

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 últimos anos (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 representa-las. Porém, qualquer elemento físico modelado deve ser definido usando a forma mais eficiente para descrever exatamente o resultado de sua forma (CHIPMAN *et al.*, 2016). A maioria dos elementos de pontes (lajes,

longarinas, transversinas, travessas, colunas, 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; MARKIČ, Š., 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 acerca 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 (DEBS, 2021). O modelo bidimensional é composto de elementos finitos unidimensionais, representando as longarinas, transversinas, travessas, colunas 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.

Quanto à escolha dos elementos finitos, deve-se basear no número total de graus de liberdade (DOF) e no esforço computacional necessário para atingir uma precisão adequada para o problema (ADAMS *et al.*, 2019). De maneira geral, os elementos finitos unidimensionais são elementos de barra de Euler-Bernoulli, com dois nós e seis graus de liberdade por nó (três de translação e três de rotação). Os elementos bidimensionais são elementos de placa ou casca que seguem a teoria de Reissner-Mindlin, sendo os elementos quadrilaterais (Q4) com quatro nós e cinco graus de liberdade por nó (três de translação e dois de rotação) com integração reduzida e controle de modos espúrios, os mais

aconselháveis para aplicações práticas (BELYTSCHKO *et al.*, 1985; BELYTSCHKO & TSAY, 1983).

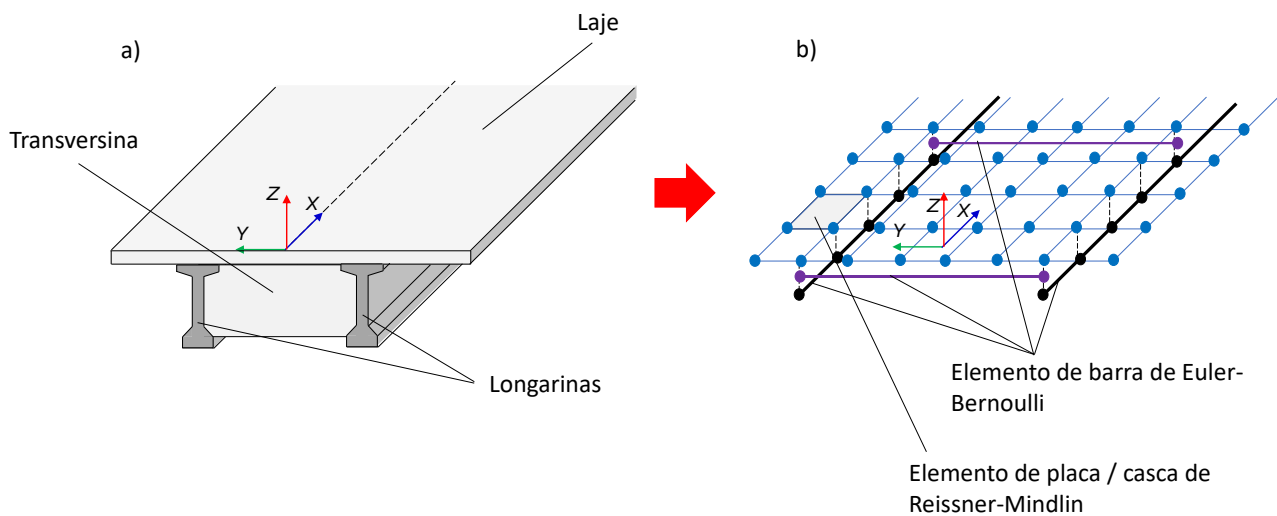


Figura 1 – Modelo de ponte em viga com eixo reto: a) Modelo físico; b) Modelo bidimensional em elementos finitos.

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 à 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.

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, serem vinculados a uma ou mais representações geométricas (BORRMANN *et al.*, 2018).

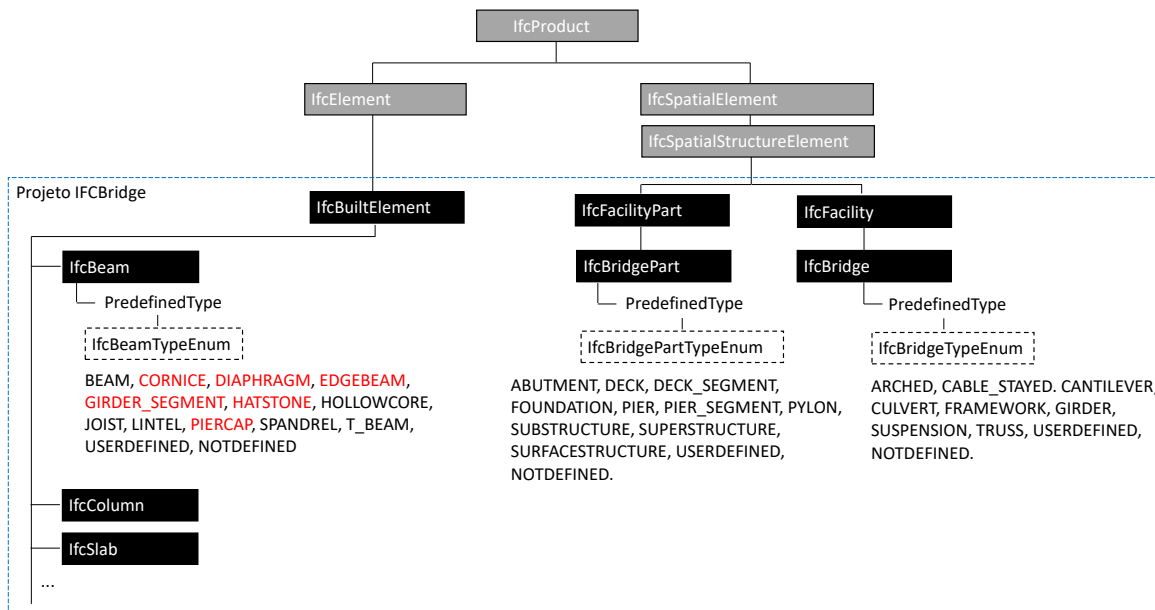


Figura 2 – Parte da extensão da estrutura de dados do projeto IFCBridge.

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 Geometry*, 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. No SAV considera-se que 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.

3. 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.PreddefinedType = GIRDER*), com longarinas de concreto, visando a utilização dos dados em 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 *PreddefinedType*. Para pontes pré-moldadas, as longarinas devem possuir o tipo predefinido *GIRDER_SEGMENT*; 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 horizontal, estando 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 (*IfcCurve*); 2) lista de seções transversais nos pontos de interesse (*IfcProfileDef*); e 3) lista de posicionamentos e orientações do sistema de referência nos pontos de interesse de cada seção (*IfcAxis2PlacementLinear*). Mostra-se na Figura 4 os atributos de *IfcSectionedSolidHorizontal* e a tradução para o respectivo elemento analítico.

3. CrossSectionPositions (Lista<*IfcAxis2PlacementLinear*>)

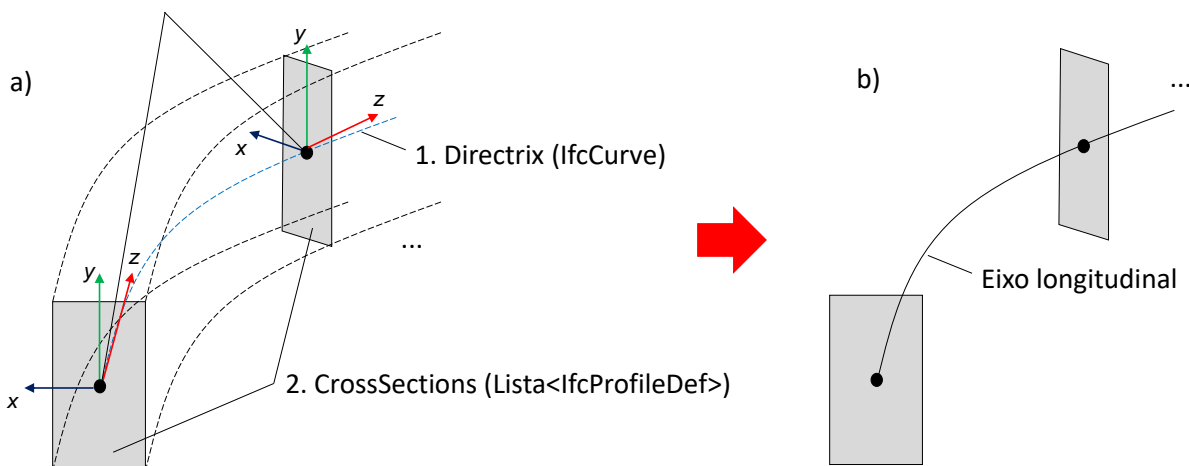


Figura 4 – Parametrização de um elemento estrutural linear: a) atributos de *IfcSectionedSolidHorizontal*; b) tradução para o respectivo elemento analítico.

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 colunas podem ser geometricamente definidas pela entidade *IfcExtrudedAreaSolidTapered*, englobando elementos com e sem seções variáveis em uma determinada direção.

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
Coluna	<i>IfcColumn</i>	USERDEFINED	<i>IfcExtrudedAreaSolidTapered</i>	BDTV

3.2. Lajes

As lajes de pontes em vigas são elementos planos que estão apoiadas em 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*. Para fins de análise estrutural, o tipo predefinido da laje não é uma informação determinante.

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.

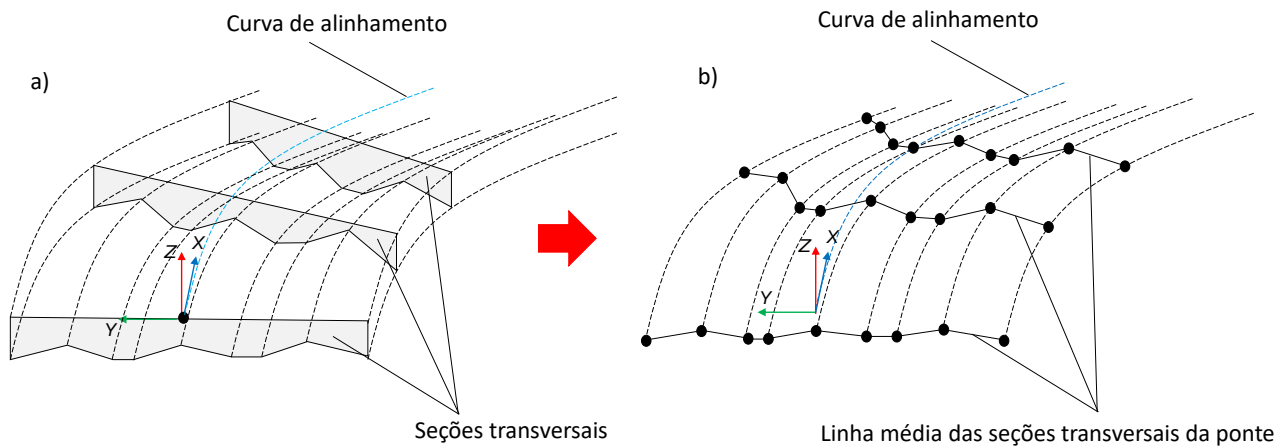


Figura 5 – Lajes: a) seções transversais da laje; b) tradução para o respectivo elemento analítico.

3.3. Propriedades físicas e mecânicas

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 são apresentadas:

- (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.PrefdefinedType* = 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 (elementos finitos unidimensionais e bidimensionais) é feita de maneira mais simples, direta e com menos volume de dados. Portanto, para longarinas, transversinas, travessas, colunas 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

- ADAMS, A.; GALINDEZ, N.; HOPPER, T.; MURPHY, T.; RITCHIE, P.; STORLIE, V.; WEISMAN, J. Manual for Refined Analysis in Bridge Design and Evaluation. Federal Highway Administration. FHWA-HIF-18-046, 2019.
- 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.
- BORRMANN, A.; AMANN, J.; CHIPMAN, T.; HYVÄRINEN, J.; LIEBICH, T.; MUHIČ, S.; MOL, L.; PLUME, J.; SCARPONCINI, P. IFC Infra Overall Architecture Project: Documentation and Guidelines. 2017.
- BORRMANN, A.; KÖNIG, M.; BEETS, J. *Building Information Modeling – Technology Found and Industry Practice*. Springer, 2018.
- BORRMANN, A.; MUHIČ, 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. *European Conference on Computing in Construction*. Chania, Crete, Greece, July 10-12, 2019.
- CHIPMAN, T.; EASTMAN, C.; LIEBICH, T.; YANG, D. *Bridge Information Modeling Standardization Report, Volume II – Schema Analysis*. Federal Highway Administration. FHWA-HIF-16-011, 2016.
- DEBS, M.K.E. *Pontes de concreto com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados*. 1ª ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2021.
- MARKIČ, Š. IFC-Bridge: Previous initiatives and their proposals. '29. 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.
- 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. *Proc., ASCE Construction Research Congress*, ASCE, Reston, VA, p.470-479, 2018.
- 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.
- SORIANO, H.L. *Método dos elementos finitos em análise de estruturas*. 1ª ed. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo: edusp, 2003.