

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Avaliação da interpretação de dados IFC para um software de análise
estrutural de pontes de concreto em vigas**

Guilherme Palla Teixeira
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

GUILHERME PALLA TEIXEIRA

**Avaliação da interpretação de dados IFC para um software de análise
estrutural de pontes de concreto em vigas**

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

Orientador: Jose Carlos Lopes Ribeiro

Coorientadores: Kleos M. L. C. Junior
Diogo Silva de Oliveira
Jose M. F. de Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

T266a
2025
Teixeira, Guilherme Palla, 1991-
Avaliação da interpretação de dados IFC para um software
de análise estrutural de pontes de concreto em vigas / Guilherme
Palla Teixeira. – Viçosa, MG, 2025.
1 tese eletrônica (119 f.): il. (algumas color.).

Texto em português e inglês.

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.160>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Pontes de concreto. 2. Análise estrutural (Engenharia) -
Programas de computador. 3. Building information modeling.
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. 624.250285

GUILHERME PALLA TEIXEIRA

Avaliação da interpretação de dados IFC para um software de análise estrutural de pontes de concreto em vigas

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

APROVADA: 14 de março de 2025.

Assentimento:

Guilherme Palla Teixeira
Autor

Jose Carlos Lopes Ribeiro
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 27/03/2025 às 12:34:51 e pelo orientador em 27/03/2025 às 13:02:08. 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 **VHCV.9TXX.HECB** e clique no botão 'Validar documento'.

À minha esposa, aos meus pais e ao meu irmão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida e por Sua infinita graça em todos os momentos.

Aos meus pais, José Maria Teixeira (in memoriam) e Cláudia Maria Palla Teixeira (in memoriam), pelo amor incondicional e pelos ensinamentos valiosos.

À minha esposa, Cíntia Gomes, pelo amor, carinho e cuidado dedicados a mim.

Ao meu irmão, Fabrício, por sempre me encorajar e transmitir força nos momentos difíceis.

Ao orientador José Carlos Lopes Ribeiro, pela amizade, dedicação e ensinamentos.

Aos coorientadores Kléos, José Maria e Diôgo, pelas significativas contribuições à minha formação.

À turma do LaBIM, em especial: Álvaro, Ana, Bruno, Christian, Fernando, Letícia, Lucas, Matheus, Nakata e Victor. A “hora do café” jamais será esquecida.

Aos grandes amigos, Lucas Nunes e Gustavo Nalon, pela parceria e ajuda durante todo o trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

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

A toda a população brasileira, cuja contribuição financeira tornou possível a realização deste trabalho.

“If you choose not to decide, you still have made a choice”.
(Neil Peart, Geddy Lee e Alex Lifeson)

RESUMO

TEIXEIRA, Guilherme Palla, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2025. **Avaliação da interpretação de dados IFC para um software de análise estrutural de pontes de concreto em vigas.** Orientador: Jose Carlos Lopes Ribeiro. Coorientadores: Kleos Magalhaes Lenz Cesar Junior, Diogo Silva de Oliveira e Jose Maria Franco de Carvalho.

A troca de dados entre softwares tornou-se um dos principais desafios no fluxo de trabalho em ambiente BIM (Building Information Modeling). A utilização do IFC (Industry Foundation Classes) como padrão neutro para troca de dados de pontes visa aumentar o nível semântico dos elementos e, por consequência, atingir a interoperabilidade. Vários softwares comerciais de análise e dimensionamento estrutural de pontes possuem a opção de exportação e importação utilizando arquivos .ifc. Porém, ainda não o fazem na versão IFC 4.3.2.0, que abrange dados de pontes e demais obras de infraestrutura. Assim, para fins de análise estrutural, faz-se necessária a interpretação das informações por meio de algoritmos de codificação, identificando os dados do modelo estrutural de uma ponte. Devido à celebração de um Termo de Execução Descentralizada entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV), encontra-se em desenvolvimento um software de análise estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF) para o cálculo da capacidade de carga de pontes de concreto em vigas (SAEP). Apresentam-se nesta tese os resultados obtidos a partir da elaboração de uma ferramenta implementada no SAEP, capaz de interpretar dados IFC de pontes para fins de análise estrutural. A ferramenta foi validada por meio da elaboração de uma metodologia para determinar um valor numérico para o nível de interoperabilidade para análise estrutural de pontes. Além disso, foi proposta uma extensão da estrutura de dados IFC para cargas móveis, uma vez que essas informações ainda não são englobadas no esquema IFC vigente. Os resultados de interpretação de dados IFC do modelo estrutural e cargas móveis mostraram um alto nível de interoperabilidade utilizando o SAEP, evitando retrabalho de modelagem por parte dos usuários.

Palavras-chave: Building Information Modeling (BIM); Industry Foundation Classes (IFC); Interoperabilidade; Pontes; Análise estrutural

ABSTRACT

TEIXEIRA, Guilherme Palla, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2025. **Evaluation of IFC data interpretation for a structural analysis software of concrete girder bridges.** Adviser: Jose Carlos Lopes Ribeiro. Co-advisers: Kleos Magalhaes Lenz Cesar Junior, Diogo Silva de Oliveira and Jose Maria Franco de Carvalho.

Data exchange between software has become one of the main challenges in the BIM (Building Information Modeling) workflow. The use of IFC (Industry Foundation Classes) as a neutral standard for exchanging bridge data aims to increase the semantic level of the elements and achieve interoperability. Several commercial bridge analysis and design software offer the ability to export and import .ifc files. However, they still don't do this in the IFC4.3.2.0 schema, which covers data from bridges and other infrastructure works. For structural analysis purposes, it is necessary to interpret bridge information using coding algorithms, identifying the data from its structural model. Due to the signing of a Termo de Execução Descentralizada (TED) between the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) and the Departamento de Engenharia Civil from Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV), a structural analysis software is under development using the Finite Element Method (FEM) to calculate the load bearing capacity of concrete girder bridges (SAEP). This thesis presents the results obtained from developing a tool implemented in SAEP capable of interpreting IFC bridge data for structural analysis. The tool was validated using a methodology to determine a numerical value for the interoperability level for bridge structural analysis. Additionally, an IFC extension for moving loads was proposed, as this information is not included yet in the current IFC schema. The results of IFC interpreting data from the structural model and moving loads showed a high interoperability level using SAEP, avoiding modeling rework by users.

Keywords: Building Information Modeling (BIM); Industry Foundation Classes (IFC); Interoperability; Bridges; Structural analysis

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Architecture, Engineering, and Construction
ARV	Alignment based Reference View
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BBC	Bounding Box Center
BDTV	Bridge Design Transfer View
BIM	Building Information Modeling
Brep	Boundary representation
BRV	Bridge Reference View
bSI	buildingSMART International
CAE	Computer Aided Engineering
CS	Case Study
CSG	Constructive Solid Geometry
CV	Coordination View
DEC/UFV	Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DTV	Design Transfer View
FEM	Finite Element Method
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
ILBSA	Interoperability Level for Bridge Structural Analysis
IPBrep	Interpretação paramétrica de geometria Brep
Iset	Information set
ISO	International Organization for Standardization
LCS	Local Coordinate System
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVD	Model View Definition
OOP	Oriented Object Programming
POO	Programação Orientada a Objetos
Pset	Property set
RF	Rating Factor
RV	Reference View

SAEP	Sistema de Análise Estrutural de Pontes
SAV	Structural Analysis View
SPF	Step Physical File
TED	Termo de Execução Descentralizada
WCS	World Coordinate System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1 Generalidades	12
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1. Objetivo geral	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4 Organização do texto	15
Referências bibliográficas	16
2. A ESTRUTURA DE DADOS IFC PARA MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DE PONTES	18
2.1 Informações gerais	18
2.2 Generalidades	18
2.3 Informações gerais de uma ponte	19
2.4 Semântica dos elementos de ponte	21
2.5 Posicionamento	23
2.5.1. Posicionamento ortogonal	24
2.5.2. Posicionamento linear	26
2.6 Geometria	28
2.6.1. Extrusão (<i>IfcExtrudedAreaSolid</i>).....	29
2.6.2. Seções transversais posicionadas linearmente ao longo da diretriz de uma curva (<i>IfcSectionedSolidHorizontal</i>).....	33
2.6.3. Representação de contorno (<i>Boundary representation - Brep</i>)	34
2.7 Propriedades dos materiais	36
2.8 Conclusões	37
Referências bibliográficas	38
3. RECOMENDAÇÕES SOBRE A EXPORTAÇÃO DE DADOS IFC DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE PONTES DE CONCRETO EM VIGAS PARA FINS DE ANÁLISE ESTRUTURAL VIA MEF	41
3.1 Informações gerais	41
3.2 Artigo	42
4. ELEMENTOS PARAMÉTRICOS DE PONTES EM VIGAS A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE GEOMETRIA BREP	51
4.1 Informações gerais	51
4.2 Artigo	52

5. NÍVEL DE INTEROPERABILIDADE PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PONTES A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE DADOS IFC	63
5.1 Informações gerais	63
5.2 Artigo	64
6. PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UMA EXTENSÃO IFC PARA DADOS DE CARGAS MÓVEIS	83
6.1 Informações gerais	83
6.2 Manuscrito	84
7. CONCLUSÕES GERAIS	118
7.1 Considerações finais	118
7.2 Contribuições ao conhecimento	119
7.3 Sugestões para trabalhos futuros	119

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Generalidades

O *Building Information Modeling* (BIM) pode ser entendido como um processo que envolve a criação, uso e atualização contínua de um modelo digital para a representação virtual de uma construção, permitindo a troca de informações e a colaboração entre os diferentes profissionais envolvidos em todos os estágios do projeto (Biswas *et al.*, 2024). Essa filosofia pode ser aplicada tanto na modelagem de construções verticais quanto em obras de infraestrutura, como pontes, viadutos, túneis, estradas e ferrovias (Borrmann *et al.*, 2019). Embora a aplicação do BIM em obras de infraestrutura ainda seja pouco explorada, há um potencial para seu uso (Vignali *et al.*, 2021), uma vez que essa tecnologia pode trazer benefícios como gestão mais eficiente, trabalho colaborativo aprimorado e redução do tempo de execução do projeto (Kumar *et al.*, 2017).

De modo geral, assim como nos projetos de edificações, o uso do BIM em projetos de infraestrutura se sustenta em três pilares fundamentais: a parametrização de objetos BIM, a colaboração entre os membros da equipe e a interoperabilidade por meio de um formato aberto, ou seja, a capacidade de dois ou mais softwares de trocar dados sem perdas de informações e com alto nível semântico. O trabalho colaborativo torna-se efetivo quando a troca de dados entre softwares é realizada sem perda de informações (Hassanien Serror *et al.*, 2008).

A buildingSMART International (bSI) lançou o esquema de dados IFC (*Industry Foundation Classes*) para promover a troca de dados entre diferentes plataformas e/ou softwares. Assim, é necessário que os softwares implementem a exportação e importação de dados seguindo o esquema IFC correspondente a cada versão, a fim de garantir a interoperabilidade (Belsky *et al.*, 2015). A implementação da exportação de dados IFC torna-se mais fácil quando os objetos BIM são parametrizados de forma eficiente (Girardet; Boton, 2021), com parâmetros semelhantes aos atributos das entidades IFC e resultando em uma interpretação dos dados nativos para o IFC de forma menos trabalhosa.

O esquema IFC4 não inclui objetos semanticamente definidos voltados para obras de infraestrutura. No entanto, devido à alta demanda internacional, extensões IFC para projetos de pontes, ferrovias, estradas e túneis foram desenvolvidas, com o objetivo de aumentar o nível semântico desses projetos e melhorar a eficiência no processo de troca de dados. Para o projeto IFCBridge, por exemplo, foi proposto um conjunto de entidades IFC semanticamente definidas

para representar os elementos presentes em pontes de diversos tipos de sistemas estruturais, como longarinas e transversinas, além de novas representações geométricas. A buildingSMART International (bSI) definiu, em 2024, a versão IFC 4.3.2.0 (IFC 4.3 ADD2) como a versão oficial corrente.

Com a definição das entidades IFC voltadas para os elementos de pontes, boa parte da melhoria do fluxo de trabalho BIM consiste em alcançar a interoperabilidade entre duas aplicações, por exemplo, uma plataforma BIM de modelagem e um software de análise estrutural. Para fins de análise estrutural de pontes, a importação dos dados IFC relacionados à semântica dos elementos, geometria, propriedades dos materiais, vinculações e conexões entre elementos, carregamentos, reações e esforços internos possui grande importância. Porém, grande parte dessas informações não é interpretada devido à falta de definição de regras de interpretação de dados IFC no domínio da análise estrutural, além da definição da certificação desse domínio (Sibenik; Kovacic, 2020). Portanto, se um software de origem não possuir um modelo de vista de exportação de dados IFC voltado para a análise estrutural, então o uso de ferramentas auxiliares de interpretação de dados IFC torna-se uma boa opção na troca de dados, além de melhorar significativamente a coordenação e a colaboração entre arquitetos e engenheiros estruturais (Chen *et al.*, 2005; Hu *et al.*, 2016; Ramaji; Memari, 2018; Khattra *et al.*, 2020).

No Brasil, para apoiar o cumprimento do Decreto Presidencial nº 10.306 de 2 de abril de 2020, relativo à implantação gradativa da tecnologia BIM na gerência de projetos de infraestrutura sob controle do DNIT, em 2020, foi celebrado um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o DNIT e o DEC/UFV, por meio do projeto de pesquisa “Apoio à implementação da metodologia BIM e desenvolvimento de metodologias e ferramentas para gestão de estruturas de Obras de Arte Especiais - OAEs” (SISPPG/UFV nº 30158375291). Um dos objetivos do TED é a implementação de um programa computacional para automatizar a avaliação da capacidade de carga de pontes rodoviárias, denominado SAEP. Uma das ferramentas do SAEP consiste em um interpretador de dados IFC para fins de análise estrutural de pontes, permitindo a interpretação de dados gerais da ponte, semântica dos elementos, geometria paramétrica e propriedades dos materiais. A interpretação desses dados IFC permite reduzir consideravelmente o retrabalho por parte do usuário, minimizando possíveis erros e a falta de informações no fluxo de trabalho BIM.

Diante do exposto, apresenta-se nesta tese a avaliação da interpretação de dados IFC 4.3.2.0, com a finalidade de utilizá-los em um software de análise estrutural de pontes de concreto em vigas com eixo reto. As recomendações de exportação de dados IFC para fins de análise estrutural e os requisitos de informação foram apresentados, analisando as principais entidades IFC que devem ser interpretadas. Uma vez que as representações geométricas no IFC podem não ser paramétricas, avaliou-se a interpretação de dados de geometria Brep (*Boundary representation*) para dados paramétricos, comparando elementos estruturais de pontes como objeto de estudo. Com a definição de todos os requisitos de informação do SAEP, foi elaborada e validada a ferramenta de interpretação de dados IFC, utilizando uma metodologia para definir o valor numérico do nível de interoperabilidade para análise estrutural de pontes e, por meio desse valor, compará-lo com alguns softwares comerciais. Por fim, uma extensão de dados IFC para cargas móveis foi proposta com a finalidade de preencher uma lacuna no esquema IFC vigente, comparando a parametrização utilizada na extensão dos dados com os parâmetros utilizados por softwares comerciais.

1.2 Justificativa

As plataformas de modelagem arquitetônica / estrutural e as ferramentas de análise estrutural, utilizadas por arquitetos e engenheiros estruturais, podem apresentar diferenças na forma de representação de um determinado objeto, o que pode gerar inconsistências e levar a problemas de interoperabilidade. Nas últimas décadas, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de garantir a interoperabilidade utilizando o arquivo neutro IFC, principalmente no que tange aos projetos de edificações (Chen *et al.*, 2005; Hu *et al.*, 2016; Ramaji; Memari, 2018; Khattra *et al.*, 2020). A interoperabilidade de modelos de pontes, todavia, é um grande desafio, pois alguns softwares ainda não possuem implementadas as entidades IFC dos objetos que compõem os elementos das pontes.

Esta pesquisa propõe uma solução inédita para a interpretação de dados IFC 4.3 e a leitura dos dados interpretados em um software de análise estrutural para pontes de concreto em vigas (SAEP). Destaca-se que, no conhecimento do autor, não há trabalhos que tratam da interpretação de dados IFC relacionados à geometria de elementos de pontes com seções transversais variáveis. Adicionalmente, uma nova metodologia para avaliar quantitativamente o nível de interoperabilidade com a consideração da relevância das informações é proposta nesta pesquisa. Além disso, propõe-se uma extensão da estrutura de dados IFC para cargas móveis através da definição de novas entidades, uma vez que a bSI ainda não definiu

oficialmente essas entidades IFC. Diante do exposto, esta pesquisa contribuirá com uma solução mais eficiente para a etapa de troca de dados entre um software BIM e um software de análise estrutural de pontes via Método dos Elementos Finitos (MEF).

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral a avaliação e implementação da interpretação de dados IFC para um software de análise estrutural de pontes de concreto em vigas com eixo reto.

1.3.2. Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram delineados para a presente pesquisa:

- a) identificação das principais entidades IFC necessárias para a interpretação de dados para fins de análise estrutural de pontes de concreto em vigas com eixo reto;
- b) desenvolvimento de uma ferramenta que interpreta dados de geometria explícita Brep para dados de geometria implícita;
- c) desenvolvimento e implementação do algoritmo interpretador de dados IFC 4.3.2.0 para tratar as informações relacionadas à semântica dos elementos de pontes, geometria paramétrica e não paramétrica e propriedades dos materiais, sistematizando os dados na forma de um arquivo ASCII para leitura no software de análise estrutural de pontes de concreto em vigas com eixo reto, denominado SAEP;
- d) elaboração de uma metodologia para avaliar quantitativamente o nível de interoperabilidade na troca de dados IFC, considerando a relevância dos conjuntos de informações trocadas;
- e) proposição de uma extensão da estrutura de dados IFC para cargas móveis no domínio de análise estrutural, avaliando a parametrização dos dados IFC de cargas móveis com os dados paramétricos utilizados em alguns softwares de análise estrutural.

1.4 Organização do texto

O texto da presente tese foi estruturado em capítulos, como se segue.

No capítulo 1, apresenta-se uma introdução geral sobre o assunto tratado nesta tese, abrangendo conceitos importantes, o posicionamento do tema no atual cenário, a justificativa da pesquisa, os objetivos e a organização do texto.

No capítulo 2, é apresentado um referencial teórico abrangendo a definição das principais entidades IFC relacionadas à geometria, posicionamento e propriedades dos materiais. Essas entidades são fundamentais para a implementação da ferramenta de interpretação de dados IFC para fins de análise estrutural de pontes.

Abordam-se nos capítulos 3, 4, 5 e 6 os temas centrais desta tese. No capítulo 3, são descritas as recomendações sobre exportação de dados IFC de elementos de pontes para fins de análise estrutural. No capítulo 4, apresenta-se a interpretação da geometria de elementos de pontes não paramétricos para elementos paramétricos, apresentando métodos para recuperar as informações semânticas importantes. No capítulo 5, apresenta-se a metodologia utilizada para determinar o valor numérico do nível de interoperabilidade para análise estrutural de pontes, metodologia que pode ser expandida para outros domínios. No capítulo 6, propõe-se uma nova extensão de dados IFC para cargas móveis.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas as considerações finais da tese e as sugestões para trabalhos futuros.

Referências bibliográficas

BELSKY, M., SACKS, R, BRILAKIS, I. Semantic enrichment for building information modeling, **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering** **00** (2015), pp. 1-14.
<https://doi.org/10.1111/mice.12128>

BISWAS, H.K., SIM, T.Y., LAU, S.L. Impact of Building Information Modeling and Advanced Technologies in the AEC Industry: A Contemporary Review and Future Directions, **Journal of Building Engineering** **82** (2024) pp. 108165.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108165>

BORRMANN, A., MUHIC, S., HYVÄRINEN, J., CHIPMAN, T., JAUD, S., CASTAING, C., DUMOULIN, C., LIEBICH, T., MOL, L. The IFC-BRIDGE Project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models, in: **Proceedings of the European Conference on Computing in Construction, European Council on Computing in Construction** (2019), Chania, pp. 377–386.
<https://doi.org/10.35490/EC3.2019.193>

CHEN, P.H., CUI, L., WAN, C., YANG, Q., TING, S.K., TIONG, R.L.K. Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers, **Automation in Construction** **14** (2005) pp. 115–128.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.013>

GIRARDET, A., BOTON, C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis, **Automation in Construction** **126** (2021), pp. 103679.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103679>

HASSANIEN SERROR M., INOUE, J., ADACHI, Y., FUJINO, Y. Shared computer-aided structural design model for construction industry (infrastructure), **CAD Computer Aided Design** **40** (2008), pp. 778–788. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2007.07.003>

HU, Z.Z., ZHANG, X.Y., WANG, H.W., KASSEM, M. Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools, **Automation in Construction** **66** (2016), pp. 29–42.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.001>

KHATTRA, S., PUNJAB, I., SINGH, H. Generating Structural Model through Automatic Data Extraction using Openbim Technology, **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology** **11** (2020) pp. 602–613.
<https://doi.org/10.34218/IJARET.11.7.2020.060>

KUMAR, B., CAI, H., HASTAK, M. An assessment of benefits of using BIM on an infrastructure project, **American Society of Civil Engineers** (2017) pp. 88–95.
<https://doi.org/10.1061/9780784481219.008>

RAMAJI, I.J., MEMARI, A.M. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models, **Automation in Construction** **90** (2018), pp. 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>

SIBENIK, G., KOVACIC, I. Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis, **Journal of Building Engineering** **32** (2020), pp. 101589.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101589>

VIGNALI, V. ACERRA, E.M., LANTIERI, C., DI VINCENZO, F., PIACENTINI, G., PANCALDI, S. Building Information Modeling (BIM) application for an existing road infrastructure, **Automation in Construction** **128** (2021), pp. 103752.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103752>

2. A ESTRUTURA DE DADOS IFC PARA MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DE PONTES

2.1 Informações gerais

Apresenta-se, neste capítulo, um breve resumo sobre as principais entidades IFC para o projeto de uma ponte, a semântica dos elementos, o posicionamento, a geometria dos sólidos e das seções transversais, e as propriedades dos materiais. As informações utilizadas neste trabalho abrangem várias entidades IFC que foram implementadas em uma ferramenta de interpretação de dados IFC para fins de análise estrutural, portanto, há a necessidade de apresentar os pontos mais importantes de cada uma delas. Além disso, algumas relações matemáticas de posicionamento dos elementos também são apresentadas, visando um melhor entendimento sobre esse tipo de informação.

2.2 Generalidades

O IFC é um modelo de dados aberto e neutro, desenvolvido para facilitar a troca de informações entre diferentes softwares. Essa estrutura de dados é organizada de forma hierárquica, composta por entidades que representam elementos de construção semanticamente definidos, além de incluir representações geométricas em diversas formas, posicionamento, propriedades, relacionamentos, entre outros aspectos. A organização dos dados IFC possibilita a padronização na troca de informações entre softwares, o que minimiza erros e, conseqüentemente, garante a interoperabilidade.

A interoperabilidade é a capacidade de dois ou mais softwares trocarem dados IFC sem erros ou perdas, e é definida por quatro níveis qualitativos: *i*) nível de arquivo, que ocorre quando uma ferramenta consegue importar e exportar arquivos .ifc com sucesso; *ii*) nível de sintaxe, que se refere à capacidade de duas ferramentas lerem arquivos .ifc sem erros; *iii*) nível de visualização, que ocorre quando duas ferramentas conseguem visualizar de forma precisa o modelo trocado; e *iv*) nível semântico, que é a capacidade de duas ferramentas interpretarem as informações com alto nível semântico (Steel *et al.*, 2010). Alcançar a interoperabilidade pode ser desafiador, uma vez que problemas relacionados a dados inconsistentes ou perdidos são frequentemente observados, prejudicando a colaboração (Ren *et al.*, 2022). Uma das principais causas desses problemas é a dificuldade que os softwares enfrentam para interpretar dados de outros domínios (Lai; Dheng, 2018). Além disso, alguns softwares ainda não são capazes de

importar dados IFC de obras de infraestrutura, como os elementos de pontes, o que compromete o nível semântico.

Inicialmente, a estrutura de dados IFC foi desenvolvida para projetos de edifícios verticais, abrangendo até o esquema IFC4. A extensão do seu escopo para incluir dados de elementos de infraestrutura começou oficialmente em 2010, com a criação de grupos internacionais pela bSI (Costin *et al.*, 2018). Paralelamente, diversas pesquisas propuseram extensões da estrutura de dados IFC para pontes, destacando contribuições para elementos paramétricos de pontes (Ji *et al.*, 2011), curvas de alinhamento (Amann *et al.*, 2014) e posicionamento linear (Jaud *et al.*, 2021). Yu *et al.* (2023) realizaram uma revisão abrangente sobre os avanços das extensões IFC para obras de infraestrutura, incluindo também as voltadas para operação e manutenção. Em consequência, os esquemas IFC 4.1, IFC 4.2 e IFC 4.3 foram oficialmente publicados em 2018, 2019 e 2021, respectivamente, com contribuições para o projeto geométrico de obras de obras de infraestrutura (IFC 4.1), estrutura espacial e elementos de pontes (IFC 4.2), e posicionamento linear (IFC 4.3).

Para interpretar dados IFC na análise estrutural de pontes, é necessário considerar a troca das informações gerais, a semântica dos elementos, o posicionamento, a geometria e as propriedades dos materiais, levando em conta os quatro níveis qualitativos descritos por Steel *et al.* (2010). Assim, as principais entidades IFC referentes a cada um desses tipos de informação são apresentadas nas seções 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6.

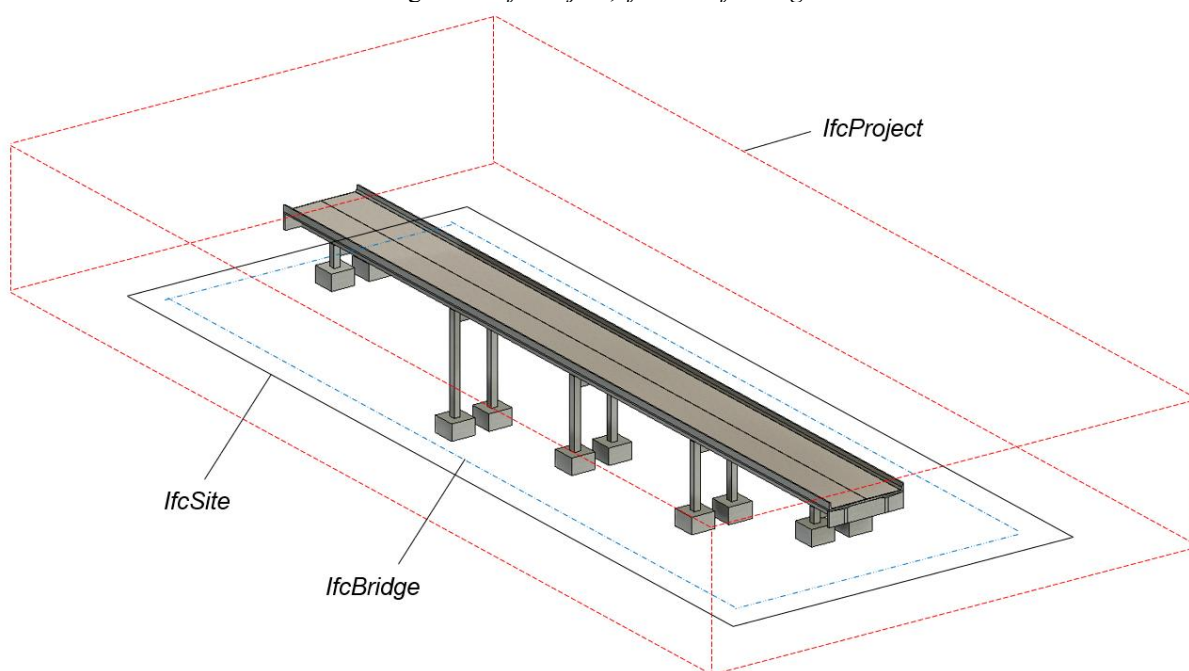
2.3 Informações gerais de uma ponte

As informações gerais de uma ponte podem ser divididas em três grupos: *i*) o projeto; *ii*) o local da construção; e *iii*) a representação da ponte. O projeto envolve um conjunto de soluções voltadas para um propósito específico, abrangendo não apenas a geometria física, mas também as intervenções planejadas ao longo de sua vida útil (Antunes *et al.*, 2024). O local da construção inclui a localização geográfica, dados climáticos, curvas de nível, infraestrutura existente, entre outros aspectos. A representação da ponte envolve dados geométricos, classificação funcional, materiais, parâmetros de desempenho, etapas construtivas, interações com o contexto, entre outros fatores. O IFC possui as entidades *IfcProject*, *IfcSite* e *IfcBridge* para representar o projeto, o local e a representação da ponte, respectivamente (Figura 1).

A entidade *IfcProject* estabelece o contexto para a troca ou compartilhamento das informações (IfcProject – IFC4.3.2 Documentation, 2023). Segundo Antunes *et al.* (2024),

alguns dos atributos de *IfcProject* correspondem às seguintes informações: a) *Name*: identidade do processo organizacional; b) *Description*: descrição do uso BIM em um modelo contratado; c) *Phase*: indicação da fase do ciclo de vida do projeto licitado; d) *RepresentationContext*: esse atributo aponta para *IfcRepresentationContext*, supertipo da entidade instanciável *IfcGeometricRepresentationContext*, que contém informações sobre o sistema de coordenadas (*WorldCoordinateSystem*), a direção do norte verdadeiro (*TrueNorth*) e a precisão das dimensões (*Precision*); e) *UnitsInContext*: este atributo aponta para *IfcUnitAssignment*, definindo as unidades utilizadas no projeto. As unidades utilizadas na exportação devem estar disponíveis no software de destino, caso contrário, os valores exportados não terão sentido físico.

Figura 1 – *IfcProject*, *IfcSite* e *IfcBridge*.



Fonte: o autor.

A entidade *IfcSite* descreve as características de uma área definida na qual a construção do projeto será concluída (*IfcSite* – IFC4.3.2 Documentation, 2023). Dentre os atributos de *IfcSite*, destacam-se as coordenadas de latitude (*RefLatitude*) e longitude (*RefLongitude*) em um ponto de referência do projeto. No esquema IFC 4.3.2.0, a entidade *IfcSite* possui 12 atributos, em vez dos 14 atributos presentes nos esquemas anteriores. O 14º atributo, chamado *SiteAddress*, apontava para *IfcPostalAddress*, uma entidade que não será mais utilizada no IFC4.3.2.0. As informações do endereço do local da obra são agora consideradas como um conjunto de propriedades definido por *Pset_Address*, conforme especificado pela bSI.

A entidade *IfcBridge* define fisicamente uma ponte como uma obra de engenharia que permite a passagem de veículos, pedestres e outros meios sobre obstáculos ou entre dois pontos a uma altura acima do solo (IfcBridge – IFC4.3.2 Documentation, 2023). O atributo *PredefinedType* de *IfcBridge* aponta para um valor enumerado que define o tipo da ponte. Por exemplo, pontes em vigas, em arco e estaiadas são classificadas como GIRDER, ARCHED e CABLE_STAYED, respectivamente. Essa informação é crucial para a interpretação dos dados IFC na análise estrutural, pois os tipos de elementos podem variar de acordo com o tipo de ponte a ser analisada.

2.4 Semântica dos elementos de ponte

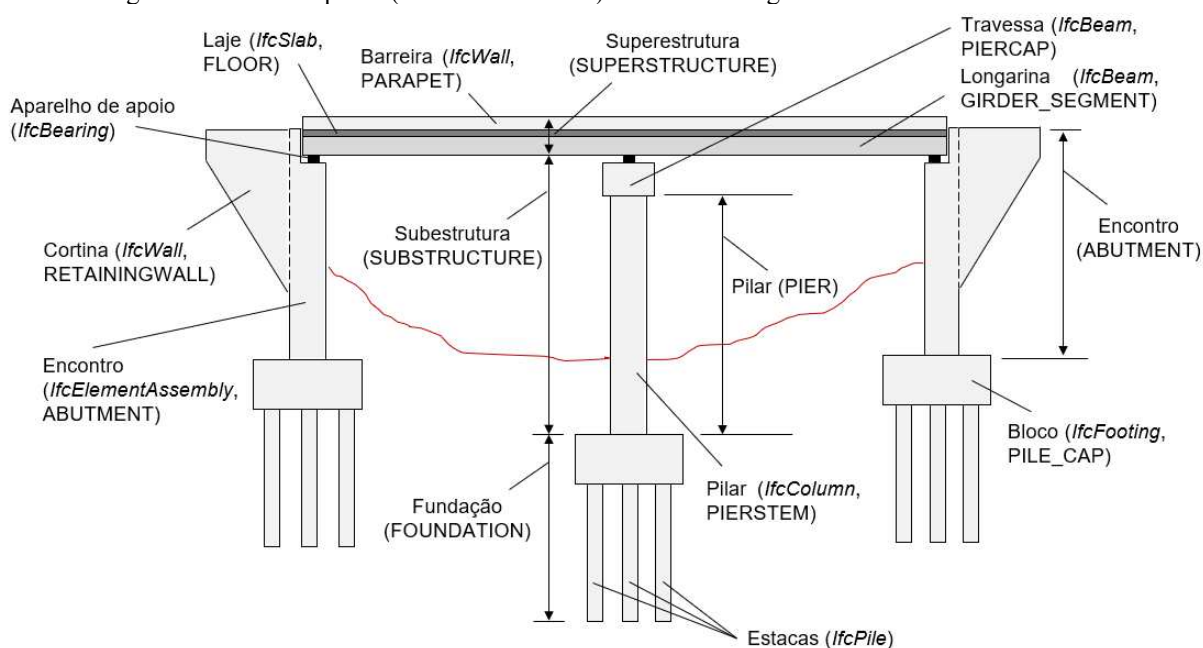
Até o IFC4, somente dados de edifícios eram interoperáveis, o que comprometia o fluxo de trabalho BIM em obras de infraestrutura. Com a extensão do IFC4 para abranger os projetos de infraestrutura, novos objetos foram definidos para enriquecer a estrutura de dados, aumentando o seu nível semântico e melhorando a troca de dados IFC.

Os elementos de uma ponte são posicionados em suas respectivas partes. Assim, o IFC classifica essas partes por meio dos itens enumerados do atributo *PredefinedType* da entidade *IfcBridgePart*, tais como o encontro (ABUTMENT), a fundação (FOUNDATION), a subestrutura (SUBSTRUCTURE), a superestrutura (SUPERSTRUCTURE), entre outras partes. É mostrado na Figura 2 as partes de uma ponte em vigas definidas pelos itens enumerados de *IfcBridgePart.PredefinedType*, bem como alguns elementos da ponte designados por suas respectivas entidades IFC.

Mostra-se na Tabela 1 o conjunto de elementos comuns em projetos de pontes e suas respectivas entidades IFC 4.3.2.0 com os tipos predefinidos. Algumas entidades IFC foram definidas a partir do IFC 4, enquanto outras sofreram edições nas definições para incluir os elementos de pontes, como as barreiras e guarda-rodas.

Com exceção do encontro da ponte, todos os outros elementos apresentados na Tabela 1 são subtipos de *IfcBuiltElement*. O encontro da ponte é considerado um elemento de construção que pode ser composto por vários elementos, definido por *IfcAssemblyElement*, com o tipo predefinido ABUTMENT.

Figura 2 – Partes da ponte (elementos cotados) e elementos segundo a estrutura de dados IFC.



Fonte: o autor.

Tabela 1 – Elementos comuns em projetos de ponte e as respectivas entidades IFC com os tipos predefinidos.

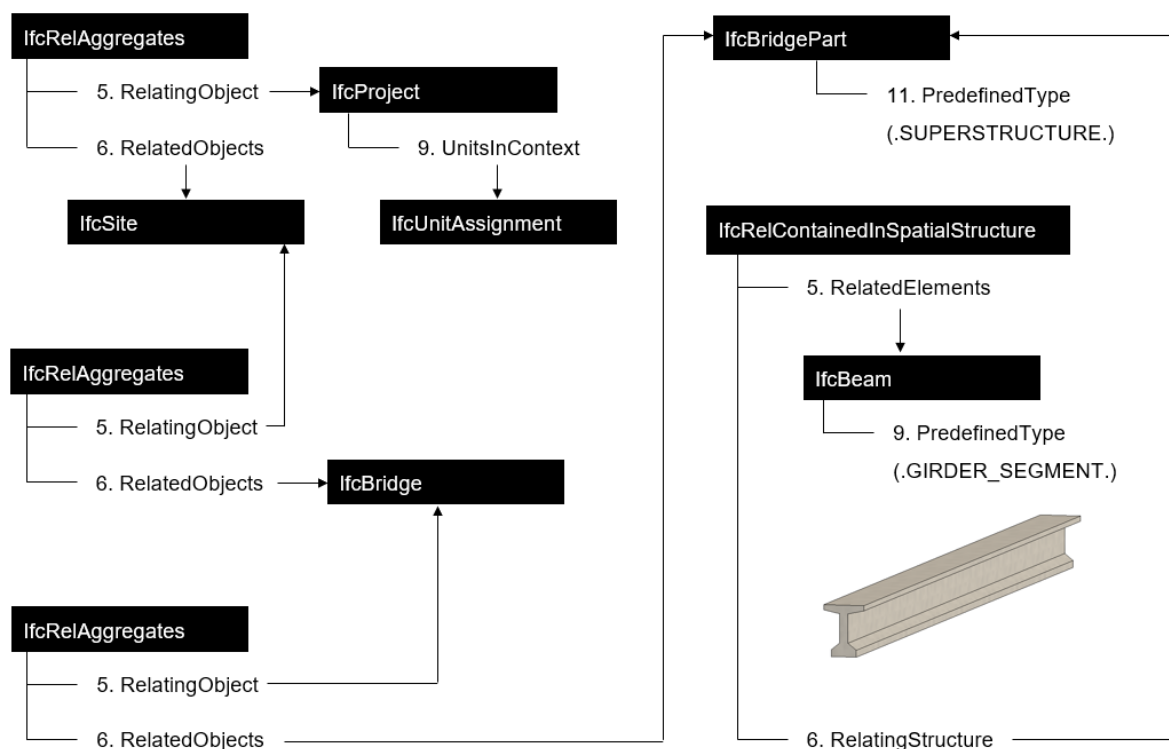
Elemento	Entidade IFC	Tipo predefinido
Aparelho de apoio (elastômero)	IfcBearing	ELASTOMERIC
Barreira	IfcWall	PARAPET
Bloco de fundação	IfcFooting	PILE_CAP
Cortina	IfcWall	RETAININGWALL
Encontro	IfcElementAssembly	ABUTMENT
Estaca (geral)	IfcPile	-
Guarda-corpo	IfcRailing	BALUSTRADE
Guarda-rodas	IfcRailing	GUARDRAIL
Laje de ponte	IfcSlab	FLOOR
Longarina	IfcBeam	GIRDER_SEGMENT
Pavimento (flexível)	IfcPavement	FLEXIBLE
Pavimento (rígido)	IfcPavement	RIGID
Pilar (pier)	IfcColumn	PIERSTEM
Transversina	IfcBeam	DIAPHRAGM
Travessa	IfcBeam	PIERCAP
Tubulão (geral)	IfcCaissonFoundation	-

Fonte: o autor.

Apresentam-se na Figura 3 as entidades que relacionam *IfcProject*, *IfcSite*, *IfcBridge*, *IfcBridgePart* e uma instância que representa uma longarina (*IfcBeam*, com tipo predefinido *GIRDER_SEGMENT*). Uma instância de *IfcRelAggregates* relaciona o projeto (*IfcProject*) e o local da obra (*IfcSite*) por meio dos atributos *RelatingObject* e *RelatedObjects*, respectivamente. De maneira análoga, uma ponte (*IfcBridge*) pode ser relacionada ao local da obra, e uma parte da ponte (*IfcBridgePart*, com tipo predefinido *SUPERSTRUCTURE*) pode ser relacionada à

ponete utilizando *IfcRelAggregates*. O relacionamento de uma instância de *IfcBeam*, posicionada na superestrutura da ponte, é estabelecido utilizando *IfcRelContainedInSpatialStructure*. Portanto, todos os elementos de ponte mostrados na Tabela 1 são relacionados conforme a parte da ponte onde se encontram.

Figura 3 – Estrutura espacial no IFC: relacionamento entre uma instância *IfcBeam* (GIRDER_SEGMENT) e a parte da ponte onde o elemento é encontrado.



Fonte: o autor.

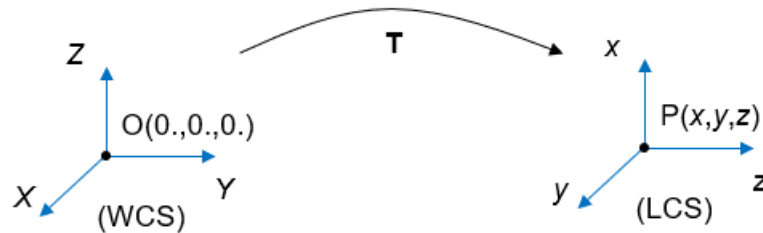
2.5 Posicionamento

De maneira geral, o posicionamento de um elemento de ponte pode ser ortogonal ou linear. O posicionamento ortogonal envolve as coordenadas (x_0, y_0, z_0) de um ponto em relação a um WCS (World Coordinate System) ou a um LCS (Local Coordinate System). O posicionamento linear envolve as coordenadas de deslocamento no eixo longitudinal da diretriz da curva, no eixo transversal e na elevação, considerando a parametrização da diretriz do alinhamento do projeto (Hu *et al.*, 2014). Para obras de infraestrutura, a principal vantagem de se utilizar o posicionamento dos elementos em relação a uma curva de alinhamento é a atualização automática da posição desses elementos sempre que modificações nas dimensões e nos posicionamentos forem necessárias (Ji *et al.*, 2012). Para pontes de eixo reto e em nível, o uso do posicionamento ortogonal oferece vantagens de precisão e melhor controle na modelagem paramétrica dos elementos de pontes.

2.5.1. Posicionamento ortogonal

Um ponto pode estar posicionado em relação a um WCS ou a um LCS. Mostra-se na Figura 4 um ponto P e dois sistemas de coordenadas: WCS e LCS. O ponto O é a origem do WCS e o ponto P é a origem do LCS. As coordenadas do ponto P em relação ao WCS são (x,y,z) .

Figura 4 – Posicionamento local ortogonal.



Fonte: o autor.

Assim, a matriz de transformação \mathbf{T} que leva em consideração a nova origem do LCS e as novas direções, é dada pela equação (1):

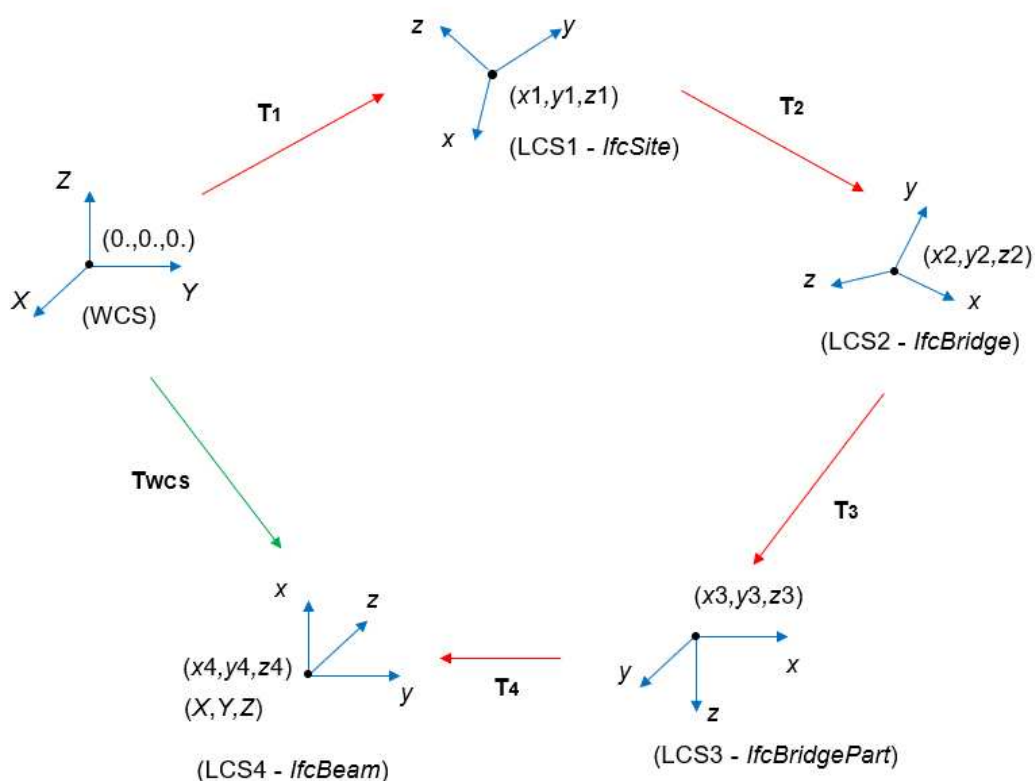
$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{X,x} & \cos \theta_{X,y} & \cos \theta_{X,z} & x \\ \cos \theta_{Y,x} & \cos \theta_{Y,y} & \cos \theta_{Y,z} & y \\ \cos \theta_{Z,x} & \cos \theta_{Z,y} & \cos \theta_{Z,z} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde os vetores $(\cos \theta_{X,x}, \cos \theta_{Y,x}, \cos \theta_{Z,x})$, $(\cos \theta_{X,y}, \cos \theta_{Y,y}, \cos \theta_{Z,y})$, $(\cos \theta_{X,z}, \cos \theta_{Y,z}, \cos \theta_{Z,z})$ correspondem às direções dos eixos x , y e z do LCS, respectivamente; e os valores de x , y e z são as coordenadas da origem do LCS em relação ao WCS.

No IFC, o posicionamento ortogonal de um produto (como o local da ponte, a ponte em si ou um elemento de ponte) é baseado na equação (1). Esse posicionamento é definido pelo atributo *ObjectPlacement* da entidade abstrata *IfcProduct*. Por exemplo, o posicionamento de uma viga é representado pelo atributo *IfcBeam.ObjectPlacement*. Por convenção, a instância de *IfcSite* é o único objeto posicionado em relação ao WCS (Borrmann; Berkhan, 2018). Adota-se o critério: WCS \rightarrow local da obra \rightarrow ponte \rightarrow parte da ponte (como a superestrutura) \rightarrow elemento da ponte (como a viga). Assim, uma instância de *IfcBridge* está posicionada em relação a *IfcSite.ObjectPlacement*; uma instância de *IfcBridgePart* está posicionada em relação a *IfcBridge.ObjectPlacement*; e uma instância de *IfcBeam* está posicionada em relação a *IfcBridgePart.ObjectPlacement* (Figura 5).

T_1 , T_2 , T_3 e T_4 são as matrizes de transformação responsáveis pelo posicionamento do local da obra em relação ao WCS, da ponte em relação ao local da obra, da parte da ponte em relação à ponte como um todo, e do elemento da ponte em relação à parte da ponte, respectivamente. Uma possível alteração no posicionamento de um dos produtos resulta em uma atualização apenas no produto anterior. Ou seja, ao modificar o posicionamento de uma viga na ponte, o posicionamento da viga em relação à parte da ponte será alterado, enquanto os demais posicionamentos permanecem inalterados.

Figura 5 – Exemplo da sequência de posicionamento ortogonal de produtos no IFC.



Fonte: o autor.

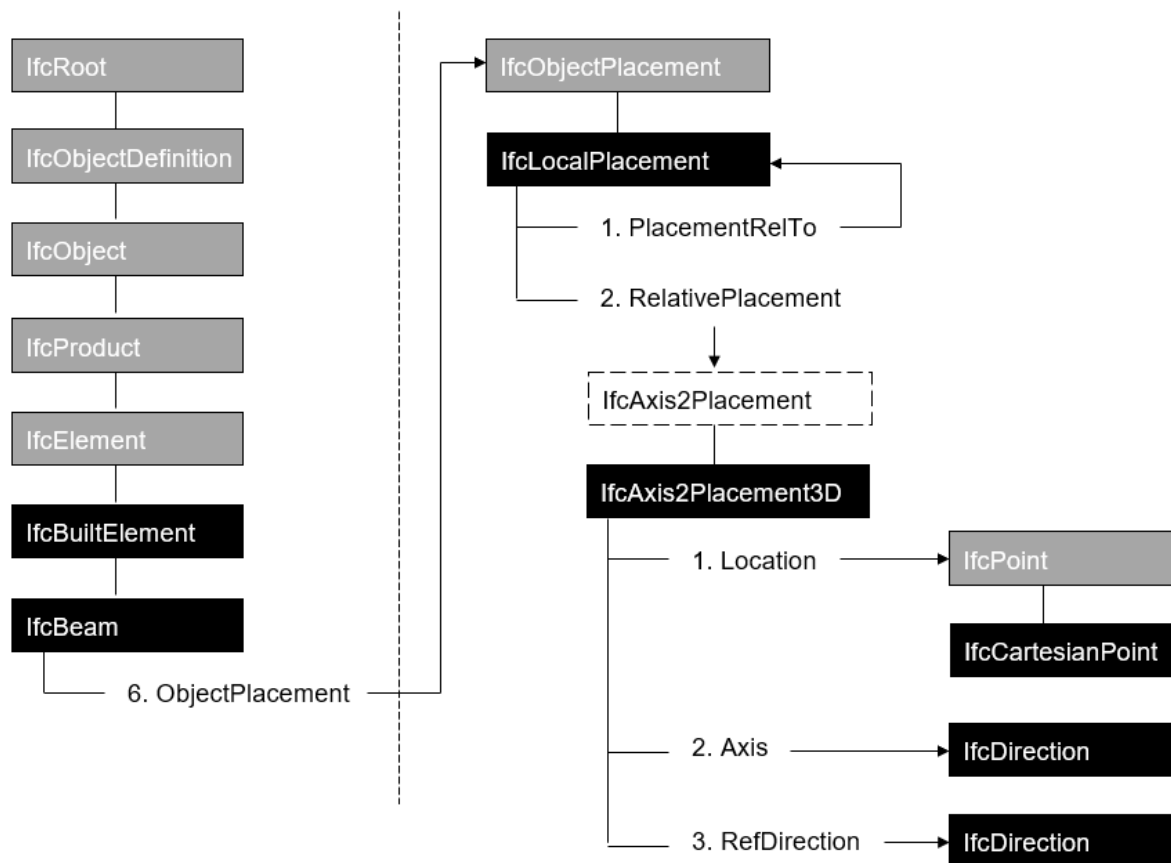
Para o posicionamento ortogonal, o atributo *ObjectPlacement* aponta para uma instância de *IfcLocalPlacement*, subtipo da entidade abstrata *IfcObjectPlacement* (Figura 6). O atributo *PlacementRelTo* define o sistema de referência ao qual o elemento está relacionado. Assim, esse atributo opcional aponta para uma outra instância de *IfcLocalPlacement*. Caso esse atributo não seja fornecido, o elemento estará posicionado em relação ao WCS. O atributo *RelativePlacement* aponta para uma instância de *IfcAxis2Placement3D*, que define a nova origem do sistema de referência, por meio de *IfcCartesianPoint*, e as novas direções dos eixos z e x locais, por meio de *IfcDirection*. Portanto, com os valores das origens de cada LCS (atributo *Location* de *IfcAxis2Placement3D*), as direções dos eixos z e x (atributos *Axis* e

RefDirection de *IfcAxis2Placement3D*, respectivamente), e a direção y calculada por meio do produto vetorial das direções dos eixos z e x , determina-se a matriz do posicionamento do elemento em relação ao WCS, \mathbf{T}_{WCS} , dada pela equação (2):

$$\mathbf{T}_{\text{WCS}} = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{X,x4} & \cos \theta_{X,y4} & \cos \theta_{X,z4} & X \\ \cos \theta_{Y,x4} & \cos \theta_{Y,y4} & \cos \theta_{Y,z4} & Y \\ \cos \theta_{Z,x4} & \cos \theta_{Z,y4} & \cos \theta_{Z,z4} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde os vetores $(\cos \theta_{X,x4}, \cos \theta_{Y,x4}, \cos \theta_{Z,x4})$, $(\cos \theta_{X,y4}, \cos \theta_{Y,y4}, \cos \theta_{Z,y4})$, $(\cos \theta_{X,z4}, \cos \theta_{Y,z4}, \cos \theta_{Z,z4})$ correspondem às direções dos eixos x , y e z do LCS4, respectivamente; e os valores de X , Y e Z são as coordenadas da origem do LCS4 em relação ao WCS.

Figura 6 – Entidades IFC para a definição do posicionamento ortogonal. As entidades hachuradas de cinza são abstratas.



Fonte: o autor.

2.5.2. Posicionamento linear

Em obras de infraestrutura, o posicionamento de um ponto pode ser determinado a partir da curva de alinhamento da obra. Essa curva é posicionada ortogonalmente em relação ao

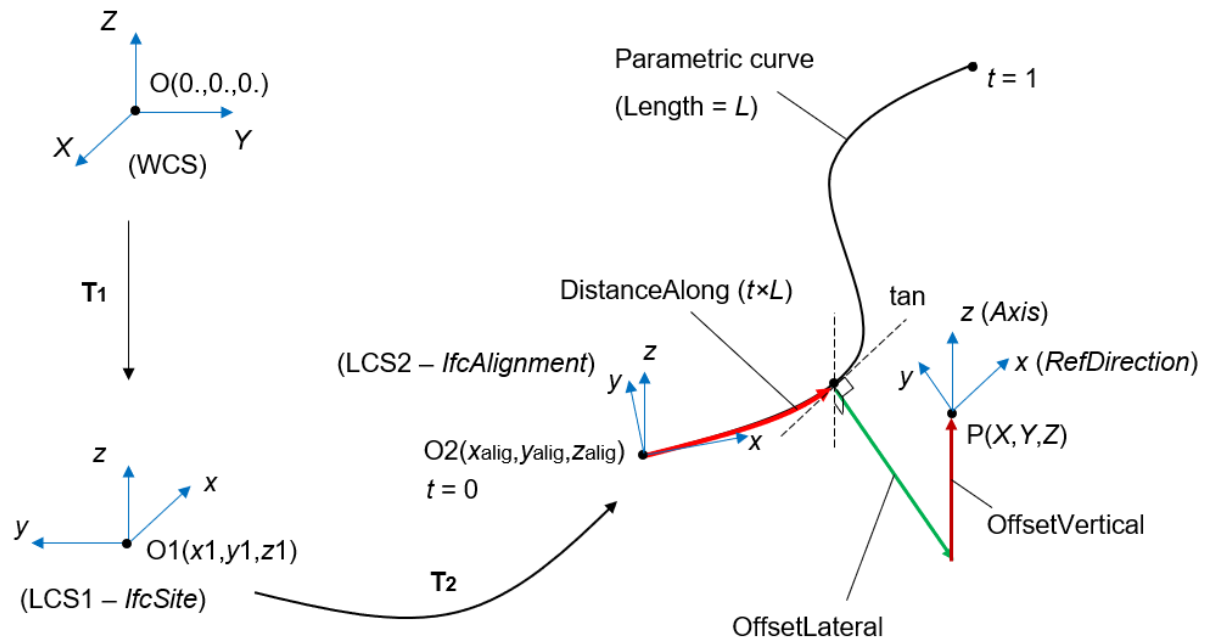
sistema de referência da instância de *IfcSite*. A partir dessa definição de posicionamento, todos os demais produtos são posicionados em relação ao alinhamento. No IFC, a curva de alinhamento é semanticamente definida pela entidade *IfcAlignment*, que pode ser descrita pelas seguintes configurações: *i*) horizontal; *ii*) horizontal e vertical; *iii*) horizontal, vertical e inclinações laterais (superelevações); *iv*) múltiplas configurações verticais baseadas na mesma configuração horizontal; *v*) múltiplas configurações verticais baseadas na mesma configuração horizontal, com superelevações aplicadas (*IfcAlignment* – IFC4.3.2 Documentation, 2023).

Com a definição do alinhamento, tanto por meio de seu posicionamento quanto pela sua representação geométrica, os demais produtos são posicionados linearmente utilizando a entidade *IfcLinearPlacement*, subtipo de *IfcObjectPlacement*. Mostra-se na Figura 7 o posicionamento linear de um ponto P em relação a uma curva de alinhamento contínua, com sua representação geométrica a partir de uma instância de *IfcAlignment*. A origem do alinhamento está posicionada em relação ao local da obra, ou seja, em relação ao *IfcSite.ObjectPlacement*, com coordenadas por x_{alig} , y_{alig} e z_{alig} . A posição de um ponto P é determinada pela distância ao longo da curva de alinhamento e pelos deslocamentos lateral e vertical em relação a um plano tangente à curva. Para uma curva paramétrica, a distância ao longo da curva é dada por tL , onde t é um parâmetro adimensional entre 0 e 1, e L é o comprimento total da curva.

O atributo *IfcLinearPlacement.RelativePlacement* posiciona o ponto P em relação à curva de alinhamento, apontando para uma instância de *IfcAxis2PlacementLinear*. Essa entidade define o ponto em relação à curva de alinhamento por meio do atributo *Location*, e também as direções locais z e x por meio dos atributos *Axis* e *RefDirection*, respectivamente. A entidade *IfcPointDistanceExpression* contém informações sobre as distâncias ao longo da curva, deslocamentos lateral e vertical, e a curva à qual o ponto está posicionado, utilizando os atributos *DistanceAlong*, *OffsetLateral*, *OffsetVertical* e *BasisCurve*, respectivamente.

Diferentemente do posicionamento ortogonal, a entidade *IfcLinearPlacement* possui um atributo opcional *CartesianPosition*, que define as coordenadas do ponto P e as direções z e x , apontando para uma instância de *IfcAxis2Placement3D*. Os dados desse atributo tornam-se importantes, principalmente em cenários de troca de dados IFC, pois ajudam a evitar erros e a perda de precisão nos valores.

Figura 7 – Exemplo do posicionamento ortogonal de uma curva de alinhamento e o posicionamento linear de um ponto P no IFC.



Fonte: o autor.

2.6 Geometria

As representações geométricas no IFC podem ser modeladas de forma explícita ou implícita (Borrmann; Berkhan, 2018). A modelagem geométrica explícita consiste na geração de um sólido a partir de pontos, arestas e faces (Boundary Representation – Brep) ou por meio de superfícies trianguladas ou poligonais. A modelagem geométrica implícita é baseada na definição de sólidos por parâmetros, nos quais todas as informações são descritas implicitamente, como os parâmetros das seções transversais utilizadas, suas posições, a direção de extrusão, a diretriz, entre outros. Assim, a escolha da representação geométrica deve considerar o tipo de aplicação, garantindo maior eficiência na troca de dados IFC (Wagner *et al.*, 2020).

Para a análise estrutural de pontes, fica evidente que os elementos paramétricos oferecem vantagens significativas na troca de dados IFC e, por isso, deveriam ser modelados de forma implícita, utilizando extrusões e varreduras (Borrmann *et al.*, 2019). Dessa forma, quando um sólido é modelado implicitamente por meio da atribuição de parâmetros incorporados à estrutura de dados IFC, sua exportação deve preservar o histórico de modelagem (McGlenn *et al.*, 2019).

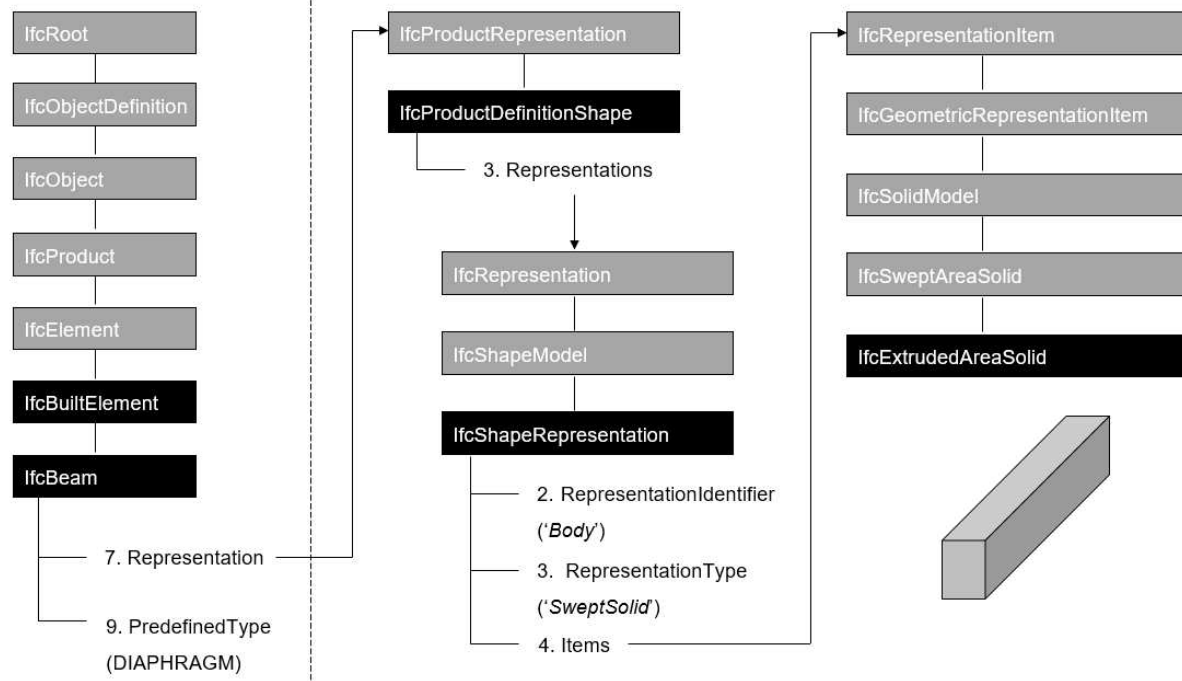
Mostra-se na Figura 8 a estrutura de dados IFC instanciáveis para a definição da representação geométrica de uma viga transversina com seção transversal extrudada em uma determinada direção. O atributo *Representation* aponta para a entidade abstrata *IfcProductRepresentation*, que pode definir a representação da forma do produto por meio da entidade *IfcProductDefinitionShape*. Assim, o atributo *Representations* aponta para uma lista de instâncias de subtipos de *IfcRepresentation*, permitindo a representação da forma do produto através da entidade abstrata *IfcShapeModel*. A forma do produto é definida pela entidade instanciável *IfcShapeRepresentation*, cujo atributo *Items* contém uma lista de itens de representação. Cada item dessa lista pode ser uma instância de um subtipo da entidade abstrata *IfcGeometricRepresentationItem*. No IFC, a maioria das representações geométricas de sólidos 3D pertence a subtipos da entidade abstrata *IfcSolidModel* e, no caso de sólidos gerados por varreduras, a subtipos de *IfcSweptAreaSolid*. No exemplo da Figura 8, a instância *IfcExtrudedAreaSolid* é utilizada para representar um sólido gerado por extrusão de uma seção retangular. Além disso, os atributos *RepresentationIdentifier* e *RepresentationType* de *IfcShapeRepresentation* desempenham um papel essencial na identificação da representação da forma ('Body') e no tipo de representação geométrica utilizada ('SweptSolid').

As entidades IFC que representam sólidos geométricos implícitos incluem os subtipos de *IfcSweptAreaSolid*, *IfcCsgSolid*, *IfcCsgPrimitive3D* e *IfcSectionedSolid*, além das entidades instanciáveis *IfcSectionedSpine* e *IfcSweptDiskSolid*. As entidades IFC que representam sólidos geométricos explícitos são os subtipos de *IfcManifoldSolidBrep* e *IfcTessellatedItem*. Nesta seção, são detalhadas as entidades *IfcExtrudedAreaSolid* (subtipo de *IfcSweptAreaSolid*), *IfcSectionedSolidHorizontal* (subtipo de *IfcSectionedSolid*) e *IfcFacetedBrep* (subtipo de *IfcManifoldSolidBrep*).

2.6.1. Extrusão (*IfcExtrudedAreaSolid*)

Sólidos prismáticos compõem grande parte dos elementos estruturais e não estruturais de um modelo. Em edifícios, vigas, pilares, lajes, paredes, entre outros elementos, são modeladas por meio de extrusão de um perfil em uma determinada direção. No caso de elementos de ponte, a extrusão do perfil é viável quando não há variação de seção transversal ao longo da direção de extrusão. No entanto, em pontes de eixo reto, longarinas, transversinas e travessas costumam apresentar variações ao longo do comprimento, o que inviabiliza o uso exclusivo da extrusão para sua modelagem.

Figura 8 – Exemplo da representação geométrica de uma transversina no IFC.



Fonte: o autor.

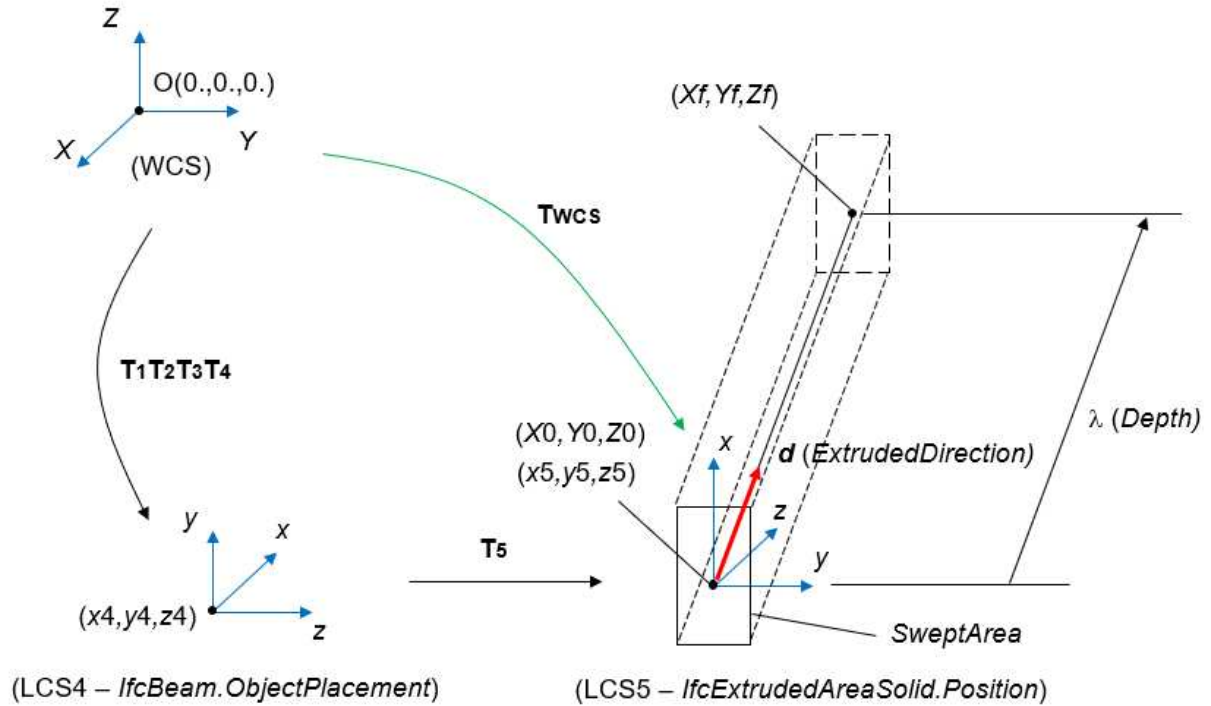
A geração de um elemento por extrusão de um perfil depende da definição do perfil e seus parâmetros (*SweptArea*), da direção de extrusão (*ExtrudedDirection*) e do comprimento da extrusão nessa direção (*Depth*) (IfcExtrudedAreaSolid – IFC Documentation, 2023). A posição (*Position*) do perfil em relação ao LCS é um atributo opcional. Caso seja definida, uma matriz de transformação adicional (T_5) é incorporada à multiplicação de matrizes apresentada na Equação (2), conforme ilustrado na Figura 9.

O atributo *SweptArea* aponta para uma instância de *IfcProfileDef*, supertipo de todas as definições de perfis no IFC. De modo geral, os elementos lineares de pontes possuem seções paramétricas (subtipos da entidade abstrata *IfcParameterizedProfileDef*), arbitrárias (*IfcArbitraryClosedProfileDef*) ou arbitrárias com partes vazadas (*IfcArbitraryProfileDef WithVoids*). As seções parametrizadas são posicionadas de forma que seu contorno seja definido no plano *xy* local, com a origem localizada no centro da caixa delimitadora da seção. As seções arbitrárias podem ser posicionadas em qualquer ponto do plano *xy* da seção.

As seções parametrizadas apresentam a vantagem de exigir menor esforço computacional para interpretação em comparação com as seções arbitrárias. Com a identificação da seção paramétrica e a interpretação de seus parâmetros, é possível calcular facilmente diversas propriedades geométricas, como área, centroide, momentos de inércia,

produto de inércia, entre outras. Para seções arbitrárias, essas propriedades também podem ser obtidas de forma eficiente por meio do Teorema de Green; no entanto, a interpretação semântica da seção é significativamente mais complexa.

Figura 9 – Parâmetros de um sólido gerado por extrusão de um perfil paramétrico utilizando *IfcExtrudedAreaSolid*.



Fonte: o autor.

Para a análise estrutural, é fundamental determinar os pontos inicial e final de um elemento estrutural linear. Utilizando a matriz de transformação para o centro da caixa delimitadora da seção, o comprimento de extrusão (atributo *Depth*) e o vetor da direção de extrusão (atributo *ExtrudedDirection*), é possível calcular as coordenadas do ponto final do elemento extrudado (X_f, Y_f, Z_f) no WCS por meio da Equação (3):

$$\begin{bmatrix} X_f & Y_f & Z_f & 1 \end{bmatrix}^T = \lambda \cdot \mathbf{T}_{\text{WCS}} \mathbf{d}^* \quad (3)$$

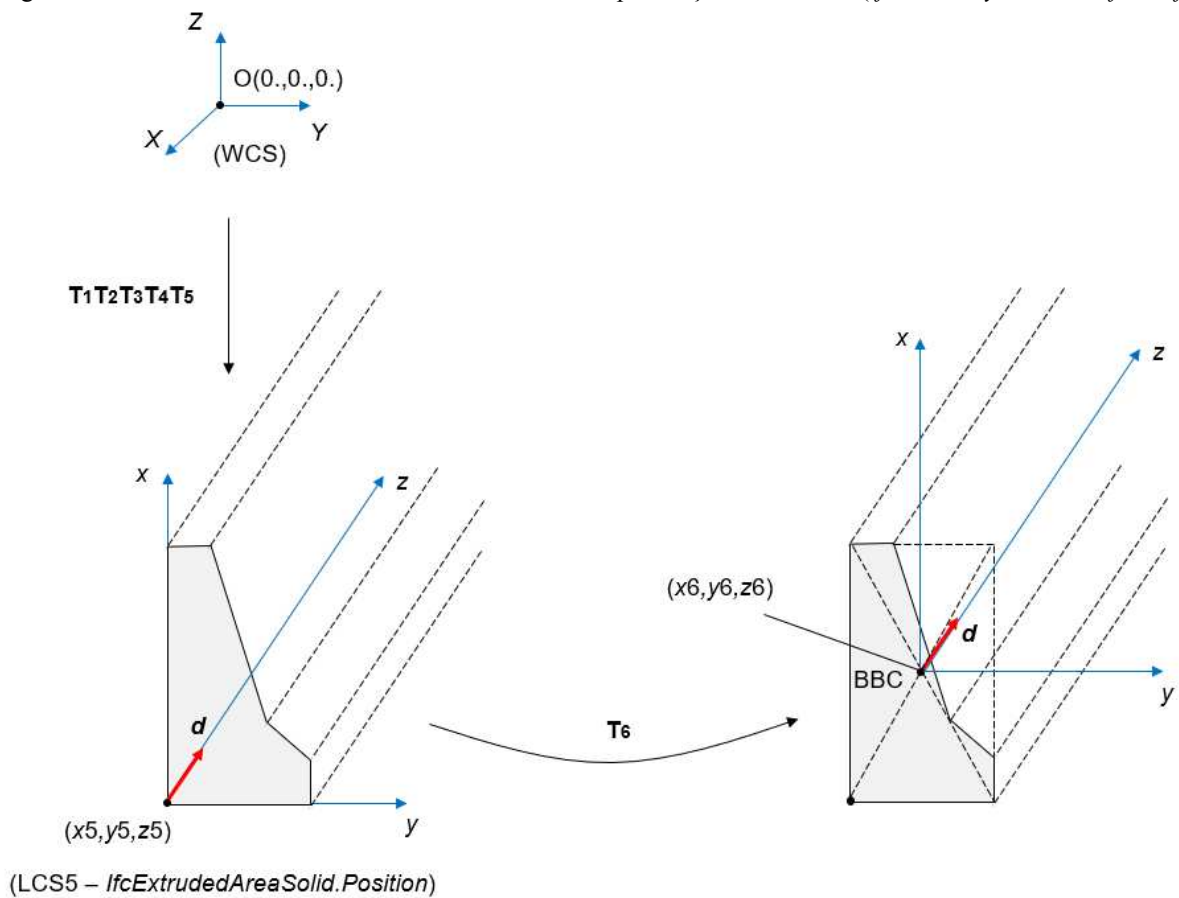
onde λ ($\lambda > 0$) é o comprimento de extrusão, \mathbf{T}_{WCS} é a matriz de transformação para o centro da caixa delimitadora da seção e \mathbf{d}^* é um vetor dado pela Equação (4):

$$\mathbf{d}^* = \begin{bmatrix} a & b & c & 1/\lambda \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

onde a , b e c são os cossenos diretores da extrusão, ou seja, são as coordenadas do vetor \mathbf{d} , conforme ilustrado na Figura 9.

Quando a seção transversal é arbitrária, o LCS5 pode não estar situado no centro da caixa delimitadora. Nesse caso, os pontos da seção são definidos no LCS5 com base na interpretação do atributo *OuterCurve* da entidade *IfcArbitraryClosedProfileDef*. Assim, considerando o ponto do centro da caixa delimitadora (*Bounding Box Center* - BCC), com coordenadas x_6 , y_6 e z_6 (Figura 10), determina-se a matriz \mathbf{T}_{WCS} por meio da Equação (5).

Figura 10 – Coordenadas do centro da caixa delimitadora para seções arbitrárias (*IfcArbitraryClosedProfileDef*).



Fonte: o autor.

$$\mathbf{T}_{WCS} = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \mathbf{T}_4 \mathbf{T}_5 \begin{bmatrix} 1. & 0. & 0. & x_6 \\ 0. & 1. & 0. & y_6 \\ 0. & 0. & 1. & z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Com o valor da matriz de transformação T_{wcs} para seções arbitrárias fornecido pela Equação (5), aplica-se a Equação (3) para determinar as coordenadas do ponto final da seção extrudada.

Elementos prismáticos com perfil e área lateral retangulares podem ser representados por meio de extrusão em uma das três direções, porém com baixo nível semântico. O exemplo mais comum é a viga, onde o perfil escolhido para extrusão deve ser sempre ortogonal à direção longitudinal. Caso contrário, a viga terá sua representação geométrica concluída, mas com os parâmetros da seção transversal incorretos. Para as lajes, duas opções devem ser seguidas: *i*) para lajes com espessura constante, comuns em edifícios, a extrusão deve ocorrer sempre na direção vertical, sendo o perfil extrudado a área total de piso da laje; *ii*) para lajes com espessuras variáveis, comuns em pontes, a extrusão do perfil deve ocorrer na direção do fluxo de tráfego. Padronizar a maneira de representar a geometria de um sólido com base na semântica do elemento é fundamental para melhorar o fluxo de dados entre as aplicações (Wu; Zhang, 2019).

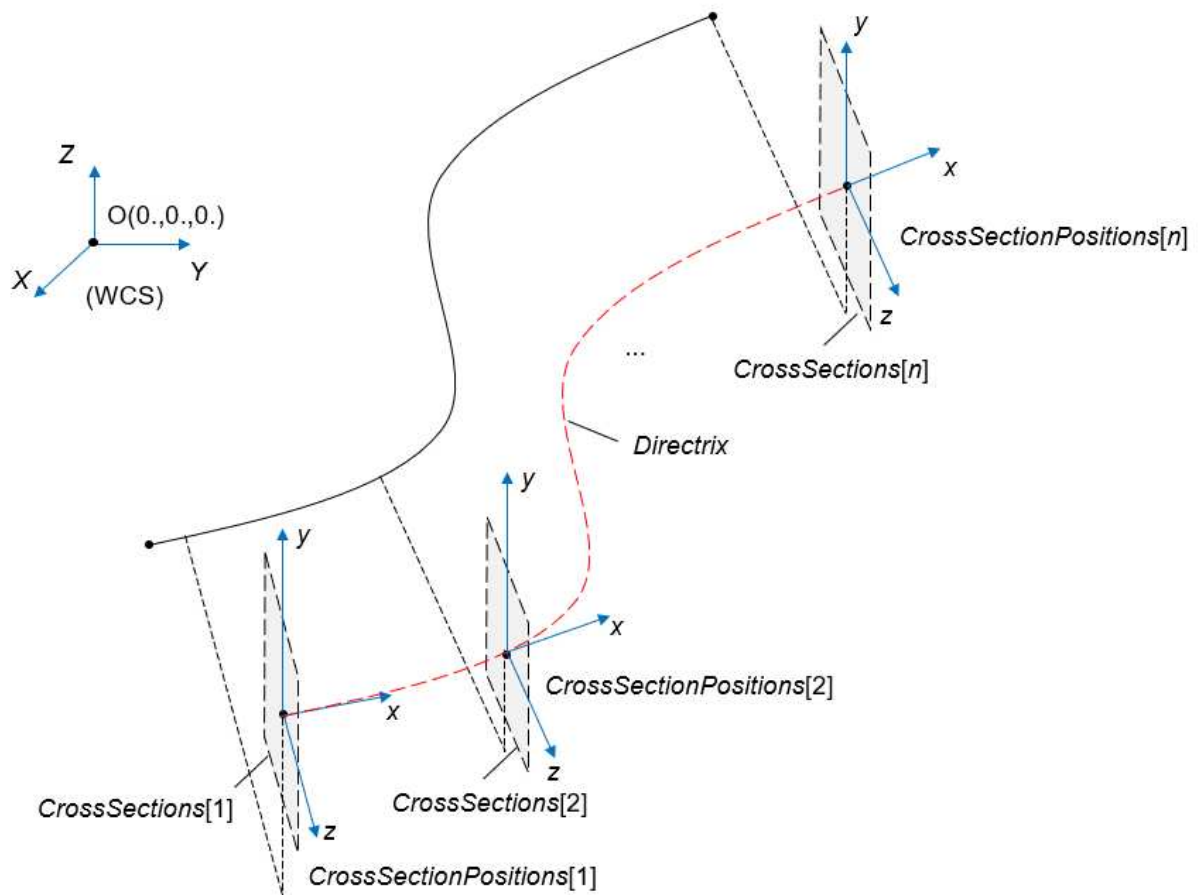
2.6.2. Seções transversais posicionadas linearmente ao longo da diretriz de uma curva (*IfcSectionedSolidHorizontal*)

Uma vez que grande parte dos elementos de pontes apresenta variações de seções transversais ao longo de uma diretriz, a modelagem implícita desses elementos se torna mais complexa, o que, por consequência, dificulta a exportação dos dados IFC. Geralmente, as plataformas BIM e softwares de análise exportam dados IFC de elementos complexos utilizando representação de contorno (Brep) ou superfícies trianguladas / poligonais, o que não é adequado para diversos domínios, devido à falta de semântica, à perda de precisão e ao grande volume de dados necessários para representá-los (Borrmann *et al.*, 2019).

A entidade *IfcSectionedSolidHorizontal* define um sólido a partir de uma modelagem implícita, utilizando posicionamento linear e seções variáveis ao longo de uma diretriz (*IfcSectionedSolidHorizontal* – IFC Documentation, 2023), conforme ilustrado na Figura 11. O atributo *Directrix* define a curva usada como diretriz para a varredura das seções. O atributo *CrossSections* define uma lista de seções transversais, que podem ser paramétricas ou não, as quais serão posicionadas em pontos específicos ao longo da curva definida no atributo *Directrix*. As posições das seções transversais são especificadas pelo atributo *CrossSectionPositions*, que aponta para uma lista de instâncias de *IfcAxis2PlacementLinear*.

Assim, a i -ésima seção transversal definida em *CrossSections* corresponde à i -ésima posição definida em *CrossSectionPositions*.

Figura 11 – Atributos de *IfcSectionedSolidHorizontal*.



Fonte: o autor.

A grande vantagem de *IfcSectionedSolidHorizontal* é a parametrização de um sólido complexo, utilizando posicionamentos lineares e seções transversais variáveis ao longo da diretriz do elemento, característica comum em elementos de pontes. No entanto, como ocorre com outros sólidos complexos modelados implicitamente, a desvantagem está no esforço computacional necessário para implementar a exportação de dados de elementos paramétricos utilizando essa entidade IFC. Utilizar a representação geométrica da curva de alinhamento como base para as posições das seções transversais é uma boa opção, pois essa curva já possui sua semântica definida através de *IfcAlignment*.

2.6.3. Representação de contorno (*Boundary representation - Brep*)

Uma das opções de modelagem explícita no IFC é a utilização da representação de contorno (Brep). Essa técnica define um sólido por meio de um conjunto de vértices que

formam as arestas, um conjunto de arestas que formam as faces e um conjunto de faces que compõem o sólido. A principal vantagem dos sólidos Brep é a possibilidade de implementação de um algoritmo único para sua interpretação. No entanto, seu nível semântico é considerado baixo para fins de análise estrutural. Assim, os sólidos Brep são mais utilizados para fins de coordenação, onde as informações de posicionamento e seções transversais não são preponderantes.

Para sólidos Brep, o atributo *RepresentationType* da entidade *IfcShapeRepresentation* identifica a representação de forma como ‘Brep’. Alguns sólidos complexos podem ser modelados como representações mistas, combinando, por exemplo, sólidos extrudados e sólidos Brep, identificados pelo tipo ‘SolidModel’. Essa abordagem reduz significativamente o tamanho do arquivo .ifc, além de aumentar o nível semântico da geometria como um todo. Elementos estruturais de pontes, como longarinas, transversinas e travessas, podem se beneficiar desse modelo misto, pois possuem seções transversais extrudadas e variações de seção próximas aos apoios ou nas extremidades.

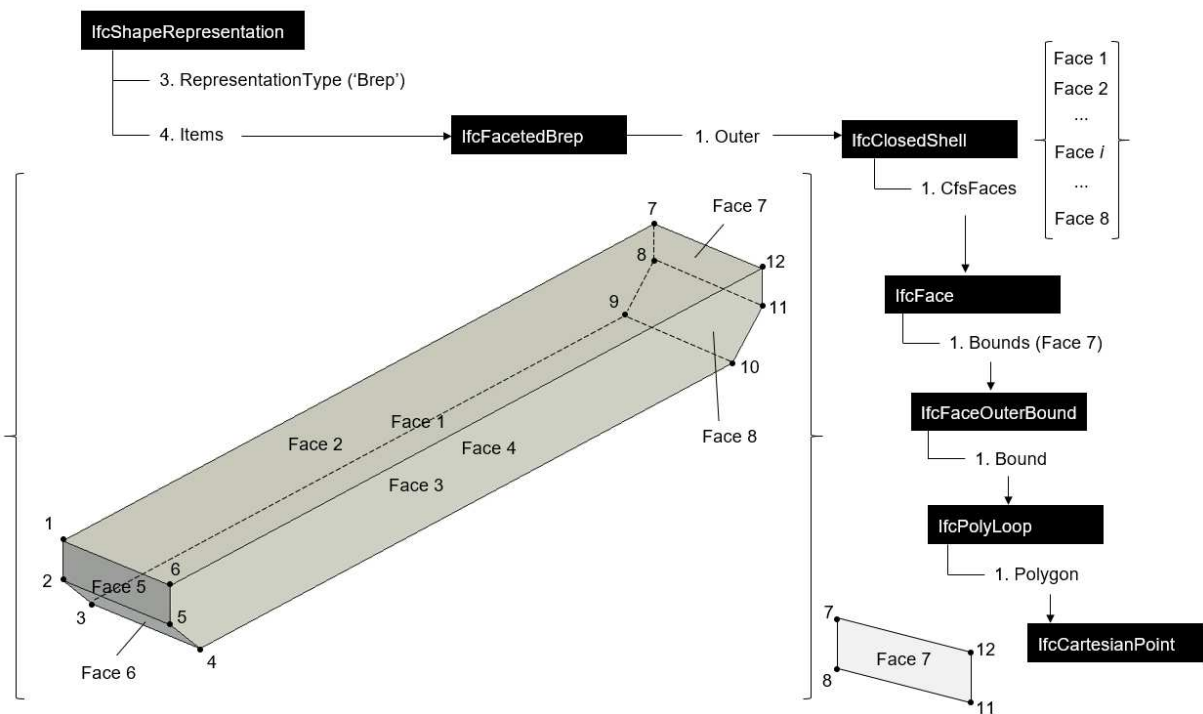
A entidade abstrata *IfcManifoldSolidBrep* é o supertipo de *IfcFacetedBrep*, no qual todas as faces e arestas são planas e possuem contornos poligonais (*IfcFacetedBrep* – IFC4.3.2 Documentation, 2023), conforme mostrado na Figura 12. A entidade *IfcFacetedBrep* herda de *IfcManifoldSolidBrep* o atributo *Outer*, responsável por definir o contorno externo do sólido por meio de *IfcClosedShell*. O atributo *CfsFaces* define o conjunto de faces do sólido, apontando para instâncias de *IfcFace*. Os contornos de cada face são definidos pelo atributo *Bounds*, que aponta para *IfcFaceBound*. De maneira análoga, as arestas de cada face são definidas pelo atributo *Bound*, que aponta para *IfcLoop*. A representação das arestas retas é mais eficiente quando se utilizam instâncias de *IfcPolyLoop*, onde o atributo *Polygon* define uma lista de instâncias de *IfcCartesianPoint*, cada uma representando um vértice da face.

Um sólido Brep é posicionado em relação ao LCS de algum subtipo de *IfcElement*. Assim, pode-se determinar as coordenadas dos pontos no WCS (**P**) por meio da Equação (6):

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{WCS}} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde n é o número de pontos do sólido. A determinação desses pontos no WCS facilita a parametrização de sólidos Brep, como o comprimento máximo do sólido, coordenadas dos pontos em um determinado plano que secciona o sólido e, em casos específicos, permite-se a identificação e as dimensões de seções transversais.

Figura 12 – Um exemplo de dados IFC para representar sólidos Brep.



Fonte: o autor.

2.7 Propriedades dos materiais

A fim de estabelecer uma estrutura padronizada e consistente para representar informações sobre as propriedades predefinidas de objetos, a bSI definiu os *Property Sets* (Psets). Essa padronização evita ambiguidades, facilita a implementação da exportação e importação de dados entre diferentes softwares e melhora a capacidade de identificação e extração de informações específicas dos elementos (Borrmann; Berkhan, 2018). Por exemplo, uma propriedade comum em todos os materiais é a sua densidade, que está contida no conjunto de propriedades *Pset_MaterialCommon*, denominada *MassDensity*.

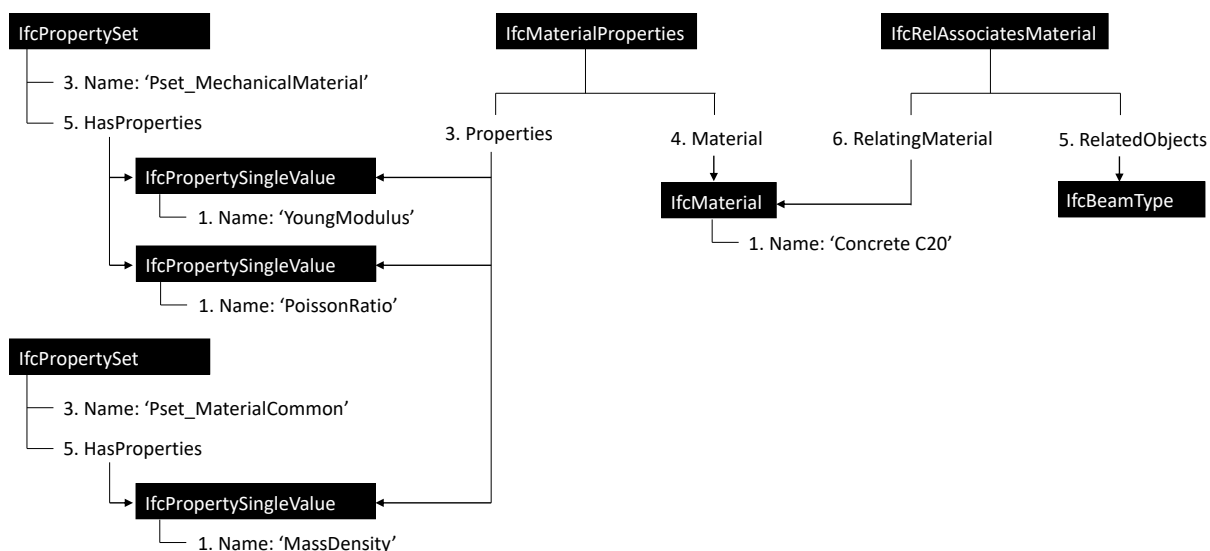
Para materiais isotrópicos, as propriedades mecânicas necessárias para a análise estrutural de uma estrutura envolvem, principalmente, o módulo de elasticidade longitudinal, o coeficiente de Poisson e o coeficiente de dilatação térmica. A bSI padronizou essas propriedades sob as denominações *YoungModulus*, *PoissonRatio* e *ThermalExpansion-*

Coefficient, respectivamente. Essas propriedades estão agrupadas no conjunto de propriedades *Pset_MaterialMechanical*.

A entidade *IfcMaterialProperties* está associada a um conjunto de propriedades definidas pelo usuário e relacionadas a um material. As propriedades dos materiais são definidas por um subtipo de *IfcMaterialDefinition*, cujo nome é identificado por *IfcMaterial*. Uma vez definidas, essas propriedades podem ser diretamente associadas aos objetos por meio da entidade *IfcRelAssociatesMaterial*.

Mostra-se na Figura 13 um exemplo da forma mais comum de associação de um material a um objeto tipificado *IfcBeamType*. O material, denominado 'Concrete C20', possui as seguintes propriedades: módulo de elasticidade longitudinal (*YoungModulus*), coeficiente de Poisson (*PoissonRatio*) e a densidade (*MassDensity*). Os conjuntos de propriedades são representados por instâncias de *IfcPropertySet*: uma para *Pset_MaterialMechanical* (*YoungModulus* e *PoissonRatio*) e outra para *Pset_MaterialCommon* (*MassDensity*). *IfcMaterialProperties* vincula essas três propriedades ao material definido pelo usuário.

Figura 13 – Associação de material (*IfcMaterial*) com um objeto tipificado *IfcBeamType*.



Fonte: o autor.

2.8 Conclusões

A modelagem de pontes utilizando o padrão neutro IFC exige uma abordagem criteriosa para garantir a fidelidade semântica dos elementos e a troca de dados sem perdas. Considerando as entidades IFC apresentadas neste capítulo, pode-se concluir:

- As partes e os elementos de pontes estão semanticamente definidos no IFC 4.3. Assim, a interoperabilidade depende da identificação precisa desses elementos, sob pena de o modelo possuir baixo nível semântico, ou seja, com várias informações perdidas durante a troca de dados;
- O posicionamento dos elementos de pontes pode ser definido por meio do alinhamento da ponte ou do posicionamento ortogonal utilizado em edifícios de múltiplos pavimentos. O posicionamento linear vinculado ao alinhamento apresenta vantagens significativas para pontes curvas, como a atualização automática do posicionamento dos elementos da ponte ao transladar um único elemento. Para pontes de eixo reto, os dois tipos de posicionamento podem ser utilizados sem grandes prejuízos;
- Os diversos tipos de representações geométricas no IFC são justificados pela grande abrangência de aplicações, como visualização, compatibilização entre projetos, projeto e análise estrutural, entre outros. A modelagem de sólidos utilizando varreduras e extrusões é mais adequada para fins de projeto e análise estrutural, devido à facilidade de interpretação de dados paramétricos. Os sólidos representados por modelagem explícita têm a desvantagem de exportar um grande volume de dados; porém, são mais fáceis de serem interpretados para fins de visualização;
- A definição dos nomes das propriedades utilizando conjuntos de propriedades (*property sets*) evita ambiguidades na troca de dados entre softwares. A entidade *IfcPropertySingleValue* é a indicada para propriedades que possuem um único valor, por exemplo, a densidade do material definida pela propriedade *MassDensity* ou a resistência característica à compressão do concreto definida por *CompressiveStrength*.

Referências bibliográficas

ANTUNES, M.L., CÉSAR Jr., K., RIBEIRO, J.C., OLIVEIRA, D., CARVALHO, J.M. Analysis of IFC interoperability data schema for Project representation, **Automation in Construction** 166 (2024), pp. 105650. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105650>

BORRMANN, A., BERKHAN, V. Principles of Geometric Modeling, in: **Building Information Modeling** (2018); Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 27–41. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>

BORRMANN, A., MUHIC, S., HYVÄRINEN, J., CHIPMAN, T., JAUD, S., CASTAING, C., DUMOULIN, C., LIEBICH, T., MOL, L. The IFC-BRIDGE Project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models, in: **Proceedings of**

the European Conference on Computing in Construction, European Council on Computing in Construction (2019), Chania, pp. 377–386.
<https://doi.org/10.35490/EC3.2019.193>

buildingSMART International. **IfcAlignment**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcAlignment.htm>.
Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcBridge**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcBridge.htm>.
Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcExtrudedAreaSolid**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcExtrudedAreaSolid.htm>. Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcFacetedBrep**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcFacetedBrep.htm>. Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcMaterialProperties**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcMaterialProperties.htm>. Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcProject**. Disponível em: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/lexical/IfcProject.htm. Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcSectionedSolidHorizontal**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcSectionedSolidHorizontal.htm>. Acesso em 21 de janeiro de 2025

buildingSMART International. **IfcSite**. Disponível em:
<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcSite.htm>.
Acesso em 21 de janeiro de 2025

COSTIN, A., ADIBFAR, A., HU, H., CHEN, S. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations, **Automation in Construction** **94** (2018), pp. 257-281.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>

HU, H., CHEN, S., SRIKONDA, R., ALI, N. Development of alignment-based parametric data exchange schema for bridge geometry, **Transportation Research Record** **2460** (2014), pp. 22–30. <https://doi.org/10.3141/2460-03>

JAUD, Š., ESSER, S., BORRMANN, A., WILKSTRÖM, L., MUHIC, S., MIRTSCHIN, J. A critical analysis of linear placement in IFC models, in: **European Conference on Product and Process Modeling** (2021), Moscow, pp. 1–8.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003191476>

JI, Y., BEETZ, J., BONSMMA, P., NISBET, N., KATZ, C., BORRMANN, A. Integration of Parametric Geometry into IFC-Bridge, in: **Proceedings of the 23rd European Conference Forum Bauinformatik** (2011), Cork, pp. 1–8.

JI, Y., BORRMANN, A., OBERGRIEBER, M. Exchange of parametric bridge models using a neutral data format, **Journal of Computing in Civil Engineering** **27.6** (2012), pp. 593–606. [https://doi.org/10.1061/41182\(416\)65](https://doi.org/10.1061/41182(416)65)

LAI, H., DENG, X. Interoperability analysis of ifc-based data exchange between heterogeneous BIM software, **Journal of Civil Engineering and Management** **24** (2018), pp. 537–555. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6132>

McGLINN, K. WAGNER, A., PAUWELS, P., BONSMMA, P., KELLY, P., O’SULLIVAN, D. Interlinking geospatial and building geometry with existing and developing standards on the web, **Automation in Construction** **109** (2019), pp. 235-250.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.026>

REN, R., ZHANG, J., CHEN, Y., DIB, H. A BIM information processing framework to facilitate enriched BIM applications, in: **Proceedings ASCE Construction Research Congress, ASCE** (2020), pp. 1135-1144. <https://doi.org/10.1061/9780784483961.119>

STEEL, J., DROGEMULLER, R. TOTH, B. Model interoperability in building information modeling, **Software and Systems Modeling** **11** (2010), pp. 99-109.

<https://doi.org/10.1007/s10270-010-0178-4>

WAGNER, A., BONDUEL, M., PAUWELS, P., RÜPPEL, U. Representing construction-related geometry in a semantic web context: A review of approaches, **Automation in Construction** **115** (2020), pp. 103130. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103130>

WU, J., ZHANG, J. New automated BIM object classification method to support BIM interoperability, **Journal of Computing in Civil Engineering** **33** (2019), pp. 1-17.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858)

YU, Y., KIM, S., JEON, H., KOO, B. A Systematic Review of the Trends and Advances in IFC Schema Extensions for BIM Interoperability, **Applied Sciences** **13** (2023) 12560.

<https://doi.org/10.3390/app132312560>

3. RECOMENDAÇÕES SOBRE A EXPORTAÇÃO DE DADOS IFC DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE PONTES DE CONCRETO EM VIGAS PARA FINS DE ANÁLISE ESTRUTURAL VIA MEF

3.1 Informações gerais

Este capítulo resulta dos estudos preliminares desta tese, tendo sido publicado em formato de artigo no XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas 2023 (XIV CBPE 2023) em maio de 2023. O artigo aborda a modelagem estrutural bidimensional de pontes em vigas, a estrutura de dados IFC para pontes em geral, os modelos de vista de exportação e as entidades IFC mais eficientes para representar a geometria e as propriedades dos materiais de alguns elementos de pontes, visando a análise estrutural via MEF. As recomendações foram elaboradas com base nos primeiros estudos das entidades IFC realizados em 2022, período em que ainda não havia uma documentação oficial da estrutura de dados IFC para obras de infraestrutura.

3.2 Artigo



Recomendações sobre a exportação de dados IFC de elementos estruturais de pontes de concreto em vigas para fins de análise estrutural via MEF

Guilherme Palla Teixeira¹, José Carlos Lopes Ribeiro², Kléos Magalhães Lenz César Júnior³, Diôgo Silva de Oliveira⁴, José Maria Franco de Carvalho⁵

¹ Universidade Federal de Viçosa / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / guilherme.palla@ufv.br

² Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil / jcarlos.ribeiro@ufv.br

³ Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil / kleos@ufv.br

⁴ Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil / diogooliveira@ufv.br

⁵ Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Civil / josemaria.carvalho@ufv.br

Resumo

O uso da metodologia BIM (*Building Information Modeling*) em projetos de pontes ainda necessita de avanços significativos no que tange a parametrização dos objetos e a interoperabilidade. A troca de dados IFC (*Industry Foundation Classes*) de elementos estruturais de pontes deve ser realizada de maneira eficiente, levando em conta os dados exportados por meio de MVDs (*Model View Definition*) e a utilidade dos dados importados. Logo, este artigo propõe recomendações sobre a exportação de dados geométricos e propriedades de elementos estruturais de pontes de concreto em vigas, visando uma melhor eficiência na implementação de tradutores de dados IFC por parte dos desenvolvedores de softwares de análise estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF). Em função da complexidade da geometria de longarinas e lajes de pontes, a parametrização de tais elementos devem ser feitas preferencialmente considerando extrusão / varredura e a possibilidade de seções transversais variáveis ao longo do alinhamento da ponte. Assim, a exportação de dados IFC relativos à elementos estruturais de pontes utilizando faces trianguladas ou poligonais não é eficiente, principalmente devido à alta densidade de informações para defini-los. Além disso, os elementos estruturais e suas respectivas propriedades mecânicas devem estar semanticamente definidos na troca de dados, facilitando a tradução para o modelo analítico da ponte.

Palavras-chave

IFCBridge; representação geométrica IFC; análise estrutural de pontes; MVD; BIM; MEF.

1. Introdução

A implementação da metodologia BIM (*Building Information Modeling*) no contexto de projetos de infraestrutura, como pontes e viadutos, vem se desenvolvendo ao longo dos anos de uma maneira mais lenta com relação ao BIM nos projetos de edificações (Pinto, 2016). Um dos principais desafios a ser melhorado é a interoperabilidade, ou seja, o processo de troca de dados entre softwares utilizando arquivos IFC (*Industry Foundation Classes*), de modo que não tenha

perdas de informações (Ren *et al.*, 2018). Assim, em função da alta demanda internacional, a comissão interna da *buildingSMART International* (bSI) propôs uma extensão da versão atual da estrutura de dados do IFC, visando a definição de objetos para melhorar a troca de informações relacionados aos projetos de pontes (IFCBridge), ferrovias (IFCRail), estradas (IFCRoad) e túneis (IFCTunnel). No caso de pontes, o projeto IFCBridge propõe um conjunto de entidades para a representação de objetos que definem semanticamente pontes de diversos tipos de sistema estrutural.

Quanto à representação geométrica IFC dos objetos que definem os elementos de pontes, as plataformas de modelagem BIM podem usar diversas formas para representá-las. Porém, qualquer elemento físico modelado deve ser definido usando a forma mais eficiente para descrever exatamente o resultado de sua forma (FHWA-HIF-16-011, 2016). A maioria dos elementos de pontes (lajes, longarinas, transversinas, travessas, pilares, etc.) pode ser representada usando varredura de seções transversais ao longo de uma diretriz (subtipos de *IfcSweptAreaSolid*) e representações de contorno (*Boundary Representation* – BRep, subtipos de *IfcManifoldSolidBrep*). A geometria em mosaico (subtipos de *IfcTessellatedItem*) com conjunto de faces trianguladas não é apropriada para estes tipos de objetos, devido à perda de precisão e aumento considerável no tamanho do arquivo IFC (Borrmann *et al.*, 2019; Markic, 2017). Logo, com a finalidade de interpretar dados com eficiência, para posterior análise estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF), a representação geométrica de um determinado objeto deve ser definida levando em conta a sua respectiva semântica.

O maior número de opções para a representação geométrica dos elementos estruturais das pontes, em relação aos elementos estruturais de edifícios, dificulta o processo de implementação da tradução para o respectivo modelo analítico. A exportação de dados para fins de análise estrutural via MEF de pontes de concreto em vigas pode ser alcançada através de implementação da tradução de dados geométricos e propriedades dos materiais de maneira adequada e eficiente, levando em conta a semântica correta dos objetos.

Uma vez que a versão corrente do IFC (IFC4) não interpreta informações de análise estrutural via MEF, as informações geométricas são as mais importantes a serem entregues aos softwares de modelagem e análise estrutural (Park *et al.*, 2020). Sendo assim, este artigo propõe recomendações da exportação de dados IFC relativo à geometria de elementos estruturais de pontes de concreto em vigas e suas propriedades mecânicas, de forma a melhorar a eficiência na implementação de tradutores de dados IFC para fins de análise estrutural via MEF.

2. Revisão de literatura

2.1 Modelagem e análise estrutural via MEF de pontes de concreto em vigas

A modelagem estrutural em elementos finitos de uma ponte é uma tarefa técnica que necessita de uma boa caracterização do sistema físico a ser analisado, além do conhecimento das potencialidades e limitações do MEF. Para cada novo problema abordado, é necessário um novo experimento de modelagem, de forma que o analista de estruturas consiga desenvolver mais sensibilidade e experiência para problemas cada vez mais complexos (Soriano, 2003). A qualidade dos resultados da análise estrutural depende de um estudo prévio do tipo de modelo utilizado, realizando um balanço de suas vantagens e desvantagens.

Para pontes de concreto em vigas, o modelo estrutural denominado bidimensional (Figura 1) é o mais utilizado para posterior análise estrutural via MEF, por englobar a grande maioria dos elementos estruturais, além de retornar os valores de esforços solicitantes de uso direto do

dimensionamento (El Debs, 2021). O modelo bidimensional é composto de elementos finitos unidimensionais, representando as longarinas, transversinas, travessas, pilares e demais elementos lineares, e elementos bidimensionais de superfície, representando as lajes. Para elementos unidimensionais, é comum trabalhar com variações de seções transversais ao longo do comprimento da ponte, por exemplo, longarinas com aumento de largura da seção nas regiões de apoios. Nas lajes, a variação de espessura na direção da largura das mesmas também é recorrente. Tais casos aumentam consideravelmente o tempo de processamento da análise estrutural de pontes de concreto em vigas.

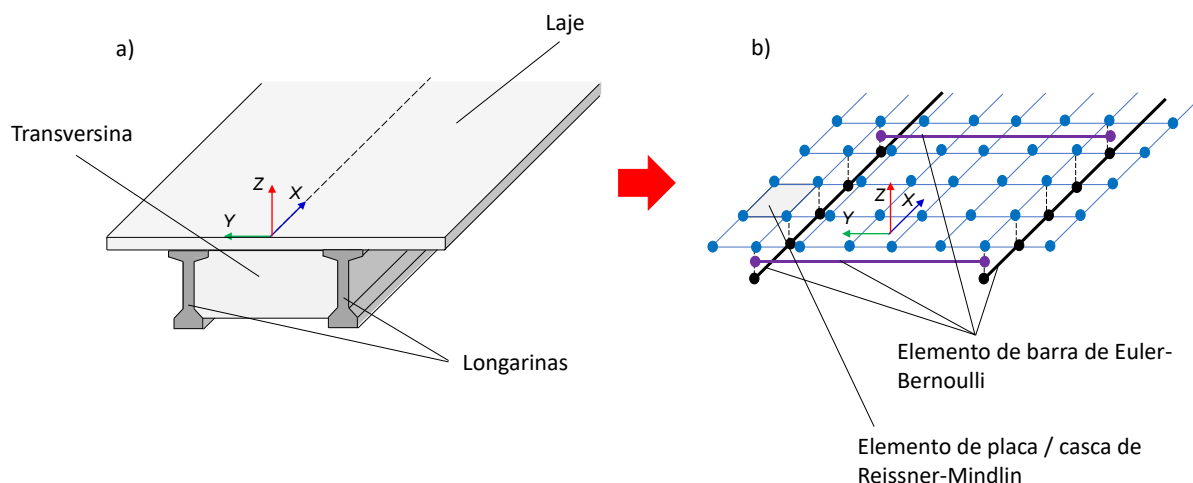


Figura 1 – Modelo de ponte em vigas com eixo reto: a) Modelo físico; b) Modelo bidimensional em elementos finitos.

2.2 Modelagem da informação de pontes (proposta IFC4.3.1.0)

2.2.1 Projeto IFCBridge: Entidades IFC para pontes

Um projeto de extensão da estrutura de dados IFC, para além de modelagem de edificações, foi elaborado para suprir o aumento da demanda internacional para projetos de infraestrutura, como pontes, ferrovias, estradas e túneis.

Uma parte da estrutura proposta pelo projeto de extensão IFCBridge é mostrada na Figura 2. A entidade *IfcBridge*, um dos subtipos de *IfcFacility*, possui o atributo *PredefinedType* do tipo *IfcBridgeTypeEnum*, que lista os tipos de estruturas de pontes (pontes em viga, estaiadas, em arco, etc.). A entidade *IfcBridgePart* (subtipo de *IfcFacilityPart*) define as partes da ponte por meio do tipo *IfcBridgePartTypeEnum* (fundação, subestrutura, superestrutura, etc.). Para definir os elementos estruturais de edificações e obras de infraestrutura, utiliza-se *IfcBuiltElement* em substituição a entidade *IfcBuildingElement* no IFC4. Mostra-se na Figura 2 os tipos de vigas (*IfcBeam*), destacadas de vermelho, que foram incluídas na proposta IFC4.3.1.0, englobando o projeto de pontes.

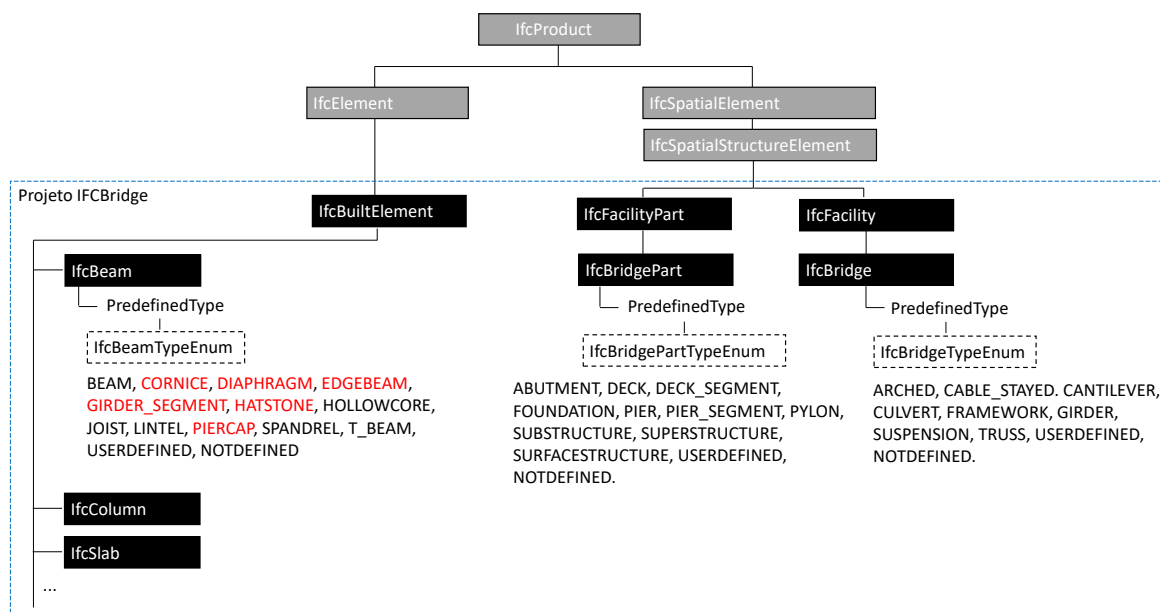


Figura 2 – Parte da extensão da estrutura de dados do projeto IFCBridge.

2.2.2 Representação geométrica no IFC

O modelo de dados IFC faz uma divisão estrita entre a descrição semântica e a sua representação geométrica (Borrmann *et al.*, 2018). A descrição semântica de um objeto é definida como o que de fato é o objeto. Por exemplo, na proposta IFC4.3.1.0, um sólido formado pela extrusão de uma seção transversal retangular (representação geométrica: utilização da entidade *IfcExtrudedAreaSolid*) poderá ser uma longarina de ponte (descrição semântica de *IfcBeam*, com o atributo *IfcBeam.PredefinedType* = GIRDER_SEGMENT) ou uma transversina (*IfcBeam.PredefinedType* = DIAPHRAGM). Logo, o aspecto que define uma representação geométrica de um objeto é a sua descrição semântica, ou seja, todos os objetos são, inicialmente, definidos semanticamente e podem, então, ser vinculados a uma ou mais representações geométricas (Borrmann *et al.*, 2018).

No IFC, os sólidos podem ser formados por geometria em mosaico (*IfcTesselatedItem*), representação de contorno (BRep, através de *IfcManifoldSolidBrep*, subtipo de *IfcSolidModel*), varredura (*IfcSweptAreaSolid*), parametrização de elementos primitivos CSG (*Constructive Solid Modeling*, através de *IfcCsgPrimitive3D*), dentre outros. Para a maioria dos elementos da superestrutura de pontes, as representações geométricas mais usuais são os métodos implícitos de varredura e explícitos de geometria BRep, porém, com extensões para representar as curvas de alinhamento, rotação e variação da seção transversal na direção do alinhamento, através da proposta da entidade *IfcSectionedSolidHorizontal*, elaborada a partir do esquema IFC4x1 (Borrmann *et al.*, 2017).

2.2.3 Representação geométrica de sólidos × *Model View Definition*

Um determinado objeto (uma viga, por exemplo) pode ser representado de formas geométricas diferentes, a depender do uso específico do usuário. Para evitar o aumento do nível de implementação do IFC, levando em conta todas as possibilidades possíveis de representação, a BSI propôs o *Model View Definition* (MVD), que consiste em um subconjunto específico do domínio de dados IFC, facilitando a troca de informações para fins específicos.

A versão do MVD mais usual e suportada pela grande maioria dos softwares BIM é o *Coordination View 2.0 (CV v.2.0)*, exclusivamente no esquema IFC2x3, sendo o primeiro MVD desenvolvido pela bSI. Na versão IFC4, a bSI considera os MVDs *Design Transfer View (DTV)* e o *Reference View (RV)*. O RV é um subconjunto do DTV e foi desenvolvido para ser usado como referência, apenas como leitura, permitindo alterações nos dados BIM por parte do autor do projeto. Como sucessor do CV v.2.0, as plataformas BIM já possuem a implementação do DTV, que é um MVD para troca unidirecional, sendo mais utilizada quando o projeto possui representações geométricas mais complexas, como superfícies com faces trianguladas.

Para fins de análise estrutural, a bSI propôs o MVD *Structural Analysis View (SAV)*, no esquema IFC2x3. SAV considera o modelo analítico de um modelo estrutural, ou seja, os elementos estruturais lineares são representados por curvas que passam pelo centro de gravidade da seção transversal vinculadas à informação de sua seção transversal; os elementos estruturais planos são representados por áreas planas com sua respectiva espessura. Esse MVD não está disponível na maioria das plataformas BIM, em função do alto custo de implementação e manutenção (Ramaji; Memari, 2018). Logo, tradutores de dados geométricos IFC para o seu respectivo modelo analítico podem ser utilizados, evitando retrabalho por parte dos profissionais responsáveis pela análise estrutural de uma ponte, por exemplo.

Uma das etapas do projeto IFCBridge consistiu na definição de três níveis de implementação para vistas específicas (MVDs): *Bridge Reference View (BRV)*, *Alignment based Reference View (ARV)* e *Bridge Design Transfer View (BDTV)*. Os dois primeiros são baseados no RV e o último no DTV.

Mostra-se na Figura 3 algumas representações geométricas IFC (a partir da versão IFC4), conforme o MVD escolhido para a exportação.

	RV IFC4	BRV	ARV	DTV IFC4	BDTV
IfcSolidModel					
IfcManifoldSolidBrep					
IfcAdvancedBrep				X	X
IfcFacetedBrep				X	X
IfcSweptAreaSolid					
IfcExtrudedAreaSolid	X	X	X	X	X
IfcExtrudedAreaSolidTapered				X	X
IfcSectionedSolid					
IfcSectionedSolidHorizontal			X		X
IfcTessellatedItem					
IfcTessellatedFaceSet					
IfcPolygonalFaceSet	X	X	X	X	X
IfcTriangulatedFaceSet	X	X	X	X	X

Figura 3 – Algumas representações geométricas IFC para cada MVD.

2. Recomendações para exportação de dados IFC para fins de análise estrutural via MEF

Este item aborda as recomendações dos autores para exportação de dados IFC, na proposta IFC4.3.1.0, de elementos de pontes em vigas (*IfcBridge.PredefinedType* = GIRDER), com longarinas de concreto, a partir de uma modelagem bidimensional via MEF.

3.1 Longarinas e demais elementos lineares

Um tradutor de dados IFC deve identificar semanticamente uma longarina a partir da entidade *IfcBeam*, por meio do atributo *PredefinedType*. Para pontes pré-moldadas, as longarinas devem possuir o tipo predefinido GIRDER_SEGMENT; já para as pontes com elementos moldados *in loco*, as longarinas podem também ser semanticamente definidas como T_BEAM, em função da consideração de uma largura colaborativa da laje no dimensionamento da longarina, formando uma seção T. Uma vez identificada semanticamente, a representação geométrica deve ser definida em função da variação de seção transversal ao longo de seu comprimento e a variação de sua direção.

Para elementos prismáticos, como as longarinas com eixo reto e sem variação de seção transversal, deve-se utilizar a entidade *IfcExtrudedAreaSolid*, disponível em todos os MVDs apresentados na Figura 3. Tais elementos devem ser parametrizados levando em conta a extrusão de uma seção transversal em um determinado comprimento e a direção de extrusão.

As longarinas com eixo reto e variação linear de seção transversal podem ser representadas geometricamente pela entidade *IfcExtrudedAreaSolidTapered*, subtipo de *IfcExtrudedAreaSolid*. Além dos atributos herdados de *IfcExtrudedAreaSolid*, considera-se a seção transversal no ponto final de extrusão e, conseqüentemente, seu posicionamento. Para MVDs relativos aos dados de pontes, a exportação da entidade *IfcExtrudedAreaSolidTapered* está disponível somente no BDTV.

IfcSectionedSolidHorizontal é a entidade que representa geometricamente sólidos com seção transversal variável ao longo da diretriz de uma curva situada no espaço, ou seja, é a representação geométrica mais abrangente para as longarinas e demais elementos lineares. Essa entidade está disponível nos MVDs ARV e BDTV. A parametrização de um elemento estrutural linear deve considerar 1) a curva que define o seu alinhamento, ou seja, a diretriz de seu eixo longitudinal; 2) lista de seções transversais nos pontos de interesse; e 3) lista de posicionamentos e orientações do sistema de referência nos pontos de interesse de cada seção. Mostra-se na Figura 4 os atributos de *IfcSectionedSolidHorizontal* e a tradução para o respectivo elemento analítico.

Para os demais elementos lineares de uma ponte de concreto em vigas, deve-se mapear as entidades e o tipo predefinido de cada um, conforme é mostrado na Tabela 1. Recomenda-se a entidade *IfcSectionedSolidHorizontal* para os elementos que podem ser definidos em função do alinhamento da ponte, como as longarinas. Transversinas, travessas e pilares podem ser geometricamente definidas pela entidade *IfcExtrudedAreaSolidTapered*, englobando elementos com e sem seções variáveis em uma determinada direção.

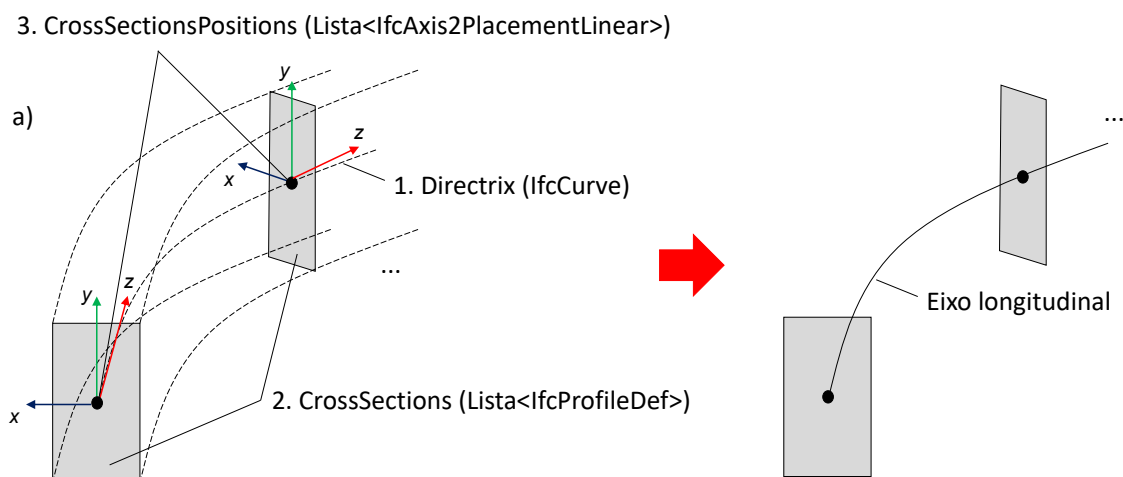


Figura 4 – Parametrização de um elemento linear: a) atributos de *IfcSectionedSolidHorizontal*; b) tradução para o respectivo elemento analítico.

Tabela 1 – Recomendações de exportação de dados de representação geométrica IFC de elementos lineares em função do tipo predefinido do objeto.

Elemento	Exportada como	PredefinedType	Representação geométrica IFC	MVD
Longarina pré-moldada	<i>IfcBeam</i>	GIRDER_SEGMENT	<i>IfcSectionedSolidHorizontal</i>	ARV, BDTV
Longarina moldada <i>in loco</i>	<i>IfcBeam</i>	GIRDER_SEGMENT / T_BEAM	<i>IfcSectionedSolidHorizontal</i>	ARV, BDTV
Transversina	<i>IfcBeam</i>	DIAPHRAGM	<i>IfcExtrudedAreaSolidTapered</i>	BDTV
Travessa	<i>IfcBeam</i>	PIERCAP	<i>IfcExtrudedAreaSolidTapered</i>	BDTV
Pilar	<i>IfcColumn</i>	USERDEFINED	<i>IfcExtrudedAreaSolidTapered</i>	BDTV

3.2 Lajes

As lajes de pontes em vigas são elementos planos que estão apoiadas nas longarinas e, em alguns trechos, em transversinas. Na proposta IFC4.3,1.0, as lajes de pontes em vigas devem ser identificadas semanticamente através da entidade *IfcSlab*.

As lajes de pontes em vigas podem possuir variação de espessura nas direções longitudinal e transversal, resultando nas mais diversas formas poligonais. Assim, a representação geométrica das lajes também deve ser representada por *IfcSectionedSolidHorizontal*, respeitando o alinhamento da ponte. A tradução da representação geométrica para o respectivo elemento analítico se baseia na determinação das seções transversais abertas da linha média da laje. Os pontos da linha média da laje podem ser determinados por meio de um algoritmo que traduz as coordenadas das seções transversais da laje em coordenadas da linha média, vinculando a espessura em cada ponto, conforme é mostrado na Figura 5.

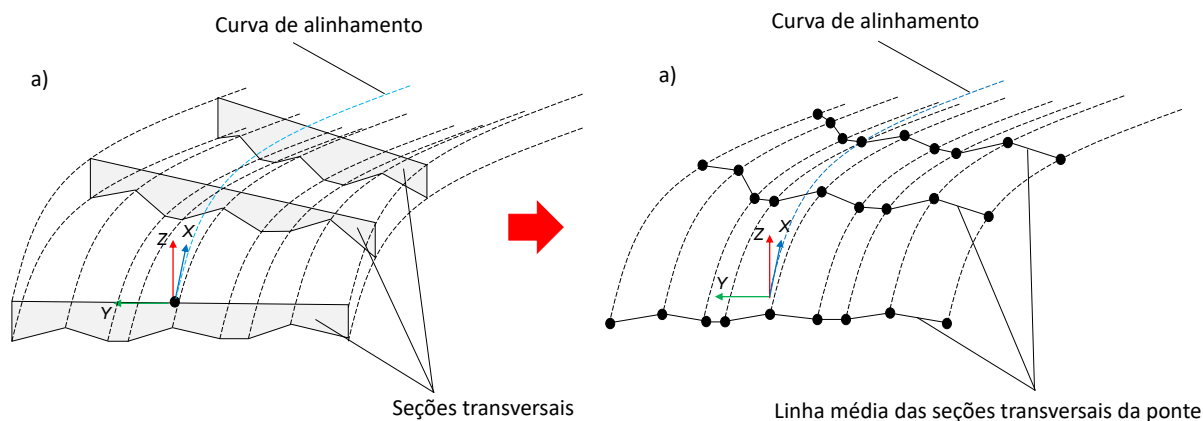


Figura 5 – Lajes: a) seções transversais da laje; b) tradução para o respectivo elemento analítico.

3.3 Propriedades dos materiais

Quanto às propriedades necessárias para a análise estrutural via MEF, recomenda-se a utilização de propriedades pré-definidas pela bSI (*property set* - Pset), de forma a facilitar a tradução através do nome da propriedade, conforme é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades necessárias para análise estrutural via MEF

Nome das propriedades	Símbolo	Property set (Pset)
YoungModulus	E	<i>Pset_MaterialMechanical</i>
ShearModulus	G	<i>Pset_MaterialMechanical</i>
PoissonRatio	ν	<i>Pset_MaterialMechanical</i>
ThermalExpansionCoefficient	α	<i>Pset_MaterialMechanical</i>
MassDensity	ρ	<i>Pset_MaterialCommon</i>
CompressiveStrength	f_c	<i>Pset_MaterialConcrete</i>

4. Conclusões

Este estudo apresenta algumas recomendações para exportação de dados geométricos e propriedades IFC, com a finalidade de traduzi-los e exportá-los para softwares de análise estrutural via MEF, com ênfase para pontes de concreto em vigas. As seguintes conclusões foram obtidas:

- (1) O MVD escolhido para exportação de dados IFC interfere na representação geométrica de um determinado objeto. O MVD *Bridge Design Transfer View* (BDTV) engloba grande parte das representações geométricas, aumentando o esforço computacional na implementação da tradução dos dados para o modelo analítico, para fins de análise estrutural via MEF. Em contrapartida, o MVD *Alignment Reference View* (ARV) possui menos opções de representação geométrica, resultando em menor esforço na implementação da tradução dos dados.
- (2) Na implementação da exportação de dados IFC, o tipo pré-definido de um objeto é uma informação determinante para a melhor escolha de sua respectiva representação geométrica. Para pontes em vigas (*IfcBridge.PreddefinedType* = GIRDER), a entidade *IfcSectionedSolidHorizontal* é a mais eficiente para representar geometricamente

longarinas e lajes parametrizadas com curva de alinhamento, podendo ser exportada pelos MVDs ARV e BDTV. A implementação da tradução dos dados de *IfcExtrudedAreaSolid*, *IfcExtrudedAreaSolidTapered* e *IfcSectionedSolidHorizontal* para os respectivos elementos analíticos é feita de maneira mais simples, direta e com menos volume de dados. Portanto, para longarinas, transversinas, travessas, pilares e lajes, não é recomendado a exportação de dados IFC com representação geométrica por faces poligonais e representações BRep, independente do MVD escolhido.

- (3) As propriedades dos materiais que compõem os elementos da ponte devem ser identificadas de acordo com a nomenclatura adotada pela bSI, facilitando a implementação do algoritmo de busca de tais propriedades.

Para complementar as informações descritas neste trabalho, estudos de casos podem ser realizados no futuro para avaliar a semântica dos objetos de pontes na exportação de dados IFC. No presente momento, o esquema IFC vigente certificado pela bSI (IFC4) não engloba obras de infraestrutura, impossibilitando a realização dos estudos de caso para pontes de concreto em vigas.

Referências

- Pinto, R.F.F. Aplicação da metodologia BIM ao projeto de pontes: caso prático. **Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Civil**, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.
- Ren, R.; Zhang, J.; Dib, H.N. BIM Interoperability for structural analysis, in: **Construction Research Congress: Computer Applications**, ASCE, Reston, p.470-479, 2018.
- FHWA-HIF-16-011. Bridge Information Modeling Standardization Volume II: Schema Analysis. **US Department of Transportation Federal Highway Administration**. FHWA-HIF-16-011, 2016.
- Borrmann, A.; Muhic, S.; Hyvärinen, J.; Chipman, T.; Jaud, S.; Casting, C.; Dumoulin, C.; Liebich, T.; Mol, L. The IFC-Bridge project – Extending the IFC standard to enable high-quality Exchange of bridge information models. **European Conference on Computing in Construction**. Chania, Crete, Greece, July 10-12, 2019.
- Markic, Š. IFC-Bridge: Previous initiatives and their proposals, in: **The 29th Forum Bauinformatik**. Dresden, p.12-19, 2017.
- Park, S.I.; Lee, S.-H; Almasi, A.; Song, J.-H. Extended IFCbased Strong form meshfree collocation analysis of a bridge structure. **Automation in Construction** **119**, 103364, 2020.
- Soriano, H.L. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. 1^a ed. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo: edusp, 2003.
- El Debs, M.K.E. **Pontes de concreto com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados**. 1^a ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2021.
- Belytschko, T.; Liu, W.K.; Ong, J.S.J.; Lam, D. Implementation and application of a 9-node Lagrange shell element with spurious mode control. **Computers and Structures** **20**, p.121-128, 1985.
- Belytschko, T.; Tsay, C.S. A stabilization procedure for the quadrilateral plate element with one point quadrature. **International Journal for Numerical Methods in Engineering** **19**, p.405-419, 1983.
- Ramaji, I.J.; Memari, A.M. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. **Automation in Construction** **90**, p. 117-133, 2018.
- Borrmann, A.; König, M.; Beets, J. **Building Information Modeling – Technology Found and Industry Practice**. Springer, 2018.
- Borrmann, A.; Amann, J.; Chipman, T.; Hyvärinen, J.; Liebich, T.; Muhic, S.; Mol, L.; Plume, J.; Scarponcini, P. **IFC Infra Overall Architecture Project: Documentation and Guidelines**. 2017.

4. ELEMENTOS PARAMÉTRICOS DE PONTES EM VIGAS A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE GEOMETRIA BREP

4.1 Informações gerais

Apresenta-se neste capítulo parte dos resultados obtidos a partir do interpretador de dados IFC para análise estrutural, coletados em julho de 2023. O conteúdo foi publicado em formato de artigo no 7º Congresso Internacional *A Era BIM* em novembro de 2024. O artigo destaca a importância da parametrização em elementos de pontes e propõe um interpretador de dados IFC para geometria Brep, permitindo que as informações paramétricas sejam obtidas de forma inequívoca pelo usuário.

4.2 Artigo



Elementos paramétricos de pontes em vigas a partir da interpretação de geometria Brep

Parametric girder bridge elements from the Brep geometry interpretation

Guilherme Palla Teixeira | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | guilherme.palla@ufv.br

José Carlos Lopes Ribeiro | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | jcarlos.ribeiro@ufv.br

Kléos Magalhães Lenz César Jr | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | kleos@ufv.br

Diôgo Silva de Oliveira | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | diogooliveira@ufv.br

José Maria Franco de Carvalho | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | josemaria.carvalho@ufv.br

Letícia Negris Gardioli | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | leticia.gardioli@ufv.br

Lucas Andrade Nunes | Universidade Federal de Viçosa (UFV) | lucas.a.nunes@ufv.br

DOI: [10.5281/zenodo.14477948](https://doi.org/10.5281/zenodo.14477948)

Resumo

A troca de dados entre uma plataforma BIM (*Building Information Modeling*) e um software de análise estrutural pode ser efetuada utilizando o padrão aberto IFC (*Industry Foundation Classes*). No entanto, perdas de informações podem ocorrer durante a troca de dados, geralmente resultando em retrabalho por parte dos usuários e problemas na colaboração entre arquitetos e engenheiros. Alguns softwares de análise estrutural importam os dados IFC com informações não parametrizadas e apresentam erros na interpretação das informações. Além disso, representações geométricas ineficientes para fins de análise estrutural podem ser exportadas, como é o caso de geometria Brep (*Boundary representation*), o que exige um maior esforço na implementação de uma ferramenta de interpretação de dados IFC. Interpretar informações geométricas explícitas para informações paramétricas, com o objetivo de realizar análise estrutural, é um dos principais desafios para os implementadores de importação de dados IFC, já que um sólido pode ter sua geometria representada de várias maneiras. Um exemplo comum é a exportação de dados IFC relacionados à geometria de elementos de pontes, que geralmente possuem elementos lineares com geometria complexa, porém com baixo nível semântico no que diz respeito à sua utilização para análise estrutural. Algumas representações geométricas são exportadas sem informações relacionadas à seção transversal, direções longitudinal, vertical ou transversal, posicionamento da seção no espaço, número de seções transversais para os elementos com variações de seções

transversais ao longo do comprimento, entre outras informações. Quando a troca de dados IFC está comprometida, essas informações geométricas tornam-se fundamentais para o processo de modelagem estrutural. Dessa forma, propõe-se neste trabalho uma parametrização automática da geometria de elementos de ponte de concreto em vigas, interpretando dados IFC4x3 referentes à geometria explícita Brep em dados IFC de geometria implícita e dados paramétricos exportados para leitura. Optou-se pelo Revit (v. 2025) para exportar os dados IFC4x3, por ser uma plataforma BIM largamente utilizada. Longarinas e travessas foram os elementos lineares escolhidos para a interpretação da representação geométrica IFC, devido à possibilidade de variação da seção transversal ao longo do comprimento desses elementos. Além disso, os dados IFC interpretados foram importados no software AllPlan Engineering (v. 2025) e, posteriormente, exportados para avaliação da geometria importada após a interpretação e das entidades IFC utilizadas na exportação. A interpretação de dados geométricos não paramétricos para dados paramétricos é mais difícil de ser implementada, especialmente quando se deseja determinar os parâmetros da seção transversal do elemento. A substituição da geometria explícita para implícita resulta em uma redução no número de instâncias IFC superior a 80%, gerando, portanto, arquivos .ifc menores. O AllPlan Engineering permite a importação de dados IFC de modelagem implícita além de *IfcExtrudedAreaSolid*, no entanto, não apresenta informações sobre as dimensões das seções transversais. A exportação de dados IFC pelo AllPlan Engineering é majoritariamente realizada por meio de geometria explícita.

Palavras-chave: BIM. IFC. Pontes. Modelagem paramétrica. Análise estrutural.

INTRODUÇÃO

As informações relacionadas à modelagem geométrica de objetos BIM (*Building Information Modeling*) e a sua representação IFC (*Industry Foundation Classes*) possuem grande importância no processo de troca de dados entre uma plataforma BIM de modelagem e um software de análise estrutural. O IFC apresenta uma grande estrutura de dados voltada para a representação geométrica; portanto, a função que a geometria exerce no software de destino é fundamental para melhorar a eficiência na interpretação de dados geométricos [1]. Desconsiderar isso pode resultar em retrabalho no processo de modelagem e análise estrutural [2].

Nos projetos de pontes em vigas, a geometria de seus elementos geralmente apresenta grande complexidade devido ao uso de seções transversais variáveis ao longo do eixo longitudinal. Isso dificulta a parametrização e, conseqüentemente, reduz a qualidade da representação geométrica em IFC durante a exportação [3,4]. Em alguns casos, as propriedades geométricas desses elementos são difíceis de interpretar, como as informações sobre seções transversais, comprimento do elemento, posicionamento do centro de gravidade ou do centro da caixa delimitadora da seção, entre outras. Assim, a representação geométrica explícita normalmente é exportada pelos softwares, utilizando superfícies trianguladas/poligonais e a geometria por representação de contorno (*Boundary Representation – Brep*). Esses dois tipos de representação geométrica requerem menor esforço na implementação da exportação dos dados IFC [5], mas perdem em nível semântico para análise estrutural [1]. Portanto, a parametrização eficiente e o seu vínculo com a representação geométrica IFC são os fatores fundamentais para melhorar significativamente a interoperabilidade dos dados de pontes [3].

A interoperabilidade em um determinado domínio pode ser alcançada com o auxílio de ferramentas de interpretação de dados IFC. Para realizar a análise estrutural sem a necessidade de esforço adicional na modelagem, as informações devem ser interpretadas considerando a parametrização geométrica dos elementos e os dados dos materiais [6]. Atualmente, os softwares de modelagem e análise estrutural interpretam a geometria importada conforme se encontra no arquivo .ifc, dificultando a parametrização em casos de geometria explícita. Dessa forma, sólidos exportados por geometria Brep não são adequados para modelagem bidimensional de pontes em vigas, sendo necessários algoritmos de interpretação específicos para aumentar a semântica de geometria desse tipo.

Neste trabalho, propõe-se *i*) a parametrização da geometria de elementos de pontes de concreto em vigas com eixo reto, a partir da interpretação de dados de geometria Brep por meio de uma ferramenta denominada IPBrep; *ii*) a análise da importação e exportação dos dados geométricos desses elementos no software AllPlan

Engineering (v. 2025), considerando a importação dos dados IFC da geometria implícita interpretada pelo IPBrep. O Revit (v. 2025) foi escolhido para a exportação dos dados IFC no esquema IFC4x3 da geometria Brep de longarinas e travessas, por ser uma plataforma BIM amplamente utilizada na modelagem estrutural. Longarinas e travessas, que geralmente apresentam variação de seção transversal ao longo do comprimento, foram os elementos estruturais escolhidos para este estudo. Os dados geométricos foram interpretados e parametrizados de acordo com as principais entidades IFC, facilitando a leitura para o usuário. O AllPlan Engineering foi selecionado pela facilidade de integração com o AllPlan Bridge, um software de modelagem e análise estrutural de pontes.

REVISÃO DE LITERATURA

A descrição da geometria 3D de um elemento de construção é um dos aspectos mais importantes na aplicação do BIM, desempenhando um papel central no domínio arquitetônico e na indústria da construção [7]. Grande parte da modelagem geométrica é abrangida pelo IFC, possibilitando diversas formas geométricas de representação [1,3]. Assim, a escolha da representação geométrica mais eficiente deve considerar os casos de uso de cada aplicação, o que, na prática, geralmente não é observado [7].

Segundo Wagner *et al.* [1], a descrição geométrica de um objeto pode ser classificada em uma das seguintes categorias: 1) Nuvem de pontos; 2) Sólidos formados por superfícies trianguladas/poligonais (*Tessellated*); 3) Brep; 4) CSG (*Constructive Solid Geometry*); 5) Extrusões, varreduras, rotações, e curvas de Bézier/B-Spline/NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*). Ferramentas adequadas de interpretação devem ser utilizadas para determinar os dados IFC [8]. Borrmann e Berkham [5] classificam as descrições geométricas 1, 2 e 3 como modelagem geométrica explícita e as descrições 4 e 5 como modelagem implícita.

Os sólidos formados por superfícies trianguladas ou poligonais são descritos por meio das coordenadas dos pontos no espaço e das curvas que ligam esses pontos, formando o sólido 3D. Sólidos Brep são compostos por faces, arestas e vértices que constituem o sólido 3D como um todo. Ambas as representações geométricas explícitas não são paramétricas e, portanto, são ideais para uso na coordenação e detecção de interferências [5]. A modelagem geométrica explícita também possui outro inconveniente: o grande volume de informações para representá-la, o que motiva o uso de ferramentas para evitar duplicidade de representações geométricas [9].

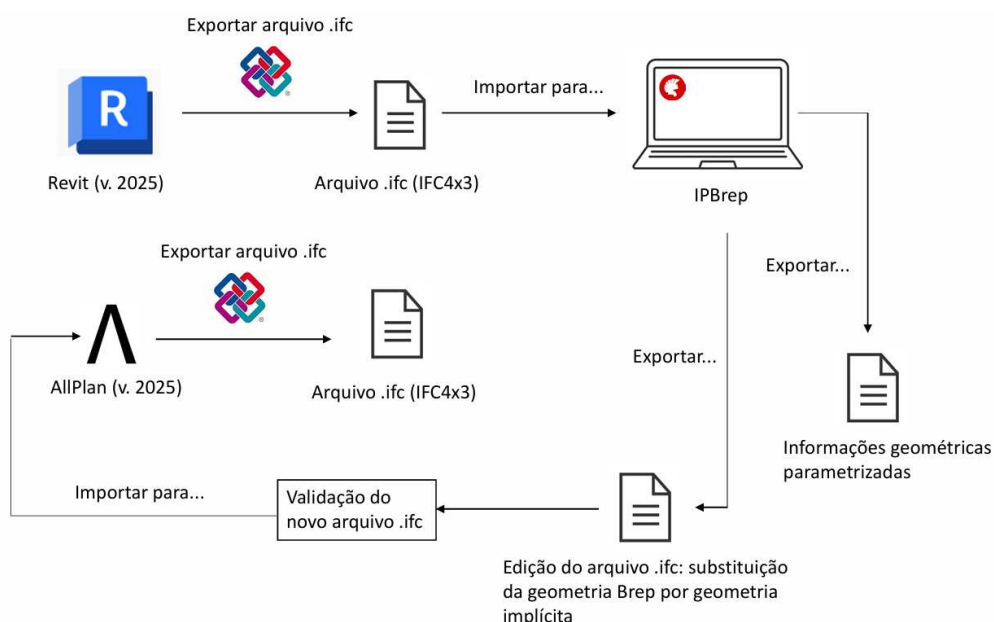
Os sólidos formados por modelagem implícita têm a capacidade de armazenar as informações necessárias para definir a geometria. Esse tipo de modelagem favorece a parametrização dos sólidos 3D, sendo, portanto, a escolha mais adequada para a troca de dados que envolve modelagem e análise estrutural [5], além da descrição geométrica de obras de infraestrutura. A parametrização na modelagem geométrica de pontes pode ser observada nos trabalhos de Sampaio [10], Ji *et al.* [3], Ji *et al.* [11] e Karaman *et al.* [12]. Para os profissionais da área de projetos de infraestrutura, o uso de varreduras é uma exigência importante para a troca de dados entre softwares [13].

O tipo predefinido dos elementos de construção é um fator importante para melhorar a eficiência da representação geométrica em IFC. Wu e Zhang [14] desenvolveram um algoritmo para classificar o tipo predefinido de um objeto BIM com base nas características geométricas comuns de vigas, lajes, fundações, pilares e paredes. Teixeira *et al.* [4] recomendaram entidades IFC para exportação de representações geométricas de elementos estruturais de pontes em vigas para fins de análise estrutural, considerando longarinas, transversinas, travessas e lajes posicionadas em relação ao alinhamento da ponte. As recomendações levaram em conta o tipo predefinido dos elementos, concluindo que os subtipos de *IfcSweptAreaSolid* e *IfcSectionedSolid* são os mais indicados para modelagem e análise estrutural bidimensional em elementos finitos de pontes em vigas.

METODOLOGIA

Mostra-se na Figura 1 um resumo esquemático da metodologia proposta para este trabalho. Elementos estruturais comuns em pontes em vigas foram modelados no Revit (v. 2025) e exportados no formato .ifc (IFC4x3). A ferramenta de interpretação de geometria Brep para dados paramétricos, denominada IPBrep, permite a importação de arquivos .ifc, identificando os elementos estruturais através do tipo predefinido de cada um. Após a identificação, a representação geométrica Brep é interpretada para dados geométricos parametrizados (seções transversais e comprimentos). As informações interpretadas são exportadas em um arquivo .txt para consulta pelo usuário, facilitando o entendimento das características geométricas do sólido 3D que representa o elemento estrutural. Em uma segunda exportação realizada pelo IPBrep, a representação geométrica do arquivo .ifc exportado pelo Revit é substituída por entidades IFC que representam a geometria implícita do sólido. O novo arquivo .ifc é validado e importado no software AllPlan Engineering (v. 2025) para a avaliação dos dados geométricos. Além disso, os modelos IFC da longarina e da travessa foram exportados para análise qualitativa da representação geométrica dos elementos.

Figura 1: Resumo esquemático para a determinação da geometria paramétrica a partir de dados de geometria Brep.



Fonte: os autores.

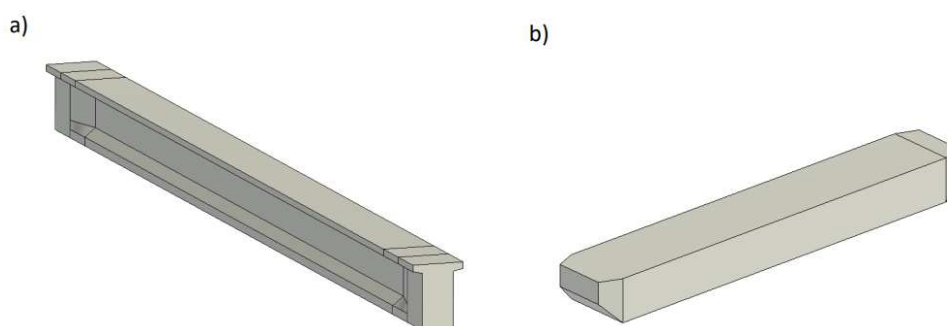
O IPBrep é uma ferramenta capaz de importar arquivos .ifc com o objetivo de interpretar geometria Brep para dados paramétricos, exportando esses dados em um arquivo .txt. Os dados paramétricos exportados são organizados de forma a facilitar a leitura pelo usuário. A estrutura de dados foi desenvolvida na linguagem Delphi, e somente as entidades IFC relevantes para a interpretação foram implementadas.

Uma vez que as longarinas e travessas podem ser projetadas com seções transversais variáveis, os elementos estruturais foram variados em função do polígono fechado das seções transversais. Foram considerados dois elementos exportados como geometria Brep: 1) Longarina de concreto com seção I e abas inclinadas (Figura 2.a); 2) Travessa com variação de seção transversal retangular nas extremidades (Figura 2.b).

A longarina possui cinco comprimentos diferentes, com três extrusões simples e duas extrusões com variação de seção transversal. As duas extrusões das seções engrossadas possuem 1 m de comprimento, assim como as duas extrusões com variação de seção transversal. O comprimento total da longarina é igual a 25 m, portanto, o

comprimento de extrusão da seção I com abas inclinadas é igual a 21 m. A seção I com abas inclinadas possui os seguintes parâmetros, conforme os atributos de *IfcAsymmetricIShapeProfileDef*: largura da mesa inferior (*BottomFlangeWidth*): 0.75 m; altura total (*OverallDepth*): 1.50 m; espessura da alma (*WebThickness*): 0.25 m; espessura da mesa inferior (*BottomFlangeThickness*): 0.20 m; largura da mesa superior (*TopFlangeWidth*): 1.20 m; espessura da mesa superior (*TopFlangeThickness*): 0.15 m; ângulo de inclinação da aba inferior (*BottomFlangeSlope*): 0.6747 rad (38.66 °); ângulo de inclinação da aba superior (*TopFlangeSlope*): 0.2075 rad (11.89 °). A origem da longarina está posicionada no ponto (0.000, -3.800, -0.950) em relação ao sistema global do projeto (WCS).

Figura 2: Elementos estruturais de pontes consideradas neste trabalho: a) Longarina com seção I e abas inclinadas; b) Travessa com variação de seção retangular nas extremidades.



Fonte: os autores.

A travessa possui seção transversal retangular, com as seções das extremidades medindo 1.20 m x 1.00 m e a seção central medindo 1.60 m x 1.00 m. O comprimento dos trechos com seções variáveis é igual a 0.5 m, e o comprimento total da travessa é igual a 10 m. A origem da travessa está posicionada no ponto (25.000, -5.000, -2.314) em relação ao WCS.

A metodologia utilizada para interpretar geometria Brep em geometria implícita está ilustrada na Figura 3. Inicialmente, realiza-se a importação do arquivo .ifc para leitura e identificação dos elementos de ponte, através do tipo predefinido especificado pelo atributo *PredefinedType* de cada entidade IFC. Em seguida, determina-se a matriz de transformação do novo WCS (*TNewWCS*), considerando a direção longitudinal das longarinas como o novo eixo X global e a direção longitudinal dos pilares como o novo eixo Z. A origem do elemento em relação ao novo WCS é calculada considerando o ponto do centro da caixa delimitadora da seção transversal com o menor valor de X para as longarinas, o menor valor de Y para travessas/transversinas e o menor valor de Z para pilares. Com todos os pontos do sólido, determinam-se os pontos de cada seção transversal do elemento e os comprimentos entre seções. Assim, dois arquivos são exportados: um com os dados IFC da representação geométrica implícita e outro com os dados paramétricos de cada elemento, de forma que o último possa ser lido facilmente por um usuário.

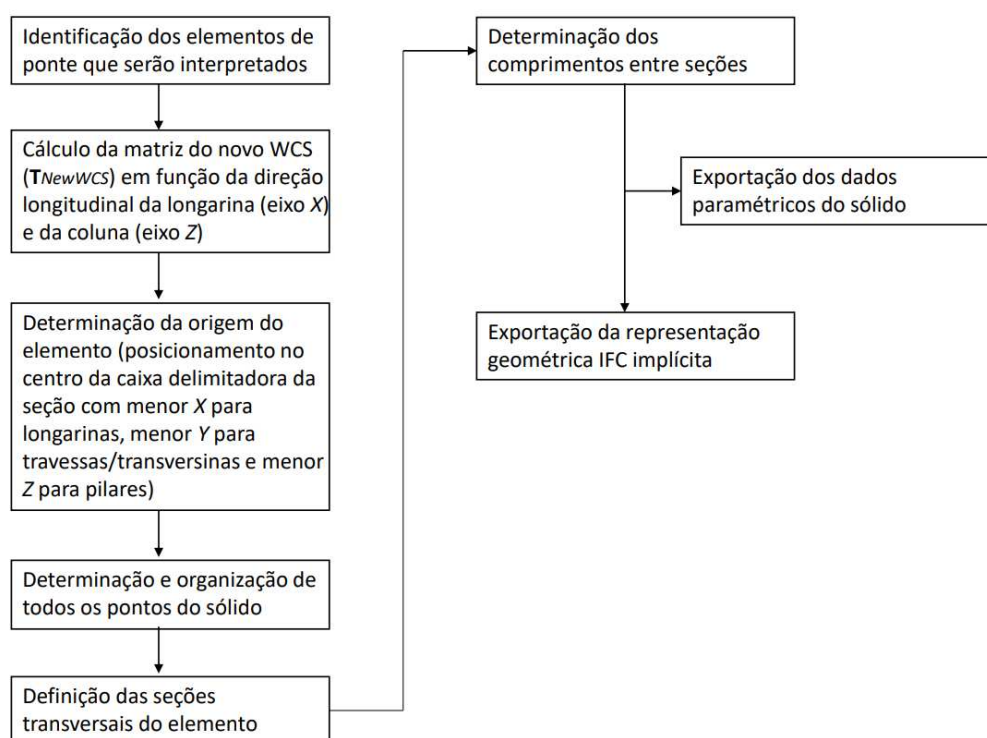
RESULTADOS

LONGARINA

Exportou-se o arquivo .ifc referente a longarina ilustrada na Figura 2, contendo 1404 instâncias IFC. A representação geométrica da longarina foi representada da instância de posição #96 até a posição #984, totalizando 888 instâncias para representar a geometria Brep de uma longarina.

Mostra-se na Figura 4 uma parte da representação geométrica após a interpretação da geometria Brep da longarina. Para interpretar a geometria Brep em geometria implícita, utilizaram-se as entidades *IfcExtrudedAreaSolid* nos trechos de extrusão simples e *IfcExtrudedAreaSolidTapered* nos trechos de variação de seção transversal. Nos trechos com variação de seção transversal, torna-se impossível a utilização da entidade *IfcAsymmetricIShapeProfileDef* na definição das seções, devido à variação do valor da espessura da alma. Portanto, optou-se pela utilização da entidade *IfcArbitraryClosedProfileDef*, definindo a seção arbitrária por meio de pontos (*IfcPolyline*). Foram necessárias 42 instâncias IFC para definir a representação geométrica, gerando uma redução de 95.27% no número de instâncias.

Figura 3: Metodologia para interpretação de dados de geometria Brep para geometria implícita.



Fonte: os autores.

O arquivo de dados paramétricos é exportado para leitura e interpretação pelo usuário. Mostra-se na Figura 5 as informações exportadas referentes à longarina. Os parâmetros das seções transversais são apresentados conforme os atributos das entidades subtipo de *IfcParameterizedProfileDef*. As seções das extremidades da longarina possuem parâmetros da entidade *IfcTShapeProfileDef*, enquanto as demais seções possuem parâmetros da entidade *IfcAsymmetricIShapeProfileDef*. A longarina possui as seguintes informações: nome, número de trechos, seção transversal dos trechos extrudados, comprimento dos trechos, seção inicial e final para os trechos com seção transversal variável, e a posição no plano xy do centro da caixa delimitadora das seções inicial e final.

Figura 4: Entidades IFC que definem a representação geométrica implícita da longarina.

```
#1039=IFCCARTESIANPOINT((0.000,0.000,24.000));
#1040=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#1039,$,$);
#1041=IFCCARTESIANPOINT((0.000,0.000,23.000));
#1042=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#1041,$,$);
#1043=IFCCARTESIANPOINT((0.000,0.000,2.000));
#1044=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#1043,$,$);
#1045=IFCCARTESIANPOINT((-0.600,0.750));
#1046=IFCCARTESIANPOINT((-0.600,0.600));
...
#1055=IFCCARTESIANPOINT((0.600,0.600));
#1056=IFCCARTESIANPOINT((0.600,0.750));
#1057=IFCPOLYLINE((#1056,#1055,#1054,#1053,#1052,#1051,#1050,#1049,#1048,#1047,#1046,#1045,#1056));
#1058=IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA.,$, #1057);
#1059=IFCCARTESIANPOINT((0.000,0.000,1.000));
#1060=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#1059,$,$);
#1061=IFCCARTESIANPOINT((-0.600,0.750));
#1062=IFCCARTESIANPOINT((-0.600,0.600));
...
#1070=IFCCARTESIANPOINT((0.375,0.553));
#1071=IFCCARTESIANPOINT((0.600,0.600));
#1072=IFCCARTESIANPOINT((0.600,0.750));
#1073=IFCPOLYLINE((#1072,#1071,#1070,#1069,#1068,#1067,#1066,#1065,#1064,#1063,#1062,#1061,#1072));
#1074=IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#1075=IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA.,$, #1073);
#1076=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#1075,#1040,#1074,1.000);
#1077=IFCEXTRUDEDAREASOLIDTAPERED(#1058,#1042,#1074,1.000,#1075);
#1078=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#1058,#1044,#1074,21.000);
#1079=IFCEXTRUDEDAREASOLIDTAPERED(#1075,#1060,#1074,1.000,#1058);
#1080=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#1075,$,#1074,1.000);
#1081=IFCSHAPEREPRESENTATION(#24,'Body','AdvancedSweptSolid',(#1080,#1079,#1078,#1077,#1076));
```

Fonte: os autores.

Figura 5: Informações da geometria paramétrica da longarina.

```
CROSS-SECTIONS:
Number of cross-sections: 2
*****
Cross-Section1:
IFCEntity: IfcTShapeProfileDef
Name: T-Shape
Depth: 1.5000
FlangeWidth: 1.2000
WebThickness: 0.7500
FlangeThickness: 0.7500
FilletRadius: $
FlangeEdgeRadius: $
WebEdgeRadius: $
WebSlope: $
FlangeSlope: 0.2075
*****
Cross-Section2:
IFCEntity: IfcAsymmetricIShapeProfileDef
Name: I-Girder
BottomFlangeWidth: 0.7500
OverallDepth: 1.5000
WebThickness: 0.2500
BottomFlangeThickness: 0.2000
BottomFlangeFilletRadius: $
TopFlangeWidth: 1.2000
TopFlangeThickness: 0.1500
TopFlangeFilletRadius: $
BottomFlangeFilletRadius: $
BottomFlangeSlope: 0.6747
TopFlangeEdgeRadius: $
TopFlangeSlope: 0.2075
*****

GIRDERS:
Number of girders: 1
-----
Girder1:
Name: G01
Number of parts: 5
Origin (WCS): 0.000 -3.800 -0.950
-----
Part1:
Cross-section: T-Shape
Length: 1.0000
-----
Part2:
Initial cross-section: T-Shape
Initial cross-section position (x,y): 0.000 0.000
Final cross-section: I-Girder
Final cross-section position (x,y): 0.000 0.000
Length: 1.0000
-----
Part3:
Cross-section: I-Girder
Length: 21.0000
-----
Part4:
Initial cross-section: I-Girder
Initial cross-section position (x,y): 0.000 0.000
Final cross-section: T-Shape
Final cross-section position (x,y): 0.000 0.000
Length: 1.0000
-----
Part5:
Cross-section: T-Shape
Length: 1.0000
*****
```

Fonte: os autores.

TRAVESSA

A representação geométrica Brep da travessa foi registrada da instância de posição #79 até a posição #163, totalizando 84 instâncias IFC. De maneira análoga, o arquivo .ifc do modelo da travessa foi exportado e interpretado, totalizando 16 instâncias IFC para representar a geometria implícita, gerando uma redução de 80.95% no número de instâncias. As entidades IFC que definem a representação geométrica implícita da travessa são mostradas na Figura 6.

As seções da travessa foram interpretadas por meio de *IfcRectangleProfileDef*. A instância de posição #176, por exemplo, define a seção transversal retangular final da primeira extrusão com variação linear, no qual o atributo *Position* de *IfcRectangleProfileDef* aponta para uma instância de *IfcAxis2Placement2D*, definindo a posição do centro da caixa delimitadora da seção. Como as alturas das seções inicial e final possuem dimensões 0.50 m e 1.00 m, respectivamente, o centro da caixa delimitadora da seção final é deslocado em -0.25m, conforme mostrado nas instâncias de posições #175 e #174.

Figura 6: Entidades IFC que definem a representação geométrica implícita da travessa.

```
#166=IFCCARTESIANPOINT((0.000,0.250));
#167=IFCAXIS2PLACEMENT2D(#166,$);
#168=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$, #167,1.600,0.500);
#169=IFCCARTESIANPOINT((0.000,-0.250,9.500));
#170=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#169,$,$);
#171=IFCCARTESIANPOINT((0.000,-0.250,0.500));
#172=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#171,$,$);
#173=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$, $,1.600,1.000);
#174=IFCCARTESIANPOINT((0.000,-0.250));
#175=IFCAXIS2PLACEMENT2D(#174,$);
#176=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$, #175,1.600,1.000);
#177=IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#178=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$, $,1.200,0.500);
#179=IFCEXTRUDEDAREASOLIDTAPERED(#173,#170,#177,0.500,#168);
#180=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#173,#172,#177,9.000);
#181=IFCEXTRUDEDAREASOLIDTAPERED(#178,$, #177,0.500,#176);
#182=IFCSHAPEREPRESENTATION(#24,'Body','AdvancedSweptSolid',(#181,#180,#179));
```

Fonte: os autores.

O arquivo de dados paramétricos da travessa exportado pelo IPBrep segue o mesmo raciocínio que o das longarinas, com a diferença de que as coordenadas locais (x,y) do centro da caixa delimitadora da seção transversal da travessa pode sofrer modificações em relação ao valor X global. Mostra-se na Figura 7 as informações da geometria paramétrica da travessa.

IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE DADOS IFC UTILIZANDO O ALLPLAN ENGINEERING

Os dados IFC de geometria implícita do modelo da longarina e da travessa foram importados no AllPlan Engineering para a análise das características geométricas. Mostra-se na Figura 8 o resultado da importação de cada elemento. O AllPlan Engineering permitiu a interpretação do sólido 3D sem erros; no entanto, as informações das seções transversais da longarina (seções arbitrárias interpretadas por meio de *IfcArbitraryClosedProfileDef*) e da travessa (seções paramétricas interpretadas por meio de *IfcRectangleProfileDef*) não foram identificadas. Ao selecionar os elementos, as seções transversais descritas nas entidades *IfcExtrudedAreaSolid* e *IfcExtrudedAreaSolidTapered* são exibidas, porém, sem as suas dimensões.

Figura 7: Informações da geometria paramétrica da travessa.

```

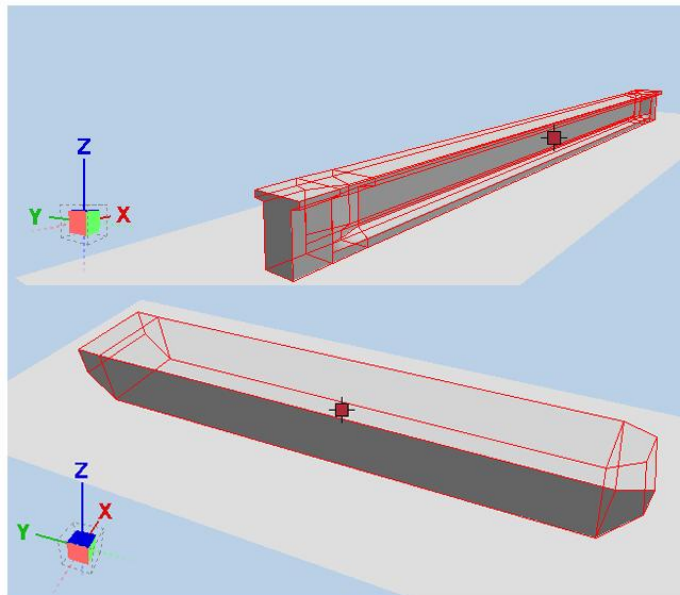
CROSS-SECTIONS:
Number of cross-sections: 2
*****
Cross-Section1:
IFCEntity: IfcRectangleProfileDef
Name: 1.20x0.50
XDim: 1.2000
YDim: 0.5000
*****
Cross-Section2:
IFCEntity: IfcRectangleProfileDef
Name: 1.60x1.00
XDim: 1.6000
YDim: 1.0000
*****

PIERCAP BEAMS:
Number of piercap beams: 1
-----
Piercap beam1:
Name: PB01
Number of parts: 3
Origin (WCS): 25.000 -5.000 -2.064
-----
Part1:
Initial cross-section: 1.20x0.50
Initial cross-section position (x,y): 0.000 0.000
Final cross-section: 1.60x1.00
Final cross-section position (x,y): 0.000 -0.250
Length: 0.5000
-----
Part2:
Cross-section: 1.60x1.00
Length: 9.0000
-----
Part3:
Initial cross-section: 1.60x1.00
Initial cross-section position (x,y): 0.000 0.000
Final cross-section: 1.20x0.50
Final cross-section position (x,y): 0.000 0.250
Length: 0.5000
*****

```

Fonte: os autores.

Figura 8: Longarina e travessa no AllPlan Engineering a partir da importação de dados IFC de geometria implícita.



Fonte: os autores.

Quanto à exportação dos dados IFC4x3, o usuário pode escolher o tipo de representação geométrica que deseja exportar, com as seguintes opções: 1) Extrusão + Brep; 2) Extrusão + superfície triangulada; 3) Brep; 4) Superfície triangulada. Em todas as opções escolhidas, houve representação geométrica explícita em sua totalidade, ou seja, representação geométrica Brep (subtipos de *IfcManifoldSolidBrep*) ou superfície triangulada (subtipos de *IfcTessellatedItem*). Portanto, mesmo os elementos sendo importados por meio de representação geométrica implícita, a exportação no AllPlan Engineering foi realizada utilizando geometria explícita.

CONCLUSÕES

Este estudo apresenta a interpretação de dados da representação geométrica Brep para geometria implícita, utilizando uma ferramenta denominada IPBrep. Essa ferramenta importa arquivos .ifc, interpreta a geometria Brep e exporta dados de representação geométrica IFC por meio de extrusão com e sem variação de seção transversal. Além disso, a ferramenta permite a exportação de dados paramétricos dos elementos de ponte que podem ser interpretados pelos usuários. Assim, as seguintes conclusões são apresentadas:

- (1) O tamanho do arquivo .ifc diminui com a substituição da geometria Brep pela geometria implícita, utilizando *IfcExtrudedAreaSolid* e *IfcExtrudedAreaSolid-Tapered*. Nos exemplos apresentados neste trabalho, a diminuição no número de instâncias IFC, em percentual, para a longarina e a travessa foi de 95.27% e 80.95%, respectivamente. Os trechos com seção variável na longarina possuem muitas faces, o que aumentou o número de instâncias *IfcFace* para representa-las.
- (2) A ferramenta de interpretação permite a exportação de dados paramétricos de cada elemento da ponte de forma estruturada, além de facilitar o entendimento por parte do usuário. Nos casos em que há perdas de informações na troca de dados entre uma plataforma BIM de modelagem e um software de análise estrutural de pontes, o uso das informações paramétricas dos elementos pode ajudar na remodelagem estrutural.
- (3) O AllPlan Engineering permite a importação sem erros para representações geométricas implícitas utilizando *IfcExtrudedAreaSolidTapered*; porém, apresenta baixo nível semântico em relação às informações das dimensões das seções transversais. Quanto à exportação no esquema IFC4x3, todos os elementos foram exportados utilizando subtipos de *IfcManifoldSolidBrep* para sólidos Brep ou *IfcTessellatedItem* para sólidos representados por superfícies trianguladas. Portanto, o Revit e o AllPlan Engineering, ambos nas versões 2025, não exportam 100% dos dados de geometria implícita de um sólido 3D.
- (4) É consideravelmente maior o esforço computacional para determinar os esforços internos em elementos com seção transversal variável. Assim, simplificações podem ser realizadas, como a divisão do trecho variável em vários trechos com seção transversal constante. Porém, o trecho variável possui a sua importância no detalhamento das armaduras. Logo, a exportação dos dados paramétricos dos elementos, além da representação geométrica IFC implícita, facilita a etapa de modelagem, análise e posição das armaduras.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se uma ferramenta de interpretação de geometria Brep para geometria IFC implícita, levando em conta o alinhamento da ponte (*IfcAlignment*) e a utilização da entidade *IfcSectionedSolidHorizontal*.

REFERÊNCIAS

- [1] WAGNER, A.; BONDUEL, M.; PAUWELS, P.; RÜPPEL, U. Representing construction-related geometry in a semantic web context: A review of approaches. In: **Automation in Construction**, v. 115, 103130, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103130>
- [2] RAMAJI, I.; MEMARI, A. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. In: **Automation in Construction**, v. 90, p. 117-133, feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>
- [3] JI, Y.; BEETZ, J.; NISBET, N.; BONSMA, P.; KATZ, C.; BORRMANN, A. Integration of parametric geometry into IFC-Bridge. In: 23rd EUROPEAN CONFERENCE FORUM BAUIFORMATIK, 2011, Cork, p. 1-8.
- [4] TEIXEIRA, G.; RIBEIRO, J.C.; CÉSAR JÚNIOR, K.; OLIVEIRA, D.; CARVALHO, J.M. Recomendações sobre a exportação de dados IFC de elementos estruturais de pontes de concreto em vigas para fins de análise

- estrutural via MEF. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2023, Rio de Janeiro, p. 1-8.
- [5] BORRMANN, A.; BERKHAN, V. Principles of geometric modeling. In: BORRMANN, A.; KÖNIG, M.; KOCH, C.; BEETZ, J. **Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice**. 1. ed. Cham, 2018. p. 27-41.
- [6] REN, R. ZHANG, J. Comparison of BIM interoperability applications at different structural analysis stages. In: CONSTRUCTION INFORMATION TECHNOLOGY, 2020, Reston, p. 537-545.
- [7] MCGLINN, K.; WAGNER, A.; PAUWELS, P.; BONSMAN, P.; KELLY, P.; O'SULLIVAN, D. Interlinking geospatial and building geometry with existing and developing standards on the web. In: **Automation in Construction**, v. 103, p. 235-250, dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.026>
- [8] JUSTO, A.; LAMAS, D.; SÁNCHEZ-RODÍGUEZ, A.; SOILÁN, M.; RIVEIRO, B. Generating IFC-compliant models and structural graphs of truss bridges from dense point clouds. In: **Automation in Construction**, v. 149, 104786, feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104786>
- [9] VONTHRON, A.; KOCH, C.; KÖNIG, M. Removing duplicated geometries in IFC models using rigid body transformation estimation and flyweight design pattern. In: **Visualization in Engineering**, v. 6, p. 1-15, feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40327-018-0061-x>
- [10] SAMPAIO, A. Geometric modeling of box girder deck for integrated bridge graphical system. In: **Automation in Construction**, v. 12, p. 55-66, apr. 2012. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(02\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(02)00040-7)
- [11] JI, Y. BORRMANN, A.; OBERGRIEBER, M. Towards the exchange of parametric bridge models using a neutral data format. In: **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 27, p. 593-606, jun. 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/41182\(416\)65](https://doi.org/10.1061/41182(416)65)
- [12] KARAMAN, S.; CHEN, S.; RATNAGARAN, B. Three-dimensional parametric data exchange for curved steel bridges. In: **Transportation Research Record**, v. 2331, p. 27-34, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.3141/2331-03>
- [13] BORRMANN, A.; MUHIC, S.; HYVÄRINEN, J.; CHIPMAN, T.; JAUD, S.; CASTAING, C.; DUMOULIN, C.; LIEBICH, T.; MOL, L. The IFC-BRIDGE Project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models. In: EUROPEAN COUNCIL ON COMPUTING IN CONSTRUCTION, 2019, Chania, p. 377-386.
- [14] WU, J.; ZHANG, J. New automated BIM object classification method to support BIM interoperability. In: **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 33, 04019033, jul. 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858

5. NÍVEL DE INTEROPERABILIDADE PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PONTES A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE DADOS IFC

5.1 Informações gerais

Este capítulo apresenta a finalização da implementação do interpretador de dados IFC para análise estrutural de pontes de concreto em vigas com eixo reto. O conteúdo foi publicado em formato de artigo na revista *Gestão & Tecnologia de Projetos* em 31/12/2024. No artigo, propõe-se uma metodologia para quantificar o nível de interoperabilidade na análise estrutural de pontes, considerando o fluxo de dados IFC do Revit para quatro softwares comerciais, além do software SAEP, que possui a capacidade de importar dados IFC por meio do próprio interpretador implementado nesta pesquisa.

5.2 Artigo

INTEROPERABILITY LEVEL FOR BRIDGE STRUCTURAL ANALYSIS FROM THE IFC DATA INTERPRETATION

NÍVEL DE INTEROPERABILIDADE PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PONTES A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE DADOS IFC

Guilherme Palla Teixeira ¹, José Carlos Lopes Ribeiro ¹, Kléos Magalhães Lenz César Jr. ¹, Lucas Andrade Nunes ¹, José Maria Franco de Carvalho ¹, Diôgo Silva de Oliveira ¹, Gustavo Henrique Nalon ¹

RESUMO:

Importar dados IFC (Industry Foundation Classes) de modelos estruturais de pontes em um software de análise estrutural é uma tarefa comum no fluxo de trabalho BIM (Building Information Modeling). Entretanto, alguns softwares ainda não importam dados IFC na versão de extensão que engloba modelos de pontes, podendo gerar inconsistências na semântica dos elementos e representações geométricas ineficientes. Para evitar perdas de informações de um modelo de ponte, propõe-se uma ferramenta de interpretação de dados IFC referente à semântica dos elementos de ponte, geometria e propriedades dos materiais. Uma nova metodologia foi desenvolvida para avaliar quantitativamente um índice de interoperabilidade para fins de análise estrutural de pontes (ILBSA), considerando a relevância das informações importadas definindo valores numéricos de pesos. Os resultados dos níveis de interoperabilidade mostraram que os softwares comerciais de análise estrutural de pontes requerem avanços significativos na interpretação de dados IFC.

PALAVRAS-CHAVE: BIM; Pontes; Infraestrutura; Troca de dados.

¹Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Conflito de Interesse:
Declaramos não haver conflitos de interesse.

Ética em Pesquisa:
Não há necessidade.

Submetido em: 27/07/2024
Aceito em: 11/12/2024

ABSTRACT:

Importing IFC (Industry Foundation Classes) data from bridge structural models into structural analysis software is common in the BIM (Building Information Modeling) workflow. However, some software tools still do not import IFC data in the extended version that covers bridge models. In addition, there is a lack of a holistic framework for determining indicators that effectively represent the interoperability level for bridge structural analysis. To prevent data loss in bridge models, this work proposes a tool for interpreting IFC data related to the semantics of bridge elements, geometry, and material properties. A new methodology was developed to quantitatively evaluate an interoperability level for bridges structural analysis, considering the relevance of the imported information by defining numerical weight values. Then, a new framework was proposed for determining each data flow's Interoperability Level for Bridge Structural Analysis (ILBSA). The interoperability level results showed that commercial bridge structural analysis software requires significant advances in interpreting IFC data.

KEYWORDS: BIM; Bridges; Infrastructure; Data exchange.

RESUMEN:

La importación de datos IFC (Industry Foundation Classes) de modelos estructurales de puentes a software de análisis estructural es una tarea habitual en el flujo de trabajo BIM (Building Information Modeling). Sin embargo, algunos programas informáticos siguen sin importar datos IFC en la versión de ampliación que incluye modelos de puentes, lo que puede provocar incoherencias en la semántica de los elementos y representaciones geométricas ineficaces. Para evitar la pérdida de información de un modelo de puente, se propone una herramienta para interpretar los datos IFC relativos a la semántica de los elementos del puente, la geometría y las propiedades de los materiales. Se ha desarrollado una nueva metodología para evaluar cuantitativamente un índice de interoperabilidad para el análisis estructural de puentes (ILBSA), considerando la relevancia de la información importada mediante la definición de valores numéricos de peso. Los resultados de los niveles de interoperabilidad mostraron que el software comercial de análisis estructural de puentes requiere avances significativos en la interpretación de los datos IFC.

PALABRAS CLAVE: BIM; Puentes; Infraestructuras; Intercambio de datos.

INTRODUCTION

Using BIM (Building Information Modeling) in multi-story buildings and infrastructure projects can bring some benefits, such as more efficient project management, enhanced collaborative efforts, and reductions in project execution timelines (Kumar *et al.*, 2017). To maximize these benefits in the BIM workflow, it is essential to improve data exchange between the different software available (Biswas *et al.*, 2024).

For structural analysis purposes, manual generation of the structural model leads to accumulated errors, rework, and high time consumption (Ramaji & Memari, 2018; Khattra *et al.*, 2020). On the other hand, the exchange of IFC (Industry Foundation Classes) data between a BIM platform and structural analysis software can lead to semantic losses of BIM elements (Jiang *et al.*, 2023) and non-parametric description of their 3D geometry (Ji *et al.*, 2011). One of the options for improving this IFC data flow is the use of data interpretation tools during the export of the .ifc file (Ramaji & Memari, 2018; Khattra *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2005; Hu *et al.*, 2016). The data exchange between different applications can be carried out efficiently if BIM platforms and structural analysis software have consistent support for the export/import of IFC data, avoiding loss of information and low semantic level (Ren *et al.*, 2018).

The types of structural models for girder bridges vary in relation to the complexity of the geometry of the elements, the simplification level of the analysis model, and the computational effort to be used. In practical applications, the two-dimensional model is the prevailing choice for Finite Element Method (FEM) structural analysis of girder bridges, as it covers the majority of the bridge structural elements and provides force values that can be directly used for design purposes (El Debs, 2021). The two-dimensional model consists of one-dimensional Euler-Bernoulli finite elements, that represent girders, diaphragms, pier cap beams, and columns, in addition to two-dimensional Reissner-Mindlin plate/shell finite elements, that represent the slabs (El Debs, 2021). For example, in a situation where the load-bearing capacity of a girder bridge is assessed using two-dimensional structural analysis, the user needs to be provided with information relating to geometry and materials to reduce rework at the structural modeling stage and, consequently, make structural analysis via FEM more efficient. Since the BIM modeling platform and the structural analysis software may not be compatible, the IFC use as a data exchange standard becomes essential in the workflow.

The available software tools still do not import IFC data in the extended version that includes bridge models (IFC4.3.2.0 schema). Furthermore, the current state-of-the-art lacks a comprehensive framework for determining indicators that effectively represent the interoperability level for bridge structural analysis. To narrow these knowledge gaps in the literature, the present work proposes an innovative tool for interpreting IFC4.3.2.0 data for structural analysis purposes in SAEP, which is a software program under development capable of modeling and performing structural analysis of concrete beam bridges with straight and level axes, as well as importing .ifc files and interpreting IFC data associated with the structural model of some bridge elements. In order to compare the IFC data interpreted in SAEP, a methodology is proposed for determining a numerical indicator that represents the efficiency level of IFC interoperability. The proposed indicator aggregated data related to the semantics of bridge elements, general information, geometry, and materials transferred between Revit (v.2024) and the following bridge modeling and structural analysis software: Allplan Engineering (v. 2024-1-2), Bentley OpenBridge (v. 23.00.00.121), CSi Bridge (v. 23.0.0), Scia Engineer (v. 24.0), and SAEP. The results were analyzed using a case study comprising bridge elements with shapes commonly used in the field of structural modeling.

LITERATURE REVIEW

IFC DATA EXCHANGE BETWEEN BIM PLATFORMS AND STRUCTURAL ANALYSIS SOFTWARE

Generally speaking, IFC (Industry Foundation Classes) interoperability is the ability of systems to exchange information without loss while maintaining its semantic level using a standard construction data model named IFC. The IFC is an extensive data structure standardized in the AEC (Architecture, Engineering, and Construction) industry and organized hierarchically to facilitate the implementation of data exchange between applications. This data structure inherits the concepts of object-oriented programming (OOP) and is described using a modeling language named EXPRESS, defined by ISO 10303-11 (Borrmann *et al.*, 2018).

A one-way data exchange using the IFC standard is exemplified using a BIM design platform and structural analysis software. The unidirectional IFC data exchange process is summarized as follows: 1) defining the exchange requirements, i.e. the information the structural analysis software needs to receive; 2) exporting an .ifc file from the BIM platform using a specific model view; 3) optionally using IFC viewers to validate the exported model; 4) importing a validated .ifc file into the structural analysis software; 5) checking the imported data directly in the structural analysis software.

The main problems in exchanging IFC data between BIM platforms and structural analysis software are: a) the exported view model does not cover all the information that the target software needs to receive (Luttun & Krijnen, 2020); b) the various ways of representing geometry, properties, and relationships in IFC can lead to inconsistencies and loss of information (Lai & Deng, 2018). Therefore, IFC interoperability is achieved if the BIM platform and structural analysis software have consistent support for exporting/importing IFC data (Ren *et al.*, 2018) by defining data models and standardizing their representation (Hu *et al.*, 2016).

Defining the structural analysis scenarios is fundamental in the IFC data exchange process and is related determining the exchange requirements. Structural analysis is divided into three stages (Ren & Zhang, 2020): 1) intrinsic modeling stage, in which the structural analyst depends only on the geometric data of the elements and the materials related to each element; 2) extrinsic modeling stage, in which the analyst also depends on the data of boundary conditions and loads acting on each element; and 3) analysis stage, which is the stage of processing the data from stages 1 and 2, obtaining the results of the analysis. The exchange of IFC data between structural analysis software is compromised when the information is related to the analysis stage (Ren & Zhang, 2020). However, if IFC data is imported into structural analysis software from the export of IFC data on a BIM modeling platform, at least information related to cross-sections, elements, and materials is expected since data on connections and acting loads are not exported via coordination or reference models view (Ramaji & Memari, 2018).

The automatic extraction of IFC data, such as element geometry and materials, speeds up the process of generating structural models, reducing errors, avoiding rework, and improving coordination between architects and structural engineers (Khattra *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2016). Chen *et al.* (2005) implemented an information web server based on IFC to automatically transform information from the architectural domain to the structural domain. Deng and Cheng (2006) developed an interpretation mechanism between architectural models based on IFC and structural models based on XML files. Liu *et al.* (2010) proposed a computational tool that interprets IFC data from architectural models into

structural model data, following the data structure of PKPM software, which is widely used in engineering offices in China. Qin *et al.* (2011) proposed a unified XML-based core model for converting architectural models between various commercial CAE software. Khattra *et al.* (2020) developed an algorithm using Python's IfcOpenShell library to interpret information from the architectural BIM model to the structural model by implementing an integrated workflow.

The architectural or structural model can be directly interpreted into its respective analytical model, considering the connections between the elements. Wang *et al.* (2015) developed an IFC data interpreter from structural models to analytical models. Hu *et al.* (2016) proposed a dual-track data interpretation algorithm based on element mapping, conflict resolution between architectural and structural elements, web-based integration, structural analysis, and continuous updating. Liu *et al.* (2016) developed a tool for interpreting IFC data from architectural models into structural and analytical models using MIDAS, ETABS, and ABAQUS software. Ramaji and Memari (2018) proposed a method that is applied to MVD Coordination View (CV) v.2.0 (IFC2x3) data, dividing the information into direct exchange units and interpretation units to determine the analytical model. To avoid manual editing when interpreting information related to the connections between elements in MVD CV v.2.0, Ramaji and Memari (2018) developed connectivity adjustments using an algorithm considering the distances between point-to-point and point-to-line.

For structural analysis of bridges, researchers enabled the interpretation of IFC data by proposing new IFC entities for bridges, sets of properties, characteristics for finite element analysis, and mesh-free analysis. In this context, the IFC4.3.2.0 scheme was officially published in 2023 by buildingSMART International (bSI). Hassanien Serror *et al.* (2008) developed a data transfer technology called Shared Computer-Aided Structural Design (sCAsD) and proposed IFC entities for finite element analysis of buildings and bridges. Xu *et al.* (2019) proposed a method based on the interpretation of IFC entities from the Brep geometry of bridge elements to perform finite element analysis. Pukl *et al.* (2016) converted bridge IFC data into structural analysis models in the input format of the ATENA software, which is used for non-linear finite element analysis of concrete structures. Park *et al.* (2020) proposed an extension of IFC for bridge elements and a methodology that interprets bridge model data to perform structural analysis without the need for meshing.

Currently, some certified BIM software offers a trial version for exporting IFC data at a higher version than IFC4, but it does not have implemented Model View Definition (MVD). This makes it difficult to carry out tasks that require interpreting bridge IFC data for information related to the analytical model. Therefore, the export of bridge IFC data for structural analysis purposes must cover the correct semantics of the elements, efficient geometric representation, and relationships between bridge elements and materials, among other factors that can not be identified when exporting view models in IFC4.

BRIDGE INFORMATION MODELING

IFC EXTENSION FOR BRIDGES

To meet the global demand for infrastructure projects such as bridges, railways, roads, and tunnels, an extension project of IFC was developed, covering not only building modeling. The final version of the schema, IFC4.3.2.0 (IFC4x3_ADD2), was officially published in 2023 by bSI.

Considering the various domains in construction modeling, previous studies presented proposals for extensions to IFC4 aimed at infrastructure works before the official publication by the bSI, with the main objective of improving interoperability between software (Yu *et al.*,

2023). Yabuki and Shitani (2003) developed a data model for reinforced and prestressed concrete bridges, proposing new entities for slabs, prestressing strands, sheaths, reinforcement, and anchoring devices. Lee and Kim (2011) considered adding IFC entities to define spatial elements in road structures. Ji *et al.* (2011) proposed an IFC data structure considering the parameterization of physical bridge elements. Amann *et al.* (2014) integrated new entities to describe transition curves for the IFCAlignment project. Amann *et al.* (2015) proposed an extension for cross-sections in road design based on the IFCAlignment project. Tanaka *et al.* (2017) developed an IFC-based information model to meet the requirements of bridge inspection processes. Park *et al.* (2020) integrated the mesh-free analysis method into the extended bridge model based on IFC. Lee *et al.* (2014), Gao *et al.* (2016), and Kwon *et al.* (2020) developed IFC entities to semantically define railroad design. Therefore, even with the efforts of several authors in contributing extensions to IFC4 and the official publication of the IFC4.3.2.0 schema in 2023, there may be a considerable delay in implementing a new schema in BIM software (Cerovsek, 2011).

The first stage of the IFC4 extension project was dedicated to the development of the first data schema, IFC4.1, proposed by the internal committee of bSI, titled IFCAlignment (Borrmann *et al.*, 2019), officially published in 2018. This schema defined the characteristics for describing the alignment of infrastructure projects, such as the reference line that delineates the layout of a bridge. In addition to defining the alignment, the new IFC geometric representation entity *IfcSectionedSolidHorizontal* was introduced, which allows sweeps along a directrix defined in the project (Borrmann *et al.*, 2019). The IFCAlignment project has enabled a) the ability to exchange alignment information in the planning, design, construction, and management phase; b) the linking of alignment information, cross-sections, and three-dimensional geometry of elements; c) the consultation of linear referencing and positioning information; among other achievements (Amann *et al.*, 2015). The IFCBridge project was officially launched in 2016 based on the IFCAlignment project and previous IFC extension projects (Markic, 2017).

The second part of the project, IFC4.2, officially published in 2019, defined the spatial hierarchy of the project, expanding specifically for bridges and considering future infrastructure works through the *IfcFacility* subtypes and *IfcFacilityPart* entities (Borrmann *et al.* 2019). The *IfcBridge* entity, as one of the subtypes of *IfcFacility*, has the *PredefinedType* attribute, encompassing various types of bridge structural systems (e.g., girder, cable-stayed, arch, etc.). Another important IFC entity is called *IfcBridgePart*, a subtype of *IfcFacilityPart*, which defines the different parts of the bridge (e.g., foundation, substructure, superstructure, etc.). In addition, the IFC4.2 schema has defined new entities that are *IfcBuildingElement* subtypes, such as the support elements (*IfcBearing*) and the deep foundation (*IfcDeepFoundation*). Some elements have been described by expanding the predefined types of entities already defined in IFC4, such as girders (GIRDER_SEGMENT), diaphragms (DIAPHRAGM), and pier cap beams (PIERCAP) of bridges, which are predefined types of *IfcBeam*. As with the IFC4 schema, objects not identified in a given schema are defined by the *IfcBuildingElementProxy* entity.

IFC4.3 was published in 2021, with the possibility of updates, taking into account rail (*IfcRailway*), road (*IfcRoad*), and waterway (*IfcMarineFacility*) projects, along with bridge (*IfcBridge*) and building (*IfcBuilding*) projects. New elements were also defined as *IfcBuiltElement* subtypes to replace the *IfcBuildingElement* entity, such as pavement (*IfcPavement*) and rail (*IfcRail*). The first candidate for updates was called IFC4.3.1.0 (IFC4x3_ADD1), with superelevation definitions, advanced geometric representations, and a spatial structure that promotes greater collaboration. IFC4.3.2.0 (IFC4x3_ADD2) was officially published in 2023 with a better definition for the linear positioning of objects using the *IfcAxis2PlacementLinear* and *IfcPointByDistanceExpression* entities (Jaud *et al.*, 2021).

IFC GEOMETRIC REPRESENTATION

The geometric representation of BIM objects is one of the most relevant information when exchanging data between software. Geometry resources are one of the most extensive and complex IFC subprocedures, requiring a significant computational effort for being implemented in BIM software (Krijnen *et al.*, 2020). Consequently, Wagner *et al.* (2020) carried out an extensive literature review to analyze geometric descriptions in relation to the requirements established in each domain. The authors recommended choosing the most suitable geometric description individually, considering the domain and the type of project.

Wagner *et al.* (2020) classified geometric representations as follows: 1) point cloud; 2) tessellated (triangulated or polygonal surfaces, analogous to a mesh); 3) boundary representation (Brep); 4) Constructive Solid Geometry (CSG); and 5) sweeps and rotations. The IFC does not semantically define solids formed by point clouds; however, some studies already presented the interpretation of sets of points in the IFC geometric representation of bridge elements (Lu & Brilakis, 2019; Justo *et al.*, 2023). The geometric representations for items 1-3 and 4-5 have explicit and implicit modeling approaches, respectively (Borrmann *et al.*, 2018).

A solid defined by implicit modeling stores the creation history as information is defined (Borrmann *et al.*, 2018). For example, a prismatic solid generated by extrusion of a cross-section (*IfcExtrudedAreaSolid*) requires the following sequence of information: 1) definition of the cross-section; 2) position of the cross-section; 3) extrusion direction; and 4) extrusion depth. Each piece of information is stored, and the solid is generated only when all the information is defined. In IFC4.3.2.0, the subtypes of *IfcSweptAreaSolid*, *IfcSweptDiskSolid*, *IfcSectionedSolid*, and *IfcCsgSolid* represent solids modeled implicitly.

Explicit modeling represents solids generated by Brep and tessellated surface representation (Borrmann *et al.*, 2018). A Brep solid is defined by the sequence body - faces - edges - vertices. A body is composed of a set of faces, a set of edges defines each face, and each edge is defined by its vertices. Subtypes of *IfcManifoldSolidBrep* are used to define solids by boundary representation. Additionally, solids modeled explicitly can be composed of triangles or polygons that define their entire surface through a set of cartesian points, using the subtypes of *IfcTessellatedItem*.

In the geometry context of bridge elements, modifying the road axis implies an automatic update of the other bridge elements (Ji *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2014), making the alignment's parameterization and bridge elements a fundamental step in the design phase. The studies by Sampaio (2003), Ji *et al.* (2012), Lee *et al.* (2012), Karaman *et al.* (2013), and Girardet and Botton (2021) have shown the importance of parameterizing bridge elements. Therefore, implicit methods are considered the most efficient geometric representations, as they involve fewer parameters to interpret, resulting in smaller files capable of being read by a computer, improving accuracy and allowing for a better fit in the structural analysis domain (Markic, 2017).

METHODOLOGY

SAEP'S GENERAL FEATURES

SAEP is based on a methodology for modeling bridges based on parametric data. It also comprises a computer system implementation for two-dimensional structural analysis of the load capacity of bridges in its stand-alone version. SAEP only considers concrete bridges with

a straight longitudinal axis, as this type of bridge is widely used in Brazil. The data structure was developed in the Delphi language, using the concepts of classes and objects, and the advantages of OOP. As for the software interface, it was decided to use OpenGL linked to the Delphi programming environment. This, SAEP was able to generate the following results: a) envelopes of nodal displacements based on the degrees of freedom considered for each element type; b) influence lines/surfaces for each force using the Jepsen & Damkilde (2016) methodology; c) envelopes of maximum and minimum forces due to the combination of dead and live loads; d) Rating Factor (RF) of the bridge, considering its deterioration condition and the application of loads from vehicles.

It is important to note that SAEP has some limitations compared to the commercial software evaluated in this research. SAEP models and interprets IFC4.3.2.0 data for concrete girder bridges with straight-axis and at level, but some types of bridges were not considered, such as steel-concrete, box girder, or cable-stayed bridges. Another limitation is importing a coordination, reference, or design view model in the IFC4 schema. SAEP does not interpret bridge elements without the correct definitions, i.e., in this case, the user will not visualize the structural model.

To read the bridge's structural model, an IFC4.3.2.0 data interpreter was implemented in SAEP, considering four stages: 1) implementation of IFC entities in the programming environment, i.e. creation of a library of IFC classes for modeling the bridge in SAEP; 2) development of an algorithm for reading an .ifc file; 3) development of IFC data interpreter; 4) validation of the IFC data interpretation tool. Since SAEP was developed in the Delphi language, the IFC class library and the .ifc file reader were also written in this language, facilitating the integration of SAEP with the IFC4.3.2.0 data interpretation tool.

Figure 1 shows the workflow for IFC4.3.2.0 data interpretation by SAEP. In addition, SAEP enables the exporting of native files with all the structured information, facilitating user readability.

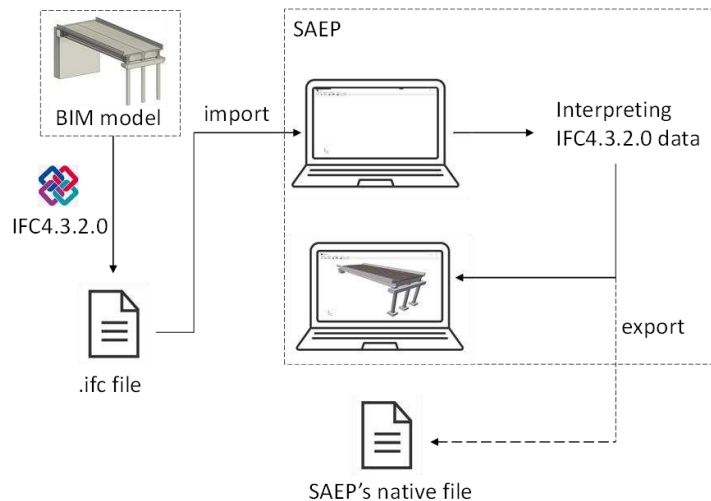


Figure 1. Workflow for IFC4.3.2.0 data interpretation by SAEP

Source: Authors

FRAMEWORK FOR OBTAINING THE ILBSA (INTEROPERABILITY LEVEL FOR BRIDGE STRUCTURAL ANALYSIS)

Figure 2 shows the proposed framework for determining each data flow's Interoperability Level for Bridge Structural Analysis (ILBSA). The Revit v. 2025 platform was chosen to export the IFC data for the model, known as the Standard Model. A model named Standard Model was

created on the Revit v.2025 platform. Revit was chosen because it is a widely used BIM platform for modeling straight-axis girder bridges, and it allows exporting data in the IFC4x3 schema using a trial version. After defining the Standard Model, the exported IFC instances were checked using the trial version view model in the IFC4x3 schema available in Revit. The IFC validation consisted of three filters: 1) use of buildingSMART IFC Validation Service (v.0.6.2); 2) use of the following IFC viewers: BIMcollab Zoom (v.8.1), usBIM.viewer+ (v.9.00), and BIMvision (v.2.28.0); and 3) visual inspection directly on the exported .ifc file. These viewers were selected because they can import .ifc files in a schema superior of IFC4. All the information presented by the viewers or the data mapping tool was checked in the .ifc file through visual inspection.

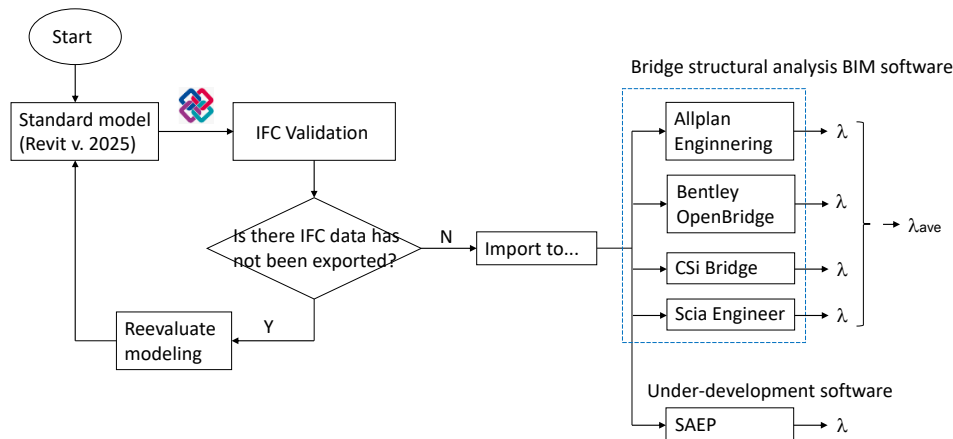


Figure 2. Proposed framework for determining each data flow's ILBSA

Source: Authors

The information checked refers to the minimum necessary for structural modeling, i.e., without considering the links between the elements and the application of the load acting on the structure. Therefore, the following information was considered in this work: 1) identification of elements; 2) general information, such as the name and global identity; 3) geometry, not only encompassing the visualization of the 3D solid but also the cross-section information, position of the element and the element \times material relationship; 4) materials, such as the name of the property sets that encompass the material, category, name of the properties as specified by bSI, values of the properties and the units. The commercial software chosen does not support the import of .ifc files in the IFC4.3.2.0 schema. For these cases, we opted to export the Design Transfer View (DTV, IFC4 schema) model unofficially available in Revit v.2025. This version of the view model is suitable for structural modeling, allowing the receiving software to modify the information (Trzeciak & Borrmann, 2018). Finally, the IFC data was imported into the software, and the value of the ILBSA (represented by the symbol λ) was determined.

The results were evaluated using the λ values for each case, quantitatively comparing the unidirectional flow of information between Revit and commercial software for bridge modeling and structural analysis, using an average value (λ_{ave}), and between Revit and SAEP.

STANDARD MODEL'S FEATURES

Figure 3 shows a 3D view of the Standard Model, used as a case study and created by parameterizing the different elements in Revit. The girders were parameterized considering the cross-section extruded along its length, in addition to the enlargement at the ends as a second element, dependent on the dimensions of the cross-section and the total length. The

pier cap beam was parameterized similarly, considering an extruded cross-section in addition to the chamfered sections at the ends as dependent elements. The parameterization of these elements is justified to reduce the density of information related to the geometric representation and to associate the material with the cross-sections of the extruded sections, making it easier to interpret the data. Slabs, pavements, and barriers were considered as elements generated by extruding an arbitrary profile in the longitudinal direction of the bridge.

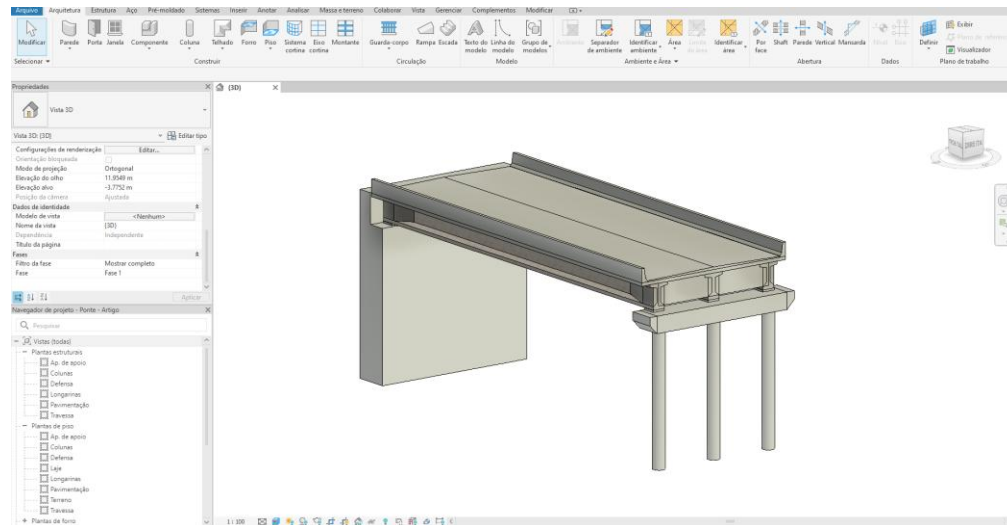


Figure 3. 3D view of the Standard Model

Source: Authors

The materials were associated with the typified elements, i.e., all bridge elements of the same type had the same properties as the user-defined materials. The import of information related to the bearings and the bridge abutment was not evaluated.

INTEROPERABILITY LEVEL FOR BRIDGE STRUCTURAL ANALYSIS (ILBSA)

Each bridge structural analysis software considered has an IFC data interpreter for the native data structure; however, some errors in data exchange can occur. The ILBSA indicator proposed in this work is defined as the percentage of information related to the structural analysis of concrete girder bridges with straight-axis, and this information was interpreted by bridge structural analysis software from an .ifc file exported by Revit. The information was analyzed and classified based on authors' expertise with data exchange between a BIM platform and structural analysis software. In addition, challenges of locating information within the structural analysis software and the rework time required to enter uninterpreted information were considered. To define the numerical value of the ILBSA, the information sets (Iset), the weights of each Iset, and the weights of each information were established, as shown in Table 1.

Table 1 indicates that the sets of information have been numbered from 1 to 4, and the weights of each Iset add up to a value of 1. These recommended weights values indicate the relevance of each Iset for the user who will receive this information. For example, the Iset related to materials (Iset_Material) has 20% relevance ($w_4 = 0.20$) about the sets of information analyzed. Each piece of information has a percentage transfer value to the structural analysis software. For example, the cross-section information (3.2 Profile) has 40% relevance to the information contained in the geometry-related Iset (Iset_Geometry) of a bridge element.

<i>i</i> . Iset	<i>i.j</i> Information name	δ_{ij} (%)	weight (ω_i)
1. Iset_Semantics	1.1 <i>Predefined type</i>	100	0.25
2. Iset_GeneralInformation	2.1 <i>Name</i>	50	0.05
	2.2 <i>Global ID</i>	50	
3. Iset_Geometry	3.1 <i>Solid 3D</i>	10	0.50
	3.2 <i>Profile</i>	40	
	3.3 <i>Positioning</i>	30	
	3.4 <i>Material relationship</i>	20	
4. Iset_Material	4.1 <i>Material name</i>	5	0.20
	4.2 <i>Category</i>	5	
	4.3 <i>Properties name</i>	40	
	4.4 <i>Properties value</i>	25	
	4.5 <i>Unity</i>	25	

Table 1. Information sets (Iset) considered for each type of bridge element

Source: Authors

The information from the four sets is checked for each type of bridge element: 1) Girders; 2) Diaphragms; 3) Pier cap beams; 4) Columns; 5) Barriers; 6) Pavement; and 7) Slabs. Therefore, the ILBSA value for each data flow, represented by the symbol λ , is given by equation (1):

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\omega_i \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta_{ij})_k \right]}{n \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i}$$

Equation 1. ILBSA - λ

Source: Authors

where $i = 1, \dots, N$ is the index of each Iset; N is the number of Iset; $k = 1, \dots, n$ is the index of each type of bridge element; n is the number of bridge elements; $j = 1, \dots, m$ is the index of each information contained in the Iset; m is the number of information contained in each Iset; $(\delta_{ij})_k$ is the percentage value of the transfer of the j -th information contained in the i -th Iset, referring to the k -th type of bridge element; and ω_i is the weight of the i -th Iset.

The semantics of a bridge element are identified through the *PredefinedType* attribute of some subtype of *IfcBuiltElement*. Some BIM platforms export an unofficial model view that follows the IFC4x3 schema and covers the predefined types of bridge elements, such as Revit v.2025. For the structural analysis of a bridge from a model imported using an .ifc file, the exact identification of the elements is important for the association of the information in each of them and the automatic generation of the finite element mesh. Therefore, the 25% weight ($\omega_1 = 0.25$) considers the relevance of information as a requirement for identifying the bridge element. In addition, the weight value is higher than geometry Iset (50%) due to the ease of implementing the semantics' interpretation in structural analysis software.

The general information considered in this study was the name and the global identity, determined by the *Name* and *GlobalID* attributes of the *IfcRoot* abstract entity. Both parameters were considered in Iset_GeneralInformation, with 50% weight for each, and Iset with 5% total weight ($\omega_2 = 0.05$). The low weight of this information is justified by the ease with which it can be transferred to analysis software, without considerable computational effort in interpreting this IFC data. In addition, the user can edit the names of the bridge elements, reducing the relevance of this information.

The geometric representation of the bridge (Iset_Geometry) is the most relevant information set to be analyzed, with 50% weight ($\omega_3 = 0.50$). This can be explained by the wide coverage of

IFC geometric representations, which makes data interpretation difficult for structural analysis software when there is a loss and inefficiency of geometric information. Geometric information with a low semantic level for structural analysis can lead to more rework than the rework to enter the other information. Therefore, considering both the relevance and amount of information, geometry has the highest weight value.

Geometry-related semantics cover not only the visualization of the 3D solid but also how the geometric representation has been considered in the structural model. The two-dimensional structural bridge analysis requires implicit geometric modeling information, such as cross-section information and element positioning, which is not easily found in Brep or tessellated solids. Parameterized geometric results in the use of more efficient finite elements and, consequently, generates less computational effort in the analysis. The relationship information that associates the material with the bridge element or cross-section is also considered.

Material properties must be interpreted, especially in cases where the strength of bridge elements needs to be determined and the user does not know these property values. The lack of this information may lead to destructive or non-destructive tests or even more costly solutions. Therefore, the information related to materials (*Iset_Material*) weighs 20% ($\omega_4 = 0.20$). The names of the properties associated with the material were given higher weight values than the weights relating to the values of the properties and their units since the Name attribute of the *IfcPropertySingleValue* entity must be equal to the name of the property defined by bSI. The following properties were considered for interpreting the IFC data: longitudinal modulus of elasticity and Poisson's ratio, contained in *Pset_MaterialMechanical* under the names *YoungModulus* and *PoissonRatio*, respectively; and material density, contained in *Pset_MaterialCommon* under the name *MassDensity*.

RESULTS

DETAILS OF ERRORS

Tables 2 to 5 show the main errors observed during the data exchange between Revit and the Allplan, Bentley, CSI Bridge, and Scia Engineer software. Semantic errors of the bridge elements result from the software's limited support for importing and exporting the IFC4x3 schema. Geometry errors include the misinterpretation of cross-sections and the incorrect positioning of the bridge elements. Regarding the interpretation of material information, only CSI Bridge performed well.

Information	Details of errors – Allplan
Semantics	Girders, diaphragms, pier cap beams, and pavement were not identified
General information	No errors were identified
Geometry	Elements with non-parametric cross-sections were not identified
Material	No material properties were identified

Table 2. Details of errors – Allplan

Source: Authors

Information	Details of errors – Bentley
Semantics	Girders, diaphragms, pier cap beams, and pavement were not identified
General information	No errors were identified
Geometry	Cross-section information and elements positioning were not identified
Material	No material properties were identified

Table 3. Details of errors – Bentley

Source: Authors

Information	Details of errors – CSI Bridge
Semantics	Girders, diaphragms, pier cap beams, pavement, and barriers were not identified
General information	No errors were identified
Geometry	Cross-section information for girders, barriers, and pavement were not identified
Material	Mass density and Young modulus not identified

Table 4. Details of errors – CSI Bridge

Source: Authors

Information	Details of errors – Scia Engineer
Semantics	Girders, diaphragms, pier cap beams, pavement, barriers, and slabs were not identified
General information	No errors were identified
Geometry	Relationship between material and bridge elements were not identified
Material	No material properties were identified

Table 5. Details of errors – Scia Engineer

Source: Authors

ILBSA VALUES

Figure 4 shows the ILBSA results for each flow, as well as the average ILBSA results for the unidirectional flow for each commercial structural analysis software. The ILBSA value for the Revit - SAEP flow was considerably higher than the average obtained for the Revit - commercial software workflow due to some advantages of SAEP over the other software.

All the software interpreted the name and global identity (*GlobalID*). This information is easily interpreted, requires minimal implementation effort, and is useful for correctly identifying bridge elements and structural analysis elements.

SAEP allows for the concrete girder bridge modeling by importing an .ifc file in the IFC4.3.2.0 schema, as well as modeling through the user's own data input. The modeling and structural analysis software analyzed cannot interpret the semantics of bridge elements, since it does not yet import .ifc files in the IFC4.3.2.0 schema, so the import was completed in the design model view in the IFC4 schema. Therefore, little can be gained from the imported model to carry out the structural analysis in each software, represented by the λ value of each flow.

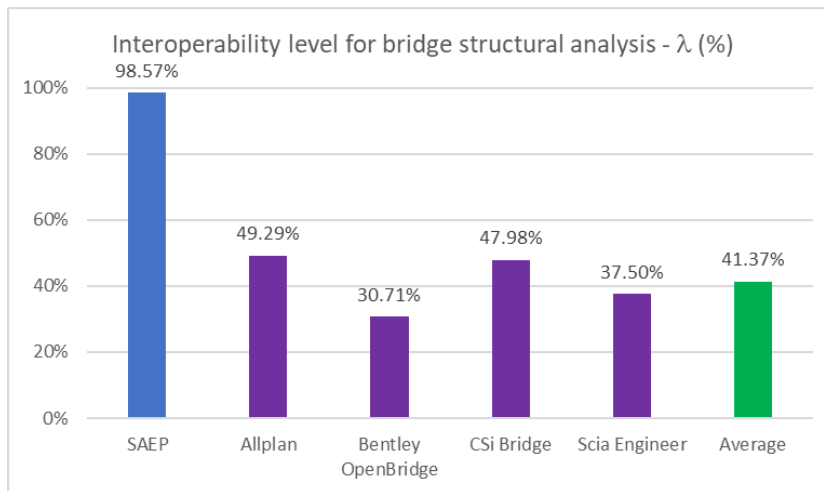


Figure 4. λ values (ILBSA) for each unidirectional workflow

Source: Authors

Figure 5 shows the percentage of geometry-related information (Table 1) that was interpreted by each software. The 51.16% value obtained for the average geometric information interpreted by the commercial software, compared to the 97.14% value obtained for the geometric information interpreted by SAEP, is justified by the low semantic level of geometry for structural analysis purposes interpreted by the commercial software. Determining the cross-section was the main information not interpreted by commercial software, especially in cases where the cross-sections of extruded elements were represented arbitrarily, using the *IfcArbitraryClosedProfileDef* entity. The information on the positioning of the cross-section of each bridge element, or the coordinates of the vertices of the elements about the global axis of the project, was only interpreted by the Scia Engineer. Elements with parametric cross-sections, represented by *IfcParameterizedProfileDef* subtypes, were interpreted correctly. SAEP can only visually represent elements extruded in a given direction, so sections with variable cross-sections are ignored for visualization purposes, which explains the 97.14% percentage of interpreted geometric information. Figure 6 shows the 3D view of the geometry of the standard model in each software.

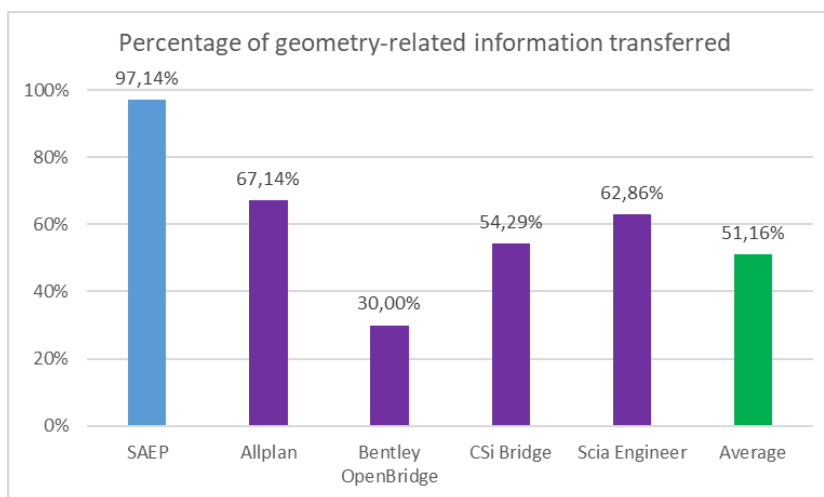


Figure 5. Percentage of geometry-related information that was interpreted in each software

Source: Authors

The association relationship between the material and the element, through the entity *IfcRelAssociatesMaterial*, was interpreted correctly in most of the elements analyzed. Apart

from SAEP, only CSI Bridge identified the material category and the name of the properties, but with incorrect values. The Allplan, Bentley OpenBridge, and Scia Engineer software did not interpret the information related to material properties. The reason is that the *IfcMaterialProperties* entity, which is responsible for defining the properties of the materials associated with an instance of *IfcMaterial*, has not been interpreted.

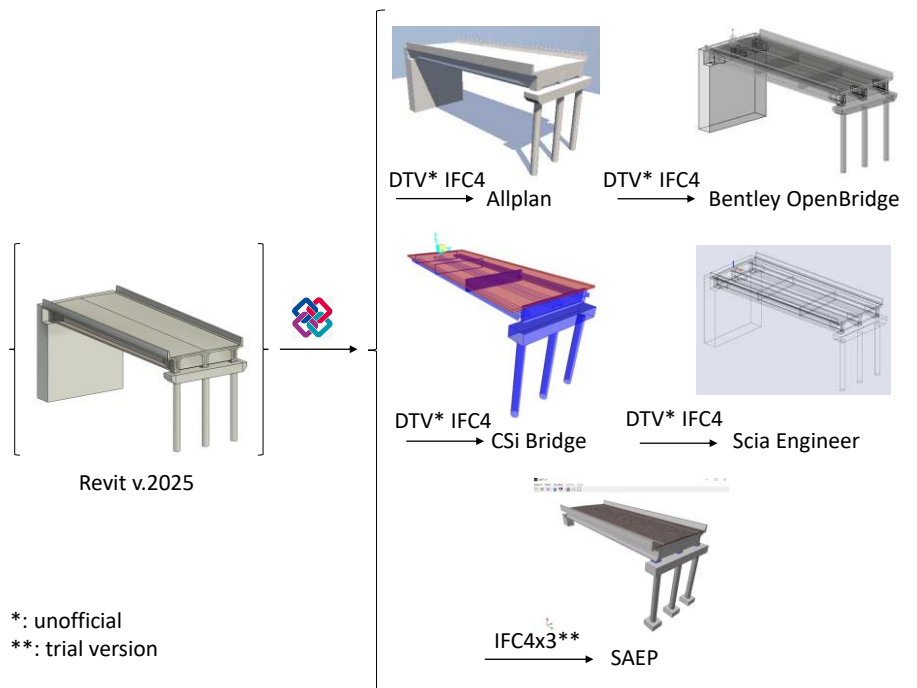


Figure 6. 3D view of the Standard Model in each software

Source: Authors

CONCLUSION

This paper presents a methodology for quantitatively determining the interoperability level for structural analysis of concrete bridges with straight beams (ILBSA, mathematically represented by λ), defining the relevance of the information using weights. In addition, a novel IFC4.3.2.0 data interpreter was implemented in the SAEP to achieve a high level of interoperability for two-dimensional structural analysis of bridges.

Based on the results presented in this work, the following contributions can be highlighted:

- Definition of the ILBSA indicator: the ILBSA was developed for the subdomain of structural bridge modeling and analysis, and the methodology applied for its determination can be applied to other subdomains by defining weights, taking into account the relevance of the imported information;
- SAEP interpreted IFC data in the IFC4.3.2.0 schema: this functionality of SAEP represents an evolution over the commercial software evaluated in this study, which did not import .ifc files in the IFC4.3.2.0 schema and did not interpret bridge elements semantically;

- In addition to interpreting design view models in the IFC4.3.2.0 schema, SAEP allowed the interoperability from the import of reference view models: the commercial software evaluated in this work only allowed the import of design view models in the IFC4 schema, containing few information for structural analysis, according to the λ values shown in Figure 2;
- Interpretation of Brep geometry and arbitrary cross-sections for structural analysis: SAEP interpreted Brep geometry, determining information related to the cross-section and positioning in the global axis. Arbitrary cross-sections, defined by *IfcArbitraryClosedProfileDef*, were interpreted and parameterized. The commercial software analyzed in this study did not parameterize an explicit geometric representation, which can lead to the consideration of three-dimensional finite elements, resulting in increased processing time in the analysis;
- Interpretation of material properties: SAEP interpreted the association relationship between the material and element, as well as material properties with names, values, and units. In general, the results showed that material properties were not interpreted by the commercial software investigated in this research.

The λ values showed that SAEP interpreted IFC4.3.2.0 data with a high semantic level. The conclusion that the amount of information that the user has to insert into the structural model to generate the analytical model is considerably less compared to other software.

The interpretation of design view models by the commercial software evaluated in this work still needs to be adjusted. Much of the relevant information is lost, and many parameters are not correctly defined. The ILBSA average value (λ_{ave}) showed that a few data can be used for structural analysis, requiring structural remodeling by the user. It can be concluded that there is an urgent need for structural bridge analysis BIM software developers to implement the reading and interpretation of design view models in the IFC4.3.2.0 schema, to make the workflow as effective as possible.

A suggestion for future research is the methodology to evaluate an interoperability level for interpretation of IFC4.3.2.0 data associated with concrete and steel-concrete bridge models with curved axes into the format corresponding to the analysis model, considering the native data structure of the receiving software and IFC.

REFERENCES

- AMANN, J., FLURL, M., JUBIERRE, J.R., BORRMANN, A. An approach to describe arbitrary transition curves in an IFC-based alignment product data model, in: **The 15th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering** (2014), Orlando, pp. 933–941. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.116>.
- AMANN, J., BORRMANN, A., SINGER, D. Extension of the upcoming IFCAAlignment standard with cross sections for road design, in: **Proceeding of the International Conference on Civil and Building Engineering Informatics** (2015), Tokyo, pp. 22–24.
- BISWAS, H.K., SIM, T.Y., LAU, S.L. Impact of Building Information Modelling and Advanced Technologies in the AEC Industry: A Contemporary Review and Future Directions, **Journal of Building Engineering** 82 (2024) pp. 108165. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108165>.
- BORRMANN, A., BEETZ, J., KOCH, C., LIEBICH, T. Industry Foundation Classes: A standardized data model for the vendor-neutral exchange of digital building models. **Building Information Modeling: Technology foundations and industry practice** (2018), pp 81–126.

- BORRMANN, A., BERKHAN, V. Principles of Geometric Modeling, in: **Building Information Modeling** (2018); Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 27–41. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>.
- BORRMANN, A., MUHIC, S., HYVÄRINEN, J., CHIPMAN, T., JAUD, S., CASTAING, C., DUMOULIN, C., LIEBICH, T., MOL, L. The IFC-BRIDGE Project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models, in: **Proceedings of the European Conference on Computing in Construction, European Council on Computing in Construction** (2019), Chania, pp. 377–386. <https://doi.org/10.35490/EC3.2019.193>.
- CEROVSEK, T. A review and outlook for a “Building Information Model” (BIM): A multi-standpoint framework for technological development, **Advanced Engineering Informatics** 25 (2011), pp. 224–244. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.003>.
- CHEN, P.H., CUI, L., WAN, C., YANG, Q., TING, S.K., TIONG, R.L.K. Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers, **Automation in Construction** 14 (2005) pp. 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.013>.
- DENG, X.Y., CHANG, T.-Y.P. Creating structural model from IFC-based architectural model, in: **Proceedings of the Joint CIB W78, W102, ICCCB, ICC, and DMUCE International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering** (2006), Montreal, pp. 3687–3695.
- EL DEBS, M.K., **Pontes de concreto com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados**, 1st edition, Oficina de Textos (2021) (ISBN 978-65-86235-31-9).
- GAO, G., LIU, Y.-S., WU, J.-X., GU, M., YANG, X.-K., LI, H.-L., IFC Railway: A Semantic and Geometric Modeling Approach for Railways based on IFC, in: **16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering** (2016), Osaka, pp. 1188–1195.
- GIRARDET, A., BOTON, C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis, **Automation in Construction** 126 (2021), pp. 103679. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103679>.
- HASSANIEN SERROR M., INOUE, J., ADACHI, Y., FUJINO, Y. Shared computer-aided structural design model for construction industry (infrastructure), **CAD Computer Aided Design** 40 (2008), pp. 778–788. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2007.07.003>.
- HU, H., CHEN, S., SRIKONDA, R., ALI, N. Development of alignment-based parametric data exchange schema for bridge geometry, **Transportation Research Record** 2460 (2014), pp. 22–30. <https://doi.org/10.3141/2460-03>.
- HU, Z.Z., ZHANG, X.Y., WANG, H.W., KASSEM, M. Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools, **Automation in Construction** 66 (2016), pp. 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.001>.
- JAUD, Š., ESSER, S., BORRMANN, A., WILKSTRÖM, L., MUHIC, S., MIRTSCHIN, J. A critical analysis of linear placement in IFC models, in: **European Conference on Product and Process Modeling** (2021), Moscow, pp. 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003191476>.
- JEPSEN, M.S., DAMKILDE, L. A direct and fully general implementation of influence lines/surfaces in finite element software, **Advances in Engineering Software** 120 (2016), pp. 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.04.006>.
- JI, Y., BEETZ, J., BONSMAN, P., NISBET, N., KATZ, C., BORRMANN, A. Integration of Parametric Geometry into IFC-Bridge, **Proceedings of the 23rd European Conference Forum Bauinformatik** (2011), Cork, pp. 1–8.
- JI, Y., BORRMANN, A., OBERGRIEBER, M. Exchange of parametric bridge models using a neutral data format, **Journal of Computing in Civil Engineering** 27.6 (2012), pp. 593–606. [https://doi.org/10.1061/41182\(416\)65](https://doi.org/10.1061/41182(416)65).
- JIANG, S., FENG, X., ZHANG, B., SHI, J., Semantic enrichment for BIM: Enabling technologies and applications, **Advanced Engineering Informatics** 56 (2023) pp. 101961. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101961>.

- JUSTO, A., LAMAS, D., SANCHEZ-RODRIGUEZ, A., SOILÁN, M., RIVEIRO, B. Generating IFC-compliant models and structural graphs of truss bridges from dense point clouds, **Automation in Construction** **149** (2023), pp. 104786. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104786>.
- KARAMAN, S., CHEN, S., RATNAGARAN, B. Three-dimensional parametric data exchange for curved steel bridges, **Transportation Research Record** (2013), pp. 27–34. <https://doi.org/10.3141/2331-03>.
- KHATTRA, S., PUNJAB, I., SINGH, H. Generating Structural Model through Automatic Data Extraction using Openbim Technology, **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology** **11** (2020) pp. 602–613. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.7.2020.060>.
- KRIJNEN, T., NOARDO, F., OHORI, K.A., LEDOUX, H., STOTER, J. Validation and Inference of Geometrical Relationships in IFC, in: **37th CIB W78 Conference** (2020), São Paulo, pp. 98–111. <https://doi.org/10.46421/2706-6568.37.2020.paper008>.
- KUMAR, B., CAI, H., HASTAK, M. An assessment of benefits of using BIM on an infrastructure project, **American Society of Civil Engineers** (2017) pp. 88–95. <https://doi.org/10.1061/9780784481219.008>.
- KWON, T.H., PARK, S.I., JANG, Y.H., LEE, S.H. Design of railway track model with three-dimensional alignment based on extended industry foundation classes, **Applied Sciences** **10** (2020), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/app10103649>.
- LAI, H., DENG, X. Interoperability analysis of ifc-based data exchange between heterogeneous BIM software, **Journal of Civil Engineering and Management** **24** (2018), pp. 537–555. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6132>.
- LEE, S.H., KIM, B.G. IFC extension for road structures and digital modeling, **Procedia Engineering** (2011), pp. 1037–1042. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.130>.
- LEE, S.-H., PARK, S.I., PARK, J., SEO, K.-W. Open BIM-based Information Modeling of Railway Bridges and its Application Concept, in: **International Conference on Computing in Civil and Building Engineering**, ASCE (2014), Orlando, pp. 504–511. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.06336>.
- LEE, K.M., LEE, Y.B., SHIM, C.S., PARK, K.L. Bridge information models for construction of a concrete box-girder bridge, **Structure and Infrastructure Engineering** **8** (2012), pp. 687–703. <https://doi.org/10.1080/15732471003727977>.
- LIU, Z.-Q., LI, Y.-G., ZHANG, H.-Y. IFC-based integration tool for supporting information exchange from architectural model to structural model, **Journal of Central South University Technology** **17** (2010), pp. 1344–1350. <https://doi.org/10.1007/s11771-010-0640-z>.
- LIU, Z.Q., ZHANG, F., ZHANG, J. The building information modeling and its use for data transformation in the structural design stage, **Journal of Applied Science and Engineering** **19** (2016), pp. 273–284. <https://doi.org/10.6180/jase.2016.19.3.05>.
- LU, R., BRILAKIS, I. Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters, **Automation in Construction** **105** (2019), pp. 102837. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102837>.
- LUTTUN, J., KRIJNEN, T. An Approach for Data Extraction, Validation and Correction Using Geometrical Algorithms and Model View Definitions on Building Models, in: **Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering**. Springer 98 (2020): pp. 529–543. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_38.
- MARKIC, Š. IFC-Bridge: Previous initiatives and their proposals, in: **The 29th Forum Bauinformatik** (2017), Desden, pp. 12–19.
- PARK, S.I., LEE, S.H., ALMASI, A., SONG, J.H. Extended IFC-based strong form meshfree collocation analysis of a bridge structure, **Automation in Construction** **119** (2020), pp. 103364. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103364>.

- PUKL, R., PALEK, P., CERVENKA, J. The possibility of using BIM for nonlinear life-cycle analysis of concrete structures, in: **The Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016)**, Delft, Netherlands (2016), pp. 655–661. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315375175>.
- QIN, L., DENG, X.Y., LA LIU, X. Industry foundation classes based integration of architectural design and structural analysis, **Journal of Shanghai Jiaotong University Science** **16** (2011), pp. 83–90. <https://doi.org/10.1007/s12204-011-1099-2>.
- RAMAJI, I.J., MEMARI, A.M. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models, **Automation in Construction** **90** (2018) pp. 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.
- REN, R., ZHANG, J., DIB, H.N. BIM interoperability for structure analysis, in: **Construction Research Congress: Construction Information Technology - Selected Papers from the Construction Research Congress**, ASCE (2018), pp. 470–479. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.046>.
- REN, R., ZHANG, J. Comparison of BIM Interoperability Applications at Different Structural Analysis Stages, in: **Construction Research Congress: Computer Applications - Selected Papers from the Construction Research Congress**, ASCE (2020), pp. 537–545. <https://doi.org/10.1061/9780784482865.057>.
- SAMPAIO, A.Z. Geometric modeling of box girder deck for integrated bridge graphical system, **Automation in Construction** **12** (2003), pp. 55–66. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(02\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(02)00040-7).
- TANAKA, F., HORI, M., ONOSATO, M., DATE, H., KANAI, S. Bridge Information Model Based on IFC Standards and Web Content Providing System for Supporting an Inspection Process, in: **The 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering** (2017), Osaka, pp. 1140–1147.
- TRZECIAK, M., BORRMANN, A. Design-to-design exchange of bridge models using IFC: A case study with Revit and Allplan, in: **Engineering and Construction – Proceedings of the 12th European Conference on Product and Process Modeling** (2018), Munich, pp. 231–239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429506215>.
- WAGNER, A., BONDUEL, M., PAUWELS, P., RÜPPEL, U. Representing construction-related geometry in a semantic web context: A review of approaches, **Automation in Construction** **115** (2020), pp. 103130. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103130>.
- WANG, X., YANG, H., ZHANG, Q.L. Research of the IFC-based Transformation Methods of Geometry Information for Structural Elements, **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications** **79** (2015), pp. 465–473. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0111-0>.
- XU, Z., RAO, Z., GAN, V.J.L., DING, Y., WAN, C., LIU, X. Developing an Extended IFC Data Schema and Mesh Generation Framework for Finite Element Modeling, **Advances in Civil Engineering** **2019** (2019), pp. 1–19. <https://doi.org/10.1155/2019/1434093>.
- YABUKI, N., SHITANI, T. An IFC-based product model for RC or PC slab bridges, **CIB Report** (2003).
- YU, Y., KIM, S., JEON, H., KOO, B. A Systematic Review of the Trends and Advances in IFC Schema Extensions for BIM Interoperability, **Applied Sciences** **13** (2023) 12560. <https://doi.org/10.3390/app13231256>

6. PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE UMA EXTENSÃO IFC PARA DADOS DE CARGAS MÓVEIS

6.1 Informações gerais

O conteúdo deste capítulo foi submetido em formato de artigo à revista *Journal of Bridge Engineering* em 06/02/2025. Apresenta-se uma nova proposta de extensão dos dados IFC para cargas móveis, preenchendo uma lacuna deixada no capítulo 5, que abordou apenas dados gerais, geometria, posicionamento e propriedades dos materiais. Propõem-se novas entidades IFC para cargas móveis, uma vez que a estrutura de dados IFC atualmente contempla apenas cargas estáticas. A nova proposta foi avaliada por meio de comparação dos parâmetros dos dados IFC das cargas móveis com os parâmetros das cargas móveis de três softwares de análise estrutural de pontes. Aplicou-se um questionário para avaliar, de forma quantitativa, a dificuldade de implementação da importação da nova proposta nos softwares considerados.

6.2 Manuscrito

Proposal and evaluation of an IFC extension for moving loads data

Guilherme Palla Teixeira^{a*}, José Carlos Lopes Ribeiro^a, Kléos Magalhães Lenz César Jr.^a, José Maria Franco de Carvalho^a, Diôgo Silva de Oliveira^a, Lucas Andrade Nunes^a, Letícia Negrís Gardioli^a, Gustavo Henrique Nalon^b

^a *Department of Civil Engineering, Federal University of Viçosa, Viçosa, 36570-900, Brazil.*

^b *Department of Civil Engineering, Federal University of Lavras, Lavras, 37200-000, Brazil.*

**Corresponding author. Telephone: (+55) 32 99113-7236, email: guilherme.palla@ufv.br*

Abstract

The IFC (Industry Foundation Classes) data structure standardizes the information exchanged to guarantee interoperability between BIM platforms and software. The IFC4x3 schema encompasses entities beyond building elements, such as bridges, rail, and roads. However, within the structural analysis domain, IFC lacks specific entities to represent data on moving loads acting on road bridges or overhead cranes. Using data from static loads to represent moving loads is not appropriate because, in addition to the semantics being wrong, it would require defining the static position of these loads, and not the region through which the load can move. Therefore, moving load data remains non-interoperable, which can lead to rework or even mistakes in structural analysis. This work defines an IFC data structure extension within the structural analysis domain, covering moving loads from the most varied types of engineering problems. The proposed changes allowed for a better data structure from a semantic point of view, with the definition of the moving load configuration and the corresponding results, facilitating the implementation of data import and export solutions in structural analysis software. Through the application of a questionnaire, the parameterization used in the proposed IFC extension for moving loads data was compared with the moving loads parameters of three bridge structural analysis software (Allplan Bridge, CSi Bridge, and Scia Engineer). Scores ranging from 0 to 10 were assigned to measure the difficulty of implementing the IFC data import functionalities proposed in these three programs. The results demonstrated that Allplan Bridge and CSi Bridge require more extensive implementation compared to Scia Engineer,

which was found to offer a simpler interpretation of the IFC data for moving loads, based on the innovative IFC extension proposed in the present work.

Keywords: Building Information Modeling. Industry Foundation Classes. Moving loads. Structural analysis. Bridges.

1. Introduction

One of the fundamental pillars of BIM (*Building Information Modeling*) is IFC (*Industry Foundation Classes*) interoperability, which enables efficient data exchange between multiple applications without loss and with a high semantic level. The IFC data structure is extremely comprehensive in managing information related to architectural, structural, and facilities projects. However, it is unrealistic to assume that project participants will be able to consistently receive data from other disciplines without errors [1]. This occurs because it is difficult for software developers to fully implement the export of .ifc files, making the process both unfeasible and costly [2]. As a result, only the data considered relevant by the receiver must be exported, resulting in the IDM (*Information Delivery Manual*) and MVD (*Model View Definition*) methodologies [3].

For the required information related to structural analysis, buildingSMART International (bSI) considers the MVD *Structural Analysis View* (SAV) in the IFC2x3 schema. This MVD defines IFC entities related to static loads, boundary conditions, connections, analytical elements, cross-sections, and associated materials, among others [4]. It is a complex and extensive view model, which makes it difficult to implement the export and maintenance of this data in structural analysis software [5]. Therefore, commercial structural analysis software needs better support for importing and exporting IFC data [6], especially for information related to structural analysis results, such as reactions and internal stresses [7].

The IFC data structure does not yet consider structural elements subjected to moving loads in the SAV. Consequently, there are no IFC entities available for the analysis results of these structural elements, such as the maximum and minimum values of internal stresses at certain points of girders and bridge decks. This information is important, especially when calculating the load-bearing capacity of these elements, in which the information of a moving load must be transferred without information loss and at a high semantic level.

This paper proposes an IFC data extension to represent the moving loads and their corresponding structural analysis results so that can be parameterized with as minimal information as possible. This IFC data extension was implemented in a concrete bridge structural analysis software called SAEP. Since influence function values (influence lines and surfaces) would lead to a large amount of information, it was decided to consider only the

maximum and minimum force values at a specific point in the structure. Using the proposed entities, four distinct engineering case studies were tested. In addition, an innovative methodological framework is proposed to compare the moving load data parameterization in three commercial software (Allplan Engineering, CSi Bridge, and Scia Engineer), evaluating the difficulty of implementing the interpretation of the IFC moving load data functionality proposed in this work.

2. IFC and structural analysis

2.1 Entities and IFC data structure for structural analysis

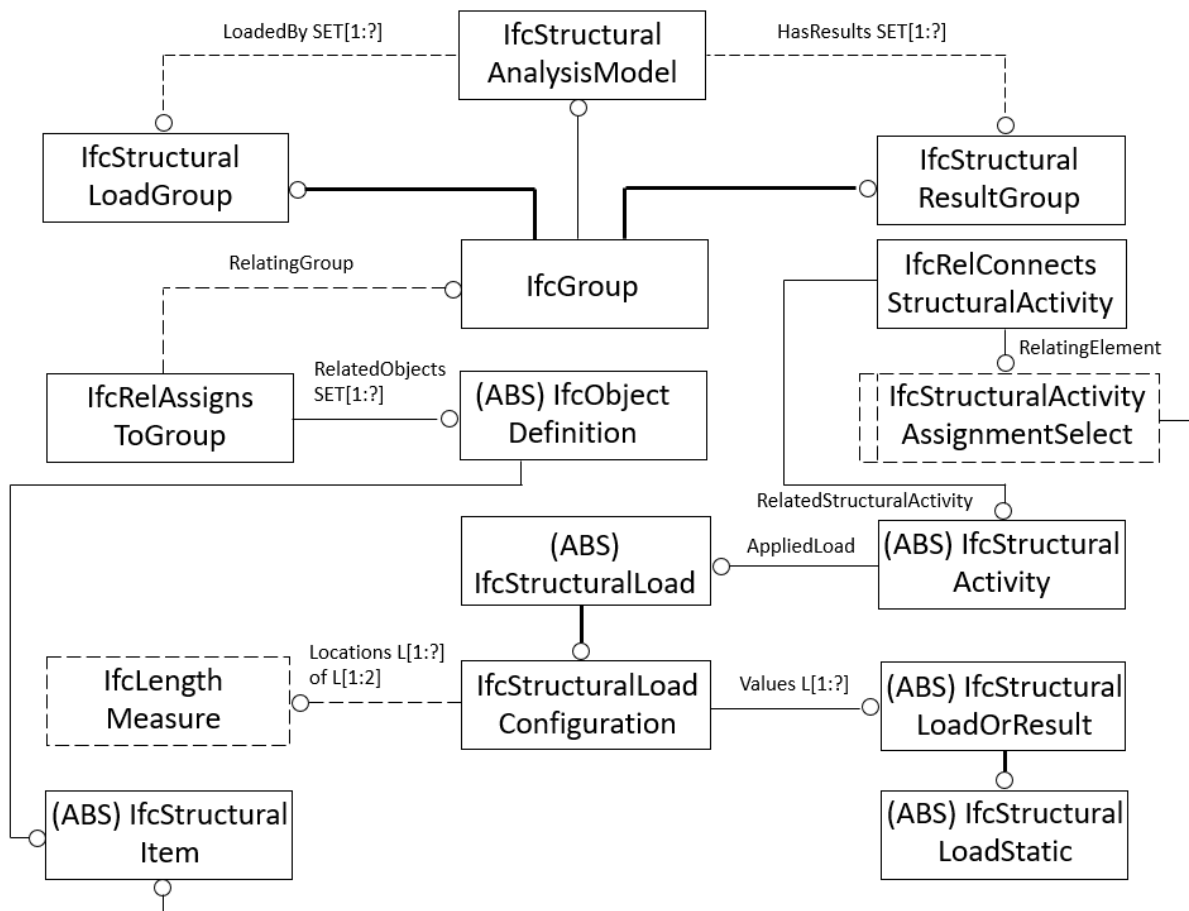
The IFC data architecture separates the IFC entities for structural analysis into two layers: the *resource layer* and the *domain layer*. The bSI defines the resource type for structural analysis, named *IfcStructuralLoadResource*, which presents the IFC entities for loads, internal stresses, boundary conditions, and connection conditions [8]. These resources are used in the structural analysis domain, called *IfcStructuralAnalysisDomain*. This domain includes the definition of straight or curved analytical elements, surface analytical elements, supports, load cases, load combinations, and analysis results [9]. The structural analysis domain does not yet include dynamic analysis, prestressed loads, finite element topology, and stress and strain results in finite element meshes [9].

Figure 1 shows the EXPRESS-G diagram summarizing the definition of the IFC static loads and their relationships. The *IfcStructuralAnalysisModel* entity is instantiated to gather all the information related to the structural items, such as the analytical elements, supports and connections, and loads, with or without associated analysis results (reactions). The entities corresponding to the definition of the group of all loads on the entire model (*IfcStructuralLoadGroup*) and the group of all reactions (*IfcStructuralResultGroup*) are instantiated using the *LoadedBy* and *HasResults* attributes, respectively. Structural analytical objects can be defined as subtypes of *IfcObjectDefinition*, using *IfcStructuralItem* for analytical structural elements such as members and plates or shells, and actions/reactions as subtypes of *IfcStructuralLoad*. The values of actions/reactions, along with their respective positions, are defined using the *AppliedLoad* attribute of *IfcStructuralActivity*. To define a configuration of actions/reactions at certain points, the *IfcStructuralLoadConfiguration* is the most efficient entity. The list of actions/reactions is defined at each position using the *Values* and *Locations* attributes of *IfcStructuralLoadConfiguration*. Therefore, subtypes of *IfcStructuralLoadStatic*

are used to define the values of these static actions/reactions, including point, linear, and surface loads, as well as displacements and temperature loads. For example, the hierarchical structure of IFC entities for defining static point actions/reactions is shown in Figure 2.

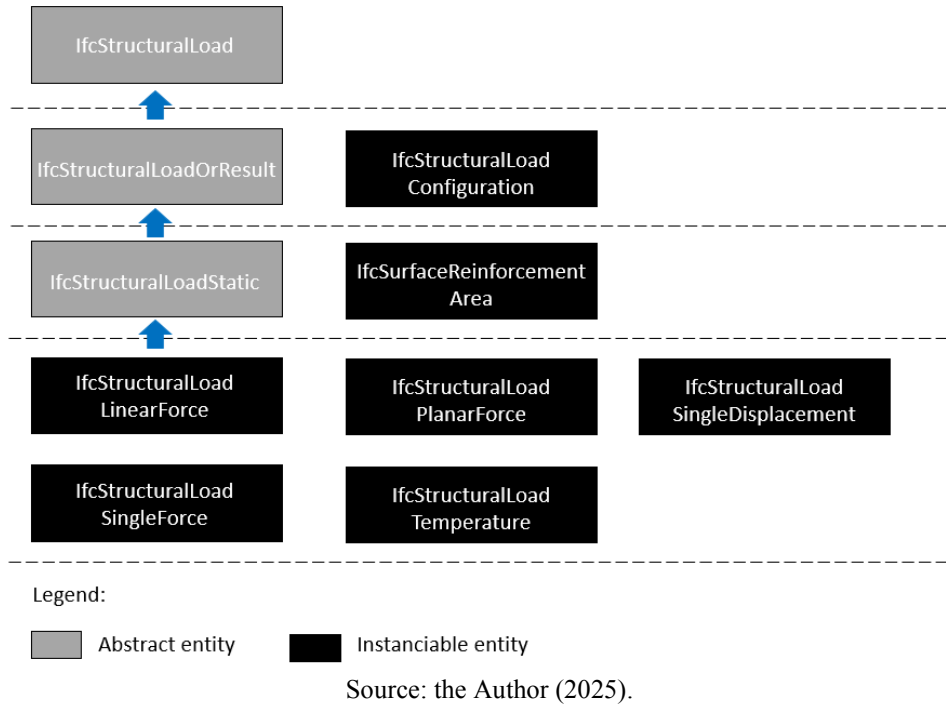
All structural items are related via *IfcRelAssignsToGroup*, using *IfcStructuralAnalysisModel* as the related group. Actions/reactions, defined as subtypes of *IfcStructuralActivity*, are also related by *IfcRelAssignsToGroup*, using *IfcStructuralLoadGroup* for actions and *IfcStructuralResultGroup* for reactions. The connecting relationship between the structural item and the actions/reactions is achieved using *IfcRelConnectsStructuralActivity*.

Figure 1 – Part of the EXPRESS-G diagram illustrating the definition and relationships of static actions/reactions and structural items.



Source: the Author (2025).

Figure 2 – Hierarchical structure of IFC entities for numerical values of static point load (actions/reactions).



2.2 MVD *Structural Analysis View*

IFC entities represent semantically defined BIM objects in the AEC (Architecture, Engineering, and Construction) industry, as well as geometric representations, relationships, materials, performance, fabrication, and properties [2]. Since the IFC data structure is extensive and complex, its full implementation in BIM software is practically unfeasible [3]. To avoid increasing the level of implementation in exporting IFC data, considering all possible forms of representation, bSI proposed the IDM-MVD methodology. This approach consists of defining data exchange requirements between BIM software, while exchanging only a subset of the IFC data domain, simplifying the process of receiving information for specific purposes [3]. According to Luttun and Krijnen [10], MVD and IFC can make the BIM workflow more complex, requiring a thorough understanding of the IFC schema and its construction. Therefore, the specifications of a view model must be simple and sufficient to meet the needs of exporting and importing IFC data between BIM software [11,12].

For structural analysis purposes, bSI has proposed the *MVD Structural Analysis View* (SAV) in the IFC2x3 schema. The MVD SAV considers the analytical model, representing the linear structural elements as curves that pass through the center of gravity of the cross-section and are linked to the section information. The two-dimensional elements are represented by

surfaces with thickness values at relevant points. In addition, MVD SAV takes into account information related to connections, static loads, and structural analysis results.

MVD SAV has some limitations that reduce its use in the construction industry. According to Ramaji and Memari [5], MVD SAV is not available in most BIM software due to the high cost of implementation and maintenance. This makes the interoperability of structural analysis data unfeasible and, consequently, encourages the development of tools for interpreting structural IFC data into structural analysis data, depending on the data structure of the target software. The results of Gerbino *et al.* [13] showed that IFC data exchanges using MVD SAV for ModeSt, RFEM, and SAP2000 software resulted in minimal data losses, highlighting the importance of implementing this MVD in commercial software.

2.3 Structural analysis in the research fields

Research on structural analysis using IFC data basically involves two approaches: *i*) testing interoperability between BIM modeling platforms and structural analysis software, without the need for MVD SAV; *ii*) using tools to interpret IFC data from the structural model to the analytical model. The first approach focused on the unidirectional or bidirectional IFC data flow between a BIM platform and structural analysis software, primarily assessing interpreted, uninterpreted, and incorrectly interpreted data. The main objective of the second approach is to generate the analysis model from architectural data or the structural model.

In general, various IFC data from the structural model are not adequately interpreted by structural analysis software, as demonstrated in the studies by Aldegeily *et al.* [14], Trzeciak & Borrmann [15], Ren & Zhang [6] and Teixeira *et al.* [16]. From the point of view of software developers, the main causes for the lack of interoperability between BIM platforms and structural analysis software are [17]: *i*) certified software may not be compatible with the exchange requirements it has been tested; *ii*) incorrectly implemented MVDs; *iii*) interpretation of non-standardized IFC data, impairing the relationships between the architectural domain and the structural analysis domain. According to Sibenik & Kovacic [17], interoperability improvements can be achieved by defining interpretation rules, introducing these rules in specific domains, and creating a domain certification.

Given the ongoing problems in the exchange of IFC data, tools for data have emerged as one of the main options for improving workflow efficiency. Structural model information

can be automatically extracted from IFC data from architectural models using the *IfcOpenShell* class library, as recommended by Khattra *et al.* [18] and Singh *et al.* [19]. Chen *et al.* [20], Wang *et al.* [21], Hu *et al.* [22], Liu *et al.* [23], and Ramaji & Memari [5] reported the interpretation of IFC data from architectural models for structural analysis data, in the IFC2x3 schema. Shoieb *et al.* [24] proposed a tool that interprets IFC2x3 coordination and structural analysis data for data exchange between SAP2000 and STAAD Pro software. In the studies by Xu *et al.* [25], Jia *et al.* [26], and Leonardi *et al.* [27], finite element meshes and analyses through the interpretation of IFC data. For the IFC4x3 schema, Teixeira *et al.* [16] reported a data interpretation tool from the structural model of girder bridges for structural analysis data of bridge elements, demonstrating a high level of interoperability.

Currently, moving loads data can not be imported because there are no IFC entities that encompass this type of information. Therefore, IFC data extensions must be proposed to enable the exchange of such data. An IFC data extension for bridge structural analysis was proposed by Park *et al.* [4], in which IFC entities were introduced for structural mesh-free bridge analysis. For example, the entities *IfcStructuralSingleStress* and *IfcStructuralSingleStrain* were proposed to define stress and strain values, respectively. These entities were defined as subtypes of *IfcStructuralLoadStatic*, meaning that moving loads can only be considered if their positions are explicitly defined.

The technical report by the Federal Highway Administration [28] proposes accounting for moving loads through the *IfcStructuralLoadDynamic* entity, which is defined as a subtype of *IfcStructuralLoad*. *IfcStructuralLoadDynamic* considers the evaluation of actions at various positions to determine the maximum and minimum force results. However, this approach significantly increases the amount of IFC data to be exported, with limited utilization of these data for determining the maximum and minimum forces at each point of the structural element.

3. New Proposal

A new proposal for extending the IFC data structure for structural analysis is carried out in the present research. New abstract and instantiable entities were introduced, defining moving loads and analysis results while considering the passage of moving loads over a specified path. For the current version of IFC, the entire structure of instantiable IFC entities remained

unchanged, fully leveraging the advantages of object-oriented programming for future implementations.

Firstly, Section 3.1 presents the definition of moving loads in IFC, detailing the resulting inheritance structure. Section 3.2 describes the hierarchical structure of the new IFC entities, considering the analysis results after the passage of moving loads over a specific path, determining the maximum and minimum values. Section 3.3 presents an investigation of four different case studies to validate the new proposal.

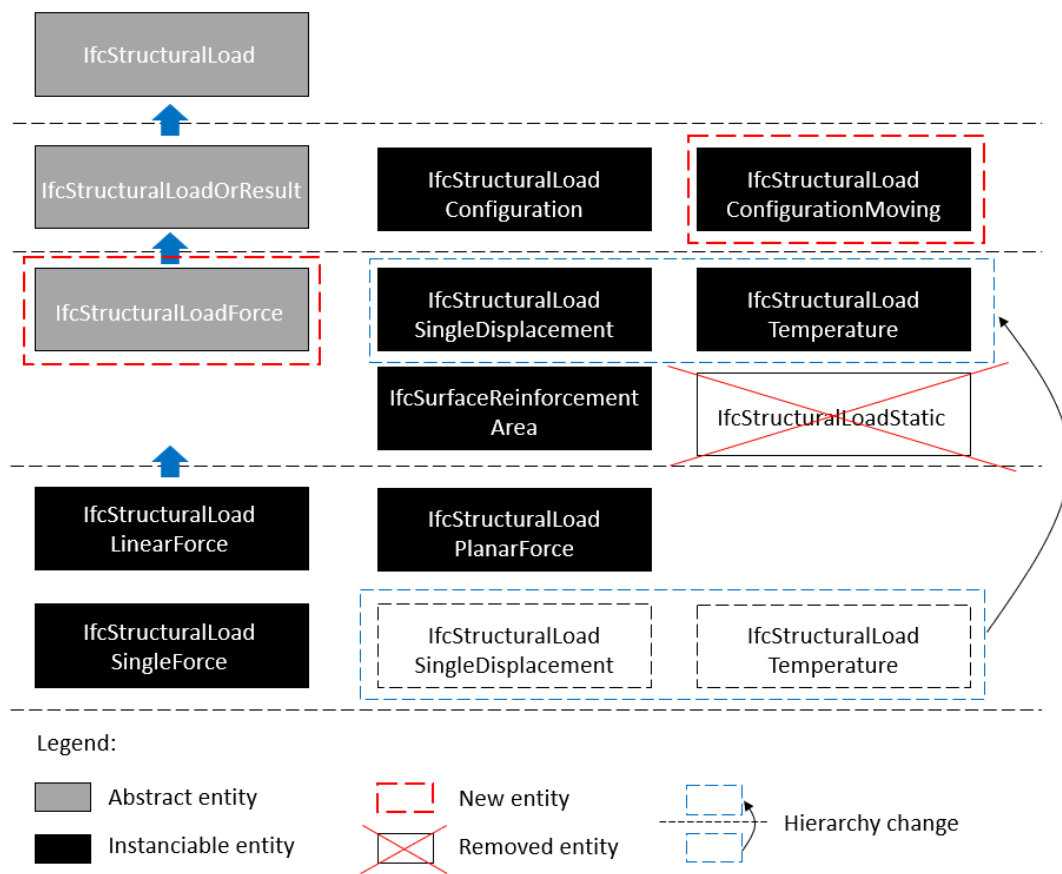
3.1 Definition of moving loads in IFC

The hierarchical structure for static actions was revised to better organize IFC entities for defining the values of static actions and moving loads. Figure 3 shows that the new proposal involves replacing the abstract entity *IfcStructuralLoadStatic* with the abstract entity *IfcStructuralLoadForce* (highlighted with a dashed red rectangle), where *IfcStructuralLoadLinearForce*, *IfcStructuralLoadPlanarForce*, and *IfcStructuralLoadSingleForce* are subtypes of *IfcStructuralLoadForce*. The entities *IfcStructuralLoadSingleDisplacement* and *IfcStructuralLoadTemperature* remain at the same hierarchical level as *IfcStructuralLoadForce* since imposed displacements and temperature variations do not directly represent forces (it is not semantically appropriate for these classes to be descendants of *IfcStructuralLoadForce*).

As a subtype of *IfcStructuralLoad*, the instantiable entity *IfcStructuralLoadConfigurationMoving* (Figure 4) was created, allowing the definition of moving load values and the positioning of each load. This new entity has six attributes: 1. *Name*: the name of the moving load, inherited from *IfcStructuralLoad*; 2. *Values*: a list of instances of subtypes of *IfcStructuralLoadForce*; 3. *LocationsSingleForce* (optional): a list containing n pairs of values of type *IfcLengthMeasure*, where each pair corresponds to the coordinates (x, y) of the applied point load relative to the center of the moving load area that is not occupied by the crowd load, if applicable (the x -axis defines the direction of the moving load traffic, and the y -axis represents the transverse direction of the moving load traffic); 4. *LocationsLinearForce* (optional): a list of m elements, where each element defines a starting point and an ending point of the linear load relative to the center of the area defined by the moving load; 5. *XDim/2* (optional): half the length (along the x -axis) of the moving load; 6. *YDim/2* (optional): half the width (along the y -axis) of the moving load.

The number of instances contained in the *Values* attribute must be at most equal to $n + m + 2$, where n is the number of point loads, m is the number of linear loads, and 2 corresponds to the number of planar loads applied at a distance x and y relative to the center of the area defined by the moving load. If the *LocationsLinearForce* attribute is not provided, the number of instances contained in the *Values* attribute is equal to $n + 2$. In addition to linear loads, planar loads are also optional. Therefore, if there are no planar loads, the number of instances contained in the *Values* attribute is equal to n .

Figure 3 – New proposal for the hierarchical structure of IFC entities for determining the values of static point loads (actions/reactions).

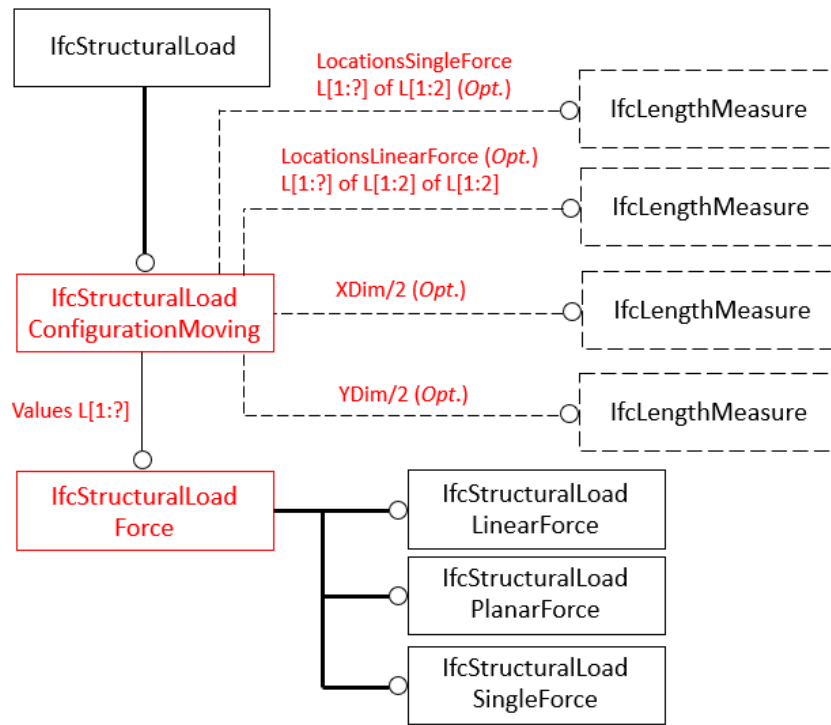


Source: the Author (2025).

The importance of creating the entities *IfcStructuralLoadConfigurationMoving* and *IfcStructuralLoadForce*, as well as the proposal to remove the abstract entity *IfcStructuralLoadStatic*, is more clearly shown in Figures 4 and 5. In the current version of IFC, the *Values* attribute of *IfcStructuralLoadConfiguration* points to a list of instances of subtypes of *IfcStructuralLoadOrResult*, which is a supertype of *IfcStructuralLoadStatic*. Moving loads only involve forces. Then, the *IfcStructuralLoadConfiguration* entity is useful only for static

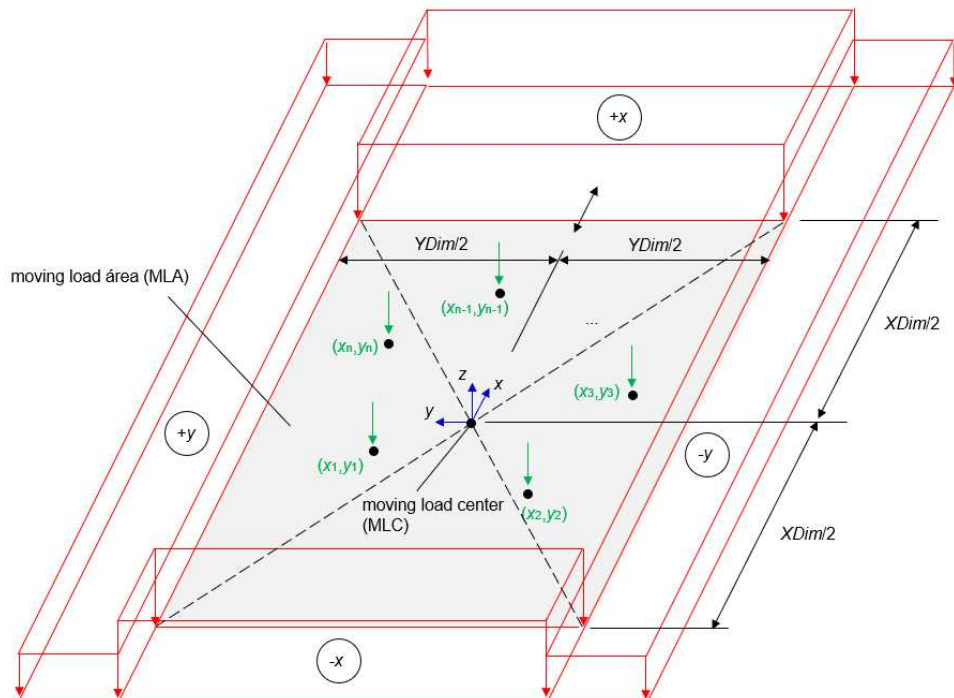
actions/reactions. As a result, there is a need to create the moving load configuration using another IFC entity.

Figure 4 – EXPRESS-G diagram for *IfcStructuralLoadConfigurationMoving*.



Source: the Author (2025).

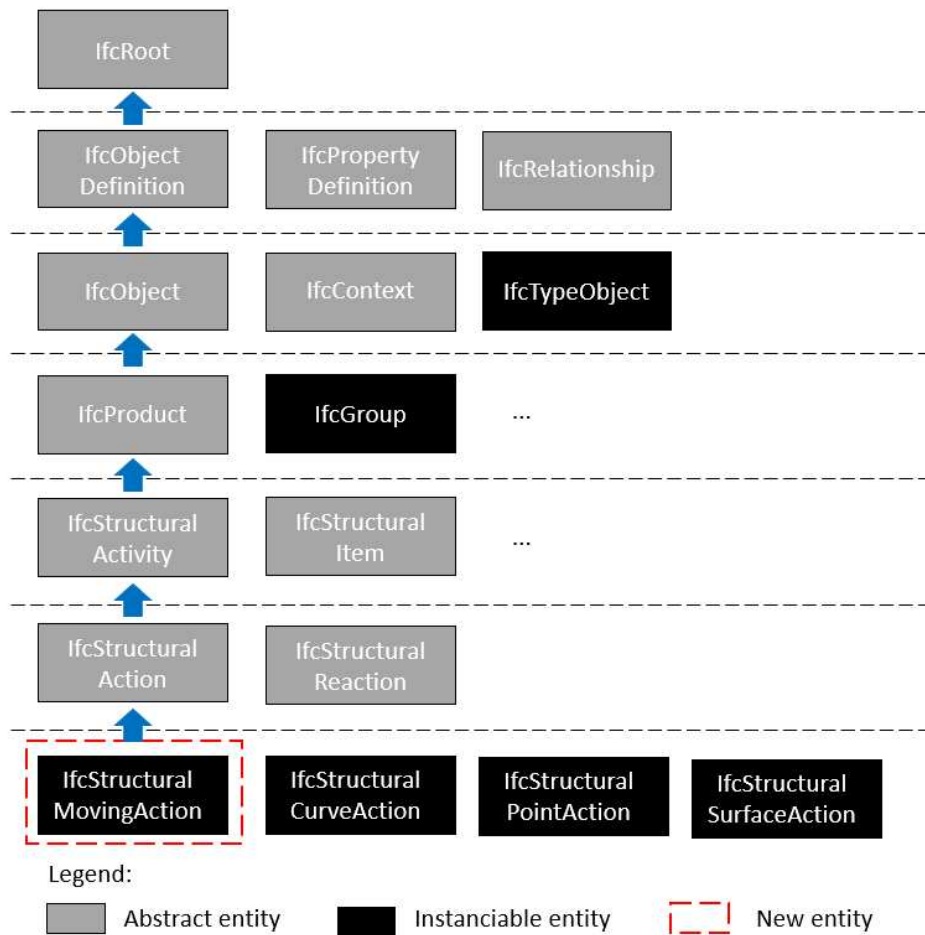
Figure 5 – Definition of the position of point and planar moving loads using *IfcStructuralLoadConfigurationMoving*.



Source: the Author (2025).

The moving load defined by *IfcStructuralLoadConfigurationMoving* is considered a single action, even though it is defined as a set of point, linear, and planar loads. This classification arises from the fact that these loads lack a fixed position and are positioned relative to the center of the area defined by the moving load. Therefore, there is a need to create an instantiable entity, a subtype of *IfcStructuralAction*, called *IfcStructuralMovingAction* (Figure 6), to define a moving load that corresponds to a set of point, linear, and planar loads.

Figure 6 – New proposal for the hierarchical structure of IFC entities for defining instances of moving loads (*IfcStructuralMovingAction*).



Source: the Author (2025).

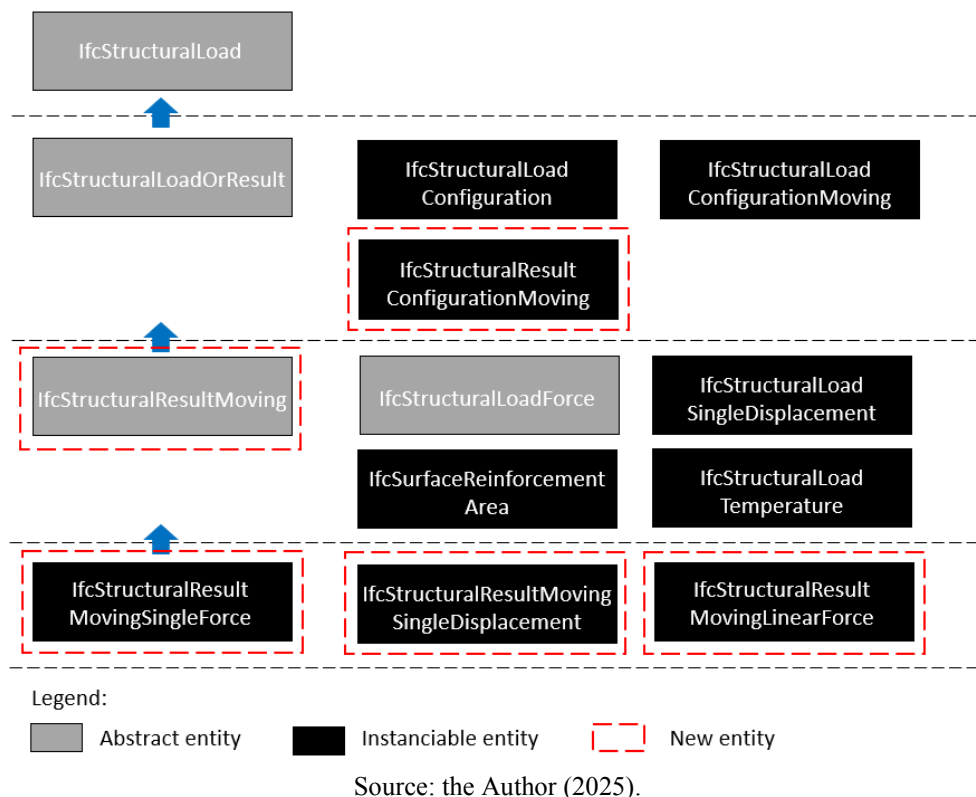
3.2 Definition of analysis results due to the application of moving loads in IFC

The structural analysis results due to the application of moving loads at a specific point of a structural element are calculated based on the positions of the moving loads. In other words, different internal force values are determined using influence functions. While it is possible to create IFC entities corresponding to the values of the influence functions at each point of the structure, this would be practically unfeasible in terms of computational effort. Therefore, the

decision was made to create IFC entities corresponding to the analysis results due to the moving load, considering the maximum and minimum values, which are essential to design structural elements as well as for the analysis of their load-bearing capacity.

Figure 7 shows the hierarchical structure of the IFC entities related to the structural analysis results due to the application of moving loads, in addition to the IFC entities defined in the previous section. The instantiable entity *IfcStructuralResultConfigurationMoving* was created to define the structural analysis results at specific points of the structural element (Figure 8). This entity has two attributes, in addition to the 1. *Name* attribute, inherited from *IfcStructuralLoad*: 2. *Values*, which corresponds to a list of instances of subtypes of *IfcStructuralResultMoving*; 3. *Locations*, which corresponds to a list of instances of subtypes of *IfcPoint*.

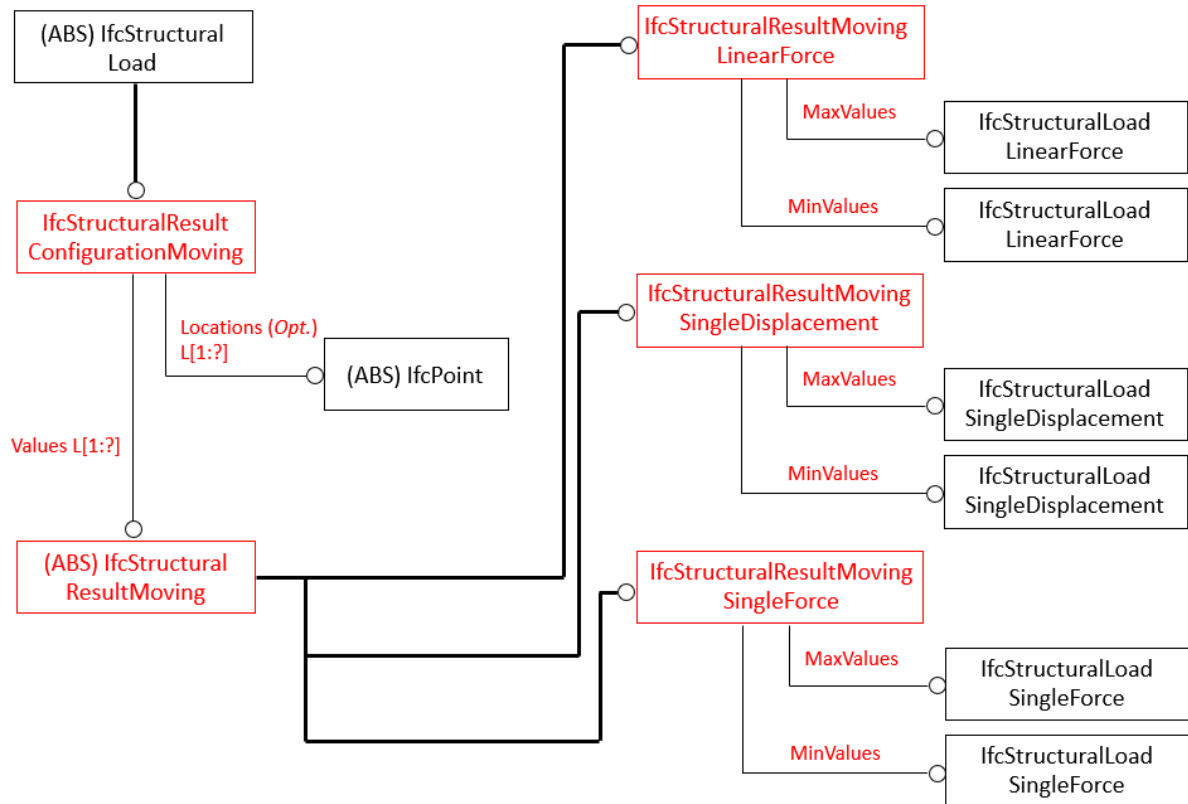
Figure 7 – New proposal for the hierarchical structure of IFC entities for determining the values of point reactions due to the application of the moving load.



IfcStructuralResultMoving is an abstract entity created to consider the analysis results due to the application of the moving load. Thus, it is the supertype of three entities that are considered 1) The results of internal forces related to forces and moments (*IfcStructuralResultMovingSingleForce*); 2) The results of displacements and rotations

(*IfcStructuralResultMovingSingleDisplacement*); and 3) The results of forces and moments per unit of length (*IfcStructuralResultMovingLinearForce*).

Figure 8 – EXPRESS-G diagram for *IfcStructuralResultConfigurationMoving*, *IfcStructuralResultMoving*, and their subtypes.



Source: the Author (2025).

The *Locations* attribute points to a list of instances of *IfcPoint* subtypes. Unlike the *IfcStructuralMovingAction* entity, *IfcStructuralReaction* must contain information about the position relative to a local coordinate system. Thus, the points are defined in relation to the *ObjectPlacement* attribute of *IfcStructuralReaction*.

The subtypes of *IfcStructuralResultMoving* have two attributes in addition to the *Name* attribute inherited from *IfcStructuralLoad*: 2. *MaxValues* and 3. *MinValues*. These attributes point to a list of instances that define the maximum (*MaxValues*) and minimum (*MinValues*) analysis results due to the moving load. For example, the entity *IfcStructuralResultMovingSingleForce* has the *MaxValues* and *MinValues* attributes, which point to *IfcStructuralLoadSingleForce*, i.e., the maximum and minimum forces located at the points described by subtypes of *IfcPoint* instances through the *Locations* attribute of *IfcStructuralResultConfigurationMoving*. For the entities *IfcStructuralResultMovingSingleDisplacement* and *IfcStructural-*

ResultMoving LinearForce, the *MaxValues* and *MinValues* attributes point to instances of *IfcStructuralLoadSingle Displacement* and *IfcStructuralLoadLinearForce*, respectively.

3.3 Case studies

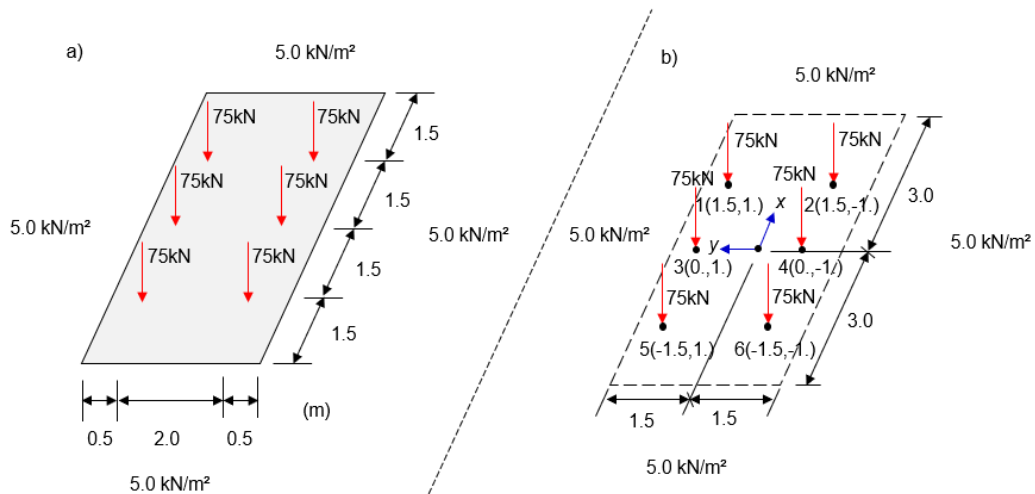
3.3.1 CS#1: Definition of a moving load for highway bridge design

A moving load for practical design of highway bridges is defined according to the Brazilian technical standard ABNT NBR 7188:2024 [29] (Figure 9) and includes the following characteristics: 1) six-point loads, each valued at 75 kN; 2) a design vehicle with a length of 6 m and a width of 3 m; 3) three sets of two loads, spaced 1.5 m apart along the length, with 2 m of spacing between them along the width; 4) a crowd load of 5.0 kN/m², applied over the entire traffic area.

Figure 10 shows the SPF (Step Physical File) format for describing the moving load in the new proposal. The *LoadedBy* attribute of the *IfcStructuralAnalysisModel* (#3198) points to a list of instances of *IfcStructuralLoadCase* (#3197), a subtype of *IfcStructuralLoadGroup* (#3196). The source of the action is a moving load, so the *ActionSource* attribute of *IfcStructuralLoadCase* is of type MOVING_LOAD_Q (new enumerator proposal).

The moving load is defined using *IfcStructuralMovingAction* (#3210), with the *AppliedLoad* attribute pointing to *IfcStructuralLoadConfigurationMoving* (#3209), the entity responsible for defining the values and positions of point loads and crowd loads over the traffic area in an *xy*-plane. The *LocationsSingleForce* attribute points to a list of six points for the location of the point loads relative to the center of the area defined by the moving load: ((1.5,1.), (1.5,-1.), (0.,1.), (0.,-1.), (-1.5,1.), (-1.5,-1.)). Since there are no linear loads, the *LocationsLinearForce* attribute is not provided (\$). The *XDim/2* and *YDim/2* attributes are 3.00 and 1.50, respectively (values in meters). Thus, the *Values* attribute points to a list with 8 instances of subtypes of *IfcStructuralLoadForce*, with six instances of *IfcStructuralLoadSingleForce* (#3203 to #3208) and two instances of *IfcStructuralLoadPlanarForce* (#3201 and #3202). All point and planar loads are in the *-z* direction relative to the local coordinate system of the moving loads. Thus, they are independent of the positioning relative to the World Coordinate System (WCS) or the project alignment.

Figure 9 – CS#1: a) Values of the moving loads and dimensions of the design vehicle; b) Position of the loads relative to the center of the area defined by the moving load.



Source: the Author (2025).

After defining the moving load (*IfcStructuralMovingAction*), the entity *IfcRelAssignToGroup* (#3211) is used to relate the instance representing the moving load action (#3210) with the instance that defines the group of the moving load in the project (#3196).

Figure 10 – CS#1: SPF format for describing the moving load for highway bridge design, as outlined in the new proposal presented in this research.

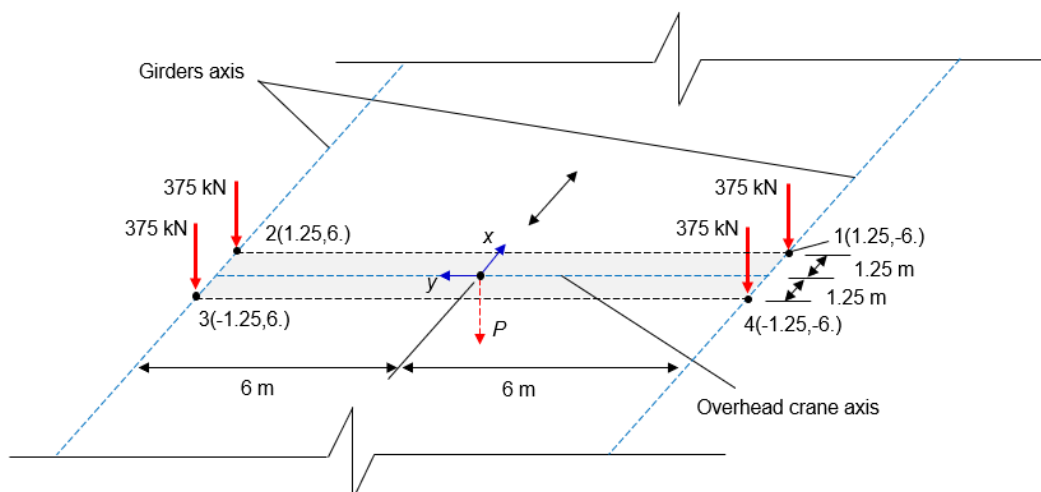
```
#3196=IFCSTRUCTURALLOADGROUP('0uY17d1wX01z2Pjff11fvv',#18,'Live',$,
$, .LOAD_GROUP., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $);
#3197=IFCSTRUCTURALLOADCASE('1yKZ_QZERAQo13pjTw3IpL',#18,'Live',$,
$, .LOAD_CASE., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $, (0., 0., 0.));
#3198=IFCSTRUCTURALANALYSISMODEL('2Su8kmjQP9QhngZXq2NLn9',#18,'Model',$, $, .LOADING_3D., #14, (#3197), $, $);
#3201=IFCSTRUCTURALLOADPLANARFORCE('y', $, $, -5.);
#3202=IFCSTRUCTURALLOADPLANARFORCE('x', $, $, -5.);
#3203=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P6', $, $, -75., $, $, $);
#3204=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P5', $, $, -75., $, $, $);
#3205=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P4', $, $, -75., $, $, $);
#3206=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P3', $, $, -75., $, $, $);
#3207=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P2', $, $, -75., $, $, $);
#3208=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P1', $, $, -75., $, $, $);
#3209=IFCSTRUCTURALLOADCONFIGURATIONMOVING('MovingLoad', (#3208, #3207, #3206, #3205, #3204, #3203, #3202, #
3201), ((1.5, 1.), (1.5, -1.), (0., 1.), (0., -1.), (-1.5, 1.), (-1.5, -1.)), $, 3.00, 1.50);
#3210=IFCSTRUCTURALMOVINGACTION('3eIzP2JLF4vhwUsdqWqxH6', #18, 'TB450', $, $, $, #3209, .LOCAL_COORDS., $);
#3211=IFCRELASSIGNSTOGROUP('8Yzq_IExpT9RR4PD$1oczk', #18, $, $, (#3210), $, #3196);
```

Source: the Author (2025).

3.3.2 CS#2: Definition of a moving load for an overhead crane

A typical definition of moving loads for an overhead crane supported on two girders is represented in Figure 11, with the following characteristics: 1) four-point loads of 375 kN each; 2) a distance between the girders axis equal to 12 m; 3) a distance between wheels along girder axes equal to 2.5 m.

Figure 11 – CS#2: Moving load of an overhead crane.



Source: the Author (2025).

Figure 12 shows the SPF format for the description of the moving load of an overhead crane. The *Values* attribute of *IfcStructuralLoadConfigurationMoving* (#3209) points to a list with four instances of *IfcStructuralLoadSingleForce* (#3205 to #3208), defining the values of the point loads of reactions from the crane bridge on the longitudinal beams. The *i*-th point in the list defined by the *LocationsSingleForce* attribute indicates the location of the *i*-th load defined in the *Values* attribute. Since there are no moving planar loads in overhead crane designs, the values of the *XDim/2* and *YDim/2* attributes are set to '\$'. There are no moving linear loads in the overhead crane design, so the *LocationsLinearForce* attribute is set to '\$'. Similarly to CS#1, the *IfcRelAssignToGroup* entity is used to relate the list of instances that defines the moving load action (#3210) with the instance that defines the group of moving loads in the project (#3196).

Figure 12 – CS#2: SPF format for the description of the moving load of an overhead crane, as outlined in the new proposal presented in this research.

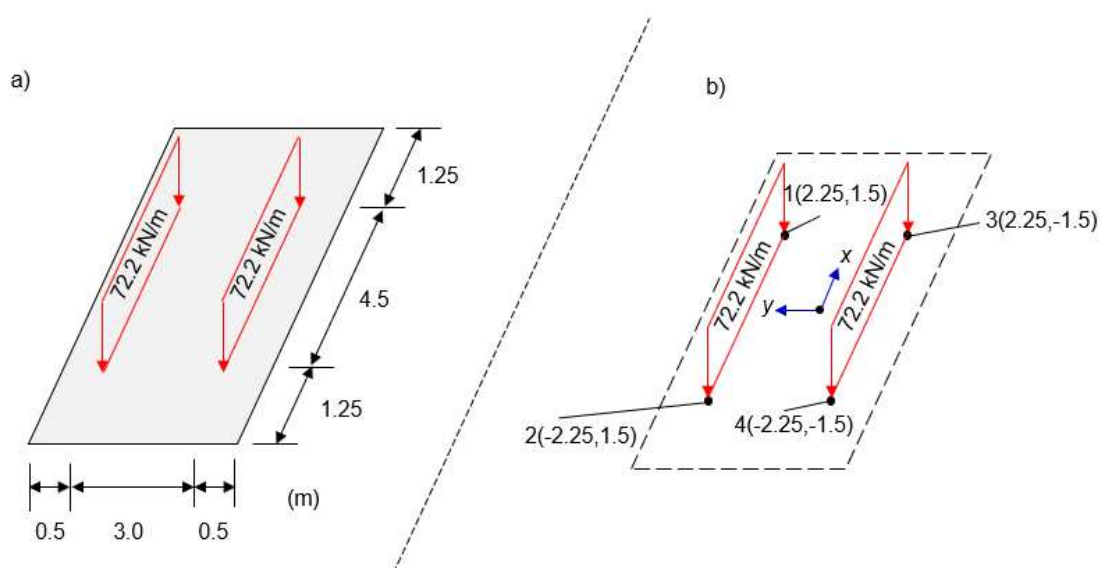
```
#3196=IFCSTRUCTURALLOADGROUP('0uY17d1wX01z2Pjff1ifvv',#18,'Live',$,
$, .LOAD_GROUP., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $);
#3197=IFCSTRUCTURALLOADCASE('1yKZ_QZERAQ0l3pjTw3IpL',#18,'Live',$,
$, .LOAD_CASE., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $, (0., 0., 0.));
#3198=IFCSTRUCTURALANALYSISMODEL('2Su8kmjQP9QhngZXq2NLn9',#18,'Model',$, $, .LOADING_3D., #14, (#3197), $, $);
#3205=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P4',$, $, -375., $, $, $);
#3206=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P3',$, $, -375., $, $, $);
#3207=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P2',$, $, -375., $, $, $);
#3208=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('P1',$, $, -375., $, $, $);
#3209=IFCSTRUCTURALLOADCONFIGURATIONMOVING('MovingLoad', (#3208, #3207, #3206, #
3205), ((1.25, -6.), (1.25, 6.), (-1.25, 6.), (-1.25, -6.)), $, $, $);
#3210=IFCSTRUCTURALMOVINGACTION('3eIzP2JLF4vhwUsdqWqxH6', #18, 'Overhead crane load', $, $, $, $, #
3209, .LOCAL_COORDS., $);
#3211=IFCRELASSIGNSTOGROUP('8Yzq_IEXpT9RR4PD$1oczk', #18, $, $, (#3210), $, #3196);
```

Source: the Author (2025).

3.3.3 CS#3: Definition of a linear moving load

The definition of a typical linear moving load is represented in Figure 13, with the following characteristics: 1) two linear loads of 72.2 kN/m each; 2) vehicle with a length of 7 m and a width of 4 m; 3) length of the linear load equal to 4.5 m; 4) transversal distance between the axes of the linear loads equal to 3 m.

Figure 13 – CS#3: a) values of the linear moving loads and vehicle dimensions; b) position of the linear loads relative to the center of the area delimited by the moving load.



Source: the Author (2025).

The SPF format for the description of the linear moving load is shown in Figure 14. The *Values* attribute defines a list with two instances of *IfcStructuralLoadLinearForce*, in which the linear load values of -72.2 kN/m are defined. Since there are no point loads, the *LocationsSingleForce* attribute is set to '\$'. If m is the number of instances contained in the list defined by the *Values* attribute related to the linear loads, then m is the number of vectors contained in the *LocationsLinearForce* attribute, with each vector consisting of 2 points. Four points are defined to locate the two linear loads, where the first point of each linear load is always the point with the highest x -coordinate, as shown in Figure 13. Although there are no planar loads, the values for the *XDim/2* and *YDim/2* attributes have been defined, indicating that the vehicle's dimensions can be easily determined using these two parameters.

Figure 14 – CS#3: SPF format for describing the linear moving load, as outlined in the new proposal presented in this research.

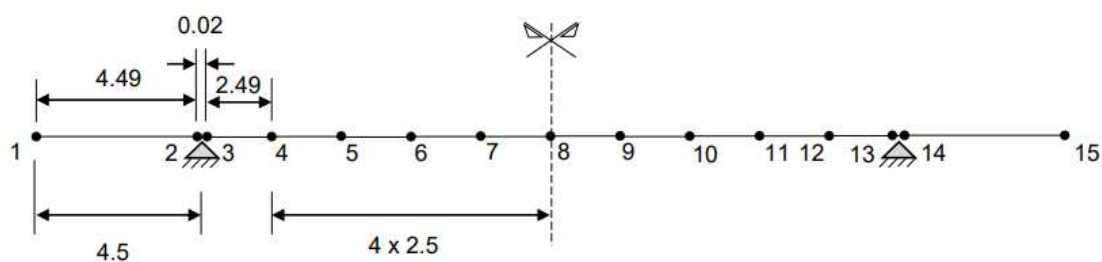
```
#3196=IFCSTRUCTURALLOADGROUP('0uY17d1wX01z2Pjff1ifvv',#18,'Live',$,
$, .LOAD_GROUP., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $);
#3197=IFCSTRUCTURALLOADCASE('1yKZ_QZERAQo13pjTw3Ipl',#18,'Live',$,
$, .LOAD_CASE., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $, (0.,0.,0.));
#3198=IFCSTRUCTURALANALYSISMODEL('2Su8kmjQP9QhngZXq2NLn9',#18,'Model',$,$, .LOADING_3D., #14, (#3197), $, $);
#3207=IFCSTRUCTURALLOADLINEARFORCE('p2',$,$,-72.2,$,$,$);
#3208=IFCSTRUCTURALLOADLINEARFORCE('p1',$,$,-72.2,$,$,$);
#3209=IFCSTRUCTURALLOADCONFIGURATIONMOVING('MovingLoad',(#3208,#3207),
$, ((2.25,1.5), (-2.25,1.5)), ((2.25,-1.5), (-2.25,-1.5)), 3.5, 2.);
#3210=IFCSTRUCTURALMOVINGACTION('3eIzP2JLF4vhwUsdqWqxH6',#18,'vehicle load',$,$,$,$,#3209, .LOCAL_COORDS.,
$);
#3211=IFCRELASSIGNSTOGROUP('8Yzq_IEXpT9RR4PD$1oczK',#18,$,$, (#3210), $, #3196);
```

Source: the Author (2025).

3.3.4 CS#4: Maximum and minimum shear force and bending moment results at nodes of analytical elements

The maximum and minimum shear forces and bending moments are considered at specific nodes of an analytical element. Figure 15 and Table 1 present the nodes and dimensions (in m) considered for each beam element, as well as the maximum and minimum values of shear force (in kN) and bending moments (in kN·m) at each node, respectively.

Figure 15 – CS#4: Dimensions (in m) of the analytical elements and representation of the nodes.



Source: the Author (2025).

Figure 16 shows the SPF format for defining the analysis results group due to the application of the moving load. The *IfcStructuralResultGroup* (#69) entity is used to group these results. The *ResultForLoadGroup* (#67) attribute is used to reference the loading group representing the result. Thus, the *HasResults* attribute of the *IfcStructuralAnalysisModel* entity points to the list of analysis results, which, in the example illustrated in Figure 11, consists only of the results due to the moving load: (#69).

Table 1 – CS#4: Global coordinates (X, Y , and Z), and maximum and minimum shear forces (S_{max} and S_{min}), maximum and minimum bending moments (M_{max} and M_{min}) each node.

Node	X (m)	Y (m)	Z (m)	Smax (kN)	Smin (kN)	Mmax (kNm)	Mmin (kNm)
1	0.00	2.65	-1.00	0.0	-145.8	0.0	0.0
2	4.49	2.65	-1.00	0.0	-465.5	0.0	-1369.9
3	4.51	2.65	-1.00	609.3	-55.0	5.2	-1375.3
4	7.00	2.65	-1.00	525.6	-57.5	1317.7	-1258.0
5	9.50	2.65	-1.00	446.1	-72.4	2318.9	-1140.4
6	12.00	2.65	-1.00	371.5	-122.4	3018.8	-1022.7
7	14.50	2.65	-1.00	301.9	-177.3	3458.0	-905.0
8	17.00	2.65	-1.00	237.1	-237.1	3608.7	-787.5
9	19.50	2.65	-1.00	177.2	-302.0	3458.0	-905.0
10	22.00	2.65	-1.00	122.4	-371.5	-1022.7	3018.8
11	24.50	2.65	-1.00	72.4	-446.1	-1140.4	2318.9
12	27.00	2.65	-1.00	57.5	-525.6	1317.7	-1258.0
13	29.49	2.65	-1.00	55.0	-609.3	5.2	-1375.3
14	29.51	2.65	-1.00	465.6	0.0	0.0	-1369.9
15	34.00	2.65	-1.00	145.8	0.0	0.0	0.0

Source: the Author (2025).

Figure 16 – CS#4: SPF format for the new proposal in defining the analysis results due to the application of moving loads.

```
#67=IFCSTRUCTURALLOADGROUP('0uY17d1wX01z2Pjff1ifvv',#3,'Live',$,
$, .LOAD_GROUP., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $);
#68=IFCSTRUCTURALLOADCASE('1yKZ_QZERAQo13pjTw3IpL',#3,'Live',$,
$, .LOAD_CASE., .VARIABLE_Q., .MOVING_LOAD_Q., $, $, (0.,0.,0.));
#69=IFCSTRUCTURALRESULTGROUP('3hp61d7fU72s80Kfs5wwqq',#3,'Live',$,
$, .FIRST_ORDER_THEORY., #67, .TRUE.);
#71=IFCSTRUCTURALANALYSISMODEL('2Su8kmjQP9QhngZXq2NLn9',#3,'Model',$, $, .LOADING_3D., #14, (#
68), (#69), $);
```

Source: the Author (2025).

The assignment relationship between the definition of analysis results for nodes 1 to 8 and the corresponding values is shown in Figure 17. Instances of *IfcStructuralPointReaction* are used to define analysis results at specific points. However, by utilizing the *IfcStructuralResultConfigurationMoving* entity (#199), the maximum and minimum values of the results are defined through the attributes *MaxValues* and *MinValues*. Thus, only one instance of *IfcStructuralPointReaction* (#200) was created, encompassing all maximum and minimum values at the nodes of the analytical elements. The internal forces were defined in the global system (*GlobalOrLocal* attribute of *IfcStructuralPointReaction*), with the shear force along the Z -direction and the bending moment about the Y -axis.

Figure 17 – CS#4: SPF format for the relationship between the definition of analysis results (nodes 1 to 8) and the entity defining the values of these results.

```
#143=IFCCARTESIANPOINT((17.,2.65,-1.));
#144=IFCCARTESIANPOINT((14.5,2.65,-1.));
#145=IFCCARTESIANPOINT((12.,2.65,-1.));
#146=IFCCARTESIANPOINT((9.5,2.65,-1.));
#147=IFCCARTESIANPOINT((7.,2.65,-1.));
#148=IFCCARTESIANPOINT((4.51,2.65,-1.));
#149=IFCCARTESIANPOINT((4.49,2.65,-1.));
#150=IFCCARTESIANPOINT((0.,2.65,-1.));

#175=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_8',,$,$,-237.1,$,-787.5,$);
#176=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_8',,$,$,237.1,$,3608.7,$);
#177=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('8',#176,#175);
#178=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_7',,$,$,-177.3,$,-905.,$);
#179=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_7',,$,$,301.9,$,3458.,$);
#180=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('7',#179,#178);
#181=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_6',,$,$,-122.4,$,-1022.7,$);
#182=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_6',,$,$,371.5,$,3018.8,$);
#183=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('6',#182,#181);
#184=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_5',,$,$,-72.4,$,-1140.4,$);
#185=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_5',,$,$,446.1,$,2318.9,$);
#186=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('5',#185,#184);
#187=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_4',,$,$,-57.5,$,-1258.,$);
#188=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_4',,$,$,525.6,$,1317.7,$);
#189=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('4',#188,#187);
#190=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_3',,$,$,-55.,$,-1375.3,$);
#191=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_3',,$,$,609.3,$,5.2,$);
#192=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('3',#191,#190);
#193=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_2',,$,$,-465.5,$,-1369.9,$);
#194=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_2',,$,$,0.,$,0.,$);
#195=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('2',#194,#193);
#196=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Min_1',,$,$,-145.8,$,0.,$);
#197=IFCSTRUCTURALLOADSINGLEFORCE('Max_1',,$,$,0.,$,0.,$);
#198=IFCSTRUCTURALRESULTMOVINGSINGLEFORCE('1',#197,#196);
#199=IFCSTRUCTURALRESULTCONFIGURATIONMOVING('MovingLoad_Shear_BendingMoment',(#198,#195,#192,#189,#186,#183,#180,#177,#176,#173,#170,#167,#166,#163,#160),(#150,#149,#148,#147,#146,#145,#144,#143,#142,#141,#140,#139,#138,#137,#136));
#200=IFCSTRUCTURALPOINTREACTION('6wQgL40TT3xdsIqjkUqzF2',#3,$,$,$,#73,$,#199,.GLOBAL_COORDS.);
#201=IFCRELASSIGNTOGROUP('5Hsj_KGFlG4BB1KI$4itbv',#3,$,$,(#199),$,#69);
```

Source: the Author (2025).

4. Methodology

A comprehensive methodology was applied in this article to assess the integration and interpretation of the IFC extension for moving loads data in bridge structural analysis process, involving two stages. The first stage consists of implementing the proposed data structure in SAEP, a bridge structural analysis software specifically developed for this study, which is capable of interpreting IFC data for moving loads. The second stage focuses on applying a questionnaire with ten questions related to the difficulty of interpreting IFC moving load data into the native data structure of different commercial software packages: Allplan Bridge 2024, CSI Bridge v.23.0.0, and Scia Engineer v.24.0.

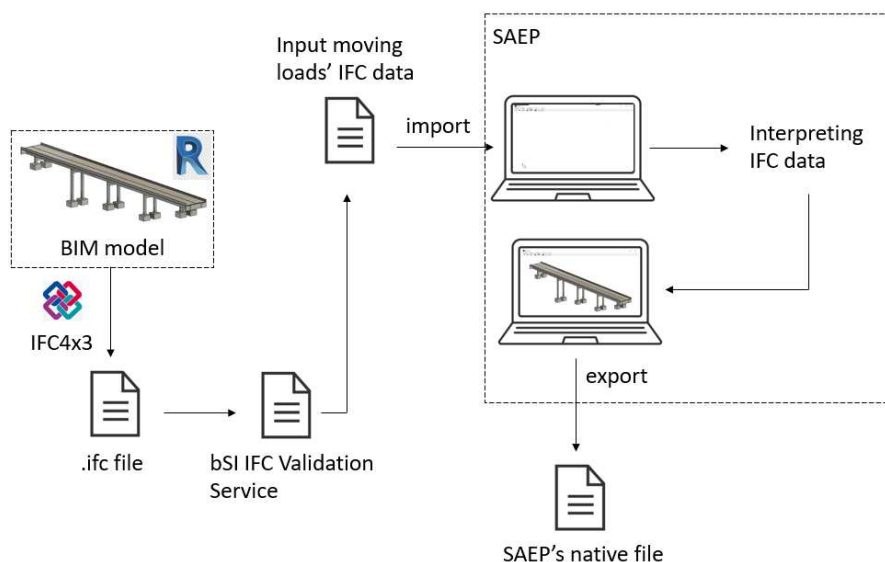
4.1 Implementation of the proposed data structure in a bridge structural analysis software

Some commercial software for structural analysis and bridge design can import and export .ifc files. However, IFC data for moving loads are not interoperable. The parameterization of moving loads in bridge structural analysis software reveals the challenges associated with interpreting and exporting these data. A high level of difficulty may discourage the use of IFC as an open standard for data exchange between software applications.

The IFC data structure proposed in this study was implemented in the concrete girder bridge structural analysis software called SAEP, which enables the modeling of straight-axis concrete girder bridges using parametric data. Moreover, SAEP imports .ifc files in the IFC4x3 schema, utilizing an IFC data interpreter for general information, bridge element semantics, geometry, and materials [16].

Figure 18 summarizes the proposed workflow for interpreting IFC data of moving loads using SAEP. Revit v.2025, a BIM platform that exports data in the IFC4x3 schema, was used to model a concrete girder bridge as practical case study. This model included the following components: 1) general information, such as the project name and location; 2) element semantics, i.e., the predefined type of bridge elements; 3) geometry chosen as a combination of extrusions and boundary representations (Boundary Representation - Brep); and 4) material data, such as density, Poisson's ratio, and Young's modulus. To validate the .ifc file exported from Revit, the bSI IFC Validation Service was used to correct any issues. Once the .ifc file is validated, the IFC data for moving loads from CS#1 is inserted into the .ifc file and imported into SAEP. SAEP features an IFC4x3 data interpreter for structural bridge analysis purposes, as well as the interpretation of moving load data according to the new approach presented in this work. Thus, the relevant information for performing the structural analysis of the bridge is automatically inserted into SAEP, ensuring interoperability in the Revit / SAEP workflow and effectively preventing loss of data.

Figure 18 – Workflow for interpreting IFC data for moving loads into SAEP.



Source: the Author (2025).

4.2 Assignment of scores related to the difficulty of interpreting IFC data for moving loads

Three commercial software packages for structural analysis of bridges were subjected to a structured evaluation to assess the difficulty of interpreting IFC data for moving loads, based on responses to a questionnaire, as shown in Table 2. Each software received a final score ranging from 0 to 10, with higher scores reflecting greater ease of interpretation. The evaluation started with a score of 10, which was adjusted after each question based on the responses of “Yes”, “Partially”, or “No”. The answers to questions Q3, Q6, and Q10 could be indirect, as they included a “Partially” option, which falls between “Yes” or “No”. Negative or partial responses led to a score decrease and advanced the evaluation. Each positive response maintained the score and advanced the evaluation. The scoring system categorized the final results into three distinct levels of difficulty: scores from 7 to 10 indicated that the IFC data moving loads was easy to interpret (*Easy*), scores from 3 to 7 are suggested moderate difficulty (*Medium*), and scores from 0 to 3 indicated a hard level of difficulty in interpretation (*Hard*).

The questions were formulated taking into account an efficient parametrization for moving loads, i.e., involving the minimum number of parameters possible and with a high semantic level in the data exchange process. The parameters considered were: *i*) the positions of point, linear, and planar loads; and *ii*) the values of point, linear, and planar loads.

Table 2 – Questionnaire and scoring assignment from 0–10 for evaluating the difficulty of interpreting IFC data for moving loads according to the new proposal presented in this research.

	Question	“Yes”	“Partially”	“No”
Q1	Are the point loads positioned on a plane (xy, yz, or xz)?	Go to Q2	-	-2, go to Q3
Q2	Is the coordinate system origin positioned at the moving load's area?	Go to Q3	-	-1, go to Q3
Q3	Are the point load values interpreted directly?	Go to Q4	-0.5, go to Q4	-1, go to Q4
Q4	Does the software have the option to insert linear loads?	Go to Q5	-	-3, go to Q7
Q5	Are the linear loads positioned on the point loads?	Go to Q6	-	-1, go to Q6
Q6	Are the linear load values interpreted directly?	Go to Q7	-0.5, go to Q7	-1, go to Q7
Q7	Does the software allow insertion planar loads in the areas located at the left, right, front, and back of the area delimited by the point loads?	Go to Q8	-	-1, go to Q8
Q8	Can the planar load values on the left/right be different from the planar load values on the front/back?	Go to Q9	-	-1, go to Q9
Q9	Are the planar loads positioned on the point loads?	Go to Q10	-	-1, go to Q10
Q10	Are the planar load values interpreted directly?	-	-0.5	-1

Source: the Author (2025).

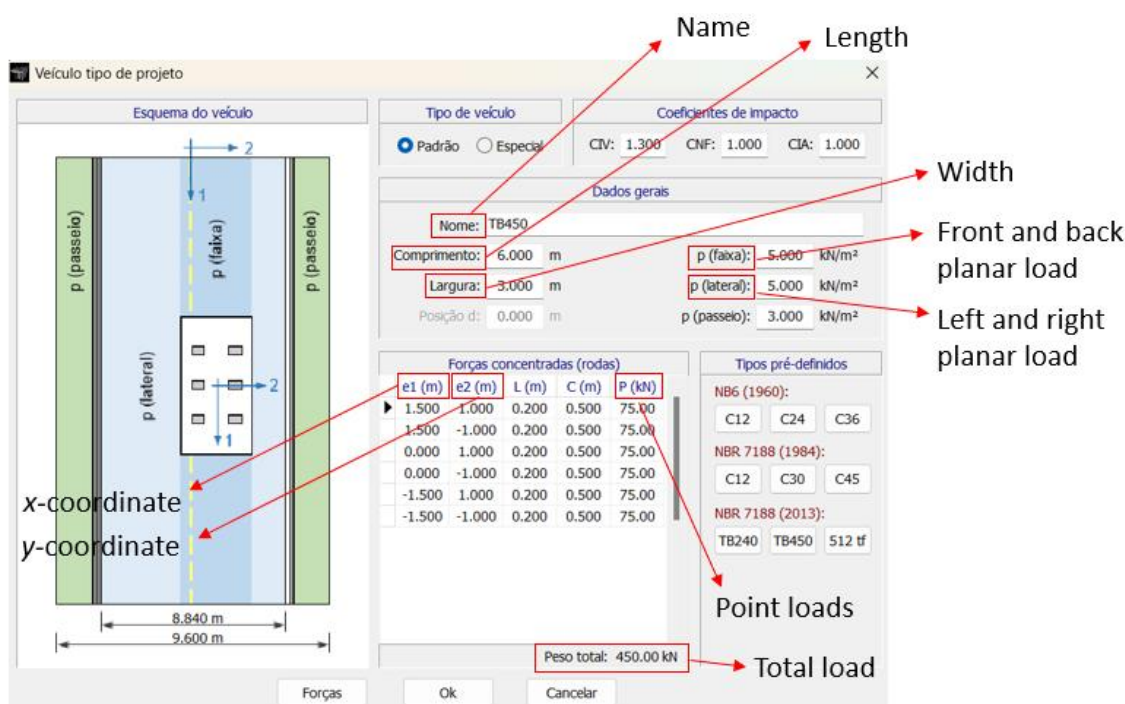
Negative responses to some questions may invalidate others, lowering the software's score. For example, question Q1 is related to the positioning of point loads in relation to a coordinate system, while question Q2 refers to the position of the origin of that system. If the positioning of the moving loads is not linked to a coordinate system, question Q2 is automatically invalidated, and the software will lose points for both questions. The same applies to question Q4.

5. Results

5.1 Interpretation of IFC data for moving loads into SAEP

The results of importing the IFC data for moving loads into SAEP are shown in Figure 19. The user has access to the moving load information in SAEP through the 'Design vehicle' window, which displays the values of vehicle's length and width, the positions and values of point loads, as well as the values for lateral and lane crowd loads.

Figure 19 – Moving load parameters in SAEP provided by the new proposal for IFC data interpretation presented in this research.



Source: the Author (2025).

Some information was not interpreted by SAEP because it is not covered by the proposed IFC data structure, such as impact coefficients, wheel length and width, and sidewalk crowd load. SAEP positions the moving load at specific points on the deck in order to generate the maximum and minimum forces on the structural elements. The impact coefficients may vary depending on the design standard, which is why they are not included in the IFC data structure. The value of the planar load on the sidewalk also depends on the design standard and is applied only in the areas that generate the maximum and minimum forces.

5.2 Software ratings and classification for interpreting IFC data of moving loads

The questionnaire results for the selected commercial software are presented in Table 3. The software CSi Bridge and Allplan Bridge demonstrated an intermediate level of difficulty in interpreting IFC data of moving loads, according to the proposal presented in this work. Therefore, these software require greater implementation requirements compared to Scia Engineer, which was found to offer an easier interpretation of IFC data of moving loads.

Table 3 – Questionnaire responses on the level of difficulty in interpreting IFC data for moving loads proposed in this work.

Question	CSi Bridge	Allplan Bridge	Scia Engineer
Q1	No	No	Yes
Q2	No	No	Yes
Q3	Partially	Partially	Partially
Q4	Yes	Yes	Yes
Q5	No	No	No
Q6	No	Partially	Partially
Q7	Yes	Yes	Yes
Q8	Yes	Yes	Yes
Q9	Yes	Yes	Yes
Q10	No	Partially	Partially
Total score	4.5	5.5	7.5
Classification	Medium	Medium	Easy

Source: the Author (2025).

Table 3 shows that some features are common among the analyzed software. All programs support the insertion of linear loads in the traffic direction, and these loads are positioned relative to the point loads. In addition, planar loads can be located to the left, right, in front, and behind the vehicle. However, some strategies must be used in this case, such as the superposition of effects, through the definition of more than one moving load.

The method for positioning point loads is one of the distinguishing factors between CSi Bridge, Allplan Bridge and Scia Engineer. The former two allow positioning point loads using distances from the previous load's position, while Scia Engineering places positions point loads according to a reference system on the plane. CSi Bridge considers the total value of point loads per vehicle axle, the distance between these loads, and the number of point loads per axle. Allplan Bridge considers point loads within a user-defined lane. Scia Engineer defines point loads on a plane, in addition to specifying the dimensions of the wheel contact with the pavement.

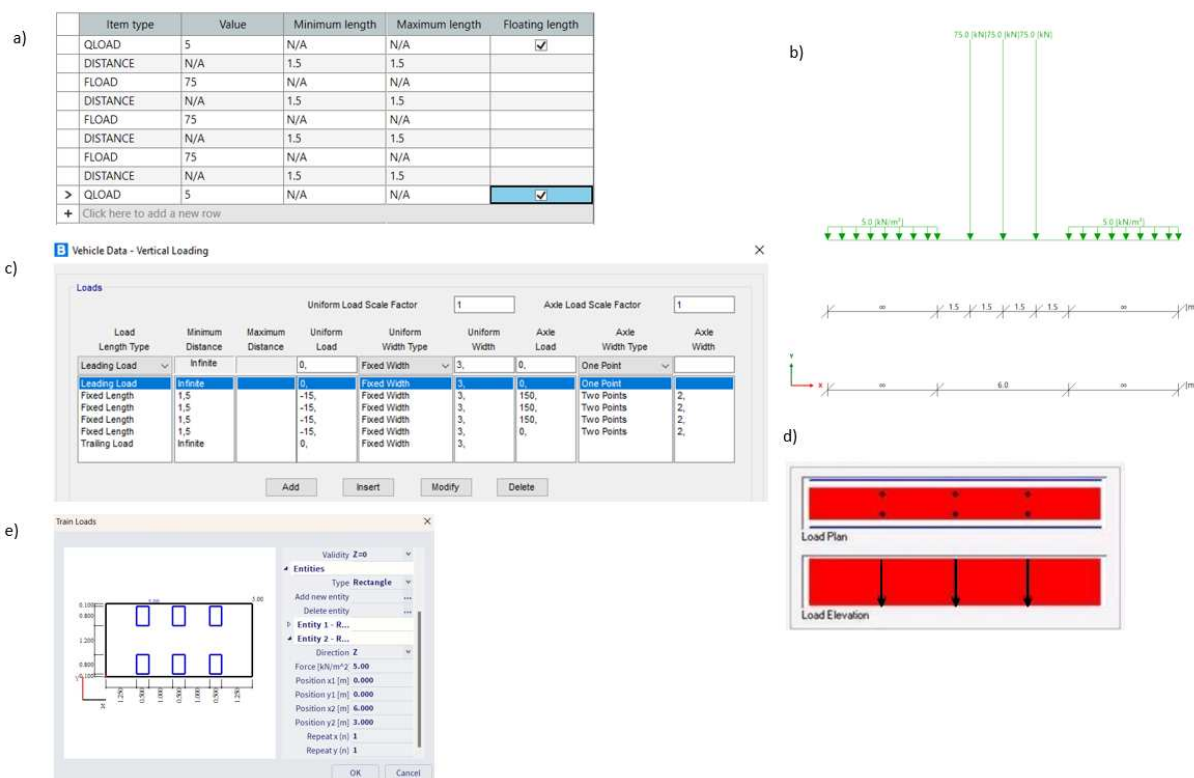
The new proposal for the planar loads parametrization considers the distance between the center of the area delimiting the vehicle and the vehicle's edges in both the longitudinal and transverse directions of the bridge. CSi Bridge considers planar loads based on the linear load along the longitudinal direction, with the additional information regarding the load's acting width. However, for moving planar loads, the width of the load is considered infinite, depending on the load's position for determining the maximum and minimum forces. Allplan Bridge and Scia Engineer consider the application of the moving planar load independently of width, which

offers an advantage over CSi Bridge. The new proposal does not consider moving planar loads with finite width, as the position of the loads varies depending on the type of force the user requires.

Linear loads can be parametrized in all three analyzed software. However, none of them consider the position of the initial and final points relative to the coordinate system positioned at the center of the vehicle's area. All three software would need to interpret the positioning of linear loads translating from the local system of the IFC data to the local system of moving loads within each software.

Figure 20 shows the parametrization of the moving load using the three software. Scia Engineer stands out for having the most compatible parameters with the new proposal for IFC data of moving loads, highlighting the position of the loads according to a reference system on a plane. CSi Bridge presents a more complex parametrization than the other software, requiring the total point load on the axle, the axle width, and the number of point loads distributed across this width. Allplan Bridge has a more similar parameterization of IFC data for moving loads, compared to CSi Bridge, due to its better interpretation of linear and planar loads. It is important to note that the 2024 version of Allplan Bridge still lacks the option to import and export IFC data for any schema, which is a disadvantage compared to the other analyzed software.

Figure 20 – Parametrization of moving loads in the analyzed software: a) parameters in Allplan Bridge; b) moving load scheme in Allplan Bridge; c) parameters in CSi Bridge; d) moving load scheme in CSi Bridge; e) parameters and scheme of moving loads in Scia Engineer.



Source: the Author (2025).

6. Conclusion

This work presents a new proposal for IFC data for moving loads, based on the implementation of a data interpreter for the concrete bridge structural analysis software called SAEP. The IFC data for moving loads were compared with the parametric data obtained from three commercial software for bridge analysis and design. A questionnaire was applied for a quantitative measurement of the level of implementation of IFC data interpretation for moving loads in these commercial software.

Based on the results presented in this work, the following contributions can be highlighted:

- IFC entities were defined for moving loads, considering a parametrization with a high semantic level and the minimum number of parameters possible. The new proposal leverages some abstract IFC entities and only edits the inheritance hierarchy of the *IfcStructuralLoadSingleDisplacement* and *IfcStructuralLoadTemperature* entities.

Therefore, the new proposal does not require significant changes to the existing data structure;

- SAEP allowed the import of IFC data for moving loads, using an innovative proposal. That is particularly useful in cases where the user needs to determine the load-bearing capacity of bridge structural elements, for which the design moving load is only known through the import of IFC data;
- The new proposal presented in this research leverages IFC entities that define the values of point, linear, and planar loads, excluding the abstract entity *IfcStructuralLoadStatic* and adding *IfcStructuralLoadForce*. For the interpretation of planar loads in force per unit area, CSi Bridge has the most complex interpretation compared to the others, requiring the value of the traffic area width;
- Positioning moving loads positioned together and relative to a local coordinate system offers greater efficiency, as it avoids large volumes of information in the .ifc file and reduces interpretation efforts in different commercial software. CSi Bridge and Allplan Bridge require more implementation effort for interpreting the IFC data for positioning moving point loads compared to Scia Engineer, as the former two rely on incremental distances to position these loads;
- Within the scope of the present proposal, the structural analysis results related to the moving loads only covered the maximum and minimum values, which avoids the large volume of data for the ordinates of influence functions, the forces at each point of the influence function, and the various positions of the moving loads where these forces are determined.

The present IFC data extension for moving loads enables implementation in commercial software, enabling data exchange with a high semantic level. The MVD SAV must be edited in the IFC4x3 schema, considering moving loads, the results of stresses arising from these loads, the possibility of linear positioning of analytical elements through an alignment curve, among other changes.

Future research is recommended to investigate the IFC data exchange for the structural analysis results of bridge elements using the innovative proposal presented in this work. This suggestion is justified by the current gap in exchanging IFC data for maximum and minimum values at key points of interest of structural elements subjected to moving loads. Furthermore, enabling this IFC data exchange would reduce the effort in verifying the structural elements by comparing forces and moments due to different moving loads.

Acknowledgement

This study was financed by the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) - TED 703/2020. The authors thank the support of DNIT and Universidade Federal de Viçosa and also acknowledge the collaboration of the research group TechBIM.

References

- [1] S. Son, G. Lee, J. Jung, J. Kim, K. Jeon, Automated generation of a model view definition from an information delivery manual using idmXSD and buildingSMART data dictionary, *Advanced Engineering Informatics* 54 (2022), pp. 101731. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101731>
- [2] M. Belsky, R. Sacks, I. Brilakis, Semantic enrichment for building information modeling, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 00 (2015), pp. 1-14. <https://doi.org/10.1111/mice.12128>
- [3] A. Bradley, H. Li, R. Lark, S. Dunn, BIM for infrastructure: an overall review and constructor perspective, *Automation in Construction* 71 (2016), pp. 139-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>
- [4] S.I. Park, S.H. Lee, A. Almasi, J.H. Song, Extended IFC-based strong form meshfree collocation analysis of a bridge structure, *Automation in Construction* 119 (2020), pp. 103364. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103364>.
- [5] I.J. Ramaji, A.M. Memari, Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models, *Automation in Construction* 90 (2018) pp. 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.

- [6] 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, ASCE (2020), pp. 537–545. <https://doi.org/10.1061/9780784482865.057>.
- [7] R. Ren, J. Zhang, H.N. Dib, BIM interoperability for structure analysis, in: Construction Research Congress: Construction Information Technology - Selected Papers from the Construction Research Congress, ASCE (2018), pp. 470–479. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.046>.
- [8] 8.19 IfcStructuralLoadResource - IFC 4.3.2 Documentation. Disponível em: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/ifcstructuralloadresource/content.html>. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [9] 7.10 IfcStructuralAnalysisDomain - IFC 4.3.2 Documentation. Disponível em: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/ifcstructuralanalysisdomain/content.html>. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [10] J. Luttun, T. Krijnen, An approach for data extraction, validation and correction using geometrical algorithms and Model View Definitions on building models, in: Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Springer 98 (2020): pp. 529–543. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_38.
- [11] R. Sacks, I. Kaner, C.M. Eastman, Y.S. Jeong, The Rosewood experiment – Building information modeling and interoperability for architectural precast facades, Automation in Construction 19 (2010), pp. 419–432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.012>
- [12] Y.C. Lee, C.M. Eastman, W. Solihin, Logic for ensuring the data exchange integrity of building information models, Automation in Construction 85 (2018), pp. 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.010>
- [13] S. Gerbino, L. Cieri, C. Rainieri, G. Fabbrocino, On BIM interoperability via the IFC

- standard: an assessment from the structural engineering and design viewport, *Applied Sciences* 11 (2021), pp. 11430. <https://doi.org/10.3390/app112311430>
- [14] M. Aldegeily, Y. Hu, X. Shao, J. Zhang, From architectural design to structural analysis: a data-driven approach to study building information modeling (BIM) interoperability, in: *54th ASC Annual International Conference Proceedings (2018)*, Minneapolis, pp. 537-545.
- [15] M. Trzeciak, A. Borrmann, Design-to-design exchange of bridge models using IFC: A case study with Revit and Allplan, in: *Engineering and Construction – Proceedings of the 12th European Conference on Product and Process Modeling (2018)*, Munich, pp. 231–239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429506215>.
- [16] G.P. Teixeira, J.C.L. Ribeiro, K.M.L. César Jr, L.A. Nunes, J.M.F. Carvalho, D.S. Oliveira, G.H. Nalon, Interoperability level for bridge structural analysis from the IFC data interpretation, *Gestão & Tecnologia de Projetos* 19 (2024), pp. 49-67. <https://doi.org/10.11606/gtp.v19i3.227401>
- [17] G. Sibenik, I. Kovacic, Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis, *Journal of Building Engineering* 32 (2020), pp. 101589. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101589>
- [18] S.K. Khattrra, H.S. Rai, J. Singh, Generating structural model through automatic data extraction using openbim technology, *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* 11 (2020) pp. 602–613. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.7.2020.060>.
- [19] T. Singh, M. Mahmoodian, S. Wang, Enhancing open BIM interoperability: automated generation of a structural model from an architectural model, *Buildings* 14 (2024), pp. 1-23. <https://doi.org/10.3390/buildings14082475>
- [20] P.H. Chen, L. Cui, C. Wan, Q. Yang, S.K. Ting, R.L.K. Tiong, Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers, *Automation in Construction* 14 (2005) pp. 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.013>.

- [21] X. Wang, H. Yang, Q.L. Zhang, Research of the IFC-based transformation methods of geometry information for structural elements, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 79 (2015), pp. 465–473. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0111-0>.
- [22] Z.Z. Hu, X.Y. Zhang, H.W. Wang, M. Kassem, Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools, *Automation in Construction* 66 (2016), pp. 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.001>.
- [23] Z.Q. Liu, F. Zhang, J. Zhang, The building information modeling and its use for data transformation in the structural design stage, *Journal of Applied Science and Engineering* 19 (2016), pp. 273–284. <https://doi.org/10.6180/jase.2016.19.3.05>.
- [24] K. Shoieb, M.H. Serror, M. Marzouk, Web-based tool for interoperability among structural analysis applications, *Journal of Construction Engineering and Management* 146 ASCE (2020), pp. 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001840](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001840)
- [25] Z. Xu, Z. Rao, V.J.L. Gan, Y. Ding, C. Wan, X. Liu, Developing an extended IFC data schema and mesh generation framework for Finite Element Modeling, *Advances in Civil Engineering* 2019 (2019), pp. 1–19. <https://doi.org/10.1155/2019/1434093>.
- [26] J. Jia, J. Gao, W. Wang, L. Ma, J. Li, Z. Zhang, An automatic generation method of finite element model based on BIM ontology, *Buildings* 12 (2022), pp. 1-16. <https://doi.org/10.3390/buildings12111949>
- [27] M.L. Leonardi, J. Granja, D.V. Oliveira, M. Azenha, Scalable BIM based open workflow for structural analysis of masonry building aggregates, *Computers and Structures* 297 (2024), pp. 107321. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107321>
- [28] FHWA-HIF-16-011, Bridge Information Modeling Standardization Volume II: Schema Analysis, US Department of Transportation Federal Highway Administration (2016), <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/hif16011/hif16011b.pdf>
- [29] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7188 – Ações devido ao

tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas. Rio de Janeiro, p. 12. 2024.

7. CONCLUSÕES GERAIS

7.1 Considerações finais

Apresentou-se nesta tese uma avaliação da interpretação de dados IFC4.3.2.0 em um software de análise estrutural de pontes de concreto em vigas com eixo reto, denominado SAEP. Com base nos resultados obtidos, podem-se fazer as seguintes considerações:

- Para análise estrutural bidimensional de pontes, a exportação de dados IFC por meio de geometria implícita é a mais recomendada, devido à menor quantidade de informações a serem interpretadas e à maior facilidade de interpretação desses dados. Assim, as entidades *IfcExtrudedAreaSolid* e *IfcSectionedSolidHorizontal* são as mais indicadas para elementos prismáticos e elementos com seções transversais variáveis, respectivamente, devendo-se, portanto, preservar o histórico da modelagem na exportação dos dados IFC;
- A implementação de uma ferramenta capaz de converter um elemento representado por geometria explícita Brep para uma geometria parametrizada resulta em um elemento com alto nível semântico, tornando-o mais inteligível para o usuário. Isso pode ser alcançado por meio da definição dos requisitos de informação a serem interpretados, como os tipos de seções transversais disponíveis em cada software, dimensões das seções, comprimento do elemento, posicionamento, entre outros;
- O nível de interoperabilidade (λ) apresentado nesta tese consiste em um valor numérico que considera a relevância das informações a serem importadas, a complexidade da interpretação de um determinado dado IFC e o retrabalho necessário quando um dado IFC é interpretado incorretamente ou não interpretado. A atribuição de pesos aos conjuntos de informações e às informações individuais permite a generalização desse conceito, evidenciando sua importância e permitindo efetuar a comparação entre softwares e algoritmos;
- A extensão da estrutura de dados IFC para cargas móveis é uma demanda essencial e urgente. A nova proposta apresentada neste trabalho fundamenta-se nos benefícios da parametrização com o menor número possível de parâmetros e na generalização dos casos, permitindo a interoperabilidade dos dados IFC de cargas móveis e seus respectivos resultados de análise de forma mais eficiente. Além disso, foram sugeridas

poucas modificações na estrutura vigente, facilitando futuras implementações de importação e exportação nos softwares de análise.

7.2 Contribuições ao conhecimento

Este trabalho aprimora o uso do BIM na análise estrutural, aproveitando-se da parametrização e da semântica precisa dos elementos de pontes na versão IFC 4.3. A troca de dados entre softwares é um problema frequentemente encontrado no fluxo de trabalho BIM; portanto, as ferramentas de interpretação de dados IFC permitiram alcançar a interoperabilidade entre uma plataforma BIM de modelagem e um software de análise estrutural de pontes de concreto, elaborado para esta pesquisa e denominado SAEP. A troca de dados foi medida a partir da elaboração de um valor numérico para o nível de interoperabilidade, permitindo a sua aplicação em diversos domínios e, por consequência, a realização de trabalhos futuros.

Quanto à nova proposta para a extensão de dados IFC de cargas móveis, este trabalho contribui para uma parametrização eficiente, ou seja, para o aumento de nível semântico com o mínimo de informações possível. A contribuição da nova proposta permite que outros autores proponham novas discussões sobre o assunto.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

Qualquer esforço na área da pesquisa é válido para aprimorar a troca de dados IFC de elementos de pontes. Os resultados obtidos abrem caminho para o desenvolvimento de novas metodologias que aumentam a eficiência da análise estrutural baseada na troca de dados IFC. Assim, destacam-se duas sugestões para trabalhos futuros:

- i) a avaliação da interpretação de dados IFC do modelo estrutural de pontes de concreto e mistas, considerando diversos tipos de curvas de alinhamento (*IfcAlignment*) com vistas a englobar as pontes inclinadas (em um primeiro momento) e as pontes em curva (em uma segunda oportunidade); e
- ii) a determinação do modelo estrutural de pontes de seções celulares a partir da interpretação de dados IFC. A consideração do alinhamento da ponte em tais casos possibilitaria uma análise mais abrangente da implementação da interpretação de dados IFC para análise estrutural.