

Novas tendências na avaliação e gestão de infraestruturas marítimas – resultados do projeto GIIP

José C. Matos

Professor, Universidade do Minho

jmatos@civil.uminho.pt



Universidade do Minho

Organização



Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes



COMISSÃO
PORTUGUESA de
MELHORAMENTO de
TERRENOS



Objetivo principal

Desenvolver um sistema modular de apoio à decisão para a gestão integrada de activos, baseado em novos modelos de degradação funcional e estrutural para diferentes tipos de activos, e tendo em conta critérios operacionais, económicos e ambientais.

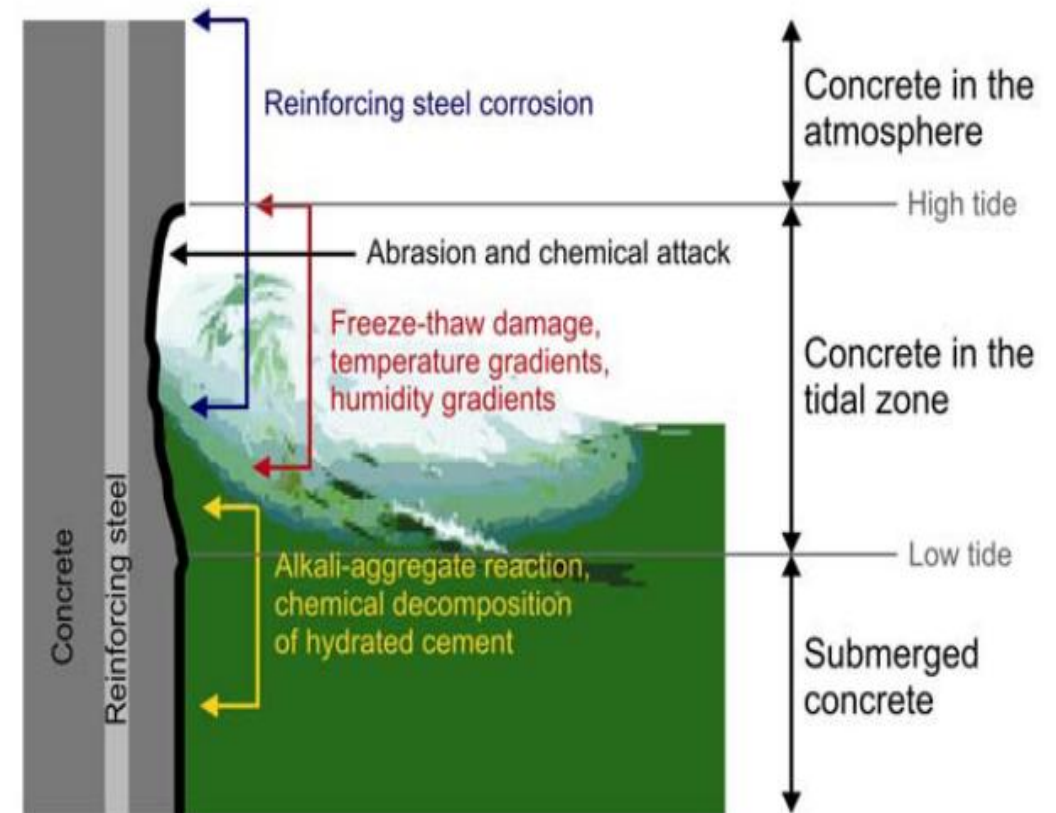


Figura. Possíveis mecanismos de degradação do betão, quando exposto a um ambiente costeiro

Crédito da imagem: Malhorta, 2000



Estudo de caso

*Doca 4 Norte – Porto de Leixões,
Portugal.*



Universidade do Minho



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



Universidade do Minho



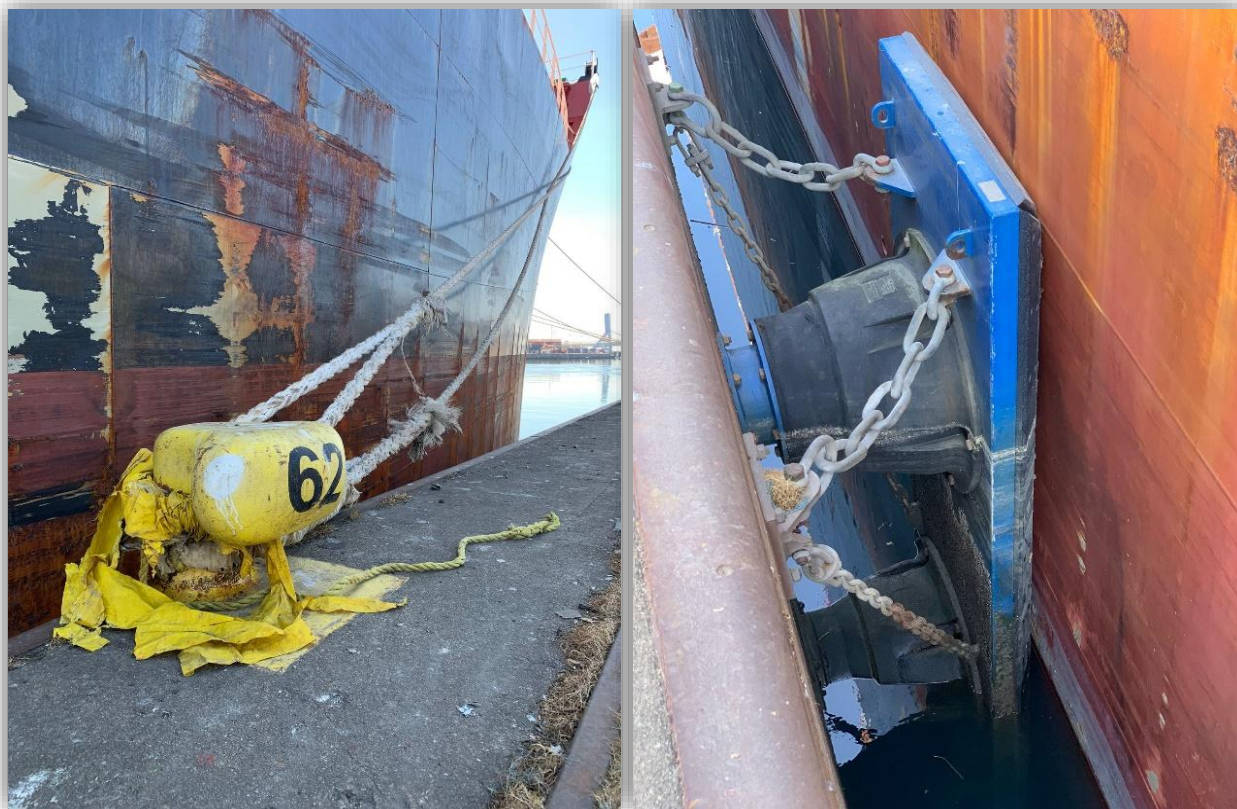
*Figura. Localização do Porto. Estudo de caso: Porto Leixões,
Portugal*



1. Análise dos **cabeços de amarração** e das **defensas marítimas**;
2. **Modelos de deterioração** para estruturas de betão armado;
3. **Modelação da estrutura**;
4. **Apoio à decisão**



1. Desenvolvimento de um sistema inteligente



Cabeços de amarração e defensas marítimas

- ✓ São elementos muito frequentes em infraestruturas portuárias;
- ✓ Servem como ponto de contacto entre as embarcações e as infraestruturas portuárias.

Figura. Estruturas portuárias (cabeço de amarração e defesa marítima)



1. Desenvolvimento de um sistema inteligente

Análise do comportamento dos cabeços de amarração

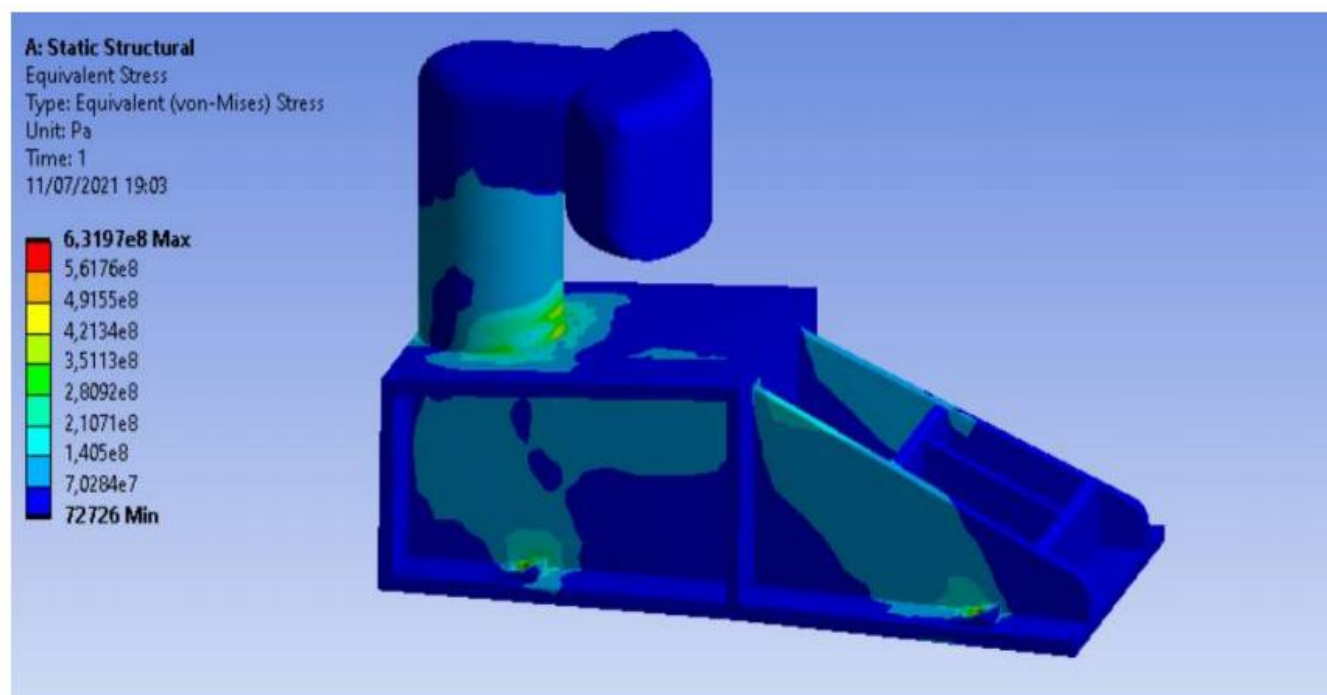


Figura. Localização das zonas de maior tensão do cabeço de amarração

Crédito da imagem: Carneiro, P.D.L.C.G. (março 2022) - Tese mestrado

Modelação dos cabeços de amarração e das defensas marítimas

- ✓ Fornecer informações de forma contínua;
- ✓ Os cabeços de amarração apresentam elevada resistência;
- ✓ A rotura dos cabeços de amarração deve-se, sobretudo, ao seu estado de utilização;
- ✓ Os sensores podem garantir uma monitorização eficaz do estado de utilização dos cabeços de amarração.

1. Desenvolvimento de um sistema inteligente

Análise do comportamento da defesa marítima

Condições Fronteira

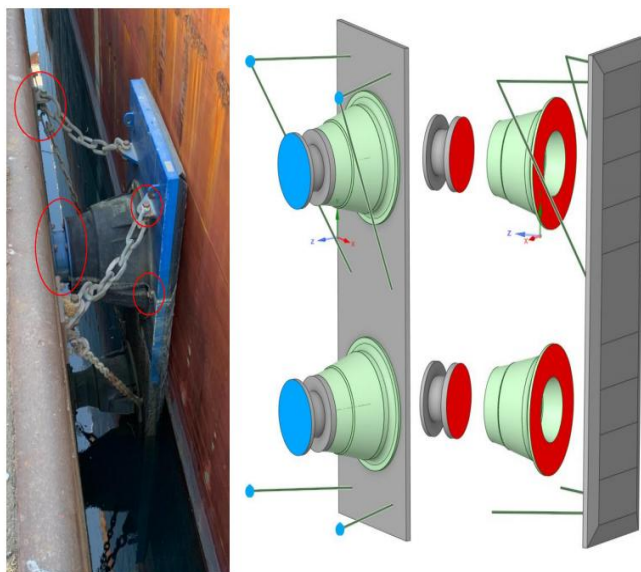


Figura. Condições de apoio da estrutura real (esquerda), do modelo numérico (direita)

Crédito da imagem: Lopes, G. P. (outubro 2023) – Tese mestrado

Solicitações

Aspetos considerados:

- ✓ Tipologia da embarcação;
- ✓ Geometria e singularidades do casco da embarcação.

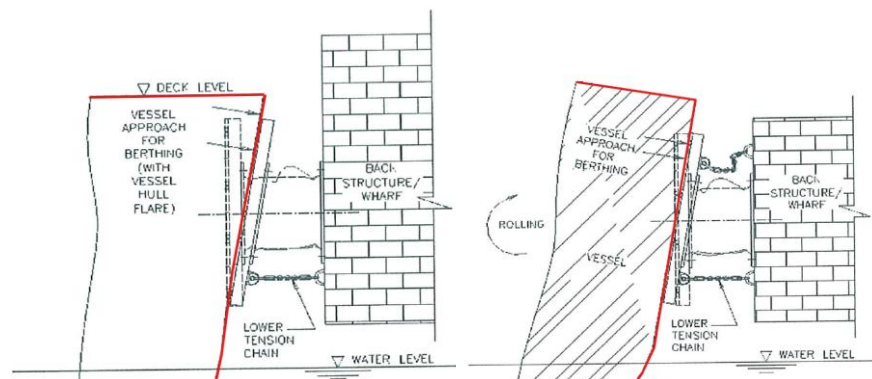


Figura. Embarcações com diferentes geometrias de casco.

Crédito da imagem: Memória Técnica APDL

Resultado

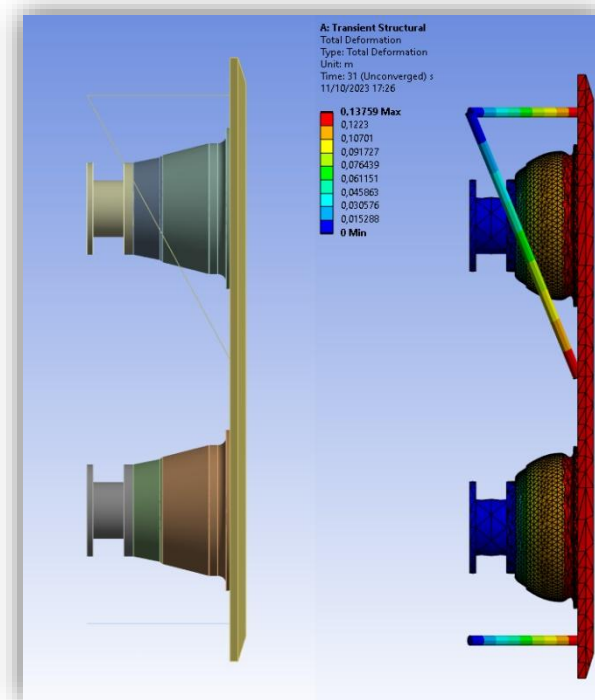


Figura. Deformada obtida do modelo numérico

Crédito da imagem: Lopes, G. P. (outubro 2023) – Tese mestrado

1. Desenvolvimento de um sistema inteligente

Principais resultados



Figura. Extensómetro para a monitorização das deformações - cabeços de amarração

Crédito imagem: TDG, 2023



Figura. Sensor de proximidade ultrassónico – defensas marítimas

Crédito imagem: Botnroll, 2023

Sistemas de monitorização no cabeço de amarração:

- Identificação das zonas de tensão;
- Determinação das extensões e das cargas de serviço;
- Avaliação da magnitude e inclinação da carga, permitindo prever eventuais roturas.

Sistemas de monitorização das defensas:

- Identificação das condições de acostagem;
- Avaliação da redução da capacidade de absorção de energia;
- Previsão de rotura dos elementos;
- Medição da carga transmitida à infraestrutura.

1. Desenvolvimento de um sistema inteligente

Principais resultados



Prototipo Experimental

- Medição da velocidade de impacto das embarcações no cais;
- Cálculo das acelerações;
- Monitorização de danos em cais portuários.

Figura. Captura do video da câmara 2 do teste GIIP-50-92-450-PERI-0-53

Crédito da imagem: Santos, R.F.J. (dezembro 2022) -Tese mestrado

2. Modelos de deterioração para estruturas betão armado

Identificação do problema de corrosão



Tipo de sensor	ALARME 1 (- grave)	ALARME 2 (+ grave)
T (°C)	+50	+60
R (Ohm)	<1000	<100 e <1000 + do que 10 dias
P (mV)	<-400	<-400 + do que 10 dias
I (A)	<-1E-6	<-10E-6

Sistema de alarme (A) e estados prováveis de condição (E) associados à corrosão.

$$\mathcal{A}_r^n(t) = \frac{\pi \left[D_0 - 2 \int_{T_i}^t r_{corr}(t_p) dt_p \right]^2}{4}$$

Tabela. Resistividade do betão (ohm) - Alarme

A1	>=2000	Risco insignificante de corrosão
A2	1000	Baixo risco de corrosão
A3	300	Risco médio de
A4	200	
A5	<=100	Ri

Tabela. Potencial de corrosão (mV) - Alarme

A1	>=-50	Risco insignificante de corrosão
A2	-100	Baixo risco de corrosão
A3	-200	Risco médio de corrosão
A4	-350	Elevado risco de corrosão
		Risco muito elevado de corrosão

Tabela. Corrente Galvanização (A) – Estado Condição

E1	0,1E-06	Passive corrosion zone
E2	1E-06	Transition corrosion zone
E3	1E-05	High active corrosion zone



2. Modelos de deterioração para estruturas betão armado

Modelo de deterioração no tempo

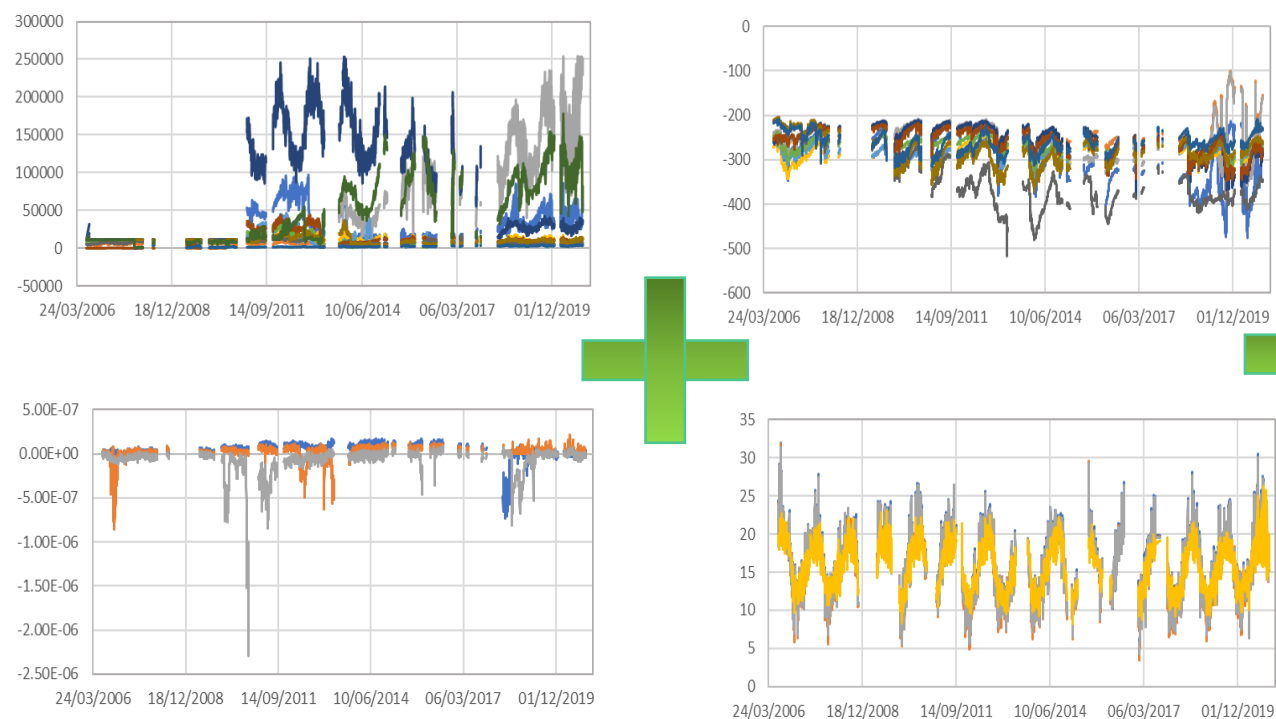


Figura. Dados recolhidos pelos sensores electroquímicos

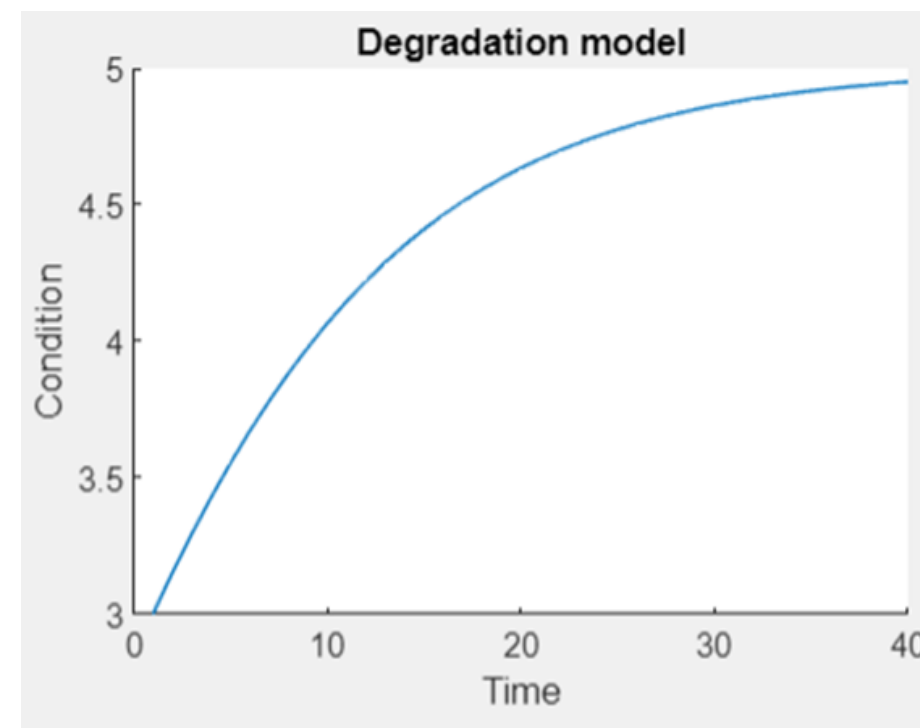


Figura. Projeção do deterioração ao longo do tempo, usando cadeias de Markov



2. Modelos de deterioração

Principais resultados

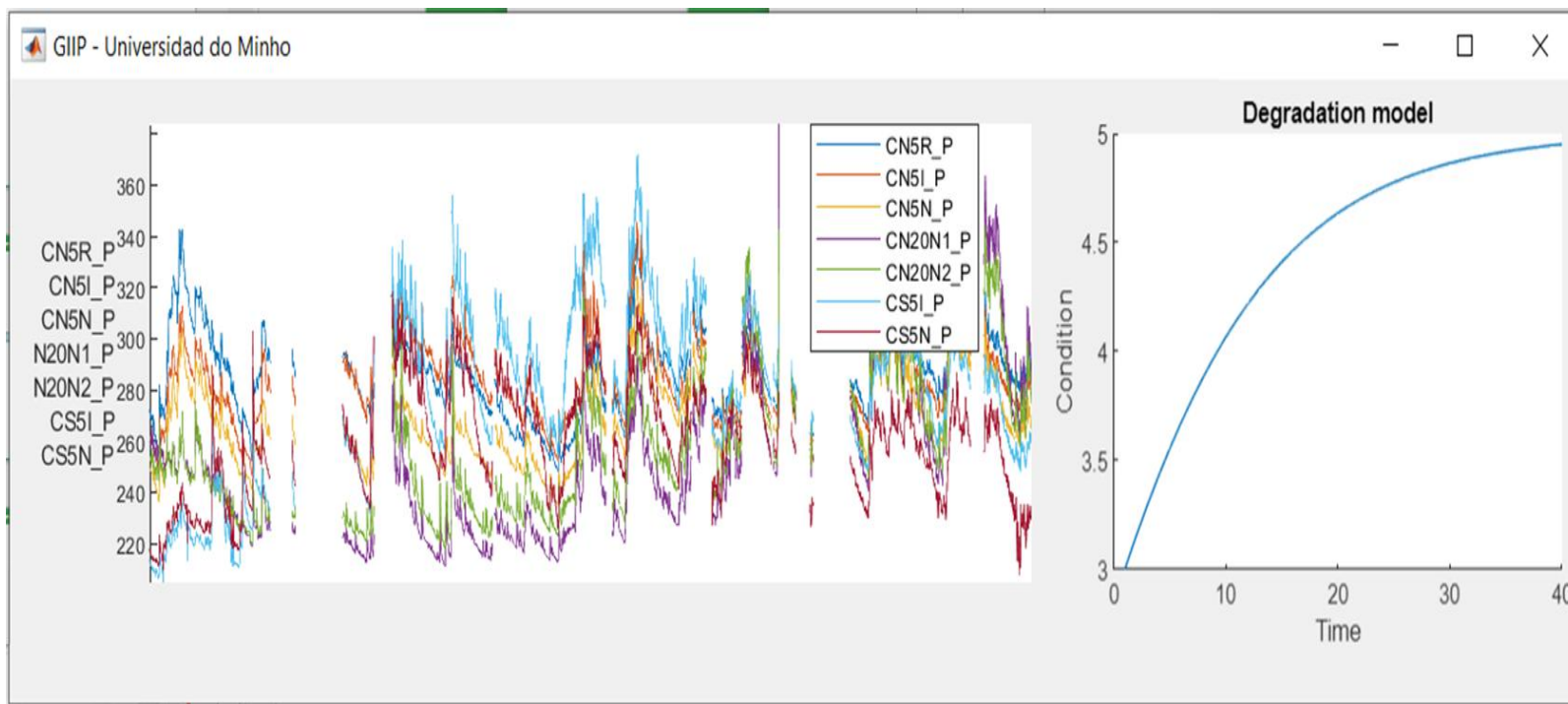


Figura. Modelo de deterioração utilizando dados de sensores electroquímicos

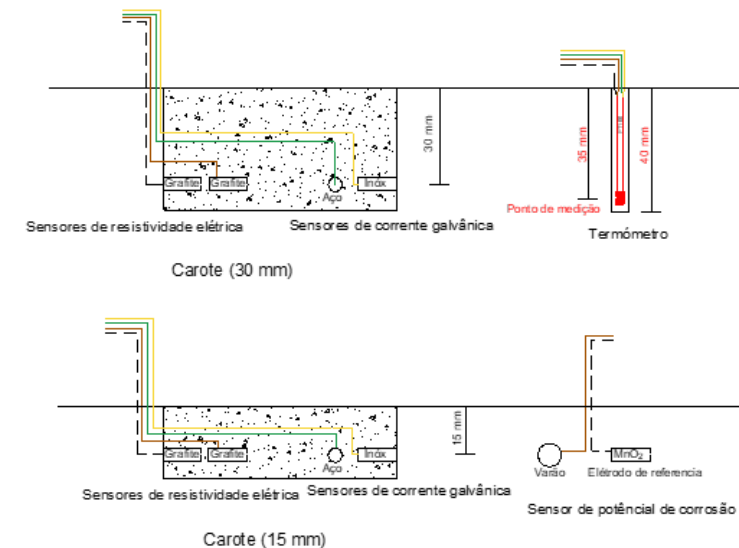


Figura. Sensores embebidos no betão

Crédito da imagem: LNEC



2. Modelos de deterioração

Modelo da deterioração no tempo

Condition state	Resistivity
1	< 100
2	100–500
3	500–1000
4	1000–3000
5	3000–6000
6	6000–20,000
7	> 20,000

Tabela. Condições de estado para o estabelecimento de cadeias de Markov.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.06 & 0.94 & 0 & 0 \\ 0.01 & 0.03 & 0.96 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.99 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0.98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.30 & 0.70 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0,39 & 0,17 & 0,06 & 0,39 & 0 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,76 & 0,09 & 0,07 & 0,03 & 0 & 0 \\ 0,01 & 0,02 & 0,86 & 0,11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0,78 & 0,21 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0,75 & 0,23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,01 & 0,98 & 0,01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,30 & 0,70 \end{bmatrix}$$

Matrizes de probabilidade

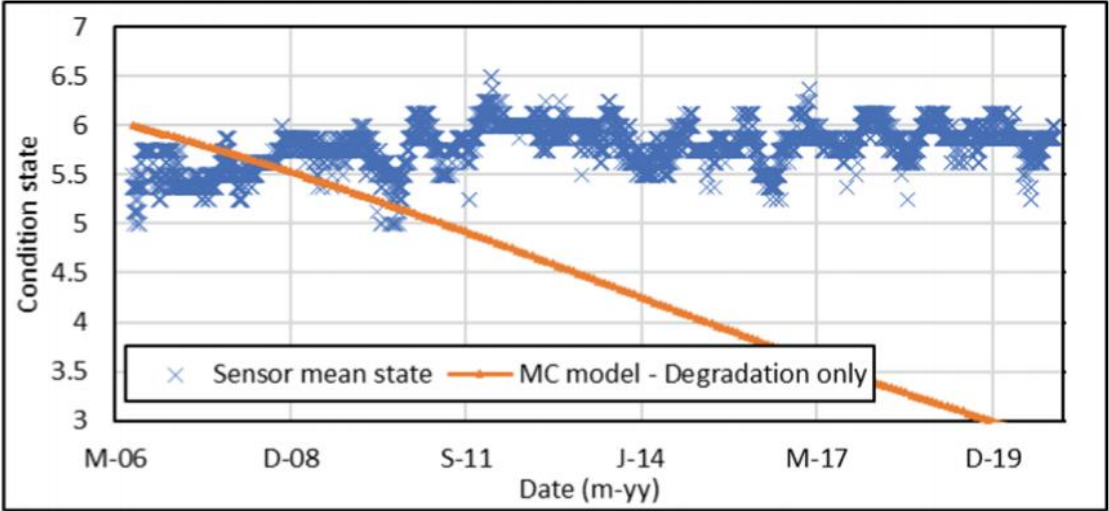


Figura. Modelo de Markov a considerar apenas a deterioração

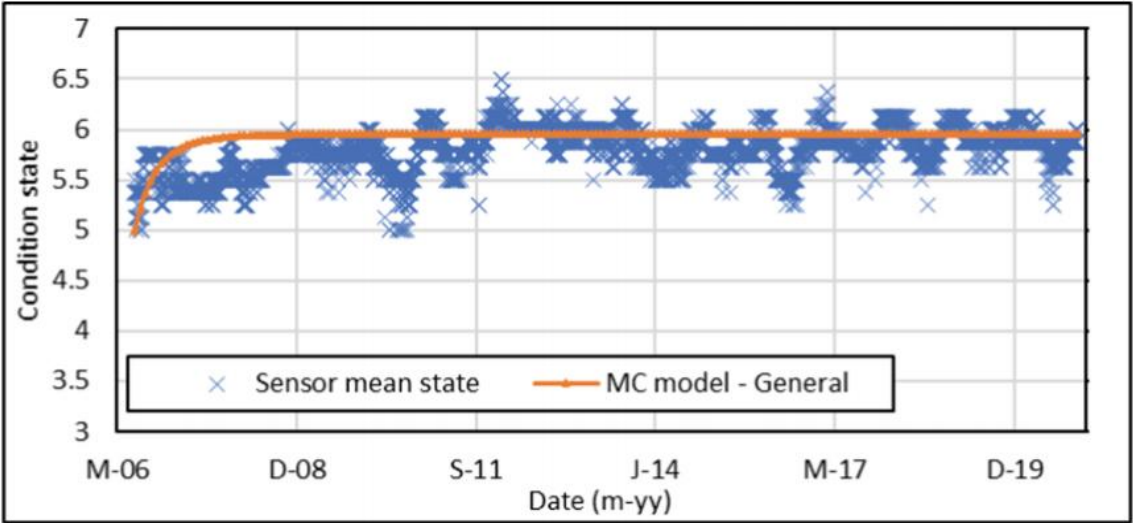
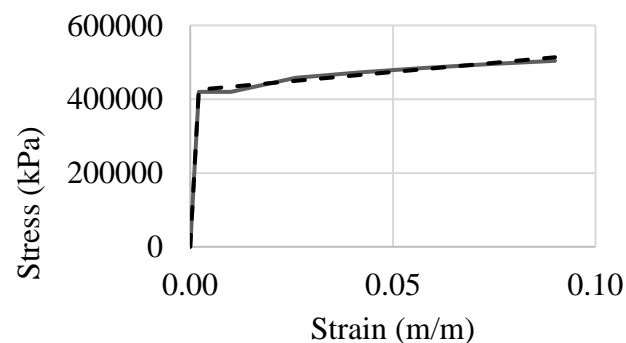
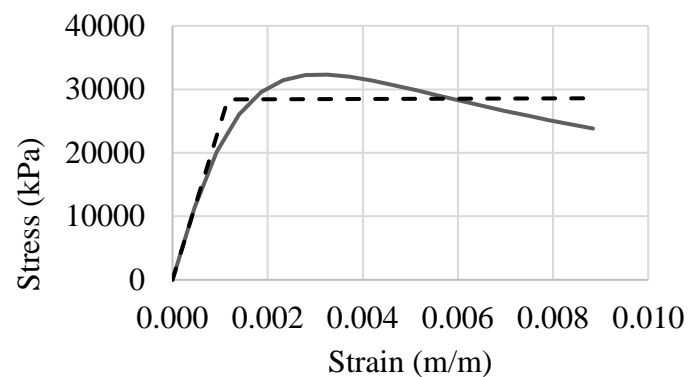


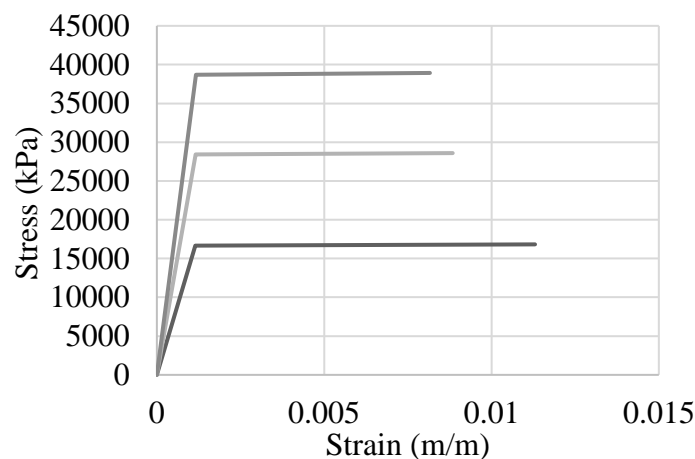
Figura. Modelo Markov a considerar a deterioração e resultados dos sensores (atualização)

3. Modelação da estrutura

Modelos de Elementos Finitos para a Geometria do Cais



(a)



(b)

Figura. Modelo Bilinear para (a) RC30RHO10; (b) Barras em aço ASTM A615Gr60

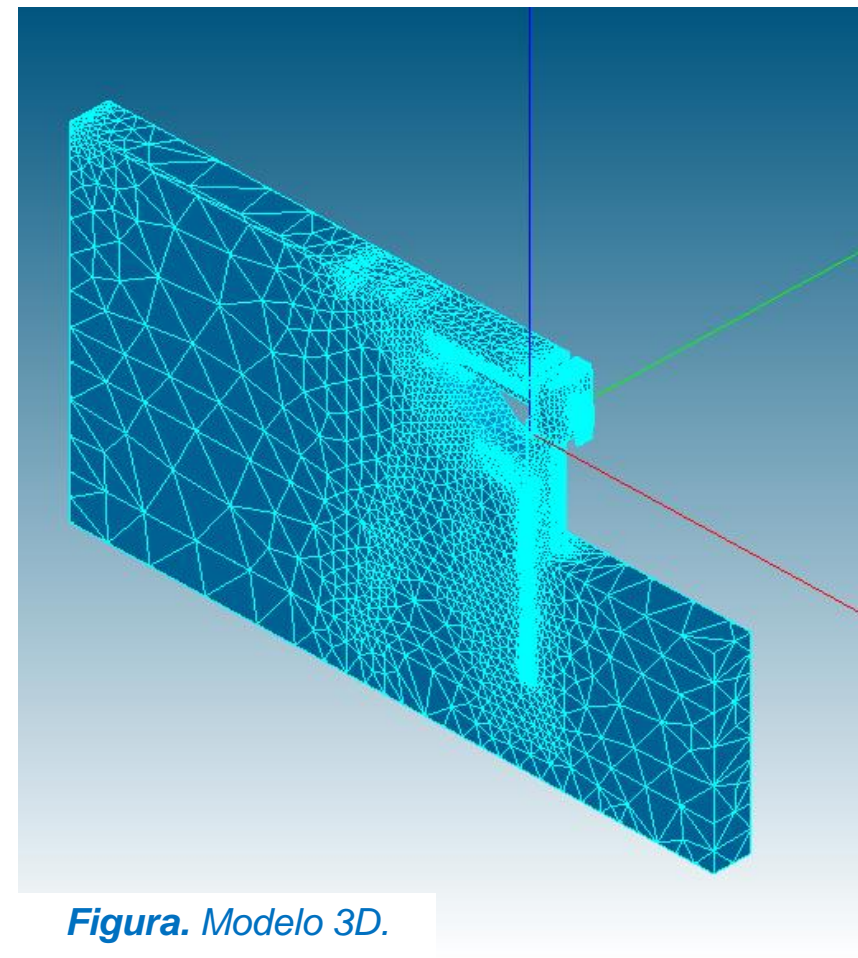


Figura. Modelo 3D.



3. Modelação da estrutura

Padrões de carga, força de navios e comportamento do solo

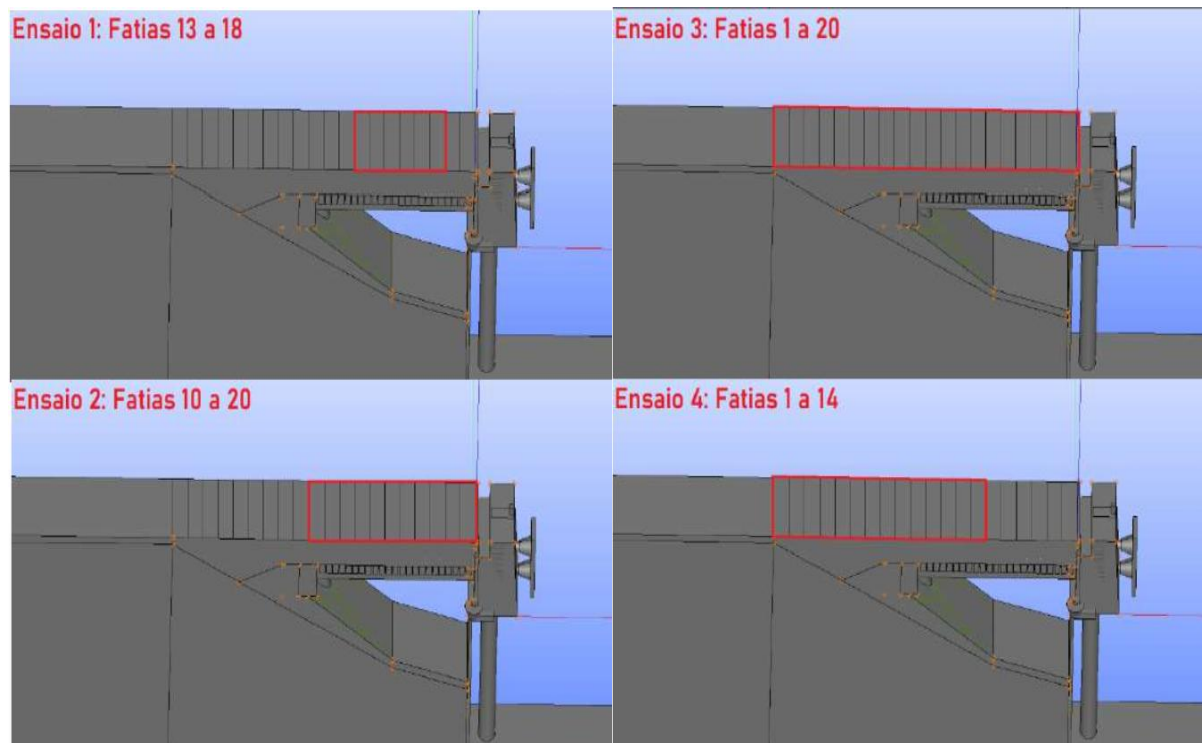


Figura. Modelação - Padrões de carga .

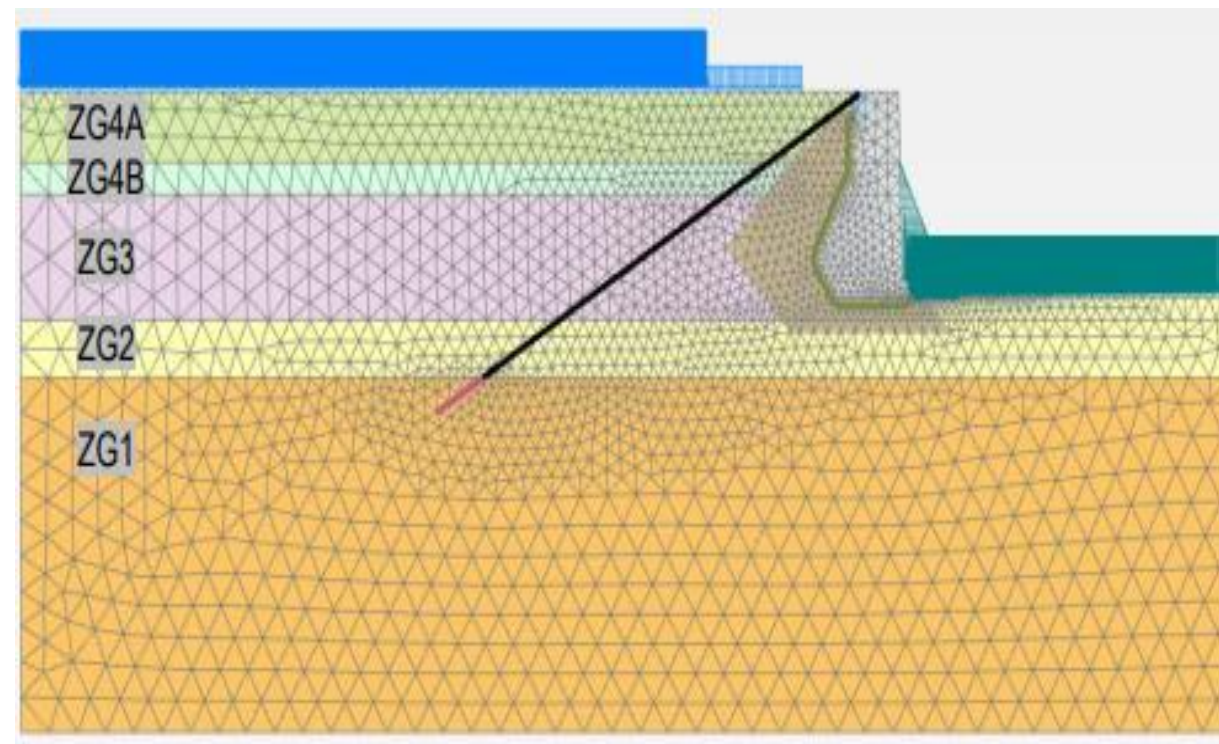


Figura. Modelação – Interação estrutura vs. solo



3. Modelação da estrutura

Principais resultados

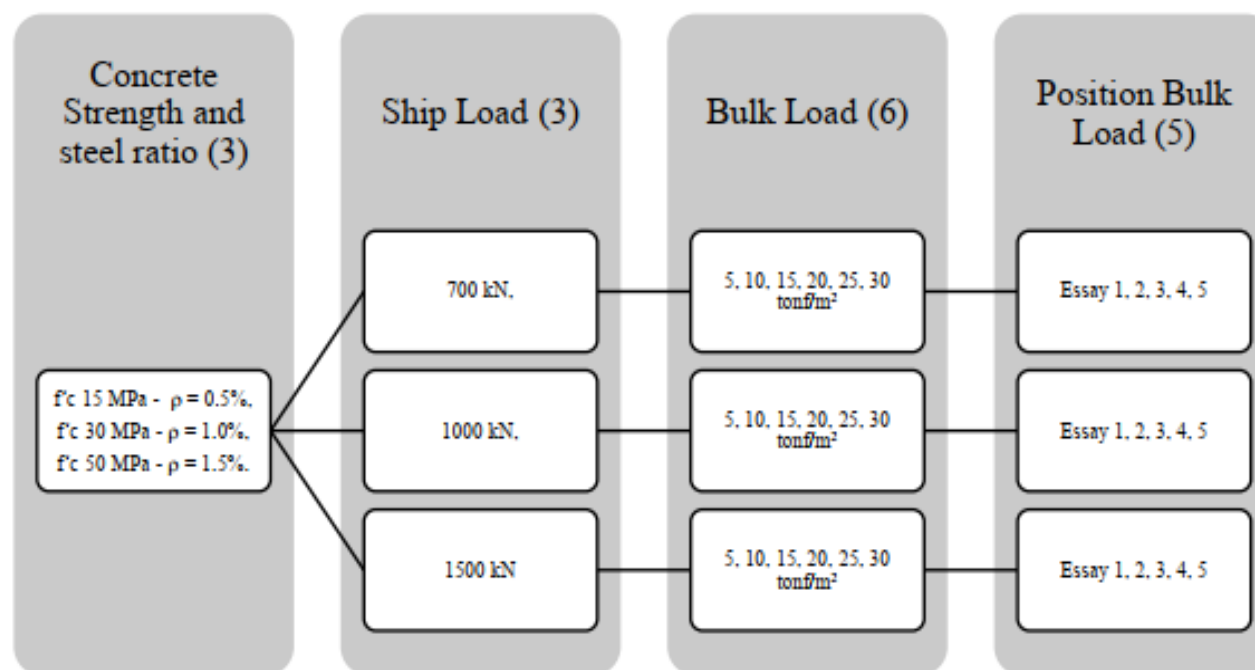


Figura. Esquema das variáveis analisadas neste estudo, e os seus valores gerais.

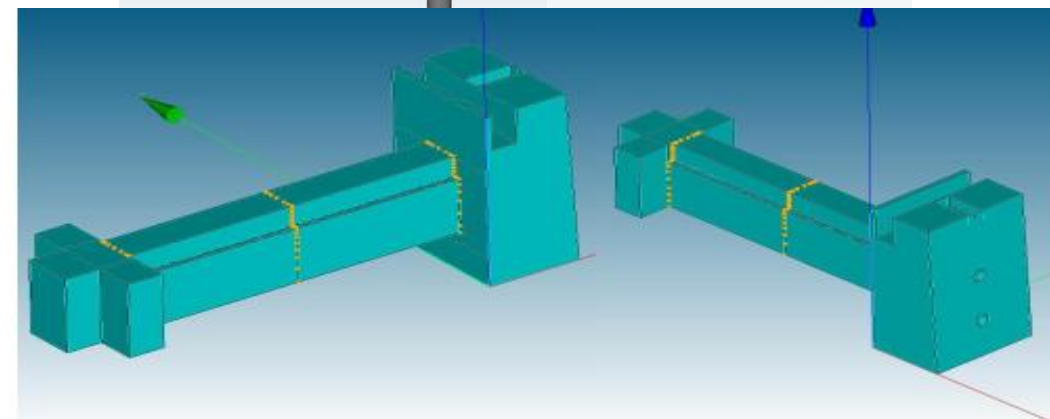
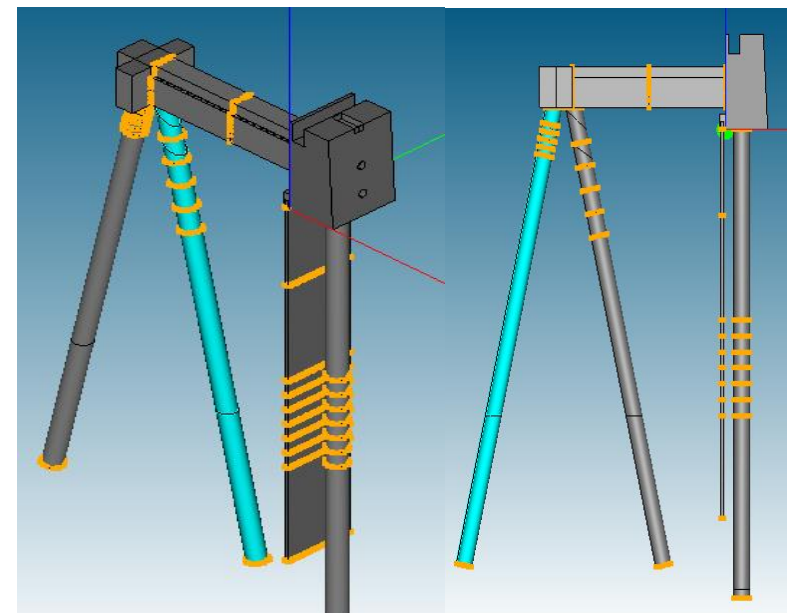


Figura. Localização das secções transversais analisadas no interior da viga principal para análise dos esforços internos

4. Apoio à decisão

Avaliação do risco e cenários de manutenção

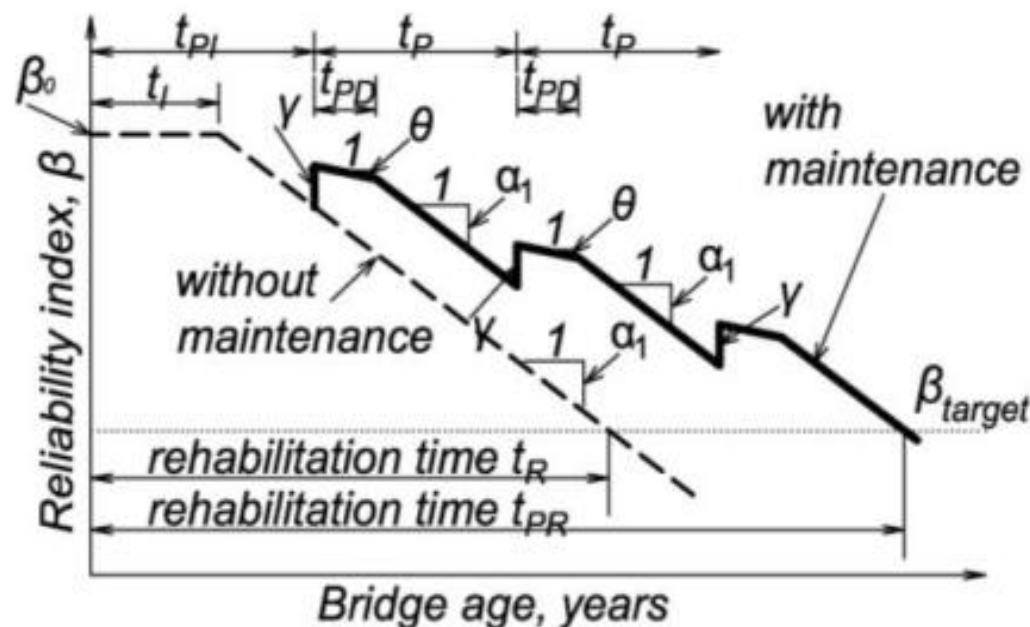


Figura. Perfil de fiabilidade sem (tracejado) e com manutenção (linha sólida).

Crédito da imagem: Frangopol et al., 2001

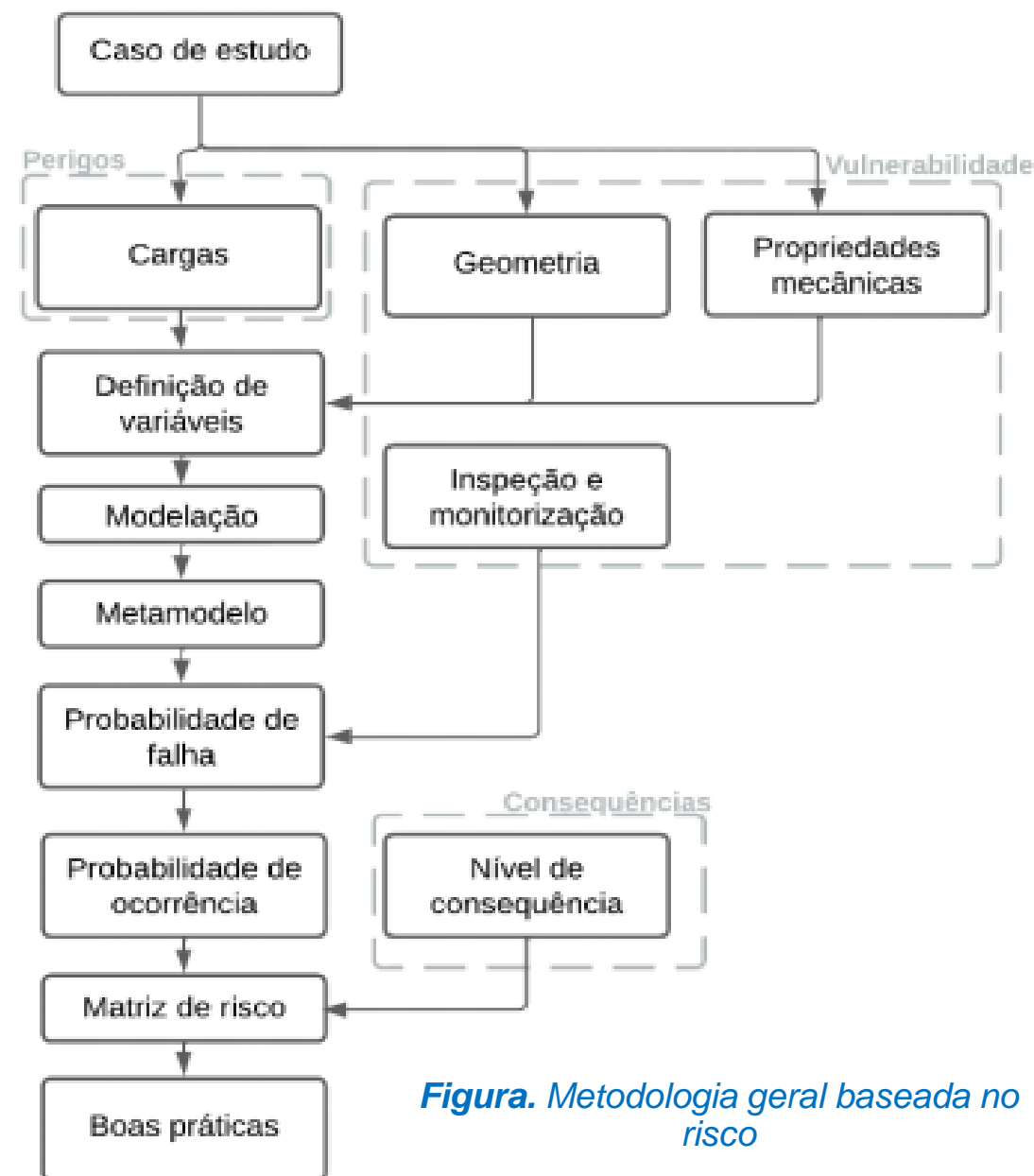


Figura. Metodologia geral baseada no risco



Conceção dos mecanismos de gestão de dados



4. Apoio à decisão

Principais resultados

- ✓ **Pequenas reparações do betão e das armaduras:** limpeza e selagem das áreas localizadas com betão danificado e limpeza e proteção das armaduras corroídas;
- ✓ Estas ações não causam qualquer melhoria no índice de fiabilidade, mas **produzem um atraso na taxa de deterioração** (linha lilás);
- ✓ Neste caso, assumiu-se que as **ações preventivas** seriam estabelecidas a cada 6 anos, atrasando a degradação da fiabilidade em 3 anos.

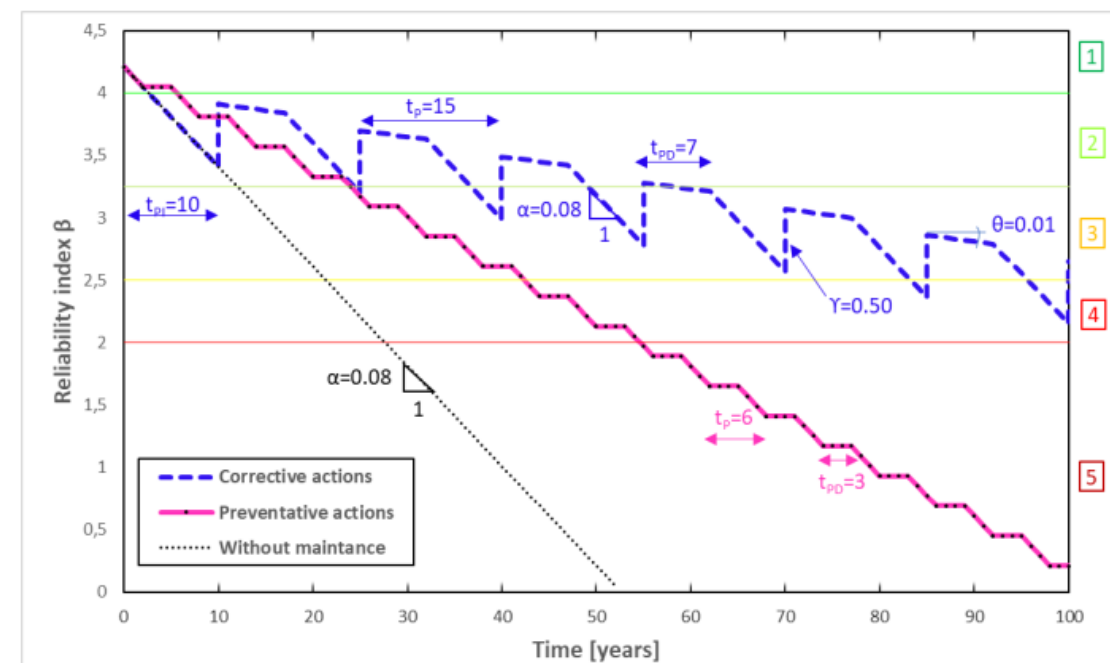


Figura. Evolução do índice de fiabilidade ao longo do tempo



4. Apoio à decisão

Principais resultados

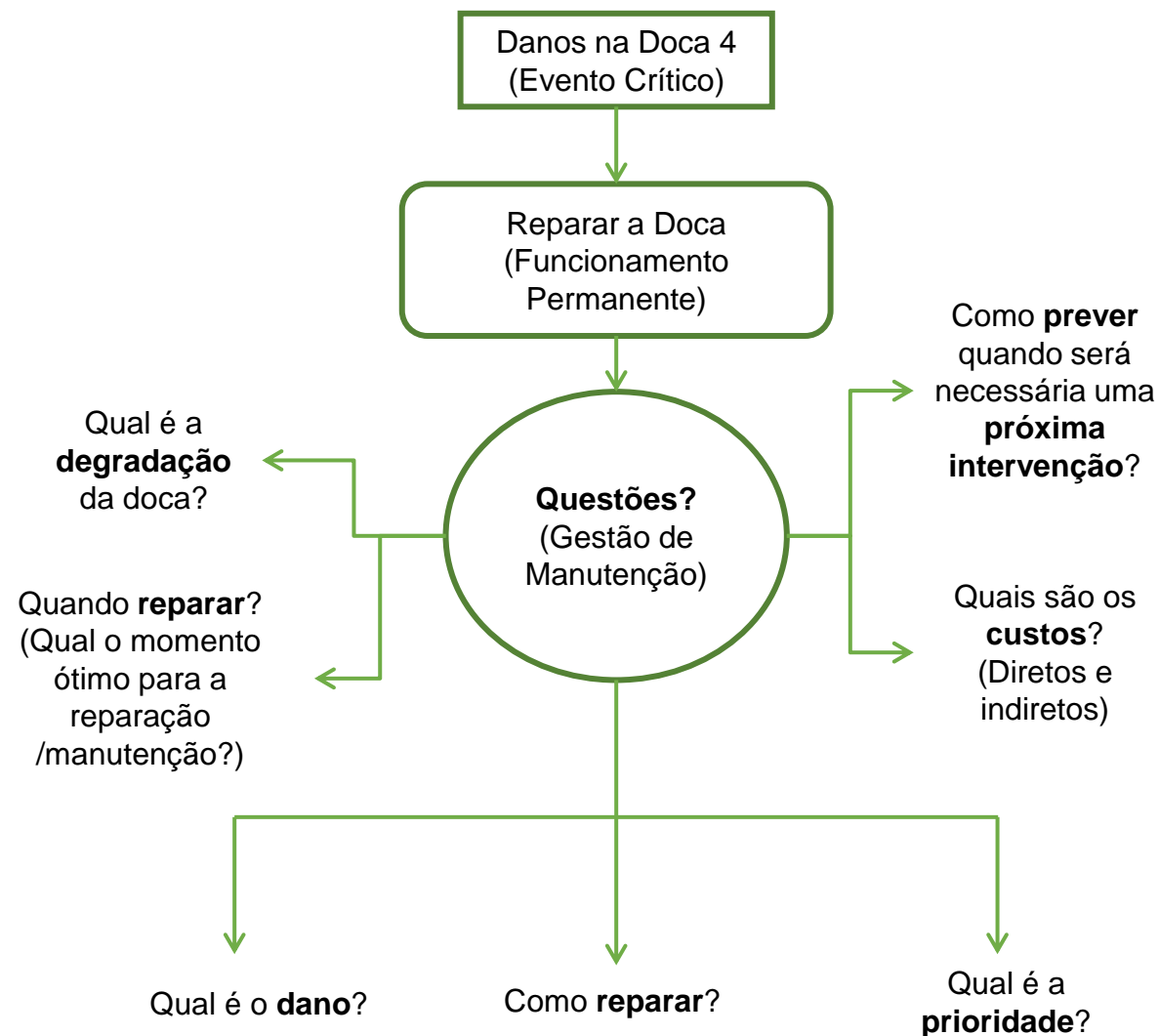
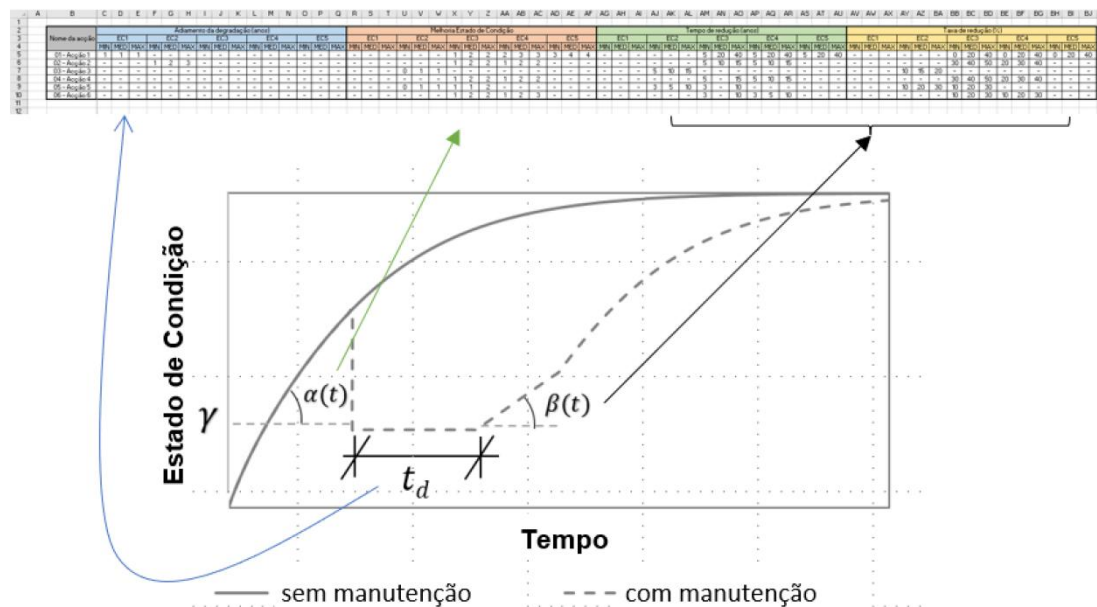


Figura. Esquema resumo do funcionamento da Plataforma de Gestão de Manutenção

Crédito da imagem: Dias, J. G. G. (dezembro 2022) -Tese mestrado



Considerações Finais

- Os sensores têm demonstrado um **grande potencial para melhorar a monitorização** das infraestruturas marítimas;
- A monitorização destas infraestruturas é crucial para **garantir a segurança, promover a sustentabilidade e otimizar a eficiência das operações marítimas**;
- Tecnologias emergentes, como sensores electroquímicos, desempenham um papel fundamental na **avaliação de infraestruturas costeiras**, permitindo **complementar medições tradicionais** e identificar parâmetros críticos, como a corrosão do aço em estruturas de betão;
- Estas tecnologias contribuem para a **manutenção proativa e a gestão eficaz** das infraestruturas marítimas.



SEMINÁRIO Geotecnia em Obras Marítimas – Aprender com a Experiência

Auditório Infante D. Henrique (APDL - Porto de Leixões)

02-03 DEZEMBRO 2024

Obrigado!

Prof. José C. Matos
jmatos@civil.uminho.pt



Universidade do Minho

Organização

