VALIDAÇÃO AUTOMATIZADA DE ARQUIVOS IFC PARA GARANTIA DE QUALIDADE EM PROCESSOS OPENBIM

Lucas Gonçalves [(1)], Carlos Capanema [(2)], Sâmara Melo [(3)]

(1) Motiva, Jundiaí - SP - Brasil, 0000-0001-8024-6542
(2) Motiva, Jundiaí - SP - Brasil, 0009-0005-7968-9158
(3) Motiva, Jundiaí - SP - Brasil, 0009-0004-8849-7783

Resumo
A interoperabilidade entre plataformas BIM é um desafio recorrente em projetos que adotam o padrão aberto *Industry Foundation Classes* (IFC). A verificação manual da conformidade desses arquivos é um processo demorado, suscetível a erros e dependente de conhecimento técnico especializado. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um app de validação automatizada de arquivos IFC, concebido como um mecanismo de Garantia de Qualidade (QA) para modelos BIM. A solução foi baseada nas diretrizes e práticas da buildingSMART, com adaptações para uso interno, integrando-se ao fluxo de avaliação de modelos BIM. A arquitetura proposta combina Python, para leitura e interpretação semântica dos dados IFC, garantindo execução local e segurança das informações, sem dependência de servidores externos. Entre os diferenciais, destacam-se: validação semântica além da sintática, customização de regras matriz de informação do projeto, processamento consolidado e interface amigável para usuários não técnicos. Testes preliminares indicam potencial para reduzir em até 99% o tempo de análise, aumentar em 100% a cobertura da verificação de requisitos e diminuir falhas de interoperabilidade. A ferramenta contribui para a eficiência operacional, redução de custos e melhoria da qualidade dos modelos BIM, representando um avanço significativo para processos openBIM e certificação de conformidade em ambientes corporativos.

1. Introdução

A crescente adoção do BIM na indústria de infraestrutura, elevou a importância da interoperabilidade entre diferentes softwares e stakeholders. O IFC é um esquema de dados comum para descrever informações do modelo BIM, que visa estabelecer um método padrão de representação e armazenamento de dados [1]. Promovido pela *BuildingSmart International*, o IFC permite que as informações sejam armazenadas em um modelo de dados estruturado e

trocadas entre diferentes softwares, sendo atualmente o modelo de dados de maior domínio para *openBIM* [2].

A consolidação do IFC como o padrão aberto para troca de dados de modelos BIM, permite fluxos de trabalho *OpenBIM*. No fluxo de trabalho *openBIM*, diversos tipos de softwares passam a importar e exportar dados de construção neste formato, promovendo o compartilhamento de informações entre diferentes especialidades. Dessa forma, diferentes partes interessadas (concessionárias, projetistas, gestores, proprietários) colaboram sem a necessidade de utilizar o mesmo software de autoria nativa [3]. Isso é vital em projetos complexos que exigem a integração de múltiplas disciplinas, evitando a perda de dados durante a importação e exportação entre plataformas heterogêneas [4].

Ações governamentais de adoção do BIM, como a Estratégia BIM BR, torna obrigatório o desenvolvimento de projetos, obras e manutenção de ativos de Rodovias em BIM. Nesse cenário, a Motiva Rodovias, empresa que administra mais de 5.000 km de malha rodoviária brasileira, projeta um Capex recorde de R$ 60 bilhões para os próximos anos, possui obrigações contratuais de entregas em BIM com os principais Poder Concedente: ANTT (Agência Nacional de Transporte Terrestres) e ARTESP (Agência de Transporte do Estado de São Paulo). Presente em todo o ciclo de vida do ativo, da concepção à operação, a concessionária adequa-se agora às novas exigências dos órgãos reguladores estaduais e federais do Brasil.

Um dos pontos críticos no fluxo de projeto em fase de pré-obra é o recebimento de modelos de terceiros. Embora o Plano de Implantação BIM de cada concessão da Motiva Rodovia aplique capacitação prática e teórica para todos os envolvidos nos projetos e obras em BIM, as práticas de *openBIM* e a manipulação técnica do formato IFC ainda estão em estágio inicial de maturidade na empresa.

A ausência de uma verificação sistemática na entrada dos dados pode propagar erros geométricos e semânticos para as etapas subsequentes, comprometendo a aplicação dos Usos BIM definidos para o empreendimento em questão. Problemas comuns incluem a perda de hierarquia espacial, geometria deslocada, ausência de classificações ou propriedades vazias, que muitas vezes só são detectados tardiamente, gerando retrabalho oneroso [5], [6], [7].

O uso de formatos proprietários e as diferenças na implementação do esquema IFC pelos softwares de autoria podem resultar em perda de dados, inconsistências e falhas na interoperabilidade [6], [7]. Por isso, a qualidade dos arquivos IFC gerados nem sempre é garantida pelos softwares de autoria nativos, resultando em perdas de informação geométrica ou semântica durante a exportação [6].

A validação manual destes arquivos exige que especialistas verifiquem hierarquias complexas, presença de propriedades e integridade geométrica, e outras séries de verificações técnicas. Toda essa avaliação de forma manual torna o processo oneroso e lento, muitas vezes impraticável a depender do volume de projetos e capacidade analítica das equipes.

Nesse contexto de alta demanda e complexidade técnica, este artigo descreve o desenvolvimento, a implementação e resultados de uma aplicação voltada à automação da verificação de qualidade dos modelos IFC em relação a aderência à matriz de informação, visando otimizar a governança de dados da concessionária, assegurando que apenas arquivos IFC em conformidade técnica avancem para o ambiente comum de dados federado.

2. Metodologia

O objetivo desta pesquisa foi criar uma ferramenta capaz de fornecer feedback visual e analítico imediato da qualidade dos arquivos .ifc. Considerando as questões anteriormente apresentadas e o objetivo da pesquisa, foi adotado a *Design Science Research* (DSR). As etapas seguidas na DSR foram: Identificação do problema e motivação, apresentada na introdução; Definição dos objetivos da solução; Design e desenvolvimento, elaboração e adaptação do artefato (app); Aplicação, etapa experimental de uso em projetos reais; Avaliação, etapa para medir o alcance dos objetivos iniciais do artefato e generalização para uma determinar classe de problemas [8].

2.1. Definição dos Objetivos da Solução

Em alinhamento às necessidades apresentadas pelos BIM Managers da Motiva, além da estrutura da integridade dos arquivos .ifc, da consistência e hierarquia, foi relatada a necessidade de verificar as informações da matriz de informação requeridas nos modelos de forma local, e com capacidade de verificar arquivos superiores a 250 mb.

Dessa forma, a solução deverá ser capaz de realizar de forma automática a análise de hierarquias, presença de propriedades e integridade geométrica. Processar a geometria e os dados alfanuméricos, gerando relatórios de conformidade.

A ferramenta deverá implementar um conjunto de regras de validação abrangente, cobrindo requisitos sintáticos e semânticos. A cobertura dos requisitos foi desenhada para atender às normas da buildingSMART e requisitos internos da empresa em:

1. **Validação Sintática**: Verificação da integridade do arquivo físico conforme a sintaxe padrão STEP (ISO 10303-21), garantindo a presença de cabeçalhos obrigatórios e que o arquivo seja legível por softwares [9];
2. **Validação do Esquema**: Análise da conformidade com a hierarquia espacial obrigatória (como a presença de IfcProject, IfcSite) e dos relacionamentos lógicos de agregação definidos no padrão IFC [10];
3. **Validação Geométrica**: Conferência do georreferenciamento correto (incluindo sistemas de coordenadas projetadas e rotação do Norte Verdadeiro) [5] [10] e verificação da existência de representação geométrica para todos os produtos listados, evitando elementos "invisíveis";
4. **Validação Semântica** (Propriedades): Verificação da presença de Property Sets (IfcPropertySet) fundamentais e da classificação correta das entidades (ex: distinção entre classes específicas e genéricas), assegurando a consistência dos dados alfanuméricos [3] [10].
5. **Conformidade com Requisitos** (BEP): Auditoria automatizada via IDS (*Information Delivery Specification*) para validar se os requisitos de informação contratuais, formalizados na Matriz de Informação [11], estão preenchidos, juntamente com o uso de regras Gherkin para verificar proposições normativas, acordos de implementação e práticas da área;
6. **Interferências Geométricas**: validação de dados/arquivo, deve ser tratado como uma etapa posterior às anteriores, distinta da verificação de consistência do arquivo digital, para que os resultados dessa fase reflitam de fato as inconsistências de sobreposição espacial entre os objetos do modelo 3D.

2.2. Design e Desenvolvimento

O desenvolvimento da aplicação seguiu uma abordagem modular, separando a lógica de validação, o processamento geométrico e a interface do utilizador. A linguagem de

programação escolhida foi Python 3, devido ao seu robusto ecossistema de bibliotecas para engenharia de dados e suporte à manipulação de arquivos IFC através do *IfcOpenShell*.
O fluxo de funcionamento da aplicação ocorre em quatro etapas:
(1) Carregamento do ficheiro .ifc;
(2) Execução dos algoritmos de validação (Sintaxe, *Schema*, Geometria e Propriedades);
(3) Cálculo de métricas de qualidade;
(4) Geração de relatórios (HTML) e de forma opcional visualização do modelo 3D no arquivo.
A arquitetura do software baseia-se em bibliotecas de código aberto para processar a geometria e os dados alfanuméricos, foram utilizadas:

- *IfcOpenShell*: Núcleo da aplicação, responsável pelo *parsing* do arquivo IFC (norma ISO 10303-21). Esta biblioteca permite a iteração sobre entidades, extração de propriedades e conversão de geometria implícita para malhas explícitas.
- *Tkinter & Ttkbootstrap*: Utilizadas para a construção da Interface Gráfica do Utilizador (GUI). O *Tkbootstrap* confere uma estética moderna e responsiva, essencial para a usabilidade por profissionais não programadores.
- *Matplotlib & Mplot3d*: Responsáveis pela renderização da visualização 3D leve integrada na ferramenta, permitindo a conferência visual da geometria processada.
- *Trimesh*: Biblioteca auxiliar utilizada para simplificação de malhas complexas e melhoria de performance na visualização de modelos com alta contagem de polígonos.

2.2.1. Métricas de Qualidade (BIM Score)

Após a análise das quatro etapas anteriormente citadas, o app deverá calcular um "Score de qualidade" do modelo. Este índice fornece uma visão rápida sobre a maturidade do modelo para os gestores do projeto. O algoritmo, implementado na classe *QualityMetricsPanel*, pondera a completude geométrica e a completude de propriedades alfanuméricas:

$$Score = \frac{Razão\ Geometria\ \% + Razao\ Propriedades\ \%}{2} \quad (1)$$

2.2.2. Interface da Aplicação e Visualização

A interface foi desenhada para ser intuitiva, dividida em abas funcionais que segregam a configuração, os resultados textuais e a análise gráfica. A tela inicial permite ao utilizador selecionar o arquivo IFC e configurar quais módulos de validação (Sintaxe, *Schema*, Geometria, Propriedades) serão executados.
Após o processamento, a aba "Detalhes de Validação" apresenta um resumo executivo e detalhes técnicos dos erros encontrados, permitindo ao analista ou BIM Manager ter um feedback e estatísticas da condição do arquivo IFC.

2.2.3. Visualizador 3D Integrado

A aba de visualização renderiza a geometria do modelo diretamente na aplicação. Utilizando o *ifcopenshell.geom*, a ferramenta converte as formas paramétricas em vértices e faces, renderizadas via *matplotlib*. Esta funcionalidade permite identificar visualmente elementos que podem ter sido exportados com coordenadas erradas ou geometria corrompida, sem a necessidade de abrir um visualizador externo.

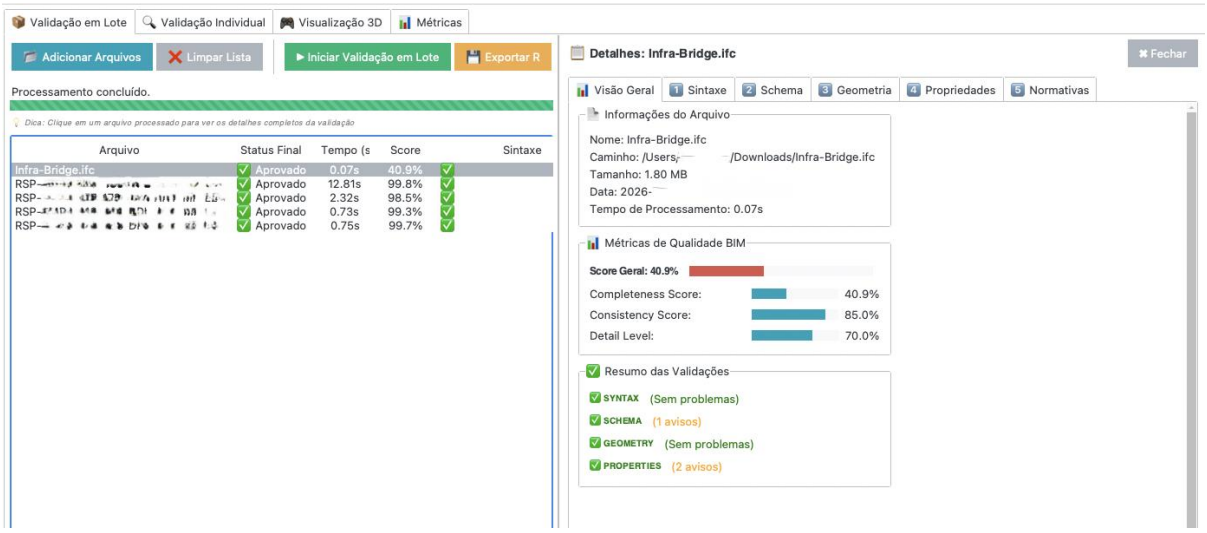


Figura 1: Interface principal

3. Testes

3.1. Objetivo e Desenho Experimental

Esta seção avalia o desempenho do aplicativo de validação de arquivos IFC por meio de medições do tempo de processamento em lote. Os arquivos analisados foram agrupados em cinco classes, definidas de acordo com o tamanho dos arquivos, conforme descrito a seguir:

- Muito pequenos: arquivos com tamanho inferior a 20 MB;
- Pequenos: arquivos com tamanho entre 20 MB e 100 MB;
- Médios: arquivos com tamanho entre 100 MB e 500 MB;
- Grandes: arquivos com tamanho entre 500 MB e 1 GB;
- Muito grandes**:** arquivos com tamanho superior a 1 GB.

Adicionalmente, apresenta-se uma estimativa técnica do tempo necessário para a realização de uma validação humana manual e completa no nível do arquivo **STEP (ISO 10303-21)**. Essa abordagem pressupõe a inspeção linha a linha do conteúdo do arquivo, com o objetivo de verificar identificadores globais (***GlobalId***), hierarquia de entidades, propriedades e relações. Embora teoricamente possível, tal procedimento mostra-se operacionalmente inviável quando aplicado a arquivos de grande porte ou a conjuntos volumosos de dados.

3.2. Ambiente de Testes

Os testes foram realizados localmente em um *laptop Dell Precision* 3591, garantindo execução independente de servidores externos. O sistema operacional adotado foi o *Windows 11*, versão 24H2. A configuração do equipamento utilizado é apresentada a seguir: Processador Intel Core Ultra 9 185H, com frequência base de 2,32 GHz; Memória RAM de 32 GB; Unidade de armazenamento SSD NVMe com capacidade de 1 TB; Placa gráfica dedicada NVIDIA RTX 2000 Ada.

3.3. Conjunto de Dados e Agrupamento por Tipo

O conjunto de dados utilizado no benchmark é composto por 183 arquivos IFC, previamente classificados em cinco faixas de tamanho conforme planilha de controle, e com tempos de processamento por arquivo registrados na coluna "Tempo". A Tabela 1 apresenta a quantidade de arquivos por tipo (n) e o total de tempo de processamento do aplicativo por categoria.

3.4. Métrica Principal: Tempo de Processamento do Aplicativo

A métrica de desempenho adotada foi o tempo total de processamento (somatório dos tempos por arquivo) por categoria e no total geral, diretamente a partir do *dataset*.

Tabela 1: Tempo total de processamento do aplicativo por tipo

Tipo	n (arquivos)	Tempo total (s)	Tempo total (min)	Tempo total (h)
Muito pequenos	126	40,27	0,67	0,011
Pequenos	28	79,32	1,32	0,022
Médios	18	486,19	8,10	0,135
Grandes	7	851,10	14,19	0,236
Muito grandes	4	4247,45	70,79	1,180
Total geral	183	5704,33	95,07	1,585

3.5. Análise de Dispersão dos Tempos por Arquivo

A distribuição dos tempos por arquivo é assimétrica: categorias menores concentram muitos arquivos com tempos na ordem de centésimos de segundo, enquanto a categoria "Muito grandes" apresenta tempos na ordem de centenas a milhares de segundos por arquivo.

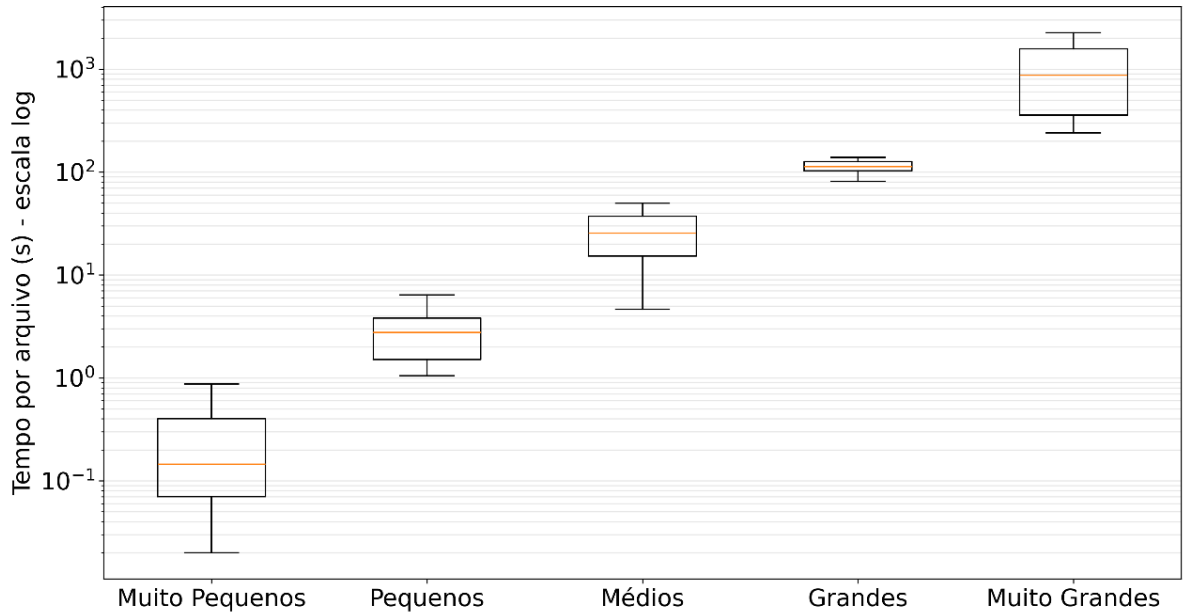


Figura 2: Distribuição dos tempos por arquivo

3.6. Estimativa técnica: validação humana manual linha a linha (STEP/ISO 10303 21)

A validação manual completa no nível STEP requer que o avaliador interprete o arquivo texto no formato ISO 10303-21, acompanhando instâncias, parâmetros e referências cruzadas. No caso específico do IFC, a verificação de *GlobalId* (IFC-GUID) demanda conhecimento das regras de codificação e conformidade (por exemplo, tamanho fixo e conjunto de caracteres), além de inspeção das entidades e relações associadas.

3.6.1. Modelo de estimativa (ordem de grandeza)

Para estimar o esforço humano sem tratá-lo como alternativa operacional, adotou-se um modelo conservador baseado em volume de texto:

- Estimativa de linhas: Assume-se que o arquivo STEP apresenta instâncias tipicamente organizadas por linha, prática comum em arquivos ISO 10303-21. Assim, o número de linhas cresce aproximadamente com o tamanho do arquivo (em KB).
- Conservadorismo no "tamanho por linha": Para não subestimar o número de linhas, utiliza-se 80 bytes/linha (quanto menor o valor, maior a quantidade estimada de linhas).
- Tempo humano por linha (inclui GUID + hierarquia + relações): Três cenários são apresentados para representar diferentes níveis de rigor ao verificar GUIDs, navegar em relações e checar consistência hierárquica:
- Otimista: 10 s/linha
- Realista: 30 s/linha
- Conservador: 60 s/linha

A necessidade de checar GUIDs e coerência relacional (hierarquia, propriedades e vínculos) torna a inspeção humana cumulativa por instância/linha e não escalável por amostragem quando o objetivo é validação completa

Tabela 2: Estimativa do Tempo Manual para o Dataset Completo

Cenário	Tempo manual estimado (h)
Otimista (10 s/linha)	**523.464 h**
Realista (30 s/linha)	**1.570.391 h**
Conservador (60 s/linha)	**3.140.783 h**

A Tabela 2 evidencia que, mesmo em cenário otimista, a validação manual completa (STEP linha a linha) exigiria centenas de milhares de horas, caracterizando inviabilidade prática para grandes volumes. A Tabela 3 apresenta síntese entre o aplicativo e o manual estimado.

Tabela 3: Tabela Comparativa. Fonte: os autores, 2026

Item	Aplicativo (observado)	Manual linha a linha (estimado)
Base	Tempos medidos por arquivo no *dataset*	ISO 1030321 + inspeção de GUIDs-21 + inspeção de GUIDs e relações
Cobertura	Processamento integral do lote (183 arquivos)	Cobertura integral é teoricamente possível, porém não escalável
Tempo total	**1,585 h** (95,07 min)	**10^5–10^6 h** (ordem de grandeza)
Implicação	Viabiliza QA sistemática em volume	Operacionalmente inviável para grandes lotes

3.7. Integração Com o Fluxo Humano

No processo operacional típico de avaliação de modelos BIM em concessões, a inspeção humana não é realizada em código estrutural, mas sim de forma amostral (spot check) e visual. Na prática real, um especialista ou analista do projeto dedica, em média, de 4 a 12 horas por modelo para realizar verificações, inspecionando uma amostra direcionada (frequentemente entre 10% e 20% dos elementos) para aferir a aderência à matriz de informação. O benefício do aplicativo desenvolvido reside na transição deste paradigma: em vez de empregar horas de trabalho especializado para validar apenas uma fração do modelo, o processo automatizado executou uma varredura integral (100%) em um lote de 183 arquivos em apenas 1,58 horas. A ferramenta aplica-se a todos os ativos rodoviários em geral, evidenciando que a automação substitui a amostragem sujeita a falhas humanas por uma verificação sistemática, veloz e paramétrica.

3.8. Limitações do Teste (Delimitação Necessária)

Atualmente, a ferramenta encontra-se na versão de produção para os itens 1 a 4 (Sintaxe, Esquema, Geometria e Propriedades base), operando de forma estável. Os itens 5 (conformidade contratual via IDS) e 6 (Interferências Geométricas) compõem o escopo do próximo ciclo de desenvolvimento. Esta priorização metodológica ocorreu porque a consistência estrutural e geométrica é um pré-requisito indispensável; a auditoria semântica contratual não pode ser executada com confiabilidade sobre modelos com falhas sintáticas elementares. A previsão de integração plena do interpretador IDS está mapeada para a próxima etapa do projeto, momento em que a matriz de informação será atrelada diretamente ao motor de regras da aplicação.

4. Resultados e Discussão: Análise Geral dos Testes Executados

Os testes realizados foram positivos e são válidos para mensurar o benefício do aplicativo sob a ótica que esta seção se propôs a avaliar: desempenho temporal em processamento real (*benchmark*) e escalabilidade frente a um cenário manual completo. O conjunto analisado é suficientemente expressivo (183 arquivos, distribuídos em cinco classes), e a soma dos tempos evidencia um resultado objetivo: o processamento automatizado do lote completo foi concluído em 95,07 minutos (1,585 h), com concentração do tempo total nos arquivos muito grandes (70,79 min somente nessa classe), o que é coerente com a natureza do IFC (crescimento de entidades e relações conforme o tamanho).

Os resultados dos testes mostram a importância do app na mitigação de horas técnicas dos analistas, justificando o tempo de desenvolvimento do aplicativo, porque demonstra, com dados observados do pipeline, que a solução permite tratar um volume alto e heterogêneo de arquivos em uma janela operacional viável; além disso, a descrição do ambiente de execução e das dependências sustenta a reprodutibilidade e reforça que o tempo medido não depende de infraestrutura externa.

Quanto à quantidade e ao tamanho dos arquivos, o desenho também é válido: a amostra inclui classes com muitos arquivos pequenos e poucos arquivos muito grandes, refletindo a distribuição típica em entregas por disciplina e submodelos, e permitindo observar tanto casos rápidos quanto casos críticos (cauda longa).

A estimativa da validação manual completa, baseada em leitura linha a linha do STEP/ISO 10303-21 com checagem de GUIDs, hierarquia, entidades, propriedades e relações, cumpre seu papel como estimativa técnica de inviabilidade (não como alternativa operacional), pois traduz o esforço humano em ordem de grandeza compatível com a complexidade do arquivo texto e das regras de identificação do IFC-GUID, reforçando porque a automação é necessária para escala. Como reforço adicional de validade prática, o fluxo humano real de avaliação de modelos tende a operar por amostragem (*spot check*) e checagens dirigidas, justamente por limitação de tempo e volume, o que converge com a conclusão do teste de que validação manual exaustiva não escala.
Do app além dos benefícios de 100% de cobertura da análise dos requisitos, podem ser destacados também a capacidade de exportar relatórios (HTML) cria um rastro de auditoria, documentando a conformidade do modelo em marcos contratuais específicos. O Aumento da confiança na base de dados para extração de quantitativos e outros usos do BIM. Padronização no nível de qualidade exigido dos fornecedores de projeto. Segurança, a execução local do script Python assegura que dados proprietários não trafeguem por servidores de terceiros.

4.1. Limitações da Aplicabilidade

Apesar dos ganhos operacionais mensuráveis, a aplicabilidade atual da ferramenta apresenta limitações práticas que devem ser contextualizadas. Primeiramente, os testes e o desenvolvimento foram homologados estritamente em ambiente Windows com hardware de alta capacidade (32 GB RAM e processamento dedicado). O comportamento do aplicativo com arquivos muito grandes em ambientes com recursos limitados ou em outros sistemas operacionais (como macOS e distribuições Linux) ainda carece de validação para assegurar verdadeira portabilidade multiplataforma. Adicionalmente, a ferramenta atua como um validador de diagnóstico; ela identifica falhas no esquema e nas geometrias exportadas, mas não realiza correções ativas nos modelos, exigindo que o retrabalho seja feito no software de autoria nativo. O objetivo fundamental da aplicação é atuar como uma barreira de qualidade (QA).

5. Conclusão

A validação automatizada de arquivos IFC não é apenas uma conveniência técnica, mas um pilar fundamental para a governança de dados em BIM. A ferramenta apresentada demonstrou como soluções baseadas em código aberto e execução local podem oferecer verificações robustas, agregando valor ao garantir que a informação que flui entre os stakeholders seja íntegra, estruturada e útil. Ao automatizar a detecção de erros sintáticos, semânticos e geométricos, o aplicativo libera os especialistas humanos para focarem em problemas de engenharia e arquitetura de maior complexidade, elevando a maturidade digital do empreendimento. A ferramenta demonstrou em teste práticos ser capaz de fornecer uma solução customizada de baixo custo e alto impacto para a garantia de qualidade em processos de projetos OpenBIM.
Trabalhos futuros incluirão a e expansão das regras para verificação de colisões (*clash detection*), a integração com a validação de requisitos de informação por IDS.

Referências

[1] S. Jiang, L. Jiang, Y. Han, Z. Wu, and N. Wang, "OpenBIM: An Enabling Solution for Information Interoperability," Applied Sciences, vol. 9, no. 24, p. 5358, Dec. 2019. doi: 10.3390/app9245358.

[2] D. Avogaro, M. Berlato, and C. Zanchetta, "Process Scheduling Application Based on Web Ontology Language Representation of the IFC Schema," in Digital Innovations in Architecture Engineering and Construction (CMW 2024), Cham, Switzerland: Springer, 2025, pp. 125-135. doi: 10.1007/978-3-031-87224-2_11.

[3] E. D. Okonta, V. Vukovic, and E. Hayat, "Prospective Directions in the Computer Systems Industry Foundation Classes (IFC) for Shaping Data Exchange in the Sustainability and Resilience of Cities," Electronics, vol. 13, no. 12, Jun. 2024. doi: 10.3390/electronics13122297.

[4] R. B. Otranto, G. Miceli, and P. C. Pellanda, "BIM-FM INTEGRATION THROUGH OPENBIM: SOLUTIONS FOR INTEROPERABILITY TOWARDS EFFICIENT OPERATIONS," Journal of Information Technology in Construction (ITcon), vol. 30, 2025. doi: 10.36680/j.itcon.2025.012.

[5] F. Noardo et al., "Tools for BIM-GIS Integration (IFC Georeferencing and Conversions): Results from the GeoBIM Benchmark 2019," ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 9, no. 9, Sep. 2020. doi: 10.3390/ijgi9090502.

[6] T. Akanbi, J. Zhang, and Y.-C. Lee, "Data-Driven Reverse Engineering Algorithm Development Method for Developing Interoperable Quantity Takeoff Algorithms Using IFC-Based BIM," Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 34, no. 5, Sep. 2020. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000909.

[7] H. Li and J. Zhang, "Semiautomatic IFC-Based BIM Reconstruction for As-Designed Bridges from 2D Plans Leveraging Semantic Segmentation and Enrichment," Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 39, no. 6, Nov. 2025. doi: 10.1061/JCCEE5.CPENG-5931.

[8] A. Dresch, D. Pacheco Lacerda, and J. A. V. Antunes, Design science research: a method for science and technology advancement. Switzerland: Springer, 2015.

[9] BuildingSmart International, "IFC Validation Service," 2025. [Online]. Available: https://www.buildingsmart.org/users/services/validation-service/. [Accessed: Nov. 3, 2025].

[10] M. L. R. Antunes, K. M. L. César, J. C. L. Ribeiro, D. S. D. Oliveira, and J. M. F. D. Carvalho, "Analysis of IFC interoperability data schema for project representation," Automation in Construction, vol. 166, p. 105650, Oct. 2024. doi: 10.1016/j.autcon.2024.105650.

[11] R. R. Santos, P. F. L. Picoli, S. M. C. Melo, N. M. Silva, and C. Kehl, "Method for Measuring Physical and Financial Progress for BIM-Based Projects," in Anais do VIII Congresso Internacional A Era BIM, Brasil: Motiva, 2024.