

UTILIZAÇÃO DO BIM PARA CUMPRIMENTO NORMATIVO: VALIDAÇÃO DAS ETI ATRAVÉS DO IDS E IFC

Emilio A. Camino ⁽¹⁾, Dora Alves ⁽²⁾, Manuel H. Pinheiro ⁽³⁾

(1) Associação Centro de Competências Ferroviário, Porto, 0009-0002-4899-4887

(2) Associação Centro de Competências Ferroviário e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 0009-0009-8217-4840

(3) Associação Centro de Competências Ferroviário, Porto, 0009-0003-8301-065X

Resumo

As Especificações Técnicas de Interoperabilidade (ETI) constituem o principal instrumento regulador para garantir que as infraestruturas ferroviárias europeias funcionam de forma harmonizada, segura e interoperável. Estes regulamentos definem parâmetros técnicos fundamentais — como gabari, características da via, tensão e frequência ou acessibilidade — que asseguram a compatibilidade técnica entre os vários subsistemas do sistema ferroviário europeu nos vários Estados-Membros.

Apesar da sua relevância, a verificação do cumprimento das ETI continua a ser um processo predominantemente manual. Os modelos BIM, ainda que ricos em informação geométrica e alfanumérica, são avaliados com base em documentos textuais, exigindo interpretações humanas que tornam o processo moroso, sujeito a erro e de difícil rastreabilidade.

Este artigo propõe uma forma de trabalhar que traduz requisitos complexos provenientes da ETI Infraestrutura em parâmetros BIM verificáveis. Através do formato aberto IDS (Information Delivery Specification), os requisitos são convertidos em regras digitais aplicáveis a modelos no formato IFC (Industry Foundation Classes), permitindo a sua validação “automática” num fluxo de trabalho com ferramentas open-source.

Para além de acelerar a validação e reforçar a fiabilidade técnica dos projetos, esta abordagem estabelece bases para uma certificação ferroviária com recurso a ferramentas digitais e revela um elevado potencial de replicação noutros domínios, onde o cumprimento normativo é igualmente determinante.

1. Introdução

A validação do cumprimento das Especificações Técnicas de Interoperabilidade (ETI) constitui um elemento central nos processos de projeto e certificação das infraestruturas ferroviárias europeias. Estes regulamentos definem parâmetros técnicos fundamentais, que asseguram a interoperabilidade, a segurança e a continuidade operacional da rede ferroviária [1] [2].

Apesar da crescente adoção da metodologia BIM em projetos ferroviários, a verificação do cumprimento das ETI continua a ser predominantemente baseada em documentação textual e interpretação manual. Os modelos BIM, ricos em informação geométrica e alfanumérica, são raramente utilizados como instrumentos formais de validação regulamentar, o que compromete a rastreabilidade, a consistência e a eficiência do processo de certificação [3].

Esta limitação não resulta apenas da ausência de ferramentas, mas sobretudo da dificuldade em traduzir regulamentos técnico-jurídicos, frequentemente condicionais e contextuais, em regras técnicas passíveis de verificação sistemática. Como consequência, mesmo em ambientes BIM, a validação regulamentar permanece fortemente dependente do julgamento humano [4].

Neste contexto, os princípios do OpenBIM, baseados em formatos abertos e interoperáveis, oferecem uma oportunidade para estruturar parte deste processo.

O objetivo deste artigo é propor e avaliar uma metodologia para a validação do cumprimento da ETI Infraestrutura ferroviária baseada em princípios OpenBIM, assente na formalização de requisitos regulamentares e na sua verificação automática em modelos digitais, analisando simultaneamente o seu potencial e os seus limites no contexto da certificação ferroviária.

2. Enquadramento Normativo e Técnico

As Especificações Técnicas de Interoperabilidade (ETI) constituem o principal instrumento regulador do sistema ferroviário europeu, definindo os requisitos técnicos obrigatórios para assegurar interoperabilidade, segurança e continuidade operacional entre os Estados-Membros. No caso da ETI Infraestrutura, estes requisitos abrangem parâmetros fundamentais da via, da geometria do traçado, das plataformas e dos afastamentos, sendo frequentemente expressos sob a forma de valores limite, intervalos admissíveis ou condições dependentes do contexto operacional [2].

Apesar da sua relevância técnica, as ETI não foram concebidas para verificação digital direta. A sua redação técnico-jurídica incorpora exceções, condições de aplicabilidade, dependências funcionais e remissões cruzadas que dificultam a tradução imediata dos requisitos em regras objetivas e sistematicamente verificáveis. Consequentemente, apenas uma parte dos requisitos regulamentares é suscetível de formalização computacional, sendo essencial distinguir entre requisitos quantitativos diretamente verificáveis, requisitos condicionais e requisitos de natureza qualitativa ou dependentes de interpretação técnica [5].

No contexto da metodologia BIM, esta limitação não resulta da ausência de modelos digitais, mas da natureza dos próprios regulamentos. A validação regulamentar em BIM não é um problema exclusivamente tecnológico, mas um problema de estruturação lógica e formalização dos requisitos regulamentares [3].

Neste enquadramento, os princípios do OpenBIM assumem particular relevância. O modelo de dados IFC fornece uma estrutura normalizada e interoperável para representar os elementos físicos e funcionais da infraestrutura ferroviária e respetivos atributos [6]. Contudo, o IFC, por si só, não define quais os requisitos regulamentares aplicáveis nem os critérios de conformidade, limitando-se a estruturar a informação disponível no modelo.

O IDS introduz uma camada formal adicional, permitindo declarar requisitos de informação e regras de validação associadas a objetos IFC, incluindo propriedades obrigatórias, tipos de dados e condições de conformidade [7]. O IDS possibilita, assim, a formalização de requisitos

regulamentares suscetíveis de serem expressos como parâmetros discretos ou intervalos verificáveis, produzindo resultados rastreáveis e auditáveis.

Todavia, a natureza declarativa do IDS implica limitações intrínsecas: apenas pode validar informação explicitamente representada no modelo IFC, não sendo adequado para verificar requisitos que dependem de análises geométricas contínuas, relações espaciais complexas ou interpretação contextual externa ao modelo. Nestes casos, a validação automática deve ser entendida como um apoio à análise técnica, e não como um mecanismo autónomo de decisão regulamentar.

Deste modo, a combinação de IFC e IDS, no quadro dos princípios OpenBIM, fornece uma base tecnicamente consistente para estruturar a validação parcial dos requisitos da ETI Infraestrutura, desde que sejam explicitamente reconhecidos os limites da formalização digital e o papel insubstituível do julgamento técnico do engenheiro.

3. Metodologia Aplicada

A metodologia proposta visa apoiar a validação do cumprimento da ETI Infraestrutura ferroviária através de modelos BIM baseados em formatos abertos, alinhados com os princípios do OpenBIM. O objetivo não é substituir o julgamento técnico do engenheiro, mas estruturar, de forma rastreável e verificável, a validação dos requisitos regulamentares que podem ser formalizados digitalmente, reconhecendo que apenas uma parte da ETI pode ser traduzida em regras computacionais sem perda de significado técnico.

A metodologia organiza-se em quatro etapas principais:

1. Seleção e interpretação dos requisitos da ETI Infraestrutura
2. Tradução dos requisitos regulamentares em requisitos BIM
3. Formalização em regras IDS
4. Validação no modelo IFC e análise crítica

Estas etapas asseguram a rastreabilidade entre o texto regulamentar, os parâmetros do modelo BIM e os resultados da validação.

3.1. Seleção e interpretação dos requisitos da ETI Infraestrutura

Os requisitos da ETI Infraestrutura são selecionados de acordo com o contexto do projeto. Cada requisito é analisado quanto à sua natureza regulamentar, distinguindo-se entre requisitos quantitativos diretos, requisitos condicionais e requisitos dependentes de interpretação qualitativa ou de exceções regulamentares.

Para cada requisito são identificados:

- o tipo de dados, unidades e domínio de valores admissíveis;
- as condições de aplicação dependentes do contexto.

Apenas os requisitos quantitativos diretos e uma parte dos requisitos condicionais são considerados candidatos à validação automática. Os restantes são explicitamente identificados como não formalizáveis e mantidos no domínio da análise técnica manual, evitando a criação de regras artificiais suscetíveis de produzir falsas conformidades.

3.2. Tradução dos requisitos regulamentares em requisitos BIM

Os requisitos selecionados são traduzidos em requisitos BIM através da definição explícita da correspondência entre o texto regulamentar e os elementos do modelo de informação. Para cada requisito são identificados:

- os objetos BIM e a sua classe IFC;
- as propriedades necessárias à verificação.

Quando os conceitos utilizados na ETI não possuem correspondência direta no esquema IFC, são definidas interpretações operacionais documentadas, assegurando que a regra BIM representa de forma tecnicamente coerente o requisito regulamentar.

3.3. Formalização em regras IDS

Os requisitos BIM considerados formalizáveis são convertidos em regras IDS, especificando os objetos a verificar, as propriedades obrigatórias e as condições de conformidade. As regras são formuladas de modo a distinguir claramente três situações: conformidade, não conformidade e impossibilidade de verificação por ausência ou inadequação da informação no modelo.

A utilização do IDS limita-se à validação de parâmetros explicitamente presentes no modelo IFC, excluindo requisitos dependentes de análises geométricas contínuas ou de interpretação contextual externa. Esta limitação pode originar situações de "falsa conformidade", nas quais a validação automática confirma a presença da informação exigida no modelo, mas não garante o cumprimento efetivo do requisito regulamentar, devido à ausência de análise espacial contínua.

3.4. Validação no modelo IFC e análise crítica

As regras IDS são aplicadas ao modelo IFC através de ferramentas compatíveis com formatos abertos, produzindo um conjunto estruturado de resultados associado a objetos e propriedades específicas do modelo. Estes resultados constituem evidência técnica de apoio à decisão, não sendo interpretados como uma decisão regulamentar final.

Cada não conformidade e cada situação de não verificabilidade é analisada criticamente, distinguindo-se entre incumprimentos reais dos requisitos da ETI e limitações decorrentes da representação ou parametrização do modelo BIM. Desta forma, a metodologia assegura uma aplicação rigorosa e tecnicamente fundamentada da validação regulamentar baseada em BIM, preservando o papel central do engenheiro no processo de certificação ferroviária.

4. Caso de Estudo

4.1. Objetivo e enquadramento do caso de estudo

O caso de estudo visa avaliar a aplicabilidade prática da metodologia proposta para a validação do cumprimento da ETI Infraestrutura através de modelos BIM em formatos abertos. O objetivo não é apenas demonstrar situações de conformidade, mas também identificar casos de não conformidade, não verificabilidade e falsas conformidades, de forma a testar os limites reais da formalização regulamentar baseada em IDS.

O cenário analisado corresponde a um troço de via ferroviária convencional, em fase de projeto, com bitola ibérica (1668 mm) em Portugal, velocidade máxima de exploração de 200 km/h e

presença de plataformas de passageiros, sem aplicação de outros casos específicos regulamentares.

A seleção deste cenário permite introduzir situações em que os requisitos regulamentares dependem explicitamente da velocidade de exploração e da geometria do traçado, criando condições para avaliar a robustez da metodologia e identificar os seus limites.

4.2. Identificação e seleção dos requisitos regulamentares aplicáveis

Com base nas características do cenário, procedeu-se à identificação de requisitos relevantes da ETI Infraestrutura. A seleção inicial incluiu um conjunto alargado de requisitos, posteriormente classificados de acordo com a sua natureza regulamentar e a sua possibilidade de serem convertidos em IDS, conforme definido na metodologia.

A Tabela 1 apresenta um subconjunto representativo dos requisitos analisados, incluindo requisitos formalizados em IDS e requisitos explicitamente excluídos (total ou parcial) da validação automática.

Tabela 1: Requisitos ETI analisados no caso de estudo

N.º	Requisito	Ponto da ETI	Valor a cumprir	Tipo de requisito	IDS
R1	Bitola	4.2.4.1	1668mm	Quantitativo direto	Completa
R2	Entre-eixo das vias	4.2.3.2	≥ 3.92 m	Quantitativo direto	Completa
R3	Raio mínimo horizontal	4.2.3.4	150 m	Quantitativo condicional	Parcial
R4	Raio mínimo vertical (curvas convexas/côncavas)	4.2.3.5	500 m convexa / 900 m côncava	Quantitativo direto	Completa
R5	Altura das plataformas	4.2.9.2	550 ou 760 mm	Quantitativo direto	Completa
R6	Traçado da via ao longo das plataformas	4.2.9.4	Raio > 300 m	Condicional / contextual	Parcial
R7	Gabari de Obstáculos	4.2.3.1	PTb+	Qualitativo / geométrico	Parcial (informacional)

Os requisitos dependentes de condições geométricas contínuas, exceções regulamentares ou avaliação qualitativa foram explicitamente excluídos (total ou parcial) da validação automática, sendo assinalados como sujeitos a verificação técnica manual.

4.3. Tradução dos requisitos regulamentares em requisitos BIM

Os requisitos considerados formalizáveis foram traduzidos em requisitos BIM através da identificação explícita dos objetos IFC relevantes, das propriedades necessárias à verificação e das unidades e domínios de valores aplicáveis.

Estas decisões de tradução foram documentadas como parte integrante do processo, permitindo a sua auditoria e discussão técnica.

Objeto BIM	Alinhamento
Ator Requerente	Cliente
Ator Fornecedor	Projetista VIA

Fase de Projeto	Projeto de execução
Uso BIM	Cumprimento Normativo
Informação Geométrica	
Detalhe	Representação do eixo com elementos essenciais de traçado (linhas, curvas, transições).
Dimensão	2D
Localização	Absoluta
Aparência	Representação gráfica simplificada, suficiente para reconhecimento em ambiente de coordenação.
Comportamento Paramétrico	Parametrização básica (raio de curva horizontal e vertical, entre eixo, bitola), para permitir atualizações consistentes.
Informação Alfanumérica	
Identificação	Nome - Código de linha - Classificação (SECCCLASS)
Conteúdo de informação	Raio Mínimo horizontal e vertical - Bitola - Entre eixo
Entidade IFC	IfcAlignment

Figura 1: Definição de requisitos BIM

4.4. Modelação BIM e preparação do modelo IFC

O modelo BIM foi desenvolvido com foco na informação necessária à validação regulamentar, assegurando a correta identificação dos elementos da via e das plataformas. Atendendo às limitações do IDS na verificação direta de geometria, parâmetros geométricos relevantes (raios de curvatura horizontais e verticais), foram previamente convertidos em propriedades explícitas associadas aos objetos IFC correspondentes, através de processos automatizados consistentes com o modelo geométrico.

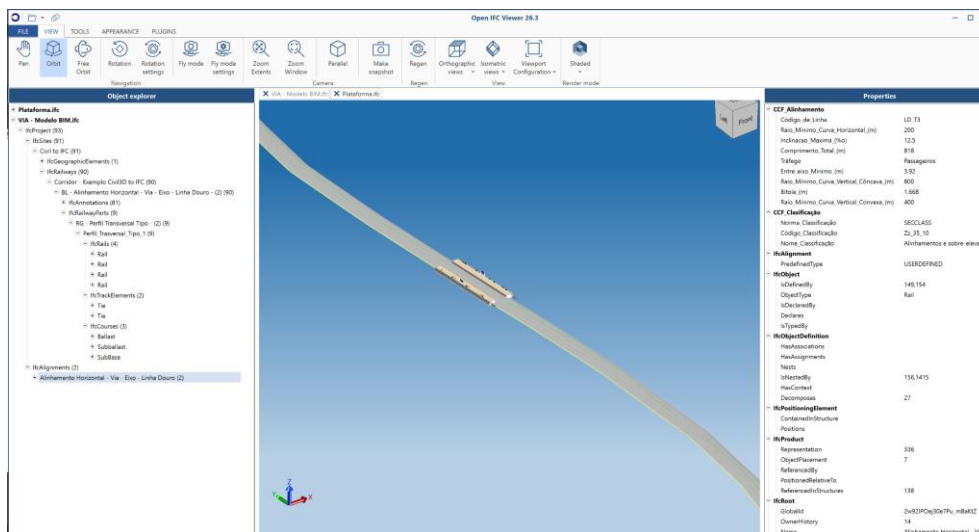


Figura 2: Modelo BIM em IFC – Estrutura do Modelo

O modelo foi exportado para IFC e verificado quanto à consistência dos objetos, propriedades e unidades necessárias à aplicação das regras IDS num controlo de qualidade global.

4.5. Implementação das regras IDS

Os requisitos considerados formalizáveis foram convertidos em regras IDS, especificando os objetos IFC a verificar, as propriedades obrigatórias e as condições de conformidade. No caso de requisitos condicionais, as regras foram formuladas de forma parcial, validando apenas os parâmetros explicitamente representados no modelo e sinalizando a necessidade de análise técnica complementar quando aplicável.

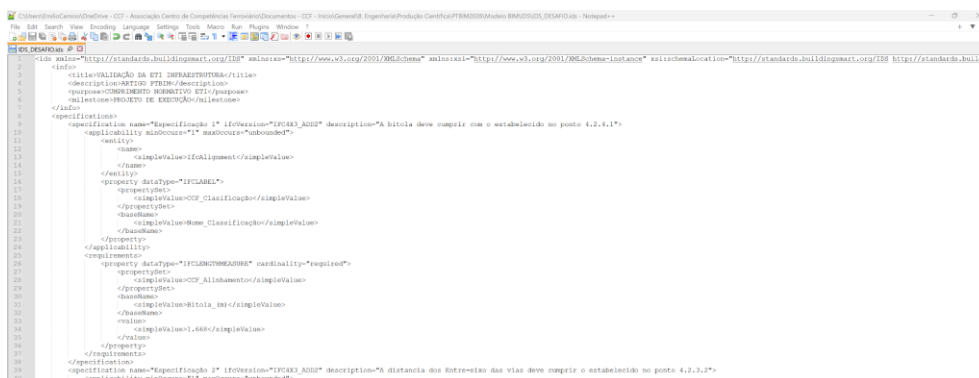


Figura 3: Definição de Regras IDS

A aplicação das regras IDS ao modelo IFC produziu um conjunto estruturado de resultados, distinguindo situações de conformidade, não conformidade e impossibilidade de verificação.

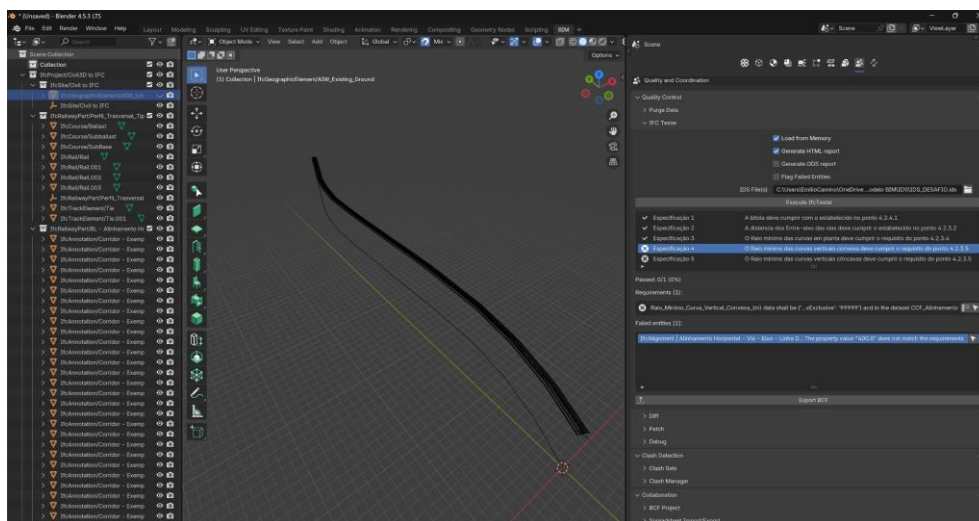


Figura 4: Modelo IFC em Blender para realizar a validação das regras IDS

4.6. Resultados da validação e análise crítica

Os resultados obtidos na validação automática dos requisitos ETI considerados no caso de estudo, são apresentados na Tabela 2, distinguindo entre conformidade, não conformidade e impossibilidade de verificação:

Tabela 2: Síntese dos resultados da validação regulamentar

N.º	Requisito	Tipo de requisito	Formalização em IDS	Resultado	Observações técnicas
R1	Bitola	Quantitativo direto	Completa	Conforme	Valor explicitamente declarado no modelo IFC
R2	Entre-eixo das vias	Quantitativo direto	Completa	Conforme	Verificação baseada em parâmetro discreto

R3	Raio mínimo horizontal	Quantitativo condicional	Parcial	Conforme	Segmento com raio inferior ao mínimo admissível
R4	Raio mínimo vertical (curvas convexas/côncavas)	Quantitativo direto	Completa	Não Conforme	Curvas convexas e côncavas fora dos limites regulamentar
R5	Altura das plataformas	Quantitativo direto	Completa	Conforme	Altura compatível com valores normalizados
R6	Traçado da via ao longo das plataformas	Condicional / contextual	Parcial	Não verificável	Dependência de condições geométricas e contextuais
R7	Gabari de Obstáculos	Qualitativo / geométrico	Parcial (informacional)	Conforme (formal)	Conformidade informacional sem validação geométrica

Na Figura 5, apresenta-se o relatório de validação do IDS e do IFC, realizado no software Blender, onde se podem observar alguns dos resultados obtidos.



Figura 5: Relatório de validação de cumprimento normativo

A identificação de uma não conformidade efetiva permitiu validar a capacidade da metodologia para detetar incumprimentos regulamentares de forma objetiva e rastreável. Por outro lado, a existência de requisitos não verificáveis evidenciou os limites intrínsecos da abordagem e a necessidade de intervenção técnica humana.

4.7. Caso crítico de validação parcial e falsa conformidade

Durante a aplicação da metodologia ao estudo de caso, identificou-se uma situação representativa das limitações intrínsecas da validação automática baseada em IDS. No que respeita ao requisito associado ao gabari da via, o modelo IFC incluía a identificação explícita do tipo de gabarito aplicável ao troço em análise, permitindo a sua verificação formal através de uma regra IDS.

Do ponto de vista estritamente informacional, o requisito foi considerado conforme, uma vez que o modelo declarava corretamente o gabarito regulamentar aplicável. Contudo, esta conformidade formal não garante, por si só, o cumprimento efetivo do requisito regulamentar, uma vez que a validação do gabarito depende da verificação geométrica contínua do espaço disponível ao longo do traçado, incluindo interferências locais, elementos da plataforma e variações do alinhamento.

Este caso ilustra uma situação de falsa conformidade, na qual a validação automática confirma a presença da informação exigida, mas não substitui a análise técnica necessária para avaliar o cumprimento real do requisito. Em contexto de certificação ferroviária, a aceitação deste resultado exige necessariamente a intervenção do engenheiro, responsável por avaliar a adequação geométrica do traçado face ao gabarito declarado.

A identificação explícita desta limitação no âmbito do estudo de caso reforça o carácter crítico da metodologia proposta, evidenciando que o IDS constitui um instrumento eficaz para apoiar a verificação regulamentar, mas não um mecanismo autónomo de aprovação.

5. Discussão

Este trabalho demonstrou que a validação do cumprimento da ETI Infraestrutura pode ser parcialmente estruturada através de modelos BIM baseados em formatos abertos, desde que seja adotada uma abordagem metodológica que distinga explicitamente entre requisitos regulamentares formalizáveis e não formalizáveis. A utilização combinada de IFC e IDS permite transformar um subconjunto relevante das ETI, tradicionalmente avaliadas por interpretação manual, em regras digitais verificáveis, rastreáveis e auditáveis.

A aplicação da metodologia a um estudo de caso real evidenciou que requisitos quantitativos diretos, como bitola, raios mínimos e alturas de plataformas, podem ser verificados automaticamente com elevado grau de consistência, desde que a informação necessária esteja explicitamente representada no modelo. Estes resultados confirmam o potencial do OpenBIM como suporte técnico à validação regulamentar e ao controlo de qualidade em projetos ferroviários, em linha com outras abordagens de verificação automática presentes na literatura [4] [8] [9].

Em paralelo, o estudo evidenciou limites estruturais da automatização regulamentar. Requisitos dependentes de geometria contínua, relações espaciais complexas ou interpretação contextual não podem ser plenamente capturados por regras declarativas baseadas em propriedades, mesmo quando suportadas por IDS. Nestes casos, a validação automática pode conduzir a situações de falsa conformidade informacional, nas quais a presença de dados no modelo não garante o cumprimento efetivo do requisito regulamentar, confirmando limitações já identificadas em estudos anteriores [5] [8].

Neste contexto, a abordagem proposta poderá integrar-se nas fases preliminares do processo de certificação ferroviária europeia ou nacional, nomeadamente durante o desenvolvimento do projeto, a verificação interna do cumprimento regulamentar e a preparação da documentação técnica para avaliação por Organismos Notificados ou Autoridades Nacionais de Segurança, complementando as práticas atuais de análise especializada.

Como desenvolvimento futuro, recomenda-se a integração desta abordagem com mecanismos complementares de análise geométrica e lógica contextual, de forma a ampliar o número de

requisitos regulamentares suscetíveis de validação automática e reduzir situações de falsa conformidade.

6. Conclusões

O caso de estudo confirma que a metodologia permite validar automaticamente um subconjunto relevante dos requisitos da ETI Infraestrutura, produzindo resultados rastreáveis e tecnicamente fundamentados. Simultaneamente, evidencia de forma clara os limites da formalização digital e a necessidade de complementar a validação automática com julgamento técnico especializado nos casos em que os requisitos dependem de geometria contínua, contexto operacional ou interpretação regulamentar.

Em síntese, o artigo apresenta uma metodologia para a validação regulamentar ferroviária baseada em princípios OpenBIM, combinando automatização, rastreabilidade e uma abordagem crítica aos limites da validação digital. A aplicação proposta evidencia o potencial desta abordagem para apoiar processos de certificação mais estruturados e transparentes, mantendo o engenheiro como elemento central do processo decisório.

Referências

- [1] União Europeia, “Diretiva (UE) 2016/797 do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário na União Europeia,” 2016.
- [2] Comissão Europeia, “Regulamento (UE) n.º 1299/2014 relativo à especificação técnica de interoperabilidade para o subsistema «infraestruturas» do sistema ferroviário da União Europeia,” 2014.
- [3] A. Borrmann, M. König, C. Koch and J. Beetz, *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*, 2018.
- [4] Z. Ma, H. Zhu, X. Xiang, Ž. Turk and R. Klinec, “Automatic compliance checking of BIM models against quality standards based on ontology technology,” *Automation in Construction*, vol. 166, 2024.
- [5] Y.-C. Lee, C. M. Eastman, W. Solihin and R. See, “Modularized rule-based validation of a BIM model pertaining to model views,” *Automation in Construction*, vol. 63, pp. 1-11, 2016.
- [6] International Organization for Standardization, *ISO 16739-1:2024 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema*, 2024.
- [7] buildingSMART International, “<https://github.com/buildingSMART/IDS>,” 2024. [Online].
- [8] Y.-C. Lee, C. M. Eastman and W. Solihin, “Rules and validation processes for interoperable BIM data exchange,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 8, pp. 97-114, 2021.
- [9] M. Häußler, S. Esser and A. Borrmann, “Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN,” *Automation in Construction*, vol. 121, 2021.