

COMPARAÇÃO DE VOLUMES DE CORTES E ATERROS UTILIZANDO SOFTWARE DE MODELAGEM TOPOGRÁFICA BIM

COMPARISON OF CUT AND FILL VOLUMES USING BIM TOPOGRAPHIC MODELING SOFTWARE

Gustavo da Luz Facchini ¹

Pedro Thiago Venzon ²

Elias Riffel ³

Vivian Siffert Wildner ⁴

RESUMO: Cálculos de volumes em projetos de terraplenagem têm implicações diretas na viabilidade e custos das obras. Esta pesquisa teve como objetivo comparar os métodos de cálculo de volumes de terraplenagem, focando nas abordagens de seções transversais e interpolação de Modelos Digitais de Terreno (MDT) no *software* Civil 3D da Autodesk. A pesquisa analisa como o espaçamento entre as seções impacta a precisão dos volumes de corte e aterro, com base em 36 amostras de projetos. O estudo avalia a precisão dos volumes gerados por diferentes distâncias entre as seções e compara com os volumes obtidos pela interpolação de MDT. O método de interpolação de MDT é recomendado para terrenos irregulares, por oferecer maior precisão, minimizando erros e otimizando recursos. Os resultados também indicam distâncias ideais entre seções, de 3,80 e 6,84 metros, para garantir erros numa faixa de tolerância de 2% a 6%, recomendado em projetos de terraplenagem. Além disso, destaca-se a importância do uso de tecnologias precisas de levantamento topográfico, como LiDAR e drones, para garantir a qualidade dos modelos digitais. O trabalho oferece recomendações práticas para melhorar os cálculos e sugere explorar intervalos menores entre as seções para obter maior precisão, contribuindo para a evolução dos cálculos e execução de projetos de terraplenagem.

Palavras-chave: MDT; volumes; terrenos.

ABSTRACT: *Volume calculations in earthwork projects have direct implications for the feasibility and costs of the works. This research aimed to compare the methods for calculating earthwork volumes, focusing on the cross-section and Digital Terrain Model (DTM) interpolation approaches in Autodesk Civil 3D software. The research analyzed how the spacing between sections impacts the accuracy of cut and fill volumes based on 36 project samples. The study evaluated the accuracy of volumes generated by different distances between sections and compared them with the volumes obtained by DTM interpolation. We recommend the DTM interpolation method for irregular terrains, as it offers greater accuracy, minimizes errors, and optimizes resources. The results also indicated ideal section distances of 3.80 and 6.84 meters to maintain error tolerances of 2% to 6%, which we recommend for earthwork projects. We also*

¹ Acadêmico. Centro Universitário de Brusque - UNIFE. E-mail: gugafacchini@unifebe.edu.br

² Mestre. Centro Universitário de Brusque - UNIFE. E-mail: pedro.venzon@unifebe.edu.br

³ Mestre. Centro Universitário de Brusque - UNIFE. E-mail: eliasriffel@unifebe.edu.br

⁴ Doutora. Centro Universitário de Brusque - UNIFE. E-mail: vivian.wildner@unifebe.edu.br

emphasized the significance of utilizing precise surveying technologies, including LiDAR and drones, to guarantee the quality of digital models. The paper provides practical recommendations to enhance calculations. It also suggests exploring smaller intervals between sections to achieve greater accuracy, thereby contributing to the advancement of calculations and the execution of earthwork projects.

Keywords: DTM; volume; terrain.

1 INTRODUÇÃO

A precisão na determinação dos volumes de corte e aterro é fundamental para o sucesso de projetos de terraplenagem, especialmente em obras rodoviárias e de infraestrutura. Métodos tradicionais, como o das seções, embora amplamente utilizados, podem introduzir erros significativos ao longo de grandes extensões, resultando em discrepâncias que afetam tanto o custo quanto o cronograma do projeto. Com o advento de tecnologias avançadas, como o Civil 3D, que opera em um ambiente BIM, é possível utilizar o método de interpolação para calcular volumes com maior precisão.

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar métodos utilizados no cálculo de volumes de terraplenagem, com foco nos métodos de seções transversais e interpolação de Modelos Digitais de Terreno (MDT) no *software* Civil 3D da Autodesk. A pesquisa se limita à análise dessas duas abordagens, expondo como as distâncias entre as seções impactam nos resultados de volumes de corte e aterro.

O objeto de estudo está centrado no cálculo de volumes de terraplenagem, especificamente nos métodos de seções e interpolação de MDT, com análise comparativa de erros de cálculo com base em 36 amostras de projetos de terraplenagem.

O objetivo geral da pesquisa foi comparar os métodos de cálculo de volumes de terraplenagem, focando nas abordagens de seções transversais e interpolação de Modelos Digitais de Terreno (MDT) no *software* Civil 3D da Autodesk. Além disso, são estabelecidos objetivos específicos, como avaliar a precisão dos volumes obtidos com diferentes espaçamentos entre as seções e a comparação com os volumes gerados pelo método de interpolação, visando identificar o impacto do espaçamento nas distorções dos resultados.

A pesquisa justifica-se pela necessidade de maior precisão nos cálculos de volumes em projetos de terraplenagem, tendo implicações diretas na viabilidade e custos das obras. A utilização do método de interpolação de MDT, com sua maior precisão, é recomendada para projetos com terrenos irregulares, principalmente quando se busca minimizar erros e otimizar recursos no processo de execução.

O estudo também visa determinar distâncias ideais entre seções para minimizar os erros em cálculos de volumes, propondo a adoção de distâncias entre 3,80 e 6,84 metros para garantir que os erros se mantenham na faixa de tolerância de 2% a 6%, como recomendado em projetos de terraplenagem. O trabalho ainda destaca a importância do uso de tecnologias de levantamento topográfico precisas, como o *Light Detection and Ranging* - LiDAR e drones, para garantir a qualidade do modelo digital do terreno.

Esta pesquisa se justifica pela necessidade de avaliar a eficácia dessa tecnologia em comparação com os métodos tradicionais. Reduzir erros nos cálculos de volumes pode gerar economias substanciais em projetos de movimentação de terra, além de melhorar o planejamento e a execução das obras.

A relevância desta pesquisa está na importância de obter resultados precisos em projetos de terraplenagem, que influenciam diretamente na viabilidade e no custo de uma obra. A análise de diferentes métodos para cálculo de volumes de corte e aterro, com ênfase na interpolação de MDT, oferece uma contribuição significativa ao campo da engenharia civil, especialmente em projetos com terrenos irregulares. Além disso, o estudo fornece recomendações práticas para a utilização dos métodos analisados e sugere a exploração de intervalos menores entre as seções, além dos três avaliados, para alcançar maior precisão nos cálculos. A pesquisa contribui para a melhoria das práticas de cálculo e execução de projetos de terraplenagem, beneficiando a engenharia civil em obras com terrenos variados e exigentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA EM MODELOS DIGITAIS

Para a representação da superfície física da Terra podemos utilizar Modelos Digitais do Terreno – MDT. Um MDT pode ser definido com a representação matemática de uma superfície, por meio das coordenadas X, Y e Z (Rocha, 2000).

Dentre as aplicações dos MDT, de acordo com Burrough (1986), estão o armazenamento de dados de altimetria para mapas topográficos; análises de corte-aterramento para projeto de estradas e barragens; elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio a análise de geomorfologia e erodibilidade; análise de variáveis geofísicas e geoquímicas e apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

O processo de geração de um MDT se divide em três fases: coleta dos dados, geração de grades e elaboração dos produtos (representação das informações obtidas).

Na geração de um modelo digital de terreno, a aquisição dos dados pode ser realizada a partir de três processos:

- digitalização de mapas já existentes;
- restituição fotogramétrica;
- levantamento direto no campo que é o caso da Topografia.

Segundo Rocha (2000), esta aquisição de dados não deve ser feita aleatoriamente. No processo de amostragem, devem ser levantados os pontos representativos da topografia ou da superfície de interesse, procurando cobrir toda a área amostrada na densidade necessária às particularidades locais. Nesse processo, devemos considerar, principalmente, os pontos característicos do terreno, tais como:

- **Pontos notáveis** - altos, baixos ou mudança de declive;
- **Linhas de estrutura** – linhas naturais do terreno: cristas, vales, talwegues e rios;
- **Breaklines** – linhas construídas como estradas, muros, etc.
- **Áreas planas** – áreas existentes ou construídas que possuem a mesma cota, como platôs, campos de futebol, lagos e outras.

Entretanto, os modelos digitais de terreno não são elaborados sobre os dados amostrados, mas sim baseados nos modelos gerados no formato de grade regular ou irregular. Esses formatos simplificam a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápidos computacionalmente.

Segundo Mourão e Rocha (2001), as grades triangulares ou TIN – Triangular Irregular Network são estruturas do tipo vetorial, compostas de arcos (arestas) e nós (vértices), que representam a superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas. Para cada um dos vértices dos triângulos, as coordenadas de localização (X, Y) e o atributo Z são armazenados, representando um valor qualquer.

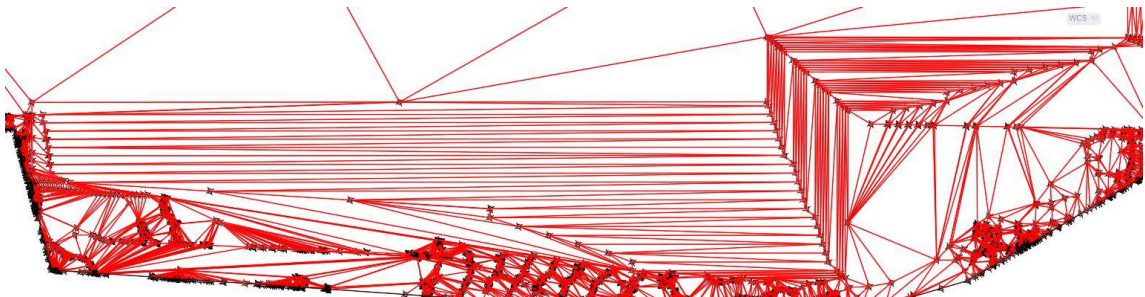
A modelagem de superfície ou reconstruções de superfícies é o processo pelo qual a representação do terreno é obtida (Li; Zhu; Gold, 2004).

Em TINs, os pontos ou vértices são escolhidos e conectados em série para formar uma rede de triângulos, representando assim a superfície na forma de triângulos contíguos e não sobrepostos (Raza *et al.*, 2023).

Os TINs têm uma vantagem sobre os modelos baseados em grade por sua capacidade de descrever a superfície em diferentes resoluções, pois, em certos casos, é necessária uma resolução maior dos triângulos, como em picos de montanhas (Raza *et al.*, 2023).

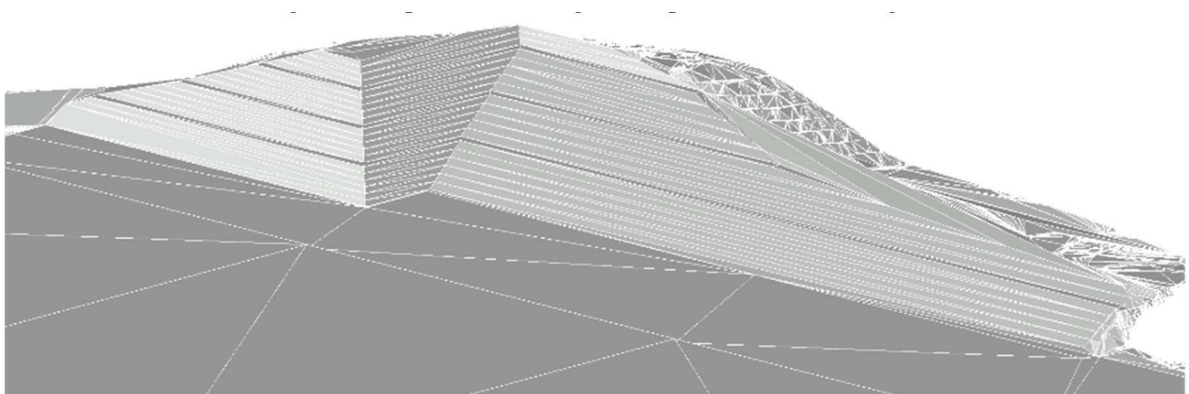
As figuras a seguir demonstram a visualização dos modelos digitais de terreno no *software* de modelagem Civil 3D, no qual é possível observar na Figura 1, os pontos e arestas das grades triangulares TIN e na Figura 2 esse mesmo modelo digital de terreno, só que com vista em 3D.

Figura 1 - Grade triangular - TIN



Fonte: autor (2024).

Figura 2 - Superfície em 3D gerada a partir da Grade triangular



Fonte: autor (2024).

2.2 NORMATIVAS BRASILEIRAS

A NBR 13.133, que trata da execução de levantamentos topográficos, é fundamental para garantir a precisão nos projetos de terraplenagem. Ela estabelece critérios técnicos para a obtenção de dados topográficos com alta confiabilidade, fundamentais para o cálculo de volumes de corte e aterro. A norma define níveis de precisão conforme a escala do projeto, destacando a importância de levantamentos rigorosos, especialmente em terrenos com alta variabilidade altimétrica. Métodos adequados são recomendados para assegurar a exatidão dos dados. Além disso, a NBR 13.133 orienta quanto à densidade de pontos levantados e ao processamento das informações, garantindo que os modelos digitais de terreno representem fielmente as condições reais do local.

Outra contribuição importante da NBR 13.133 está no controle de erros durante o levantamento e no processamento de dados. Ela enfatiza práticas como a verificação de ângulos, distâncias e nivelamentos durante o trabalho de campo, além de cuidados no tratamento dos dados para evitar distorções no modelo digital. A representação precisa do terreno levantado é essencial para comparações confiáveis com o modelo projetado, sendo o ponto de partida para análises quantitativas detalhadas. Assim, a norma serve como uma base sólida para o levantamento topográfico ser consistente e reduz o risco de discrepâncias significativas nos cálculos de movimentação de terra.

As diretrizes para levantamentos topográficos da NBR 13.133 apresentam controles de qualidade que devem ser empregados para que levantamentos topográficos apresentem a qualidade necessária para execução de projetos, podendo ser utilizados diversos tipos de ferramentas para execução do levantamento. Uma das técnicas possíveis de ser utilizada é o LiDAR, alternativa moderna de alta precisão com vasta densidade de pontos gerados.

2.3 LiDAR

LiDAR, sigla utilizada para *Light Detection and Ranging* e tradução para Detecção e alcance de luz, é um termo utilizado para designar essa nova tecnologia de sensoriamento remoto. Em português, vem sendo utilizada a terminologia de Sistema de Varredura a Laser (Coelho; Vargas, 2007).

O princípio de funcionamento do LiDAR baseia-se na emissão de pulsos laser em uma frequência específica. Esses pulsos viajam até um objeto, são refletidos de volta ao sensor, e o tempo que a luz leva para retornar é medido. Com base nesse tempo de retorno e na velocidade da luz, é possível calcular a distância entre o sensor e o objeto (Felisbino; Guerrero; Barra, 2019).

Uma vantagem dos sensores de varredura a laser em relação aos clássicos sensores passivos (fotografias aéreas e imagens de satélite) é que os scanners a laser não dependem do sol como uma fonte de iluminação. Assim sendo, a análise dos dados não é prejudicada por sombras causadas por nuvens ou objetos vizinhos (Wagner *et al.*, 2004).

Além disso, o sensor LiDAR pode captar múltiplas reflexões a partir de um único pulso, ou seja, ele pode registrar diferentes níveis de reflexão ao atravessar elementos como a copa de árvores e alcançar o solo. Esse aspecto torna o LiDAR uma ferramenta poderosa para gerar informações detalhadas de superfícies complexas, como florestas, áreas urbanas ou terrenos irregulares (Wagner *et al.*, 2004).

Apesar de ser uma tecnologia utilizada globalmente há mais de duas décadas, a aplicação do LiDAR em larga escala no Brasil começou em 2001 (Schafer; Loch, 2005). Depois disso, ele tem sido amplamente empregado em projetos que demandam grande escala e alta acurácia, como obras de infraestrutura, estudos ambientais e monitoramento de áreas urbanas.

Essa tecnologia possibilita levantamentos planialtimétricos precisos, com a obtenção de pontos coordenados conforme o observado nos locais de interesse, possibilitando a construção de superfícies tridimensionais de qualidade em *softwares* de modelagem.

2.4 BIM – MODELAGEM COM INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

O termo BIM (*Building Information Modeling*) é utilizado para definir uma metodologia capaz de implementar e organizar todas as informações pertinentes a uma edificação, possibilitando, então, a execução exata do modelo virtual dela, antes de iniciar a execução da obra (Reis, 2021).

Para Arsenault (2009), BIM é a criação paramétrica, ou inteligente, de modelos de perspectivas 3D em vez de desenhos 2D “não inteligentes”. Ele opera sobre uma base de dados digital e qualquer alteração feita nesta base reflete-se em todas as peças desenhadas que compõem o projeto. Permitindo, assim, que todos os envolvidos no período de vida do empreendimento de construção (arquiteto, engenheiro, empreiteiro e proprietário) visualizem o modelo de modo diferente, conseguindo facilmente compartilhar informações.

Entretanto, conforme apontado por Eastman *et al.* (2014), a definição de BIM exige também a delimitação daquilo que não pode ser considerado como tal. Modelos tridimensionais voltados exclusivamente para a representação geométrica e visual, frequentemente utilizados na apresentação comercial de empreendimentos, não se enquadram no conceito de BIM. Da mesma forma, modelos que não utilizam objetos paramétricos, incapazes de se ajustarem automaticamente em resposta a alterações nos elementos aos quais estão vinculados, também não atendem a essa definição. Além disso, modelos que dependem da sobreposição de desenhos 2D para formar representações tridimensionais ou que não realizam atualizações automáticas em todas as vistas quando alterações são feitas, igualmente não caracterizam a metodologia BIM.

Embora frequentemente percebida como uma inovação recente, a metodologia BIM possui raízes em setores como a indústria automobilística, aeronáutica e naval, onde já é amplamente utilizada. No entanto, sua aplicação no setor da construção civil é mais recente em comparação a essas indústrias (Reis, 2021).

2.4.1 Funcionalidades e Benefícios do BIM

A modelagem da informação da construção (BIM) permite a criação de um modelo virtual abrangente de todo o projeto, viabilizando a tomada de decisões críticas de forma antecipada. Esse processo reduz significativamente a ocorrência de surpresas durante a fase de execução, etapa em que alterações podem acarretar elevados custos financeiros (Reis, 2021).

Quando corretamente implementada, a metodologia BIM oferece inúmeros benefícios em relação aos métodos tradicionais baseados exclusivamente em documentação 2D.

Entre as funcionalidades e benefícios mais relevantes da implementação do BIM, destaca-se o aumento da qualidade dos projetos e do desempenho das construções. Uma das aplicações de maior impacto é a identificação de interferências, conhecida como *clash detection*, fundamental para a compatibilização de projetos. Essa ferramenta permite classificar os conflitos encontrados conforme sua relevância, facilitando sua identificação, categorização e organização. Segundo Addor (2015), os conflitos podem ser classificados em três categorias:

- **Soft clash:** elementos que não respeitam a distância mínima exigida em relação a outros componentes ou sistemas.
- **Hard clash:** elementos que se sobrepõem fisicamente.
- **Time clash:** elementos cuja interferência ocorre ao longo do tempo, como durante a construção ou o uso do edifício.

A capacidade do BIM de identificar, classificar e corrigir interferências em diferentes níveis reforça sua importância para a compatibilização de projetos e para a redução de retrabalhos e custos. Entretanto, para alcançar a máxima eficiência na modelagem e análise, é indispensável o uso de dados precisos e detalhados do terreno e das condições do ambiente. Nesse contexto, tecnologias de sensoriamento remoto, como o LiDAR, complementam o BIM ao fornecer informações tridimensionais de alta acurácia, fundamentais para a criação de modelos digitais do terreno (MDTs) e para o planejamento de obras que envolvam cortes e aterros. Essa integração potencializa os resultados da metodologia BIM, promovendo um controle ainda maior sobre os empreendimentos.

A tecnologia, no entanto, fica refém da acuracidade dos levantamentos topográficos para projetos de terraplenagem, para isso é necessário seguir recomendações técnicas presentes nas Normas Brasileiras – NBR.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Trata-se de uma pesquisa básica, com abordagem quantitativa e de natureza exploratória, que compara o volume de cortes e aterros obtidos pelo método tradicional por sessões com o volume calculado pelo método de interpolação de superfícies utilizando *software* de modelagem topográfica BIM.

3.2 POPULAÇÃO E AMOSTRA

Foram utilizados 36 levantamentos topográficos realizados com tecnologia LiDAR juntamente ao seu respectivo projeto de terraplenagem para obtenção dos dados. Tais projetos de terraplenagem possuem variações de 209 (duzentos e nove) metros cúbicos a 465.294 (quatrocentos e sessenta e cinco mil e duzentos e noventa e quatro) metros cúbicos de movimentação de terra.

Os projetos utilizados para as amostras variam em suas funcionalidades, sendo as mais comuns: nivelamento do solo para platôs em obras comerciais ou industriais com objetivo de implementação de 1 ou mais galpões, corte e aterro de morros para viabilização de projetos de condomínios horizontais e loteamentos, visto que as leis municipais costumam solicitar inclinação máxima para vias com acesso a lotes em 20% e lotes com declividades máximas de 30%.

3.3 INSTRUMENTOS DA PESQUISA

O *software* de modelagem BIM Civil 3D foi empregado para gerar os relatórios de movimentação de terra tanto para o método tradicional por seções quanto para o método de interpolação. Os dados obtidos com base nas amostras analisadas foram armazenados no Excel e manuseados com auxílio do Visual Basic for Applications (VBA), linguagem de programação da Microsoft, que possibilitou o refino dos dados para criação de tabelas e gráficos.

3.4 TÉCNICAS DE PESQUISA

A seguir, será discutido como foram obtidos os volumes de corte e aterro finais para cada amostra, utilizando o *software* de modelagem BIM Civil 3D, no qual foram analisados os modelos digitais de terreno para o método de seções e para o método de interpolação.

3.4.1 Método De Seções No Civil 3D

Para obtenção de volumes de terraplenagem pelo método de seções utilizando o Civil 3D, é necessário traçar um alinhamento ou *feature line* na planta, de modo que a linha passe sobre os modelos digitais de terreno a serem comparados.

“Alinhamento” e “Feature Line” são linhas com propriedades capazes, além da representação visual em 2D em planta, uma vez que, por meio da tecnologia BIM, é possível gerar corredores e perfis a partir dessas linhas especiais.

Traçado o alinhamento, utiliza-se a ferramenta “Sample Lines”, para geração de cada linha de perfil. É possível definir o intervalo entre os perfis, assim como o incremento de linhas de perfil em tangentes, curvas e espirais para maior fidelidade dos volumes calculados.

No presente trabalho, foram utilizadas distâncias de 20, 10 e 5 metros entre os perfis, pois são os distanciamentos mais comumente utilizados e solicitados pelos órgãos que autorizam os projetos de terraplenagem em Brusque e região.

Na Figura 3, as curvas de nível representam a superfície do projeto final. Esta superfície está sobreposta no sentido de georreferenciamento com a superfície do Terreno Natural, só que com sua representação desativada para clareza da visualização. A linha horizontal em azul é o alinhamento previamente apresentado, e as sample lines (perfis transversais) passam perpendicularmente ao alinhamento.

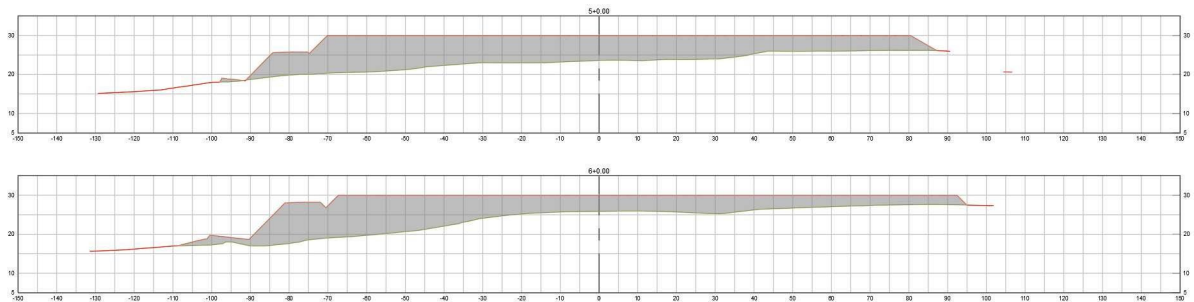
Figura 3 – Projeto com Curvas de Nível - Alinhamento em Azul na Horizontal e Sample lines em preto na vertical



Fonte: autor (2024).

Cada “Sample Line” gera um perfil como na Figura 4 a seguir, apresentando as superfícies comparadas. Na imagem, a linha verde (inferior) representa a superfície do terreno natural e, em vermelho (superior), a superfície do projeto de terraplenagem final. A hachura em cinza é a área que será utilizada para o cálculo pelo método de seções para determinação dos volumes de terraplenagem. A hachura acima da linha que representa o terreno natural representa aterro, e abaixo dessa linha representa corte.

Figura 4 – Perfil Transversal de duas seções



Fonte: autor (2024).

A Tabela 1 é um exemplo de tabela gerada pela ferramenta “Relatório de Volume” do Civil 3D, na qual cada estação é uma *sample line* e perfil gerado. Cada “Estação” é gerada a partir do intervalo escolhido para as seções. Nesse caso, como a tabela de volumes foi gerada com base nas seções com intervalos de 20 metros, cada espaço entre cada estação mede 20 metros. Caso uma seção nova fosse adicionada, não sendo múltipla do intervalo base determinado, ficaria a distância descrita após o símbolo de mais.

Para geração de volumes, é necessário determinar a superfície base “EG - Existing Ground” e a superfície de comparação “DATUM”. Estas representam a superfície acabada, não considerando os possíveis materiais de pavimentação que podem ou não ser utilizados, uma vez que o objetivo primário é determinar a movimentação de solo e não de diferentes materiais utilizados.

Tabela 1 – Tabela com os cálculos de obtenção de volumes pelo método de seções

20 metros							
Estação	Área de Corte (m²)	Volume de Corte (m³)	Área de Aterro (m²)	Volume de Aterro (m³)	Cumulativo do Volume de Corte (m³)	Cumulativo do Volume de Aterro (m³)	Cumulativo da diferença Corte/Aterro (m³)
0+00,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1+00,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02
2+00,00	64,16	641,58	94,75	947,49	641,60	947,49	-305,88
3+00,00	64,17	1.283,25	171,18	2.659,33	1.924,85	3.606,81	-1.681,96
4+00,00	715,34	7.795,14	276,55	4.477,37	9.719,99	8.084,18	1.635,81
5+00,00	1.210,43	19.257,74	698,44	9.749,90	28.977,73	17.834,08	11.143,65
6+00,00	775,63	19.860,64	636,01	13.344,43	48.838,37	31.178,51	17.659,86
7+00,00	458,06	12.336,94	620,61	12.566,19	61.175,31	43.744,70	17.430,61
8+00,00	84,56	5.426,18	938,51	15.591,18	66.601,49	59.335,88	7.265,61
9+00,00	0,00	845,57	1.952,06	28.905,66	67.447,06	88.241,54	-20.794,48
10+00,00	0,04	0,43	2.508,97	44.610,28	67.447,49	132.851,82	-65.404,33
11+00,00	0,04	0,88	1.364,43	38.734,01	67.448,37	171.585,83	-104.137,46
12+00,00	0,00	0,45	152,90	15.173,34	67.448,82	186.759,17	-119.310,35
13+00,00	0,00	0,00	0,00	1.529,01	67.448,82	188.288,18	-120.839,36
14+00,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67.448,82	188.288,18	-120.839,36

Fonte: autor (2024).

A Tabela 1 apresenta todo o cálculo de movimentação de terra ao longo das seções apresentando a área de corte e aterro em m² obtidos pela hachura presente nas seções e fazendo a média ao longo dos intervalos, é possível notar quanto que é calculado para corte e aterro entre cada seção nas colunas 3 e 5. O cumulativo dos volumes de corte e aterro são apresentados nas colunas 6 e 7 e, por fim, na coluna 8 o cumulativo da diferença entre corte e aterro, na qual quando o valor é positivo há sobra de material (solo) e quando o valor for negativo há falta de material para execução da obra de terraplenagem.

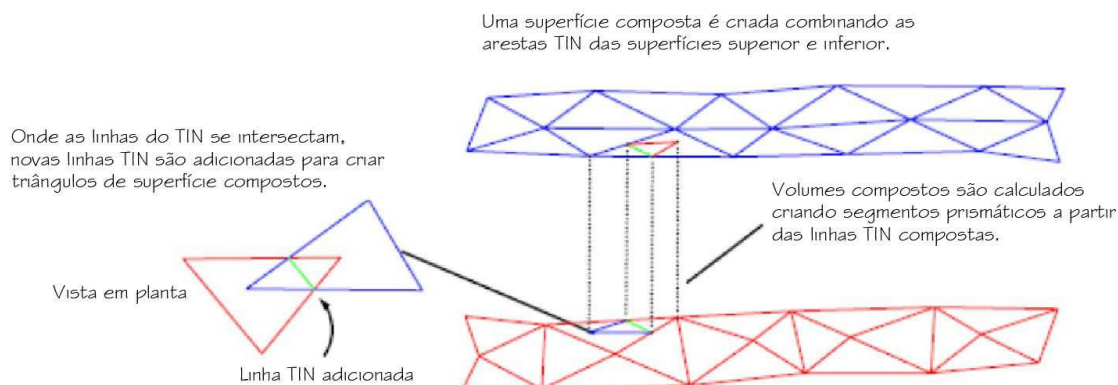
3.4.2 Método De Interpolação De Superfícies No Civil 3D

A obtenção de volumes de terraplenagem utilizando o Civil 3D pelo método de interpolação é definida pela comparação de duas superfícies TIN, em que a interpolação das superfícies combina as arestas de ambas, gerando um prisma. O conjunto dos volumes de todos os prismas gerados resulta nos volumes de corte e aterro.

Para diferenciação de corte e aterro é necessário definir a superfície base e a superfície de comparação, de modo que na interpolação das superfícies os volumes dos prismas gerados acima da superfície base sejam definidos como aterro, e o volume dos prismas gerados abaixo da superfície base ficam definidos como corte.

A Figura 5 fornecida pela Autodesk, empresa responsável pelo *software* Civil 3D, demonstra como funciona a geração dos prismas a partir das linhas de triangulação dos modelos digitais de terreno, a partir das grades triangulares TIN para cálculo.

Figura 5 – Interpolação de superfícies no Civil 3D



Fonte: Autodesk (2024).

Tal método de cálculo de volumes para terraplenagem é muito mais confiável do que o método de seções, uma vez que não é feita a média entre os perfis selecionados, havendo a geração de prismas na totalidade das superfícies analisadas.

A interpolação das superfícies é feita ao utilizar a ferramenta “volumes dashboard”, que assim como no método das seções, solicita a indicação da superfície base/terreno natural e da superfície final/superfície acabada do projeto.

A Figura 6 é a tabela gerada pelo *software* Civil 3D, apresentando respectivamente para cada coluna: Nome do cálculo sendo efetuado; Fator de empolamento para corte; Fator de empolamento para aterro; Área em planta do projeto em análise; Corte ajustado pelo empolamento; Aterro ajustado pelo empolamento; Diferença de corte e aterro, apresentando o volume da diferença e indicando corte em caso de sobra de material e aterro em caso de falta de material.

Figura 6 – Resultado do volume gerado por interpolação no software

Name	Cut Factor	Fill Factor	2d Area(sq.m)	Cut(adjust...	Fill(adjust...	Net(adjusted)(Cu. M.)
..... <input checked="" type="checkbox"/> VOLUME-6	1.000	1.000	121356.88	401404.53	314229.17	87175.36<Cut>

Fonte: autor, 2024

Para todas as amostras, o fator de empolamento foi definido como 1, uma vez que se busca apenas obter os valores absolutos dos volumes na comparação entre modelos digitais de terreno.

Empolamento é o efeito observado quando o solo é removido de seu estado natural, perdendo a compactação original. Nesse processo, as partículas se reorganizam, criando mais vazios e aumentando o volume ocupado, embora a massa permaneça inalterada.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Tabelas 2 e 3 trazem os resultados obtidos a partir dos métodos previamente apresentados. Na coluna 1 de cada tabela, está listada a amostra em análise e nas colunas seguintes, o valor do cumulativo de corte ou aterro final para seções de 20 metros, 10 metros e 5 metros. Por fim, na última coluna, há o valor de corte obtido pelo método de interpolação de superfícies.

Tabela 2 – Resultados de Cortes para os métodos adotados

Amostras	Corte - Seção 20m	Corte - Seção 10m	Corte - Seção 05m	Corte por interpolação
Amostra 01	406.118,71 m³	402.666,84 m³	401.628,55 m³	401.404,53 m³
Amostra 02	134.224,68 m³	133.976,28 m³	134.165,32 m³	134.258,07 m³
Amostra 03	90.933,01 m³	91.121,09 m³	90.659,64 m³	90.752,16 m³
Amostra 04	67.448,82 m³	68.205,52 m³	68.741,15 m³	68.990,60 m³
Amostra 05	26.654,89 m³	26.428,22 m³	26.282,39 m³	26.326,16 m³
Amostra 06	51.568,40 m³	52.430,87 m³	52.569,48 m³	52.685,89 m³
Amostra 07	288.675,56 m³	287.066,38 m³	286.854,53 m³	286.788,65 m³
Amostra 08	144.297,29 m³	142.967,33 m³	142.902,08 m³	142.974,82 m³
Amostra 09	52.815,63 m³	52.201,28 m³	51.739,88 m³	51.811,25 m³
Amostra 10	162,19 m³	160,31 m³	166,44 m³	166,10 m³
Amostra 11	71.381,80 m³	70.458,77 m³	69.436,88 m³	69.273,60 m³
Amostra 12	95.982,97 m³	93.756,82 m³	93.696,62 m³	93.878,76 m³
Amostra 13	328.851,06 m³	331.853,21 m³	331.041,68 m³	330.941,13 m³
Amostra 14	203.593,74 m³	202.048,50 m³	201.463,96 m³	201.511,65 m³
Amostra 15	48.288,68 m³	46.692,01 m³	47.073,46 m³	47.065,94 m³
Amostra 16	78,80 m³	90,85 m³	101,91 m³	105,23 m³
Amostra 17	5.104,89 m³	5.442,98 m³	5.173,32 m³	5.185,17 m³
Amostra 18	147.770,47 m³	149.436,05 m³	149.781,12 m³	149.706,13 m³
Amostra 19	9,97 m³	18,56 m³	18,10 m³	16,36 m³
Amostra 20	499.069,01 m³	495.102,22 m³	497.265,13 m³	497.098,55 m³
Amostra 21	90.680,40 m³	90.170,21 m³	90.606,91 m³	90.721,12 m³
Amostra 22	355.494,42 m³	350.685,58 m³	351.305,96 m³	351.263,15 m³
Amostra 23	246.954,65 m³	241.870,08 m³	241.592,44 m³	241.535,67 m³
Amostra 24	50.722,71 m³	49.704,38 m³	49.493,48 m³	49.488,28 m³
Amostra 25	91.775,41 m³	92.072,15 m³	91.802,90 m³	91.795,60 m³
Amostra 26	341.048,82 m³	341.464,82 m³	340.974,91 m³	340.951,99 m³
Amostra 27	91.432,53 m³	91.384,70 m³	90.891,23 m³	90.753,41 m³
Amostra 28	132.411,28 m³	131.331,60 m³	131.438,46 m³	131.373,62 m³
Amostra 29	132.851,06 m³	132.756,82 m³	132.631,92 m³	134.258,07 m³
Amostra 30	143.061,50 m³	142.944,93 m³	142.941,86 m³	142.974,82 m³
Amostra 31	51.531,64 m³	52.393,49 m³	52.538,42 m³	52.685,89 m³
Amostra 32	91.374,35 m³	91.245,03 m³	90.819,32 m³	90.722,37 m³
Amostra 33	220.690,68 m³	221.806,95 m³	221.214,60 m³	221.169,16 m³
Amostra 34	1.179,98 m³	1.242,90 m³	1.227,36 m³	1.222,48 m³
Amostra 35	325.699,38 m³	329.188,27 m³	329.015,04 m³	329.166,22 m³
Amostra 36	130.374,33 m³	128.967,04 m³	128.492,89 m³	128.765,77 m³

Fonte: autor, 2024

Tabela 3 – Resultados de Aterros para os métodos adotados

Amostras	Aterro - Seção 20m	Aterro - Seção 10m	Aterro - Seção 05m	Aterro por interpolação
Amostra 01	313.020,31 m³	314.498,63 m³	314.412,20 m³	313.945,02 m³
Amostra 02	12.012,77 m³	11.559,23 m³	11.410,63 m³	11.377,65 m³
Amostra 03	17.608,44 m³	17.010,41 m³	16.793,17 m³	16.652,23 m³
Amostra 04	188.288,18 m³	191.356,41 m³	191.233,78 m³	191.255,42 m³
Amostra 05	11.688,37 m³	12.013,44 m³	11.890,91 m³	11.944,29 m³
Amostra 06	53.853,04 m³	54.845,14 m³	54.947,64 m³	54.670,16 m³
Amostra 07	263.846,46 m³	263.163,39 m³	262.817,94 m³	262.570,37 m³
Amostra 08	132.601,42 m³	132.702,00 m³	132.476,10 m³	132.592,60 m³
Amostra 09	17.275,79 m³	17.731,58 m³	17.579,88 m³	17.574,55 m³
Amostra 10	255.259,91 m³	253.781,44 m³	253.062,76 m³	253.023,59 m³
Amostra 11	190.405,51 m³	194.171,30 m³	193.746,10 m³	193.818,20 m³
Amostra 12	107.127,94 m³	109.529,10 m³	108.426,78 m³	108.091,91 m³
Amostra 13	33.985,04 m³	34.017,91 m³	33.977,83 m³	33.948,81 m³
Amostra 14	120.925,37 m³	123.773,82 m³	124.883,47 m³	124.959,76 m³
Amostra 15	19.522,64 m³	20.344,55 m³	20.505,77 m³	20.600,68 m³
Amostra 16	2.421,87 m³	2.473,52 m³	2.486,69 m³	2.481,54 m³
Amostra 17	26,39 m³	32,10 m³	29,53 m³	28,31 m³
Amostra 18	88.453,97 m³	88.726,73 m³	88.673,82 m³	88.646,46 m³
Amostra 19	111.823,33 m³	111.058,50 m³	111.211,93 m³	111.254,90 m³
Amostra 20	31.666,33 m³	31.630,14 m³	31.910,38 m³	31.804,10 m³
Amostra 21	17.027,63 m³	16.419,52 m³	16.718,52 m³	16.652,23 m³
Amostra 22	80.049,30 m³	79.571,69 m³	79.587,55 m³	79.631,03 m³
Amostra 23	159.409,93 m³	160.501,94 m³	160.989,91 m³	160.935,07 m³
Amostra 24	47.361,15 m³	46.993,27 m³	46.782,54 m³	46.809,69 m³
Amostra 25	23.385,31 m³	22.298,06 m³	21.864,34 m³	21.837,37 m³
Amostra 26	333.869,11 m³	332.467,30 m³	332.071,73 m³	332.464,23 m³
Amostra 27	16.162,65 m³	16.737,97 m³	16.614,37 m³	16.685,69 m³
Amostra 28	29.448,44 m³	29.162,71 m³	29.220,94 m³	29.297,83 m³
Amostra 29	11.856,89 m³	11.262,49 m³	11.405,36 m³	11.377,65 m³
Amostra 30	130.250,56 m³	132.543,63 m³	132.737,83 m³	132.592,60 m³
Amostra 31	53.437,75 m³	54.297,20 m³	54.408,85 m³	54.670,16 m³
Amostra 32	15.997,01 m³	16.554,86 m³	16.628,65 m³	16.685,68 m³
Amostra 33	210.866,80 m³	212.041,67 m³	210.930,08 m³	210.502,86 m³
Amostra 34	1.173,97 m³	830,28 m³	966,78 m³	1.012,56 m³
Amostra 35	23.785,03 m³	23.539,12 m³	23.615,76 m³	23.606,44 m³
Amostra 36	75.328,29 m³	77.333,19 m³	77.951,56 m³	77.987,75 m³

Fonte: autor, 2024

Conforme esperado, os valores para corte e aterro obtidos pelos métodos das seções convergem para o valor obtido pelo método de interpolação.

A amostra 34 para Aterros da Tabela 3 é um bom exemplo para avaliar a credibilidade dos dados obtidos pelo método das seções, uma vez que é possível notar a flutuação dos valores obtidos para as seções de 20, 10 e 5 metros. O valor de aterro para seções de 20 metros foi de 1.173,97 m³, nas seções de 10 metros 830,28 m³, nas seções de 5 metros 966,78 m³. Por fim, o volume real obtido pelo método de interpolação é de 1.012,56 m³. Tal amostra demonstra como não há correlação no valor obtido ser superior ou inferior ao volume real, uma vez que as médias calculadas entre seções podem gerar volumes inferiores ou superiores ao real.

Já a amostra 2 para cortes da Tabela 2 evidencia como, por aleatoriedade, é possível alcançar um resultado quase que perfeito mesmo para seções de 20 metros,

na qual se imagina que a variação de volume será maior. O valor de corte para seções de 20 metros foi de 134.224,68 m³, nas seções de 10 metros 133.976,28 m³, nas seções de 5 metros 134.165,32 m³. Por fim, o volume real obtido pelo método de interpolação é de 134.258,07 m³. Nessa amostra, o resultado obtido por meio das seções com 20 metros de espaçamento obteve o valor mais próximo do volume observado pelo método de interpolação.

4.1 VOLUMES DE BOTA-FORA E ATERRO

Ao planejar projetos de terraplenagem, os valores de corte e aterro podem ser analisados para verificar se estão próximos do esperado. No entanto, é fundamental calcular o volume de bota-fora quando o volume de corte supera o de aterro, ou o volume de material necessário para aterrar caso o aterro exceda o corte. O ideal é equilibrar esses volumes, tornando a obra autossuficiente e minimizando a necessidade de transporte de grandes quantidades de terra para fora ou para o local do projeto.

A seguir, serão analisados os volumes finais das amostras, considerando os valores de bota-fora ou aterro. Para isso, serão utilizados os dados do cumulativo da diferença de corte/aterro obtidos pelo método das seções, bem como os valores calculados pelo método de interpolação.

Com esse intuito, foi necessário fazer a diferença de corte e aterro para cada amostra e calcular o quanto falta para alcançar o volume final obtido pelo método das seções. Para maior compreensão, será explicado o cálculo para Amostra 1 na coluna “20 m para sobreposição”.

Pelo método das seções em 20 metros para a Amostra 1:

- Corte: 406.118,71 m³
- Aterro: 313.020,31 m³

A diferença dos dois valores resulta em 93.098,40 m³ de bota-fora.

Volumes obtidos pelo método de interpolação de MDTs para a Amostra 1:

- Corte: 401.404,53 m³
- Aterro: 313.945,02 m³

A diferença dos dois valores resulta em 87.459,51 m³ de bota-fora.

A diferença entre os volumes obtidos pelo método das seções de 20 metros e pelo método de interpolação é de 5.638,89 m³. Esse valor representa o erro volumétrico ao utilizar o método das seções de 20 metros para a amostra, gerando impactos negativos na logística da obra de terraplenagem.

Diferenças como essa podem afetar a obra de várias formas, exigindo a revisão de processos burocráticos, como declarações de bota-fora ou aquisição de solos, o que pode atrasar a execução e entrega do projeto.

Na Tabela 5, o mesmo cálculo descrito acima foi repetido em cada uma das 36 amostras utilizando os respectivos valores para cada situação, para obter os volumes finais de cada amostra, utilizando os métodos para seções de 20, 10 e 5 metros e anotando o quanto se distanciam dos volumes obtidos pelo método de interpolação.

Tabela 4 – Tabela com os valores do Gráfico 2

Amostras	20 m para Sobreposição	10 m para Sobreposição	05 m para Sobreposição
Amostra 01	5.638,89 m³	708,70 m³	243,16 m³
Amostra 02	668,50 m³	463,37 m³	125,73 m³
Amostra 03	775,36 m³	10,75 m³	233,45 m³
Amostra 04	1.425,46 m³	886,08 m³	227,81 m³
Amostra 05	584,66 m³	32,92 m³	9,60 m³
Amostra 06	300,38 m³	430,00 m³	393,89 m³
Amostra 07	610,82 m³	315,29 m³	181,70 m³
Amostra 08	1.313,65 m³	116,89 m³	43,76 m³
Amostra 09	1.303,14 m³	233,00 m³	76,69 m³
Amostra 10	2.240,23 m³	763,64 m³	38,84 m³
Amostra 11	5.520,89 m³	832,07 m³	235,38 m³
Amostra 12	3.068,19 m³	1.559,13 m³	517,00 m³
Amostra 13	2.126,30 m³	842,99 m³	71,52 m³
Amostra 14	6.116,47 m³	1.722,78 m³	28,59 m³
Amostra 15	2.300,78 m³	117,79 m³	102,43 m³
Amostra 16	33,23 m³	6,38 m³	8,48 m³
Amostra 17	78,36 m³	254,02 m³	13,06 m³
Amostra 18	1.743,16 m³	350,34 m³	47,65 m³
Amostra 19	574,81 m³	198,61 m³	44,71 m³
Amostra 20	2.108,24 m³	1.822,37 m³	60,30 m³
Amostra 21	416,12 m³	318,20 m³	180,50 m³
Amostra 22	3.813,00 m³	518,23 m³	86,29 m³
Amostra 23	6.944,13 m³	767,54 m³	1,92 m³
Amostra 24	682,96 m³	32,52 m³	32,35 m³
Amostra 25	1.568,14 m³	184,14 m³	19,67 m³
Amostra 26	1.308,06 m³	509,76 m³	415,42 m³
Amostra 27	1.202,16 m³	579,01 m³	209,14 m³
Amostra 28	887,05 m³	93,10 m³	141,73 m³
Amostra 29	1.886,25 m³	1.100,85 m³	203,69 m³
Amostra 30	2.428,72 m³	19,08 m³	178,20 m³
Amostra 31	78,16 m³	80,56 m³	113,85 m³
Amostra 32	1.340,65 m³	653,48 m³	153,98 m³
Amostra 33	842,42 m³	901,02 m³	381,78 m³
Amostra 34	203,90 m³	202,70 m³	50,66 m³
Amostra 35	3.645,43 m³	89,37 m³	160,50 m³
Amostra 36	4.268,02 m³	855,83 m³	236,69 m³

Fonte: autor (2024).

Os valores observados na Tabela 4 são a diferença do volume final para cada projeto de terraplenagem por cada espaçamento de seção quando comparados ao volume real obtido pelo método de interpolação.

As amostras 1, 11, 14 e 23 apresentam erros na determinação do volume final do projeto ao utilizar o método de seções a cada 20 metros, superando a marca de

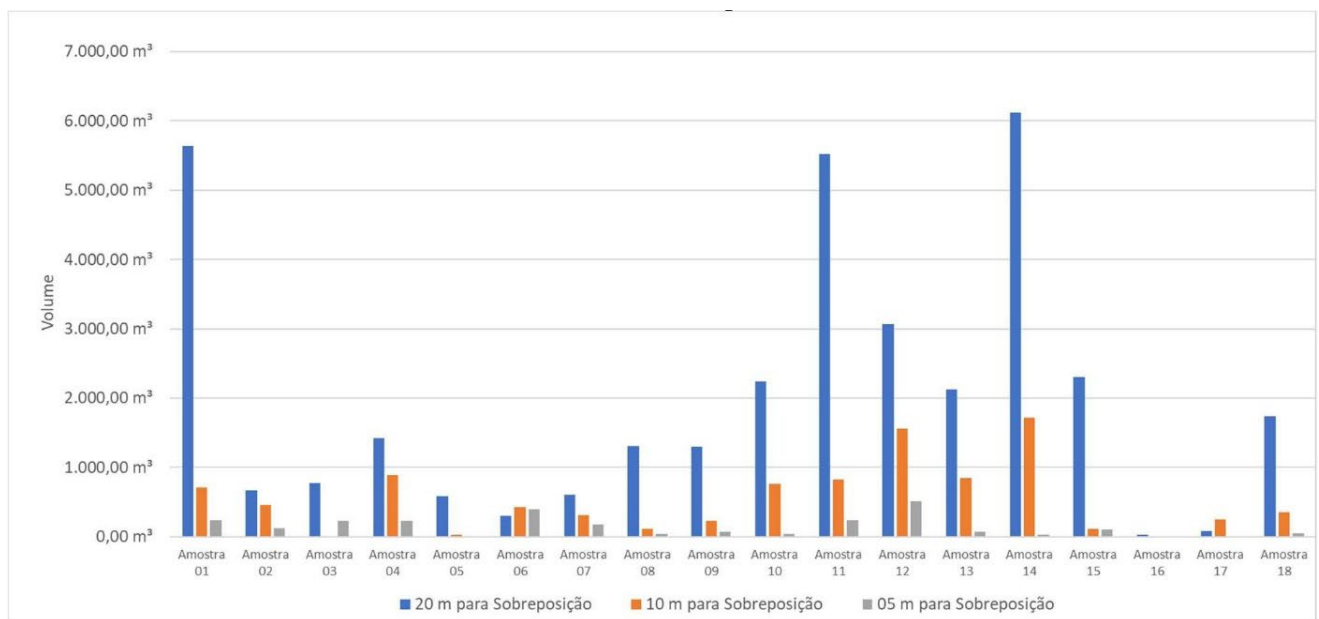
5.000 m³, enquanto essas mesmas amostras, utilizando seções de 5 metros, apresentam respectivamente erros de 243,16 m³, 235,38 m³, 28,59 m³ e 1,92 m³.

Para o porte das obras analisadas, um erro de 5.000 m³ é totalmente inviável, pois o volume do caminhão que faz transporte desses materiais costuma ser de 20 m³ e, desconsiderando empolamento, 250 viagens de caminhão para movimentar esses volumes atrapalharia muito no desenvolvimento da obra.

Porém, como o cunho das amostras utilizadas não é de obras rodoviárias, e sim de obras com considerável variabilidade, os valores para as seções de 10 e 5 metros tornam-se de maior interesse.

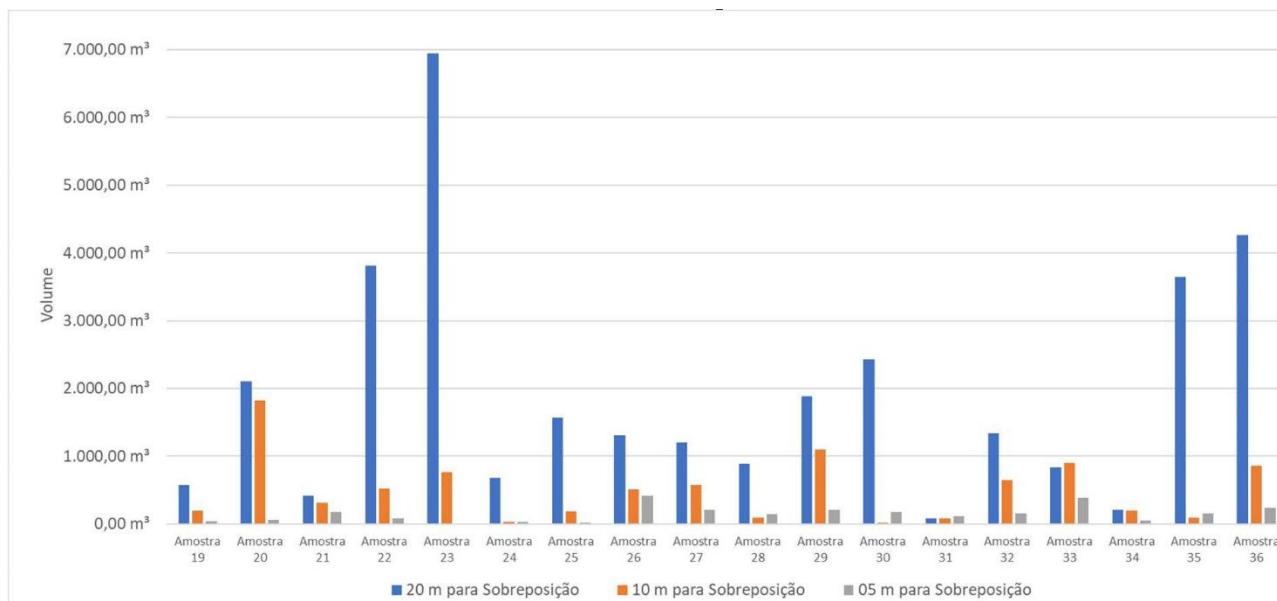
A fim de facilitar a visualização dos valores obtidos na Tabela 4, foram gerados os Gráficos 1 e 2, que foram assim divididos para facilitar a leitura dos dados, permitindo maior facilidade de interpretação para discussão.

Gráfico 1 – Variação de volumes para amostras 1 a 18



Fonte: autor (2024).

Gráfico 2 – Variação de volumes para amostras 19 a 36



Fonte: autor (2024).

A amostra 12 apresenta queda de 1.559,13 m³ para 517,00 m³, reduzindo o erro em cerca de três vezes ao adotar o intervalo de 5 metros em vez de utilizar seções a cada 10 metros.

A amostra 20 apresenta queda de 1.822,37 m³ para 60,30 m³, reduzindo drasticamente o erro ao adotar o intervalo de 5 metros em vez de utilizar seções a cada 10 metros.

Para o método das seções com 20 metros de distância, foi observado:

- Erro máximo = 6.944,13 m³ - Amostra 23.
- Erro médio = 1.945,74 m³.
- Erro mínimo = 33,23 m³ - Amostra 16.

Para o método das seções com 10 metros de distância, foi observado:

- Erro máximo = 1.822,37 m³ - Amostra 20.
- Erro médio = 515,90 m³.
- Erro mínimo = 6,38 m³ - Amostra 16.

Para o método das seções com 5 metros de distância, foi observado:

- Erro máximo = 517,00 m³ - Amostra 12.
- Erro médio = 146,39 m³.
- Erro mínimo = 1,92 m³ - Amostra 23.

Observando os valores máximos, médios e mínimos obtidos a partir dos dados da Tabela 4 para cada espaçamento do método de seções adotado, nota-se que a média dos erros para seções com 5 metros de espaçamento é a menor dentro dos intervalos analisados. E que o erro máximo para seções de 5 e 10 metros possui valores similares ao erro médio obtido respectivamente pelas seções de 10 e 20 metros.

4.2 PERCENTUAL DE ERRO ENTRE OS MÉTODOS

No Brasil, a determinação do erro máximo permitido para os volumes de terraplenagem não é regida por uma norma técnica específica que estabeleça valores fixos para a tolerância. Em projetos de terraplenagem, é comum considerar tolerâncias de 2% a 6% nos volumes, dependendo do tipo de obra, equipamentos utilizados e controle de qualidade.

A Tabela 5 demonstra o erro relativo aos volumes da Tabela 4. Assim, foi comparado o volume de erro com a diferença do corte e aterro pelo método de interpolação. Para maior compreensão, será explicado o cálculo para Amostra 1 na coluna “Erro método 20 m”.

- Volume de erro para Amostra 1 em 20 metros: 5.638,89 m³
- Volume de bota-fora para Amostra: 87.459,51 m³

$$\text{Erro 20 metros} = \frac{\text{Volume de erro para Amostra 1 em 20 metros}}{\text{Volume de bota - fora para Amostra}} \times 100$$

$$\text{Erro 20 metros} = \frac{5.638,89 \text{ m}^3}{87.459,51 \text{ m}^3} \times 100$$

$$\text{Erro 20 metros} = 6,45 \%$$

O presente cálculo foi replicado utilizando os volumes de erro e volumes de bota-fora e aterro correspondentes às suas amostras.

Tabela 5 – Tabela com os valores do Gráfico 1

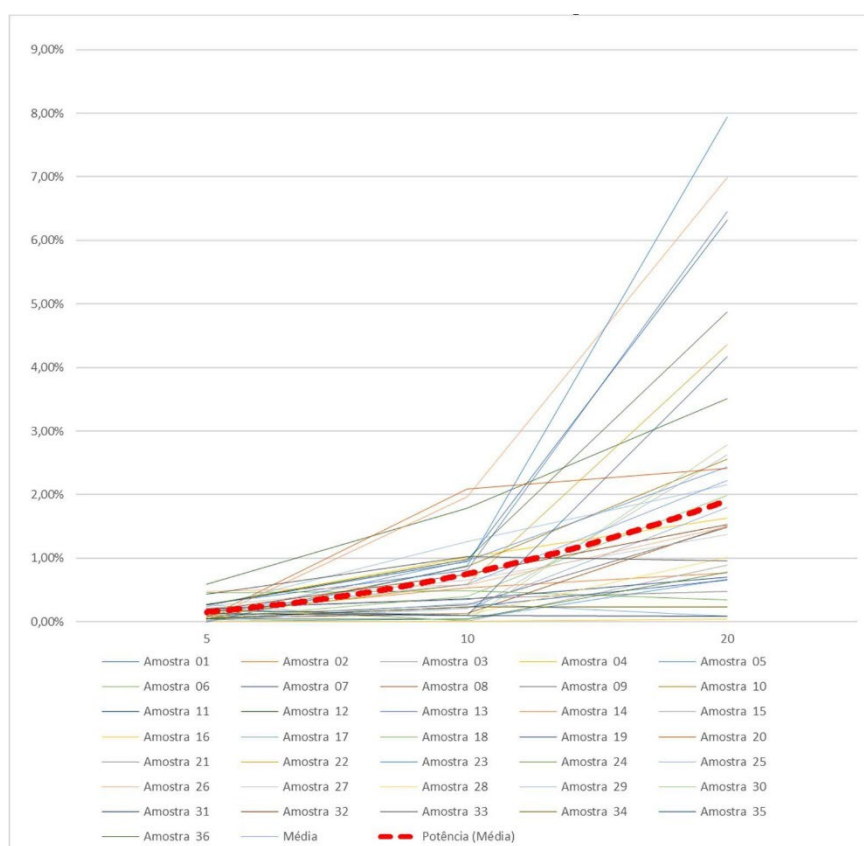
Amostras	Erro método 5m	Erro método 10m	Erro método 20m
Amostra 01	0,28%	0,81%	6,45%
Amostra 02	0,14%	0,53%	0,76%
Amostra 03	0,27%	0,01%	0,89%
Amostra 04	0,26%	1,01%	1,63%
Amostra 05	0,01%	0,04%	0,67%
Amostra 06	0,45%	0,49%	0,34%
Amostra 07	0,21%	0,36%	0,70%
Amostra 08	0,05%	0,13%	1,50%
Amostra 09	0,09%	0,27%	1,49%
Amostra 10	0,04%	0,87%	2,56%
Amostra 11	0,27%	0,95%	6,31%
Amostra 12	0,59%	1,78%	3,51%
Amostra 13	0,08%	0,96%	2,43%
Amostra 14	0,03%	1,97%	6,99%
Amostra 15	0,12%	0,13%	2,63%
Amostra 16	0,01%	0,01%	0,04%

Amostra 17	0,01%	0,29%	0,09%
Amostra 18	0,05%	0,40%	1,99%
Amostra 19	0,05%	0,23%	0,66%
Amostra 20	0,07%	2,08%	2,41%
Amostra 21	0,21%	0,36%	0,48%
Amostra 22	0,10%	0,59%	4,36%
Amostra 23	0,00%	0,88%	7,94%
Amostra 24	0,04%	0,04%	0,78%
Amostra 25	0,02%	0,21%	1,79%
Amostra 26	0,47%	0,58%	1,50%
Amostra 27	0,24%	0,66%	1,37%
Amostra 28	0,16%	0,11%	1,01%
Amostra 29	0,23%	1,26%	2,16%
Amostra 30	0,20%	0,02%	2,78%
Amostra 31	0,13%	0,09%	0,09%
Amostra 32	0,18%	0,75%	1,53%
Amostra 33	0,44%	1,03%	0,96%
Amostra 34	0,06%	0,23%	0,23%
Amostra 35	0,18%	0,10%	4,17%
Amostra 36	0,27%	0,98%	4,88%

Fonte: autor (2024).

Com base nos dados calculados para a Tabela 5, foi gerado o Gráfico 3 para visualização da queda do erro em percentual com o decréscimo do intervalo entre seções.

Gráfico 3 – Percentual de erros observados para cada seção



Fonte: autor (2024).

A linha tracejada em vermelho do Gráfico 3 é a linha de tendência gerada com base na média do erro obtido das amostras (última linha da Tabela 5). A linha com comportamento de potência possui a fórmula:

$$y = 0,00165500690534789 * X^{1,86620458076543}$$

A fórmula visa determinar o erro em “Y” a partir da distância entre seções representada por “X”. De tal modo, é possível determinar o intervalo entre seções para o caso de o método de seções ser empregado na determinação de volumes de terraplenagem.

O R-quadrado, ou coeficiente de determinação, mede a proximidade dos dados à linha de regressão. Com um valor $R^2 = 0,999770780983731$, próximo de 1, a fórmula utilizada permite estimar o valor para erros entre cinco e vinte metros das seções e, possivelmente, valores fora desse intervalo.

Com a fórmula podendo ser utilizada para descobrir tanto valores de X quanto de Y, e possuindo R-quadrado confiável, é possível buscar o distanciamento entre seções para alcançar a tolerância de erros entre 2% a 6%.

Para erros (Y) de 2%, obtemos a distância entre seções (X):

$$X = 3,80\text{metros}$$

Para erros (Y) de 6%, obtemos a distância entre seções (X):

$$X = 6,84\text{metros}$$

Logo, é possível estimar que, utilizando distâncias entre seções no intervalo entre 3,80 metros e 6,84 metros, o erro na determinação estará na faixa de tolerância de 2% a 6%.

Tais estimativas são baseadas nos erros obtidos para volumes de corte e aterro quando comparados com os valores obtidos pelo método de interpolação de superfícies.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de interpolação de modelos digitais de terreno no Civil 3D destaca-se por sua maior precisão na definição de volumes de corte e aterro, sendo ideal para calcular volumes movimentados. Esse método compara os MDTs de forma abrangente, eliminando a dependência de valores médios por intervalos.

Embora prefeituras e órgãos ambientais exijam a utilização de seções transversais para validação de projetos de terraplenagem, recomenda-se adotar a interpolação de MDTs para estimar volumes internos, bota-fora ou aterros com materiais externos.

Uma vez que os MDTs das 36 amostras analisadas não pertencem a obras rodoviárias, esperava-se que o desempenho para seções com distâncias de 20 metros entre si não fosse bom, e com erro máximo de 6.944,13 m³ e médio de 1.945,74 m³, tornou-se inviável sua utilização. As seções de 10 e 5 metros obtiveram bons resultados, com destaque para as seções a cada 5 metros, com erro máximo de 146,39 m³.

Dada a impossibilidade da utilização de *softwares* de modelagem topográfica BIM para determinação de volumes de cortes e aterros pelo método de interpolação, é possível adotar o distanciamento entre seções de 5 metros utilizados para terrenos irregulares. Essa distância se encontra no intervalo determinado entre 3,80 e 6,84 metros, encontrados visando manter o erro para determinação de volumes entre 2% e 6%.

Para resultados mais precisos, é fundamental realizar um levantamento de alta qualidade do terreno primitivo, utilizando tecnologias como LiDAR ou triangulação de imagens capturadas por drones. Essas ferramentas produzem malhas tridimensionais precisas que, ao serem trianguladas, representam com fidelidade o terreno.

A elaboração dos projetos também exige rigor. O MDT ajustado deve representar vias, platôs, cortes, bermas e aterros de forma precisa, pois cotas incorretas podem causar alterações significativas nos volumes de terraplenagem.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se explorar diferentes intervalos entre seções, além dos três analisados, para aumentar a precisão na determinação de fórmulas de cálculo de erro relacionadas ao distanciamento entre seções. Ademais, deve-se avaliar a relação do erro em casos extremos, considerando parâmetros como a área do projeto, o comprimento do alinhamento e a distância entre perfis transversais.

REFERÊNCIAS

- ADDOR, M. *et al.* (coord.) Fluxo de projetos BIM: planejamento e execução. **Boas práticas em BIM**, [S.l.], fascículo 2, agosto 2015. Disponível em: <https://www.asbeasc.org.br/newsite/wp-content/uploads/BIM2.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2024.
- ARSENAULT, P. J., **Building information modeling (BIM) and manufactured complementary building products: integrating design, drawings, specifications, and shop drawings in a BIM model**. Dezembro 2009. Disponível em: http://continuingeducation.construction.com/article_print.php?L=192&C=622&P=4. Acesso em: 5 dez. 2024.
- CERQUEIRA, F. C. Programa para o cálculo de volumes de terraplenagem dos projetos de estradas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 6, n. 1, p. 1-8, ago. 1985. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/1401>. Acesso em: 5 dez. 2024.
- COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de laser scanner aerotransportado em área de floresta usando o *software* livre GRASS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais[...]**... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3653-3660. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.13.15/doc/thisInformationItemHo mePage.html>. Acesso em: 20 out. 2024.
- CORRÊA, Iran C. S. **Topografia aplicada à engenharia civil**. 20. ed. Porto Alegre: Departamento de Geodésia – IG/UFRGS, 2021.
- EASTMAN, C. *et al.* **Manual de BIM**: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- FELISBINO B. S.; GUERRERO Y.; BARRA B. Utilização da tecnologia lidar em aplicações da engenharia civil. In: **Anais [...]**. Do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento.
- REMOTO, 2019, Santos. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/trabalhos/utilizacao-da-tecnologia-lidar-em-aplicacoes-da-engenharia-civil?lang=pt-br> Acesso em: 7 dez. 2024.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C.; **Digital terrain modeling: principles and methodology**. Washington D.C.: CRC Press, 2004.
- MEDINA, A. S.; MEDINA, S. da S. S. **A Representação da superfície topográfica através de modelos digitais de terreno**. [S.l.], [s.n.], [19--]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267992340_A_REPRESENTACAO_DA_SUPERFICIE_TOPOGRAFICA_ATRAVES_DE_MODELOS_DIGITAIS_DE_TERRENO. Acesso em: 20 out. 2024.
- LOURÃO, A.C.M; ROCHA, C.H.B. **Desmistificando os aplicativos microstation**: Guia prático para usuários em geoprocessamento. Petrópolis: Os Autores, 2001.
- RAZA, M. A. *et al.* A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 123, n. 2, 2023, p. 53-62. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.saimm.co.za/Journal/v123n2p53.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2024.

REIS, F. F. P. Aplicação do bim em projetos: estudo de caso em uma residência unifamiliar de pequeno porte.

GETEC, v. 10, n. 33, p. 101-121, 2021.

Disponível em:

<https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2564>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ROCHA, C.H.B. **Geoprocessamento tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: Edição do Autor, 2000.

SCHAFER, A.G.; LOCH, R.E.N. Aplicação do sensoriamento remoto em projetos rodoviários: um histórico, uma realidade e uma necessidade como disciplina em cursos de engenharia. *In*: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia, 2005. **Anais** [...]. Goiânia, INPE, 2005. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.13.12.45/doc/1361.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.