

# DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE GÊMEO DIGITAL BASEADO NO BIM PARA AVALIAÇÃO DE FADIGA EM PONTES METÁLICAS FERROVIÁRIAS

Idilson Nhamage, MSc.<sup>1</sup>, José A. Campos e Matos, PhD.<sup>2</sup>, Cláudio Horas, PhD.<sup>3</sup>, João P. Martins, PhD.<sup>4</sup> e Rui Calçada, PhD.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465, Porto, Portugal

email: [up202011161@up.pt](mailto:up202011161@up.pt)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, ISISE, Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal

<sup>3</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465, Porto, Portugal

<sup>4</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465, Porto, Portugal

<sup>5</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465, Porto, Portugal

---

## Sumário

*Os emergentes gémeos digitais trouxeram grande revolução nos processos de monitorização e gestão de ativos, tais como as pontes. O objetivo deste trabalho, que faz parte dum projeto piloto, é de avaliar e simular o comportamento de fadiga em Pontes Metálicas Ferroviárias com suporte de GDs, sustentadas pelas potencialidades do BIM. Um sistema integrado baseado em softwares apropriados e constituído por 3 módulos principais (Módulo Input; Módulo Cálculo; Módulo Output) é montado. O estágio atual é promissor, sendo possível não só estimar o dano por fadiga para diferentes cenários, mas também visualizá-lo e acessar diferentes informações relacionadas ao dano.*

---

**Palavras-chave:** Gémeos Digitais; Pontes Metálicas Ferroviárias; fadiga; BIM; Bridge Information Modeling.

## 1 INTRODUÇÃO

A fadiga constitui um dos modos de rotura mais comuns em estruturas metálicas (Santecchia *et al.*, 2016), sendo que no caso de Pontes Metálicas Ferroviárias (PMF) este fenómeno é essencialmente devido ao carregamento repetitivo causado pela passagem dos comboios. A avaliação e monitoramento deste fenómeno em estágio de serviço não tem se mostrado simples, sobretudo pela sua complexidade, fato que tem vindo a colocar grandes desafios na busca de instrumentos e mecanismos robustos que auxiliem os processos de inspeção e monitoramento de PMF que envolvam o fenómeno de fadiga. Os emergentes Gémeos Digitais (GDs) aparecem com o poder de revolucionar os processos de operação e manutenção (Leser *et al.*, 2020) e podem auxiliar grandemente na gestão, inspeção e avaliação do comportamento de pontes incluindo a fadiga. A utilização de GDs na avaliação do comportamento estrutural tem sido atualmente estudado, com uma tendência bastante crescente em termos pesquisas, em que por um lado está associado a atual era da Indústria 4.0. Alguns estudos recentes incluem por exemplo os trabalhos de Dong *et al.* (2021) e Ye *et al.* (2019): Dong *et al.* (2021) criou um modelo de GD para prever a vida de fadiga de uma ponte-rolante, onde informações tais como histórico de carregamento e das deformações e os ciclos de trabalhos dessa ponte-rolante foram coletadas da contraparte física para alimentar o modelo virtual; Por seu turno, Ye *et al.* (2019), em seu trabalho sobre utilização de GDs para monitorização da integridade estrutural, apresenta uma discussão referente a dois anos de estudo exploratório concernente á criação do modelo de GDs, com maior foco sobre as capacidades necessárias para o desenvolvimento do referido modelo. É de amplo conhecimento que embora alguns desenvolvimentos relacionados com GDs tenham já algumas décadas, os GDs como tal e principalmente como conceito ainda estão na sua fase de infância (Liu *et al.*, 2021) e a sua aplicação e pesquisa no setor da Arquitetura Engenharia e Construção (AEC) é ainda muito mais recente, com escassas aplicações práticas, se comparada com alguns outros setores, como por exemplo o setor de manufatura. O conceito de GD foi inicialmente introduzido em 2003 (Grieves, 2014) e a primeira publicação de um artigo em revista aconteceu somente em 2011 (Tao *et al.*, 2019). No contexto da AEC é bastante comum associar-se os GDs com o Building Information Modeling (BIM) (Boje *et al.*, 2020) ou o Bridge Information Modeling (BrIM) no caso de pontes, visto existir alguns aspetos em comum entre os modelos. No entanto, os GDs

estando na sua fase emergente e sem regulamentação ou normas que abranjam todos os setores, muitos aspetos continuam em aberto. Certas pesquisas sobre GDs não tem sido muito claras em relação por exemplo aos *softwares* e processos de comunicação entre as entidades física (gémeo físico) e modelo virtual, principalmente do ponto de vista de implementação prática. Em relação aos *softwares*, existem os chamados “*closed source software (CSS)*” geralmente comerciais e pré-determinados para realização de tarefas específicas, sendo que a sua utilização para GDs (ou modelos similares), em geral só através da combinação com outros *softwares* ou aplicações para o propósito pretendido, podendo haver limitações relacionadas com incompatibilidades entre os *softwares*/aplicações. Por outro lado, existem os “*Open sources software (OSS)*” abertos para diversidade de aplicações e modificações, no entanto, dependendo do propósito pretendido, a sua utilização pode ser demasiadamente complexa.

O Foco deste trabalho é descrever e apresentar os primeiros passos da implementação de uma metodologia para desenvolvimento do modelo de GD para avaliação da fadiga em PMF numa perspetiva global e conservativa. O modelo é suportado pelas potencialidades do BIM através de plataformas apropriadas e combina com ferramentas/*softwares* com maiores habilidades para cálculo de dano por fadiga. Isto permite ter um modelo constituído por 3 módulos, nomeadamente o módulo *Input* (Módulo I), o módulo Cálculo (Módulo II) e módulo *Output* (Módulo III). O Módulo I inclui a cópia digital da ponte (criada no *software* REVIT®) e armazenamento da informação coletada no gémeo físico (ponte física) e demais informação necessária para avaliação da fadiga; no Módulo II é calculada a fadiga (em *softwares* ANSYS® e MATLAB®) para cenários relacionados com a informação disponível no Módulo I; finalmente, no Módulo III, através de API’s (*Application Programming Interface*) é feita a integração do Módulo II e a cópia digital criada no Módulo I, permitindo a visualização gráfica do dano por fadiga e informação relacionada a esse dano, simulação para diferentes cenários e atualização contínua do modelo.

## 2 ABORDAGEM TEÓRICA

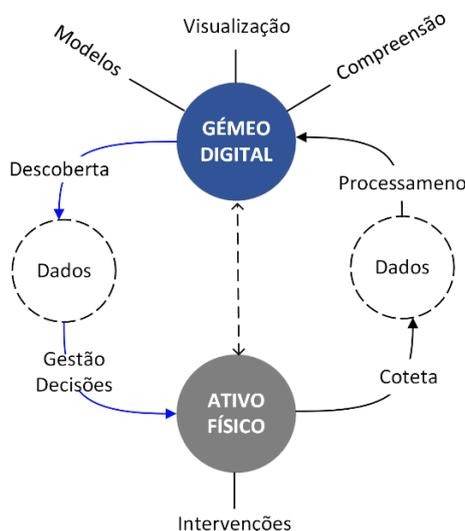
### 2.1 Paradigma dos Gémeos Digitais

No mundo cada vez mais digital, os GDs tem sido grande aposta para o aperfeiçoamento de sistemas ou suporte em processos para resolução de diversos problemas em diferentes áreas. Embora alguns desenvolvimentos relacionados com GDs tenham já algumas décadas, os GDs como tal e principalmente como conceito ainda estão na sua fase de infância (Liu *et al.*, 2021). O conceito de GD foi inicialmente introduzido em 2003 por Michael Grieves em um curso sobre gestão do ciclo de vida do produto na Universidade de Michigan (Grieves, 2014) e a primeira publicação de um artigo em revista aconteceu somente em 2011 (Tao *et al.*, 2019). Atualmente há diversas definições e entendimentos de GDs, não havendo ainda normas ou regulamentação que abranja todos os setores. O setor de manufatura por exemplo está mais avançado e conta já com alguma normalização, como é o caso da norma ISO 23247-1:2021 (“Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 1: Overview and general principles”), recentemente publicado. No setor da AEC, atualmente a criação de GDs não seguem em geral uma norma ou regulamentação específica, e onde aplicável, é razoável a utilização de aspetos normativos dos outros setores, como o acima referido, e por exemplo as normas aplicadas no BIM, visto que para o setor da AEC em certos casos encontram-se aspetos em comum entre os GDs e o BIM.

Conforme previamente referido, existem várias definições e entendimentos do GD. No seio dessas variedades, um GD pode ser definido como sendo uma representação virtual de um ativo, sistema, ou processo físico (gémeo físico), que pode ser atualizado em tempo real ou quase real à medida que novos dados são coletados, fornecer *feedback* ao gémeo físico e simular diversos cenários para avaliar possíveis riscos e prever o desempenho desse gémeo físico (Ye *et al.*, 2019). A figura 1 ilustra basicamente este conceito.

Um dos aspetos que norteiam a criação de um modelo de GD consiste na definição da sua arquitetura. As partes gerais que comumente formam essa arquitetura são: a parte física, a parte virtual, a conectividade entre as partes física e virtual e os dados. A especificidade de um dado modelo de GD ditará os componentes específicos da arquitetura, como por exemplo os aspetos relacionados com a sensorização, internet das coisas (*IoT*), inteligência artificial (IA), etc, e tendo em conta o campo de aplicação. Embora a arquitetura básica seja praticamente comum para a generalidade das áreas, um GD para AEC irá considerar, ferramentas e tecnologias diferentes daquelas aplicadas por exemplo na área de manufatura (Boje *et al.*, 2020). Madni *et al.* (2019) sugere a classificação de GD em 4 níveis de acordo com o nível de sofisticação ou maturidade do modelo: Nível 1- pré-gémeo digital; Nível 2-

gémeo digital; Nível 3- gémeo digital adaptativo e Nível 4- gémeo digital inteligente. A descrição desses níveis é apresentada na tabela 1. Uma das características dos níveis iii e iv é a transmissão de dados ou a atualização do modelo em tempo-real que é um aspeto importante no que diz respeito á comunicação entre as parte física e virtual.



**Fig.1. Conceito básico do Gémeo Digital (adaptado de Boje et al., 2020)**

Relativamente á comunicação entre estas duas partes, Shao et al. (2020), faz referência a três formas de comunicação do ponto de vista temporal, nomeadamente, tempo-real (*real-time*), quase tempo-real (*near real-time*) e *offline*. Os dois últimos verificam-se quando a atualização da parte virtual é periódica, sendo para o quase tempo-real, períodos mais curtos e o *offline*, períodos relativamente longos.

Quadro 1. Níveis de gémeos digitais (adaptado de Madni, et al., 2019)

NÍVEL	SOFISTICAÇÃO DO MODELO	GÉMEO FÍSICO	AQUISIÇÃO DE DADOS DO GÉMEO FÍSICO E CONECTIVIDADE	“MACHINE LEARNING” NO SISTEMA/NA ENVOLVENTE
1 Pré-gémeo digital	modelo virtual, baseado na tecnologia para realizar simulações incl. avaliação de riscos	não existe	não aplicável	não
2 Gémeo digital	modelo virtual de um gémeo físico	existe	desempenho; integridade; manutenção; atualização do modelo virtual em quase tempo-real ou offline	não
3 Gémeo digital adaptativo	modelo virtual de um gémeo físico com uma interface do utilizador adaptável	existe	desempenho; integridade; manutenção; atualização do modelo virtual em tempo-real	não
4 Gémeo digital inteligente	modelo virtual de um gémeo físico com uma interface do utilizador adaptável e reforço de aprendizagem	existe	desempenho; integridade; manutenção; atualização do modelo virtual em ambos tempo real e quase tempo real	sim

Uma outra classificação respeitante a GDs é apresentada por Errandonea, *et al.* (2020), que em função da forma de transmissão de dados entre as partes física e virtual (interação entre as duas partes), classifica os modelos em: (i) Modelo digital – quando a transmissão de dados entre as duas partes é manual; (ii) Sombra digital – quando a transmissão de dados da parte física para parte virtual é automática e no sentido inverso manual (unidirecional automática); (iii) Gémeo digital – quando a transmissão de dados entre as duas partes é automática (bidirecional automática). Essas classificações, que de alguma forma se mantêm em discussão no seio de investigadores vem despertar a necessidade de haver atenção sobre o que designar um GD, bem como os aspetos relevantes para conceção de um determinado nível de GD.

Na AEC é normal que o GD seja associado ao BIM (BrIM no caso de pontes) ou utilização de parte das tecnologias utilizadas no BIM, podendo se considerar para estes casos o BIM como ponto de partida para a criação do GD (Boje *et al.*, 2020), onde o modelo BIM é enriquecido, por exemplo, com dados vindo dos sensores, a *IoT*, de modo a atender determinadas aplicações.

## 2.2 Metodologia de análise de fadiga

Os Eurocódigos propõem duas metodologias para o cálculo de dano por fadiga em ligações: (i) Método de tensão equivalente de amplitude constante e (ii) Método de dano linear acumulado.

O método de tensão equivalente de amplitude constante, também conhecido por método de coeficiente –  $\lambda$  (Horas, 2021) permite efetuar a verificação à fadiga de forma simplificada, tomando como base intervalos de tensão de cargas regulamentares. Este método é apenas aplicável a casos em que a análise dinâmica é dispensada, considerando neste caso uma análise quase-estática para modelos de carregamento aplicáveis e adotando-se os fatores de amplificação dinâmica apropriados. As verificações consistem em satisfazer as condições a seguir indicadas, tendo em conta a verificação em relação a tensões normais (equação 1), tensões tangenciais (equação 2) e verificação simultânea para tensões normais e tangenciais:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1.0 \quad (3)$$

Nas equações acima,  $\Delta\sigma_c$  e  $\Delta\tau_c$  representam a resistência à fadiga associada a 2 milhões de ciclos obtidos a partir da conhecida curva S-N (*Stress vs. number of cycles to failure*),  $\gamma_{Mf}$  e  $\gamma_{Ff}$  representam os fatores parciais de segurança (parte da resistência e da ação, respetivamente) e,  $\Delta\sigma_{E2}$  e  $\Delta\tau_{E2}$  expressam a tensão de amplitude constante equivalente também associada a 2 milhões.

Por sua vez, as tensões  $\Delta\sigma_{E2}$  e  $\Delta\tau_{E2}$  são determinadas tendo em conta as seguintes expressões:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot \Phi \cdot \Delta\sigma_{71} \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{E2} = \lambda \cdot \Phi \cdot \Delta\tau_{71} \quad (5)$$

onde  $\lambda$  é fator de dano equivalente,  $\Delta\sigma_{71}$  e  $\Delta\tau_{71}$  as máximas variações de tensões oriundas do carregamento do modelo LM71 ou SW/0 (se aplicável) e  $\Phi$  é o fator de amplificação de dinâmica, descritas na EN 1991-2 (CEN, 2003).

O método de dano linear acumulado, também denominado Regra de Palmgren-Miner é o mais usado a nível de engenharia civil e mais abrangente em relação ao anterior método de tensão equivalente de amplitude constante. Neste método não se substitui por exemplo as várias amplitudes de tensão atuantes por uma amplitude equivalente e pode ser considerado tanto a análise dinâmica ou quase-estática considerando o tráfego real ou tráfego regulamentar correspondente a comboios de fadiga. Resumidamente, o método funciona da seguinte maneira: Após aplicação as cargas e determinação da tensão nominal para cada intervalo de carregamento, as curvas S-N são aplicadas para determinação do número de ciclos,  $n_i$ , correspondentes a cada variação de tensão,  $\Delta\sigma_i$  do

conjunto de carregamentos, seguindo-se a implementação do dano linear acumulado, de acordo com a seguinte expressão:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq D_L \quad (6)$$

onde, D representa o dano de fadiga acumulado considerando um certo carregamento cíclico,  $n_i$  representa o número de ciclos para variação de tensão  $\Delta\sigma_i$ ,  $N_i$  representa a vida de fadiga expressa em ciclos para o detalhe submetido a mesma variação de tensão e o  $D_L$  é o dano limite (usualmente limitado a 1).

Os dois métodos previamente descritos são considerados conservativos e mais apropriados para análise global, sendo a análise feita com base em tensões nominais (tensão adjacente à localização potencial de uma fenda, calculada pela teoria elástica excluindo qualquer efeito de concentração de tensões (CEN, 2010c)). Entretanto, um processo completo de avaliação de fadiga envolve várias fases, desde análises preliminares, com o intuito de selecionar detalhes propensas á fadiga, avaliação mais detalhada (avaliação local e tendo em conta a concentração de tensões) até a decisão sobre possíveis intervenções. Numa perspetiva de avaliação de fadiga completa para pontes metálicas existentes, Helmerich, *et al.* (2007) e Horas, (2021) consideram uma sequência de quatro fases, nomeadamente, fase I – avaliação preliminar, fase II – avaliação “standard”, fase III - análise detalhada e fase IV – decisões críticas. Nas primeiras duas fases é considerada a aplicação dos métodos de tensão equivalente de amplitude constante e de dano linear acumulado, respetivamente. A fase III é uma análise local e mais avançada, aplicada quando a fase II não é suficiente ou não conclusiva. Nesta fase, métodos locais, de mecânica da fratura e probabilísticos são aplicados (Helmerich, *et al.*, 2007). A fase IV é relativa ás decisões sobre as intervenções na estrutura tendo em conta as análises que envolvem as fases anteriores.

### 3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A metodologia proposta para o desenvolvimento do modelo de GD abrange três fases nomeadamente, a definição dos requisitos de informação (EIR - *Exchange Information Requirement*), elaboração da *framework* e desenvolvimento do modelo respetivo.

#### 3.1 Definição dos requisitos de informação (EIR)

A definição dos requisitos de informação, uma das características na elaboração de modelos BIM e aplicável para o modelo de GD a ser desenvolvido segue a estrutura a seguir apresentada (figura 2):

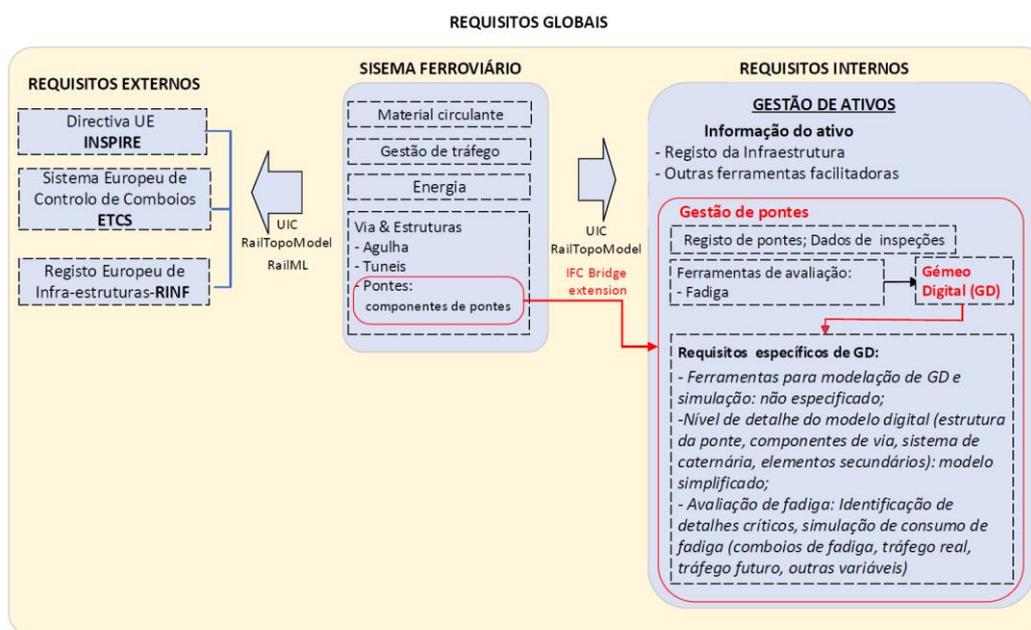


Fig. 2. Estrutura dos Requisitos de informação

### 3.2 Framework global do modelo de Gémeo Digital

A *framework* do modelo de GD proposto é apresentada na figura 3. O modelo é desenvolvido utilizando BrIM (*Bridge Information Modeling* – BIM para pontes) como base para gestão da informação do *input* e resultados provenientes das ferramentas de cálculo de fadiga.

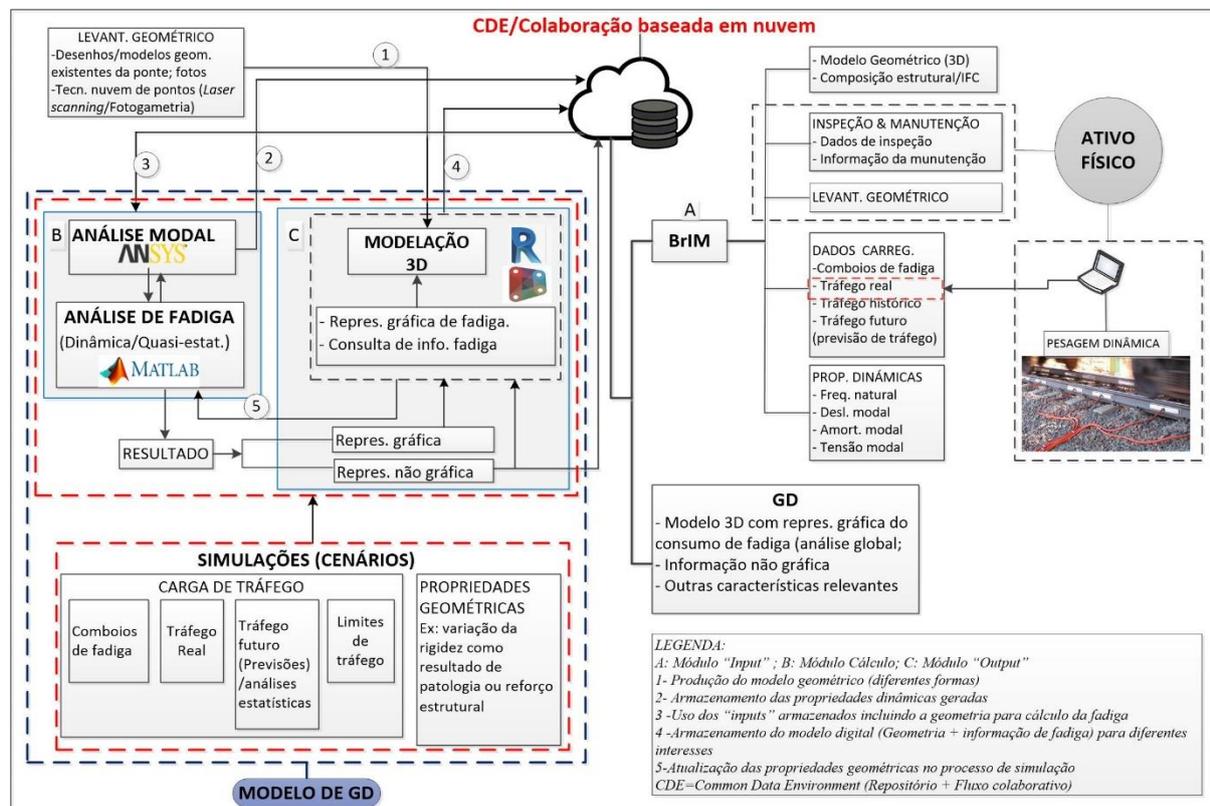


Fig. 3 Framework do modelo de gémeo digital proposto

O que fundamentalmente define o BrIM é uma base de dados partilhável e colaborativa que contém informação relevante e necessária para avaliação da fadiga, como por exemplo os dados de inspeções, propriedades dinâmicas da ponte, cargas do tráfego ferroviário e modelo geométrico tridimensional da ponte. O software REVIT, um dos pacotes mais utilizados para modelação em BIM, é utilizado para a criação do modelo geométrico 3D da ponte bem como a visualização gráfica do dano por fadiga e da informação relacionada a este dano. Um estudo realizado por Jiang *et al.* (2021), referente ao estado-da-arte sobre o estado atual e tendências dos GDs na Engenharia Civil, refere por exemplo, ao software REVIT como estando no topo no diz respeito aos meios de digitalização da parte virtual. O cálculo do dano por fadiga tendo em conta os vários cenários é realizado no software MATLAB, sendo as propriedades dinâmicas necessárias calculadas no software ANSYS. Este processo todo, permite dividir o modelo em três módulos, nomeadamente, módulo *input*, módulo cálculo e módulo *output*.

**Módulo *input*:** A informação contida neste módulo é armazenada em repositório baseado em nuvem, sendo atualizável em tempo real pelas diferentes partes que gerem o modelo. Este módulo recebe e armazena por exemplo os dados de tráfego provenientes da pesagem dinâmica. Dentre os dados armazenados, o módulo recebe ainda a informação de propriedades dinâmicas processadas no módulo de cálculo.

**Módulo de cálculo:** A parte do cálculo subdivide-se em duas partes: (i) o cálculo de propriedades dinâmicas (análise modal) no software ANSYS, sendo feita uma única vez ou sempre que haja alterações nas propriedades geométricas da estrutura e (ii) o cálculo de dano por fadiga para diferentes cenários no software MATLAB. A integração entre estes dois softwares é automática conforme ilustrado na figura 4;

**Módulo *output*:** É composto pelos resultados do dano por fadiga para diferentes cenários e a respetiva representação (gráfica e não gráfica) no modelo geométrico 3D da ponte. A integração da informação neste

módulo, vindo do módulo de cálculo e outra vindo diretamente do módulo *input* é feito por meio do API (Application Interface Programming) DYNAMO. A informação vinda diretamente do módulo *input* é aquela que é meramente descritiva, por exemplo o tipo de tráfego considerado para um dado cenário, a identificação dos detalhes, etc. O processo todo de integração entre os módulos e softwares associados é apresentado na figura 4 a seguir.

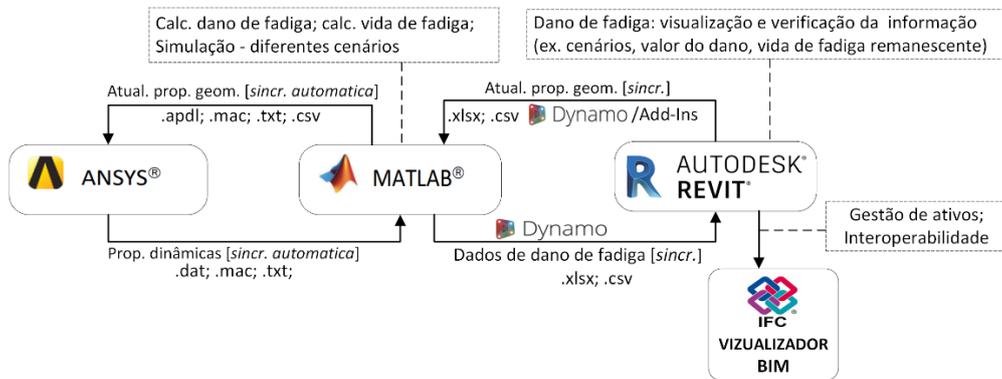


Fig. 4. Processo de integração entre módulos ou softwares/ aplicações no modelo do gémeo digital

### 3.2.1 Cálculo de dano por fadiga

O cálculo da fadiga é feito com base na metodologia descrita em 2.2, realizada para o nível 2 (avaliação “standard”) e seguindo o procedimento apresentado na figura 5.

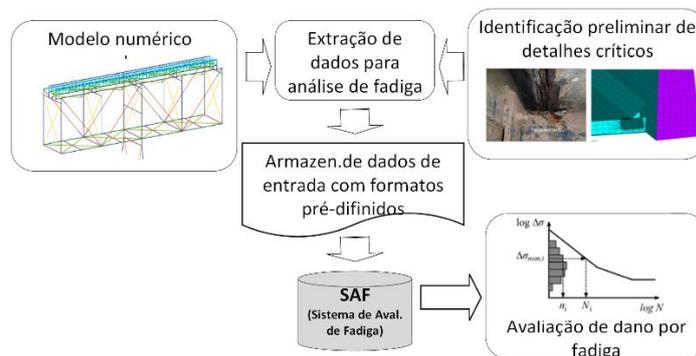


Fig. 5. Procedimento do cálculo de dano por fadiga

### 3.2.2 Representação do estado da fadiga no modelo virtual

A representação gráfica da evolução de fadiga é baseada numa escala de cores, tendo em conta o grau de consumo de fadiga (0 a 1). A figura 6 a seguir mostra o exemplo de representação da informação (visualização gráfica e não gráfica).

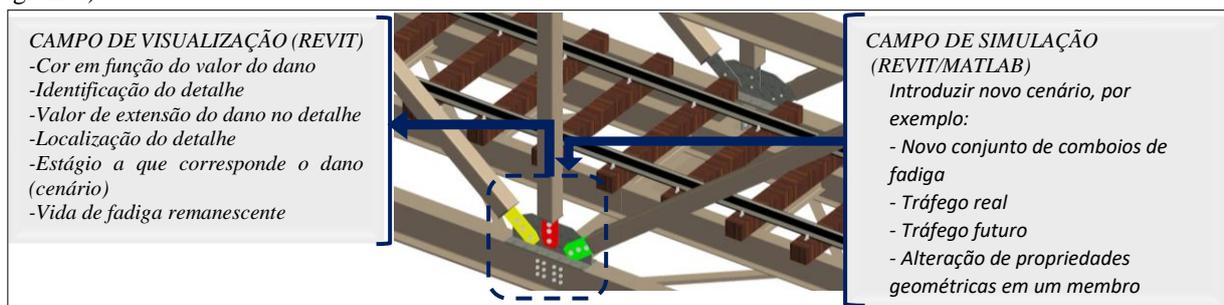


Fig. 6. Representação gráfica do estado da fadiga no modelo virtual e simulação

Para níveis de consumo mais elevados ( $d \geq 0,95$ ) é atribuído cor vermelha, para  $0,85 \leq d < 0,95$  a cor é laranja,  $0,75 \leq d < 0,85$  a cor é amarela e para níveis muito menos críticos ( $0 \leq d < 0,75$ ) é atribuído ao detalhe uma cor verde. Como acima referido, a representação inclui a parte gráfica e informação não gráfica, sendo a mesma dependente de dados oriundos do cálculo e do módulo *input* que é automaticamente transferida para visualização conforme representado nas figuras 3 e 4.

O modelo a seguir em estudo é referente a uma ponte metálica ferroviária existente com de 5 vãos (figura 7).



Fig. 7. Vista da ponte em estudo

A ponte é treliçada e constituída por ligações rebitadas. Estágios iniciais do desenvolvimento do modelo são apresentados na figura 8.

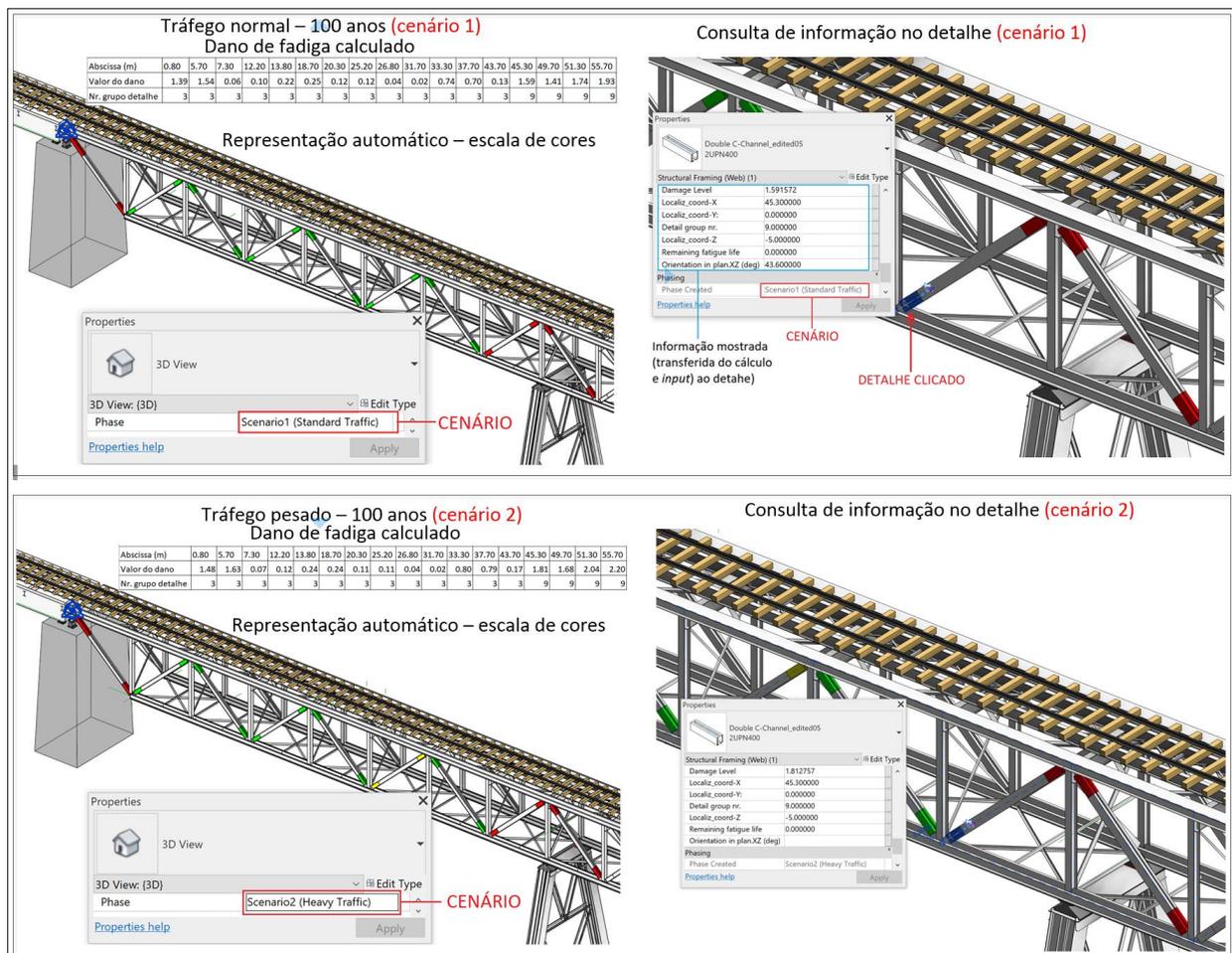


Fig. 8. Representação gráfica do estado da fadiga no modelo virtual para a ponte em estudo-detalhes em diagonais do 1º vão.

A representação do estado de fadiga (dano acumulado) no modelo virtual (representação gráfica e informação não gráfica) corresponde às diagonais do 1º vão da ponte, simulado para dois dos três cenários de tráfego previstos no Eurocódigo - EN 1991-2 (CEN, 2003), nomeadamente o tráfego normal (“standard traffic mix”) e tráfego pesado (“heavy traffic mix”).

## 4 DISCUSSÃO

Neste modelo que foram testados dois dos três cenários de comboios de fadiga para um período de 100 anos, nomeadamente o tráfego normal (*standard traffic mix*) e o tráfego pesado (*heavy traffic mix*) é feita a respetiva representação (parte gráfica e informação não gráfica) para detalhes das diagonais de um dos vãos da ponte. Uma carga real que depende da medição da carga de tráfego atual (pesagem dinâmica) e que constituiria um dos cenários, é necessária de modo a ter-se uma representação real do estado de fadiga para o nível de avaliação proposto neste trabalho, sendo este parte dos próximos desenvolvimentos. Outros cenários são nomeadamente o tráfego ligeiro (*light traffic mix*), tráfego futuro, que pode ser estimado a partir do tráfego real (tráfego presente) e o cenário relacionado com variação de propriedades geométricas da ponte. Estes dois últimos cenários têm grande papel na simulação do tipo “*what if*”. O processo completo sobre as simulações para o modelo proposta está representado na *framework* da figura 3.

A análise de fadiga efetuada é global (não detalha ou local) e faz parte da 2ª fase de avaliação de fadiga na perspetiva de uma análise completa á fadiga, visto que o maior interesse é identificar os detalhes propensos á fadiga e representar virtualmente a sua informação (parte gráfica e não gráfica). Porém com apenas os dois cenários aqui testados não seria suficiente, e conforme acima referido mais cenários são necessários, com o destaque para o tráfego real.

A comunicação entre a entidade física (gêmeo físico) e a parte virtual, do ponto de vista temporal, a literatura faz referência ao tempo-real, quase tempo-real e “*offline*”, podendo se dizer que este modelo em desenvolvimento se enquadra nos últimos dois. Por um lado, porque a fadiga é um processo progressivo e em geral não instantâneo, havendo pouca utilidade para que a comunicação entre a entidade física e a parte virtual seja em tempo-real e, por outro lado, a atualização do estado real da evolução de fadiga depende do tráfego real acumulado; na mesma linha, também uma atualização relacionada com eventual variação nas propriedades geométricas dependerá sempre dos dados de inspeções regulares e as manutenções. Não obstante, certas sub-tarefas internas no modelo digital são executáveis em tempo-real.

Em qualquer atualização, os softwares MATLAB e REVIT devem estar abertas, sendo no 1º para o cálculo e no 2º para visualização da informação no modelo. Quando é apenas visualização (gráfica e não gráfica) do estado de fadiga para diferentes cenários, pode ser feita no único software (o REVIT) podendo se exportar para outras plataformas dentro do contexto da interoperabilidade. O maior suporte do BIM/BrIM consiste na gestão da informação desde o *input* ao *output* e a modelação.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado e discutido a metodologia que inclui a *framework* para o desenvolvimento de um modelo de GD para avaliação da fadiga. Com o objetivo de identificar os detalhes propensos á fadiga e representar a respetiva informação através do processo integrado do modelo proposto, a avaliação da fadiga é feita até á fase II de um total de quatro fases devidamente descritas ao longo deste trabalho. O modelo é constituído por três módulos, nomeadamente, o módulo *input*, o módulo cálculo e o módulo *output*, integrados entre si, para o cálculo e simulação de diversos cenários e visualização da informação (gráfica e não gráfica). O BIM/BrIM serve de maior suporte para a gestão da vasta informação e a modelação. O desenvolvimento do modelo segue 3 etapas nomeadamente, a definição dos requisitos de informação, elaboração da *framework* e o processo de implementação. Dois dos três cenários do conjunto de comboios de fadiga é testado num dos vãos da ponte, havendo necessidade de mais cenários, destacando a simulação com o tráfego real. Estes pequenos testes, mostram-se promissores para os desenvolvimentos subsequentes que integrarão outros cenários, a revisão e possível melhoria do processo de automatização que irá culminar com o fecho do modelo.

## 6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) ao abrigo de protocolo com Consórcio das Escolas de Engenharia (CEE), no âmbito do Centro Ciência LP, Centro de Categoria 2, sob os auspícios da UNESCO.

Créditos: CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - FEUP

## 7 REFERÊNCIAS

- Boje, C. *et al.* (2020) ‘Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research’, *Automation in Construction*, 114(March), p. 103179. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
- CEN. (2003). Eurocode 1: Actions on structures. Part 2: Traffic Loads on Bridges. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN. (2010c). Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-9: Fatigue. Lisbon, Portugal: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- Dong, Q. *et al.* (2021) ‘Real-time prediction method of fatigue life of bridge crane structure based on digital twin’, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 44(9), pp. 2280–2306. doi: 10.1111/ffe.13489.
- Errandonea, I., Beltrán, S. and Arrizabalaga, S. (2020) ‘Digital Twin for maintenance: A literature review’, *Computers in Industry*, 123. doi: 10.1016/j.compind.2020.103316.
- Grieves, M. (2014) ‘Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - A Whitepaper by Dr . Michael Grieves’, *White Paper*, (March), pp. 1–7.
- Helmerich, R., Kühn, B. and Nussbaumer, A. (2007) ‘Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life’, *Structure and Infrastructure Engineering*, 3(3), pp. 245–255. doi: 10.1080/15732470500365562.
- Da Silva Horas, C. C. (2021). Integrated Methodology for Fatigue Life Prediction of Existing Metallic Railway Bridges. *Phd Thesis*.
- Jiang, F. *et al.* (2021) ‘Digital twin and its implementations in the civil engineering sector’, *Automation in Construction*, 130(February), p. 103838. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103838.
- Leser, P. E. *et al.* (2020) ‘A digital twin feasibility study (Part II): Non-deterministic predictions of fatigue life using in-situ diagnostics and prognostics’, *Engineering Fracture Mechanics*, 229(February), p. 106903. doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.106903.
- Liu, M. *et al.* (2021) ‘Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications’, *Journal of Manufacturing Systems*, 58(PB), pp. 346–361. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- Madni, A. M., Madni, C. C. and Lucero, S. D. (2019) ‘Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering’, *Systems*, 7(1), pp. 1–13. doi: 10.3390/systems7010007.
- Santecchia, E. *et al.* (2016) ‘A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metals’, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016. doi: 10.1155/2016/9573524.
- Shao, G. and Helu, M. (2020) ‘Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements’, *Manufacturing Letters*, 24, pp. 105–107. doi: 10.1016/j.mfglet.2020.04.004.
- Tao, F. *et al.* (2019) ‘Digital Twin in Industry: State-of-the-Art’, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), pp. 2405–2415. doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- Ye, C. *et al.* (2019) ‘A digital twin of bridges for structural health monitoring’, *Structural Health Monitoring 2019: Enabling Intelligent Life-Cycle Health Management for Industry Internet of Things (IIOT) - Proceedings of the 12th International Workshop on Structural Health Monitoring*, 1(February 2020), pp. 1619–1626. doi: 10.12783/shm2019/32287.