

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Uma Avaliação do IFC para Representação de Modelos para Análise Estrutural  
de Pontes**

Matheus do Nascimento Duarte  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**MATHEUS DO NASCIMENTO DUARTE**

**Uma Avaliação do IFC para Representação de Modelos para Análise Estrutural  
de Pontes**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Jose Carlos Lopes Ribeiro

Coorientador: Kleos M. Lenz Cesar Junior

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D812u Duarte, Matheus do Nascimento, 1995-  
2025 Uma avaliação do IFC para representação de modelos para  
análise estrutural de pontes / Matheus do Nascimento Duarte. –  
Viçosa, MG, 2025.  
1 dissertação eletrônica (87 f.): il. (algumas color.).

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.276>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Modelagem de informação da construção. 2. Pontes.  
3. Análise estrutural (Engenharia). I. Ribeiro, José Carlos Lopes,  
1977-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 690.0285

**MATHEUS DO NASCIMENTO DUARTE**

**Uma Avaliação do IFC para Representação de Modelos para Análise Estrutural de Pontes**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de março de 2025.

Assentimento:

---

Matheus do Nascimento Duarte  
Autor

---

Jose Carlos Lopes Ribeiro  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 09/05/2025 às 18:29:11 e pelo orientador em 10/05/2025 às 16:25:25. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **XPYN.TC75.6PZ2** e clique no botão 'Validar documento'.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me sustentou, e só por Sua graça pude chegar até aqui. Toda honra e glória ao Teu nome.

Aos meus pais, Waldir e Elza, à minha irmã Amanda e à minha noiva Glauciene, por todo amor, apoio, compreensão e companheirismo ao longo dessa caminhada. Cada gesto e palavra de incentivo foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente.

À minha família, em especial aos meus tios Reinaldo e Márcia, minha tia Maria Auxiliadora, meus primos e primas, minha sogra Edinice, meus cunhados Gláucio e Glauciane, e meu sobrinho Benício, por tornarem os dias mais leves em meio aos desafios. O carinho e os momentos de descontração foram essenciais nessa jornada.

À minha segunda família, a equipe da Indelével, nas pessoas do Felipe, Raphael, Antônio, Gustavo e Fernando, pelo apoio incondicional, pela compreensão diante dos compromissos acadêmicos e pela amizade que tornou essa caminhada mais fácil.

Aos meus amigos, Michael, Rafael, Júnior, Matheus B., Duda, Lucas, Matheus C., Pedro e tantos outros, pelo apoio constante e pela parceria em todos os momentos, seja nos desafios ou nas conquistas.

Ao meu orientador e coorientador, José Carlos L. Ribeiro e Kléos M. L. César Jr., que tanto respeito e admiro, por confiarem no meu trabalho e me conduzirem com dedicação, profissionalismo e amizade. Suas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Aos nossos encontros de terça-feira, junto ao Guilherme, que sempre trouxeram reflexões valiosas e impulsionaram este trabalho. À UFV, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta dissertação se tornasse realidade, o meu mais sincero agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro unicamente do DNIT, por meio do projeto de pesquisa “Apoio à implementação da metodologia BIM e desenvolvimento de metodologias e ferramentas para gestão de OAE” firmado entre o DNIT e a UFV via Termo de Execução Descentralizada TED 703/2020.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

DUARTE, Matheus do Nascimento, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2025. **Uma Avaliação do IFC para Representação de Modelos para Análise Estrutural de Pontes**. Orientador: Jose Carlos Lopes Ribeiro. Coorientador: Kleos Magalhaes Lenz Cesar Junior.

O avanço do Building Information Modeling (BIM) tem impulsionado mudanças significativas na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), especialmente no setor de infraestrutura. No entanto, a modelagem de pontes para análise estrutural ainda enfrenta desafios relacionados à interoperabilidade e à organização das informações no esquema Industry Foundation Classes (IFC). Esta dissertação investiga a aplicação do IFC 4.3 na criação de modelos de pontes, explorando soluções que possibilitem a representação de geometrias, propriedades físicas e carregamentos estruturais. O estudo desenvolve um framework para a criação de modelos IFC voltados à análise estrutural de pontes, abordando a estruturação de informações para garantir compatibilidade com o princípio OpenBIM. Além disso, é proposta uma metodologia para a instanciação IFC de veículos-tipo e cargas móveis, considerando sua integração com modelos analíticos. A pesquisa também discute as limitações semânticas do IFC para representar certos elementos estruturais e a carga móvel, e sugere direções para aprimoramentos futuros, especialmente no contexto de novos desenvolvimentos. Os resultados obtidos reforçam a importância do BIM na infraestrutura e apontam caminhos para o aprimoramento da interoperabilidade e da eficiência na troca de informações em modelos de pontes. O trabalho contribui consolidando diretrizes para a aplicação do IFC 4.3 e fornecendo subsídios para futuras melhorias no esquema de dados.

Palavras-chave: IFC; interoperabilidade; pontes; análise estrutural

## ABSTRACT

DUARTE, Matheus do Nascimento, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2025. **An Assessment of IFC Model Representation for Structural Analysis of Bridges**. Adviser: Jose Carlos Lopes Ribeiro. Co-adviser: Kleos Magalhaes Lenz Cesar Junior.

The advancement of Building Information Modeling (BIM) has driven significant changes in the Architecture, Engineering, Construction, and Operation (AECO) industry, especially in the infrastructure sector. However, bridge modeling for structural analysis still faces challenges related to interoperability and the organization of information in the Industry Foundation Classes (IFC) schema. This dissertation investigates the application of IFC 4.3 in bridge modeling, exploring solutions that enable the representation of geometries, physical properties, and structural loads. The study develops a framework for creating IFC models aimed at structural analysis of bridges, addressing the structuring of information to ensure compatibility with OpenBIM principle. Additionally, a methodology is proposed for the IFC instantiation of standard vehicles and moving loads, considering their integration with analytical models. The research also discusses the semantic limitations of IFC in representing certain structural elements, and the moving loads, and suggests directions for future improvements, particularly in the context of new developments. The results reinforce the importance of BIM in infrastructure and highlight paths for improving interoperability and efficiency in information exchange in bridge models. The study contributes by consolidating guidelines for the application of IFC 4.3 and providing insights for future enhancements in the data schema.

Keywords: IFC; interoperability; bridges; structural analysis

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Linha do tempo de lançamentos das versões do IFC.....	19
Figura 2-2 - Arquitetura do esquema de dados da versão IFC 4.3.....	21
Figura 2-3 - Ilustração do conceito de uso do MVD no esquema IFC.....	23
Figura 2-4 - Situação desejada à padrões e soluções <i>OpenBIM</i> .....	24
Figura 2-5 - Estrutura ECS ( <i>Entity Component System</i> ) em comparação com objetos IFC.....	25
Figura 3-1 - Etapas do trabalho baseadas na DSR.....	35
Figura 3-2 - Fluxo de informações na composição do modelo analítico em BIM.....	38
Figura 3-3 - Classes correspondentes às estruturas componentes de uma ponte em IFC.....	40
Figura 3-4 - Classes correspondentes aos elementos componentes da superestrutura de uma ponte em IFC.....	41
Figura 3-5 - Classes correspondentes aos elementos componentes da fundação de uma ponte em IFC.....	41
Figura 3-6 - Classes IFC correspondentes à montagem da mesoestrutura de uma ponte.....	42
Figura 3-7 - Classes IFC correspondentes à montagem do encontro de uma ponte.....	43
Figura 3-8 - Estrutura para representação da seção de elementos em IFC.....	45
Figura 3-9 - Estrutura de atribuição de propriedades a materiais.....	46
Figura 3-10 - Propriedades mecânicas de materiais.....	46
Figura 3-11 - Propriedades de materiais específicos.....	47
Figura 3-12 - Framework para criação de modelos IFC de pontes.....	48
Figura 3-13 - Representação geométrica da ponte reproduzida a partir do modelo IFC.....	49
Figura 3-14 - Representação e atributos da viga longarina do MGS.....	50
Figura 3-15 - Representação e atributos da viga longarina do MGC.....	51
Figura 3-16 - Instanciação da representação geométrica da viga longarina no MGS.....	52
Figura 3-17 - Instanciação da representação geométrica da viga longarina no MGC.....	53
Figura 3-18 - Tempo de execução versus tamanho do modelo.....	54

Figura 4-1 - Arquitetura de dados IFC (Árvore 3D) .....	64
Figura 4-2 - Configuração de cargas estáticas definidas pela ABNT NBR 7188:2013.....	66
Figura 4-3 - Veículo de cargas especiais .....	67
Figure 4-4 - Esquema dos veículos-tipo de normas anteriores .....	68
Figura 4-5 - Diagrama de classes IFC empregadas na instanciação das cargas de veículo-tipo.....	72
Figura 4-6 - Grafo do veículo-tipo instanciado em IFC.....	74
Figura 4-7 - Visualização do modelo de ponte após inclusão de veículo-tipo TB-450 na plataforma usBim .....	75
Figura 4-8 - Visualização do modelo de ponte após inclusão de veículo-tipo TB-450 na plataforma Blender .....	76
Figura 4-9 - Caso de carregamento na interface do CSI Bridge.....	77
Figura 4-10 - Demonstração de resultado de verificação do arquivo IFC na ferramenta <i>Validation</i> .....	78

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação.
BCF	<i>BIM Collaboration Format</i> (Formato de colaboração BIM).
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelo de Informação da Construção).
DER	Departamento de Estradas e Rodagem.
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
HTML	<i>HyperText Markup Language</i> (Linguagem de Marcação de Hipertexto).
IDM	<i>Information Delivery Manual</i> (Manual de entrega das informações).
IDS	<i>Information Delivery Specification</i> (Especificação de entrega de informação).
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> (Classes da Indústria da Construção).
IFD	<i>International Framework for Dictionaries</i> (Estrutura internacional para dicionários).
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização).
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i> (Notação de Objeto JavaScript).
MVD	<i>Model View Definition</i> (Definição do Modelo de Vista).
UFV	Universidade Federal de Viçosa.
XML	<i>Extensible Markup Language</i> (Linguagem de Marcação Extensível).

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>11</b>
1.1. Generalidades .....	11
1.2. Objetivos .....	12
1.3. Justificativa.....	13
1.4. Estrutura da dissertação .....	14
Referências Bibliográficas.....	14
<b>CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1. <i>Building Information Modeling</i> .....	17
2.2. <i>OpenBIM</i> .....	17
2.3. <i>Industry Foundation Classes</i> .....	19
2.4. Programação Orientada a Objeto .....	22
2.5. <i>Model View Definition</i> .....	23
2.6. IFC 5 .....	24
2.7. BIM e infraestrutura.....	26
Referências Bibliográficas.....	27
<b>CAPÍTULO 3 – UM FRAMEWORK PARA A CRIAÇÃO DE MODELOS IFC PARA ANÁLISE ESTRUTURAL .....</b>	<b>31</b>
3.1. Introdução .....	32
3.2. Metodologia de pesquisa .....	34
3.3. Investigação do problema .....	35
3.4. Identificação dos artefatos e definição de estratégias.....	38
3.5. Desenvolvimento da solução .....	40
3.5.1. Definição semântica dos elementos e estruturas espaciais .....	40
3.5.2. Simplificação da representação geométrica .....	43
3.5.3. Definição dos materiais e suas propriedades.....	46
3.5.4. <i>Framework</i> da estrutura completa .....	47
3.6. Validação e avaliação do artefato .....	48
3.6.1. Elaboração dos modelos IFC.....	49
3.6.2. Comparação entre os modelos IFC .....	50
3.6.3. Métricas dos algoritmos de interpretação .....	54

3.7. Conclusões .....	55
Referências Bibliográficas.....	56
<b>CAPÍTULO 4 – INSTANCIAÇÃO DE VEÍCULO-TIPO EM IFC E SUA REPRESENTAÇÃO EM MODELOS DE PONTE .....</b>	<b>61</b>
4.1. Introdução .....	62
4.2. Revisão de literatura .....	63
4.2.1. <i>Industry Foundation Classes</i> .....	63
4.2.2. Cargas de tráfego nas normas brasileiras .....	65
4.2.3. Aplicações do IFC em análise estrutural.....	68
4.3. Metodologia.....	69
4.4. Estudo de Caso.....	72
4.4.1. Interpretação dos modelos .....	74
4.4.2. Discussões.....	78
4.5. Conclusões .....	80
Referências Bibliográficas.....	81
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>86</b>
5.1. Considerações finais .....	86
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	86

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1. Generalidades

A indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) vem passando por uma transformação significativa impulsionada pela integração de novas tecnologias, conceitos e abordagens que redefinem o significado de "construção" nos próximos anos (FORCAEL *et al.*, 2020). O conceito de Construção 4.0 tem sido amplamente estudado na literatura (CRAVEIRO *et al.*, 2019; MUNIANDAY *et al.*, 2024; PERRIER *et al.*, 2024) e representa a convergência de tendências e tecnologias digitais e físicas, remodelando a forma como os ativos construídos são projetados e executados (SAWHNEY, 2020).

A Construção 4.0 se apoia em três pilares principais: produção industrial, abrangendo métodos como pré-fabricação e impressão 3D; sistemas físico-cibernéticos, que incluem o uso de robôs para tarefas arriscadas e repetitivas e drones para levantamentos e posicionamentos; e tecnologias digitais, como a Internet das Coisas (IoT), *laser scanning* e o *Building Information Modeling* (BIM) (SAWHNEY, 2020).

Dentre as diversas definições disponíveis, Borkowski (2023) propõe que o BIM pode ser compreendido sob duas perspectivas. De forma ampla, trata-se de um processo colaborativo que envolve pessoas, sistemas de informação, bancos de dados e softwares. Em um nível mais específico, o BIM pode ser descrito como uma base de dados semântica de elementos de construção, acompanhando-os ao longo de sua vida útil. O uso dessa tecnologia traz benefícios a diversos agentes do setor AECO, como proprietários, projetistas e construtores, ao longo das várias fases do empreendimento, desde a concepção até a operação (EASTMAN *et al.*, 2014).

Além de uma inovação tecnológica, o BIM representa um mercado em crescimento acelerado. Estima-se que esse mercado tenha alcançado US\$ 8,5 bilhões em 2024, com projeção de crescimento para US\$ 29 bilhões até 2034 (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2024). Esse avanço não apenas melhora os processos do setor AECO, mas também abre novas oportunidades para desenvolvedores de software, projetistas e construtores.

Embora originalmente concebido para aplicações em edifícios, o BIM tem sido cada vez mais adotado no setor de infraestrutura, permitindo maior eficiência e melhor

gerenciamento de projetos complexos. Infraestruturas, como rodovias e pontes, apresentam desafios adicionais devido à sua grande extensão e interação com o ambiente (VIGNALI *et al.*, 2021). Nesse contexto, o uso de soluções BIM promove a colaboração e a troca de informações entre diferentes disciplinas. Entre essas soluções, destaca-se o *Industry Foundation Classes* (IFC), que aprimora significativamente a interoperabilidade entre diferentes softwares e profissionais envolvidos nos projetos (JUSTO *et al.*, 2021).

A recente expansão do esquema IFC para infraestrutura, por meio da versão IFC 4.3, Addendum 2, Corrigendum 0 (IFC 4.3.2.0), doravante denominado IFC 4.3, reforça essa tendência. Com a inclusão de elementos específicos para obras de infraestrutura, como rodovias, pontes e ferrovias, essa versão amplia as possibilidades de aplicação do BIM no setor. No entanto, devido ao seu lançamento recente, desenvolvedores de software ainda estão adaptando suas soluções para suportar plenamente o novo esquema. Isso evidencia a necessidade de estudos que explorem suas aplicações e potencialidades, especialmente no desenvolvimento de modelos BIM para pontes no contexto do IFC.

## 1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal a apresentação e validação de soluções baseadas no IFC 4.3 para a criação de modelos de pontes de concreto sobre longarinas, com foco na sua aplicação em análises estruturais. Para isso, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- desenvolvimento e validação de um *framework* para a criação de modelos de pontes, garantindo a inclusão das informações necessárias para a análise estrutural;
- delineamento de modelos de representação geométrica de elementos de pontes que sejam compatíveis com a interpretação das informações no modelo estrutural analítico;
- desenvolvimento e validação de uma metodologia para a instanciação de veículos-tipo e veículos de cargas especiais atuantes em pontes no esquema IFC 4.3; e
- análise da potencialidade de ferramentas BIM na interpretação de informações provenientes da análise estrutural.

### 1.3. Justificativa

No Brasil, o Governo Federal publicou, em 2018, o Decreto Federal nº 9.377/2018, revogado e substituído pelo Decreto Federal 9.983/2019, no qual foi estabelecida a Estratégia BIM BR. Em janeiro de 2024, foi instituída pelo Decreto nº 11.888 (BRASIL, 2024) a Nova Estratégia BIM BR. A iniciativa tem por finalidade promover um ambiente adequado ao investimento em BIM e sua difusão no país. Baseadas na Estratégia BIM BR, instituições públicas como o DNIT vêm estabelecendo, paralelamente, estratégias para a adoção do BIM em sua área de atuação.

No cenário nacional, o emprego do BIM no setor de infraestrutura apresenta um crescimento lento. De acordo com a Fundação Getúlio Vargas (CASTELO, 2018), em pesquisa realizada em 2018, apenas 8,5% das empresas de infraestrutura entrevistadas utilizava a tecnologia BIM. Em nova pesquisa realizada em março de 2024 (CASTELO, 2024), seis anos após a implantação da Estratégia BIM BR, 15,5% das empresas de obras viárias, e 13,7% das empresas de obras de arte especiais pesquisadas utilizavam a tecnologia BIM. É notável o aumento do uso do BIM no setor de infraestrutura após a implementação da Estratégia BIM BR, embora ainda haja muito a crescer. Em comparação, empresas do setor de construção experimentaram um maior crescimento na utilização do BIM, partindo de 9,2% em 2018 para 20,6% em 2024, chegando a 37,2% das empresas no setor de edificações residenciais.

Regionalmente, instituições públicas têm disponibilizado materiais, com os objetivos de regulamentar e orientar os profissionais envolvidos nos processos de licitação. Exemplos desses materiais são o Caderno BIM para Infraestrutura Rodoviária (DER, 2023) do estado do Paraná; o Caderno Técnico de Especificações de Escopo de Projetos BIM de Rodovias (DER, 2024) do Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG); e o Caderno BIM SUDECAP (SUDECAP, 2024) da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, entre outros.

Este trabalho insere-se no âmbito de uma parceria estabelecida entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), por meio do Termo de Execução Descentralizada (TED) 703/2020, relacionado à pesquisa intitulada “Apoio à implementação da metodologia BIM e desenvolvimento de metodologias e ferramentas para gestão de Obras de Artes Especiais (OAEs)”. Um dos objetivos dessa parceria foi desenvolver o Sistema de

Análise Estrutural de Pontes (SAEP), uma ferramenta criada no contexto da pesquisa com o objetivo principal de realizar análises estruturais de pontes submetidas a cargas especiais (DNIT, 2023).

Além de suas funcionalidades principais, o SAEP também tem como objetivo importar modelos de pontes no formato IFC 4.3 e traduzi-los para sua estrutura de dados interna. Complementarmente, o objetivo deste trabalho no projeto foi desenvolver um sistema de exportação IFC, capaz de gerar modelos no padrão IFC 4.3.2.0 a partir dos dados contidos na estrutura do SAEP. Essa tarefa exigiu um estudo aprofundado sobre a estrutura de classes do esquema IFC, visando construir um *framework* para criação de modelos de pontes e, assim, atender às necessidades dos elementos representados no SAEP.

#### 1.4. Estrutura da dissertação

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 englobou a introdução geral do trabalho. O segundo capítulo contém o referencial teórico necessário para a melhor compreensão do conteúdo abordado nos capítulos seguintes. O capítulo 3 trata-se de um trabalho onde foi apresentado e validado, com base na metodologia *Design Science Research*, um *framework* para a composição de modelos de pontes em IFC endereçados à interpretação para a análise estrutural. O capítulo 4 diz respeito a um trabalho onde foi proposta uma estrutura para a instanciação de veículos-tipo normatizados, contendo sua configuração de carga e sua representação geométrica. Por fim, o capítulo 5 reúne as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, com base nos resultados obtidos ao longo das seções.

#### Referências Bibliográficas

ANA MARIA CASTELO. Insituto Brasileiro de Economia. **A construção digital**. 2018. Disponível em: <https://blogdoibre.fgv.br/posts/construcao-digital>. Acesso em: 28 jan. 2025.

ANA MARIA CASTELO. Insituto Brasileiro de Economia. **A digitalização na construção**: o uso do bim. o uso do BIM. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <https://blogdoibre.fgv.br/posts/digitalizacao-na-construcao-o-uso-do-bim>. Acesso em: 28 jan. 2025.

BORKOWSKI, Andrzej Szymon. A Literature Review of BIM Definitions: narrow and broad views. **Technologies**, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 176, 11 dez. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/technologies11060176>.

CRAVEIRO, Flávio; DUARTE, José Pinto; BARTOLO, Helena; BARTOLO, Paulo Jorge. Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: a perspective on construction 4.0. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 103, p. 251-267, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>.

Departamento de Estradas de Rodagem. **Caderno BIM**: infraestrutura rodoviária. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023.

Departamento de Estradas de Rodagem. **Caderno Técnico de Especificações de Escopo de Projetos BIM de Rodovias**. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2024.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Diretrizes para Modelagem de Dados para um Programa de Análise Estrutural Compatível com BIM**. Brasília, 2023. 133 p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP M2.A1).

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **Manual de BIM**: um guia de modelagem de informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Porto Alegre: Bookman, 2014. 503 p. Tradução de: Cervantes Gonçalves Ayres Filho *et al.*

FORCAEL, Eric; FERRARI, Isabella; OPAZO-VEGA, Alexander; PULIDO-ARCAS, Jesús Alberto. Construction 4.0: a literature review. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 22, p. 9755, 23 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12229755>.

FUTURE MARKETING INSIGHTS (org.). **Building Information Management (BIM) Market Analysis**: trends & forecast 2024-2034. Trends & Forecast 2024-2034. 2024. Disponível em: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/building-information-modeling-bim-software-market>. Acesso em: 14 fev. 2025.

GOVERNO FEDERAL. **Estratégia BIM BR**: Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling - BIM. Brasília: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, 2018.

JUSTO, Andrés; SOILÁN, Mario; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, Ana; RIVEIRO, Belén. Scan-to-BIM for the infrastructure domain: generation of ifc-compliant models of road infrastructure assets and semantics using 3d point cloud data. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 127, p. 103703, jul. 2021. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103703>.

MUNIANDAY, Praveena; SARAWAK, Miri; RAHMAN, Rahimi A.; ABDULLAH, Al-Sultan; ESA, Muneera. A comprehensive analysis of the importance of investigating the impact of Construction 4.0 skills on project performance. **Journal Of Information Technology In Construction**, [S.L.], v. 29, p. 686-721, 29 set. 2024. International Council for Research and Innovation in Building and Construction.  
<http://dx.doi.org/10.36680/j.itcon.2024.031>.

PERRIER, Nathalie; FIRST, Aristide Bled; BOURGAULT, Mario; COUSIN, Nolwenn; DANJOU, Christophe; PELLERIN, Robert; ROLAND, Thibaut. Construction 4.0: a comparative analysis of research and practice. **Journal Of Information Technology In Construction**, [S.L.], v. 29, p. 16-39, 6 fev. 2024. International Council for Research and Innovation in Building and Construction.  
<http://dx.doi.org/10.36680/j.itcon.2024.002>.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Caderno BIM SUDECAP**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2024.

SAWHNEY, Anil; RILEY, Mike; IRIZARRY, Javier. **CONSTRUCTION 4.0**: an innovation platform for the built environment. New York: Taylor & Francis, 2020.

VIGNALI, Valeria; ACERRA, Ennia Mariapaola; LANTIERI, Claudio; VINCENZO, Federica di; PIACENTINI, Giorgio; PANCALDI, Stefano. Building information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 128, p. 103752, ago. 2021. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103752>.

## CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

### **2.1. Building Information Modeling**

BIM (*Building Information Modeling* – Modelagem de Informação da Construção) tem diversas definições na literatura. Kymmell (2008) o define como uma simulação projetada consistindo no modelo 3D de componentes do projeto com links para todas as informações necessárias relacionadas ao planejamento, construção ou operação do projeto e descomissionamento.

Azhar *et al.* (2012) abordam o conceito BIM como uma tecnologia e como um processo. Além disso, traz diferentes utilidades ao longo da vida útil do elemento, com aplicações desde a fase de estudo prévio, projeto, planejamento, construção e pós construção. Ao utilizar o BIM, é realizado um uso mais profundo da tecnologia nos projetos, na engenharia, construção e operação de instalações (BORRMANN *et al.*, 2018 p. 3).

O BIM se baseia em conceitos essenciais (ANDRADE; RUSCHEL, 2009): a colaboração, a interoperabilidade, e a modelagem paramétrica. A colaboração refere-se à prática das atividades de vários atores no processo da construção de forma conjunta e coordenada em um modelo compartilhado. Interoperabilidade consiste na troca de dados entre os atores envolvidos no processo da construção sem a perda de informações. A modelagem paramétrica consiste na criação de modelos tridimensionais baseados em parâmetros e relações, permitindo maior adaptabilidade durante o processo de modelagem.

### **2.2. OpenBIM**

Buscando solucionar problemas de interoperabilidade, surgiram as soluções em *OpenBIM*. Tais soluções visam a redução de erros em colaboração, aumentando a interoperabilidade entre softwares e garantindo o rigor na colaboração entre disciplinas, o que resulta no aumento da eficiência de todo o projeto (JIANG *et al.*, 2019).

Em 1994, foi fundada a *International Alliance of Interoperability* - Aliança Internacional para a Interoperabilidade (IAI), por desenvolvedores de softwares, usuários e autoridades públicas ao redor do mundo. A organização tinha como missão definir, promover e publicar uma especificação para o compartilhamento de dados ao

longo do ciclo de vida projetado, globalmente, entre as disciplinas e entre aplicações técnicas. Em 2003, a aliança foi renomeada para *buildingSMART International* (bSI).

A organização sem fins lucrativos vem obtendo sucesso em definir formatos de dados independentes visando uma compreensível troca de dados em modelos digitais de construção (BORRMANN *et al.*, 2018).

Entre as principais iniciativas de padrões abertos, destacam-se:

- IFC – é um formato de dados neutro, descrito detalhadamente na próxima subseção;
- IDM – *Information Delivery Manual* (Manual de entrega das informações): é o formato voltado aos processos. O IDM dispõe de todas as informações acerca dos responsáveis pelo projeto e os respectivos papéis desempenhados ao longo da vida útil da construção, além de quando, como e para quem cada informação deve ser entregue (BORRMANN *et al.*, 2018);
- MVD – *Model View Definitions* (Definições de visualização do modelo): a bSI define o MVD como um nível específico de implementação do IFC para descrever a troca de dados para um uso ou fluxo de trabalho específico. O foco de seu uso é estreitar o escopo de acordo com a necessidade do receptor;
- IFD – *International Framework for Dictionaries* (Estrutura internacional para dicionários): um documento interpretável por computador que define os Requisitos de Intercâmbio nas trocas baseadas em modelos. O IFD define como os objetos, classificações, materiais, propriedades e valores devem ser entregues. Baseado nesse padrão, foi criado o bsDD - *buildingSmart Data Dictionary* (Dicionário de Dados buildingSmart), uma biblioteca que contém e explica os termos da indústria da AECO globalmente, de forma a garantir a não ambiguidade dos termos;
- BCF – *BIM Collaboration Format* (Formato de colaboração BIM): permite a comunicação de diferentes aplicações BIM sobre problemas encontrados no modelo, usufruindo de modelos IFC previamente compartilhados entre si, de acordo com a definição da bSI. O BCF trabalha através da transferência de dados no formato XML, na qual a informação é contextualizada acerca de um problema referenciando diretamente uma vista, capturada via PNG e coordenadas IFC;

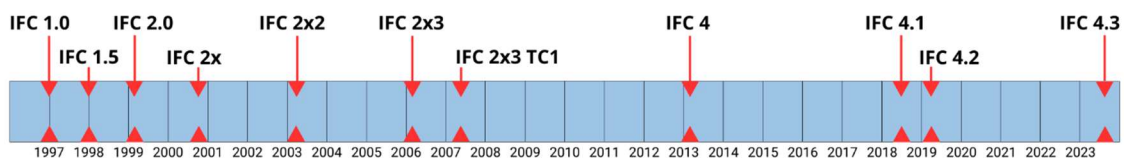
- IDS – *Information Delivery Specification* (Especificação de entrega de informação): padrão em desenvolvimento que define exigências de informações de uma forma de fácil leitura para humanos e interpretável para máquinas. O IDS tem como objetivo substituir os atuais requerimentos de informações que, tradicionalmente, são compartilhados de modo não interpretável ao computador, assim como em planilhas ou arquivos PDF. Com o uso do IDS, um usuário pode requerer o uso de propriedades, materiais, classificações, tipos de entidades e dependência de objetos.

### 2.3. Industry Foundation Classes

O IFC é um complexo modelo de dados no qual é possível representar geometria e estrutura semântica de um modelo de construção utilizando uma abordagem orientada a objeto (BORRMANN *et al.*, 2018, p. 83). A bSI (2025a) define que o IFC é compreendido por um esquema disponível em diversas formas, com documentação disponível em HTML, definições de *Property Sets* e *Quantity Sets* disponíveis em XML, e mecanismos de troca ou serialização de arquivos de dados.

O IFC surgiu como um meio de intercâmbio de informações entre aplicações de diferentes disciplinas da indústria AECO. Portanto, como forma de cumprir uma troca completa de dados, o esquema busca representar todos os elementos de um projeto, o que acarreta no volume de dados elevado. Por isso, ao longo de mais de 25 anos desde seu lançamento, o IFC segue em desenvolvimento, atualmente na versão 4.3.2.0. Na Figura 2-1 representam-se os lançamentos das versões do IFC entre 1997 e 2025.

Figura 2-1 - Linha do tempo de lançamentos das versões do IFC



Fonte: adaptado de Borrmann *et al.* (2018).

Em caráter normativo, a ISO 16739:2024 - *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries* - revisada em

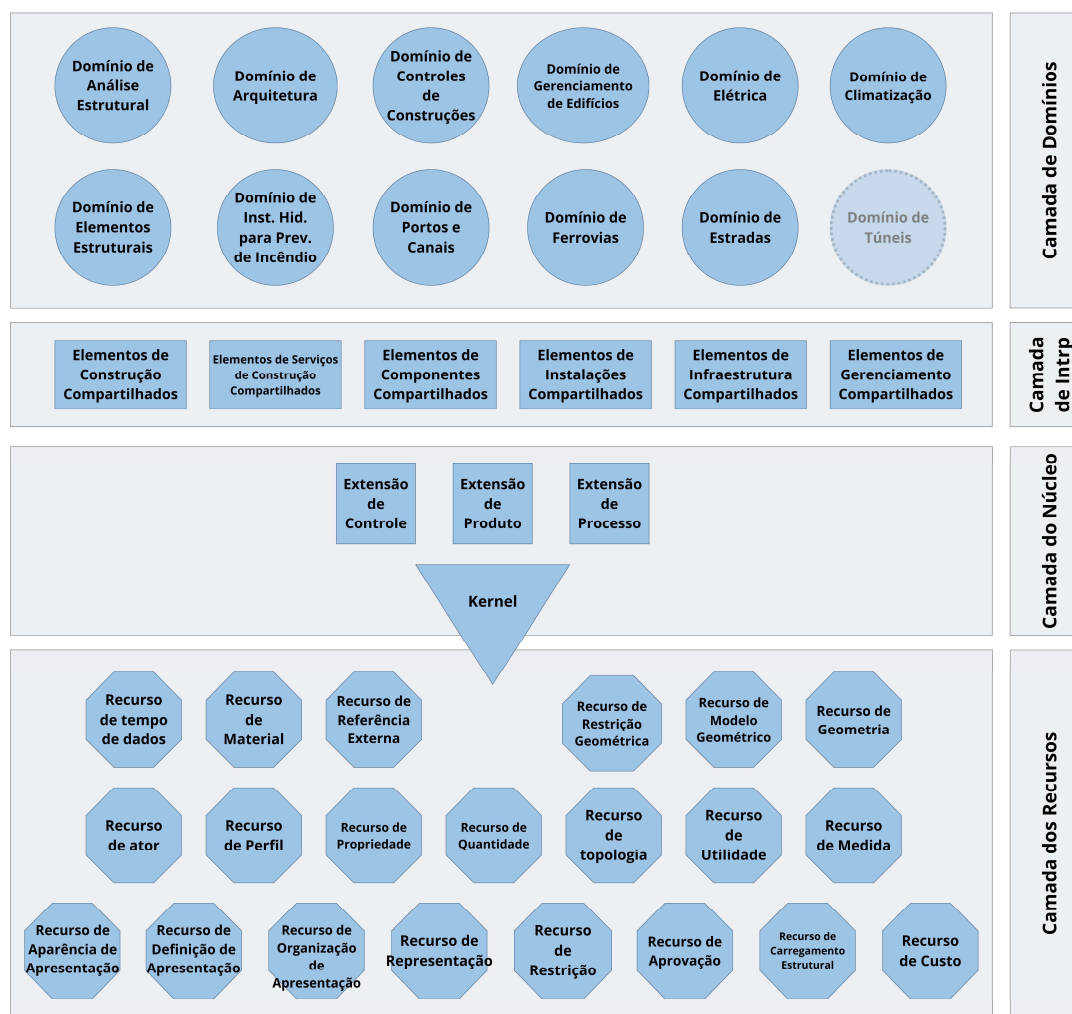
2018, define as características do IFC. Além disso, a documentação do IFC 4.3.2.0 (2025) faz referência às seguintes normas:

- ISO 10303 – 11, Sistemas de automação industrial e integração – Representação e troca de dados de produto – Parte 11: métodos de descrição: Manual de referência da linguagem EXPRESS;
- ISO 10303 – 21, Sistemas de automação industrial e integração – Representação e troca de dados de produto – Parte 21: métodos de implementação: Codificação de texto simples da estrutura de dados;
- ISO 10303 – 28, Sistemas de automação industrial e integração – Representação e troca de dados de produto – Parte 28: métodos de implementação: Representações XML de esquemas e dados EXPRESS, usando esquemas XML.

A grande adição no IFC 4.3 foi a inclusão de elementos de infraestrutura. De acordo com a bSI (2025a), estão inclusas definições de formato de trocas BIM necessárias ao longo das fases da vida útil de edificações e infraestrutura: demonstração de necessidade, concepção de necessidade, delineamento de viabilidade, estudo de viabilidade e delineamento de autoridade financeira, delineamento de projeto conceitual, projeto conceitual completo, projeto coordenado, aquisição e autoridade financeira completa, informação de produção, construção, operação e manutenção. Também estão inclusas as várias disciplinas envolvidas no ciclo de vida: projeto de arquitetura e de engenharia civil, engenharia de serviços e utilidades, engenharia estrutural, planejamento da construção, aquisição, gerenciamento de instalações e utilidades, gerenciamento de projeto, gerenciamento de exigência do cliente, autoridades da indústria para permissão e aprovação. Além disso, o escopo inclui: estrutura de projeto, componentes físicos, componentes espaciais, itens de análise, processos, recursos, controles, atores e definições de contexto. A versão IFC 4.4 já vem sendo desenvolvida, tendo como característica a adição de funcionalidades, principalmente para túneis.

A arquitetura de esquema de dados do IFC é dividida em quatro camadas conceituais, nas quais cada esquema faz parte de uma única camada. Na Figura 2-2 demonstra-se a arquitetura de dados da versão IFC 4.3.

Figura 2-2 - Arquitetura do esquema de dados da versão IFC 4.3.



Fonte: adaptado de *buildingSmart International* (2023).

A bSI (2025a) define que:

- a camada dos domínios inclui esquemas que contém definições de entidades que são especializações de produtos, processos ou recursos específicos para uma certa disciplina. Essas definições são tipicamente utilizadas para troca e compartilhamento de informações dentro do próprio domínio;
- a camada de interoperabilidade inclui esquemas contendo definições de classes que são específicas para uma especialização geral de produto, processo ou recurso usado entre diversas disciplinas. Essas definições são tipicamente utilizadas para troca e compartilhamento de informações entre domínios;
- a camada do núcleo inclui o esquema do *kernel* e as extensões principais, contendo as definições de entidade mais gerais. Todas as entidades definidas

na camada do núcleo ou acima dela herdam atributos da classe *lfcRoot*, ou seja, apresentam um identificador único (*GlobalId*) e informações opcionais de autoria e histórico (*OwnerHistory*), além de nome (*Name*) e descrição (*Description*); e

- a camada de recursos é a camada mais baixa na cadeia, e inclui todos os esquemas individuais contendo definições de recursos. Tais definições não devem ser utilizadas independentemente de uma definição declarada em algum nível acima.

#### **2.4. Programação Orientada a Objeto**

A Programação Orientada a Objeto (POO) é um paradigma de programação baseado na utilização de objetos como elementos fundamentais. De forma simplificada, objetos são instâncias de classes, que determinam a informação contida no objeto e como ele pode manipulá-la (RICARTE, 2001). Segundo Stefik e Bobrow (1985), os objetos são entidades que combinam as propriedades dos procedimentos e dados, uma vez que estes executam cálculos e armazenam o estado local.

Os quatro pilares em que se baseia a POO são os conceitos de encapsulamento, abstração, herança e polimorfismo.

O encapsulamento é o princípio de projeto pelo qual cada componente de um programa deve agregar toda a informação relevante para sua manipulação como uma unidade (RICARTE, 2001). Por sua vez, a abstração representa o princípio de que programas não devem fazer suposições sobre implementações e representações internas (STEFIK; BOBROW, 1985). Esse conceito permite a ocultação de informação não relevante à classe ao nível do objeto. Ambos conceitos não são exclusivos à POO, mas potencialmente utilizados no paradigma pelo apoio no conceito de herança.

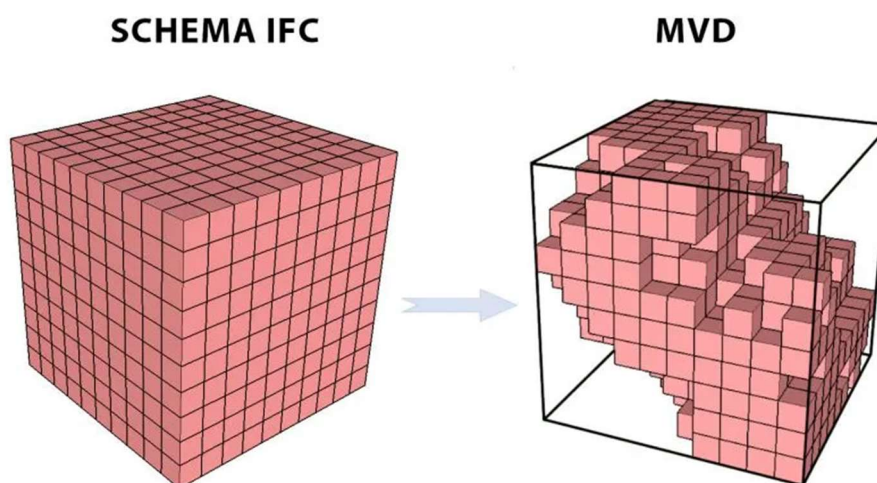
A herança é um mecanismo que permite que características comuns a diversas classes sejam fatoradas em uma classe base, ou superclasse (RICARTE, 2001). Stefik e Bobrow (1985) destacam que a hereditariedade permite a criação fácil de objetos que são quase idênticos a outros, com mudanças adicionais. Os autores ainda afirmam que a hereditariedade reduz a necessidade de especificar informação redundante e simplifica a atualização e modificação, já que a informação pode ser adicionada e modificada em um só lugar.

Por fim, o polimorfismo, segundo Issaryakul e Hossain (2011), refere-se à habilidade de invocar a mesma função com uma diferente implementação, sob um diferente contexto.

## 2.5. Model View Definition

O esquema do modelo de dados IFC é muito extenso, o que torna sua implementação desafiadora para os desenvolvedores. Além disso, a riqueza de informações que podem ser capturadas geralmente excede o nível pretendido em uma determinada aplicação na vida útil de um projeto (Beetz *et al.*, 2018). Isso evidencia a necessidade de padronizar os meios de especificar as informações esperadas de um modelo, garantindo clareza e interoperabilidade. Nesse contexto, surge o *Model View Definition* (MVD), uma solução que define as bases para a implementação de requerimentos em modelos IFC parciais. O MVD funciona como um filtro, incluindo apenas um subconjunto de classes relevantes para um uso específico do BIM, de acordo com os interesses definidos pelo MVD. Na Figura 2-3 ilustra-se o conceito de aplicação de um MVD em um modelo IFC.

Figura 2-3 - Ilustração do conceito de uso do MVD no esquema IFC.



Fonte: ACCA (2020).

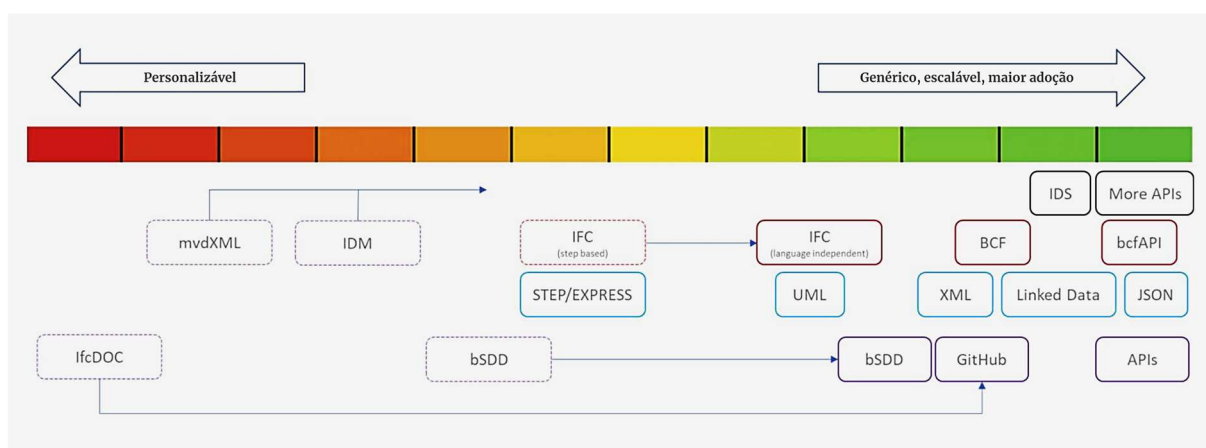
A bSI (2025b) afirma que por um certo período, a criação de MVD particulares era livre, bem como abordar desenvolvedores de software para implementá-los. Isso gerava uma situação em que os MVDs não eram interoperáveis entre si. Dessa forma, o conceito de MVD se tornou mais restrito. Há três MVDs básicos para a

implementação de softwares para IFC: *Coordination View*, no esquema IFC 2x3; *Reference View*, nos esquemas IFC 4 e IFC 4.3; e *Alignment View*, no esquema IFC 4.3. Além disso, existem casos específicos de usos do MVD, como o Arquitetônico, Estrutural, Instalações e Infraestrutura. Um exemplo é o *Structural Analysis View*, MVD desenvolvido no esquema IFC 2x3, com foco em modelos analíticos estruturais.

## 2.6. IFC 5

O esquema atual do IFC enfrenta diversas limitações que impactam sua implementação pela indústria, incluindo dificuldades na incorporação de atualizações, tamanhos excessivos de arquivos e escalabilidade limitada. Essas questões afetam diretamente seu uso em aplicações complexas, como a modelagem de infraestrutura e grandes edificações. Discussões sobre essas limitações apontam como principais causas a estrutura monolítica do IFC e sua dependência de tecnologias específicas, como o STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). Apesar dos avanços trazidos pelo IFC 4, que aprimorou a representação geométrica, e pelo IFC 4.3, que introduziu elementos de infraestrutura, a indústria reconhece que o formato baseado em STEP apresenta restrições inerentes. Assim, faz-se necessário adotar soluções mais genéricas, escaláveis e amplamente difundidas. Na Figura 2-4 ilustra-se um panorama dos padrões e soluções *OpenBIM* no contexto atual.

Figura 2-4 - Situação desejada à padrões e soluções *OpenBIM*

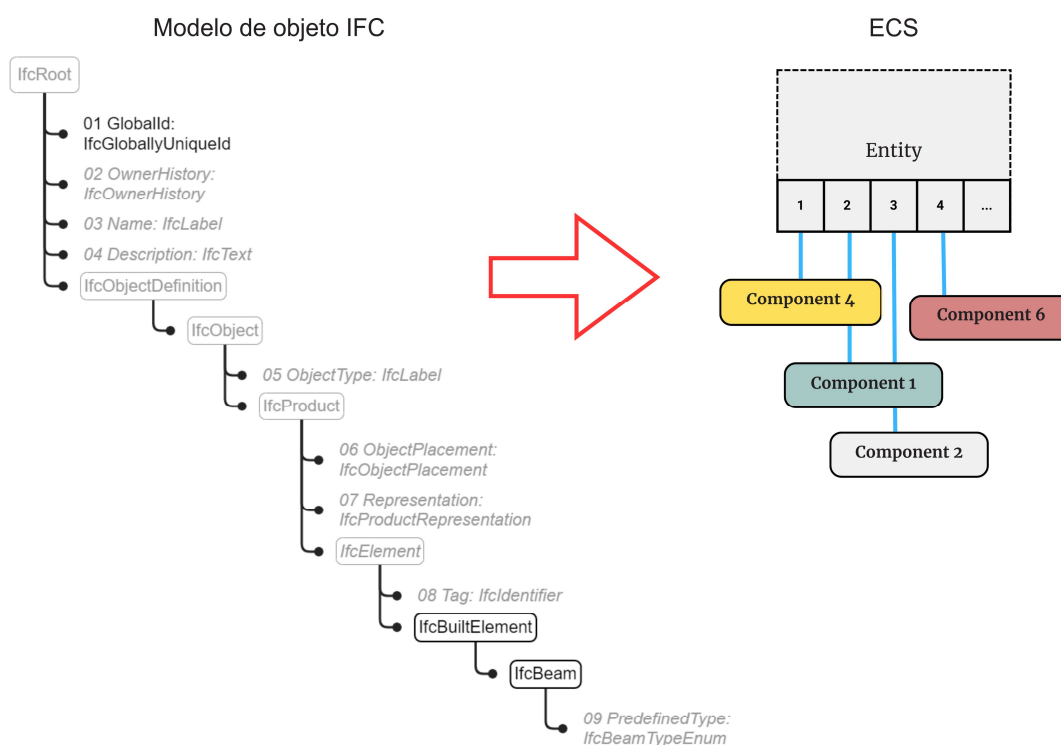


Fonte: *buildingSMART International (2025c)*.

O IFC 5 surge como uma resposta a esses desafios, trazendo uma série de melhorias para simplificar sua implementação, aumentar a interoperabilidade e

favorecer a colaboração por meio da modularização do esquema. Uma das principais inovações é a adoção do paradigma *Entity Component System* (ECS), uma estrutura desenvolvida na indústria de games e amplamente utilizada devido à sua flexibilidade e eficiência. O ECS organiza os modelos a partir de entidades, que funcionam como identificadores únicos dos objetos; componentes, que armazenam dados específicos sobre as entidades; e sistemas, que contêm lógicas operacionais aplicadas a determinadas entidades e componentes. Essa abordagem permite maior flexibilidade na estruturação dos dados e facilita a extensibilidade do modelo. Na Figura 2-5 ilustra-se a diferença entre a modelagem tradicional do IFC e a abordagem baseada em ECS.

Figura 2-5 - Estrutura ECS (*Entity Component System*) em comparação com objetos IFC



Fonte: o autor (2025).

Apesar dos benefícios, a transição para o IFC 5 impõe desafios, especialmente na representação geométrica e semântica dos modelos, bem como na padronização e implementação em softwares. Como alternativa para simplificar a geometria, propõe-se o uso de malhas triangulares explícitas. Embora essa abordagem reduza a complexidade computacional, gera debates sobre a necessidade de manter informações paramétricas sobre os elementos modelados. Além disso, a migração do

formato STEP para um padrão independente da linguagem representa um desafio significativo para os desenvolvedores. O IFC 5 adotará JSON (*JavaScript Object Notation*) como formato principal de serialização, um avanço baseado nos resultados do projeto ifcJSON, que desenvolveu uma serialização JSON para o IFC 4.3.

Paralelamente, tecnologias emergentes como o *Universal Scene Description* (USD) têm atraído atenção no setor AECO. O USD, desenvolvido pela Pixar, é um padrão de representação 3D amplamente utilizado em animação e modelagem digital. Suas principais vantagens incluem o gerenciamento eficiente de modelos complexos, a composição de dados de múltiplos autores e o gerenciamento incremental de alterações. O crescente interesse no USD levou a um replanejamento da direção do IFC 5, com a exploração de como conceitos do USD podem ser integrados ou servir de inspiração para o desenvolvimento futuro do padrão IFC. Segundo Vendrell (2024), algumas características do USD que podem beneficiar o IFC 5 incluem:

- a composição de dados: o USD permite a combinação de dados de diversas fontes de uma maneira não destrutiva, facilitando assim a colaboração;
- estrutura hierárquica: utiliza um sistema de “prims”, organizados em uma estrutura de árvore, similar à hierarquia de objetos no IFC;
- esquema extensível: dispõe de mecanismos para definição e extensão de esquema de dados de forma flexível; e
- performance otimizada: projetado para suportar grandes e complexos conjuntos de dados.

A bSI ainda não definiu uma data oficial para o lançamento do IFC 5 (VENDRELL, 2024). No entanto, diversos esforços estão em andamento para sua implementação. A tendência é que o lançamento ocorra de forma incremental, iniciando com uma versão básica (ACCA, 2024), que será posteriormente expandida para suportar mais funcionalidades e ampliar sua base de adoção na indústria AECO.

## **2.7. BIM e infraestrutura**

O emprego do BIM em projetos e construções de infraestrutura de transporte apresenta um crescimento nos últimos anos. DODGE Data & Analytics (2017) aponta o uso do BIM em infraestrutura na França, Reino Unido, Alemanha e Estados Unidos, nos anos de 2015 e 2017, e uma projeção, na época, para 2019. Os quatro países avançaram com a utilização do BIM no setor, partindo de menos de 27% dos projetos

em 2015, para mais de 48% em dois anos. Esse aumento é justificável tendo em vista o grande potencial do BIM durante a vida útil das obras de infraestrutura, desde a fase de projeto e construção (RAMAJI; MEMARI, 2018; AKANBI; ZHANG 2022), até as fases de operação e manutenção (ISALOVIC *et al.*, 2020).

Bradley *et al.* (2016) desenvolveram uma revisão de literatura onde levantaram trabalhos sobre o BIM em infraestrutura. Após a consulta à 69 publicações, os autores destacaram, entre as lacunas nas pesquisas, estudos acerca da integração da informação, com ênfase em um formato comum de dados para infraestrutura.

Costin *et al.* (2018) desenvolveram uma ampla revisão de literatura sobre o BIM e a infraestrutura de transportes, onde apresentaram discussões sobre as aplicações, desafios e recomendações. Foram consultadas 189 publicações, buscando levantar dados sobre a utilização do BIM no setor. Segundo os autores, os resultados apontam para a necessidade de um formato neutro para a troca de dados para promover a interoperabilidade. Tal necessidade é potencialmente suprida com o recente lançamento da versão IFC 4.3. Os autores complementaram que a colaboração contínua entre a academia e a indústria é necessária para mitigar maiores desafios, e alcançar o potencial máximo do BIM para a infraestrutura de transportes.

### Referências Bibliográficas

ACCA Software. **IFC 5**: o que é e como manejar o novo padrão openbim para intercâmbio de dados no setor aec. o que é e como manejar o novo padrão openBIM para intercâmbio de dados no setor AEC. 2024. Disponível em: <https://biblus.accasoftware.com/ptb/o-que-e-o-ifc-5/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

AKANBI, Temitope; ZHANG, Jiansong. Framework for Developing IFC-Based 3D Documentation from 2D Bridge Drawings. **Journal Of Computing In Civil Engineering**, v. 36, n. 1, p. 1-13, jan. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000986](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000986).

ANDRADE, Max Lira Veras X. de; RUSCHEL, Regina Coeli. APPLICATION INTEROPERABILITY BIM USED IN ARCHITECTURE THROUGH THE FORMAT IF. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 1-36, 15 dez. 2009. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.4237/gtp.v4i2.102>.

AZHAR, Salman; KHALFAN, Malik; MAQSOOD, Tayyab. Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond. **Australasian Journal Of Construction Economics And Building**, v. 12, n. 4, p. 15-28, nov. 2012. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.013120167780649>. Acesso em: 11 out. 2023.

BEETZ, Jakob; BORRMANN, André; WEISE, Matthias. Process-Based Definition of Model Content. In: BORRMANN, André; KÖNIG, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. **Building Information Modeling: technology foundations and industry practice**. Springer, 2018. p. 127.

BORRMANN, André; KONING, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. Building Information Modeling: Why? What? How? In: BORRMANN, André; KÖNIG, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. **Building Information Modeling: technology foundations and industry practice**. Springer, 2018. p. 3.

BORRMANN, André *et al.* Industry Foundation Classes: a standardized data model for the vendor-neutral exchange of digital building models. In: BORRMANN, André; KÖNIG, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. **Building Information Modeling: technology foundations and industry practice**. Springer, 2018. p. 83.

BRADLEY, Alex; LI, Haijiang; LARK, Robert; DUNN, Simon. BIM for infrastructure: an overall review and constructor perspective. **Automation In Construction**, v. 71, n. 1, p. 139-152, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>.

buildingSMART International Limited. **IFC4.3 Documentation**. Disponível em: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>. Acesso em: 28 jan. 2025a.

buildingSMART INTERNATIONAL. **Model View Definition (MVD): an introduction**. An Introduction. Disponível em: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/>. Acesso em: 28 jan. 2025b.

buildingSMART INTERNATIONAL. **Technical Roadmap buildingSMART: Getting ready for the future.** Disponível em: [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/09/20200430\\_buildingSMART\\_Technical\\_Roadmap.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/09/20200430_buildingSMART_Technical_Roadmap.pdf).

Acesso em: 15 fev. 2025c.

COSTIN, Aaron; ADIBFAR, Alireza; HU, Hanjin; CHEN, Stuart S.. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. **Automation In Construction**, v. 94, p. 257-281, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>.

DAVID DELGADO VENDRELL. buildingSMART International. **The Evolution of IFC: the path to IFC5.** The path to IFC5. 2024. buildingSMART Spain. Disponível em: <https://www.buildingsmart.es/2024/12/03/the-evolution-of-ifc-the-path-to-ifc5/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

DODGE Data & Analytics. **The Business Value of BIM for Infrastructure 2017.** SmartMarket Report. Bedford: Dodge Data & Analytics, 2017. Disponível em: <https://www.construction.com/toolkit/reports>. Acesso em: 15 nov. 2023.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **Manual de BIM: um guia de modelagem de informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores.** Porto Alegre: Bookman, 2014. 503 p. Tradução de: Cervantes Gonçalves Ayres Filho *et al.*.

International Organization for Standardization (ISO). ISO 10303-11: Industrial automation systems and integration Product data representation and exchange Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual. Genebra: ISO, 2004.

\_\_\_\_\_. ISO 10303-21: Industrial automation systems and integration Product data representation and exchange Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure. Genebra: ISO, 2016.

\_\_\_\_\_. ISO 10303-28: Industrial automation systems and integration Product data representation and exchange Part 28: Implementation methods: XML representations of EXPRESS schemas and data, using XML schemas. Genebra: ISO, 2007.

\_\_\_\_\_. ISO 16739: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Geneva: ISO, 2024.

ISAILOVIC, Dusan; STOJANOVIC, Vladeta; TRAPP, Matthias; RICHTER, Rico; HAJDIN, Rade; DÖLLNER, Jürgen. Bridge damage: detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. **Automation In Construction**, v. 112, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088>.

ISSARIYAKUL, T., HOSSAIN, E. (2012). A Review of the Polymorphism Concept in OOP. In: **Introduction to Network Simulator NS2**. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1406-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1406-3_17).

JIANG, Shaohua; JIANG, Liping; HAN, Yunwei; WU, Zheng; WANG, Na. OpenBIM: an enabling solution for information interoperability. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24, p. 1-27, 8 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app9245358>.

KYMMELL, Willen. **Building Information Modeling: planning and managing construction projects with 4D cad and simulations**. McGraw-Hill, 2008.

RAMAJI, Issa J.; MEMARI, Ali M.. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information mo. **Automation In Construction**, v. 90, p. 117-133, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.

RICARTE, Ivan Luiz Marques. **Programação Orientada a Objetos: uma abordagem com java**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001.

STEFIK, Mark; BOBROW, Daniel. Object-Oriented Programming: themes and variations. **Ai Magazine**, Palo Alto, v. 6, n. 4, p. 40-63, jan. 1985.

VAN BERLO *et al.* **The Challenges of talking about IFC5: the many views one can have of IFC**. Disponível em: [https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2024/09/20240829\\_Denver\\_ImplementerAssembly\\_day2.1\\_IFC5\\_part1\\_Greg-usecases.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2024/09/20240829_Denver_ImplementerAssembly_day2.1_IFC5_part1_Greg-usecases.pdf). Acessado em: 15 fev. 2025.

## CAPÍTULO 3 – UM FRAMEWORK PARA A CRIAÇÃO DE MODELOS IFC PARA ANÁLISE ESTRUTURAL

Matheus do Nascimento Duarte, Guilherme Palla Teixeira, José Carlos Lopes Ribeiro, Kléos Magalhães Lenz César Júnior, Diôgo Silva de Oliveira, José Maria Franco de Carvalho

### Resumo

---

A infraestrutura de transportes desempenha um papel estratégico na organização territorial, e as pontes são elementos essenciais para a conectividade e segurança viária. O uso do *Building Information Modeling* (BIM) tem avançado nesse setor, mas a interoperabilidade entre modelos autorais e analíticos estruturais ainda apresenta desafios, especialmente na interpretação eficiente dos dados. Este trabalho propõe um framework para a modelagem de pontes no formato *Industry Foundation Classes* (IFC), otimizando a organização semântica, a representação geométrica e a atribuição de propriedades. A abordagem, baseada em *Design Science Research* (DSR), possibilita a conversão eficiente de modelos autorais em representações analíticas estruturais. A comparação com um modelo IFC exportado do Revit demonstrou a preservação das informações, garantindo integridade semântica e geométrica. O uso de geometria implícita permitiu reduzir significativamente o volume de dados sem comprometer a fidelidade da modelagem. Além disso, a análise de desempenho indicou que a estrutura proposta não impacta a escalabilidade do processamento. Conclui-se que o framework atende aos requisitos para a criação de modelos analíticos estruturais de pontes, garantindo compatibilidade com o formato IFC. Como trabalho futuro, sugere-se investigar a interpretação de diferentes estruturas de modelos autorais em aplicações de análise estrutural.

**Palavras-chave:** IFC, BIM, Modelagem de Pontes, Análise Estrutural, Interoperabilidade.

---

### 3.1. Introdução

A infraestrutura desempenha um papel importante na estrutura organizacional de uma região, influenciando diretamente a qualidade de vida e o crescimento econômico local. Alguns sistemas são essenciais para a manutenção das funções sociais vitais, organização econômica e defesa nacional (Yang *et al.*, 2023), sendo classificados como Sistemas de Infraestrutura Crítica (SIC). Os SICs modernos de grande escala são sistemas complexos, por contarem com diversas dimensões, setores, atores, etc (Papadopoulus *et al.*, 2024). Além disso, raramente trabalham de forma isolada, estando normalmente fortemente acoplados e integrados a um sistema de infraestruturas interdependente. Essa integração aumenta a qualidade e eficiência dos SICs, mas também sua vulnerabilidade, tendo em vista que um colapso pode criar um efeito em cascata que impactaria todos os sistemas interligados (Justo *et al.*, 2021). Dentre os SICs, pode-se citar a infraestrutura de transportes, onde se destaca o papel das pontes.

Dada a importância estratégica das pontes, é de grande interesse o desenvolvimento de ferramentas e meios que auxiliem seu controle em todas as etapas de seu ciclo de vida. Nesse contexto, a utilização de tecnologias se mostra eficiente na indústria da AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação) (Azhar *et al.*, 2012; RAMAJI *et al.*, 2018; ISALOVIC *et al.*, 2020; AKANBI e ZHANG 2022), como o *Building Information Modeling* (BIM). Segundo Borrmann *et al.* (2018), ao utilizar o BIM, é realizado um uso mais profundo da tecnologia nos projetos, na engenharia, construção e operação de instalações. Kymmell (2008) define o BIM como uma simulação projetada consistindo no modelo 3D de componentes do projeto com links para todas as informações necessárias relacionadas ao planejamento, construção ou operação do projeto e descomissionamento. A utilização do BIM na infraestrutura vem sendo objeto de estudos (Bradley *et al.*, 2016; Costin *et al.*, 2018), onde os autores evidenciam a necessidade da colaboração contínua entre a academia e a indústria para mitigar maiores desafios, e alcançar o potencial máximo do BIM para a infraestrutura de transportes. Para o sucesso de sua metodologia, o BIM se baseia em três pilares: a modelagem paramétrica, a colaboração e a interoperabilidade.

A interoperabilidade é definida como a troca de dados livre de perdas entre softwares produzidos por diferentes desenvolvedores (Borrmann *et al.*, 2018). Ozturk

(2020) destaca ainda que a interoperabilidade é não somente o intercâmbio de dados, como também de significado. A interoperabilidade melhora a coordenação e colaboração apesar da dispersão na indústria da construção (MULLER *et al.*, 2017). O intercâmbio de dados evita o fornecimento de informações já presentes no modelo, assim como a ambiguidade e potenciais falhas no processo. A indústria, tal como os órgãos públicos, tem se esforçado para garantir o cumprimento da interoperabilidade, tendo como resultados iniciativas como o *CIM Steel Integration Standards (CIS/2)*, o *Industry Foundation Classes (IFC)*, entre outros. Apesar de sua importância e dos esforços constantes para melhora na troca de dados, a interoperabilidade segue sendo um desafio. Borrmann *et al.* (2018) apontam diversas dificuldades encontradas para o alcance da interoperabilidade, como a fragmentação do setor da construção, a colaboração temporária entre diferentes empresas, entre outras. Além disso, os grandes avanços dos vários softwares simultaneamente podem gerar problemas de compatibilidade, o que implica em problemas na interoperabilidade (SHIROWZHAN *et al.*, 2020).

O principal objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma estrutura de trabalho de modo a melhorar a interoperabilidade entre modelos arquitetônicos e modelos analíticos estruturais de pontes, baseado na versão IFC 4.3, na busca por uma interpretação mais eficiente e sem perda de dados. Ademais, são outros objetivos deste trabalho:

- levantar as principais dificuldades na interpretação de dados de modelos IFC na composição de um modelo analítico;
- apontar uma estrutura clara e objetiva de correlação entre entidades IFC e elementos de pontes, a fim de compor modelos de pontes de forma assertiva e padronizada, facilitando sua interpretação; e
- propor e avaliar melhores meios de transmitir dados utilizando o padrão IFC, principalmente dados de geometria dos elementos de pontes, visando uma interpretação mais eficiente e sem perda de dados.

As contribuições obtidas a partir deste trabalho são:

- um padrão de exportação de modelos de pontes utilizando o esquema IFC na versão 4.3; e

- uma estrutura apontando dados necessários em um modelo físico de ponte para a composição do modelo analítico estrutural de pontes de forma a favorecer a interpretação desses dados e a diminuição da perda de dados.

O trabalho é conduzido segundo a metodologia *Design Science Research* (DSR), descrita no subitem 3.2. No subitem 3.3, é trabalhada a identificação e conscientização do problema, onde serão abordados diversos aspectos acerca do emprego do BIM na infraestrutura e no processo de análise estrutural, além do panorama da utilização do IFC no fluxo entre a modelagem de pontes e a análise estrutural. Também são investigadas as estruturas ligadas ao modelo analítico existentes no IFC. No subitem 3.4 são destacadas as estratégias na construção da solução proposta, dividida em três etapas. O subitem 3.5 traz o desenvolvimento da ferramenta, com os esquemas de instanciação e organização das classes dos elementos de construção, a proposta para representação geométrica simplificada e a representação adequada das propriedades. No subitem 3.6 é avaliado o emprego da estrutura proposta, com a comparação na interpretação de modelos IFC contendo as mesmas informações, mas em estruturas distintas. No subitem 3.7, são discutidos os resultados, e revisados e explicitados os conhecimentos obtidos ao longo do trabalho.

### **3.2. Metodologia de pesquisa**

O trabalho foi desenvolvido utilizando a metodologia DSR, a qual tem foco no planejamento e desenvolvimento de artefatos aplicáveis, assim como sistemas, aplicações, métodos, entre outros, que podem contribuir potencialmente à eficácia dos sistemas de informação em organizações (Peffer *et al.*, 2007). A aplicabilidade da metodologia em problemas práticos, e seu uso em trabalhos acerca do IFC (Antunes *et al.*, 2024; Moura *et al.*, 2024) atestam a capacidade da DSR.

Seguindo essa metodologia, o trabalho parte da delimitação do problema a ser abordado, e a definição dos objetivos a serem cumpridos. Em seguida, parte-se à etapa de conscientização do problema, construída a partir de uma revisão bibliográfica. A terceira etapa conduz à identificação do artefato e definição das estratégias, seguida do desenvolvimento da solução. Por fim, conduz-se à avaliação do artefato buscando sua validação, seguida da análise dos resultados. Na Figura 3-1 apresenta-se uma relação entre a etapa desenvolvida e sua ocupação na DSR.

Figura 3-1 - Etapas do trabalho baseadas na DSR



Fonte: o autor (2025).

### 3.3. Investigação do problema

A tecnologia BIM vem sendo amplamente utilizada nas diversas fases de um projeto estrutural, com diversos trabalhos explorando as potencialidades do BIM na área da engenharia de estruturas. Ramaji e Memari (2018) destacaram que o campo da análise e projeto estrutural é um dos tipos mais empregados dentro da análise de engenharia, um dos usos do BIM (Messner *et al.*, 2021). Em seu trabalho, os autores discutiram o desenvolvimento de um novo mecanismo para a transformação de modelos baseados em IFC sob o *Model View Definition (MVD) Coordination View* para seu modelo estrutural equivalente em *Structural Analysis View*. Uma ferramenta foi desenvolvida então para automatizar a Troca de Informações Interpretadas (IIE – *Interpreted Information Exchange*), tendo sua aplicação testada e validada em um estudo de caso.

Shoeib *et al.* (2020) desenvolveram uma análise abrangente da interoperabilidade no domínio da análise estrutural, buscando avaliar a acurácia da troca de informações. É importante ressaltar que as informações mapeadas na troca de dados foram a geometria, carregamentos estáticos, condições de contorno e propriedades de materiais. Foram considerados na análise 5 softwares de análise estrutural atuantes no mercado. A partir do resultado da análise, um conversor de modelo de análise estrutural baseado em *web* foi desenvolvido, utilizando o esquema de dados IFC.

Sibenik e Kovacic (2020) buscaram identificar os problemas processuais na troca de dados entre projeto arquitetônico e análise estrutural, e propor melhorias. Os autores evidenciaram que o intercâmbio de dados via IFC é o mais utilizado nas pesquisas e ferramentas empregadas na indústria AECO. Os autores comentaram que melhorias sistemáticas podem ser alcançadas seguindo as seguintes estratégias: (a) introduzindo regras de interpretação na troca de dados; (b) focando em esquemas de dados de construção de diversos domínios específicos em vez de esquema integrado; e (c) desenvolvendo um novo processo de certificação baseado em domínios específicos no esquema de dados de construção.

Leonardi *et al.* (2024) destacaram as dificuldades nos procedimentos do BIM para análise em elementos finitos aplicados a construções históricas. Os autores introduziram, através do desenvolvimento de uma ferramenta, um método de análise de elementos finitos utilizando dados do formato aberto IFC. A validação da ferramenta ocorreu por meio da sua aplicação no projeto de um edifício, certificando sua capacidade de trabalho com geometrias complexas e escalabilidade.

Em paralelo, o BIM vem desempenhando um importante papel também na área da infraestrutura, sendo esse o foco do último lançamento do formato IFC, o IFC 4.3. A necessidade da inclusão de elementos de infraestrutura no IFC partiu de um aumento na demanda global, tendo como marco de início dos esforços a fundação do comitê *Infra Room* em 2013, uma subdivisão da *buildingSMART International* (bSI) (Borrman *et al.*, 2019).

No contexto das pontes, o modelo IFC-Bridge foi desenvolvido em 2002 (Yabuki *et al.*, 2006), a partir de um trabalho colaborativo entre grupos de pesquisa japonês e francês. O trabalho buscou a criação de um modelo de ponte padronizado baseado em IFC. A partir daí, constata-se a publicação de diversos trabalhos ao longo dos últimos anos abordando a utilização do esquema IFC em pontes.

Ji *et al.* (2013) introduziram uma extensão ao formato IFC-Bridge existente no momento do desenvolvimento do trabalho, promovendo assim um meio de troca de modelos paramétricos de pontes. Os autores destacaram as entidades adicionais necessárias para a definição dos parâmetros e captura de restrições geométricas e dimensionais.

Park *et al.* (2020) propuseram um novo framework de análise que integra um método de análise estrutural não dependente de malha dentro de um modelo de ponte

baseado em IFC. O trabalho buscou trazer soluções alternativas à análise pelo Método dos Elementos Finitos, tendo em vista as dificuldades intrínsecas à integração do método ao BIM. Os autores destacaram a importância no intercâmbio de informações entre os modelos arquitetônico e analítico. Assim, baseando-se nas entidades IFC, foi desenvolvido e validado o framework utilizando o método diferencial de partículas na análise estrutural.

Justo *et al.* (2023) apresentaram uma abordagem de modelagem automática de ponte treliçada a partir de dados de *laser scan* como fonte de informação geométrica. Além da geração de um modelo físico de informação, foi gerado também um grafo estrutural.

Apesar dos diversos esforços em prol da utilização do esquema IFC em pontes, ainda são escassos os trabalhos que se baseiem integralmente na versão IFC 4.3, tendo em vista seu recente lançamento oficial.

A atual estrutura do IFC comporta um domínio específico para elementos de análise estrutural. Segundo a bSI (2025), o *IfcStructuralAnalysisDomain* descreve o modelo de análise estrutural a fim de integrar de forma sólida com o domínio de engenharia estrutural. O domínio reutiliza definições existentes de elementos de construção e de estrutura espacial, e os associa às considerações estruturais. Seu foco é garantir que as informações de engenharia estrutural sejam capturadas e tornadas visíveis para outros domínios relacionados. Este inclui, em seu escopo elementos de barra e elementos de placa, retos ou curvos; conexões entre pontos, curvas e superfícies, e seus apoios; especificação de carregamentos incluindo forças pontuais, lineares, forças em uma superfície, forças devido a temperaturas, e suas associações à grupos, casos e combinações de carregamento; especificação de diferentes modelos de análise estrutural a fim de descrever diferentes aspectos ou partes de uma edificação; e resultados de análise definidos por deslocamentos e forças. O esquema não inclui em seu escopo análises dinâmicas, descrição de forças de protensão, topologia em elementos finitos, e resultados em malhas de elementos finitos, assim como tensões e deformações em elementos estruturais.

Em geral, estruturas de pontes demandam análises estruturais complexas devido à natureza de suas ações, bem como suas dimensões e formatos. Estruturas de dados capazes de comportar objetos gerados na análise são essenciais para o desempenho e qualidade da análise estrutural. Nesse contexto, o

*IfcStructuralAnalysisDomain* pode ser encarado como um meio de comunicação de dados extraídos das aplicações de análise estrutural, portando os elementos do modelo analítico, e destinando-os a outras aplicações de análise ou de usos posteriores à análise. Na definição da análise estrutural, no contexto do uso BIM, é evidenciada a necessidade da utilização do modelo de projeto autoral como requisito de informação (Messner *et al.*, 2021), tornando claro o fluxo de informações no processo de composição do modelo analítico, descrito na Figura 3-2. Dessa forma, mostra-se valoroso o foco na interpretação de modelos de projeto autoral, visto que a partir dessa etapa pode-se desenvolver o modelo analítico, tanto numa estrutura de dados personalizada quanto em IFC.

Figura 3-2 - Fluxo de informações na composição do modelo analítico em BIM



Fonte: o autor (2025).

### 3.4. Identificação dos artefatos e definição de estratégias

Informações provenientes do modelo de projeto são necessárias na construção de um modelo analítico estrutural. Do ponto de vista da interpretação de modelos IFC na formação de modelos analíticos, informações completas dos elementos estruturais permitem a escolha correta dos elementos correspondentes no modelo analítico, além de sua locação e conexão com os elementos adjacentes. Dados de representação geométrica e propriedades dos materiais providenciam informações necessárias na etapa de análise estrutural. Portanto, essas informações são essenciais na modelagem de pontes visando a troca de dados para automatização na construção de modelos analíticos. Entretanto, a falta de padrões na exportação de modelos de

pontes ainda resulta em modelos dissonantes. Esse fato compromete o valor semântico dos componentes do modelo, causando problemas na sua interpretação.

Independentemente da estrutura de dados utilizada na composição de modelos analíticos a partir de modelos autorais, seja utilizando o *IfcStructuralAnalysisDomain* como feito por Ramaji e Memari (2018), ou destinando-se a uma estrutura de dados personalizada, o primeiro esforço se encontra na interpretação dos modelos autorais, necessária para a captação das características dos elementos de construção. Além disso, observando o fluxo de trabalho BIM proposto no projeto de pontes, entende-se que, a criação de um modelo analítico com base em um modelo autoral, mesmo que utilizando posteriormente o *IfcStructuralAnalysisDomain*, se torna inviável pela equipe de modelagem da ponte, visto que a criação de modelos analíticos demanda habilidades e conhecimentos requeridos na própria fase de análise estrutural.

Na fase de análise estrutural, partindo da interpretação necessária para a criação do modelo analítico em IFC, a entrada desses dados em uma aplicação de análise em IFC pode ser desnecessária, visto que a partir da interpretação do modelo autoral, pode-se criar o modelo analítico na própria estrutura de dados da aplicação. Dessa forma, mostra-se valiosa a atenção na forma como os dados são organizados no modelo autoral, de forma a favorecer uma interpretação mais eficiente e assertiva.

Portanto, esse trabalho visa contornar problemas de interoperabilidade na criação de modelos analíticos de pontes explorando três causas prováveis: (a) o uso de elementos físicos sem a descrição do tipo predefinido, disponíveis para elementos de pontes na versão IFC 4.3, além da falta da montagem de grupos de elementos em suas estruturas físicas corretas; (b) a possibilidade de representação de informações por diferentes formas, principalmente em informações de representação geométrica; e (c) a falta de dados necessários para a construção do modelo analítico, principalmente dados de propriedades dos materiais. Enquanto a primeira causa cria problemas de endereçamento das informações dos elementos físicos a seus correspondentes analíticos, a segunda gera ineficiência e perda de dados durante a interpretação de modelos, e a terceira resulta em modelos incompletos.

Buscando contornar esses problemas, uma estrutura é proposta, baseando-se em três pilares: (a) a definição semântica dos elementos da ponte, bem como o agrupamento desses elementos nas estruturas espaciais adequadas; (b) a simplificação da representação geométrica; e (c) a definição correta das propriedades

dos materiais. A estrutura de trabalho proposta é determinada a partir do estudo e pesquisa na documentação do IFC 4.3 bSI (2025).

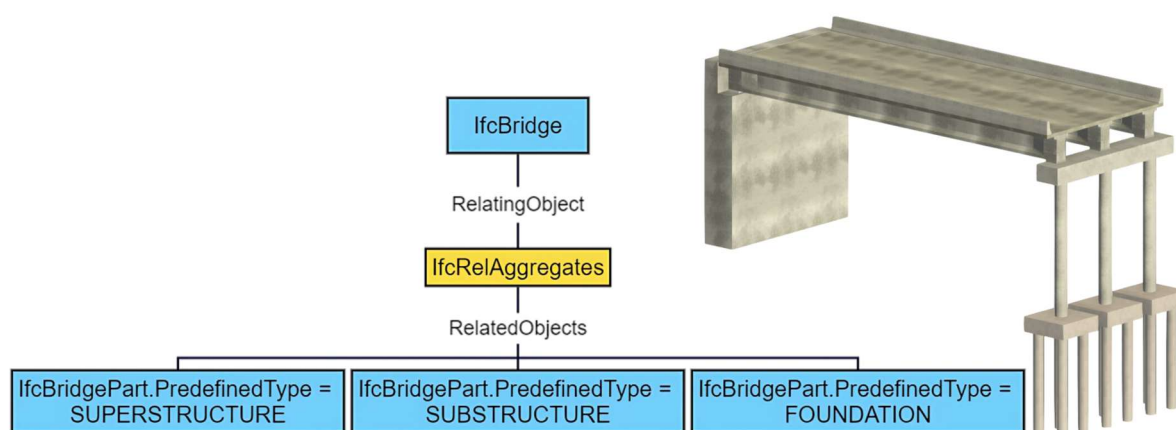
A solução é apresentada em diagramas, de forma a apresentar graficamente as classes utilizadas, assim como os relacionamentos necessários para a composição do modelo autoral.

### 3.5. Desenvolvimento da solução

#### 3.5.1. Definição semântica dos elementos e estruturas espaciais

De forma a organizar espacialmente os elementos da ponte, existem classes que determinam as estruturas espaciais como partes da ponte. Assim, o objeto da ponte, instanciado através da classe *IfcBridge* se relaciona com suas partes, infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura, instanciadas por *IfcBridgePart*, por meio do relacionamento *IfcRelAggregates*, como descrito na Figura 3-3.

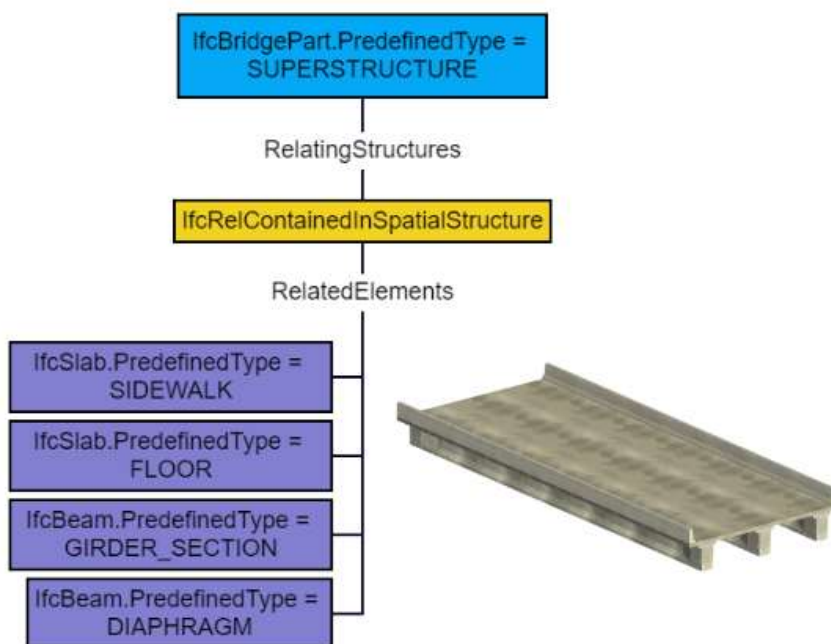
Figura 3-3 - Classes correspondentes às estruturas componentes de uma ponte em IFC



Fonte: o autor (2025).

A superestrutura é composta pelas vigas longarinas, transversinas, além do tabuleiro, pavimentação, defensas e calçada da ponte. Os elementos estruturais são descritos através das classes *IfcBeam* (para as vigas) e *IfcSlab* (para as lajes), e sua diferenciação é definida através do atributo *PredefinedType*. Esses elementos são agrupados à superestrutura por meio da classe *IfcRelContainedInSpatialStructure*. A estrutura, com o relacionamento, bem como as classes e tipos predefinidos utilizados para compor a superestrutura são apresentados na Figura 3-4.

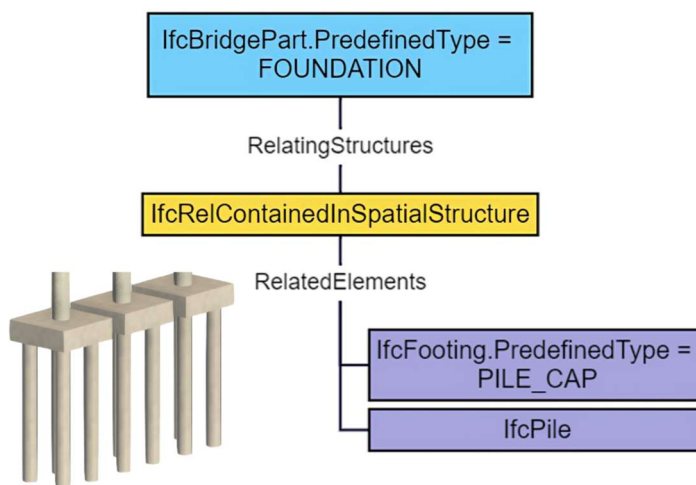
Figura 3-4 - Classes correspondentes aos elementos componentes da superestrutura de uma ponte em IFC



Fonte: o autor (2025).

A fundação, instanciada por *IfcBridgePart*, do tipo predefinido *FOUNDATION*, conta com blocos de fundação, sapatas e estacas, instanciadas por *IfcFooting* e *IfcPile* (Figura 3-5).

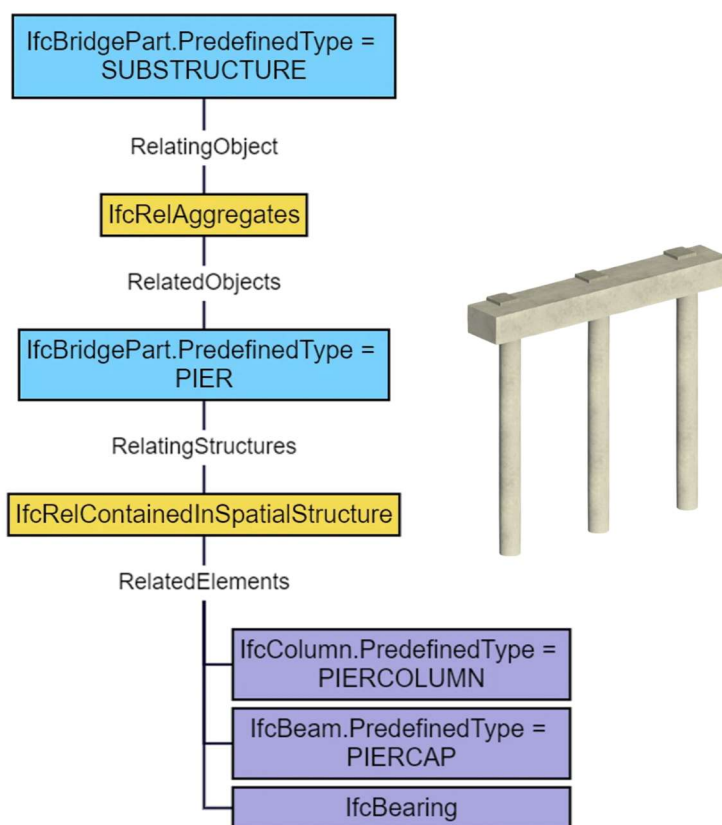
Figura 3-5 - Classes correspondentes aos elementos componentes da fundação de uma ponte em IFC.



Fonte: o autor (2025).

A mesoestrutura da ponte é dividida em dois grandes grupos, sendo estes o pír e o encontro. O pír é um conjunto de elementos que compõem um apoio, instanciado através da classe *IfcBridgePart*, com tipo predefinido *PIER*. O pír é composto por pilares, viga travessa e aparelhos de apoio correspondentes ao mesmo apoio, instanciados por *IfcColumn*, *IfcBeam* e *IfcBering*. Os grupos do pír e encontro se agrupam à mesoestrutura através do relacionamento *IfcRelAggregates*. A mesoestrutura é descrita na Figura 3-6 utilizando o enumerador *SUBSTRUCTURE* para o *IfcBridgePart.PredefinedType*.

Figura 3-6 - Classes IFC correspondentes à montagem da mesoestrutura de uma ponte

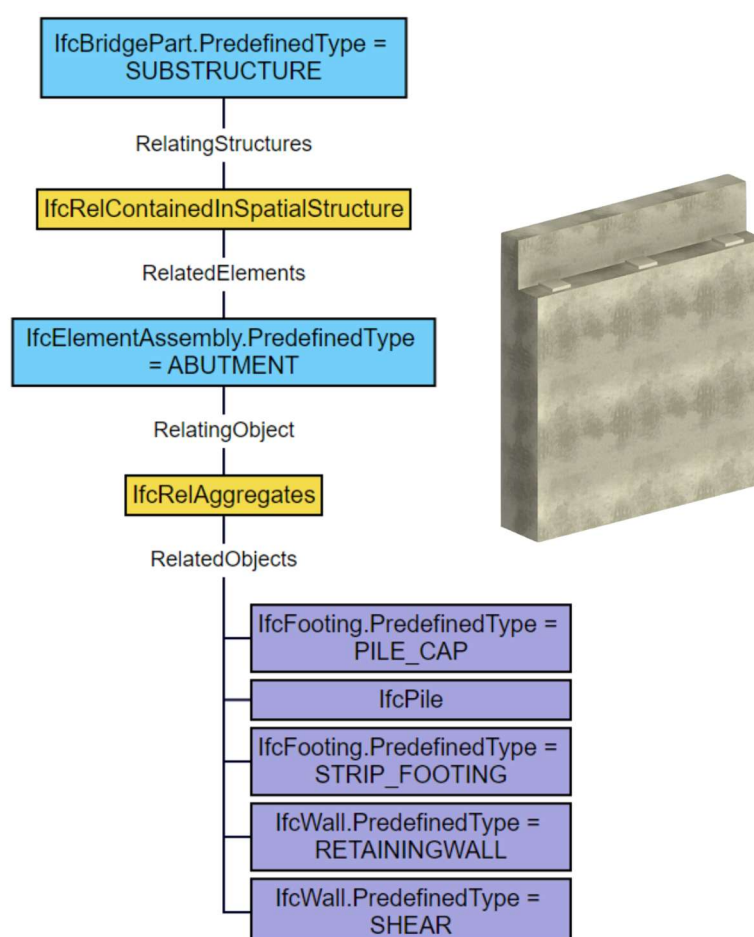


Fonte: o autor (2025).

O encontro pode ser composto por parede de contenção, além de aparelhos de apoio, e elementos de fundação própria. O conjunto correspondente do encontro é um *IfcElementAssembly*, com tipo predefinido *ABUTMENT*. Seu relacionamento à mesoestrutura se dá pelo *IfcRelContainedInSpatialStructure*, diferentemente dos grupos previamente citados. Os elementos componentes do encontro são

instanciados pelas classes *IfcFooting*, *IfcPile*, *IfcWall* e *IfcBearing*, e são agrupados no encontro por meio do relacionamento *IfcRelAggregates*. A estrutura de montagem do encontro é apresentada na Figura 3-7.

Figura 3-7 - Classes IFC correspondentes à montagem do encontro de uma ponte



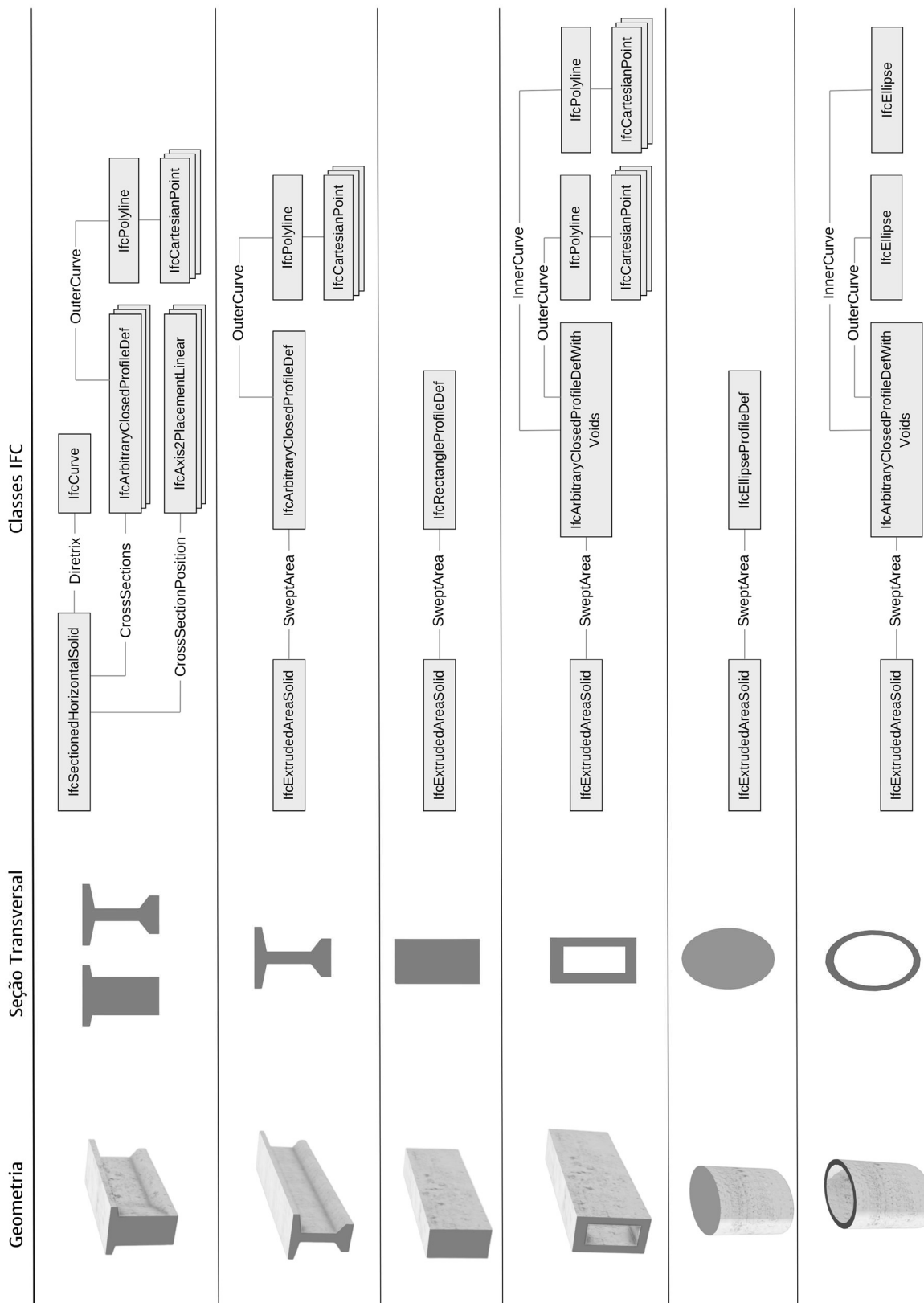
Fonte: o autor (2025).

### 3.5.2. Simplificação da representação geométrica

No contexto da representação geométrica de elementos, o esquema IFC contém diversos meios de representação. De forma objetiva, elementos presentes em modelos de pontes podem ser representados a partir de varredura, onde a seção transversal do elemento é descrita, assim como a direção e comprimento da varredura, ou por representação das superfícies correspondentes às faces do elemento. Enquanto o volume de dados para elementos representados por varredura, para elementos prismáticos, varia pouco de acordo com a complexidade da seção, ou

quantidade de arestas para sua instanciação, esse volume aumenta drasticamente nas representações utilizando *Boundary Representation* (BRep), ou *Tessellation* (triangulação). É importante ressaltar que os métodos para a representação, assim como outros dados, são avaliados de acordo com o uso BIM no qual o modelo em questão será empregado. Portanto, no contexto da interpretação de modelos IFC para a criação de modelos analíticos, torna-se mais adequado o uso de classes voltadas à representação geométrica através de varredura, como *IfcExtrudedAreaSolid* e *IfcSectionedSolidHorizontal*. A estrutura proposta para a representação geométrica simplificada de elementos, apresentados a partir de exemplos de alguns sólidos é descrita na Figura 3-8.

Figura 3-8 - Estrutura para representação da seção de elementos em IFC

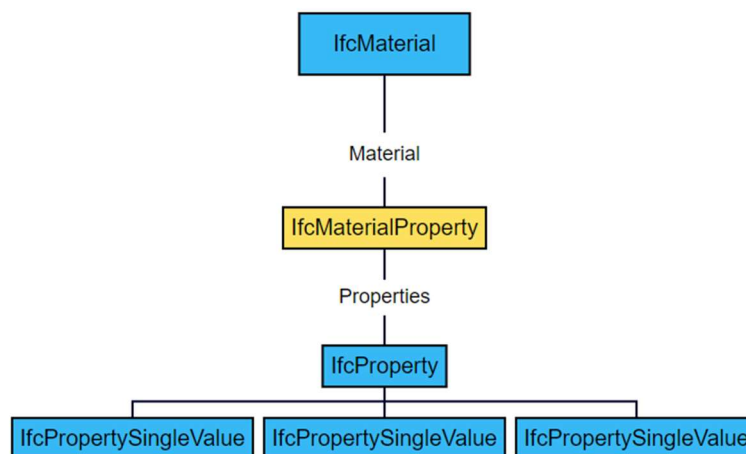


Fonte: o autor (2025).

### 3.5.3. Definição dos materiais e suas propriedades

A atribuição das propriedades dos materiais que compõem os elementos de construção é realizada através da classe *IfcMaterialProperty*, que relaciona um material às diversas propriedades. A estrutura é representada na Figura 3-9.

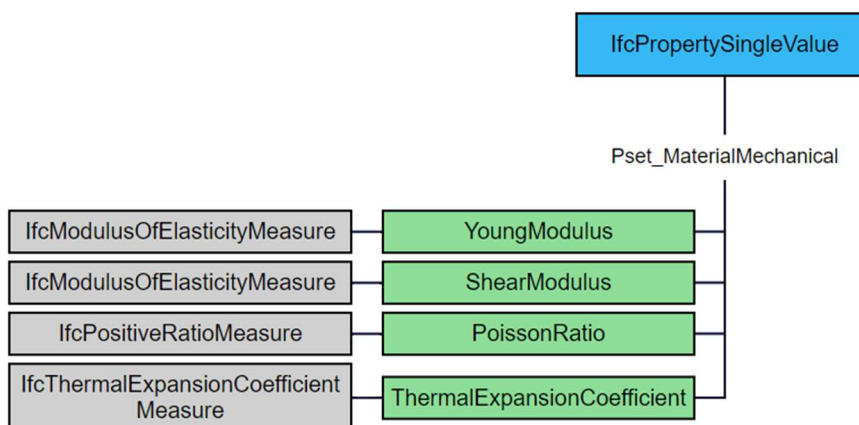
Figura 3-9 - Estrutura de atribuição de propriedades a materiais



Fonte: o autor (2025).

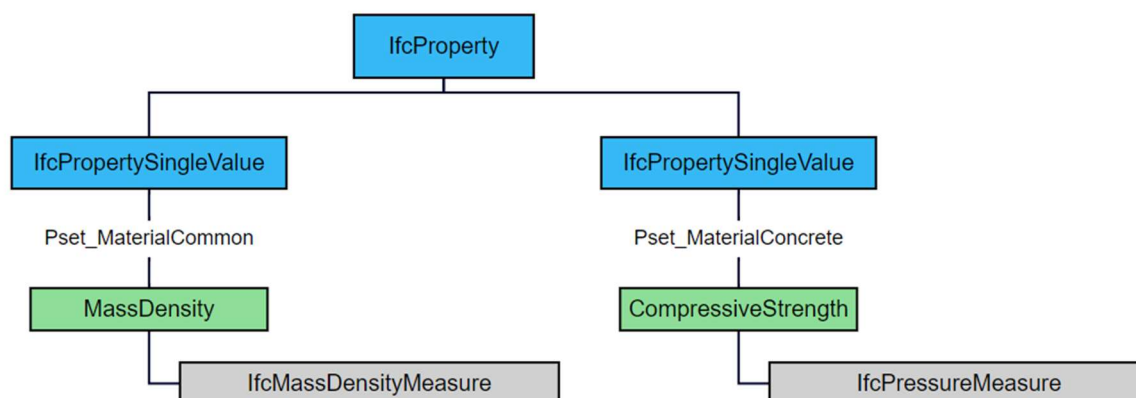
Para o uso em estudo, são demandadas propriedades referentes às características mecânicas dos materiais, contidas na Figura 3-10, além de suas propriedades físicas, presentes na Figura 3-11, que serão posteriormente utilizadas no processo de análise estrutural.

Figura 3-10 - Propriedades mecânicas de materiais



Fonte: o autor (2025).

Figura 3-11 - Propriedades de materiais específicos



Fonte: o autor (2025).

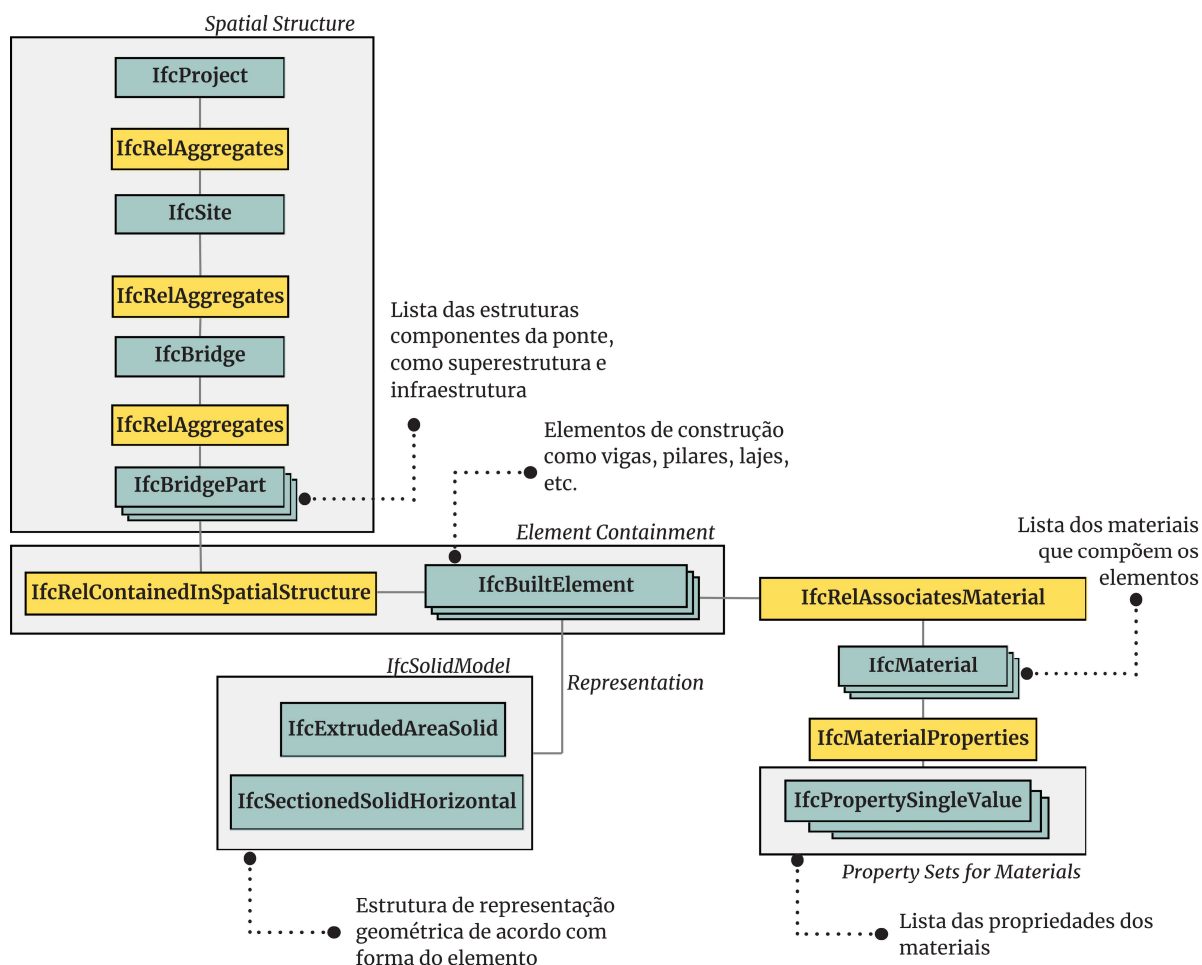
### 3.5.4. Framework da estrutura completa

A estrutura espacial do modelo IFC para pontes é organizada hierarquicamente, permitindo a agregação de elementos em níveis superiores. As partes que compõem a ponte são agrupadas na entidade *IfcBridge* por meio da relação *IfcRelAggregates*, garantindo uma organização coerente do modelo. Além de estruturar os componentes, *IfcBridge* armazena informações essenciais, como o tipo de estrutura da ponte.

A ponte, agora consolidada na instância *IfcBridge*, é posicionada no ambiente geoespacial do projeto através da classe *IfcSite*, também vinculada por *IfcRelAggregates*. *IfcSite* contém informações de localização, como coordenadas e elevação, fundamentais para a correta inserção do modelo no espaço real.

Por fim, *IfcSite* é associado ao *IfcProject*, que define o contexto geral do modelo, incluindo unidades de medida, sistema de coordenadas e contexto de representação geométrica. Essa relação, novamente estabelecida por *IfcRelAggregates*, assegura a integridade e consistência do projeto. Na Figura 3-12 apresenta-se o framework proposto, destacando as classes principais utilizadas na composição do modelo IFC de pontes para fins de análise estrutural.

Figura 3-12 - Framework para criação de modelos IFC de pontes



Fonte: o autor (2025).

### 3.6. Validação e avaliação do artefato

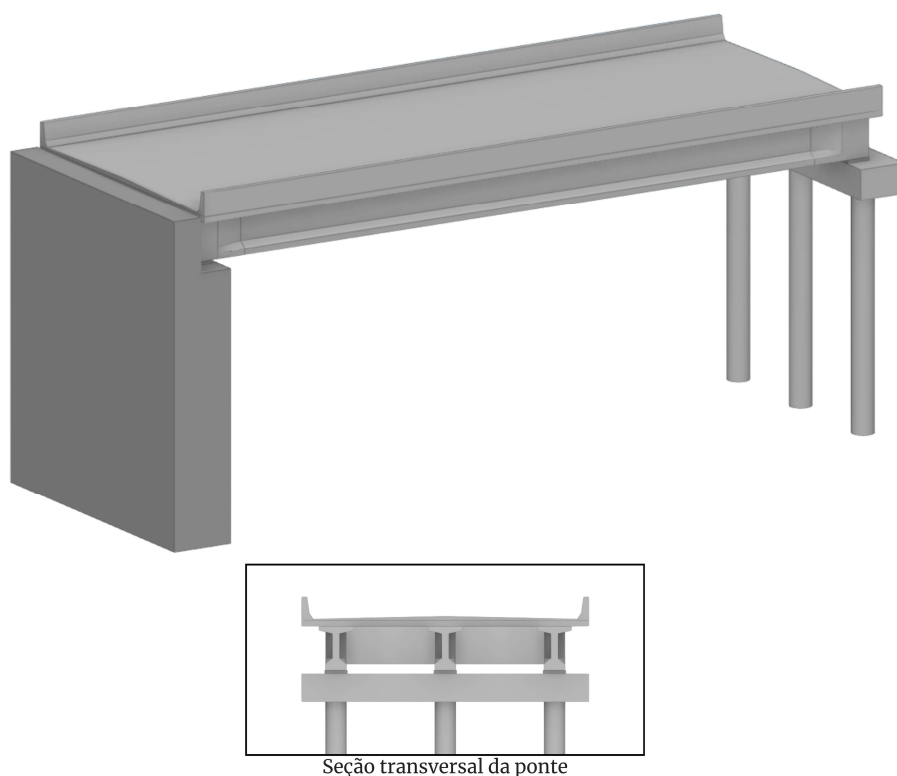
O método de avaliação da estrutura proposta consiste na comparação entre dois modelos representando uma mesma ponte, um primeiro modelo IFC elaborado dentro da estrutura proposta, e o segundo de um modelo exportado do software Revit. Os modelos contêm as mesmas informações, representadas por diferentes estruturas no esquema IFC, principalmente em relação à representação geométrica. Inicialmente foi realizada uma análise qualitativa, com a visualização dos modelos, e a identificação das propriedades nos arquivos. Um sistema de interpretação de arquivos IFC para a captura das informações necessárias na composição do modelo analítico foi utilizado. Por fim, realiza-se uma análise do comportamento do algoritmo de interpretação, por meio de análise de desempenho, onde são analisados o aumento do tempo de processamento em função do aumento da quantidade de dados de entrada. Para a

realização dessa análise, são elaborados modelos de tamanhos variados. O objetivo da análise de desempenho é qualificar a escalabilidade do algoritmo. Dessa forma, as métricas do próprio sistema de interpretação são utilizadas para analisar sua eficiência a partir da variação da estrutura dos dados do modelo.

### 3.6.1. Elaboração dos modelos IFC

Foram desenvolvidos dois modelos de uma mesma ponte, com diferentes estruturas de informação em IFC. A ponte em questão é uma ponte de concreto sobre três longarinas, com dois vãos de 25 m e largura de 10 m. A ponte é apoiada numa extremidade por conjuntos de três pilares e uma travessa. Além disso, conta com 2 transversinas em cada vão, e duas nas extremidades, todas com distâncias de 5 m. A ponte ainda apresenta barreiras do tipo *New Jersey*, localizadas nas extremidades laterais da ponte. A representação geométrica do modelo é apresentada na Figura 3-13.

Figura 3-13 - Representação geométrica da ponte reproduzida a partir do modelo IFC



Seção transversal da ponte

Fonte: o autor (2025).

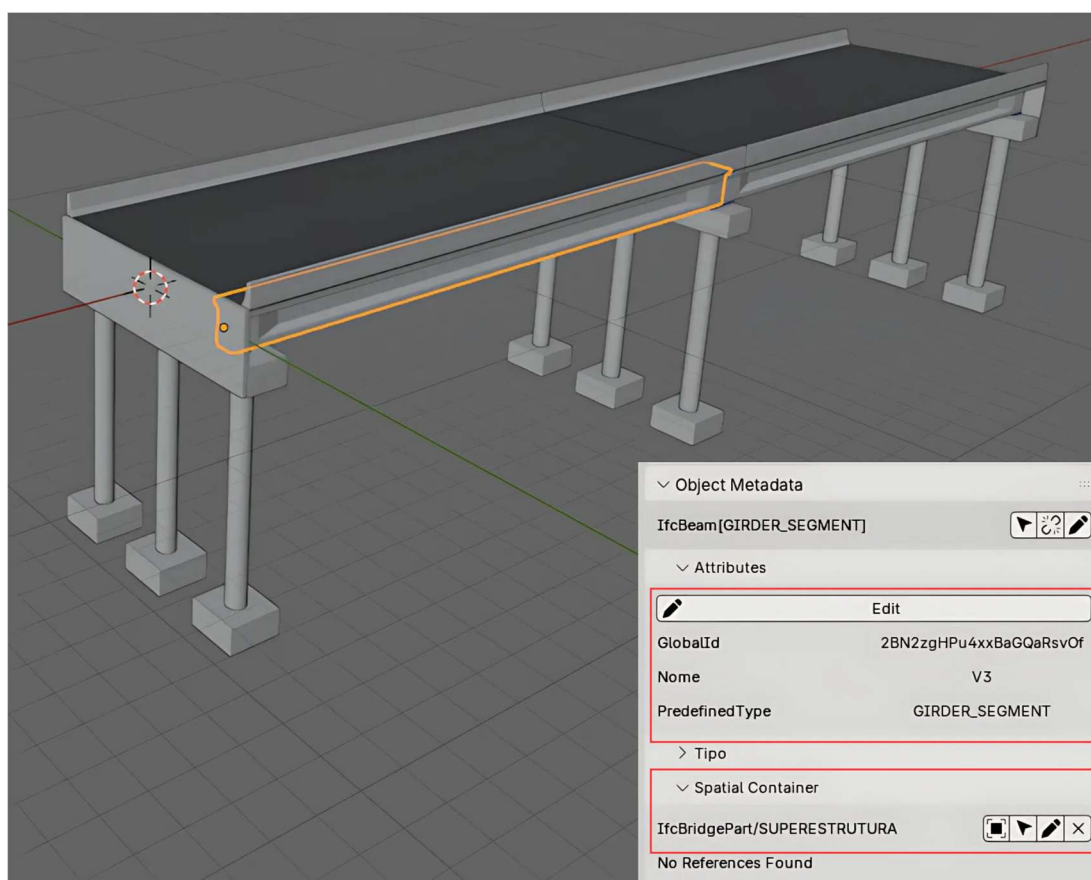
O modelo que segue a estrutura proposta no trabalho é denominado Modelo de Geometria Simplificada (MGS). Nesse modelo, opta-se pela utilização de representações geométricas baseadas em varredura. O segundo modelo,

denominado Modelo de Geometria Complexa (MGC), é extraído do Revit, e utiliza representações geométricas baseadas em *Boundary Representation (BRep)* nos elementos com variação de seção transversal. Para orientar a comparação, a viga longarina da extremidade direita é utilizada como elemento de controle. O elemento foi escolhido devido a sua complexidade geométrica causada pela variação na seção transversal ao longo de seu comprimento. Para a visualização dos modelos, é utilizada a aplicação Blender 4.3.2, com o emprego do *Add-on Bonsai*, onde são também identificados atributos e propriedades dos elementos.

### 3.6.2. Comparação entre os modelos IFC

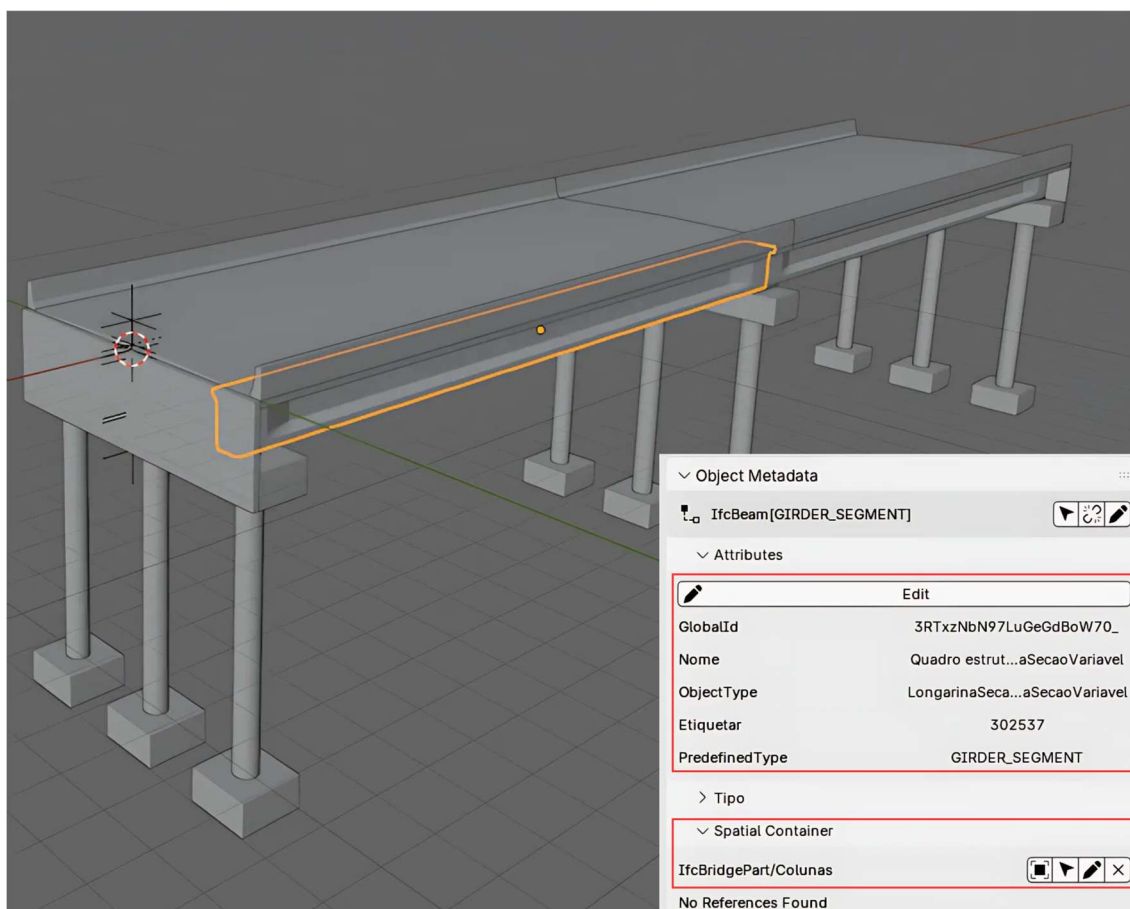
O processo de comparação entre os modelos IFC, orientado através de um elemento de controle, parte da identificação desse elemento em cada um dos modelos. Dessa forma, é levantado no Blender o atributo *GlobalId* da viga longarina em estudo, tanto no MGS (Figura 3-14) quanto no MGC (Figura 3-15), além de informações quanto à estrutura utilizada na criação dos modelos.

Figura 3-14 - Representação e atributos da viga longarina do MGS



Fonte: o autor (2025).

Figura 3-15 - Representação e atributos da viga longarina do MGC



Fonte: o autor (2025).

A instanciação da viga longarina por meio de *IfcBeam*, com atributo *PredefinedType* apontando à *GIRDER\_SEGMENT* no MGC confere o correto valor semântico ao elemento. O *SpatialContainment* do elemento aponta uma instância de *IfcBridgePart*, indicando a instanciação correta da estrutura espacial como uma parte componente de uma ponte.

No arquivo físico, a partir do *GlobalID* identificado no Blender, é possível analisar a estrutura necessária para a representação geométrica dos elementos nos modelos. No MGS (Figura 3-16), por se tratar de um elemento com variação de seção transversal ao longo de seu eixo, é utilizada a classe *IfcSectionedSolidHorizontal*. O elemento foi instanciado com uma representação mista, onde no trecho de seção constante, a geometria representada apoia-se em *IfcExtrudedAreaSolid*. No total, a geometria do elemento é comportada em 42 objetos IFC.

Figura 3-16 - Instanciação da representação geométrica da viga longarina no MGS

<pre>#6100=IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA., 'Secao1-apoio', #6101); #6101=IFCINDEXEDPOLYCURVE(#6102, (IFCLINEINDEX((1,2)), IFCLINEINDEX((2,3)), IFCLINEINDEX((3,4)), IFCLINEINDEX((4,5)), IFCLINEINDEX((5,6)), IFCLINEINDEX((6,7)), IFCLINEINDEX((7,8)), IFCLINEINDEX((8,9)), IFCLINEINDEX((9,10)), IFCLINEINDEX((10,11)), IFCLINEINDEX((11,12)), IFCLINEINDEX((12,1))), \$); #6102=IFCCARTESIANPOINTLIST2D((-0.6,0.75), (-0.6,0.6), (-0.375,0.5526), (-0.375,-0.54), (-0.375,-0.55), (-0.375,-0.75), (0.375,-0.75), (0.375,-0.55), (0.375,-0.54), (0.375,0.5526), (0.6,0.6), (0.6,0.75)), \$);</pre>	Descrição da seção do apoio
<pre>#6106=IFCPOLYLINE((#1, #6107)); #6107=IFCCARTESIANPOINT((25., 0., 0.)); #6108=IFCSECTIONEDSOLIDHORIZONTAL(#6106, (#6100, #6100, #6143), (#6117, #6119, #6121)); #6109=IFCSECTIONEDSOLIDHORIZONTAL(#6106, (#6143, #6100, #6100), (#6123, #6125, #6127)); #6110=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#6112, #3, #5); #6111=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#6143, #6110, #7, 22.9); #6112=IFCCARTESIANPOINT((2.05, 0., 0.)); #6117=IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#6118, #3, \$); #6118=IFCPOINTBYDISTANCEEXPRESSION(IFCLENGTHMEASURE(0.05), \$, \$, \$, #6106); #6119=IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#6120, #3, \$); #6120=IFCPOINTBYDISTANCEEXPRESSION(IFCLENGTHMEASURE(1.05), \$, \$, \$, #6106); #6121=IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#6122, #3, \$); #6122=IFCPOINTBYDISTANCEEXPRESSION(IFCLENGTHMEASURE(2.05), \$, \$, \$, #6106); #6123=IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#6124, #3, \$); #6124=IFCPOINTBYDISTANCEEXPRESSION(IFCLENGTHMEASURE(22.95), \$, \$, \$, #6106); #6125=IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#6126, #3, \$); #6126=IFCPOINTBYDISTANCEEXPRESSION(IFCLENGTHMEASURE(23.95), \$, \$, \$, #6106); #6127=IFCAXIS2PLACEMENTLINEAR(#6128, #3, \$); #6128=IFCPOINTBYDISTANCEEXPRESSION(IFCLENGTHMEASURE(24.95), \$, \$, \$, #6106);</pre>	Descrição das variações no início e fim do vão
<pre>#6130=IFCCARTESIANPOINT((-0.6,0.75)); #6131=IFCCARTESIANPOINT((-0.6,0.6)); #6132=IFCCARTESIANPOINT((-0.125,0.5)); #6133=IFCCARTESIANPOINT((-0.125,-0.35)); #6134=IFCCARTESIANPOINT((-0.375,-0.55)); #6135=IFCCARTESIANPOINT((-0.375,-0.75)); #6136=IFCCARTESIANPOINT((0.375,-0.75)); #6137=IFCCARTESIANPOINT((0.375,-0.55)); #6138=IFCCARTESIANPOINT((0.125,-0.35)); #6139=IFCCARTESIANPOINT((0.125,0.5)); #6140=IFCCARTESIANPOINT((0.6,0.6)); #6141=IFCCARTESIANPOINT((0.6,0.75)); #6142=IFCPOLYLINE((#6130, #6131, #6132, #6133, #6134, #6135, #6136, #6137, #6138, #6139, #6140, #6141, #6142)); #6143=IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA., 'Secao VAO', #6142);</pre>	Descrição da seção no vão
<pre>#64=IFCSHAPEREPRESENTATION(#41, 'Body', 'SolidModel', (#6108, #6111, #6109)); #85=IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE(\$, \$, (#64)); #86=IFCCARTESIANPOINT((0., -3.8, 0.)); #87=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#86, #7, #3); #88=IFCLOCALPLACEMENT(\$, #87); #89=IFCBEAM('2BN2zgHPu4xxBaGQaRsvOf', #18, 'V3', \$, \$, #88, #85, \$, .GIRDER SEGMENT.);</pre>	Descrição da geometria do elemento

Fonte: o autor (2025).

No MGC, a representação geométrica do elemento é descrita em *BRep* (Figura 3-17).

Figura 3-17 - Instanciação da representação geométrica da viga longarina no MGC

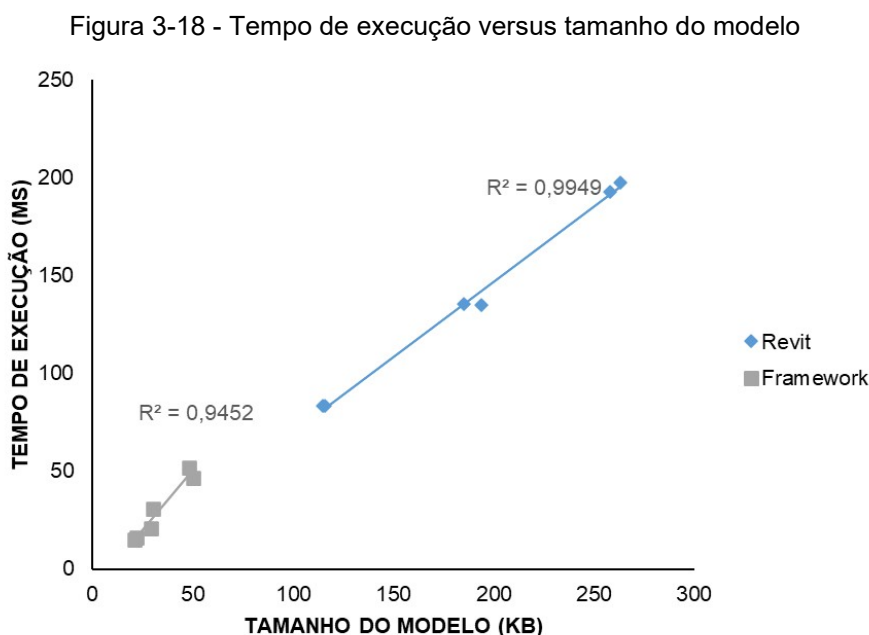
<pre>#653=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#650,#652,#9,21.); . #670=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#667,#669,#9,1.);</pre>	<p>Descrição das seções do apoio e do vão</p>
<pre>#687=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#684,#686,#9,1.); . #688 @ #1359 . #1360=IFCCLOSEDSHELL((#768,#771,#774,#777,#780,#783,#786,#789,#792,#795,#798,#801,#804,#807,#810,#813,#816,#819,#822,#825,#828,#831,#834,#837,#840,#843,#846,#849,#852,#855,#858,#861,#864,#867,#870,#873,#876,#879,#882,#885,#888,#891,#894,#897,#900,#903,#906,#909,#912,#915,#918,#921,#924,#927,#930,#933,#936,#939,#942,#945,#948,#951,#954,#957,#960,#963,#966,#969,#972,#975,#978,#981,#984,#987,#990,#993,#996,#999,#1002,#1005,#1008,#1011,#1014,#1017,#1020,#1023)); #1361=IFCFACETEDBREP(#1360); #1362=IFCCLOSEDSHELL((#1104,#1107,#1110,#1113,#1116,#1119,#1122,#1125,#1128,#1131,#1134,#1137,#1140,#1143,#1146,#1149,#1152,#1155,#1158,#1161,#1164,#1167,#1170,#1173,#1176,#1179,#1182,#1185,#1188,#1191,#1194,#1197,#1200,#1203,#1206,#1209,#1212,#1215,#1218,#1221,#1224,#1227,#1230,#1233,#1236,#1239,#1242,#1245,#1248,#1251,#1254,#1257,#1260,#1263,#1266,#1269,#1272,#1275,#1278,#1281,#1284,#1287,#1290,#1293,#1296,#1299,#1302,#1305,#1308,#1311,#1314,#1317,#1320,#1323,#1326,#1329,#1332,#1335,#1338,#1341,#1344,#1347,#1350,#1353,#1356,#1359)); #1363=IFCFACETEDBREP(#1362);</pre>	<p>Descrição das variações no início e fim do vão</p>
<pre>#1364=IFCSHAPEREPRESENTATION(#24,'Body','SolidModel',(#653,#670,#687,#1361,#1363)); #1372=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,\$,\$); #1373=IFCREPRESENTATIONMAP(#1372,#1364); #1374=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#3,\$,\$); #1375=IFCREPRESENTATIONMAP(#1374,#1371); #1376=IFCBEAMTYPE('28SlKSTWPCV9GowZ2nE92o',#18,'Quadro estrutural : LongarinaSecaoVariavel : LongarinaSecaoVariavel',\$,\$,(#1399),(#1373,#1375),'302409',\$,.GIRDER_SEGMENT.); #1377=IFCMATERIAL('&lt;Unnamed&gt;',\$,\$); #1378=IFCMAPPEDITEM(#1373,#97); #1379=IFCSHAPEREPRESENTATION(#24,'Body','MappedRepresentation',(#1378)); #1380=IFCMAPPEDITEM(#1375,#97); #1381=IFCSHAPEREPRESENTATION(#23,'Axis','MappedRepresentation',(#1380)); #1382=IFCCARTESIANPOINT((-12.4999999999999945,-0.600000000000000642,-0.750000000000003808)); #1383=IFCBOUNDINGBOX(#1382,24.999999999999893,1.20000000000000091,1.50000000000000546); #1384=IFCSHAPEREPRESENTATION(#25,'Box','BoundingBox',(#1383)); #1385=IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE(\$,\$,(#1379,#1381,#1384)); #1386=IFCCARTESIANPOINT((12.499999999999929,-3.8000000000000402,1.8639999999999775)); #1387=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#1386,\$,\$); #1388=IFCLOCALPLACEMENT(#34,#1387); #1389=IFCBEAM('3RTxzNbN97LuGeGdBoW70_',#18,'Quadro estrutural : LongarinaSecaoVariavel : LongarinaSecaoVariavel',\$,'LongarinaSecaoVariavel:LongarinaSecaoVariavel', #1388,#1385,'302537',.GIRDER_SEGMENT.);</pre>	<p>Descrição da geometria do elemento</p>

Fonte: o autor (2025).

Nota-se que a criação dos vários planos depende da criação dos pontos de cada vértice, e por se tratar de uma geometria complexa, o volume de dados é muito grande em comparação com o MGS. A nível de comparação, são necessários 751 objetos IFC. Dessa forma, além do aumento significativo dos dados comportados no modelo, a complexidade da representação pode implicar dificuldades na interpretação e captação de informações da geometria do elemento, como área da seção transversal da viga, momentos de inércia, produto de inércia, fator de forma para o cisalhamento, dentre outras. Tal fato evidencia os problemas de interoperabilidade, gerados pelos grandes avanços simultâneos dos vários softwares (SHIROWZHAN *et al.*, 2020), levantados anteriormente.

### 3.6.3. Métricas dos algoritmos de interpretação

Por fim, a partir da utilização de modelos com um, dois e três vãos, sucessivamente, e com duas e três longarinas por modelo, foram mensurados os tempos de execução de um software de interpretação de modelos IFC, focado na captação de informações utilizadas no processo de análise estrutural. Os resultados são apresentados na Figura 3-18. O tempo de execução foi obtido a partir da média aritmética de três execuções.



Fonte: o autor (2025).

Constata-se, a partir da Figura 3-18, que a interpretação de ambos os modelos ocorreu de maneira similar, apontando para um algoritmo com comportamento linear, ou seja, o tempo de execução aumenta linearmente em relação ao aumento do volume de dados de entrada. Isso demonstra que apesar do volume elevado de dados no MGC, sua estrutura não afeta diretamente na interpretação dos dados de interesse na fase de análise estrutural de um modelo de pontes. Além disso, os modelos elaborados na estrutura proposta comportaram as informações com um volume de dados consideravelmente menor, comparados aos modelos exportados do Revit. Isso se dá não só pelo volume de dados necessários na representação geométrica no MGC, mas também pela exportação de diversas outras informações nos modelos exportados do Revit, que não dizem respeito à análise estrutural, como conjuntos de propriedades.

### **3.7. Conclusões**

O modelo proposto neste trabalho demonstrou equivalência em relação ao modelo exportado do Revit, garantindo a preservação de todas as informações relevantes para a composição de modelos analíticos estruturais de pontes. A estrutura desenvolvida comporta integralmente os dados necessários para a interpretação e conversão de modelos autorais em representações analíticas, assegurando a integridade semântica e geométrica da modelagem. Dessa forma, o trabalho comporta de forma organizada informações necessárias para o desenvolvimento de modelos autorais de pontes, com a finalidade da composição de modelos estruturais de pontes.

Graficamente, não foram observadas perdas na representação dos elementos propostos. Além disso, elementos de geometria complexa, como aqueles com seções transversais variáveis ao longo do comprimento, puderam ser modelados utilizando geometria implícita, reduzindo significativamente o volume de dados necessário para a sua descrição. Esse aspecto representa uma vantagem significativa em relação à modelagem IFC gerada pelo Revit, otimizando a instanciação dos elementos sem comprometer a fidelidade geométrica.

Do ponto de vista da interpretação dos modelos, ambas as estruturas analisadas apresentaram comportamentos similares, não impactando significativamente a escalabilidade do software de interpretação de modelos IFC.

Dessa forma, conclui-se que a estrutura apresentada atende aos requisitos necessários para a geração de modelos analíticos estruturais de pontes, proporcionando uma abordagem mais enxuta e simplificada. Além disso, a organização adotada não comprometeu o intercâmbio de informações no formato aberto IFC, garantindo compatibilidade e usabilidade dentro de fluxos de trabalho BIM.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a investigação da interpretação de modelos autorais compostos em diferentes estruturas dentro de aplicações de análise estrutural, com o objetivo de mensurar a eficácia e completude das informações interpretadas pelos softwares disponíveis no mercado.

### **Referências Bibliográficas**

AKANBI, Temitope; ZHANG, Jiansong. Framework for Developing IFC-Based 3D Documentation from 2D Bridge Drawings. *Journal Of Computing In Civil Engineering*, v. 36, n. 1, p. 1-13, jan. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000986](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000986).

ANTUNES, Maria Luisa Ribeiro; CÉSAR, Kleos Magalhaes Lenz; RIBEIRO, Jose Carlos Lopes; OLIVEIRA, Diogo Silva de; CARVALHO, Jose Maria Franco de. Analysis of IFC interoperability data schema for project representation. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 166, p. 105650, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105650>.

AZHAR, Salman; KHALFAN, Malik; MAQSOOD, Tayyab. Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond. **Australasian Journal Of Construction Economics And Building**, v. 12, n. 4, p. 15-28, nov. 2012. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.013120167780649>. Acesso em: 11 out. 2023.

BORRMANN, André; KONING, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. Building Information Modeling: Why? What? How? In: BORRMANN, André; KÖNIG, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. *Building Information Modeling: technology foundations and industry practice*. Springer, 2018. p. 3.

BORRMANN, André *et al.* Industry Foundation Classes: a standardized data model for the vendor-neutral exchange of digital building models. In: BORRMANN, André; KÖNIG, Markus; KOCH, Christian; BEETZ, Jakob. Building Information Modeling: technology foundations and industry practice. Springer, 2018. p. 83.

BORRMANN, André; MUHIC, Sergej; HYVÄRINEN, Juha; CHIPMAN, Tim; JAUD, Stefan; CASTAING, Christophe; DUMOULIN, Claude; LIEBICH, Thomas; MOL, Laura. The IFC-Bridge project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models. Proceedings Of The 2019 European Conference On Computing In Construction, p. 377-387, 10 jul. 2019. University College Dublin. <http://dx.doi.org/10.35490/ec3.2019.193>.

BRADLEY, Alex; LI, Haijiang; LARK, Robert; DUNN, Simon. BIM for infrastructure: an overall review and constructor perspective. Automation In Construction, v. 71, n. 1, p. 139-152, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>.

buildingSMART International Limited. **IFC4.3 Documentation**. Disponível em: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>. Acesso: 28 de janeiro de 2025.

COSTIN, Aaron; ADIBFAR, Alireza; HU, Hanjin; CHEN, Stuart S.. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. **Automation In Construction**, v. 94, p. 257-281, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>.

ISAILOVIC, Dusan; STOJANOVIC, Vladeta; TRAPP, Matthias; RICHTER, Rico; HAJDIN, Rade; DÖLLNER, Jürgen. Bridge damage: detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. **Automation In Construction**, v. 112, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088>.

JOHN MESSNER. Computer Integrated Construction Program. **BIM Project Execution Planning Guide**. 3. ed. University Park: Penn State University, 2021.

JI, Yang; BORRMANN, André; BEETZ, Jakob; OBERGRIEßER, Mathias. Exchange of Parametric Bridge Models Using a Neutral Data Format. **Journal Of Computing In Civil Engineering**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 593-606, nov. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000286](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000286).

JUSTO, Andrés; SOILÁN, Mario; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, Ana; RIVEIRO, Belén. Scan-to-BIM for the infrastructure domain: generation of ifc-compliant models of road infrastructure assets and semantics using 3d point cloud data. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 127, p. 103703, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103703>.

JUSTO, Andrés; LAMAS, Daniel; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, Ana; SOILÁN, Mario; RIVEIRO, Belén. Generating IFC-compliant models and structural graphs of truss bridges from dense point clouds. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 149, p. 104786, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104786>.

KYMMELL, Willen. Building Information Modeling: planning and managing construction projects with 4D cad and simulations. McGraw-Hill, 2008.

LEONARDI, Maria Laura; GRANJA, José; OLIVEIRA, Daniel V.; AZENHA, Miguel. Scalable BIM based open workflow for structural analysis of masonry building aggregates. **Computers & Structures**, [S.L.], v. 297, p. 107321, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107321>.

MOURA, Rebeca Viana Alencar Rodrigues; MICELI JUNIOR, Giuseppe; PELLANDA, Paulo César. Integração openBIM de modelo e orçamento com o sistema nacional de classificação de informação: uma proposta de fluxo de trabalho interoperável e colaborativo. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 261-283, 21 ago. 2024. Universidade de São Paulo. Agência de Bibliotecas e Coleções Digitais. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v19i2.226681>.

MULLER, Marina Figueiredo; GARBERS, Amanda; ESMANIOTO, Filipe; HUBER, Natan; LOURES, Eduardo Rocha; CANCEGLIERI JUNIOR, Osiris. Data interoperability assessment through IFC for BIM in structural design – a five-year gap analysis. **Journal Of Civil Engineering And Management**, v. 23, n. 7, p. 943-954, 13 jul. 2017. Vilnius Gediminas Technical University. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2017.1341850>

OZTURK, Gozde Basak. Interoperability in building information modeling for AECO/FM industry. **Automation In Construction**, v. 113, p. 103122, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103122>.

PARK, Sang I.; LEE, Sang-Ho; ALMASI, Ashkan; SONG, Jeong-Hoon. Extended IFC-based strong form meshfree collocation analysis of a bridge structure. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 119, p. 103364, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103364>.

PAPADOPOULOS, Lazaros; DEMESTICHAS, Konstantinos; MUÑOZ-NAVARRO, Eva; HERNÁNDEZ-MONTESINOS, Juan José; PAUL, Stephane; MUSEUX, Nicolas; KÖNIG, Sandra; SCHAUER, Stefan; ALARCÓN, Alfonso Climente; LLOPIS, Israel Perez. Protection of critical infrastructures from advanced combined cyber and physical threats: the praetorian approach. **International Journal Of Critical Infrastructure Protection**, [S.L.], v. 44, p. 100657, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100657>.

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus A.; CHATTERJEE, Samir. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal Of Management Information Systems**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 45-77, dez. 2007. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.2753/mis0742-1222240302>.

RAMAJI, Issa J.; MEMARI, Ali M.. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information mo. **Automation In Construction**, v. 90, p. 117-133, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.

SHIROWZHAN, Sara; SEPASGOZAR, Samad M.e.; EDWARDS, David J.; LI, Heng; WANG, Chen. BIM compatibility and its differentiation with interoperability challenges as an innovation factor. **Automation In Construction**, v. 112, p. 103086, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103086>.

SHOIEB, Kareem; SERROR, Mohammed Hassanien; MARZOUK, Mohamed. Web-Based Tool for Interoperability among Structural Analysis Applications. **Journal Of Construction Engineering And Management**, [S.L.], v. 146, n. 6, p. 1-12, jun. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001840](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001840).

SIBENIK, Goran; KOVACIC, Iva. Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 32, p. 101589, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101589>.

YABUKI, Nobuyoshi; LEBEGUE, Eric; GUAL, Jean; SHITANI, Tomoaki; ZHANTAO, Li. INTERNATIONAL COLLABORATION FOR DEVELOPING THE BRIDGE PRODUCT MODEL "IFC-BRIDGE". In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND DECISION MAKING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING, 1., 2006, Montreal. **Proceedings [...]** . Montréal: Université de Montréal, 2006. p. 1927-1936.

YANG, Zhuyu; BARROCA, Bruno; LAFFRÉCHINE, Katia; WEPPE, Alexandre; BONY-DANDRIEUX, Aurélie; DACLIN, Nicolas. A multi-criteria framework for critical infrastructure systems resilience. **International Journal Of Critical Infrastructure Protection**, [S.L.], v. 42, p. 100616, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100616>.

## CAPÍTULO 4 – INSTANCIÇÃO DE VEÍCULO-TIPO EM IFC E SUA REPRESENTAÇÃO EM MODELOS DE PONTE

Matheus do Nascimento Duarte, Guilherme Palla Teixeira, José Carlos Lopes Ribeiro, Kléos Magalhães Lenz César Júnior, Diôgo Silva de Oliveira, José Maria Franco de Carvalho

### Resumo

---

O padrão *Industry Foundation Classes* (IFC) desempenha um papel essencial na interoperabilidade de projetos BIM. Com a introdução de elementos de infraestrutura no IFC 4.3, torna-se viável integrar carregamentos normativos, como os veículos-tipo das normas brasileiras, diretamente a modelos BIM. Este trabalho propõe e valida uma metodologia para instanciação desses carregamentos em IFC, incorporando informações estruturais e geométricas que facilitam a análise e visualização dos carregamentos. Um estudo de caso testa a abordagem em um modelo de ponte e avalia sua interpretação em diferentes plataformas, incluindo o *CSI Bridge*. Os resultados confirmam a viabilidade da metodologia para representar carregamentos normativos e centralizar informações estruturais, destacando desafios na semântica do IFC e na compatibilidade com softwares de análise estrutural.

**Palavras-chave:** *Building Information Modeling*; Modelos IFC de pontes; Análise estrutural de pontes; *IfcStructuralAnalysisDomain*; Veículo-tipo.

---

#### 4.1. Introdução

O *Building Information Modeling* (BIM) é um dos desenvolvimentos mais promissores na indústria AECO (Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações) [1]. Essa tecnologia tem demonstrado utilidades significativas ao longo de todo o ciclo de vida das obras, com aplicações que abrangem desde a fase de estudo preliminar, projeto, planejamento e construção, até a operação e o descomissionamento [2,3]. Ao adotar o BIM, é possível ampliar o uso da tecnologia, promovendo maior integração e eficiência nos processos de projeto, construção e operação de instalações [4]. Nesse contexto, o *Industry Foundation Classes* (IFC) emerge como um padrão essencial para garantir a interoperabilidade e o armazenamento de informações de forma aberta e padronizada.

Diversos esforços têm sido direcionados à aplicação do BIM em obras de infraestrutura [5,6], acompanhados por iniciativas nacionais, como a Estratégia BIM BR [7], que incentiva a adoção do BIM em projetos de infraestrutura, incluindo pontes [8,9]. Entre os elementos de infraestrutura, as pontes destacam-se como componentes críticos, recebendo atenção crescente em estudos que buscam aprimorar sua modelagem e análise no contexto BIM [10-12].

O lançamento do IFC 4.3.2.0, doravante denominado simplesmente nesta pesquisa como IFC 4.3, trouxe avanços significativos para a modelagem de pontes, incluindo a introdução de semânticas adequadas para seus elementos específicos. Paralelamente, a área de análise estrutural, incorporada ao esquema desde a versão IFC 2x2, já está consolidada. No entanto, a inclusão de dados relacionados a pontes levanta questões quanto à possibilidade de incorporar elementos de cargas específicas, como as cargas de tráfego, diretamente nos modelos BIM. Essa integração pode resultar em modelos mais completos e informativos, capazes de atender às diversas fases do ciclo de vida de uma ponte.

Por outro lado, a inexistência de dados de projeto por falta de processos de gestão na época da construção das pontes é um grande problema [13]. Com o envelhecimento das estruturas, e a evolução das cargas, torna-se necessária a verificação da integridade estrutural dos elementos, visando a manutenção da segurança da estrutura. Além disso, em caso de tráfego de cargas especiais, é essencial o registro do veículo-tipo utilizado no dimensionamento, para comparação dos resultados de análise. Nesse cenário, o BIM, e mais especificamente o IFC,

emerge como uma promissora ferramenta para o gerenciamento de informações de projetos [14,15]. Assim, este trabalho tem como objetivo criar uma estrutura que possibilite a instanciação de veículos-tipo normativos brasileiros no formato IFC e avaliar sua aplicabilidade em um modelo de ponte.

O artigo está estruturado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se a fundamentação teórica, abordando a estrutura e as potencialidade do IFC, uma revisão das normas brasileiras relacionadas a veículos-tipo, além de estudos que investigam a aplicação de cargas em modelos IFC. Em seguida, descreve-se a metodologia adotada, detalhando os passos na composição da estrutura e o diagrama utilizado. Posteriormente, é apresentado o estudo de caso, no qual o veículo-tipo TB-450 é instanciado e incorporado a um modelo de ponte existente. Por fim, são expostos os resultados obtidos, incluindo a interpretação do arquivo IFC em diferentes plataformas, e discutidos os resultados, contribuições e recomendações para estudos futuros.

## **4.2. Revisão de literatura**

### **4.2.1. *Industry Foundation Classes***

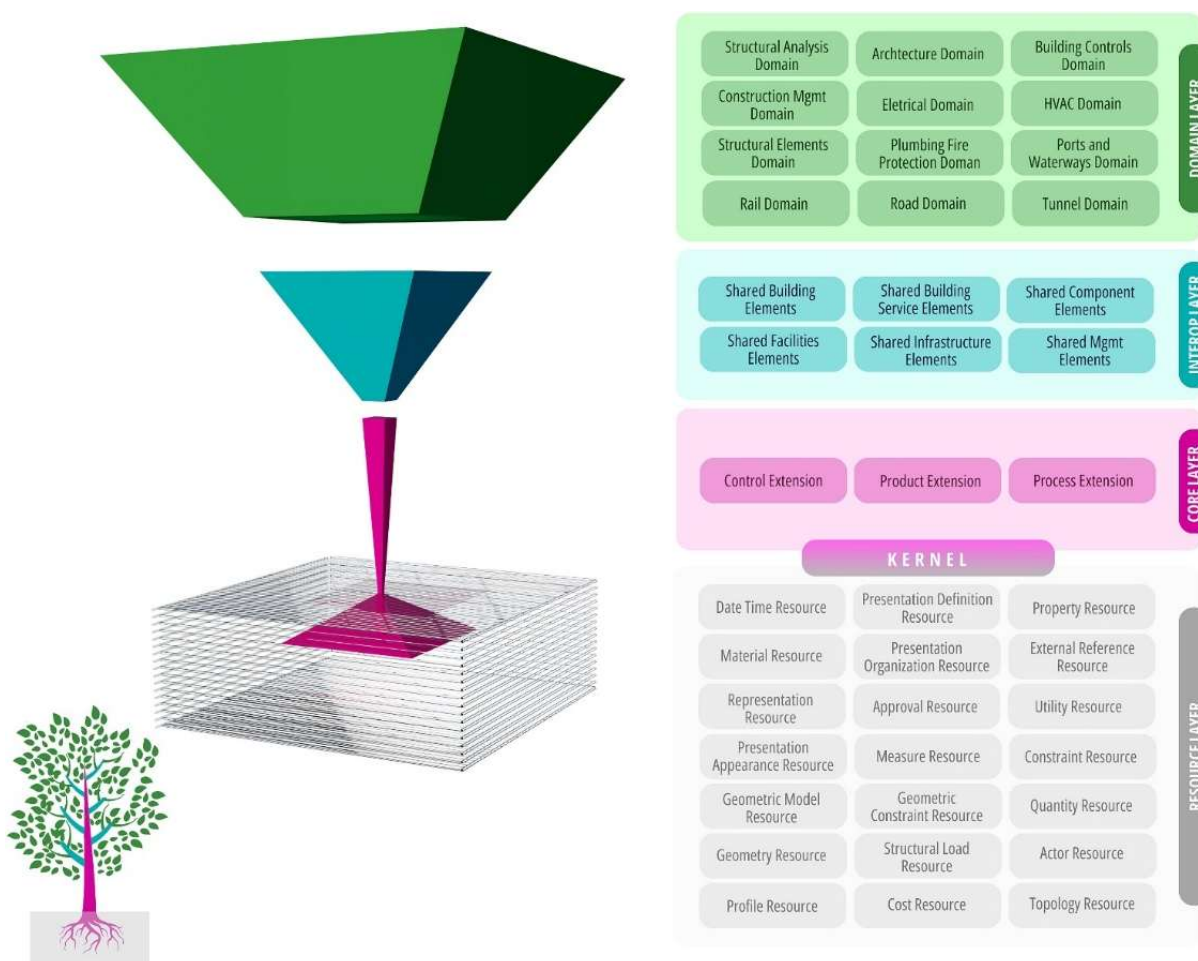
Garantir a interoperabilidade de modelos é uma tarefa vital para o funcionamento de sistemas BIM. A atuação do IFC como um padrão aberto nesse contexto é fundamental, permitindo a troca e o armazenamento de dados em todas as fases da vida útil de um projeto. O IFC é um complexo modelo de dados no qual é possível representar geometria e estrutura semântica de um modelo de construção utilizando uma abordagem orientada a objeto [16]. O mais recente lançamento do padrão desenvolvido pela *buildingSMART International* (bSI) é a versão IFC 4.3, que inclui elementos de infraestrutura em seu esquema, dentre eles elementos de estradas, ferrovias, portos e hidrovias, pontes e os elementos comuns entre todos estes.

A organização da estrutura e desenvolvimento do processo de extensão do esquema IFC para inclusão de elementos de pontes foram as atividades centrais do projeto IFC-Bridge [17]. Segundo os autores, o projeto objetivou abordar os tipos mais consolidados globalmente, devido às limitações no prazo e nos recursos. Dentre os usos priorizados no projeto estão a importação dos parâmetros principais de rodovias, visualização técnica, modelagem sequencial de construção e a coordenação de

modelos. Por outro lado, devido à alta complexidade para desenvolvimento, e o curto prazo para execução, usos como a análise estrutural foram postergados.

Com base nessa estrutura, a arquitetura de dados IFC [18] pode ser comparada a uma árvore natural [19], exposta na Figura 4-1, que é dividida em 4 camadas.

Figura 4-1 - Arquitetura de dados IFC (Árvore 3D)



Fonte: Antunes *et al.* (2024).

A camada dos domínios é a mais alta, inclui esquemas que contém definições de entidades de especialização de produtos, processos ou recursos específicos para uma certa disciplina. A próxima camada abaixo é a camada de interoperabilidade, que inclui esquemas contendo definições de classes que são específicas para uma especialização geral de produto, processo ou recurso usado em diversas disciplinas. Classes dessa camada são tipicamente utilizadas para a troca e compartilhamento de informações entre domínios. Abaixo, a camada do núcleo abriga o esquema do *kernel*

e as extensões principais, contendo definições de entidade mais gerais. Todas as entidades definidas a partir dessa camada herdam atributos da classe *IfcRoot*. Por fim, a camada mais baixa no esquema é a camada dos recursos, que inclui todos os esquemas individuais contendo definições de recursos. Essas definições não são utilizadas independentemente de uma definição declarada em uma camada acima.

Informações relacionadas a análise estrutural são delimitadas no domínio *IfcStructuralAnalysisDomain*. De acordo com a bSI [20], o *IfcStructuralAnalysisDomain* descreve o modelo de análise estrutural a fim de integrar de forma sólida com o domínio de engenharia estrutural. O domínio reutiliza definições existentes de elementos de construção e de estrutura espacial, e os associa às considerações estruturais. O foco é garantir que as informações de engenharia estrutural sejam capturadas e tornadas visíveis para outros domínios relacionados.

O domínio *IfcStructuralAnalysisDomain* inclui em seu escopo elementos de barra e elementos de placa, retos ou curvos; conexões entre pontos, curvas e superfícies, e seus apoios; especificação de carregamentos incluindo forças pontuais, lineares, forças em uma superfície, forças devido a temperaturas, e suas associações aos grupos, casos e combinações de carregamento; especificação de diferentes modelos de análise estrutural a fim de descrever diferentes aspectos ou partes de uma edificação; e resultados de análise definidos por deslocamentos e forças. O esquema não inclui em seu escopo análises dinâmicas, descrição de forças de protensão, topologia em elementos finitos, e resultados em malhas de elementos finitos, assim como tensões e deformações em elementos estruturais.

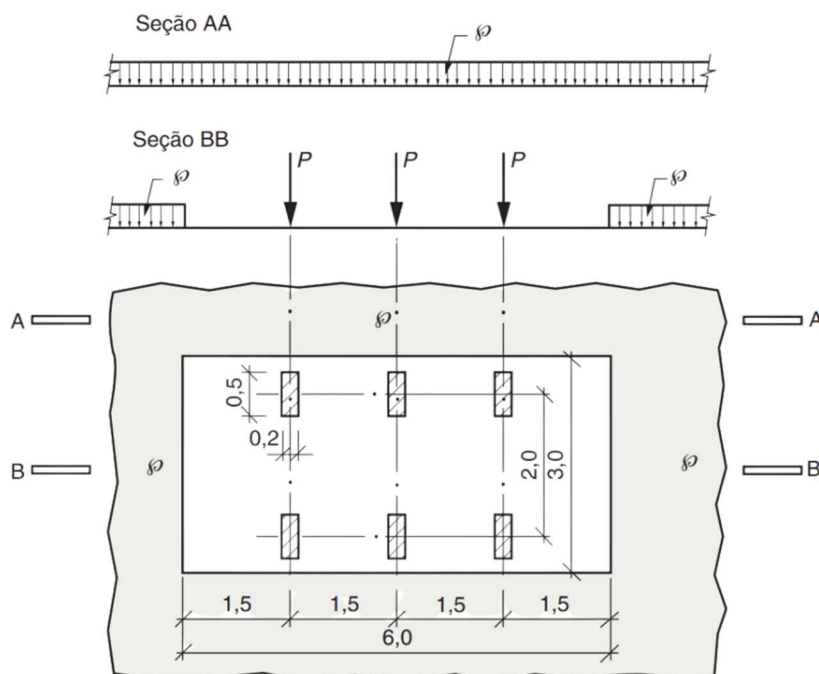
Adicionalmente, como suporte a classes do *IfcStructuralAnalysisDomain*, o *IfcStructuralLoadResource* [21] contém as definições de carregamentos estruturais, resultados, condições de contorno e de conexões. Tais definições especificam a força, momento, rigidez, deslocamento, entre outros fatores. De forma mais específica, as definições do recurso de carregamentos são utilizadas nas definições de ações e reações estruturais que contém as definições de carregamento em espaços bidimensionais ou tridimensionais.

#### **4.2.2. Cargas de tráfego nas normas brasileiras**

Atualmente, as cargas provenientes do tráfego de veículos e ações dos pedestres em pontes e viadutos são determinadas pela ABNT NBR 7188:2013 [22].

Essa norma determina uma configuração de cargas estáticas que compõem um veículo-tipo, conforme descrito na Figura 4-2.

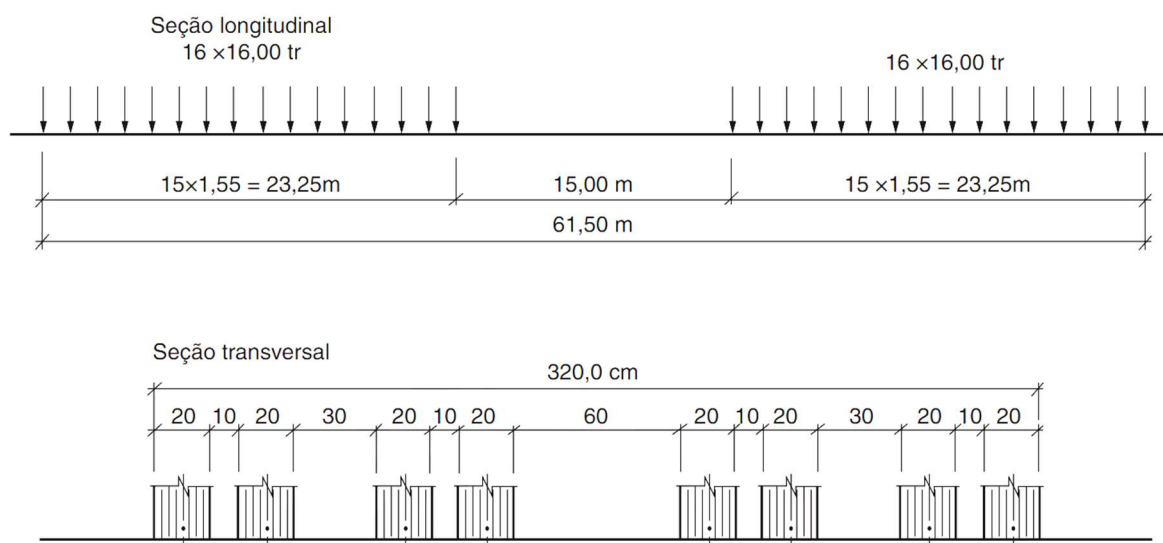
Figura 4-2 - Configuração de cargas estáticas definidas pela ABNT NBR 7188:2013



Fonte: ABNT (2013).

Segundo a norma, a carga móvel rodoviária padrão TB-450 é definida por um veículo tipo de 450 kN, com seis rodas,  $P$  igual a 75 kN, três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18,0 m<sup>2</sup>, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante  $p$  igual a 5 kN/m<sup>2</sup>. Em casos de estradas vicinais municipais de uma faixa e obras particulares, a carga rodoviária mínima é definida pelo TB-240, com distribuição análoga ao TB-450, mas carga  $P$  igual a 40 kN, e carga  $p$  igual a 4 kN/m<sup>2</sup>. A ABNT NBR 7188:2013 [22] ainda define que, a critério do órgão com jurisdição sobre a via, as obras devem ser verificadas para o transporte de carga especial, descrito conforme configuração apresentada na Figura 4-3.

Figura 4-3 - Veículo de cargas especiais



Fonte: ABNT (2013).

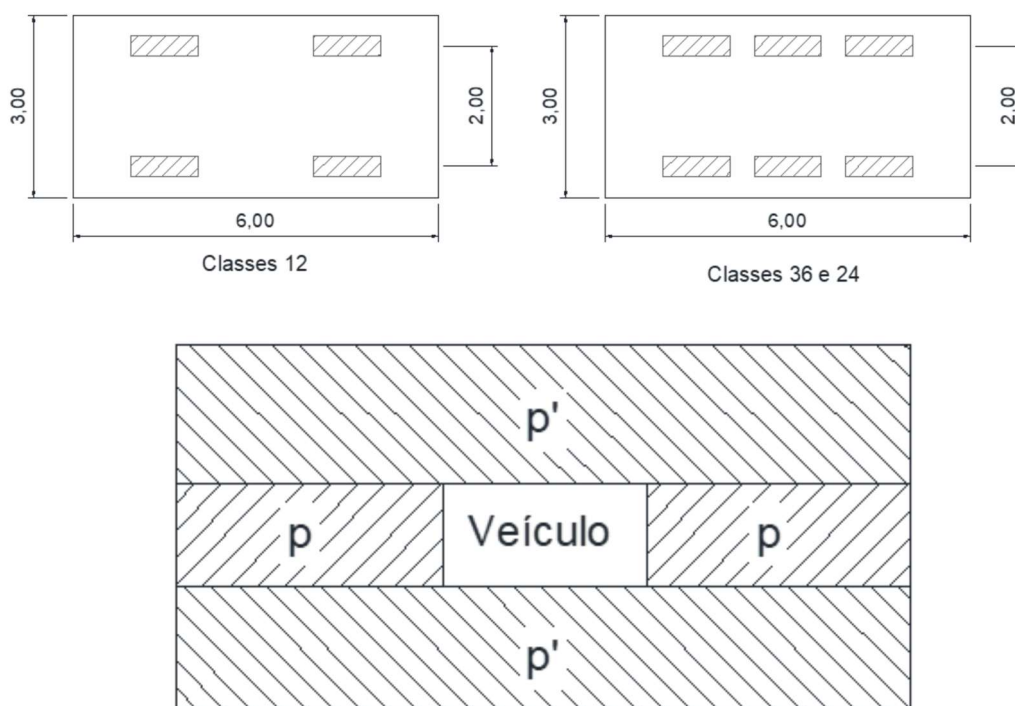
Aprofundando-se, a malha rodoviária brasileira aumentou significativamente entre as décadas de 1960 e 1980 [23]. Logo, a grande maioria das pontes existentes foram construídas segundo as normas vigentes da época, a NB-6 [24] e a ABNT NBR 7188:1984 [25], o que requer uma maior atenção quanto aos veículos-tipo definidos por tais normas.

A NB-6 [24] apresenta as classes de carga de 120, 240 e 360 kN. A configuração espacial das cargas do veículo era similar à apresentada na Figura 4-2 no caso das classes 240 e 360. No caso da classe 120, o veículo contava apenas com 4 rodas, abrindo mão do eixo central. As cargas aplicadas por cada uma das rodas era de 40 kN e 60 kN, para as classes 240 e 360, respectivamente. Os veículos da classe 120 contava com cargas de 20 kN nas rodas do eixo dianteiro e 40 kN no eixo traseiro. A carga uniformemente distribuída era dividida em faixas, sendo a carga  $p$  atuante na frente e atrás do veículo, e a carga  $p'$  no restante do tabuleiro. A carga  $p$  equivalia a 3 kN/m<sup>2</sup>, 4 kN/m<sup>2</sup> e 5 kN/m<sup>2</sup>, para as classes 120, 240 e 360, respectivamente. Já a carga  $p'$  continha o valor de 3 kN/m<sup>2</sup> para todas as classes.

A ABNT NBR 7188:1984 [25] manteve as configurações de carga do veículo de classe 120. Já as classes 240 e 360 foram substituídas pelas classes 300 e 450, com a atualização das cargas de roda para 50 kN e 75 kN, respectivamente. A carga uniformemente distribuída passou a ser de igual valor para as faixas  $p$  e  $p'$ , sendo

equivalente a  $5 \text{ kN/m}^2$ . As dimensões do veículo não foram alteradas. Os esquemas são apresentados na

Figure 4-4 - Esquema dos veículos-tipo de normas anteriores



Fonte: ABNT (1984).

#### 4.2.3. Aplicações do IFC em análise estrutural

Abordagens aplicando o IFC a projetos estruturais têm demonstrado o potencial do padrão em diversas frentes da engenharia. Ramaji e Memari [26] investigaram a interpretação de modelos de coordenação para automação na geração de modelos estruturais em IFC. O estudo utilizou informações espaciais e propriedades para gerar modelos estruturais e foi validado por meio de um estudo de caso, evidenciando a eficácia do método. No entanto, a abordagem se concentrou exclusivamente na geração de elementos estruturais e conexões, deixando de lado informações relacionadas às cargas e à análise estrutural.

Muller *et al.* [27] analisaram a evolução da interoperabilidade entre ferramentas BIM em um intervalo de cinco anos, utilizando modelos IFC de projetos estruturais. O estudo avaliou parâmetros como material, tipo, localização dos elementos, GUID (*Globally Unique Identifier*) e geometria. Os resultados indicaram avanços significativos na interoperabilidade ao longo do período, mas também revelaram

lacunas, como a ausência de dados relacionados a armações de estruturas de concreto e informações de carregamento. Visando sobrepujar os problemas identificados, os autores recomendam a consideração de ambos os elementos como objetos, para que sejam hospedados juntamente aos elementos estruturais, facilitando a geração dos elementos para viabilizar a transferência via IFC. No entanto, essa alteração acarretaria uma perda semântica considerável, dado que há uma distinção clara entre elementos estruturais e analíticos no padrão. Além disso, uma modificação dessa magnitude poderia comprometer a compatibilidade com versões anteriores do IFC.

Ren e Zhang [28] ampliaram a discussão ao conduzir uma análise do uso do IFC nos três estágios da análise estrutural, sendo estas a fase de modelagem intrínseca (geometria e materiais), modelagem extrínseca (condições de apoio e carregamentos) e fase de análise. Os autores compararam arquivos IFC gerados nas três fases em termos da cobertura da informação, e casos identificados de falta de informação a partir de um modelo estrutural simples de vigas e colunas. Após análise e exportação, informações de geometria, materiais, apoio e carregamentos foram transmitidos com sucesso aos arquivos IFC. Já as informações dos resultados de análise não foram incluídas no arquivo.

No contexto de pontes, o FHWA [29] explorou desafios na entrega digital de projetos, com ênfase na padronização do conteúdo e formato das trocas digitais. Por meio de um estudo de caso, foram investigadas todas as fases de um projeto de ponte entregue digitalmente em BIM. Na seção de análise estrutural, os autores destacaram limitações do IFC em capturar informações específicas de análise, como cargas móveis normatizadas, fundamentais para pontes. Os autores sugeriram uma extensão ao padrão para abordar essas lacunas e permitir maior integração com softwares de análise estrutural. É importante ressaltar que as cargas móveis utilizadas no dimensionamento de pontes são determinadas por normatização local, o que atribui maior complexidade quanto ao uso do IFC para cobertura global dos casos.

### **4.3. Metodologia**

A metodologia adotada para a instanciação do veículo tipo em IFC envolveu três etapas principais: análise normativa, instanciação das cargas e representação geométrica para facilitar a visualização do conjunto de ações. Inicialmente, foi

realizada uma análise detalhada da norma ABNT NBR 7188:2013 [22], complementada por comparações com as normas NB-6 [24] e ABNT NBR 7188:1984 [25]. Essa etapa permitiu identificar os parâmetros essenciais para a modelagem, como as cargas totais do veículo, as dimensões das rodas, o espaçamento entre eixos e as especificações das faixas de carregamento. A instanciação das cargas e a representação geométrica foram desenvolvidas com base no estudo da documentação do IFC 4.3 [30].

As cargas de roda foram representadas como ações de superfície, utilizando a classe *IfcStructuralSurfaceAction* para adequação ao esquema IFC. O atributo *AppliedLoad* aponta para uma instância de *IfcStructuralLoadConfiguration*, que, por sua vez, contém uma lista de instâncias de *IfcStructuralLoadSingleForce*, representando as cargas pontuais de cada roda. As posições relativas das cargas foram especificadas no *IfcStructuralLoadConfiguration*, garantindo a localização de cada roda no modelo. Para diferenciar o tipo de carregamento, o atributo *PredefinedType* foi configurado como *DISCRETE*.

As cargas de multidão foram configuradas para cobrir diferentes regiões da ponte, com faixas posicionadas na pista e, quando aplicável, nas calçadas. Duas faixas longitudinais na pista foram definidas, à frente e atrás do veículo, com largura equivalente à do veículo. Outras duas faixas laterais foram posicionadas ao longo da pista, ocupando os espaços adjacentes. Nas calçadas, foram definidas faixas adicionais para representar as cargas aplicáveis. Cada faixa foi representada como uma instância de *IfcStructuralSurfaceAction*, configurada como carga constante, e as forças foram atribuídas através de instâncias de *IfcStructuralLoadPlanarForce*, armazenadas na lista *Values* do *IfcStructuralLoadConfiguration*. Nesse caso, o atributo *PredefinedType* de cada *IfcStructuralSurfaceAction* foi definido por *CONST*.

Além disso, foi criada uma representação geométrica das ações para permitir a visualização no modelo. A representação foi associada ao atributo *Representation* das subclasses de *IfcStructuralActivity*, utilizando instâncias de *IfcExtrudedAreaSolid* apontadas pela cadeia *IfcProductDefinitionShape* → *IfcShapeRepresentation*. As cargas de multidão foram representadas pela área de atuação da ação, com extrusão vertical proporcional à intensidade da carga (1 metro de altura para cada 5 kN/m<sup>2</sup>). Para as cargas de roda, cada uma foi representada por um retângulo com as

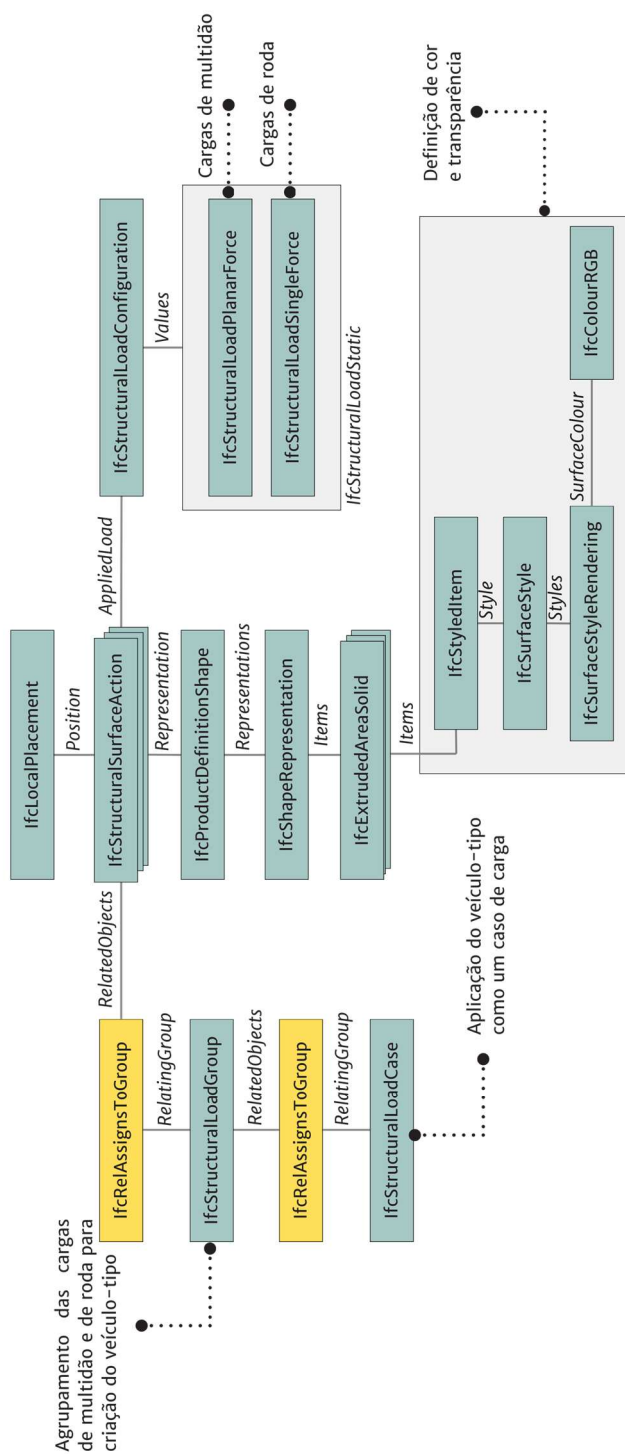
dimensões das rodas fornecidas pelas normas, extrudado verticalmente em uma altura proporcional de 1 metro para cada 25 kN.

A diferenciação visual das cargas foi implementada utilizando cores por meio da classe *IfcStyledItem*. Foram aplicadas as cores vermelha para cargas de multidão na faixa de rolamento, amarela para as faixas nas calçadas e azul para as cargas de roda. Além disso, foi configurada uma transparência de 50% nos sólidos representando as cargas, utilizando o atributo *Transparency* da classe *IfcSurfaceStyle Rendering*, garantindo uma melhor visibilidade do modelo estrutural subjacente.

Por fim, as cargas foram agrupadas, para sua identificação como um conjunto pertencente a um elemento. O objeto do grupo de cargas foi criado por meio da classe *IfcStructuralLoadGroup*. Para aglomerar as ações ao grupo criado, foi utilizado o relacionamento *IfcRelAssignsToGroup*. Além disso, foi criado o caso de carregamento através de *IfcStructuralLoadCase*, confirmando a atuação do veículo-tipo. Na instanciação de *IfcStructuralLoadCase*, o produto dos coeficientes de majoração das cargas para consideração do efeito dinâmico das cargas pode ser incluído, por meio do atributo *Coefficient*. O atributo *PredefinedType* foi definido por *Load\_Group*, e o atributo *ActionType* foi definido como *VARIABLE\_Q*. Já a definição da natureza da ação é comprometida, pela ausência da natureza móvel na lista predefinida. Dessa forma, o atributo *ActionSource* foi instanciado por *USERDEFINED*, e a descrição da natureza da carga foi descrita no atributo *ObjectDefinition*, como *MOVING\_LOAD*.

A abordagem completa é apresentada na Figura 4-5 por meio de um diagrama, com as classes e os atributos envolvidos na solução proposta.

Figura 4-5 - Diagrama de classes IFC empregadas na instanciação das cargas de veículo-tipo



Fonte: o autor (2025).

#### 4.4. Estudo de Caso

Para validar a metodologia proposta, foi realizado um estudo de caso aplicado a uma ponte de concreto com 100 m de comprimento e 11,2 m de largura. A estrutura apresenta um sistema de longarinas e conta com passeios laterais de 0,80 m de

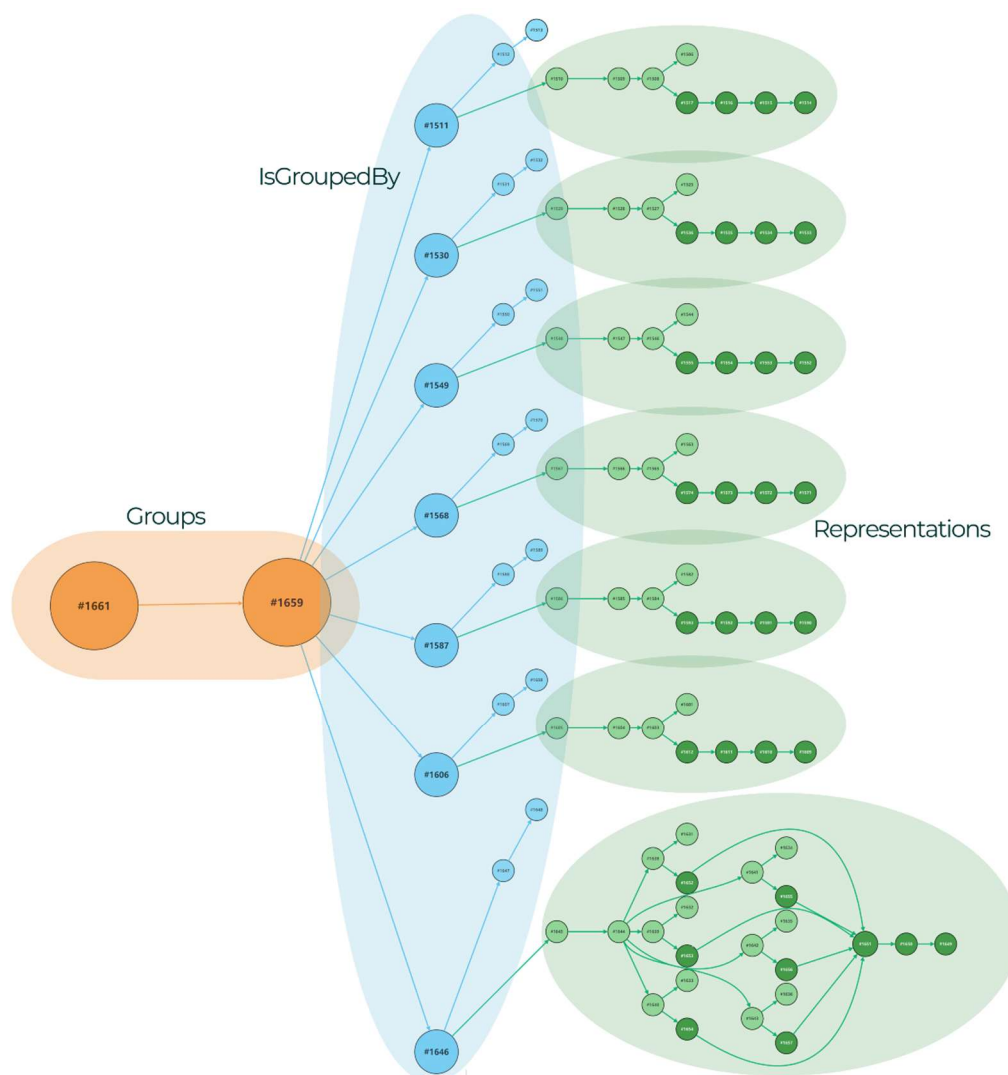
largura em cada lado, separados da faixa de rolamento por barreiras guarda-rodas do tipo *New Jersey*.

As cargas instanciadas no modelo referem-se ao veículo tipo TB-450 kN, conforme especificado pela norma ABNT NBR 7188:2013. Esse veículo possui dimensões de 3 m de largura por 6 m de comprimento e é composto por 6 rodas, cada uma com 0,5 m de largura e 0,2 m de comprimento. Cada roda aplica uma carga pontual de 75 kN sobre o tabuleiro da ponte. A carga de multidão foi distribuída em torno do veículo, sendo de 5 kN/m<sup>2</sup> sobre a faixa de rolamento e de 3 kN/m<sup>2</sup> sobre os passeios. Além disso, foram considerados o coeficiente de impacto vertical de 1,14, coeficiente de número de faixas de 1, e coeficiente de impacto adicional de 1,25, resultando em um produto de 1,425.

No modelo IFC, as cargas foram representadas geometricamente para facilitar a visualização e a análise no contexto do modelo estrutural. As cores e transparências atribuídas aos elementos gráficos permitiram distinguir os diferentes tipos de carregamento: vermelho para as cargas de multidão na faixa de rolamento, amarelo para as cargas nos passeios e azul para as cargas de roda. Essa diferenciação visual facilitou a compreensão da distribuição das ações no modelo (visível na Figura 4-7).

A adição das instâncias que compõem o veículo-tipo foi feita diretamente no *STEP Physical File* – SPF (arquivo físico STEP), formato definido pela ISO 10303-21[32]. O arquivo pode ser modificado por meio de um editor de textos. Devido ao volume de dados contidos no SPF, foi utilizado o respectivo grafo (Figura 4-6) para simplificar a visualização dos dados envolvidos no processo de instanciação.

Figura 4-6 - Grafo do veículo-tipo instanciado em IFC



Fonte: o autor (2025).

A utilização de grafos tem sido eficaz para a avaliação e consulta de dados em arquivos IFC, como apresentado por Zhu *et al.* [31] e Antunes *et al.* [19].

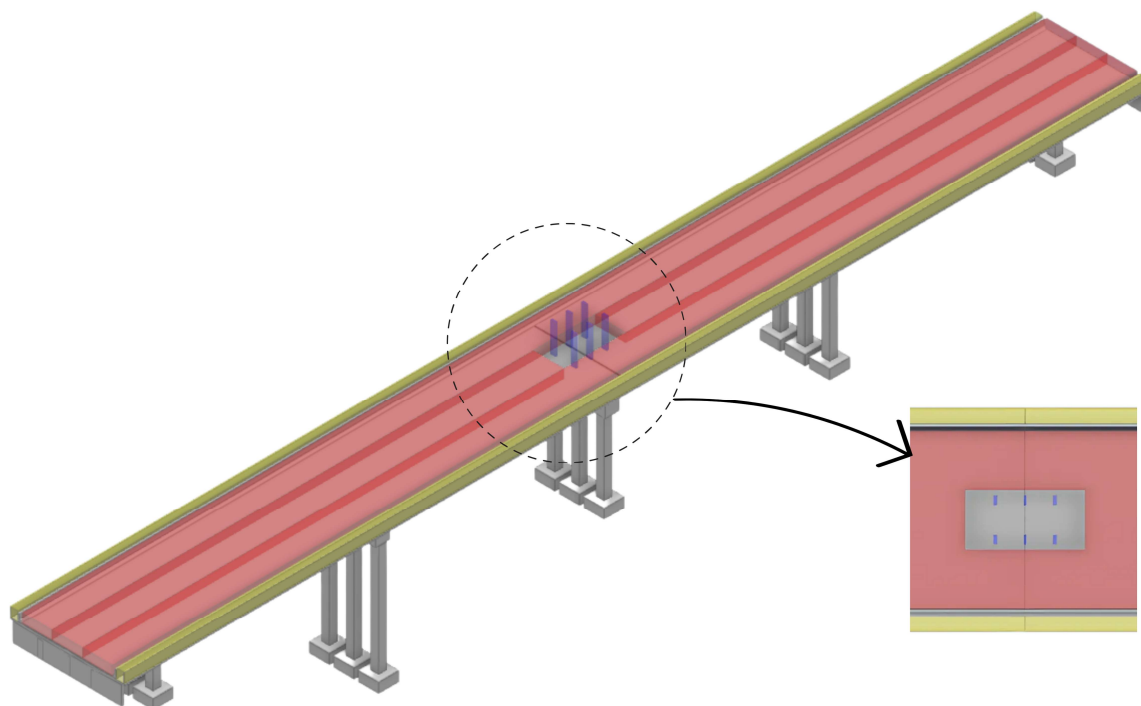
#### 4.4.1. Interpretação dos modelos

O estudo seguiu com a interpretação do modelo da ponte, com a instanciação do veículo-tipo nas ferramentas usBIM e, no Blender, com auxílio do add-on Bonsai. Uma terceira etapa envolveu a interpretação de um modelo analítico, com o veículo-tipo incluído no software de análise estrutural CSI *Bridge*. Por fim, utilizando a ferramenta *Validation Service*, da bSI, foi avaliada a instanciação proposta.

No visualizador IFC usBIM, foi possível observar a representação geométrica das cargas, além de consultar atributos associados às instâncias do modelo. Na

Figura 4-7 é apresentado o modelo da ponte com a inclusão do TB-450, juntamente com o exemplo das informações da ação correspondente às cargas de roda.

Figura 4-7 - Visualização do modelo de ponte após inclusão de veículo-tipo TB-450 na plataforma usBim



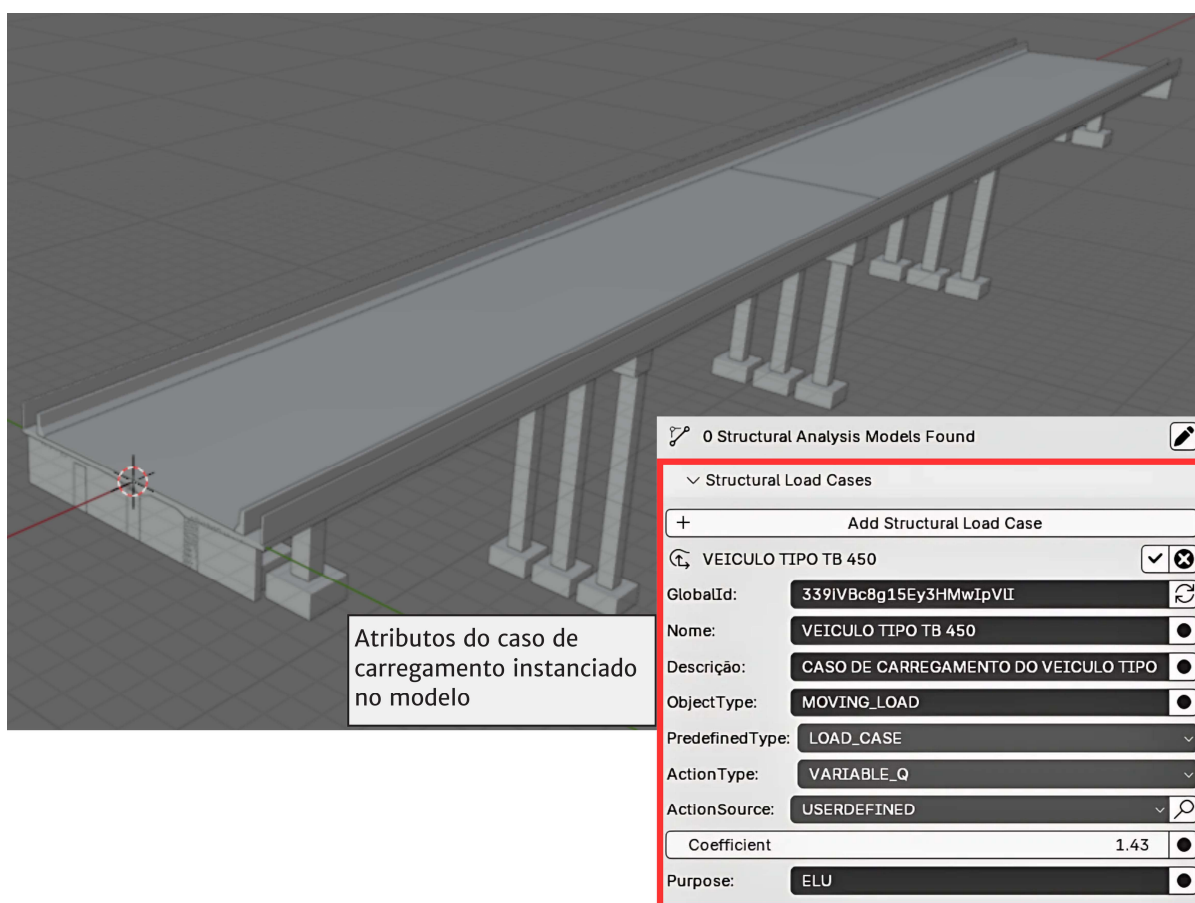
IfcStructuralSurfaceAction		
Características		
Dados Gerais		
GlobalId	223ivBc8g15Ey3HMwlpVII	
Name	CARGA DE RODA	
Description	CARGAS DE 75KN POR RODA	
ObjectType		
ObjectType		
GlobalOrLocal		
GlobalOrLocal	.LOCAL_COORDS.	
DestabilizingLoad		
DestabilizingLoad	False	
ProjectedOrTrue		
ProjectedOrTrue	.TRUE_LENGTH.	
PredefinedType		
PredefinedType	.DISCRETE.	
IfcObjectPlacement		
Representação Geométrica		
IfcOwnerHistory		
Grupo		
Grupo		
RelatingGroup	IfcStructuralLo...	IfcStructuralLoadGroup VEICULO TIPO TB 450 (GRUPO DE CARGAS DE RODA E MULTIDAO QUE FORMAM O TB 450) (289ivBc8g15Ey3HMwlpVII)

- Carga de multidão - faixa de rolamento
- Carga de multidão - passeio
- Carga de roda

Fonte: o autor (2025).

Adicionalmente, utilizando o add-on Bonsai do Blender, foi possível acessar detalhes sobre os atributos e configurações do caso de carregamento, embora a visualização gráfica das cargas não estivesse disponível nessa plataforma. A representação da ponte, assim como os atributos do caso de carregamento são apresentados na Figura 4-8.

Figura 4-8 - Visualização do modelo de ponte após inclusão de veículo-tipo TB-450 na plataforma Blender

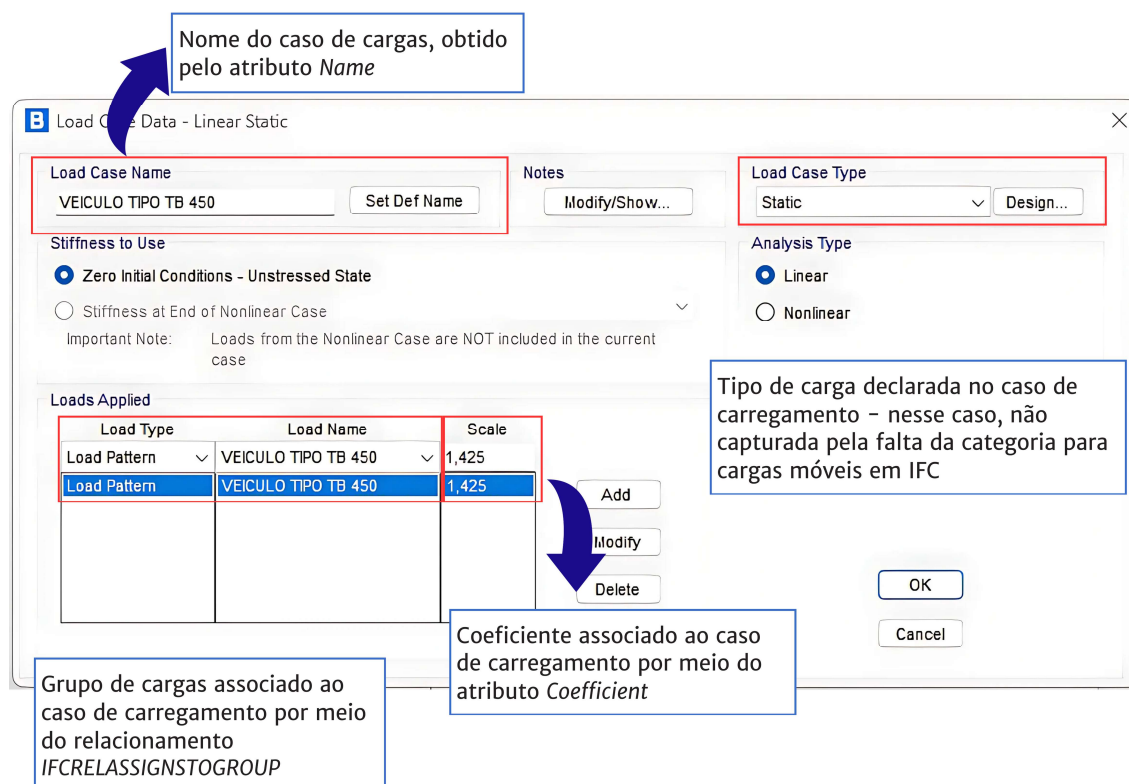


Fonte: o autor (2025).

O modelo de instanciação proposto foi incorporado a um modelo estrutural exportado a partir do CSI Bridge, com a correspondência a algumas classes do modelo, como o *OwnerHistory*. Após isso, foi realizada a importação do modelo com as cargas móveis. O software identificou e endereçou à sua estrutura de dados o grupo de cargas, assim como o caso de carregamento. Essa identificação foi mapeada com elementos obtidos por meio dos atributos das classes adicionadas ao modelo, sendo elas o nome do grupo de cargas, o caso de carregamento e o coeficiente de

majoração de cargas. São apresentadas na Figura 4-9 as definições do caso de carregamento na interface do *CSI Bridge*. Embora o caso de carregamento tenha sido interpretado corretamente, o tipo do caso de cargas não foi definido como móvel, visto que não há a predefinição dentro do atributo *ActionSource*.

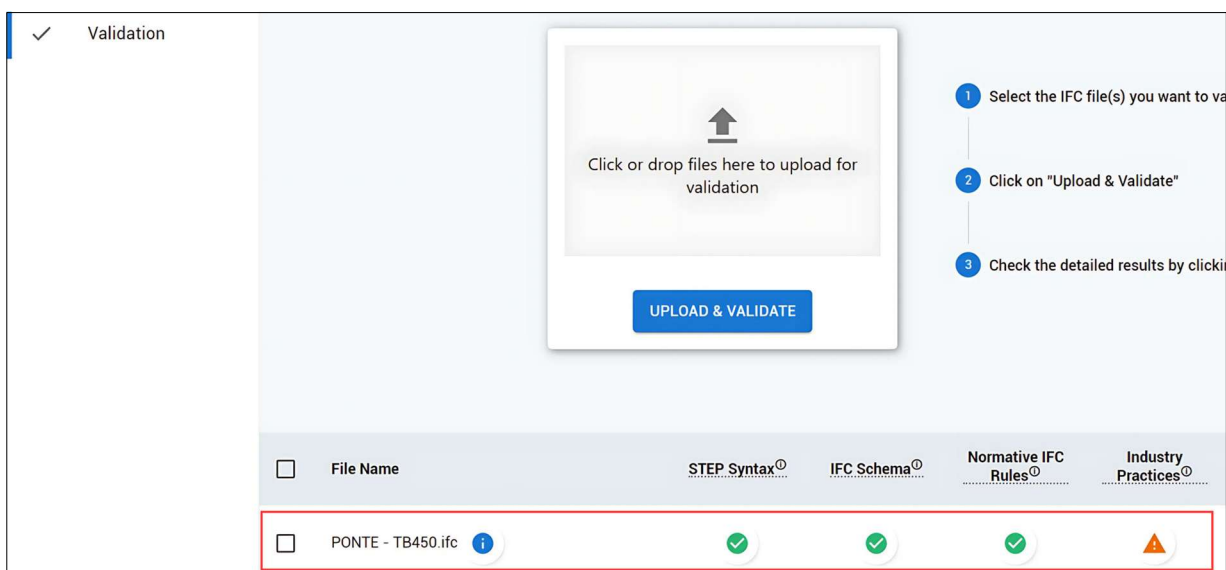
Figura 4-9 - Caso de carregamento na interface do CSI Bridge



Fonte: o autor (2025).

Para assegurar a conformidade do modelo gerado, a validação foi realizada utilizando a ferramenta da bSI *Validation*. Esse processo avaliou a sintaxe do arquivo IFC, além de regras normativas, funções e proposições formais codificadas no esquema. Os resultados confirmaram a aderência do modelo às especificações do IFC e à metodologia proposta. O resultado da verificação é apresentado na Figura 4-10.

Figura 4-10 - Demonstração de resultado de verificação do arquivo IFC na ferramenta *Validation*



Fonte: o autor (2025).

#### 4.4.2. Discussões

A instanciação do veículo-tipo em um modelo IFC trouxe benefícios significativos, tanto para a interoperabilidade quanto para a centralização das informações de análise estrutural. A utilização de um padrão aberto permite uma troca de informações mais eficiente entre diferentes ferramentas e profissionais. Além disso, o armazenamento das informações de carregamento e análise em IFC possibilita que estas sejam reaproveitadas em futuras atividades ou atualizações do modelo.

A metodologia adotada foi capaz de interpretar e representar de forma eficaz as configurações de carregamento definidas pela ABNT NBR 7188:2013 [22], ao mesmo tempo em que atendeu às normas anteriores, como a NB-6 [24] e a ABNT NBR 7188:1984 [25]. O método também evidenciou diferentes ações através da representação geométrica e de estilos de superfície, permitindo uma visualização clara das cargas e suas distribuições. Informações adjacentes, como coeficientes de majoração por efeito dinâmico, foram integradas ao modelo, abrangendo de forma completa os parâmetros do veículo tipo TB-450.

Entretanto, alguns desafios foram identificados ao longo do processo. Embora o caso de carregamento do TB-450 e suas cargas tenham sido reconhecidos pela plataforma Blender com o add-on Bonsai, a representação geométrica das ações não foi transcrita. Informações como seção transversal dos sólidos e estilo de superfície foram interpretadas e apresentadas na aba *Geometry and Materials*, mas os sólidos

geométricos não foram gerados pela aplicação. Uma análise da documentação do Bonsai [33] revelou que o software possui capacidades avançadas em análise estrutural, como definição de elementos estruturais, criação e gerenciamento de casos de carga e integração com ferramentas externas. Contudo, não está clara a compatibilidade do software com a geometria associada às ações estruturais. Isso pode estar relacionado ao esquema hierárquico adotado pela plataforma, que organiza os elementos de construção de acordo com estruturas espaciais definidas, sendo elas *IfcProject*, *IfcSite*, *IfcBridge*, *IfcBridgePart*, até a camada dos elementos. Como os elementos representativos do carregamento não fazem parte de uma estrutura espacial e não são subclasses de *IfcElement*, o software pode não as interpretar como parte da geometria do modelo.

Outro ponto identificado foi a semântica das classes utilizadas para a instanciação das cargas. As ações foram instanciadas utilizando subclasses de *IfcStructuralLoadStatic*, indicando que seriam cargas estáticas. Contudo, as cargas de tráfego do veículo tipo TB-450 são, por natureza, cargas móveis, o que gera uma contradição semântica. Essa questão é debatida sob dois pontos de vista: no contexto da fonte das cargas, a utilização da classe *IfcStructuralLoadStatic* não descreve corretamente os esforços dinâmicos. Por outro lado, os efeitos dinâmicos são considerados atendidos pela inclusão dos coeficientes de majoração definidos pela norma. O resultado da análise decorrente das ações de tráfego advém da sobreposição de resultados de análises estáticas realizadas para diferentes posições do veículo, garantindo que os casos mais críticos sejam atendidos. Assim, do ponto de vista da análise estrutural, a utilização das classes estáticas é parcialmente adequada, havendo uma deficiência semântica com relação à posição das ações, as quais não possuem uma localização fixa sobre a estrutura.

Adicionalmente, a fonte das ações foi especificada de forma explícita. O atributo *ObjectType* foi utilizado para descrever a natureza das ações associadas ao veículo tipo TB-450, enquanto o atributo *ActionSource* foi definido como *USERDEFINED* para acomodar a característica móvel das cargas, uma vez que essa natureza não está contemplada na lista predefinida de ações do IFC. A interpretação do modelo de carga no *CSI Bridge* evidenciou a necessidade de uma predefinição das cargas móveis como um tipo ou fonte de carregamento, visto que apesar da correta interpretação do

caso de cargas, e do grupo de carregamento, a falta do suporte semântico prejudicou a interoperabilidade do modelo.

#### **4.5. Conclusões**

Este trabalho apresentou uma metodologia para a instanciação de veículos-tipo normativos no formato IFC, com aplicação em um modelo de ponte de concreto sobre longarinas. A abordagem demonstrou como as cargas associadas a veículos-tipo podem ser representadas de maneira integrada, armazenando informações analíticas e geométricas em um formato padronizado e interoperável.

Entre as principais contribuições do trabalho, destacam-se:

- centralização de informações estruturais em um formato aberto, promovendo a interoperabilidade entre ferramentas e profissionais;
- representação geométrica detalhada das ações, com uso de cores, transparências e parâmetros normativos para facilitar a visualização e interpretação das cargas; e
- flexibilidade da metodologia, capaz de atender tanto à norma vigente (ABNT NBR 7188:2013) quanto às normas anteriores, abrangendo diferentes configurações de carregamento. Além disso, a estrutura proposta é capaz de atender a veículos de cargas especiais, sendo adaptável à configuração de carga necessária.

Embora tenha evidenciado a necessidade de melhorias no suporte à representação de cargas móveis no padrão IFC, especialmente em relação à semântica das classes disponíveis, a metodologia adotada mostrou-se funcional e aplicável. Essa questão semântica abre caminho para trabalhos futuros, incentivando discussões e revisões do esquema IFC para melhor atender às demandas de análise estrutural. Também é relevante explorar a integração com outras ferramentas de análise estrutural para validar diretamente os modelos instanciados, além de investigar como os dados de cargas móveis armazenados em IFC podem ser utilizados em simulações paramétricas ou automações no projeto estrutural.

Por fim, este trabalho reforça o potencial do uso de padrões abertos como o IFC na modelagem e análise de estruturas, promovendo maior confiabilidade no armazenamento e intercâmbio de informações em projetos de engenharia.

## Referências Bibliográficas

- [1] C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. *Manual de BIM: um guia de modelagem de informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores*. Porto Alegre: Bookman, 2014. 503 p. Tradução de: Cervantes Gonçalves Ayres Filho *et al.*[2] S. Azhar, M. Khalfan, and T. Maqsood. "Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond". *Australasian Journal Of Construction Economics And Building*, v. 12, n. 4, p. 15-28, nov. 2012, <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.013120167780649>.
- [2] S. Azhar, M. Khalfan, and T. Maqsood. "Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond". *Australasian Journal Of Construction Economics And Building*, v. 12, n. 4, p. 15-28, nov. 2012, <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.013120167780649>.
- [3] W. Kymmell. *Building Information Modeling: planning and managing construction projects with 4D cad and simulations*. McGraw-Hill, 2008.
- [4] A. Borrmann, M. Koning, C. Koch, J. Beetz. "Building Information Modeling: Why? What? How?", in: *Building Information Modeling: technology foundations and industry practice*. A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz, Springer, 2018. p. 3.
- [5] A. Costin, A. Adibfar, H. Hu, S. S. Chen. "Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations". *Automation In Construction*, v. 94, p. 257-281, out. 2018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>.
- [6] A. Bradley, H. Li, R. Lark, S. Dunn. "BIM for infrastructure: an overall review and constructor perspective". *Automation In Construction*, v. 71, n. 1, p. 139-152, nov. 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>.
- [7] Governo Federal, *Estratégia BIM BR: Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modeling - BIM*. Brasília: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, 2018.
- [8] Departamento De Estradas De Rodagem, *Caderno BIM: infraestrutura rodoviária*. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2023.

- [9] Departamento De Estradas De Rodagem, *Caderno Técnico de Especificações de Escopo de Projetos BIM de Rodovias*. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2024.
- [10] A. Justo, D. Lamas, A. Sánchez-Rodríguez, M. Soilán, B. Riveiro. “Generating IFC-compliant models and structural graphs of truss bridges from dense point clouds”, *Automation in Construction*, v. 149, p. 104786, maio 2023, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104786>.
- [11] A. C. P. Martins, I. R. Castellano, K. M. L. César Júnior, J. M. F. Carvalho, F. G. Bellon, D. S. Oliveira, J. C. L. Ribeiro. “BIM-based mixed reality application for bridge inspection”, *Automation in Construction*, v. 168, p. 105775, dez. 2024, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105775>.
- [12] G. P. Teixeira *et al.* “Interoperability level for bridge structural analysis from the IFC data interpretation”, *Gestão & Tecnologia de Projetos*, v19, n3, dez. 2024.
- [13] M. S. Andrade *et al.* “Metodologia de avaliação estrutural para longarinas de pontes de concreto armado sem dados de projeto: uma análise probabilística”, in: *Congresso Brasileiro De Pontes E Estruturas, 2023*, Rio de Janeiro.
- [14] B. Mcguire, R. Atadero, C. Clevenger, M. Ozbek. “Bridge Information Modeling for Inspection and Evaluation”. *Journal Of Bridge Engineering*, v. 21, n. 4, abr. 2016, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000850](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000850).
- [15] J. Liu, L. Duan, S. Lin, J. Miao, J. Zhao. “Semantic Web-Based CRUD Operation and Constraint Validation for IFC-Based Information Management”. *Journal Of Construction Engineering And Management*, v. 150, n. 10, out. 2024, <http://dx.doi.org/10.1061/jcemd4.coeng-14276>.
- [16] A. Borrmann *et al.*, “Industry Foundation Classes: a standardized data model for the vendor-neutral exchange of digital building models”, in: *Building Information Modeling: technology foundations and industry practice*, A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz, Springer, 2018. p. 84.

- [17] A. Borrmann, S. Muhic, J. Hyvärinen, T. Chipman, S. Jaud, C. Castaing, C. Dumoulin, T. Liebich, L. Mol. “The IFC-Bridge project – Extending the IFC standard to enable high quality exchange of bridge information models”. *Proceedings Of The 2019 European Conference On Computing In Construction*, p. 377-387, 10 jul. 2019, University College Dublin, <http://dx.doi.org/10.35490/ec3.2019.193>.
- [18] buildingSMART International. “Architecture overview”. [buildingsmart.org](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/content/introduction). Accessed: 24 jan. 2025. [Online.] Available: [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_3/HTML/content/introduction](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/content/introduction).
- [19] M. L. R. Antunes, K. M. L. César, J. C. L. Ribeiro, D. S. Oliveira, J. M. F. Carvalho. “Analysis of IFC interoperability data schema for project representation”. *Automation In Construction*, v. 166, out. 2024, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105650>. [20] buildingSMART International Limited. “IfcStructuralAnalysisDomain”. [buildingsmart.org](https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/ifcstructuralanalysisdomain/content.html). Accessed: 24 jan. 2025. [Online.] Available: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/ifcstructuralanalysisdomain/content.html>.
- [21] buildingSMART International. “IfcStructuralLoadResource”. [buildingsmart.org](https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/ifcstructuralloadresource/content.html). Accessed: 24 jan. 2025. [Online.] Available: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/ifcstructuralloadresource/content.html>.
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- [23] Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, *Rodovias Brasileiras: gargalos, investimentos, concessões e preocupações com o futuro*. In: Comunicados do IPEA. 52. ed. Brasília: IPEA, 2010.
- [24] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NB-6: Cargas móveis em pontes rodoviárias*. Rio de Janeiro: ABNT, 1960.

- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 7188: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- [26] I. J. Ramaji, A. M. Memari. “Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information modeling”. *Automation In Construction*, v. 90, p. 117-133, jun. 2018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.
- [27] M. F. Muller, A. Garbers, F. Esmanioto, N. Huber, E. R. Loures, O. Canciglieri Junior. “Data interoperability assessment through IFC for BIM in structural design – a five-year gap analysis”. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 23, n. 7, p. 943-954, 13 jul. 2017, <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2017.1341850>.
- [28] R. Ren, J. Zhang. “Comparison of BIM Interoperability Applications at Different Structural Analysis Stages”, in: *Construction Research Congress: Computer Applications -Selected Papers from the Construction Research Congress*, p. 537–545. <https://doi.org/10.1061/9780784482865.057>.
- [29] Brenner, J. M. *et al.*, 2020. *Demonstration of Bridge Project Delivery Using BIM*, Washington,DC: Federal Highway Administration.
- [30] buildingSMART International. “Documentation”. [buildingsmart.org](https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org). Accessed: 24 jan. 2025. [Online.] Available: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org>.
- [31] J. Zhu, P. Wu, X. Lei. “IFC-graph for facilitating building information access and query”. *Automation In Construction*, v. 148, p. 104778, abr. 2023, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104778>.
- [32] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 10303-21: Industrial automation systems and integration Product data representation and exchange Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure*. Genebra: ISO, 2016.
- [33] IfcOpenShell Contributors. “Bonsai 0.8.0 Documentation: Structural Analysis”. <https://docs.bonsaibim.org>. Accessed: 24 jan. 2025. [Online.] Available: [https://docs.bonsaibim.org/guides/structural\\_analysis/index.html](https://docs.bonsaibim.org/guides/structural_analysis/index.html).

**Author contributions:** MND: Conceptualization, Writing – Original Draft, Data curation, Formal analysis, Methodology; GPT: Data curation, Methodology, Writing – review and editing; JCLR e KMLCJ: Funding acquisition, Supervision, Conceptualization, Formal analysis, Methodology, Writing – review and editing; DSO e JMFC: Funding acquisition, Project administration.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS

### 5.1. Considerações finais

Este trabalho explorou aplicações práticas do uso do IFC 4.3 em modelos de pontes voltados para análise estrutural. Ao longo do estudo, foram investigadas as potencialidades do esquema IFC para comportar informações de geometria, propriedades físicas e mecânicas, além de dados de carregamento diretamente ligados a modelos analíticos estruturais.

Inicialmente, no Capítulo 2, foi elaborado um referencial teórico para contextualizar os conceitos abordados nos capítulos seguintes. No Capítulo 3, foi realizada uma investigação sobre a aplicação de modelos IFC na fase de análise estrutural de pontes, resultando na definição de um framework para a modelagem focada nesse propósito. Dentre as recomendações identificadas, destaca-se a importância da correlação entre geometrias e as estruturas do IFC adequadas para sua representação. No Capítulo 4, foi desenvolvida uma estrutura para instanciação de modelos de veículos-tipo, permitindo validar a compatibilidade de ferramentas *OpenBIM* com elementos de análise estrutural no IFC.

A organização e validação das informações extraídas da documentação do IFC 4.3 representam uma contribuição significativa tanto para a academia quanto para a indústria. O processo de consulta e interpretação da documentação do IFC pode ser desafiador, e este trabalho pode servir como um repositório útil para desenvolvedores interessados na implementação de geradores de modelos voltados para análise estrutural.

No decorrer do estudo, algumas dificuldades foram encontradas. No Capítulo 2, a metrificação do impacto do modelo IFC apresentou desafios. A criação de diversos modelos de forma manual evidenciou a rigidez no arquivo IFC. No Capítulo 3, a ausência de semântica específica para a representação de carga móvel no esquema IFC foi uma limitação significativa do modelo proposto, o que ficou evidente na interpretação do veículo-tipo no software CSI Bridge.

### 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, estudos que proponham extensões ao esquema IFC para incorporar a representação semântica de cargas móveis podem trazer benefícios

relevantes para a interoperabilidade de modelos analíticos de pontes. Além disso, pesquisas voltadas para a mensuração da interoperabilidade entre diferentes aplicações de análise estrutural, considerando a troca de modelos analíticos e resultados de análise, podem apontar melhorias no processo de criação e validação desses modelos.

A perspectiva para o futuro do IFC, com a possível chegada do IFC 5, envolve uma reformulação na estrutura de dados, buscando minimizar a redundância informacional, ou seja, evitar que diferentes estruturas representem as mesmas informações, ainda que sem comprometer a semântica. Espera-se também que mais objetos específicos para pontes, como as cargas móveis, sejam incluídos no esquema, visto que o IFC 4.3 representa apenas um primeiro passo para a incorporação desse tipo de estrutura. Assim, futuras pesquisas serão necessárias para viabilizar o uso, aplicação e disseminação de uma nova estrutura de dados, além da necessidade de frameworks que possibilitem a conversão das versões até então utilizadas na possível nova versão do IFC.

Além disso, avanços na modelagem de dados para armazenamento de resultados de análises estruturais são aguardados, visando acomodar o elevado volume de dados gerado nessa etapa.