

## CONTROLE DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE ESTATÍSTICA DE UMA NUVENS DE PONTOS PARA BIM ESTRUTURAL AS-BUILT

Rubens L. Lopes<sup>1</sup>, Brismark G. da Rocha<sup>2</sup> e Bráulio B. Soares<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Multidisciplinary Technologies, Technological University Dublin, Dublin, Ireland*

<sup>2,3</sup>*Departamento de Ciência e Tecnologia, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazil*

**Palavras-chave:** BIM, Varredura a laser, Nuvem de pontos, Estatística, Controle de qualidade, Engenharia Civil.

**Resumo.** As técnicas tradicionais de controle de qualidade em canteiros de obras são demoradas e difíceis, envolvendo várias inspeções e comunicação entre os envolvidos. Detectar falhas cedo é essencial para evitar desperdícios. A modelagem de informação de construção (*Building Information Modeling* – BIM) está revolucionando a construção civil, especialmente com a tecnologia de nuvem de pontos, que permite um controle de qualidade em tempo real e mais eficiente. Neste contexto, o presente estudo analisou a precisão na construção de diferentes elementos de uma edificação, incluindo colunas, paredes, pisos e vigas, utilizando medições detalhadas e testes estatísticos. Nas colunas, a maioria das medições mostrou intervalos de confiança estreitos, exceto por uma face, sugerindo um possível erro sistemático na construção. Testes *t*-Student revelaram diferenças significativas entre várias comparações de médias das faces. Nas paredes, os intervalos de confiança foram estreitos, com uma distribuição equilibrada entre valores positivos (deformações que se projetam para fora das superfícies planejadas) e negativos (deformações que se projetam para dentro das superfícies planejadas), embora os testes indicassem diferenças significativas na maioria das comparações de médias. Nos pisos, observou-se uma tendência de construção preferencialmente positiva, com alguns intervalos de confiança estreitos e faces alinhadas, e diferenças significativas entre muitas médias. Para as vigas, a quantidade limitada de amostras dificultou conclusões definitivas, mas os testes indicaram diferenças significativas entre as médias de algumas faces. O estudo, portanto, identificou tendências de construção preferencialmente positiva nas colunas e pisos, com variações significativas nas medições, enquanto as paredes apresentaram um equilíbrio maior. As análises estatísticas destacaram a importância do monitoramento rigoroso para garantir a precisão na edificação das estruturas e corrigir possíveis erros sistemáticos.

---

\*E-mail addresses: [rubenslage@gmail.com](mailto:rubenslage@gmail.com), [brismarkrocha@uern.br](mailto:brismarkrocha@uern.br), [brauliosoares@uern.br](mailto:brauliosoares@uern.br).

## QUALITY CONTROL IN CIVIL CONSTRUCTION: STATISTICAL ANALYSIS OF A POINT CLOUD FOR STRUCTURAL AS-BUILT BIM

**Keywords:** BIM, Laser Scanning, Point Cloud, Statistics, Quality Control, Civil Engineering.

**Abstract.** Traditional quality control techniques on construction sites are time-consuming and challenging, involving multiple inspections and communication among stakeholders. Early detection of flaws is essential to avoid waste. Building Information Modeling (BIM) is revolutionizing civil construction, especially with point cloud technology, which enables real-time and more efficient quality control. In this context, the present study analyzed the construction accuracy of different building elements, including columns, walls, floors, and beams, using detailed measurements and statistical tests. For the columns, most measurements showed narrow confidence intervals, except for one face, suggesting a possible systematic construction error. Student's t-tests revealed significant differences in several face mean comparisons. For the walls, the confidence intervals were narrow, with a balanced distribution between positive values (deformations protruding outward from the planned surfaces) and negative values (deformations intruding inward from the planned surfaces), although the tests indicated significant differences in most mean comparisons. On the floors, a trend toward preferentially positive construction was observed, with some narrow confidence intervals, aligned faces, and significant differences among many means. For the beams, the limited sample size hindered definitive conclusions, but the tests indicated significant differences in the means of some faces. The study therefore identified trends of preferentially positive construction in the columns and floors, with significant variations in measurements, while the walls showed greater balance. The statistical analyses highlighted the importance of rigorous monitoring to ensure structural construction accuracy and to correct possible systematic errors.

## 1 INTRODUÇÃO

As abordagens clássicas para controle de qualidade em canteiros de obras são demoradas e dependem de muitos fatores, incluindo inspeção no local, coleta e análise de metragens de toda ordem, detecção de defeitos, e, até mesmo, da comunicação entre os atores do projeto com os da edificação, isso tudo a fim de se resolver problemas e desvios decorrentes da execução da obra [6].

Identificar defeitos precocemente no processo de construção é crucial, pois parte dos custos de construção são desperdiçados devido a retrabalho de componentes defeituosos detectados tardiamente. Apesar de esforços de pesquisas em sistemas automáticos de detecção de defeitos, as abordagens atuais de levantamento e controle de qualidade são limitadas [12], tornando difícil para os gestores identificar e gerenciar defeitos [11].

*Building Information Modeling* (BIM), ou Modelagem de Informação de Construção, está se tornando uma ferramenta digital indispensável na construção civil, pois está transformando a maneira como projetos são concebidos, gerenciados e executados. Uma das tecnologias-chave que está impulsionando essa transformação é a nuvem de pontos, capturada de forma precisa e detalhada por meio de lasers fornecendo informações tridimensionais de um ambiente físico [7]. Cada ponto da nuvem é uma medida de distância do aparato laser medidor ao objeto construído. Essa nuvem fornece uma base sólida para o desenvolvimento de modelos virtuais de edificações [2, 9]. O uso da Modelagem de Informação de Construção em conjunto com a nuvem de pontos possibilita um controle de qualidade em tempo real melhorando os métodos tradicionais [1, 8, 17].

BIM é um processo colaborativo de gestão de informações ao longo do ciclo de vida da construção, que integra dados geométricos, funcionais e operacionais. A edificação é o resultado físico desse processo. Apesar do suporte que o BIM oferece, podem existir diferenças entre o modelo digital e a obra construída, devido a ajustes e imprevistos na execução [4, 13, 16]. Essas diferenças podem surgir de várias fontes, como imprecisões na modelagem, variações durante a construção ou até mesmo mudanças não documentadas. É aqui que entra a análise estatística das diferenças entre o modelo e a edificação. Ao comparar os dados da nuvem de pontos obtidos durante a construção com o BIM, é possível identificar e quantificar essas disparidades de forma objetiva.

A análise estatística das diferenças entre o modelo e a edificação oferece informações valiosas para os profissionais da construção. Ela permite detectar áreas onde o projeto não foi adequadamente executado, destacar padrões de desvio e fornecer informações críticas para melhorar os processos de construção. Além disso, essa abordagem baseada em dados ajuda a garantir a conformidade com os padrões de qualidade e especificações do projeto. Uma vez que essas diferenças impactam o cronograma, o custo e a qualidade do projeto, uma análise estatística sobre tais diferenças (ou desvios da obra) pode ajudar a mitigar os riscos e otimizar o desempenho na execução de projetos; isso inclui recomendações específicas para ajustes nos processos de modelagem, métodos de captura de dados e/ou práticas de construção. Portanto, uma pesquisa baseada no exposto apresentado acima tem o potencial de oferecer uma série de vantagens significativas para a indústria da construção, ao focar na eficácia da análise estatística das diferenças entre projetos e edificações reais.

A pesquisa agora realizada pode fornecer informações essenciais para impulsionar a melhoria contínua dos processos de construção. O objetivo desta pesquisa é analisar estatisticamente os dados de medidas em abordagens automatizadas para a criação de modelos BIM *as-built*, focando no controle estatístico da qualidade como uma técnica fundamental para garantir a

consistência e a melhoria contínua do processo de edificação envolvido na construção civil.

Especificamente neste trabalho, analisam-se amostras de medidas utilizadas na construção de um desses modelos a fim de determinar suas limitações e variabilidades. Para tanto, é realizado um estudo de caso, a partir de um levantamento [10] de diferenças entre as medidas de um modelo de edificação e o resultado da sua construção. Essas medidas, que constituem exatamente a diferença entre o projeto e o produto da edificação, são analisadas por meio de ferramentas estatísticas como comportamento de médias e variâncias, além da determinação de verossimilhança entre médias (e/ou variâncias) de amostras distintas. Este artigo estrutura-se da seguinte forma usual: contexto, metodologia, resultados e discussões, finalizando com algumas considerações.

## 2 METODOLOGIA

A elaboração das amostras do presente estudo é produto da pesquisa de Lopes e Lamon (2023) [10], que abordou o problema da intervenção ativa na atualização do fluxo de trabalho conforme construído (*as-built*) usando automatização de tarefas via *scripts* de Programação Visual. Tal pesquisa realizou-se cíclica e interativa [3]. Em Lopes e Lamon (2023) [10], as informações sobre posição e desvio do modelo original foram extraídos e analisados utilizando *scripts* de Programação Visual para atualizar parâmetros e coordenadas dos elementos no modelo [9].

A ação de levantamento de dados envolveu Escaneamento a Laser Terrestre (ELT), arquivamento do modelo de projeto - Revit, medição da discrepância entre o modelo de projeto e os pontos na nuvem de pontos, e ajuste dos elementos ao modelo. Os resultados são comparados com as discrepâncias obtidas por software de referência usando os mesmos arquivos de ELT e modelo de projeto. O escopo dos elementos estruturais analisados inclui pisos, paredes, colunas e vigas. A implementação do levantamento seguiu três fases: coleta de dados, processamento, comparação e análise de resultados.

Para a coleta de dados, uma área de 10 m x 30 m x 5 m (veja Figura 1a) com um pavimento dividido em 16 partes, 7 paredes, 8 colunas e 2 vigas foi selecionada como amostra. A área (veja Figura 1b) foi escaneada a laser quatro vezes usando o scanner terrestre Leica P40 ELT, criando uma nuvem de pontos 3D (veja Figura 2). A incerteza de medição para um alcance de 35 metros é de 1,5 milímetros [15, 18].

O desvio de projeto referencial para cada elemento foi obtido do relatório gerado pelo software ClearEdge3D-Verity [14]. Este software analisa a nuvem de pontos em relação ao modelo de projeto, produzindo uma representação 3D do elemento construído. Em seguida, o software mede o desvio entre o elemento projetado e o construído. Os resultados são apresentados em um relatório extenso e detalhado, contendo informações como tradução de medida vertical e horizontal e de rotação do elemento construído em relação ao projeto. Do relatório, apenas a translação cruzada foi considerada, onde o desvio é medido perpendicularmente ao plano do eixo longo do elemento. Essa medida de desvio é o parâmetro agora usado pelo *framework* proposto no presente trabalho.

O processamento dos dados foi realizado utilizando um *script* de Programação Visual, desenvolvido no software Dynamo do Revit 2022. A implementação do *script* visou a realização de sete tarefas principais: leitura de entradas, tradução dessas informações para números, filtragem de pontos não pertencentes ao elemento, medição de desvio do projeto, catalogação desses resultados, medição de tempo de processamento e armazenamento em rede dos resultados.

O *script* processa as informações de entrada a fim de compará-las e analisá-las: verificando elemento repetidos, determinando as coordenadas de cada ponto na nuvem, selecionando pontos

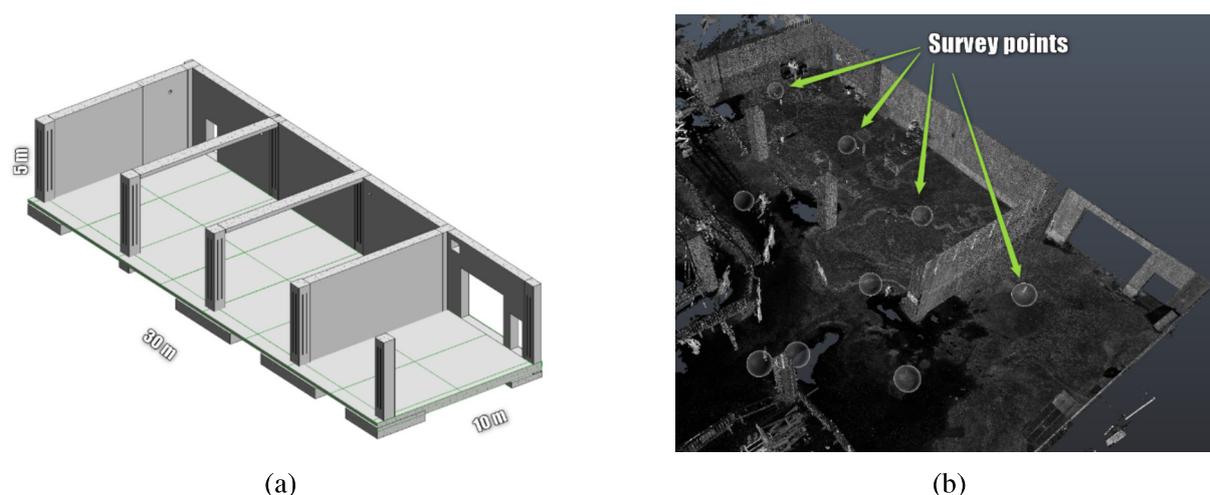


Figura 1: (a) modelo dos elementos da área do arquivo Revit e (b) local dos elementos edificados onde foram realizadas as medições da nuvem de pontos

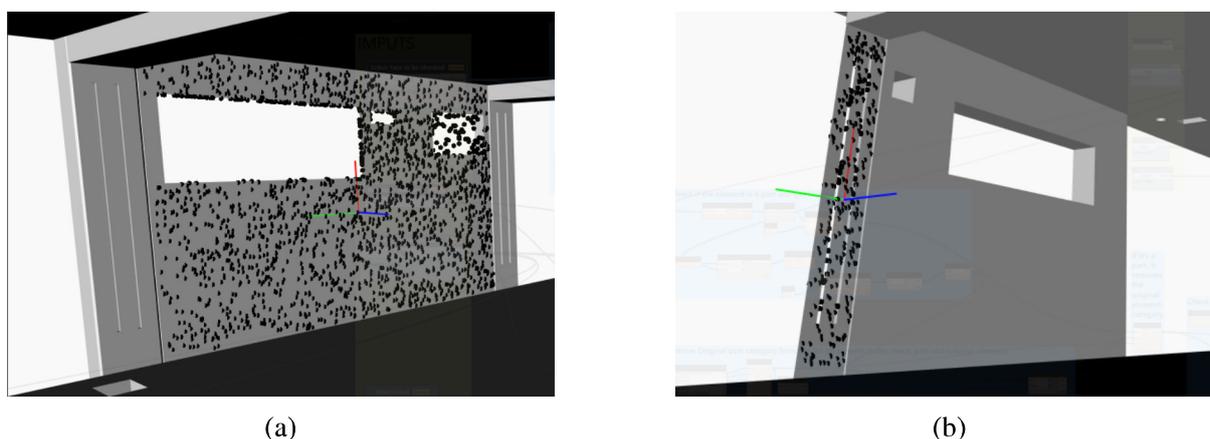


Figura 2: Nuvem de pontos obtidos do escaneamento do elemento edificado incluída no modelo arquitetônico: (a) os pontos em áreas brancas correspondem a medições sobre elementos removidos e (b) sistema de coordenadas movido para o centro de uma face de coluna analisada com o eixo  $z$  representado em azul

próximos à face do elemento, filtrando pontos compartilhados, e medindo a distância de cada ponto da face do elemento analisado [5].

Todo o processo de captação de dados resultou em um levantamento detalhado de uma nuvem de pontos de BIM, incluindo medidas das diferenças entre o modelo virtual e a construção real das faces dos elementos, como colunas estruturais (Structural columns), vigas (Structural framings), paredes (Walls) e pisos (Floors). Esse levantamento é apresentado em diversas tabelas contendo as medidas precisas dessas diferenças. Aqui, é sugerida uma leitura pormenorizada do trabalho de Lopes e Lamon (2023) [10] para um maior detalhamento dos procedimentos realizados e das técnicas e instrumentos utilizados no levantamento dos dados usados na presente pesquisa. Na Tabela 1 é apresentado um extrato desse conjunto de dados para ilustrar essas medições.

Com o conjunto de dados das diferenças entre o projeto e a edificação, foi realizada uma análise estatística das médias para cada amostra de face de elemento construído a fim de estabe-

Tabela 1: Extrato da tabela contendo os valores das medidas de diferenças entre modelo e edificação de faces dos elementos construídos

ELEMENTOS	<i>Structural framing</i>	<i>Structural columns</i>	<i>Walls</i>	<i>Floors</i>
Face <sup>a</sup> do elemento	2672	2635	2889	2691
Mediana das medidas [m]	3,244473	0,220656	0,597659	0,948690
Diferenças entre Modelo e Edificado [m]	0,007469	0,056229	-0,015257	0,009736
	0,005759	-0,019482	0,007742	0,009146
	0,006210	-0,020295	-0,019259	-0,059221

<sup>a</sup> Cada face tem uma numeração para diferenciá-las.

lecer um controle estatístico de qualidade dos vários elementos. Utilizamos o software Statistics versão 12.0 para todos os cálculos estatísticos.

É importante destacar que os valores positivos e negativos das diferenças entre o modelo e o edificado, apresentados na Tabela 1, correspondem, respectivamente, aos conceitos de Construção Positiva e Construção Negativa:

- Construção Positiva: representa as deformações que se projetam para fora das superfícies planejadas, configurando volumes adicionados, saliências ou extensões que ultrapassam os limites definidos no projeto original.
- Construção Negativa: refere-se às deformações que se desenvolvem para dentro das superfícies planejadas, caracterizando reentrâncias, cavidades ou subtrações volumétricas em relação ao contorno estabelecido no modelo.

O controle estatístico da qualidade é uma técnica essencial para assegurar a consistência e aprimoramento contínuo dos processos. Baseia-se na coleta e análise sistemática de dados para identificar variações e tomar medidas corretivas quando necessário. Por meio de ferramentas estatísticas como gráficos de médias de amostras específicas e análise de suas tendências, é possível monitorar a qualidade do processo e minimizar a produção defeituosa.

As amostras foram obtidas de maneira que cada uma representasse as medidas das diferenças modelo-edificado para cada face de um objeto construído. Dessa forma, foram produzidas as amostras das medidas dessas diferenças para as diversas faces de colunas, paredes, pisos e vigas.

Procedeu-se, então, a análise por objetos, de forma que, colunas, paredes, pisos e vigas resultaram em gráficos diferentes. Foram produzidos gráficos de médias com seus respectivos intervalos de 95% de confiança para as amostras das faces de cada objeto.

Em seguida, foi aplicado o teste *t*-Student para verificar a verossimilhança entre médias e o teste *F*-Snedcor para a análise das variâncias de amostras de faces diferentes de cada elemento. O teste *t*-Student determina a probabilidade de observar uma diferença nas médias de duas amostras, se estas fossem da mesma população. Já o teste *F*-Snedcor determina se duas populações possuem variâncias iguais. Importante enfatizar que cada amostra é de uma população de pontos diferentes, ou seja, que cada amostra é oriunda de uma face diferente do elemento. Um *p*-valor baixo obtido no teste sugere uma diferença mais significativa entre as médias (ou variâncias). Os testes determinam, a um nível de significância de 5%, qual das seguintes hipóteses deve ser aceita:

$$H_0 \begin{cases} t\text{-Student: não há diferença significativa entre as médias de amostras de faces distintas.} \\ F\text{-Snedcor: as variâncias são similares.} \end{cases}$$

$$H_1 \begin{cases} t\text{-Student: há diferença significativa entre as médias de amostras de faces distintas.} \\ F\text{-Snedcor: as variâncias não são similares.} \end{cases}$$

Esses testes são importantes ferramentas estatísticas empregadas para determinar se existem disparidades relevantes entre conjuntos de dados amostrais.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das medidas obtidas das diferenças entre o modelo e o edificado, derivadas de nuvem de pontos obtida do escaneamento a laser em um canteiro de obras de uma construção, foram realizadas análises do comportamento estatístico dessas medidas.

A amostra completa consiste em medidas de desvios modelo-construção de várias faces de um elemento edificado. Cada elemento inclui as medições de desvios de suas distintas faces, sendo que cada face contém um número considerável de medições de desvios, obtidas para pontos diferentes da mesma face. Dessa forma, as medições de cada face compõem uma lista e, conseqüentemente, constituem uma amostra individual. Uma síntese dessa amostra é disponibilizada na Tabela 1.

A análise estatística se dá, inicialmente, por estabelecermos as variabilidades das médias das faces para cada elemento estrutural. Posteriormente, determina-se a verossimilhança entre as médias das amostras por meio da aplicação do teste *t*-Student.

Essas análises permitem uma compreensão abrangente e detalhada das variações nos desvios modelo-construção, identificando padrões e tendências que podem ser cruciais para aprimorar a qualidade e a consistência dos processos de construção. Ao integrar diferentes técnicas de análise estatística e visualização de dados, busca-se aprimorar a análise, promovendo maior eficiência e confiabilidade no resultado final da obra. A seguir são apresentados os resultados para cada elemento.

#### 3.1 Colunas

Para a obtenção da amostra de colunas, foram realizadas 11658 medições, distribuídas entre 10 faces diferentes das colunas construídas, resultando cada face numa amostra.

Esses dados foram usados para construir o gráfico da Figura 3, onde o eixo vertical representa valores de diferenças medidas em metros, e o eixo horizontal representa cada face de coluna edificada. O gráfico foi construído com intuito de analisar o comportamento geral das médias das diferenças medidas para cada face das colunas edificadas. Para cada face (ou amostra) foi determinada a média das diferenças e o intervalo de confiança de 95%, representados na Figura 3 pelos pontos (médias) e barras (intervalos de confiança das médias).

Na Figura 3, é possível observar que, de maneira geral, o intervalo de confiança é  $< 10$  mm, com a amostra A4 distoando das demais faces. Verifica-se também que 80% das faces tem médias positivas e 20% negativas, indicando possível erro sistemático na edificação das colunas. Ao se considerar as barras de confiança de cada amostra, embora diminua para 50% o exclusivamente positivo, a suspeita se fortalece pois verifica-se que as colunas são construídas majoritariamente seguindo um sentido preferencial – o positivo. Neste ponto, deve-se ressaltar que, entre os elementos edificados, as colunas são os únicos elementos que possuem faces opostas, e que a suspeita de direção preferencial de suas edificações, portanto, possa não passar disso.

Vale salientar que o erro sistemático citado ocorre quando uma construção, seja positiva ou negativa, se sobrepõe a outra, indicando que a superfície edificada pertence a um elemento

pré-moldado, ou superfície de contenção, que não foi posicionado corretamente, ou, alternativamente, que seu volume apresenta dimensões inferiores ou superiores às previstas no projeto.

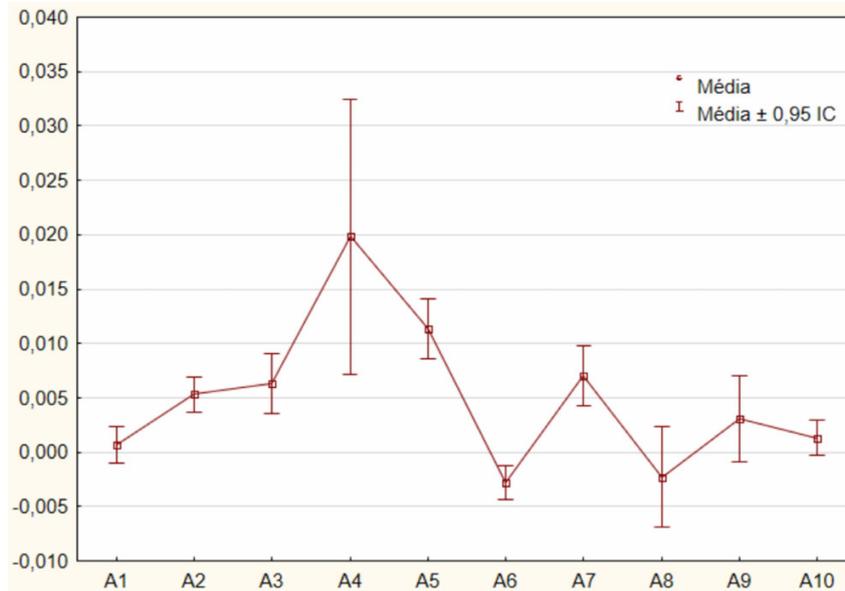


Figura 3: Médias e intervalos de 95% de confiança para as amostras de faces das colunas (*Structural columns*). No eixo das abcissas, tem-se cada uma das faces e, no eixo ordenado, valores médios das diferenças medidas em metros

Foram aplicados, em seguida, os testes para as amostras. Os resultados de cada probabilidade ( $p$ ) das combinações entre duas faces distintas estão listados na Figura 4. Os resultados em vermelhos, marcados com **I**, implicam diferenças relevantes entre amostras.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	■	○	○	I	○	○	○	○	I	○
2	I	■	○	I	I	○	○	○	○	○
3	I	○	■	I	○	○	○	○	○	○
4	I	I	○	■	I	I	I	I	I	I
5	I	I	I	○	■	I	○	○	I	I
6	I	I	I	I	I	■	I	○	○	○
7	I	○	○	○	I	I	■	○	I	○
8	○	I	I	○	I	○	I	■	○	○
9	○	○	○	○	I	I	○	○	■	○
10	○	I	I	I	I	I	I	○	○	■

Médias

Variâncias

Figura 4: Teste  $t$ -Student e  $F$ -Snedcor, respectivamente, para médias e variâncias entre as amostras das faces de colunas (*Structural columns*). Os quadrados vermelhos (marcados com **I**) representam  $p$ -valores menores que 0,05 e aqueles em azul (marcados com **○**) representam  $p$ -valores maiores que 0,05. Abaixo da diagonal principal (quadrados cinzas) da tabela encontram-se os resultados para as médias e, acima dela, para as variâncias

Levando-se em conta os resultados obtidos dos testes, verifica-se que há diferenças significativas (**I** na Figura 4) entre aproximadamente 60% (27 **I**'s entre 45 **I**'s+**○**'s) das médias das

faces comparadas. Esse percentual cai para 36% (16 de 45) quando comparadas com as variâncias das faces. Os resultados dessas variâncias sugerem maior homogeneidade na edificação das colunas, pois as variâncias encontradas são particularmente semelhantes umas às outras, para tais elementos. Concomitante com os resultados das variâncias, um resultado de que a ampla maioria (60%) das médias apresentam diferenças estatisticamente significativas entre as amostras ratifica a suspeita de direção de edificação preferencialmente positiva.

### 3.2 Paredes

Para as amostras de faces de paredes, foram coletadas um total de 17.531 medições, diferentes das paredes construídas, resultando cada face numa amostra. Igualmente como para as amostras de colunas, esses dados foram usados para construir o gráfico da Figura 5, onde o eixo vertical representa valores de diferenças medidas em metros, e o eixo horizontal representa cada face de parede edificada. O gráfico foi construído com intuito de analisar o comportamento geral das médias das diferenças medidas para cada face das paredes edificadas. Para cada face (ou amostra) foi determinada a média das diferenças e o intervalo de 95% de confiança, representados na Figura 5 pelos pontos e barras.

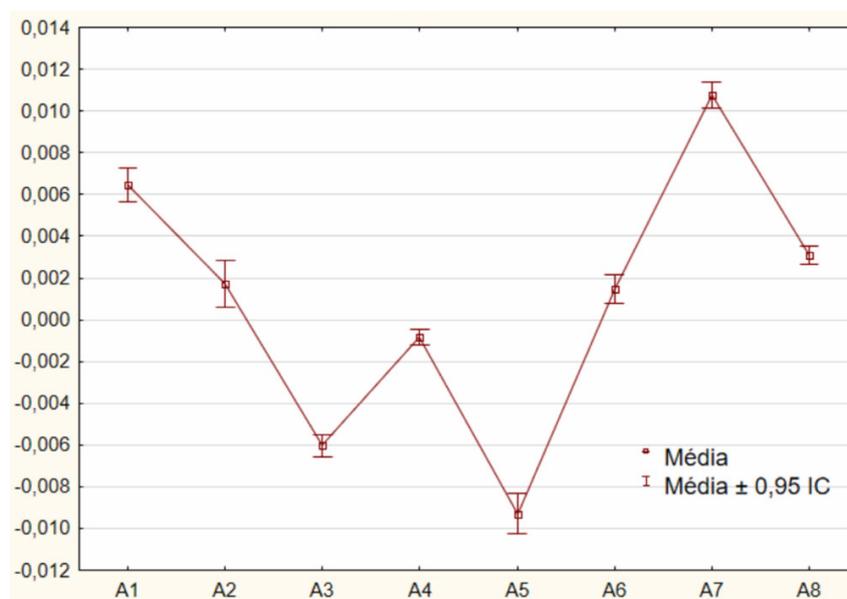


Figura 5: Médias e intervalos de 95% de confiança para as amostras de faces das paredes (*Walls*). No eixo das abcissas, tem-se cada uma das faces e, no eixo ordenado, valores médios das diferenças medidas em metros

Nessa figura observa-se que o intervalo de confiança é  $< 2$  mm. Aqui não é observada face distoando das demais; pelo contrário, parecem bem distribuídas entre valores negativos e positivos. Embora quase 2/3 das faces tenham valores exclusivamente (ver barra de 95% de confiança) positivos, com o restante das faces tendo valores exclusivamente negativos. Isso torna inconclusiva a percepção de alguma preferência de direção de construção.

Os testes comparando duas faces distintas das amostras de paredes resultaram na Figura 6, cujos símbolos em vermelhos (marcados com **I**) representam que o teste encontrou diferenças relevantes entre as faces comparadas.

Os resultados apresentados na Figura 4 indicam que há diferenças significativas (**I**) entre aproximadamente 96% (27 entre 28) das médias das faces comparadas. Esse percentual di-

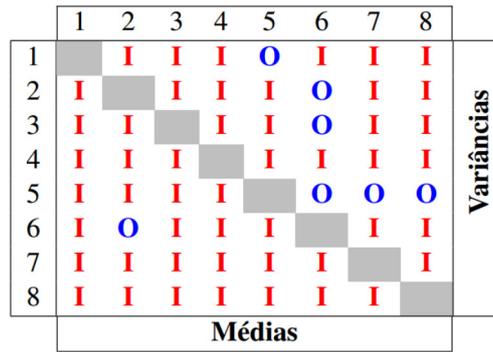


Figura 6: Teste *t*-Student e *F*-Snedcor, respectivamente, para médias e variâncias entre as amostras das faces de paredes (*Walls*). Os quadrados vermelhos (marcados com **I**) representam *p*-valores menores que 0,05 e aqueles em azul (marcados com **O**) representam *p*-valores maiores que 0,05. Abaixo da diagonal principal (quadrados cinzas) da tabela encontram-se os resultados para as médias e, acima dela, para as variâncias

minui para 79% (22 entre 28) quando se a comparação for entre as variâncias das faces. O percentual alto entre as médias aponta para edificações efetivamente distintas de paredes realizadas por possíveis agentes/métodos igualmente diferentes. Os resultados, também distintos, das variâncias corroboram as diferenças cometidas por agentes/métodos da construção.

### 3.3 Pisos

Por sua vez, para a amostra referente aos pisos, foram realizadas 23.464 medições distribuídas em 24 amostras distintas.

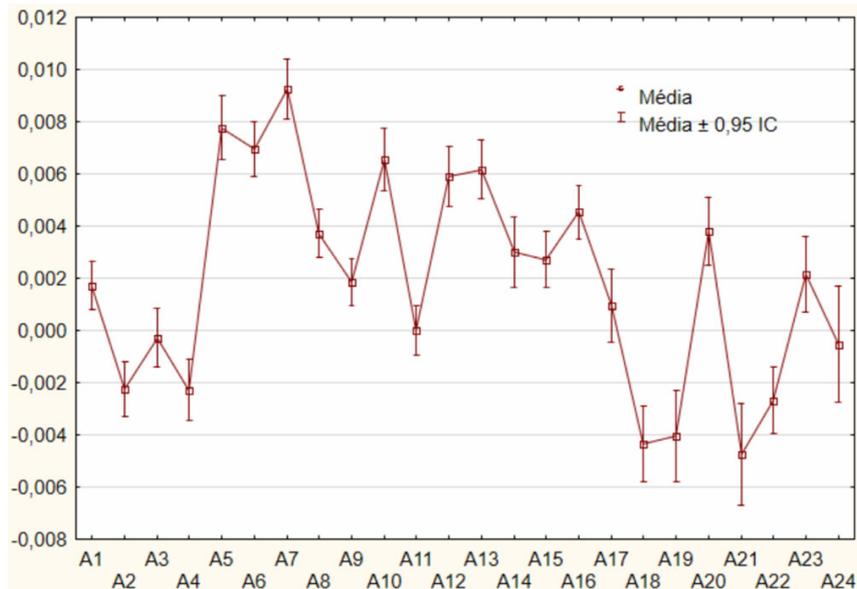


Figura 7: Médias e intervalos de 95% de confiança para as amostras de faces das pisos (*Floors*). No eixo das abcissas, tem-se cada uma das faces e, no eixo ordenado, valores médios das diferenças medidas em metros

Observa-se, na Figura 7, que o intervalo de confiança é  $< 4$  mm. Aqui quatro faces (A3,

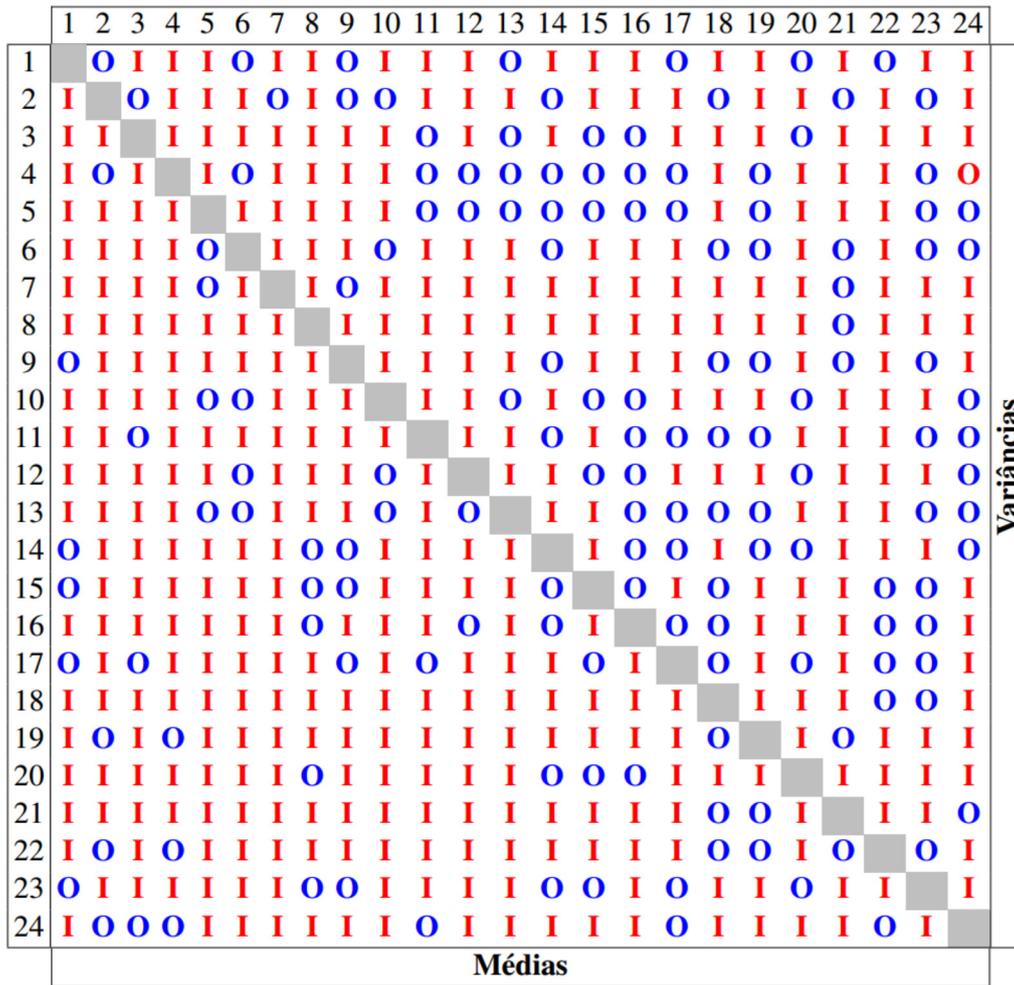


Figura 8: Teste *t*-Student e *F*-Snedcor, respectivamente, para médias e variâncias entre as amostras de 24 faces de pisos. Os quadrados vermelhos (marcados com **I**) representam *p*-valores menores que 0,05 e aqueles em azul (marcados com **O**) representam *p*-valores maiores que 0,05. Abaixo da diagonal principal (quadrados cinzas) da tabela encontram-se os resultados para as médias e, acima dela, para as variâncias

A11, A17 e A24) foram edificadas com perfeição, uma vez que são as únicas amostras com intervalo de confiança envolvendo diferença zero entre modelo e edificado. Ademais dos reduzidos intervalos de confiança, e das quatro faces construídas perfeitamente, é observado, na Figura 7, que parece haver uma direção preferencial de edificação para os pisos. É possível observar 14 faces exclusivamente positivas entre as 24 amostras, correspondendo a um percentual de aproximadamente 58%, enquanto as faces exclusivamente negativas correspondem a 25% do total.

Os resultados dos testes para as comparações entre duas faces distintas das amostras de pisos mostram que aproximadamente 80% (221 de 276 comparações) das médias das faces realmente diferem entre si (Figura 8). Já para as variâncias, o percentual de distinção significativa é de aproximadamente 64% (176 de 276) entre amostras das faces.

O percentual alto entre as médias, e entre as variâncias, das faces distintas dos pisos assegura que suas edificações envolvem agentes/métodos construtivos com resultados efetivamente dis-

tintos, muito embora isso possa não contribuir negativamente para a construção como um todo devido ao intervalo de confiança ser relativamente estreito.

### 3.4 Vigas

Observando a Figura 9, não é possível concluir que o processo de construção das vigas esteja sob controle devido à existência de apenas três amostras, o que dificulta a análise. Mas, é possível observar uma semelhança de comportamento entre as médias das amostras das faces 1 e 2 que as diferenciam da média da amostra da face 3.

Apesar de existirem diversas medições de desvios, devido à disponibilidade limitada de amostras (faces) para vigas, não é possível afirmar categoricamente se suas edificações têm direção preferencial.

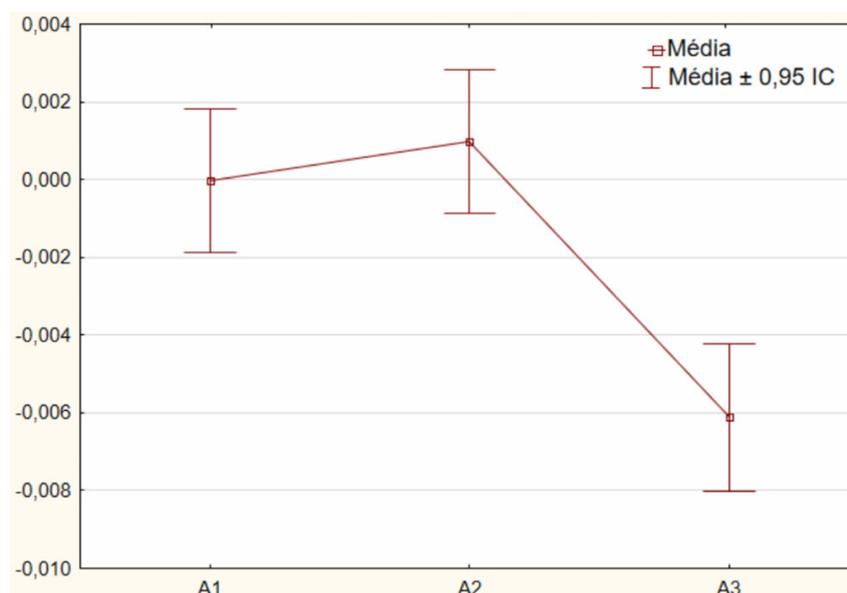


Figura 9: Médias e intervalos de 95% de confiança para as amostras de faces das vigas (*Structural framing*). No eixo X tem-se cada uma das faces; e no eixo Y, valores médios das diferenças medidas em metros.

Como para todas as outras estruturas edificadas, o teste *t*-Student foi aplicado para verificar essa informação visual de verosimilhança entre as médias e o teste F-Snedcor para as variâncias dessas amostras de vigas. Considerando um nível de significância de 5%, foram obtidos os seguintes resultados: a) não se observou diferença significativa entre as médias das amostras das faces 1 e 2, mas suas variâncias são significativamente diferentes; b) determinou-se diferença significativa entre as médias das amostras das faces 3 e 1 e entre as faces 3 e 2, mas não entre suas variâncias. Pode-se asseverar, portanto, que a amostra da face 3 é diferente das outras duas.

## 4 CONCLUSÕES

Considerando as análises apresentadas na seção anterior, torna-se possível destacar diversos pontos que sintetizam os principais achados do presente estudo, bem como suas implicações para a construção civil.

Constata-se que a maior parte das medições das colunas revelou intervalos de confiança estreitos, exceto por uma face que se destacou, onde a maioria das observações apresentou médias

positivas, sugerindo um possível erro sistemático na edificação. As análises estatísticas evidenciaram divergências significativas em várias comparações entre as médias das faces. Nos estudos das paredes, os intervalos de confiança ficaram restritos, com uma distribuição equitativa entre valores positivos e negativos, embora a maioria das faces tenha reportado exclusivamente valores positivos. Os testes estatísticos mostraram diferenças significativas na maioria das comparações de médias. Quanto aos pisos, os intervalos de confiança foram estreitos, com algumas faces perfeitamente alinhadas e uma tendência predominantemente positiva em boa parte das faces examinadas. As análises indicaram diferenças notáveis em muitas das médias das faces. No que tange às vigas, a limitação da amostragem impediu a determinação conclusiva de uma direção preferencial na construção. Todavia, os testes apontaram que algumas faces não apresentaram diferenças significativas nas médias, mas sim nas variâncias, enquanto outra face mostrou inconsistências estatisticamente relevantes nas médias em relação às demais.

Em síntese, os resultados revelam a presença de assimetrias e variações relevantes na execução dos elementos estruturais, indicando tendências e possíveis desvios sistemáticos na edificação. Tais evidências ressaltam a necessidade de rigor no controle e na gestão da qualidade durante o processo construtivo. Esse controle de qualidade pode ser maximizado utilizando-se exatamente da análise estatística realizada neste trabalho para melhorar a modelagem de informação de construção *as-built*.

### ***Agradecimentos***

Rubens Lage Lopes agradece ao professor Davitt Lamon, da *School of Multidisciplinary Technologies, Technological University Dublin*, pela orientação e pelas contribuições fundamentais durante o mestrado, que foram essenciais para a realização deste trabalho. Os autores agradecem também à *BAM Ireland* (<https://www.bamireland.ie/>) pelo suporte na coleta de dados com nuvem de pontos, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

### **REFERÊNCIAS**

- [1] R. Agarwal, S. Chandrasekaran e M. Sridhar. Imagining construction's digital future. *McKinsey & Company*, 24(06), 2016.
- [2] E. Alreshidi, M. Mourshed e Y. Rezgui. Factors for effective bim governance. *Journal of Building Engineering*, 10:89–101, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.02.006>.
- [3] R. Baskerville e J. Pries-Heje. Grounded action research: a method for understanding IT in practice. *Accounting, Management and Information Technologies*, 9(1):1–23, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0959-8022\(98\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0959-8022(98)00017-4).
- [4] I. Brilakis, M. Lourakis, R. Sacks, S. Savarese, S. Christodoulou, J. Teizer e A. Makhmalbaf. Toward automated generation of parametric bims based on hybrid video and laser scanning data. *Advanced Engineering Informatics*, 24(4):456–465, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.006>.
- [5] J. Collao, F. Lozano-Galant, J. A. Lozano-Galant e J. Turmo. Bim visual programming tools applications in infrastructure projects: A state-of-the-art review. *Applied Sciences*, 11(18), 2021. <https://doi.org/10.3390/app11188343>.
- [6] A. Dong, M. L. Maher, M. J. Kim, N. Gu e X. Wang. Construction defect management using a telematic digital workbench. *Automation in Construction*, 18(6):814–824, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.03.005>.
- [7] P. Gamba e B. Houshmand. Digital surface models and building extraction: a comparison of ifsar and lidar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,

- 38(4):1959–1968, 2000. <https://doi.org/10.1109/36.851777>.
- [8] D. A. Ilter e E. Ergen. Bim for building refurbishment and maintenance: current status and research directions. *Structural Survey*, 33:228–256, 2015. <https://doi.org/10.1108/SS-02-2015-0008>.
- [9] N. Kadhim, A. D. Mhmood e A. H. Abd-Ulabbas. The creation of 3d building models using laser-scanning data for bim modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1105(1):012101, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1105/1/012101>.
- [10] R. L. Lopes e D. Lamon. A critical analysis of speed and accuracy when updating structural as-built bims with visual programming and point-cloud survey data. In *Cita BIM Gathering, Dublin*, v. 6, p. 24–31. 2023.
- [11] R. Maalek, D. D. Lichti e J. Y. Ruwanpura. Automatic recognition of common structural elements from point clouds for automated progress monitoring and dimensional quality control in reinforced concrete construction. *Remote Sensing*, 11(9), 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11091102>.
- [12] C. Merschbrock e B. E. Munkvold. Effective digital collaboration in the construction industry - a case study of bim deployment in a hospital construction project. *Computers in Industry*, 73:1–7, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.07.003>.
- [13] V. Pătrăucean, I. Armeni, M. Nahangi, J. Yeung, I. Brilakis e C. Haas. State of research in automatic as-built modelling. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2):162–171, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.001>.
- [14] H. F. Requirements e T. V. Scan. *Verity™ Usage Guide*. 2022.
- [15] L. Sanhudo, N. M. M. Ramos, J. P. Martins, R. M. S. F. Almeida, E. Barreira, M. L. Simões e V. Cardoso. A framework for in-situ geometric data acquisition using laser scanning for bim modelling. *Journal of Building Engineering*, 28:101073, 2020. ISSN 2352-7102. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101073>.
- [16] P. Tang, D. Huber, B. Akinci, R. Lipman e A. Lytle. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7):829–843, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>.
- [17] R. Volk, J. Stengel e F. Schultmann. Building information modeling (bim) for existing buildings — literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38:109–127, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>.
- [18] G. Walsh. *Leica ScanStation P-Series – Details that matter*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2015.