de pontos das distâncias mínimas dos pontos vizinhos mais próximos antes (esquerda) e depois (direita) da diluição.



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

O processo da etapa de modelagem se inicia com a identificação de lajes. O método utiliza análise da densidade de pontos dentro de um histograma de altura para encontrar os planos horizontais na nuvem de pontos. No histograma é necessário identificar os candidatos a serem uma possível laje pela densidade de pontos. Para isso, uma faixa de altura que contém pelo menos 50% do número máximo de pontos encontrados em qualquer plano é identificada como uma candidata a superfície horizontal, conforme ilustrado na Figura 10.

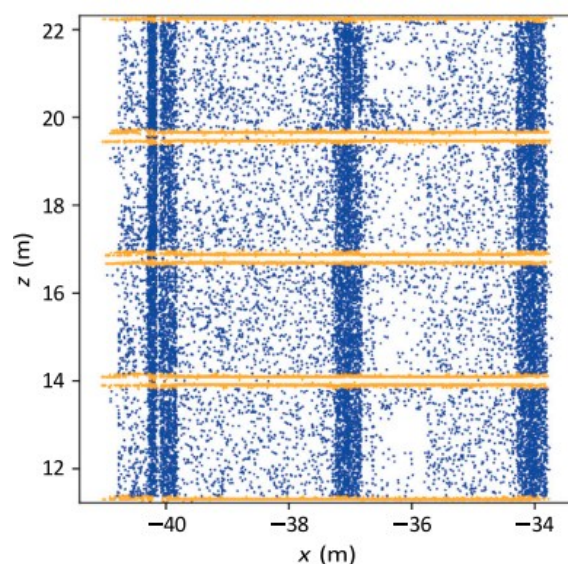
Figura 10 - Histograma de densidade de pontos mostrando as contagens de pontos por altura (coordenada z), com um limiar de 50% do máximo marcado por uma linha azul tracejada.



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

Após identificação a partir das densidades é possível analisar pela Figura 11 as possíveis lajes.

Figura 11 - A vista lateral da nuvem de pontos exibe a distribuição de pontos no plano x - z , identificando os candidatos a superfícies horizontais (em laranja) acima do limiar e os outros pontos (em azul) abaixo dele.

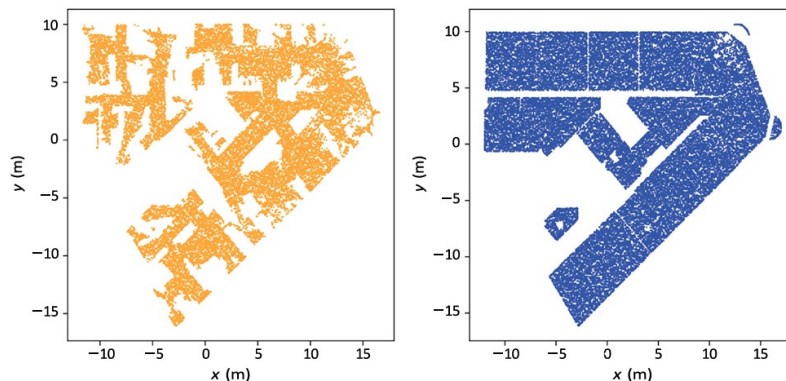


Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

A forma da laje é definida com base na quantidade de superfícies detectadas. Se for a primeira laje (térreo) ou se houver um número ímpar de superfícies, uma espessura manual é

necessária. Se um número par de superfícies for encontrado, elas são fundidas para criar uma planta baixa robusta, assumindo que a laje espelha o teto do andar inferior, de acordo com Figura 12.

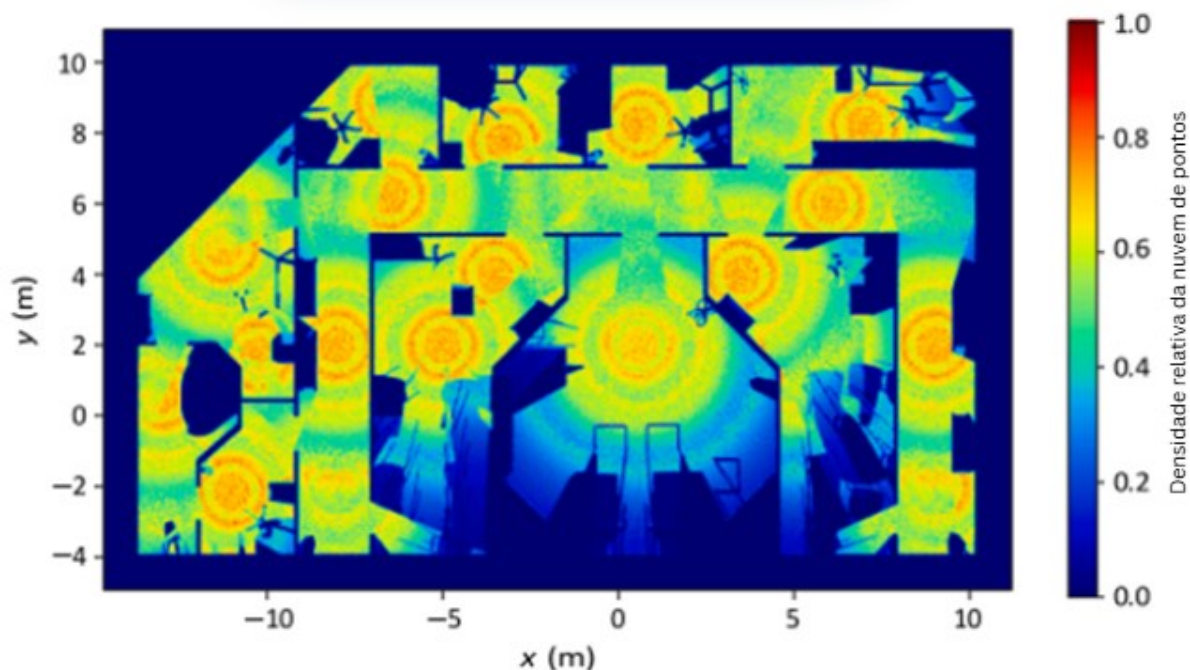
Figura 12 - Superfícies candidatas a serem fundidas representando o piso (esquerda) e o teto (direita).



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

A partir disso, os pontos 3D das superfícies identificadas são projetados em um plano 2D, descartando-se a coordenada Z. Utiliza-se então a função `create_hull_from_histogram` para gerar um histograma 2D a partir desses pontos, o qual funciona como um mapa de calor que destaca as áreas de alta densidade. Por ser parte de um fluxo de trabalho de código aberto em Python, a execução de funções como essa foi projetada para ser multiplataforma, podendo ocorrer em qualquer sistema computacional que suporte o interpretador Python 3.10.

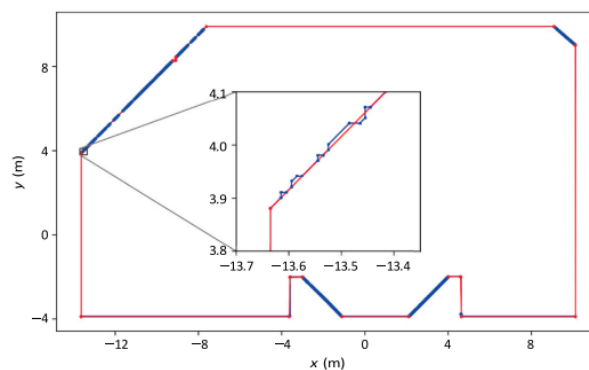
Figura 13 - Mapa de calor de áreas de alta densidade.



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

A partir do histograma, gera-se um contorno inicial, que os autores definem como uma máscara binária. Aplicam-se então operações morfológicas de dilatação e erosão (utilizando a biblioteca *OpenCV*) a essa máscara binária para suavizar irregularidades e refinar seus limites, mantendo a forma geral do objeto. Zbirovský e Nežerka (2025) utilizam os algoritmos de Suzuki e Abe (1985), implementado pela função *findContours()* do *OpenCV*. Por meio dessa técnica, o contorno mais proeminente da máscara é extraído para delinear a planta da laje. Adicionalmente, aplica-se o algoritmo de Douglas-Peucker (1973) ao contorno extraído para reduzir o número de pontos e suavizar sua forma, resultando em um polígono que representa a laje de forma eficiente e com seus pontos mais significativos, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Vista ampliada da borda da laje do teto, com a borda original indicada em azul e a borda suavizada, gerada usando o algoritmo Douglas-Peucker, em vermelho.



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

Identificadas as estruturas horizontais, inicia-se o processo de segmentação de pavimentos. Essa segmentação tem objetivo de facilitar a organização espacial do edifício. A função *split_pointcloud_to_storeys* é utilizada, recebendo duas funções de entradas principais:

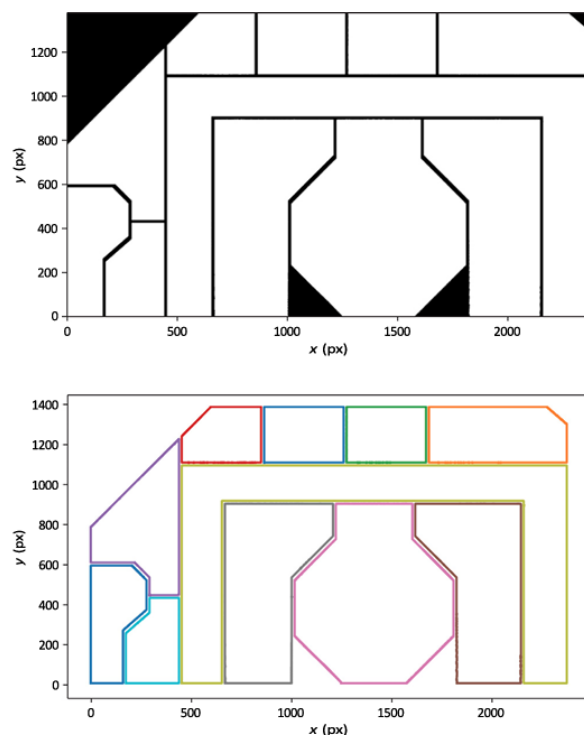
- *points_xyz*: as coordenadas 3D da nuvem de pontos completa.
- *slabs*: os dados das lajes já identificadas. Cada laje é representada por um dicionário que detalha seu polígono, coordenadas x e y, a coordenada z inferior e sua espessura.

A função processa cada laje individualmente e em sequência, extraindo os pontos que estão localizados entre a base de uma laje e o topo da laje que fica abaixo dela. Por padrão, o algoritmo mantém uma folga de 10 cm tanto do teto quanto do piso ao extrair os pontos de um pavimento. A saída do processo é uma lista de subconjuntos de nuvens de pontos, na qual cada subconjunto corresponde a um único e distinto pavimento do edifício.

A partir da segmentação de pavimentos, inicia-se a identificação de paredes. A função começa isolando os segmentos de parede ao analisar apenas uma seção horizontal de cada andar. Por padrão, essa seção corresponde a 90% a 100% da altura do piso para minimizar ruídos e objetos irrelevantes. Os pontos que estão dentro desses limites de altura são então convertidos para uma matriz 2D, contendo apenas as coordenadas x e y. Um histograma 2D é criado a partir dos pontos 2D, o qual evidencia as áreas com maior densidade de pontos. Esse histograma é convertido em uma imagem binária (uma máscara em preto e branco), que isola

as regiões de alta densidade, correspondentes às prováveis localizações das paredes. Utiliza-se a função *findContours* da biblioteca *OpenCV* para extrair os contornos da imagem binária, que representam os limites externos dos segmentos de parede. Assim como nas lajes, cada contorno é simplificado por meio do algoritmo de Douglas-Peucker (1973) para transformá-lo em segmentos de linha mais simples, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Máscara binária destacando regiões de alta densidade indicativas das posições das paredes (superior) e contornos delineando segmentos de parede na planta baixa 2D, derivados da segmentação da máscara binária (inferior)



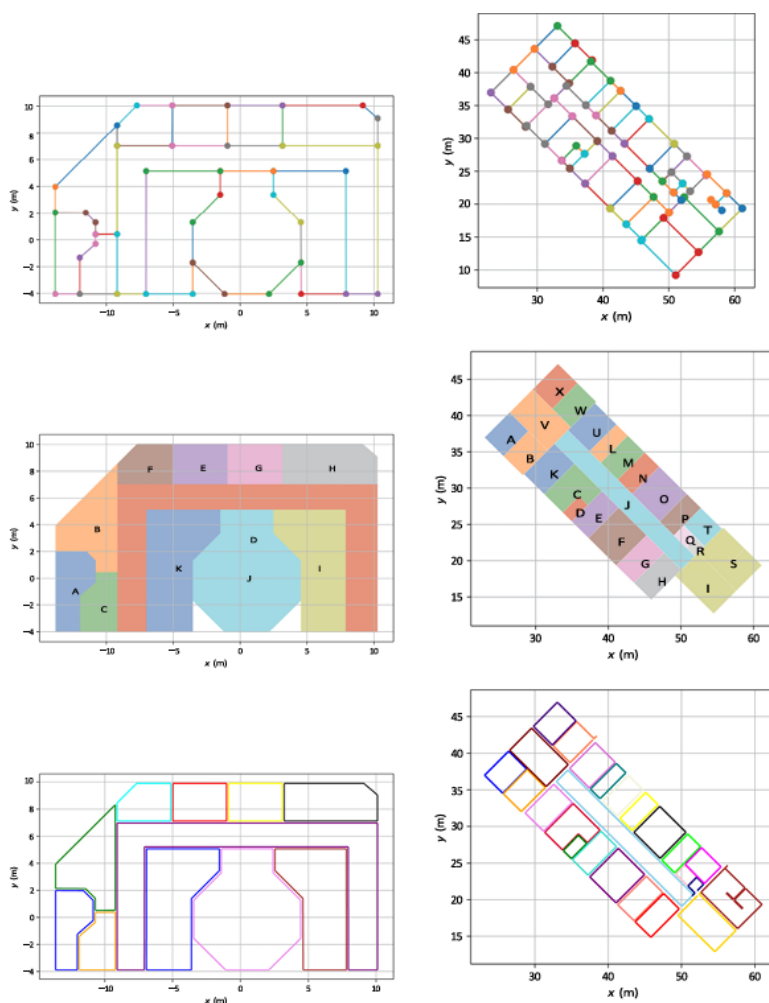
Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

Após a segmentação de paredes, os pequenos segmentos de parede passam por uma análise para serem unidos em segmentos mais longos, com base em seus ângulos, distâncias e alinhamento. Para formar uma representação volumétrica, o algoritmo pareia superfícies opostas de uma parede (as linhas delimitadoras). O pareamento só acontece se as superfícies forem paralelas, estiverem dentro de uma distância máxima e tiverem sobreposição suficiente. Se uma superfície externa não for detectada (comum em varreduras internas), uma superfície virtual é gerada para completar o par. Os passos finais incluem o cálculo do eixo central da parede e o ajuste das conexões para garantir que a topologia esteja correta. As extremidades dos segmentos de parede são ajustadas nas interseções para garantir que se conectem. A função finaliza fornecendo os pontos inicial e final de cada parede, juntamente com sua espessura. Adota-se que a altura da parede corresponde à altura total do andar.

Identificadas as paredes, inicia-se a identificação de zonas. Para isso, a função *identify_zones* analisa a geometria da parede, processando primeiro os eixos centrais das paredes para garantir sua conectividade e alinhamento. Os segmentos de parede (representados por seus eixos) são divididos em suas interseções e, em seguida, estendidos para se conectar a

eixos vizinhos que estejam dentro de uma distância específica, definida pelo parâmetro *snapping_distance*. O algoritmo gera segmentos paralelos aos eixos das paredes. Estes novos segmentos representam as superfícies reais das paredes e são criados a uma distância do eixo correspondente à metade da espessura de cada parede. Os segmentos paralelos recém-criados (que representam as superfícies das paredes) são então estendidos até que se cruzarem, formando assim os limites fechados das zonas. Por fim, a função cria polígonos fechados definidos pelos eixos das paredes. Cada polígono gerado serve como um candidato a uma zona (cômodo), visto na Figura 16.

Figura 16 - Eixos das paredes ajustados aos vizinhos mais próximos e divididos nas interseções (superior), polígonos gerados com base nos eixos das paredes (meio), e limites finais das zonas definidos pelas superfícies de parede correspondentes (inferior).

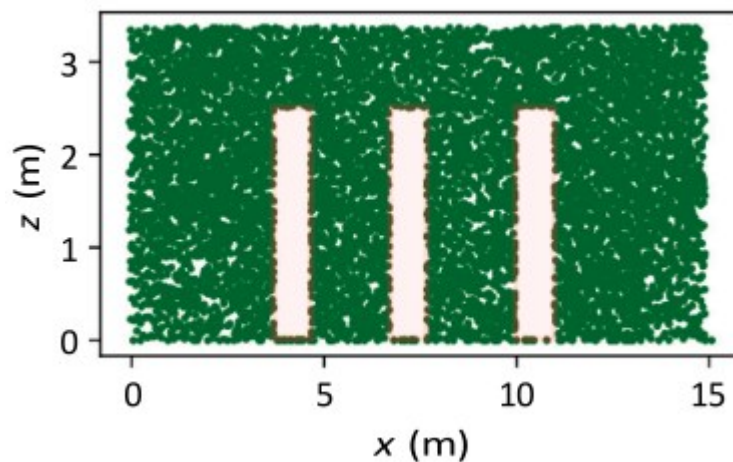


Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

No contexto deste método, a principal utilidade de definir essas zonas é a capacidade de extrair dados geométricos de cada cômodo, como área e volume. Adicionalmente, essa segmentação permite a agregação de informações semânticas específicas, como o tipo de acabamento, a finalidade do espaço (ex: quarto, cozinha), ou dados sobre segurança e desempenho acústico.

Por fim, após a identificação de zonas, identificam-se as aberturas. A análise inicia-se com o isolamento da parede a ser analisada, que é posicionada na origem do sistema de coordenadas e rotacionada para ficar alinhada ao plano x-z (comprimento e altura). Primeiro, o algoritmo determina a posição da abertura ao longo do comprimento da parede (eixo X) por meio de um histograma de densidade de pontos. As lacunas (áreas com baixa densidade de pontos) nesse histograma são identificadas como possíveis aberturas. Após uma possível abertura ser encontrada no eixo x, o mesmo procedimento de análise de histograma é repetido para o eixo z (altura) para determinar os limites superior e inferior da abertura, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Detecção de aberturas em paredes baseada em histograma, mostrando a vista lateral da parede.

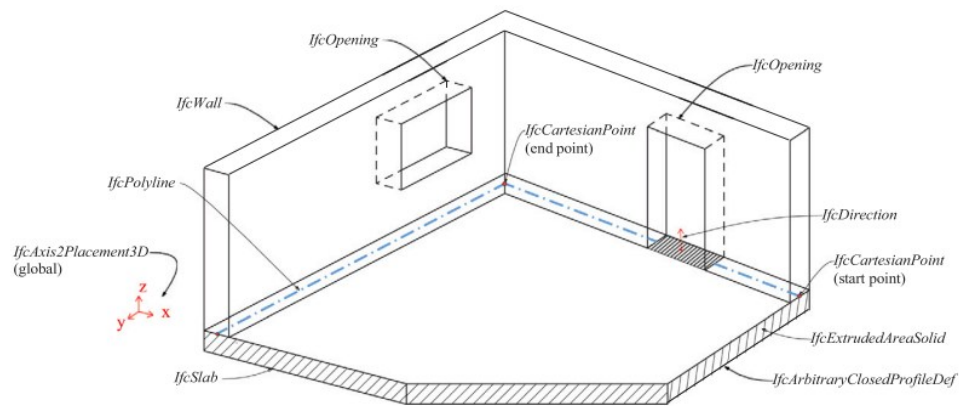


Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

A precisão de todo o processo é melhorada pela diluição prévia da nuvem de pontos. Uma distribuição de pontos mais uniforme torna os espaços vazios no histograma mais nítidos, minimizando erros na detecção.

Por fim, o arquivo de saída no formato Industry Foundation Classes (IFC) é gerado utilizando a biblioteca IfcOpenShell para Python, na versão IFC 4 ADD2 TC1. A representação gráfica de todas as classes utilizadas neste processo é apresentada na Figura 18, em que foi indicado todas as classes IFC utilizadas para execução do modelo geométrico.

Figura 18 - Classes para execução da geometria



Fonte: Adaptado de Zbirovský e Nežerka (2025)

3. METODOLOGIA

A partir das metodologias de automação do processo *Scan-to-BIM* analisadas na revisão bibliográfica, será detalhado o fluxo de trabalho desenvolvido para a reconstrução geométrica de grandes estruturas de concreto. O método foi proposto para um objeto de estudo específico: a Usina Hidrelétrica de Mascarenhas de Moraes. Considerando a complexidade da barragem, o escopo da modelagem se concentra em dois de seus componentes estruturais mais representativos e de geometria distinta: o vertedouro e a estrutura principal em arco. As seções a seguir descreverão as etapas adotadas.

3.1. Abordagem para Modelagem da Usina Hidrelétrica Mascarenha de Moraes

A modelagem tridimensional da barragem Mascarenhas de Moraes a partir de nuvens de pontos apresenta um desafio particular devido à sua geometria heterogênea. A estrutura é composta por elementos de natureza distinta: por um lado, a geometria contínua e curvilínea do arco principal e, por outro, os componentes de geometria segmentada e predominantemente plana dos vertedouros, que incluem múltiplas paredes e aberturas. A Figura 19 apresenta a Usina Hidrelétrica Mascarenha de Moraes, com destaque em vermelho os vertedouros e arco da barragem.

Figura 19 - Usina Hidrelétrica Mascarenha de Moraes

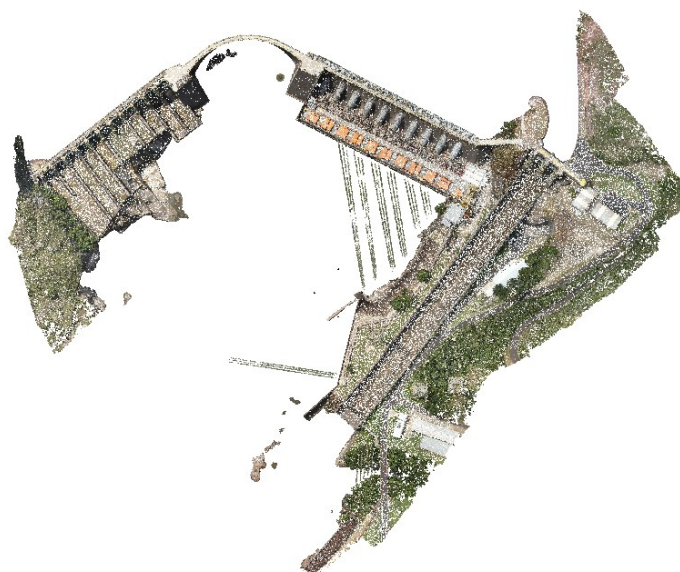


Fonte: (JÚNIOR, [s.d.])

A nuvem de pontos que serve como base para este estudo foi gerada no contexto de um projeto anterior de iniciação, no qual foi desenvolvida uma modelagem 3D manual da Usina Hidrelétrica de Mascarenhas de Moraes. Como esses dados constituem o ponto de partida tanto para a abordagem manual prévia quanto para a automatizada aqui proposta, a seguir descreve-se seu processo de obtenção.

A nuvem de pontos da barragem foi obtida por meio de fotogrametria. Esta é uma técnica não invasiva que permite a criação de modelos 3D precisos a partir do processamento de fotografias de alta resolução (LONGONI, 2012). Para a aquisição de dados, um drone equipado com uma câmera de alta resolução sobrevoou a extensão da barragem. Após a aquisição das imagens, o processamento foi realizado no software Agisoft Metashape para a criação da nuvem de pontos, a qual é apresentada na Figura 20.

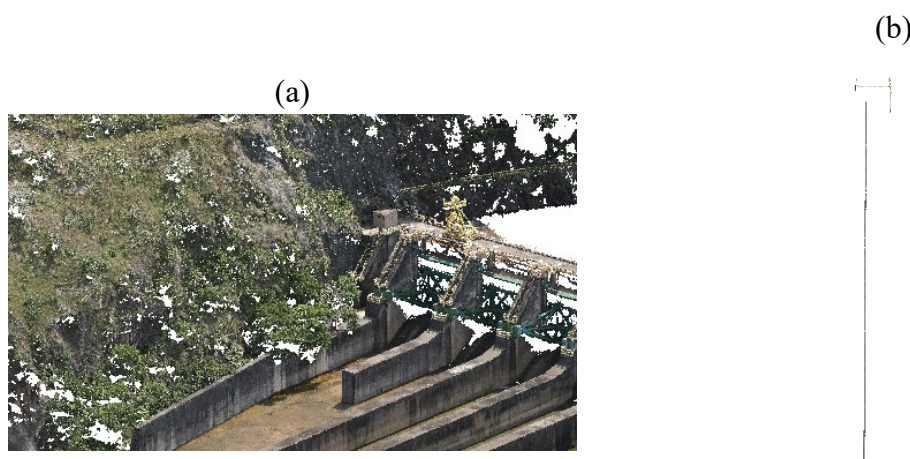
Figura 20 - Nuvem de pontos da UHMMO obtida por fotogrametria



Fonte: Autora (2025).

A nuvem de pontos obtida apresenta algumas particularidades que devem ser consideradas para as etapas de modelagem. A primeira é que, devido à grande extensão da barragem, o arquivo completo possui 156 GB, o que demanda um alto esforço computacional para processamento. A segunda é a presença de imperfeições, como oclusões causadas pela vegetação e ausência de dados em áreas que a fotogrametria não pôde capturar, como as estruturas submersas, conforme ilustrado na Figura 21.

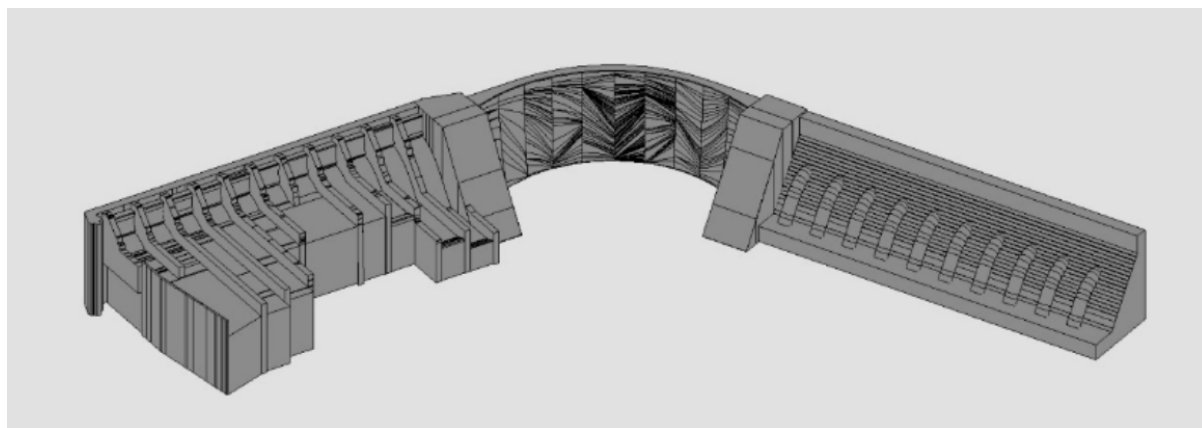
Figura 21- Obstruções da nuvem de pontos. (a) Vegetação obstruindo vertedouro. (b) Seção transversal do arco da barragem que não pôde ser capturado a extensão à montante em contato com a água.



Fonte: Autora (2025).

Para fins de comparação com o método automatizado que será tratado a seguir, descreve-se o processo de reconstrução geométrica manual. Este teve início com a exportação da nuvem de pontos para o formato E57, visando sua compatibilidade com o software Recap Pro. No Recap Pro, os dados foram submetidos a tratamento e conferência. Subsequentemente, o conjunto de pontos foi reexportado como arquivo RCP para o Revit, local onde se realizou a modelagem paramétrica BIM, cujo resultado é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Modelagem 3D obtida manualmente.



Fonte: Autora (2025).

Em pesquisas anteriores, o método utilizado para a reconstrução geométrica demandou um tempo considerável e revelou-se excessivamente laborioso. Esse cenário evidencia a necessidade de buscar técnicas de modelagem automática que ofereçam maior eficiência e agilidade ao processo. Entretanto, uma abordagem de modelagem automatizada que utilize apenas uma metodologia de execução poderia gerar imprecisões, visto que os algoritmos de reconstrução são frequentemente otimizados para tipos específicos de formas.

Diante disso, este trabalho propõe a aplicação de uma estratégia híbrida, correlacionando as potencialidades de cada método analisado na revisão bibliográfica com as características de cada parte da barragem.

Para a estrutura em arco, que a geometria pode ser descrita por equações de curvas e extrusões contínuas, com a adaptação da metodologia *Scan-to-BIM-to-Sim* de Fang et al (2025). Essa abordagem, originalmente desenvolvida para pontes, é robusta na extração de eixos e perfis paramétricos a partir de projeções 2D. Para o vertedouro, que se assemelha a uma edificação devido à presença de paredes, lajes e aberturas, a metodologia *Cloud2BIM* mostra-se mais adequada. Sua força reside na segmentação de planos e na identificação de elementos arquitetônicos, o que permite uma reconstrução mais fiel dessa porção da estrutura. O foco da aplicação combinada é, portanto, a reconstrução geométrica do sólido da barragem, visando otimizar e automatizar o processo de modelagem 3D e culminando na criação de um modelo preciso no formato BIM.

Por se tratar de uma usina hidrelétrica que entrou em operação em 1957, a barragem carecia de informações de projeto, que foram sendo perdidas ao longo do tempo. Dessa maneira, apenas dois documentos puderam ser utilizados para a obtenção de dados adicionais. O primeiro é a digitalização de uma lista de cotas da UHMMO, da qual foi possível extrair informações relevantes, como as cotas do topo da comporta do vertedouro e do topo do passadiço. O referido documento é ilustrado na Figura 23.

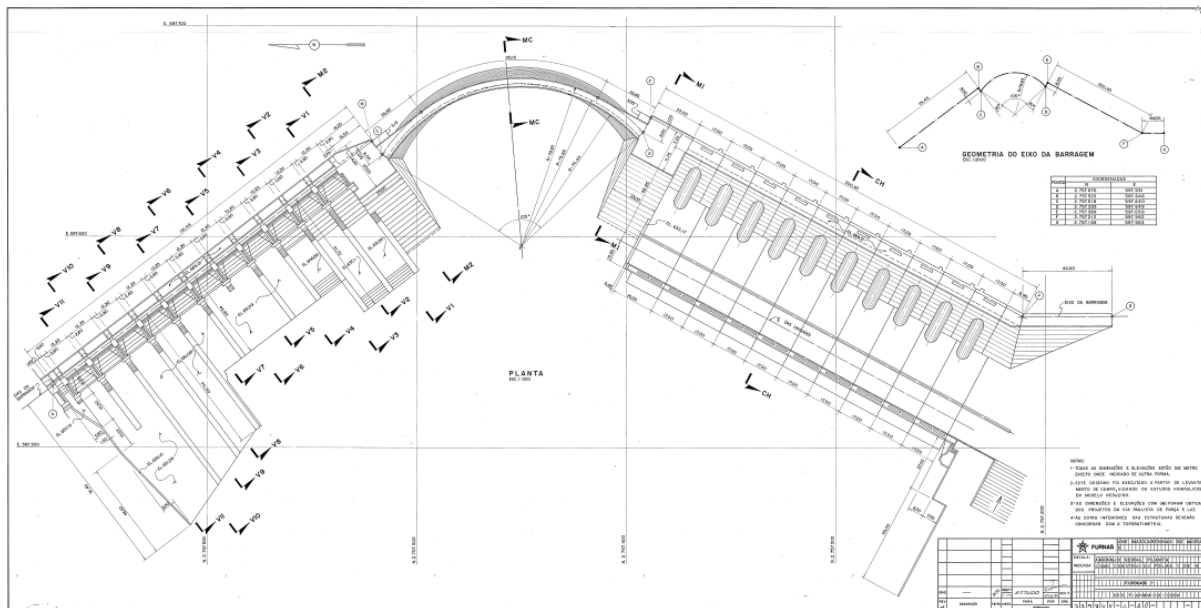
Figura 23- Lista de cotas da UHMMO

LEGENDA DAS COTAS DA UEMM.O	
COTA	DESCRIÇÃO
605,32	Fundo do poço mestre
604,50	Dreno mestre para o poço de drenagem (V5%)
605,87	Fundo do tubo de sucção (drenagem do t de sucção para o dreno mestre V-10
605,56	Centro do diâmetro do tubo do registro V-10
606,25	Soleira das comportas do canal de fuga
606,93	Soleira na saída do canal de fuga na ponta da inalação
605,73	Pino da comporta de manutenção estando esta colocada
610,05	Parte superior na saída do canal de fuga
611,12	Pino da galeria da inspeção mecânica
612,56	Drenagem do conduto forçado para tubo de sucção V-11
612,56	Pino da plataforma para acesso à portinhola de inspeção do tubo de sucção
612,66	Tubo de admissão d'água do canal de fuga para enchimento de tubo sucção
613,12	Descarga do coletor do poço mestre no canal de fuga
613,92	Nível máximo d'água para operação de canal de fuga (projeto)
614,22	Piso da plataforma de acesso à portinhola de inspeção da caixa espiral
615,92	Nível mínimo d'água para operação do canal de fuga (atual)
615,49	Centro das palhetas
619,12	Nível normal d'água para operação do canal de fuga
619,12	Pino da sala das turbinas
619,82	Piso da galeria de cabos elétricos
623,82	Piso da sala dos geradores
627,12	Passadiço do canal de fuga
637,12	Nível máximo d'água para operação do canal de fuga (atual)
628,12	Murta do canal de fuga (paralelo)
629,12	Piso da sala de controle e área de trafos
629,62	Nível máximo d'água para operação do canal de fuga (projeto)
639,62	Nível do trilho da ponte rolante lado da montante
631,12	Nível do trilho da ponte rolante lado da jusante
635,52	Pino superior da galeria de inspeção da tomada d'água
635,69	Topo do tubo da válvula de aeração da Unidade Geradora 1
643,18	Topo do inferior da grade horizontal da tomada d'água
646,12	Soleira da comporta de admissão
647,12	Centro do conduto forçado na tomada d'água
648,62	Saída do registro by passe de enchimento no conduto forçado
650,12	Topo do conduto forçado logo abaixo da comporta de admissão
650,67	Pino da comporta de admissão estando esta colocada (fechada)
652,12	Centro de registro by passe na tomada d'água
653,12	Nível mínimo d'água para operação do reservatório
653,50	Soleira das comportas do vertedor
659,45	Crista do vertedor
659,69	Topo da grade horizontal da tomada d'água
659,82	Banc para sustentação da comporta do vertedor
660,12	Ponto de fixação na barragem dos isoladores dos cabos do vão de 138 kV
658,50	Suporte de sustentação dos isoladores dos cabos do vão de 138 kV na barragem
666,12	Topo das comportas do vertedor
666,12	Nível máximo d'água para operação do reservatório
666,82	Nível máximo d'água para operação do reservatório (projeto)
668,62	Nível relativo à área de desapropriação
669,12	Passadiço da barragem.

Fonte: Furnas Centrais Elétricas S.A. — Documento de Cotas (documento interno), 2025.

O segundo documento é uma planta do arranjo geral da barragem, ilustrada na Figura 24, na qual se encontram informações relevantes como coordenadas de pontos referenciais, dimensões gerais de projeto e outras cotas que não constavam no arquivo anterior.

Figura 24 - Projeto com arranjos gerais da UHMMO.



Fonte: FURNAS Centrais Elétricas S.A. — Planta (documento interno), 2025.

A partir da nuvem de pontos e documentos adicionais é possível analisar o processo de modelagem automatizada.

3.2. Aplicação do *Scan-to-BIM-to-Sim* em Geometrias Constantes

A seção em arco da barragem é caracterizada por sua geometria contínua e por possuir seções transversais que se mantêm constantes ou que variam de forma gradual ao longo de um eixo, característica ilustrada na Figura 25.

Figura 25 - Foto aproximada do arco da barragem



Fonte: Autora (2025)

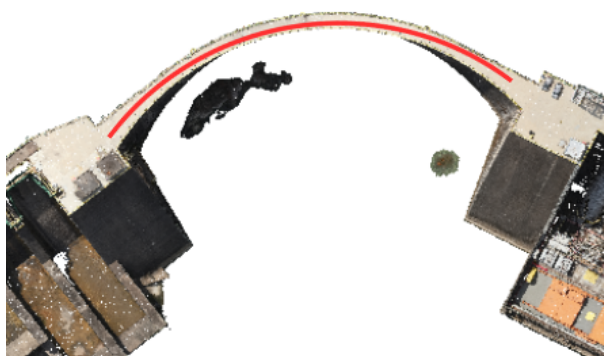
Em análise inicial, para essas estruturas, a abordagem do *framework Scan-to-BIM-to-Sim* de Fang *et al.*, (2025) é particularmente adequada pelos seguintes motivos:

- Eficiência para geometrias que aceitam extrusão: O método se baseia na extração de parâmetros de seções transversais e longitudinais para gerar um modelo 3D a partir da extrusão. Essa abordagem é ideal para modelar do arco da barragem que funciona de maneira análoga a uma ponte, caso de estudo do artigo.
- Compatibilidade com nuvens de pontos imperfeitas: O método de Fang *et al.* (2025) é projetado para lidar com nuvens de pontos defeituosas ou de baixa qualidade. Isso reduz a dependência de equipamentos de escaneamento de altíssima precisão e de um processamento extensivo dos dados, diminuindo custos e tempo.
- Redução do esforço computacional: A abordagem paramétrica, que extrai apenas as informações do contorno, reduz a demanda computacional em comparação com métodos manuais e métodos que processam cada ponto individualmente.

Apesar de a metodologia de Fang *et al.* (2025) ser compatível com nuvens de pontos densas, para o presente estudo de aplicação não há necessidade de utilizar o arquivo completo. Dessa maneira, propõe-se a segmentação da nuvem de pontos, utilizando-se apenas a porção que corresponde à estrutura de interesse. No caso da Usina Hidrelétrica de Mascarenhas de Moraes, como o estudo da metodologia foca no arco, faz sentido seccionar apenas essa estrutura central.

O procedimento original de Fang *et al.* (2025) para pontes envolve o fatiamento da nuvem de pontos em seções longitudinal, transversal e de planta baixa. No entanto, para a barragem curva, o fatiamento longitudinal não é aplicável para a extração de parâmetros relevantes. Já a vista em planta baixa é essencial, pois permite a extração do eixo central do arco, parâmetro fundamental para a futura modelagem por extrusão. Essa curva pode ser extraída com o auxílio do projeto de arranjo geral (Figura 24). A Figura 26 exemplifica uma aproximação da extração do parâmetro da curva do arco.

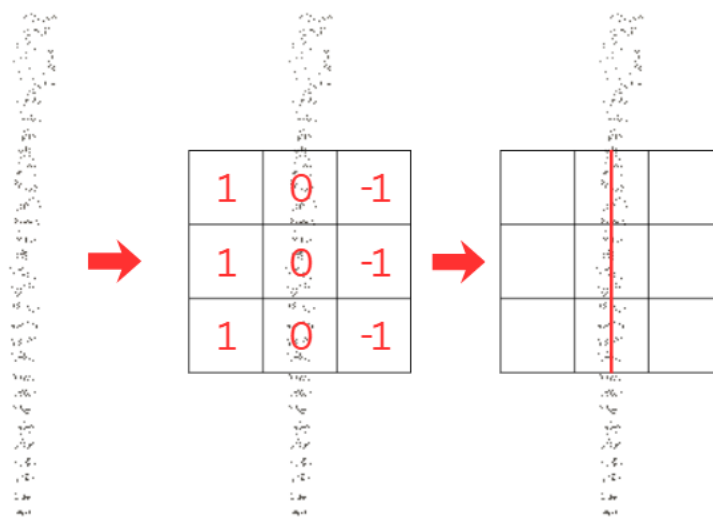
Figura 26 - Eixo central do arco da barragem.



Fonte: Autora (2025)

Quanto à análise da seção transversal, o ponto central da metodologia de Fang *et al.* (2025) foca na extração dos parâmetros da borda a partir de nuvens de pontos imprecisas. Para superar esse desafio, é proposta a técnica de convolução para a detecção de bordas. A Figura 27 exemplifica a aplicação dessa técnica na nuvem de pontos de uma borda da barragem.

Figura 27 - Exemplo de detecção de bordas a partir da convolução



Fonte: Autora (2025)

Por fim, após a detecção de todas as bordas existentes, deve-se considerar que parte da nuvem de pontos do arco da barragem a montante não foi capturada por estar submersa. Para contornar a ausência de dados, sugere-se complementar a seção transversal da seguinte forma:

- À montante: A linha de topo (função de primeiro grau) é estendida até atingir a cota estabelecida pelo documento de referência (Figura 23)
- Na base do arco: O perfil da curva é fechado por uma reta horizontal que conecta a extremidade da linha estendida à montante com a da curva identificada à jusante.

Os parâmetros de borda resultantes deste processo são exemplificados na Figura 28, que representa a seção transversal da parte central do arco da barragem.

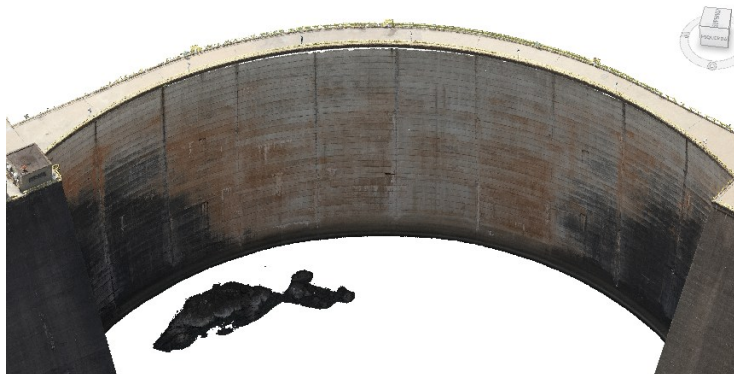
Figura 28 - Parâmetros da seção transversal: Borda detectada (vermelho); Extensão à montante (azul); Interseção de curvas (verde).



Fonte: Autora (2025)

Por fim, após a identificação de todos os parâmetros da seção transversal, é necessário definir os pontos do eixo central ao longo do qual a extrusão por varredura será executada. Para isso, sugere-se a adoção das juntas de dilatação do arco da barragem como pontos de referência. Essa escolha se justifica por estarem espaçadas uniformemente e por possuírem coordenadas documentadas, que também são passíveis de identificação na própria nuvem de pontos. A Figura 29 ilustra a localização desses pontos na nuvem de pontos no arco da barragem.

Figura 29 - Ranhuras verticais da nuvem de pontos do arco que representam as juntas de dilatação.



Fonte: Autora (2025)

Após toda documentação ser feita, é possível realizar a extrusão do arco da barragem.

3.3. Aplicação do *Cloud2BIM* para Geometrias Não Constantes

Os vertedouros, com suas comportas e canais de escoamento, não seguem uma seção transversal constante. Por se tratar de 11 vãos que se apoiam sobre um rochedo irregular, alguns canais possuem alturas distintas. Essa variação impossibilita a criação de um módulo único para replicação, o que dificulta a aplicação de um método de seção constante, como o utilizado para o arco da barragem. A geometria do vertedouro, portanto, correlaciona-se mais com a de um edifício, composto por paredes, aberturas e zonas. Essa característica de segmentação por diferentes planos e alturas é apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Foto aproximada do vertedouro, identificando sua estrutura irregular.



Fonte: Autora (2025)

Em análise inicial, a aplicação do *framework* Cloud2BIM, embora desenvolvido para edificações, é uma solução factível para esta parte da barragem:

- Análise de estruturas com paredes e aberturas: O *Cloud2BIM* é capaz de detectar elementos verticais (paredes) e identificar vazios entre eles (aberturas). As paredes divisórias dos canais e as estruturas de sustentação do tabuleiro do vertedouro podem ser interpretados como paredes espessas. Os vãos onde as comportas estão instaladas podem ser tratados como grandes aberturas. O método utiliza uma análise para identificar essas aberturas de forma automatizada, o que é ideal para modelar os 11 vãos do vertedouro.
- Utilização do código aberto (*Open-Source*): Por ser uma ferramenta de código aberto, ela oferece transparência no processo, que permite customizações para se adaptar melhor às especificidades da geometria do vertedouro e elimina a dependência de softwares comerciais proprietários.

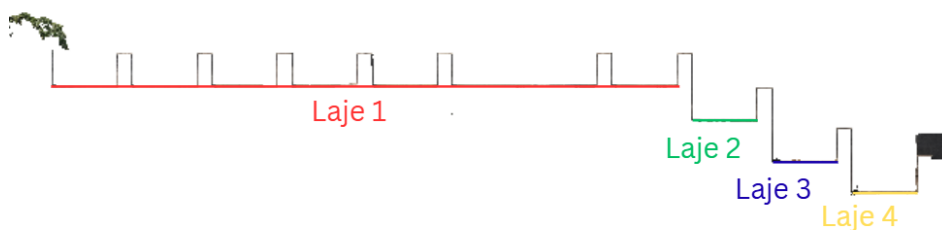
Assim como a metodologia de Fang *et al.* (2025) realizada para o arco da barragem, Zbirovský e Nežerka (2025) também propõem um método compatível com nuvens de pontos densas. Porém, como já realizado na abordagem anterior, sugere-se a segmentação da nuvem, utilizando-se apenas a porção que corresponde à estrutura de interesse. Dessa forma, para o estudo de aplicação na Usina Mascarenhas de Moraes, faz-se necessário seccionar a estrutura do vertedouro.

O fluxo de trabalho de Zbirovský e Nežerka (2025) consiste em quatro etapas principais: identificação de lajes, paredes, zonas e, por fim, aberturas. A seguir, detalha-se a exemplificação da aplicação de cada uma dessas etapas no contexto do vertedouro.

No âmbito da identificação de lajes, observa-se que a estrutura do vertedouro, por se apoiar em um rochedo irregular, apresenta diferentes alturas de extravasão para os canais. Seu tabuleiro, contudo, está em uma cota definida que pode ser consultada no documento de referência (Figura 23).

A Figura 31 exemplifica, a partir de uma seção transversal da nuvem de pontos, a identificação da densidade de pontos para a detecção de superfícies candidatas a lajes na Usina Hidrelétrica.

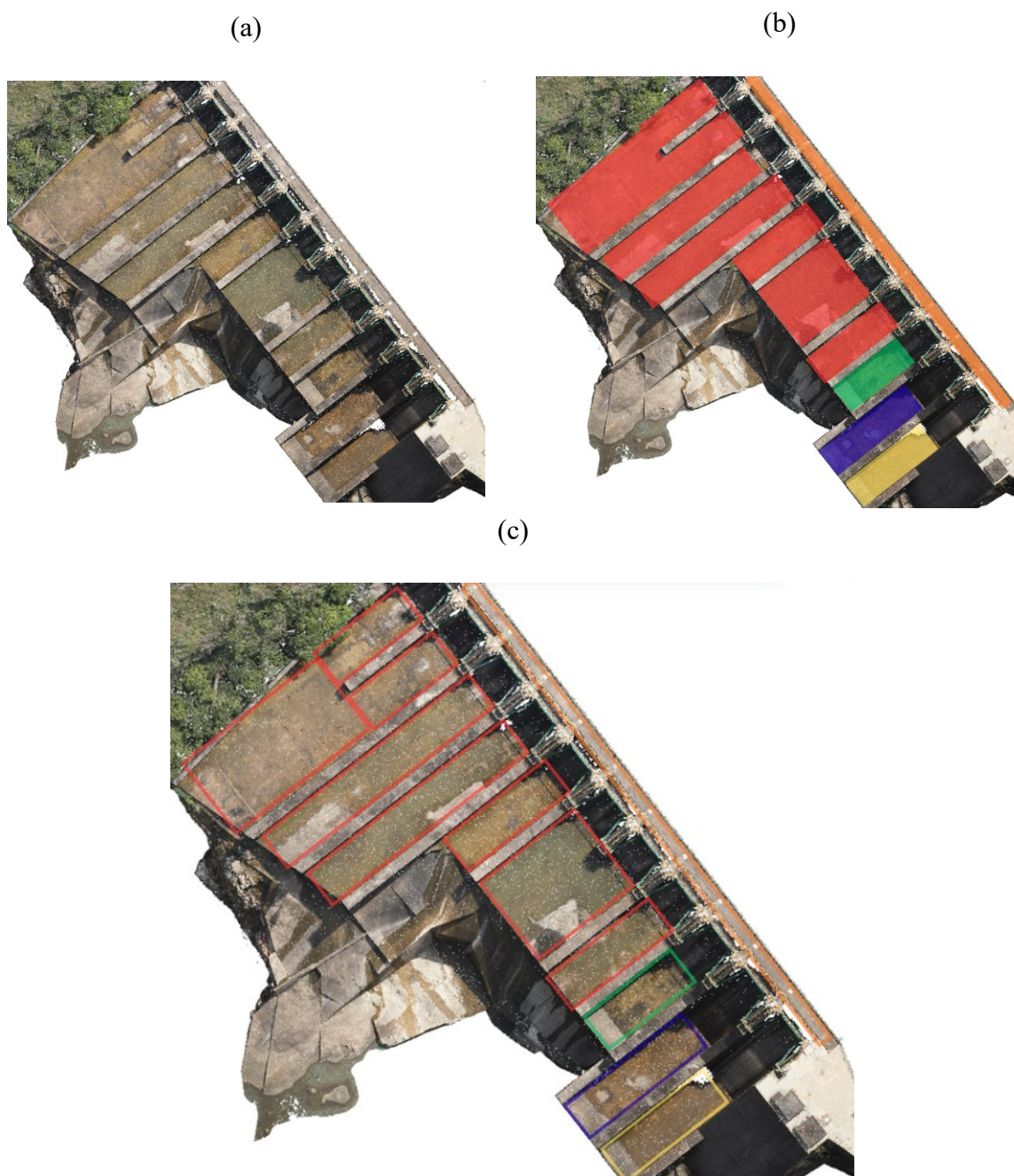
Figura 31 - Identificação de possíveis candidatos a lajes



Fonte: Autora (2025)

A partir da definição dos candidatos, a identificação das lajes para a estrutura do vertedouro é exemplificada na Figura 32. Conforme a metodologia de Zbirovský e Nežerka (2025), o processo consiste em duas etapas principais: primeiro, são identificadas as áreas de alta densidade de pontos e, em seguida, é feita a extração do contorno de suas bordas.

Figura 32 - Identificação de lajes. (a) Planta baixa vertedouro; (b) Identificação de densidade de pontos para lajes; (c) Extração de contornos



Fonte: Autora (2025)

Similar à identificação de lajes, a detecção de paredes também utiliza a verificação da densidade de pontos em uma projeção de planta baixa, conforme exemplificado na Figura 33, que ilustra a delimitação desses elementos.

Figura 33 - Delimitações de paredes a partir da densidade de um plano horizontal



Fonte: Autora (2025)

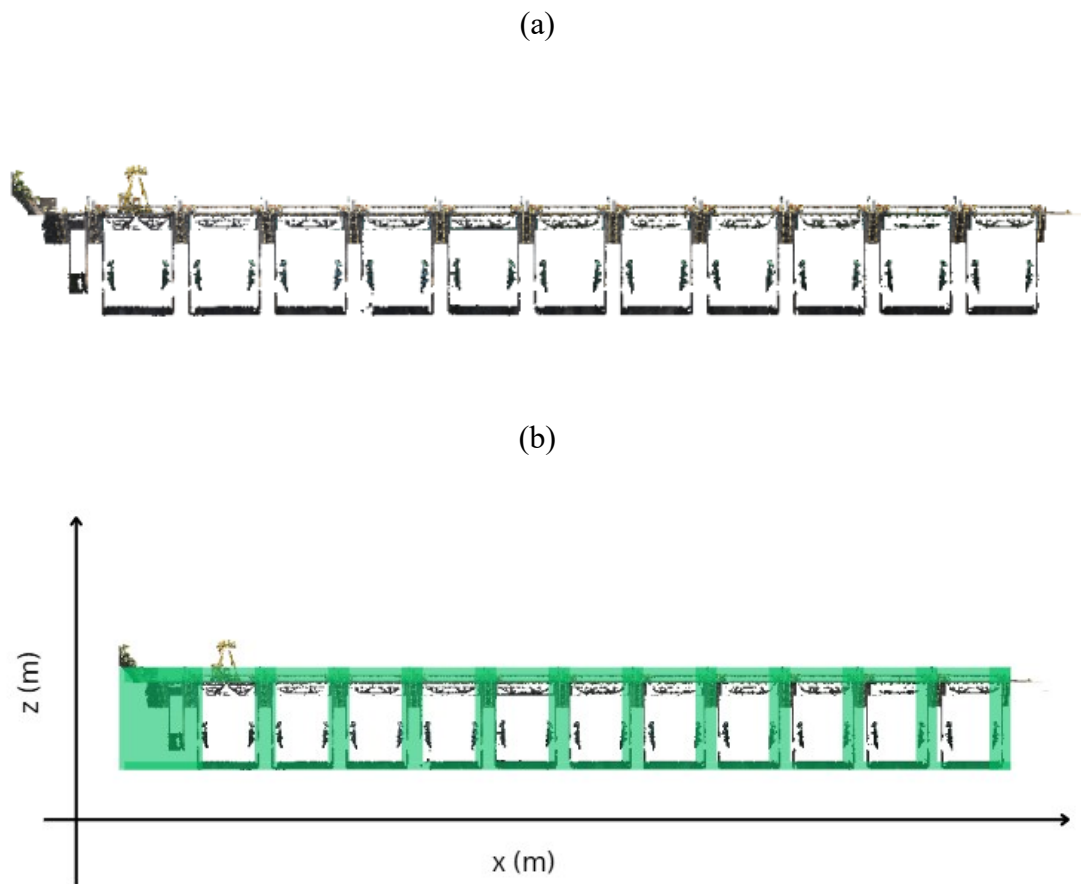
No fluxo de trabalho original de Zbirovský e Nežerka (2025), a etapa seguinte à identificação de paredes seria a de zonas. No entanto, optou-se por não implementar este passo no presente estudo de aplicação. As zonas, no contexto original, são concebidas para delimitar cômodos internos de edificações, uma analogia que não se aplica diretamente à geometria aberta do vertedouro da barragem.

A decisão de omitir esta etapa é reforçada pelo fato de que sua ausência não impacta a identificação de outros elementos geométricos. Adicionalmente, os próprios autores justificam que a principal utilidade das zonas é extrair dados como área e volume de cômodos, o que foge ao escopo da reconstrução puramente geométrica deste trabalho.

Ressalta-se, contudo, que para futuras aplicações de operação e manutenção (O&M) da barragem, a implementação da identificação de zonas para delimitar espaços funcionais específicos poderia se tornar pertinente.

Por fim, realiza-se a identificação das aberturas, etapa que, no contexto da barragem, é correlacionada com a detecção das comportas do vertedouro. Para exemplificar o processo, analisou-se um corte da seção transversal de uma das comportas. A Figura 34 ilustra o histograma de densidade de pontos ao longo do eixo horizontal (X), no qual as lacunas com baixa densidade indicam a localização precisa da abertura.

Figura 34 - Identificação de paredes. (a) Seção transversal do vertedouro; (b) Histograma densidade de pontos para identificação de abertura.



Fonte: Autora (2025)

Após identificações serem feitas, é possível realizar a modelagem do vertedouro da barragem.

3.4. Análise Comparativa e Justificativa da Abordagem Híbrida

A eficácia da abordagem híbrida proposta neste trabalho reside na combinação estratégica das potencialidades de duas metodologias distintas. Esta seção realiza uma análise comparativa entre os fluxos trabalho de Fang *et al.* (2025) e Zbirovský e Nežerka (2025), destacando suas similaridades e, principalmente, suas diferenças fundamentais, que justificam sua aplicação direcionada a partes específicas da barragem.

Uma similaridade notável entre os dois métodos é a etapa inicial de pré-processamento. Ambos recorrem ao software de código aberto CloudCompare para o tratamento da nuvem de pontos. Contudo, suas estratégias para reduzir o esforço computacional já apontam para suas diferentes filosofias: enquanto o *Cloud2BIM* promove uma diluição global para diminuir a densidade total de pontos, o *Scan-to-BIM-to-Sim* opta por trabalhar com a nuvem de pontos completa, segmentando-a em porções menores para análise local.

A diferença mais crucial, no entanto, está na lógica de reconstrução geométrica. O método de Fang *et al.* (2025), *Scan-to-BIM-to-Sim* é centrado na extração de seções transversais. Ele "fatia" a nuvem de pontos para definir perfis que são então extrudados ao longo de um eixo central. Essa abordagem é altamente eficaz para geometrias contínuas e de seção constante ou gradualmente variável. Por outro lado, o método de Zbirovský e Nežerka (2025), *Cloud2BIM* baseia-se na análise de densidade de pontos em histogramas para identificar elementos arquitetônicos, como lajes e paredes. Sua lógica pressupõe a existência de múltiplas superfícies e elementos para que os picos de densidade no histograma sejam comparativos para definição. Essa distinção fundamental é a chave para a estratégia híbrida adotada:

A abordagem de seções transversais (*Scan-to-BIM-to-Sim*) é ideal para a geometria regular do arco da barragem. Contudo, se tornaria impraticável no vertedouro, pois exigiria a manipulação e o fatiamento manual de cada uma das inúmeras paredes, vãos e canais, o que contraria o objetivo de automação. Da mesma maneira, a análise de densidade de pontos (*Cloud2BIM*) não seria eficaz no arco, por se tratar de uma estrutura única e contínua, sem os múltiplos elementos planos necessários para criar um histograma com picos de densidade interpretáveis para a detecção de "lajes" ou "paredes".

Portanto, a combinação das técnicas escolhidas faz-se necessária para atender a geometria do objeto de estudo. A metodologia híbrida permite aplicar a lógica de extrusão à geometria contínua do arco e a lógica de detecção de estruturas à geometria segmentada do vertedouro, otimizando o processo de reconstrução para cada componente.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho partiu do desafio de aplicar metodologias de automação *Scan-to-BIM* para a reconstrução geométrica de infraestruturas complexas e existentes, como barragens, para as quais a documentação técnica é frequentemente inexistente.

A análise comparativa e a aplicação teórica das metodologias permitiram alcançar os objetivos propostos e extrair conclusões significativas. O principal achado da pesquisa é a confirmação de que a geometria intrínseca do elemento estrutural é o fator preponderante na escolha da técnica de modelagem automatizada. Ao demonstrar que a abordagem por extrusão se adequa à geometria contínua do arco e a de detecção de feições à geometria segmentada do vertedouro, constatou-se que uma abordagem híbrida é a alternativa mais eficiente para a reconstrução digital completa de uma barragem, cumprindo assim o objetivo específico de propor um fluxo de trabalho otimizado para o caso de estudo.

Durante a execução do estudo, diversos desafios foram encontrados, como a ausência de documentação original de projeto, o alto esforço computacional para manipular a nuvem de pontos de 156 GB e a presença de imperfeições nos dados, como oclusões por vegetação e ausência de informações em áreas submersas. É válido ressaltar também as limitações deste trabalho: o escopo foi intencionalmente restrito à reconstrução geométrica, não abrangendo a

agregação de informações semânticas. Além disso, a validação do fluxo de trabalho foi apenas proposta no estudo de caso, não sendo aplicada.

Apesar das limitações, a metodologia proposta orienta a seleção da técnica mais adequada para cada desafio geométrico, otimizando o uso de recursos e reduzindo a necessidade de manipulação manual de dados, um dos maiores dificultadores do processo. Garante-se, assim, a qualidade e um modelo BIM suficiente para servir de base para futuras análises de segurança, operação e manutenção, reforçando a contribuição prática e a relevância do trabalho.

5. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se, primeiramente, a validação prática do fluxo de trabalho proposto por meio de sua aplicação efetiva na Usina Hidrelétrica de Mascarenha de Moraes. Além disso, propõe-se a aplicação e validação desta metodologia híbrida em outras barragens com diferentes tipologias, o que poderia ampliar seu escopo e consolidá-la como uma solução padronizada para o setor de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **Segurança de Barragens**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao/seguranca-de-barragens>. Acesso em: 18 set. 2025.
- ANDRIASYAN, Mesrop et al. From Point Cloud Data to Building Information Modelling: An Automatic Parametric Workflow for Heritage. **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, p. 1094, 2020. DOI: 10.3390/rs12071094.
- BARAZZETTI, Luigi et al. Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 57, p. 71-87, 2015. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.004.
- BASSIER, M.; MATTHEUWSEN, L.; VERGAUWEN, M. BIM RECONSTRUCTION: AUTOMATED PROCEDURAL MODELING FROM POINT CLOUD DATA. *In*: 6th International Workshop LowCost 3D - Sensors, Algorithms, Applications, Strasbourg, France. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-2/W17, p. 53-60, 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-53-2019.
- BASSIER, Maarten; VERGAUWEN, Maarten. Unsupervised reconstruction of Building Information Modeling wall objects from point cloud data. **Automation in Construction**, v. 120, 103338, 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103338.
- CAPONE, M.; LANZARA, E. SCAN-TO-BIM vs 3D IDEAL MODEL HBIM: PARAMETRIC TOOLS TO STUDY DOMES GEOMETRY. *In*: 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Bergamo,

Italy. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-2/W9, p. 219-226, 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-219-2019.

DOUGLAS, David H.; PEUCKER, Thomas K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. **Cartographica: the international journal for geographic information and geovisualization**, v. 10, n. 2, p. 112-122, 1973.

ELETROBRÁS FURNAS (org.). **Lei de Segurança de Barragens**. 2023. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/subsecao/1742/lei-de-seguranca-de-barragens?culture=pt>>. Acesso em: 18 set. 2025.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. Documento de Cotas. 2024. Documento interno.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. Planta. 2024. Documento interno.

FANG, Yunping et al. Scan-to-BIM-to-Sim: Automated reconstruction of digital and simulation models from point clouds with applications on bridges. **Results in Engineering**, v. 25, 104289, 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104289.

GOEBBELS, Steffen. 3D Reconstruction of Bridges from Airborne Laser Scanning Data and Cadastral Footprints. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 5, n. 10, 2021. DOI: 10.1007/s41651-021-00076-9.

GORETTI, Hannah; SETIAWAN, Harijanto. The Impact of Buildings Throughout Their Life Cycle on the Environment: A Systematic Review. **ARPHA Proceedings**, v. 7, p. 316-325, 2024.

JÚNIOR, A. (Eletrobras Furnas, Ed.), [s.d.]. Acesso em: 9 set. 2025

LIU, Yudong et al. Dataset and benchmark for as-built BIM reconstruction from real-world point cloud. **Automation in Construction**, v. 173, 106096, 2025. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106096.

LONGONI, LAURA et al. Surface and subsurface non-invasive investigations to improve the characterization of a fractured rock mass. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 9, n. 5, p. 461-472, 2012.

MACHER, Hélène; LANDES, Tania; GRUSSENMEYER, Pierre. From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, p. 1030, 2017. DOI: 10.3390/app7101030.

MAHMOUD, Mostafa et al. Automated Scan-to-BIM: A deep learning-based framework for indoor environments with complex furniture elements. **Journal of Building Engineering**, v. 106, 112596, 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112596.

MENDEZ, Ronald Osiris. The building information model in facilities management. 2006.

MOYANO, Juan et al. Analysis and management of structural deformations through parametric models and HBIM workflow in architectural heritage. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 103274, 2022. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103274.

RADZIEJOWSKA, Aleksandra; CIEPŁUCHA, Wojciech; MAJTA, Marcin. BIM model for the operational phase based on available documentation. **Archives of Civil Engineering**, p. 347–363-347–363, 2025.

ROMAN, O. et al. A SEMI-AUTOMATED APPROACH TO MODEL ARCHITECTURAL ELEMENTS IN SCAN-TO-BIM PROCESSES. *In*: 29th CIPA Symposium, Florence, Italy. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLVIII-M-2-2023, p. 1345-1352, 2023. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1345-2023.

SHISHKOV, Radul; PENCHEV, Petar. **Automated Transformation of 3D Point Cloud to Building Information Model: Leveraging Algorithmic Modeling for Efficient Reconstruction**. [s.l.: s.n., s.d.].

SILVA, MAM; COUTO, João Pedro. BIM na operação e manutenção de edifícios—estado da arte e perspectivas futuras. *In*: **PtBIM-3º Congresso Portugues de Building Information Modelling. Anais [...]**. 2020.

SON, H.; KIM, C.; TURKAN, Y. **Scan-to-BIM – An Overview of the Current State of the Art and a Look Ahead**. [s.l.: s.n., s.d.].

SUZUKI, Satoshi et al. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. **Computer vision, graphics, and image processing**, v. 30, n. 1, p. 32-46, 1985.

TANG, Pingbo et al. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. **Automation in Construction**, v. 19, p. 829-843, 2010. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.

TANG, Shengjun et al. BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep learning and improved morphological approach. **Automation in Construction**, v. 141, 104422, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104422.

TOMMASI, C.; ACHILLE, C.; FASSI, F. FROM POINT CLOUD TO BIM: A MODELLING CHALLENGE IN THE CULTURAL HERITAGE FIELD. *In*: XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B5, p. 429-436, 2016. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-429-2016.

WANG, Qian; GUO, Jingjing; KIM, Min-Koo. An Application Oriented Scan-to-BIM Framework. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, p. 365, 2019. DOI: 10.3390/rs11030365.

XIONG, Biao et al. Knowledge-driven inference for automatic reconstruction of indoor detailed as-built BIMs from laser scanning data. **Automation in Construction**, v. 156, 105097, 2023. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105097.

ZBIROVSKÝ, Slávek; NEŽERKA, Václav. Open-source automatic pipeline for efficient conversion of large-scale point clouds to IFC format. **Automation in Construction**, v. 177, p. 106303, 2025.