

Expandindo usos BIM para caracterização do estado de fadiga em pontes metálicas ferroviárias

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.14>

**Idilson Nhamage¹, Cláudio Horas²,
Ngoc-Son Dang³, José Campos e Matos⁴,
João Poças Martins⁵, Rui Calçada⁶**

¹ CONSTRUCT – FEUP, Porto, Portugal, ORCID: 0000-0001-9854-7677

² CONSTRUCT – FEUP, Porto, Portugal, ORCID: 0000-0002-9868-3270

³ ISISE-EEUM, Guimarães, Portugal, ORCID: 0000-0002-3341-3034

⁴ ISISE-EEUM, Guimarães, Portugal, ORCID: 0000-0002-1536-2149

⁵ CONSTRUCT – FEUP, BUILT CoLAB, Porto, Portugal, ORCID: 0000-0001-9878-3792

⁶ CONSTRUCT-FEUP, Porto, Portugal, ORCID: 0000-0002-2375-7685

Resumo

Nos últimos anos, a necessidade de envolver a tecnologia digital nos processos de Gestão e Manutenção de Infraestruturas de Transporte (GMIT) tem sido crescente, tendo em conta que hoje em dia, o desenvolvimento de qualquer sector está intrinsecamente ligado ao atual ambiente tecnológico digital. Como forma de responder a esta necessidade, há uma tendência para expandir o âmbito de aplicação do *Building Information Modelling* (BIM), tradicionalmente usado para projetos de edifícios, redireccionando os respetivos Usos BIM para áreas como Gestão e Manutenção de Pontes. Uma das subcategorias que fazem parte do leque dos Usos BIM é a monitorização do ativo na sua fase operacional. Este trabalho usa essa base para desenvolver um modelo experimental que combina um Sistema de Análise de Fadiga (SAF) e um modelo BIM da ponte. Essas duas partes são ligadas a uma base de dados que possibilita a atualização contínua do modelo global, formando um Gémeo Digital (GD), capaz de caracterizar em qualquer instante a evolução de dano de fadiga em qualquer detalhe de ligação da ponte. O SAF é baseado num modelo de elementos finitos que é associado ao Método de Danos Lineares Acumulados (MDLA) para a determinação do dano por fadiga, ambos implementados em *softwares* comerciais, enquanto o modelo BIM é desenvolvido a partir de *softwares* e programas de código aberto, que permitem maior flexibilização quanto à manipulação de objetos BIM, quase necessário

para infraestruturas como pontes, incluindo a utilização do padrão IFC mais evoluído (IFC4x3). A partir da base de dados, que contém parâmetros como condições de carga (tráfego ferroviário) e de geometria da ponte, o modelo global é continuamente atualizado para reavaliação da evolução do dano por fadiga, e mostra-se promissor para a gestão do ciclo de vida da ponte.

1. Introdução

Atualmente, são notáveis os esforços no seio da buildingSMART na ampliação do BIM para infraestruturas lineares como pontes, vias-férreas e estradas. Isso envolve o alargamento de repositórios de dados partilhados, padronizados e orientados a objetos que inclua esse tipo de infraestruturas. No entanto, o uso do BIM em fase de operação, manutenção e gestão desses ativos ainda apresenta desafios enormes. Isso ocorre principalmente devido à falta de flexibilidade no modelo atual em lidar com informações sobre anomalias e comportamento estrutural ao longo do tempo [1]. Os sistemas e processos atuais que caracterizam os modelos BIM ainda carecem, por exemplo, de elementos geométricos interoperáveis relacionados com diferentes defeitos em infraestruturas, fundamentais nos processos de gestão e operação. Uma das anomalias predominantes em pontes metálicas ferroviárias é a fadiga, relacionada com a passagem de comboios. Este fenómeno consiste num processo de iniciação e de propagação de fendas num elemento estrutural causado por flutuações de tensão [2]. A avaliação e acompanhamento desse processo complexo, pode incluir informação sobre inspeção prévia ou resultados de análises preliminares sobre o estado de um elemento estrutural, resultados de análises que caracterizem o estado da fadiga do elemento estrutural ao longo do tempo, entre outras informações. É sabido que a identificação de dano em infraestruturas como pontes, incluindo danos por fadiga, constitui uma forma essencial de avaliar o estado da condição dessas infraestruturas. Todavia, a informação sobre esses dados dificilmente pode ser expressa (visualizada por exemplo) na infraestrutura em causa através dos métodos correntes de análise para identificação de danos [3]. Havendo necessidade em solucionar esta e outras questões, o BIM tem vindo a ser adotado em novos domínios. Atualmente, são visíveis os avanços e o seu crescente uso em outras infraestruturas incluindo pontes e vias férreas [4]. Essa aplicação vai além da simples modelação, estendendo-se à gestão dessas infraestruturas, atento às grandes potencialidades desta tecnologia [4, 5]. Essas potencialidades são fundamentalmente evidenciadas pela representação digital (ou visualização) e possibilidades de integrar informação [6, 7], vistos como benéficos para qualquer gestão de infraestruturas. Contudo, o processo de integração da informação ainda levanta grandes debates, do ponto de vista do tipo e alcance da informação a integrar. Por isso, conhecendo a existência dessas potencialidades, um desafio atual significativo é definir processos que permitam enriquecer os modelos BIM com informação sobre o estado de um determinado ativo, de forma automática e contínua, obtendo-se neste caso um Gémeo Digital (GD). Esta é uma questão colocada por diversos pesquisadores (ver por exemplo [8]), sendo notáveis as tentativas de ligar modelos BIM com outras partes que o alimentam com informação, mas não há ainda uma forma ou procedimento concretos para o estabelecimento desta ligação [8]. Dentro desses desafios, este estudo apresenta uma forma de aplicar o BIM para dar suporte ao processo de avaliação da evolução de dano por fadiga em pontes metálicas ferroviárias, onde são destacados os processos de modelação conduzidos por dados e baseados em recursos abertos, integração automática da informação proveniente de análises numéricas e do ativo físico no modelo BIM, formando um GD. No âmbito do openBIM, são explorados recursos de código aberto (IfcOpenShell +

Python + Blender) para modelação em BIM e com padrão IFC recente (IFC4x3_ADD1) em processo de padronização na ISO [9], que inclui já algumas entidades relacionadas com pontes e vias férreas (figura 1a), como forma de ultrapassar as atuais limitações que ainda caracterizam a maioria das plataformas comerciais BIM, que ainda não implementaram esta última versão do padrão IFC (figura 1b). O IfcOpenShell é uma biblioteca constantemente atualizada e que permite aceder e editar ficheiros em formato IFC de código aberto [10]. As análises numéricas de fadiga, cujos resultados alimentam continuamente o modelo BIM, são realizadas em softwares potentes de análise numérica e programação, nomeadamente o ANSYS APDL® e o MATLAB®.

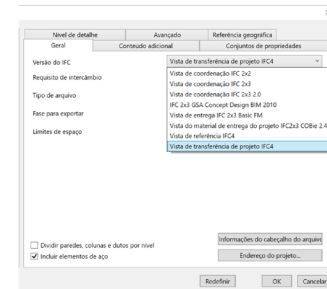
Figura 1

(a) IfcRail a partir de IFC4x3 modelada parametricamente com recursos de código aberto (Ifcopenshell + Python + Blender);
 (b) Extrato de uma plataforma BIM, numa das versões recentes limitada a IFC 4.0.

IfcRail: parte do código EXPRESS

```

ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('ViewDefinition [CoordinationView]', '2;1;'));
FILE_NAME('Rail.ifc', '2023-12-08T16:32:13+00:00', (), (), 'IfcOpenShell v0.7.0-6c9e138ca');
FILE_SCHEMA('IFC4X3_ADD1');
ENDSEC;
DATA;
#1=IFCPROJECT('00s09c3j3i0d0ghu1zmbg', $, 'My Project', $, $, $, (#10), #5);
#2=IFCSUNIT(*, LENGTHUNIT, ., MILLI, ., METRE.);
#3=IFCSUNIT(*, AREAUNIT, $, SQUARE_METRE.);
#4=IFCSUNIT(*, VOLUMEUNIT, $, CUBIC_METRE.);
#5=IFCUNITASSIGNMENT((#4, #2, #3));
#6=IFCARTESIANPOINT((0., 0., 0.));
#7=IFCDIRECTION((0., 0., 1.));
#8=IFCDIRECTION((1., 0., 0.));
#9=IFCAXIS2PLACEMENT3D(#6, #7, #8);
#10=IFCGEOMETRICREPRESENTATIONCONTEXT($, 'Model', 3, 1, E-05, #9, $);
#11=IFCGEOMETRICREPRESENTATIONSUBCONTEXT('Body', 'Model', *, *, *, #10, $, MODEL_VIEW, $);
#12=IFCSITE('15_sx8s6z2kuz2m8p10s6t', $, 'My Site', $, $, $, $, $, $, $, $);
#13=IFCBUILDING('08m3c1g9p9p73asi5d7ah', $, 'Building A', $, $, $, $, $, $, $, $);
#14=IFCBUILDINGSTOREY('1bf3n4_4p9m9rdz180mkg', $, 'Ground Floor', $, $, $, $, $, $, $, $);
#15=IFCRELAGGREGATES('3hms5z112epvjg94hzn8', $, $, $, #1, (#12));
#16=IFCRELAGGREGATES('1x83akcf558vjy715ma', $, $, $, #12, (#13));
#17=IFCRELAGGREGATES('w0v0x8cvcqy1d0x2f8a', $, $, $, #13, (#14));
#18=IFCRAIL('3d4t2v112g0s9m70u5', $, 'Rail line', $, $, #45, #24, $, $);
    
```



(a)

(b)

2. Abordagem metodológica

2.1. Sistema de Análise de Fadiga (SAF) e modelo BIM da ponte

Atendendo ao principal objetivo deste estudo, cuja intenção é alimentar continuamente um modelo BIM com resultados provenientes de análises numéricas da fadiga (e informação relevante que pode não ser proveniente do cálculo), um Sistema de Análise de Fadiga (SAF) e um modelo BIM para ponte são previamente criados de forma separada para sua posterior integração, em que:

- a) SAF – este consiste de duas partes. Na primeira parte desenvolve-se um modelo numérico da ponte para determinação das suas propriedades dinâmicas ou estáticas com recurso ao software ANSYS APDL® e na segunda é calculado o dano por fadiga através do Método de Danos Lineares Acumulados (MDLA) [2] usando as programações no MATLAB® (figura 2). Os resultados de saída desta fase são, além do dano, a respetiva identificação e localização ao longo da ponte, bem como a vida de fadiga remanescente;

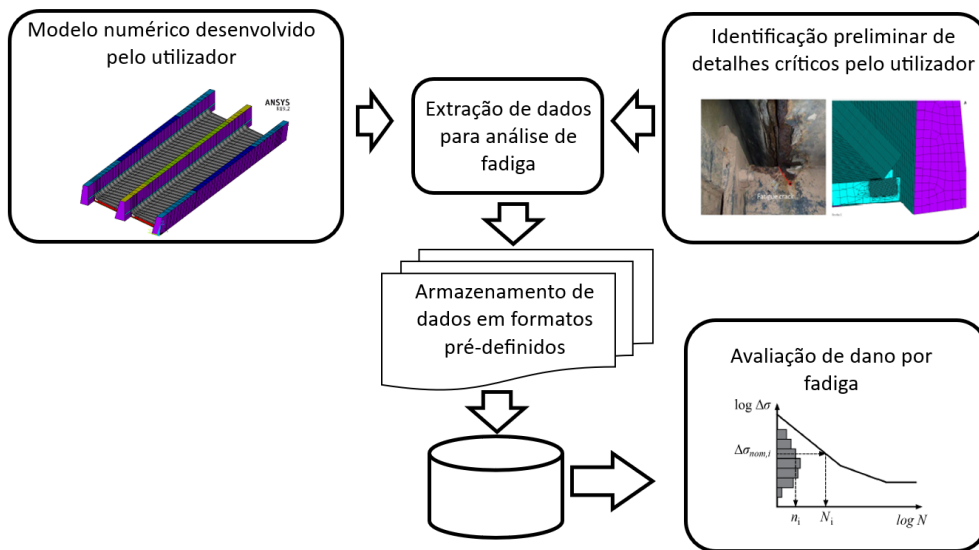


Figura 2
Visão geral do Sistema de Análise da Fadiga (SAF).

b) Geração do modelo BIM da ponte – Através de recursos de código aberto (IfcOpenShell + Python + Blender) e com padrão IFC4x3, a geração do modelo BIM da ponte incluindo os elementos da via-férrea é feita utilizando um processo baseado em dados, para produção paramétrica de diferentes elementos (IfcBuildingElement) e posterior combinação para formação do modelo inteiro (figura 3).

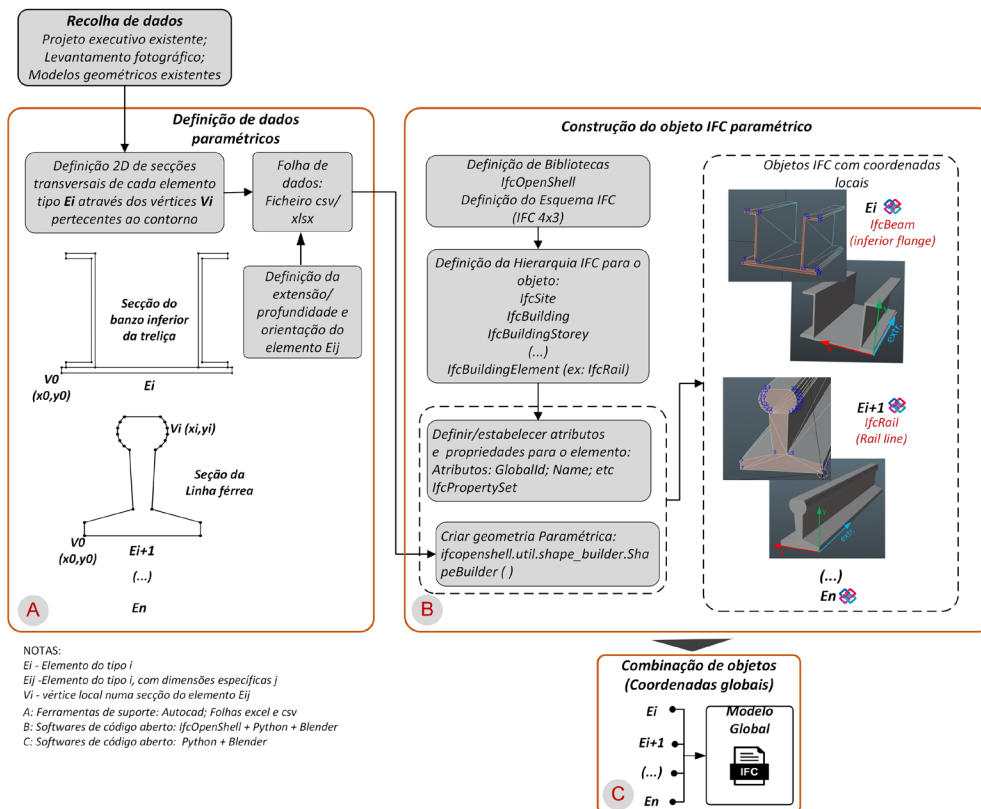


Figura 3
Geração do modelo BIM para ponte e via férrea.

Ainda com os mesmos recursos de código aberto, propõe-se modelar as representações geométricas do dano, bem como a criação de uma plataforma de consulta de informação não geométrica sobre o dano (figura 4). Tanto as representações geométricas de dano como a plataforma de consulta de informação ficam vazios até que a informação sobre o dano (ou outra informação) seja introduzida por meio do processo de integração (ver subsecção 2.2).

Figura 4

Plataforma de consulta de informação não geométrica sobre o dano num determinado detalhe de ligação.

The screenshot shows a software interface with a top navigation bar containing 'Navigation', 'Smart views', 'Conflicts', 'Lists', and 'Issues'. Below this is a tree view under 'Offline' showing a hierarchy: 'PSet_prop_DetailConnect02' > 'Connect-Site' > 'Connect-Building' > 'Connect-Storey' and 'Civil Element'. Below the tree view is a table titled 'Civil Element' with columns: Summary, Location, Material, PartOf, Clashes, and 'BIM_Connect-Detail'. The table has a 'Property' column and a 'Value' column.

Property	Value
DamageValue	0
Detail-Location-X	0
Detail-Location-Y	0
Detail-Location-Z	0
Detail-Tag	DV-1
Remaining F.Life(yrs)	0

2.2. Processo de integração SAF – modelo BIM para a ponte

Neste estudo, propõe-se criar um SAF separado do modelo BIM, tendo em conta a complexidade de cada uma das partes. No estado inicial as duas partes funcionam de forma independente, passando a haver dependência quando é estabelecida a ligação. Conforme mostrado na figura 5, a ligação tem duas vertentes, sendo:

- a) Vertente 1 – é um processo direto em que a informação dos resultados provenientes da análise de fadiga (valor de dano, sua identificação, localização e vida de fadiga remanescente) ou outra informação disponível é diretamente introduzida no modelo BIM de forma automática, atualizando o modelo em termos geometria e representação do dano. A representação geométrica do dano é realizada através de sistema de cores RGB (*Red-Green-Blue*), cuja coloração vai alterando em função da magnitude do dano, ao passo que a representação não geométrica é realizada através de valores numéricos alocados nos parâmetros de interesse e que caracterizam o dano. Plataformas comerciais como REVIT® e RHINO® possuem ferramentas específicas, designadas por Interface de Programação de Aplicações (APIs), que permitem a ligação com dados de ambiente externo. Neste estudo, o modelo BIM é gerado por meio de *softwares* e programação de código aberto, sendo a inserção da informação realizada através da programação em Python;

b) Vertente 2 – É um processo inverso (simulação), em que se pode atualizar simultaneamente o modelo BIM e o SAF, gerando-se novos resultados e voltar para vertente 1, mantendo assim um processo contínuo. A atualização do modelo BIM é realizado por meio do mesmo processo descrito em (a), ao passo que a atualização do SAF é realizada através do conjunto APDL (Ansys Parametric Design Language) + MATLAB que acedem ao respetivo modelo numérico de elementos finitos e os algoritmos de cálculo de dano de fadiga, atualizando o modelo geométrico de elementos finitos e as cargas do tráfego.

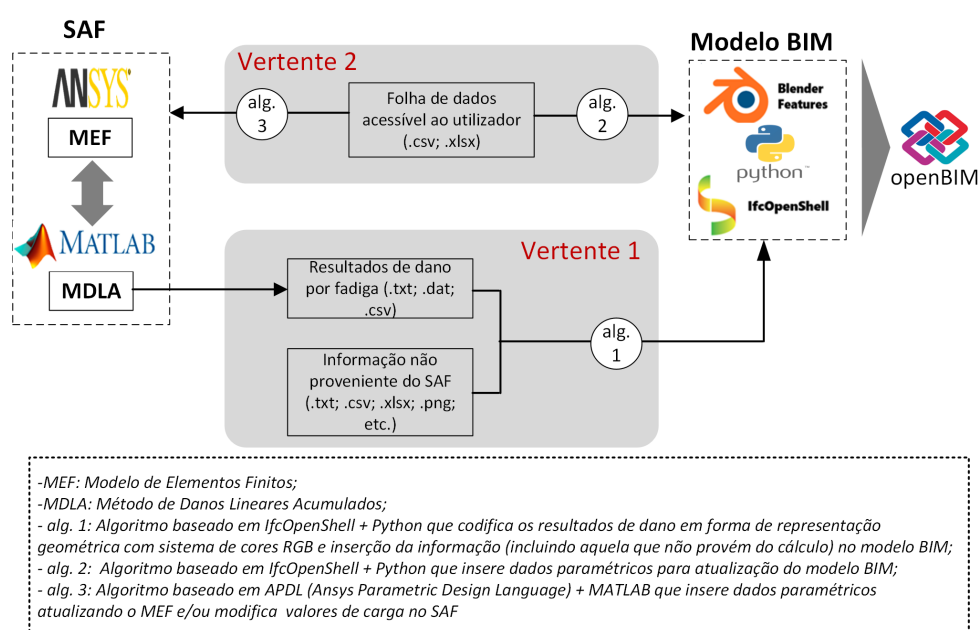


Figura 5
Esquema do processo de integração SAF – Modelo BIM para a ponte.

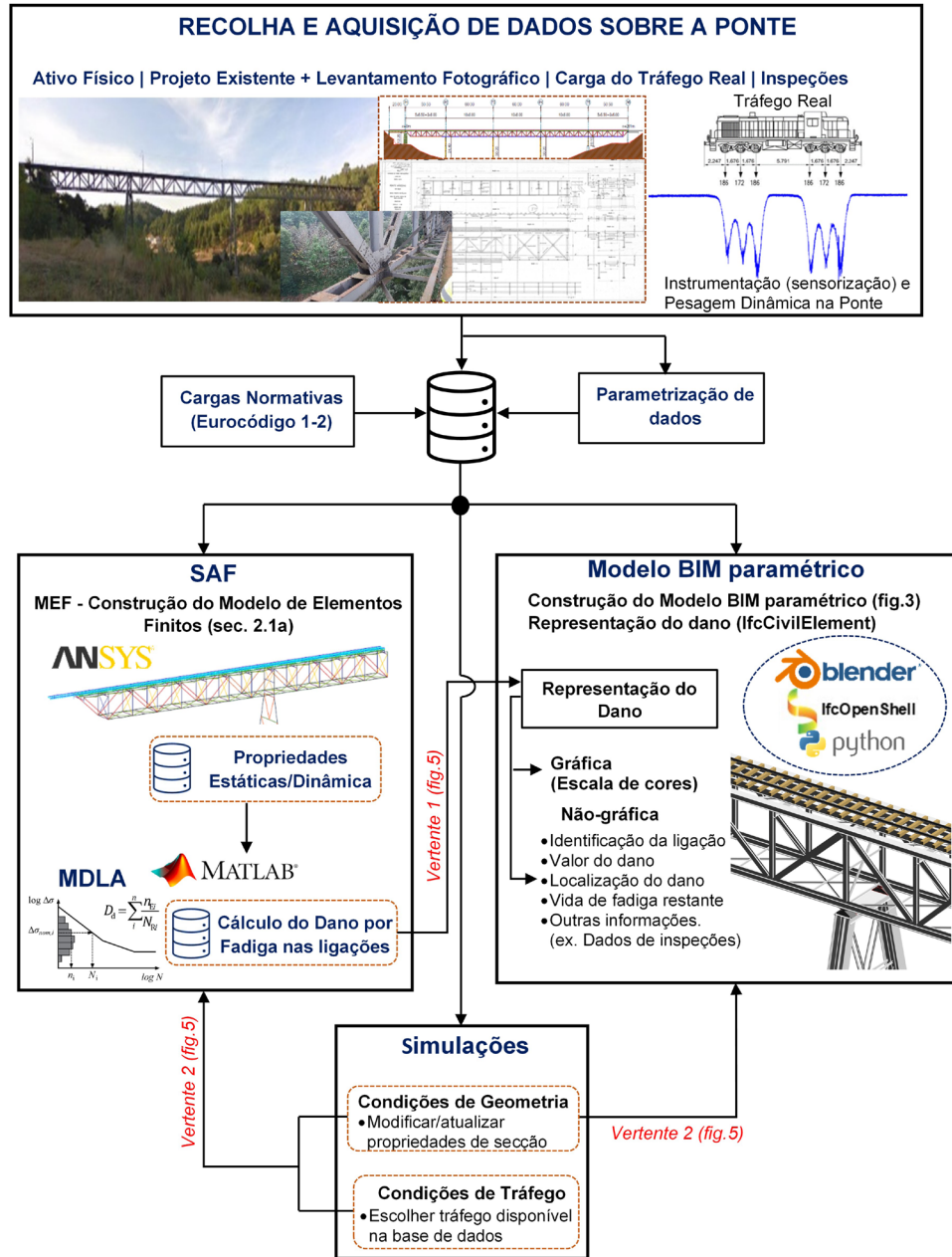
3. Caso de estudo

3.1. Descrição e framework

A metodologia descrita na secção anterior é aplicada a um caso real. Trata-se de um trabalho em curso referente à Ponte de Várzeas, localizada no distrito de Aveiro, Portugal. A ponte é metálica treliçada, composta por 5 vãos e um total de 281m de comprimento. A descrição detalhada pode ser encontrada em [11]. O objetivo é usar o modelo BIM para auxiliar o processo de avaliação da evolução de dano por fadiga nas ligações principais da estrutura da ponte, considerando diferentes cenários que envolvem a carga do tráfego e as propriedades geométricas dos elementos estruturais. Com a possibilidade de automatização do processo de avaliação de fadiga e realce da visualização do que pode acontecer em diversos cenários, forma-se um GD. Há 4 partes ou processos principais envolvidos na Framework (figura 6). Primeiro é feita a recolha de toda informação sobre a geometria, propriedades mecânicas dos elementos e carga do tráfego real ou típica na ponte, que permite a construção tanto

do modelo numérico (Modelo de Elementos Finitos – MEF) como do modelo BIM. A obtenção da informação do tráfego real e que leve ao estado real da fadiga, implica a instrumentação (sensorização) da ponte e aplicação da técnica de Pesagem Dinâmica na Ponte (*Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM)*), não sendo no entanto, escopo deste trabalho. A descrição da abordagem e implementação pode ser encontrada em [12].

Figura 6
Framework do Uso BIM para caracterização da evolução de dano por fadiga da Ponte de Várzeas.

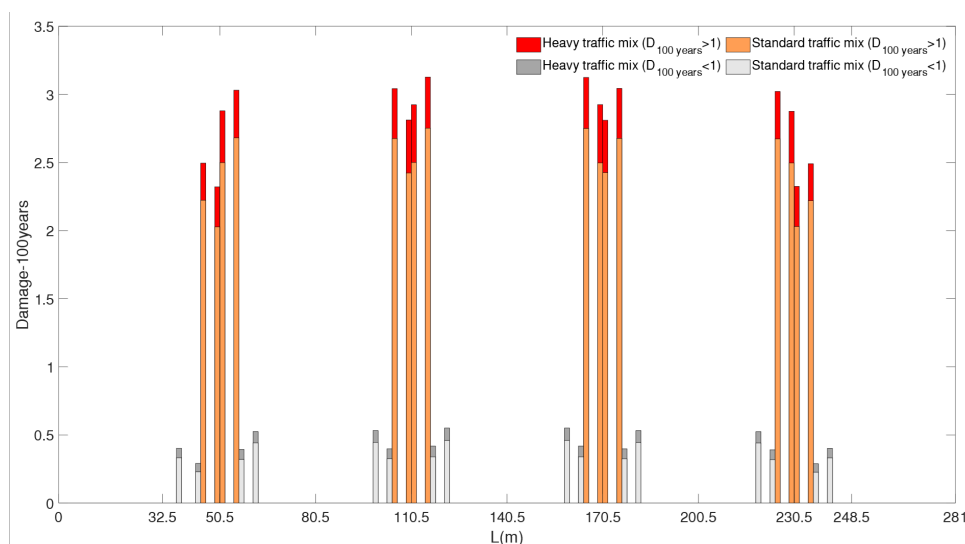


O MEF e o modelo BIM são construídos separadamente de forma paramétrica (através do APDL para modelo numérico e recursos de código aberto para o modelo BIM). A parametrização permite que seja possível automatizar a atualização dos modelos, assim como construir outros modelos da mesma natureza de forma mais rápida.

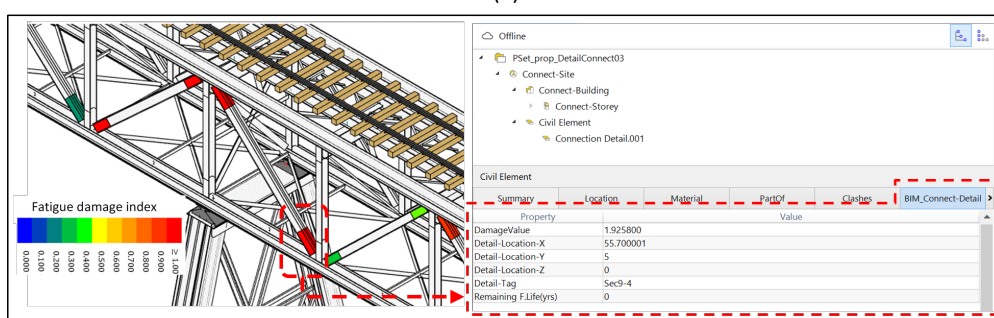
O MEF permite a determinação das propriedades estáticas ou dinâmicas da ponte e, quando combinado com o Método de Danos Lineares Acumulados (MDLA), forma-se o Sistema de Análise de Fadiga (SAF). Este sistema permite determinar, em função dos dados de entrada (carga do tráfego e propriedades geométricas), o dano por fadiga numa determinada ligação. A interligação entre o SAF e o Modelo BIM, incluindo como é feita a visualização e consulta da evolução do dano é ilustrada nesta Framework e resumidamente descrita na secção 2.

3.2. Resultados

A figura 7a mostra os valores de dano por fadiga processados para detalhes de ligações pertencentes às diagonais localizadas junto aos apoios da ponte e a 7b ilustra parte da representação da respetiva informação num visualizador BIM.



(a)



(b)

Figura 7

(a) Valores de dano por fadiga processados, para detalhes de ligações das diagonais localizadas junto aos apoios da ponte; (b) Exemplo de representação gráfica e não gráfica da informação do dano numa das diagonais – Visualizador BIM.

Esta representação é realizada após a integração da informação e produção do modelo BIM (integrado) em formato IFC, através dos processos anteriormente descritos. Os dados sobre o dano processados correspondem a cenários de carga dos comboios de fadiga tipo “Standard Traffic Mix” e “Heavy Traffic Mix” descritos no Eurocódigo 1-2 [13]. Com o auxílio do visualizador BIM, é possível identificar detalhes críticos ou zonas em bom estado e consultar a informação quantitativa sobre o detalhe em referência.

4. Conclusão

No leque das potencialidades do BIM, este trabalho demonstrou como o BIM pode ser utilizado para auxiliar o processo de avaliação de evolução de fadiga em pontes metálicas ferroviárias, sendo, portanto, uma forma de estender o seu uso. O modelo global é uma combinação do SAF e o modelo BIM da ponte, sendo o SAF responsável pelo processamento do dano por fadiga, alimentando continuamente o modelo BIM. Entre a informação de entrada para o processamento da fadiga está o tráfego normativo e o tráfego real (para o dano real). Este último, não utilizado neste trabalho e que conduz a um GD mais completo, implica a instrumentação da ponte (sensorização da ponte) e uso da técnica de Pesagem Dinâmica na Ponte (*Bridge Weigh-in-Motion*), conforme a framework representada na figura 6. Diferentemente do sistema normal de avaliação de fadiga, caracterizado por elevado trabalho manual, este modelo torna o sistema mais aberto e automático, permitindo que novos dados de entrada relacionados com cargas de tráfego ou propriedades geométricas sejam introduzidos de forma automática, resultando na representação automática da evolução de dano por fadiga, o que por último torna o processo mais rápido e flexibiliza a tomada de decisão.

Referências

- [1] L. Liu, P. Hagedorn, and M. König, "BIM-Based Organization of Inspection Data Using Semantic Web Technology for Infrastructure Asset Management," in *Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures*, (Lecture Notes in Civil Engineering, 2022, ch. Chapter 127, pp. 1117-1126.
- [2] CEN, "Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço. Parte 1-9: Fadiga," ed. Lisboa, Portugal: Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2010.
- [3] Y. Tian, X. Zhang, H. Chen, Y. Wang, and H. Wu, "A Bridge Damage Visualization Technique Based on Image Processing Technology and the IFC Standard," *Sustainability*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/su15118769.
- [4] D. Queiroz, M. Placido, R. Silva, and W. Vital, "Influence of Topographic Data in the Development of Railway Projects Using BIM," *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 149, no. 6, 2023, doi: 10.1061/jtepbs.Teeng-7575.
- [5] A. S. Shishlov, A. M. Costin, and M. T. Davidson, "Integration of Building Information Modeling Interoperability into Nonlinear Finite Element Analysis of Bridge Substructures," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2677, no. 10, pp. 9-21, 2023, doi: 10.1177/03611981231160172.

- [6] L. Inzerillo, F. Acuto, A. Pisciotta, I. Dunn, K. Mantalovas, M. Zeeshan, and G. Di Mino, "Virtual Reality and Bim for Infrastructures," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-2/W3-2023, pp. 81-88, 2023, doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W3-2023-81-2023.
- [7] P. Zhao and X. He, "Research on dynamic data monitoring of marine bridge steel structure building information based on BIM model," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 4, 2021, doi: 10.1007/s12517-021-06601-w.
- [8] T. Yamane, P.-j. Chun, and R. Honda, "Detecting and localising damage based on image recognition and structure from motion, and reflecting it in a 3D bridge model," *Structr and Infrastr Eng*, pp. 1-13, 2022, doi: 10.1080/15732479.2022.2131845.
- [9] buildingSmart-International, "Infrastructure Domain Roadmap," Version 1.0 ed, 2023.
- [10] IfcOpenShell. "IfcOpenShell, the open source ifc toolkit and geometry engine." <https://ifcopenshell.org/> (accessed December 07, 2023).
- [11] I. Nhamage, N.-S. Dang, C. Horas, J. Poças Martins, J. Matos, and R. Calçada, "Performing Fatigue State Characterization in Railway Steel Bridges Using Digital Twin Models," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, 2023, doi: 10.3390/app13116741.
- [12] R. Pimentel, D. Ribeiro, L. Matos, A. Mosleh, and R. Calçada, "Bridge Weigh-in-Motion system for the identification of train loads using fiber-optic technology," *Structures*, vol. 30, pp. 1056-1070, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.01.070.
- [13] CEN, "Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 2: Ações de tráfego em pontes", ed. Lisboa, Portugal: Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2017.