

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Gil Faria Silva Dias

**Aplicação de modelos BIM e SIG para a
análise da degradação e gestão de
infraestruturas portuárias**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Gil Faria Silva Dias

**Aplicação de modelos BIM e SIG para a
análise da degradação e gestão de
infraestruturas portuárias**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor José António Silva Carvalho
Campos Matos
Doutora Elisabete Rodrigues Teixeira

Dezembro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-SemDerivações

CC BY-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Agradecimentos

Primeiramente, quero deixar o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor José Matos, por toda a transmissão de conhecimentos, de oportunidades, pela confiança e apoio. Um agradecimento especial à minha coorientadora, doutora Elisabete Teixeira, pelo permanente apoio, profissional e pessoal, por toda a paciência, transmissão de conhecimentos, por sempre me ter facultado todas as condições para que pudesse chegar mais longe, por todas as críticas e reconhecimentos, por todo o esforço e amizade.

Ao Professor Doutor João Marcelino, por toda a ajuda e disponibilidade, por todos os ensinamentos e partilhas, foi uma honra. À *APDL* e aos engenheiros da *3MAPS*, por todo o trabalho conjunto e partilha de conhecimentos. Ao Professor Doutor Eduardo Pereira, aos colegas do *STREMUM*, ao Mário e ao José, por toda a disponibilidade e ajuda.

Aos meus pais, Ana Maria e João Luís, e ao meu irmão, José Dinis, por todo o amor e apoio incondicional que me deram a vida inteira, por toda a paciência e compreensão. Por todos os sacrifícios que sempre fizeram para que eu e o Dinis pudéssemos seguir os nossos sonhos. Devo-vos tudo. Aos meus avós, um beijo de imensa ternura e gratidão.

À minha namorada, Bruna, por ter estado comigo em todos os momentos ao longo destes anos, garantindo-me sempre o maior bem-estar, com todo o seu amor, carinho, atenção, compreensão, tranquilidade, paciência, motivação e apoio incondicional. Não teria aqui chegado sem ti.

A todos os meus colegas e amigos, com um especial agradecimento ao Martim, ao Miguel, ao Ricardo, meus companheiros nesta jornada. Obrigado por terem talhado comigo este caminho. Tornaram-no melhor, tornaram-me maior. Um abraço especial ao primo Nuno por toda a força, todas as palavras e elucidações que sempre guardarei.

Por fim, quero deixar o meu enorme agradecimento à *DSTGroup* pela confiança que em mim depositou, por todo o apoio, atenção e pelas experiências tão marcantes e engrandecedoras que me proporcionou ao longo de todo este percurso.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Aplicação de modelos BIM e SIG para a análise da degradação e gestão de infraestruturas portuárias

Resumo

As plataformas SIG representam ferramentas de gestão sofisticadas com bases de dados extensas e dinâmicas. Estas valências tornam-nas excelentes ferramentas de apoio à decisão. Porém, quando aplicadas à gestão de ativos, carecem de especialização pormenorizada. Neste âmbito, a utilização da metodologia BIM está já estabelecida globalmente como uma possível solução [1], [2]. No entanto, devido ao seu foco no detalhe intrínseco do próprio ativo, sem acautelar os aspetos do meio envolvente, revela-se insuficiente para uma gestão global de infraestruturas [3].

Os portos comerciais representam infraestruturas críticas para a sociedade. São estes altamente dependentes do meio geográfico, social e económico que os rodeiam. Todos estes agentes interagem com a infraestrutura, tendo impactos diretos no estado de conservação dos ativos que a compõem. Por forma a acautelar estes impactos de forma dinâmica, eficiente e inteligente, a integração de modelos de degradação em plataformas SIG revela-se o caminho a seguir.

Com associação de *solvers* de análise estrutural, capazes de desenvolver simulações de carga e estudar o impacto direto nos ativos, face a determinada utilização, obtém-se uma ferramenta de gestão poderosa, baseada numa ação preventiva, ao contrário de uma ação de reparação, típica dos métodos tradicionais.

Constam no presente trabalho o desenvolvimento de um modelo de degradação de um ativo portuário, Doca 4 do Porto de Leixões, num software *open-source*: *Salomé-Meca*, onde foram simulados inúmeros cenários de carga, representativos da utilização em serviço da doca. O modelo e resultados das deformações obtidas nos ensaios foram posteriormente analisados e integrados numa plataforma de gestão da manutenção.

Palavras-Chave: BIM; Infraestruturas Portuárias; Integração de modelos; Plataforma de Gestão da Manutenção; SIG.

Application of BIM and GIS models for the degradation analysis and management of Port Infrastructures

Abstract

GIS platforms represent sophisticated management tools with extensive and dynamic databases. These valences make them excellent decision support tools. However, when applied to asset management, they lack detailed specialization. In this context, the use of the BIM methodology is already globally established as a possible solution [1], [2]. However, due to its focus on the intrinsic detail of the asset itself, without taking care of the surrounding aspects, it is insufficient for a global infrastructure management [3].

Commercial ports represent critical infrastructure for society. These are highly dependent on the geographic, social and economic environment that surround them. All these agents interact with the infrastructure, having direct impacts on the state of conservation of their assets. In order to prevent these impacts in a dynamic, efficient and intelligent way, the integration of degradation models in GIS platforms proves to be the way forward.

With association of structural analysis solvers, capable of developing load simulations and studying the direct impact on assets, a powerful management tool is obtained, based on a preventive action, as opposed to a typical repair action of traditional methods.

The present work includes the development of a degradation model of a port asset, Dock 4 from Porto de Leixões, in an open-source software: *Salomé-Meca*, where numerous load scenarios were simulated, representing the use in service of the dock. The model and results of the deformations obtained in the tests were later analyzed and integrated into a maintenance management platform.

Keywords: BIM; GIS; Model Integration; Maintenance Management Platform; Port Infrastructures

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xiv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento temático e motivação	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organização da dissertação	2
2. Infraestruturas portuárias	4
2.1. Introdução às infraestruturas portuárias	4
2.2. Infraestruturas Portuárias - O que são e como se constituem	6
2.2.1. Portos fluviais:	6
2.2.2. Portos de pesca:	7
2.2.3. Portos de água quente:	8
2.2.4. Portos secos ou estações aduaneiras:	8
2.2.5. Portos marítimos:	9
2.2.6. Estruturas constituintes das infraestruturas portuárias	11
2.3. Infraestruturas Portuárias - Quem as legisla, e quem e como as gere	13
2.3.1. Organização da Autoridade Portuária	13
2.3.2. Gestores das infraestruturas portuárias	14
2.3.3. Gestão de uma infraestrutura portuária	17
2.3.4. Qual a razão de realizar uma gestão portuária	22
2.4. Gestão Portuária - Panorama Internacional	23
2.5. Gestão Portuária - Panorama Nacional	27
2.5.1. Porto de Viana do Castelo	29
2.5.2. Porto de Sines	31

2.5.3. Porto de Leixões.....	33
2.6. Problemáticas na gestão de infraestruturas portuárias	37
3. Modelos preditivos de degradação e gestão da infraestrutura portuária	39
3.1. Introdução, objetivos e gestão dos modelos preditivos.....	39
3.2. Degradação das Infraestruturas Portuárias	40
3.2.1. Inspeções de infraestruturas portuárias	40
3.2.2. Ações de manutenção comuns e reparações das estruturas portuárias	42
3.2.3. Restrições na manutenção	43
3.3. Gestão das ações de manutenção em infraestruturas portuárias baseada em modelos preditivos de degradação.....	44
3.3.1. Cadeias de Markov.....	46
3.3.2. Criação de modelos preditivos de degradação para gestão das I.P. através de modelos estocásticos de Markov	47
4. Implementação de ferramentas BIM e SIG na gestão da degradação em Infraestruturas Portuárias	53
4.1. Métodos tradicionais de manutenção nas Infraestruturas Portuárias.....	54
4.2. Novas tecnologias no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC)	56
4.2.1. O BIM como ferramenta de gestão da manutenção em infraestruturas portuárias.....	57
4.3. Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	60
4.3.1. Vantagens da aplicação dos SIG	61
4.3.2. Implementação de plataformas SIG em Infraestruturas Portuárias	63
5. Caso de Estudo	64
5.1.1. Constituição da Doca 4	67
5.2. Implementação de metodologia BIM na Doca 4	73
5.2.1. Simulações de Carga na Doca 4	79
5.3. Modelo geotécnico e estrutural para análise mecânica da Doca 4.....	81

5.3.1. Modelação em software open-source: SALOME_MECA	81
5.3.2. Metodologia aplicada à modelação do caso de estudo: Doca 4	88
5.4. Ensaaios de simulação de carga na Doca 4.....	101
5.4.1. Ajuste ao modelo inicial.....	107
5.5. Análise de resultados	108
5.6. Integração de modelos na Plataforma de Gestão da Manutenção	119
5.6.1. Criação e funcionamento da Plataforma de Gestão da Manutenção	119
5.6.2. Integração do Modelo da Doca 4 na Plataforma de Gestão da Manutenção	124
5.6.3. Upgrade da Plataforma de Gestão da Manutenção	130
6. Considerações finais.....	133
6.1. Conclusões	133
6.2. Trabalhos futuros	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de operações simplificado de um porto comercial, adaptado de [61].	5
Figura 2. Layout típico dos subsistemas de um porto marítimo comercial, adaptado de [62].	11
Figura 3. Estruturas constituintes típicas de uma infraestrutura portuária, adaptado de [63].	12
Figura 4. Número de TEU's, em milhões, que passaram pelos portos de cada país, em 2019, [24].	25
Figura 5. Ranking mundial da qualidade das infraestruturas portuárias, em cada país, de 1(baixa) até 7(alta), 2019, [64].	25
Figura 6. Número de TEUs, em milhões, que passaram pelos portos portugueses, entre 2012 e 2019, [65].	26
Figura 7. Classificação da qualidade das infraestruturas portuárias portuguesas, entre 2012 e 2019, [66].	26
Figura 8. Mapa de Portugal continental com a localização dos principais portos portugueses, adaptado de [67].	29
Figura 9. Estaleiros navais de Viana do Castelo [68].	30
Figura 10. Porto de Viana do Castelo [31].	31
Figura 11. Porto de Sines [69].	32
Figura 12. Rotas estratégicas ao porto de Sines [32].	33
Figura 13. Porto de Leixões, [35].	34
Figura 14. Mapa do Porto de Leixões, [70].	36
Figura 15. Mapa simplificado da gestão de risco em infraestruturas, adaptado de [41].	40
Figura 16. Ações de manutenção baseadas no índice de condição estrutural, SHI, adaptado de [39].	46
Figura 17. Exemplo de uma cadeia de Markov com quatro estados, [43].	47
Figura 18. Mapa resumo do estado da arte da literatura de modelos de degradação, baseados em cadeias de Markov.	52
Figura 19. Medição realizada por mergulhador em inspeção subaquática [71].	55
Figura 20. Planta de localização da Doca 4 (desenhos fornecidos pela APDL).	64

Figura 21. Embarcações típicas amarradas aos cabeços de amarração da Doca 4 (fotografias pessoais).	65
Figura 22. Abertura de fendas na Doca 4 fruto das ações de tração das embarcações amarradas sobre os cabeços de amarração (fotografia oferecida pela APDL).....	65
Figura 23. Imagem de satélite do Porto de Leixões, com Doca 4 salientada a amarelo, imagens obtidas através do Google Earth.	68
Figura 24. Perfil-tipo da Doca 4 (Desenhos técnicos fornecidos pela APDL).	69
Figura 25. Constituição estrutural da Doca 4.	70
Figura 26. Pormenor da viga-cais, defensas e cabeços de amarração no modelo de elementos finitos.....	71
Figura 27. Corte do alçado Oeste, Doca 4.	72
Figura 28. Geometria de projeto do cabeço de amarração (Desenhos técnicos fornecidos pela APDL).	73
Figura 29. Doca 4, com defensas tipo célula, semi-submersas, e cabeços de amarração (fotografia oferecida pela APDL).	73
Figura 30. Propriedades do material betão (B225) utilizado nos elementos estruturais do modelo.	75
Figura 31. Modelo BIM (vista 3D) da Doca 4, em Revit.	76
Figura 32. Meio Geotécnico envolvente da Doca 4 (modelado em Revit).	77
Figura 33. Modelo BIM (alçado Sul), escala 1:1, em Revit.	78
Figura 34. Modelo geométrico da Doca 4 (à esquerda) e modelo analítico da Doca 4 (à direita).	80
Figura 35. Arquitetura de um módulo de CAE (Computer Aided Engineering) [58].	82
Figura 36. Arquitetura do módulo CAE: SALOME_MECA [58].	83
Figura 37. Interface gráfica do Salome_Meca, apresentação dos módulos do pacote [58].	84
Figura 38. Interface do módulo AsterStudy.	85
Figura 39. Definição e atribuição dos materiais ao modelo.	86
Figura 40. Atribuição de cada material ao respetivo grupo de elementos.	87
Figura 41. Localização dos grupos de elementos finitos, pormenor da viga-cais, defensas e cabeço de amarração.	92
Figura 42. Localização dos grupos de elementos finitos, modelo global.....	92

Figura 43. Modelo geométrico da Doca 4.	95
Figura 44. Imposição de deslocamentos nulos nas faces extremas do modelo.	96
Figura 45. Definição das condições de apoio do modelo: Imobilização das faces extremas do modelo, a amarelo. [1/2].	96
Figura 46. Definição das condições de apoio do modelo: Imobilização das faces extremas do modelo, a amarelo. [2/2]	97
Figura 47. Malha de Elementos Finitos gerada sobre o modelo geométrico ("Mesh1").	98
Figura 48. Malha de Elementos Finitos gerada sobre o modelo geométrico ("Mesh1"), em alçado.	99
Figura 49. Cálculo da Malha de Elementos Finitos gerada sobre o modelo geométrico através do módulo Mesh do Salome_Meca.	100
Figura 50. Faces encastradas da viga principal (Grupo 3).	102
Figura 51. Área de carregamento dividida em 20 "fatias"	103
Figura 52. Configuração das áreas carregadas por ensaio.	105
Figura 53. Cenários de carga calculados.	107
Figura 54. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m ²), Grupo 1.	110
Figura 55. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m ²), Grupo 2.	110
Figura 56. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m ²), Grupo 3.	111
Figura 57. Evolução dos assentamentos, em metros, dos grupos de estacas com o aumento de carga (Grupo 2, Ensaio 2).	111
Figura 58. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m ²), Grupo 1.	113
Figura 59. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m ²), Grupo 2.	113
Figura 60. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m ²), Grupo 3.	113
Figura 61. Resultados extremos das deformações para o Grupo 1.	114
Figura 62. Resultados extremos das deformações para o Grupo 2.	114
Figura 63. Resultados extremos das deformações para o Grupo 3.	115
Figura 64. Comparação dos resultados dos ensaios para o Grupo 1.	115
Figura 65. Comparação dos resultados dos ensaios para o Grupo 2.	116
Figura 66. Comparação dos resultados dos ensaios para o Grupo 3.	116
Figura 67. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m ²), Grupo 1 (Interpolação Quadrática).	117

Figura 68. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m2), Grupo 2 (Interpolação Quadrática).	117
Figura 69. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m2), Grupo 1 (Interpolação Quadrática).	118
Figura 70. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m2), Grupo 2 (Interpolação Quadrática).	118
Figura 71. Esquema resumo do funcionamento da Plataforma de Gestão da Manutenção.	123
Figura 72. Formulário para a criação de um novo projeto [59].	124
Figura 73. Página de informações do projeto [59].	124
Figura 74. Formulário para o carregamento de um modelo IFC [59].	125
Figura 75. Modelo da Doca 4 carregado na Plataforma de Gestão.	125
Figura 76. Botões com funcionalidades de um modelo [59].	126
Figura 77. Formulário para alterar a localização geográfica do modelo [59].	127
Figura 78. Modelo da Doca 4, integrado e georreferenciado na plataforma de gestão da manutenção, na sua posição real sobre o Porto de Leixões.	128
Figura 79. Integração do modelo de elementos finitos, com respetivos resultados, na plataforma de gestão.	128
Figura 80. Georreferenciação do modelo de elementos finitos, com respetivos resultados, na plataforma de gestão.	129
Figura 81. Diagrama de implantação [59].	130
Figura 82. Integração SIG/BIM com representação tridimensional, [60].	131
Figura 83. Esquema simplificado da influência das diversas ações na doca.	138
Figura 84. Arquitetura (simplificada) do sistema de previsão da capacidade resistente da doca, ao longo do tempo, em função da sua degradação.	141

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas atribuídas aos elementos da malha.	93
Tabela 2. Propriedades mecânicas atribuídas aos elementos da malha, continuação.	94

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Instrumentos de gestão portuária [19].....	19
Quadro 2. Instrumentos de gestão portuária [19], continuação.....	20
Quadro 3. Instrumentos de gestão portuária [19], continuação.....	21
Quadro 4. Instrumentos de gestão portuária [19], continuação.....	22
Quadro 5. Vantagens e desvantagens da utilização da metodologia BIM em comparação com os métodos tradicionais [53].....	60
Quadro 6. Parâmetros considerados na caracterização mecânica do betão.	89
Quadro 7. Listagem de ensaios de carga. [1/2]	103
Quadro 8. Listagem de ensaios de carga. [2/2]	104
Quadro 9. Comparação de resultados entre interpolação linear e quadrática da malha.	119

1. Introdução

1.1. Enquadramento temático e motivação

A análise Geoespacial é crucial em projetos de gestão de infraestruturas e na previsão de manutenções das infraestruturas [4], contudo carecem de ferramentas de modelação paramétrica, disponíveis como por exemplo a ferramenta BIM. Atualmente, a complementaridade das ferramentas e modelos aparecem como uma solução tanto a nível dos operadores das infraestruturas, como dos construtores, e decisores políticos [5]. Por outro lado, a transição da escala local para a infraestrutura (onde os dados geoespaciais não podem ser negligenciados) já demonstrou que a modelação paramétrica integrada com geoinformação é uma ferramenta poderosa para simplificar e ajudar na manutenção. Esta tese pretende a criação de uma ferramenta SIG que integre modelos de degradação físicos e de performance das infraestruturas críticas portuárias, que permita a gestão preditiva destas infraestruturas ao longo do tempo de vida útil. Foi neste contexto preponderante, ambicioso e inovador, ao nível da gestão de ativos, que foi criada esta dissertação e definidos os seguintes objetivos com fim a contribuir para o avanço da implementação das novas metodologias de manutenção de infraestruturas no setor AEC.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a integração de modelos de degradação e performance numa plataforma SIG que sirva como ferramenta de gestão da manutenção para infraestruturas portuárias.

Essa plataforma deve conter todos os meios necessários para a entidade gestora desenvolver a sua atividade com base, quase exclusiva, nesta ferramenta integrada, colaborativa e inteligente, por fim a prever e melhorar a gestão das infraestruturas portuárias ao longo de todo o seu ciclo de vida. Para isso, traçam-se como principais objetivos:

- Modelação BIM do ativo em estudo;
- Modelação numérica da Doca 4 num *software open-source* de cálculo, *Salomé-Meca*.
- Estudar quais os valores e disposições típicas da carga, material a granel, que são colocadas *in situ* sobre a Doca 4 em serviço;

- Configurar o modelo numérico de modo a simular as cargas aplicadas durante o uso da doca;
- Desenvolver análises mecânicas, através do método dos elementos finitos, aplicando cargas que simulem realisticamente a utilização que é dada ao ativo durante o seu normal funcionamento;
- Obter os resultados das deformações/assentamentos e fazer uma análise crítica da influência que o posicionamento e valor das cargas aplicadas têm no comportamento da estrutura;
- Integrar os modelos de degradação numa plataforma SIG de gestão da manutenção;
- Aceder ao modelo e respetivos resultados através da interface da plataforma de gestão da manutenção.

Com a realização do presente plano de trabalhos os principais resultados compreendem a obtenção de:

- Plataforma que integre modelos de degradação e performance como os modelos estruturais das infraestruturas portuárias;
- Plataforma de gestão da manutenção que faculte apoio à decisão afeta aos limites de serviço da Doca 4;
- Previsão e melhoria na gestão das infraestruturas portuárias ao longo de todo o ciclo de vida.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos que se propõem a solucionar o tema proposto. No primeiro capítulo apresenta um enquadramento temático da dissertação, os seus objetivos acompanhados da metodologia adotada para a concretização dos mesmos.

No segundo capítulo consta uma abordagem inicial e geral às infraestruturas portuárias, os diferentes tipos, assim como uma apresentação dos diversos ativos que tradicionalmente as constituem. É feito um resumo sobre as entidades que as legisla e gere, e ainda como o fazem. Por fim, é apresentada uma breve revisão do panorama nacional e internacional ao nível da gestão portuária, seguida de uma breve discussão sobre as suas problemáticas.

No terceiro capítulo apresenta-se um estudo afeto à gestão da manutenção das infraestruturas portuárias. Metodologia de inspeção, ações de manutenção e reparação, assim como restrições na manutenção deste tipo de infraestruturas são aqui discutidas. É feita uma introdução aos modelos preditivos, com especial destaque para os baseados em cadeias de Markov. É ainda demonstrado como é desenvolvida a criação de modelos preditivos de degradação para a gestão de infraestruturas portuárias através de modelos de Markov.

No quarto capítulo é feita uma revisão dos métodos tradicionais de manutenção nas infraestruturas portuárias seguindo-se de uma introdução às novas tecnologias e metodologias nesta área, para o setor AEC. É feita uma introdução geral ao Building Information Modeling (BIM) e aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) orientados precisamente à gestão da manutenção de infraestruturas portuárias, apontando os aspetos essenciais.

No quinto capítulo, afeto ao caso de estudo, são descritos todos os trabalhos conduzidos ao longo do projeto. Desde uma breve explicação relativa ao caso de estudo selecionado: Doca 4 do Porto de Leixões, a modelação BIM deste, as modelações da infraestrutura e análises mecânicas em software de cálculo estrutural, *Salomé-Meca*, com as respetivas justificações e fundamentações dos estudos levados a cabo, sob a forma de memórias descritivas. São ainda apresentados e discutidos os resultados das análises, seguidos da integração do modelo, com respetivos resultados, na plataforma de gestão da manutenção.

Por fim, o sexto capítulo resume-se às considerações finais, com as conclusões retiradas dos trabalhos conduzidos, acompanhadas das perspetivas de trabalhos futuros que, devido ao tempo limitado deste projeto, não houve oportunidade de realizar.

2. Infraestruturas portuárias

Uma infraestrutura portuária é um organismo complexo que está intrinsecamente ligado ao meio onde se insere. Fenómenos ambientais, atmosféricos, marítimos, entre outros, têm o poder de incapacitar por completo a atividade portuária durante a ocorrência de eventos extremos. Para além dos impactos imediatos que estes eventos podem ter sobre o normal funcionamento dos trabalhos nas docas, esta exposição a um meio tão agreste, típico das zonas costeiras, pode causar danos funcionais e estruturais a longo prazo [6].

Quer na gestão logística de operações e funcionamento de uma infraestrutura portuária, quer na sua manutenção, torna-se então necessário ter fontes de informação, em tempo real, que auxiliem a tomada de decisão. Um exemplo de um evento, a curto prazo, que pode obrigar ao cessar de funções num porto é a ocorrência de ventos fortes, devido ao perigo inerente à operação de gruas e até mesmo dos contentores de carga [6].

Para além da influência ambiental sob a qual as infraestruturas portuárias estão vulneráveis, irregularidades no funcionamento das infraestruturas portuárias têm, por sua vez, uma grande influência económica sobre a própria infraestrutura, sobre a economia regional, ou, consoante o nível de importância do porto, sobre a economia nacional. Torna-se assim imperativa a implementação de ferramentas preditivas para uma preparação logística informada capaz de dar uma resposta atempada perante irregularidades que possam vir a ocorrer num futuro a curto, médio e longo prazo.

Face ao rigor exigido na operação e gestão destas infraestruturas críticas para a sociedade, os próximos capítulos serão dedicados a uma breve discussão sobre como é feita e por quem é feita, a vários níveis, a gestão destas infraestruturas explorando o panorama nacional e internacional.

2.1. Introdução às infraestruturas portuárias

Um porto pode ser muito simplificada e resumido como um espaço no qual é possível albergar um conjunto de barcos e navios, permite também o embarque e desembarque de passageiros e ainda a transação de bens. De uma forma generalizada, é uma infraestrutura

utilizada com o propósito fundamental de carregar e descarregar embarcações, ou seja, um ponto de convergência no transporte de bens, ou pessoas, que faz a transição do seu meio de transporte, quer seja uma transição: marítima-terrestre; marítima-aérea, ou ainda, marítima-fluvial [7]. Na Figura 1 esquematiza-se, de forma simplificada, o modelo de operações para um porto comercial.

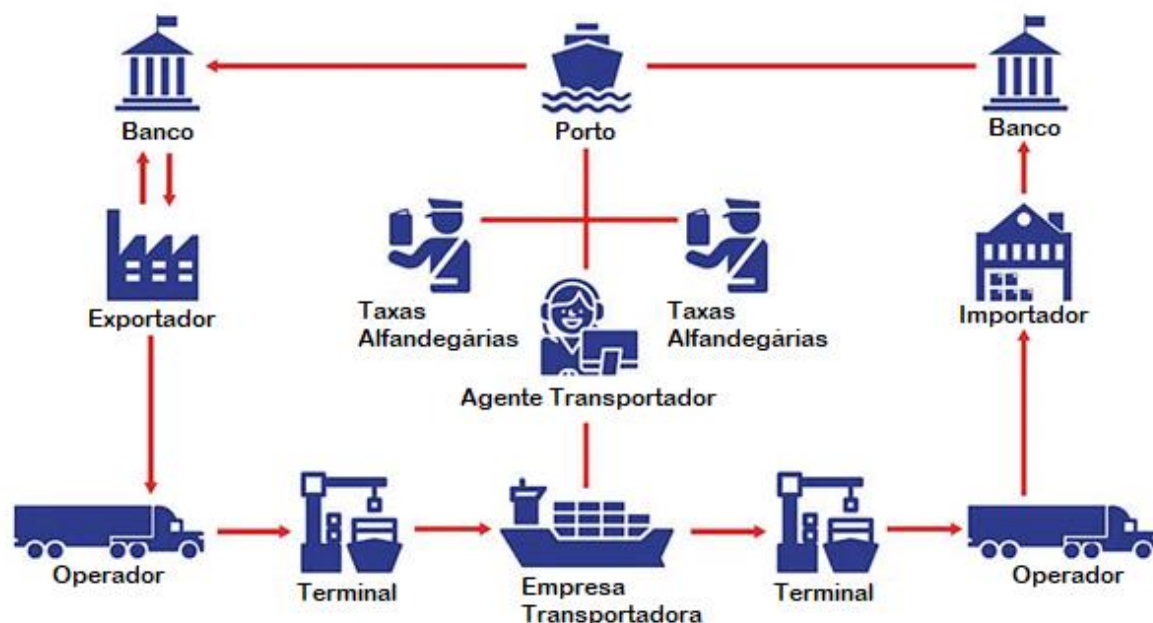


Figura 1. Modelo de operações simplificado de um porto comercial, adaptado de [61].

Os portos são de extrema importância económica, contribuindo fortemente para o crescimento das regiões onde se inserem, não só através da mercadoria que trazem e levam, catapultando o negócio local, mas também através das inúmeras atividades diretas e indiretas que geram na região, das quais a atividade portuária está intrinsecamente dependente. Falamos por exemplo na necessidade da existência de empresas transportadoras, que estejam equipadas com frotas de veículos prontas a escoar a mercadoria que chega por via marítima ao porto, instituições financeiras para a atribuição de empréstimos bancários, quer para os comerciantes, quer para as próprias empresas donas das embarcações de transporte, agências seguradoras, locais de alojamento quer para trabalhadores, quer para eventuais passageiros que desembarquem, entre muitas outras atividades económicas que representam um potencial de crescimento enorme ao nível do emprego local [8].

Face aos positivos impactos económicos e sociais, consoante a escala do porto em análise, é fácil compreender a forma como estas infraestruturas são uma peça chave no funcionamento e desenvolvimento de um país. Promovendo a economia e o negócio a nível local, nacional e internacional, o turismo, e ainda, fora do âmbito civil, é importante mencionar o papel fundamental que historicamente representam para as forças militares.

2.2. Infraestruturas Portuárias - O que são e como se constituem

Os portos podem ter origem natural ou serem construídos artificialmente, que, como referido anteriormente, é um espaço cujo propósito fundamental é o carregamento e descarregamento de embarcações [9]. Os portos podem ser frequentados por navios de grandes dimensões de rotas marítimas, ou serem simplesmente portos fluviais situados em rios ou lagos. A profundidade dos portos acaba por ser das características mais preponderantes, pois dita quais as embarcações que poderão atracar no mesmo.

Dadas as inúmeras potencialidades destas infraestruturas, a sua versatilidade e os vastos tipos de atividades que podem ser realizadas, por forma a otimizar os seus rendimentos numa determinada vertente de exploração, leva a que muitos portos se especializem, o que os divide e classifica face à função que primordialmente servem ou característica que os distingue dos demais. Assim sendo, considerando uma variedade de fatores como a sua localização, a sua profundidade, a sua atividade principal, o tipo de embarcações que pode receber, os portos podem ser classificados como [7]:

- Portos fluviais;
- Portos de pesca;
- Portos de água quente (cuja água não congela no inverno);
- Portos secos (ou estação aduaneira);
- Portos marítimos.

2.2.1. *Portos fluviais:*

Os portos fluviais são portos construídos sobre corpos de água de menores dimensões, relativamente aos portos marítimos, nomeadamente em lagos ou rios. Podem ser destinados a atividade comercial de transporte de bens, a passageiros, ou ambos [7].

Alguns portos fluviais conseguem, inclusive, ter acesso ao mar através de sistemas de canais. Estes portos têm funcionamento análogo ao dos portos marítimos apenas com a condicionante de, como foram construídos sobre a linha costeira de corpos de água de relativa menor dimensão, não possuem, geralmente, profundidades da mesma ordem de grandeza dos portos marítimos, pelo que, representa uma limitação à dimensão dos navios que nos portos fluviais podem navegar. Os portos fluviais podem ainda ser construídos apenas com o intuito de uso recreativo, recebendo apenas embarcações de pequenas dimensões, ferryboats ou atividades de pesca [7].

Apesar de poderem ter um uso meramente recreativo, os portos fluviais podem, por outro lado, representar pontos estratégicos de grande importância económica na movimentação de bens entre regiões ligadas por cursos fluviais. Face à responsabilidade social que carregam, também os portos fluviais devem estar equipados de centros logísticos para a monitorização do tráfego no porto; locais de armazenamento de mercadorias, contentores, para situações em que sejam descarregados por um navio, e que só mais tarde, serão novamente carregados por um terceiro que continuará o transporte desses bens; existência de um centro logístico que faça o controlo das atividades comerciais desenvolvidas no porto, assim como o registo dos inventários e ainda armazéns próprios para a colocação de máquinas usadas nos trabalhos de carga e descarga de bens [7].

2.2.2. Portos de pesca:

Como a designação indica, os portos de pesca estão primordialmente ligados a toda a atividade comercial piscatória. Esta, para além de profissional, pode ser também uma atividade de lazer. Os portos de pesca podem ser fluviais ou marítimos [7]. Uma particularidade fulcral deste subgénero portuário é a sua completa dependência da presença de peixe na região onde se insere. Perante a escassez de peixe, estes portos deixam de ser utilizados. Esta vulnerabilidade inerente a este tipo de porto obriga a uma gestão muito eficaz por parte da entidade exploradora do mesmo.

No porto de pesca devem estar presentes as seguintes estruturas [7]:

- Hangares: Área reservada ao depósito e preservação de bens. Pode ser um espaço de produção ou armazenamento de bens alimentares, ou produtos para o peixe;

- Postos de abastecimento: Área na qual são abastecidos os barcos, nomeadamente com combustível e afins;
- Edifício administrativo e de operações: É o edifício principal onde é feito o controlo do tráfego, da pesca, questões legais e de segurança e saúde;
- Espaços comerciais: Espaços destinados à compra e venda do peixe.

2.2.3. *Portos de água quente:*

Portos de água quente são aqueles cuja água nunca congela, mesmo nos invernos gelados, ou seja, mantêm-se operacionais durante a totalidade do ano. Estes portos são de extrema importância nos países com climas mais frios, uma vez que, nas estações frias, quando a água congela nos restantes portos e ficam temporariamente encerrados, toda a atividade portuária é necessariamente reencaminhada para estes portos de água quente, que estão permanentemente operacionais e utilizáveis [7]. O facto destes portos se tornarem, durante determinados períodos do ano, nos únicos pontos que estabelecem a ligação às rotas comerciais marítimas de uma determinada região ou país, faz deles infraestruturas imprescindíveis para a estabilidade económica do meio onde se inserem [7].

2.2.4. *Portos secos ou estações aduaneiras:*

São portos localizados fora da linha costeira, ou seja, portos terrestres que estão conectados ao porto marítimo através de uma rede rodoviária ou ferroviária, servindo como centrais logísticas intermodais [7], [10]. Estes portos secos são muito úteis no sentido de aliviar a congestão de mercadoria no porto marítimo ao qual estão associados, uma vez que a mercadoria descarregada dos navios é diretamente encaminhada e armazenada no porto seco, que funciona como a ponte entre a rota marítima dos bens e o seu transporte terrestre Intra continental até ao seu destino final.

Um porto seco tem funções semelhantes às de um porto marítimo, sendo uma infraestrutura à qual chegam e da qual partem grandes volumes de mercadoria, possuindo por isso, maquinaria especializada para a manobrar, armazéns, parques onde podem ser colocados os contentores, entre outras. A única característica que realmente diferencia um porto seco de um porto marítimo é o facto de este estar localizado fora da linha costeira [7], [10].

2.2.5. Portos marítimos:

Os portos marítimos constituem o tipo de portos mais comuns em todo o mundo, sendo usados para o desenvolvimento de atividades comerciais de transação de mercadorias e bens, designando-se como portos comerciais, ou então, no transporte de passageiros, designando-se como portos de cruzeiro. Estes estão situados sobre a orla costeira e permitem a acomodação de pequenas embarcações a grandes navios [7].

Os componentes mais comuns nestes portos são: armazéns, parques para a colocação dos contentores, gruas, no caso dos portos comerciais, ou então, para o caso de portos de cruzeiro: hotéis, restaurantes, e outras comodidades para aumentar o interesse dos passageiros em visitar e instalarem-se em determinado porto [7].

Os portos marítimos são responsáveis pela maioria de todo o transporte aquático, de bens e pessoas, e podem ainda ser classificados em três categorias distintas [7]:

- Portos de cruzeiro;
- Portos de apoio;
- Portos comerciais.

Portos de cruzeiro: Este tipo de portos especializa-se nas atividades afetas aos navios de cruzeiro, proporcionando todas as condições para o embarque e desembarque dos passageiros que viajam nestes navios recreativos. Dadas as exigências de comodidade que este tipo de passageiros apresenta, os portos de cruzeiro, para além de terem que garantir as condições gerais para o funcionamento de qualquer porto, devem ainda estar preparados para responder às mais variadas necessidades dos seus transeuntes [7]. Os portos de cruzeiro são o tipo de portos mais movimentado, com uma constante circulação de passageiros assim como as continuas atividades de carregamento e descarregamento dos navios. Referir ainda que, todas as formalidades inerentes às viagens de cruzeiro têm preparação prévia e são executadas por parte da autoridade portuária [7].

Portos de apoio: São portos que, como a própria designação indica, servem o propósito de prestar apoio a embarcações. Estão situados no meio das rotas que ligam dois portos

principais e podem ser usados pelas embarcações para lhes serem prestados, por exemplo, abastecimentos de combustível ou reparações essenciais [7].

Portos comerciais: São os portos especializados onde se realizam as movimentações e transações de mercadorias e bens. O carregamento e descarregamento das mercadorias envolve um conjunto de máquinas que pode variar consoante o tipo de carga, por esta razão, os portos comerciais podem ser especializados apenas num, ou em vários tipos de produto [7].

Produtos como madeiras, combustíveis, automóveis, etc. são transportados em granel, este transporte tem exigências distintas do transporte feito em contentores. Ou seja, os portos podem trabalhar apenas com carga em granel, em contentores, ou então, com ambos os tipos de carga, ou seja, são portos capazes de lidar com todo o tipo de mercadorias, tornando-se por isso, nos mais versáteis. Múltiplos terminais são postos em funcionamento simultaneamente para, por eles, serem distribuídos os vários tipos distintos de mercadorias que chegam ao porto [7].

Na Figura 2 é apresentada a configuração típica de um porto comercial marítimo, com os respetivos subsistemas que o constituem. Apesar do exemplo citado ser referente a um porto marítimo comercial, vários dos subsistemas que nele se apresentam são comuns aos vários tipos de portos, tais como, por exemplo, os quebra-mares, paredões, canais e escritórios, enquanto espaços destinados ao controlo logístico do porto.

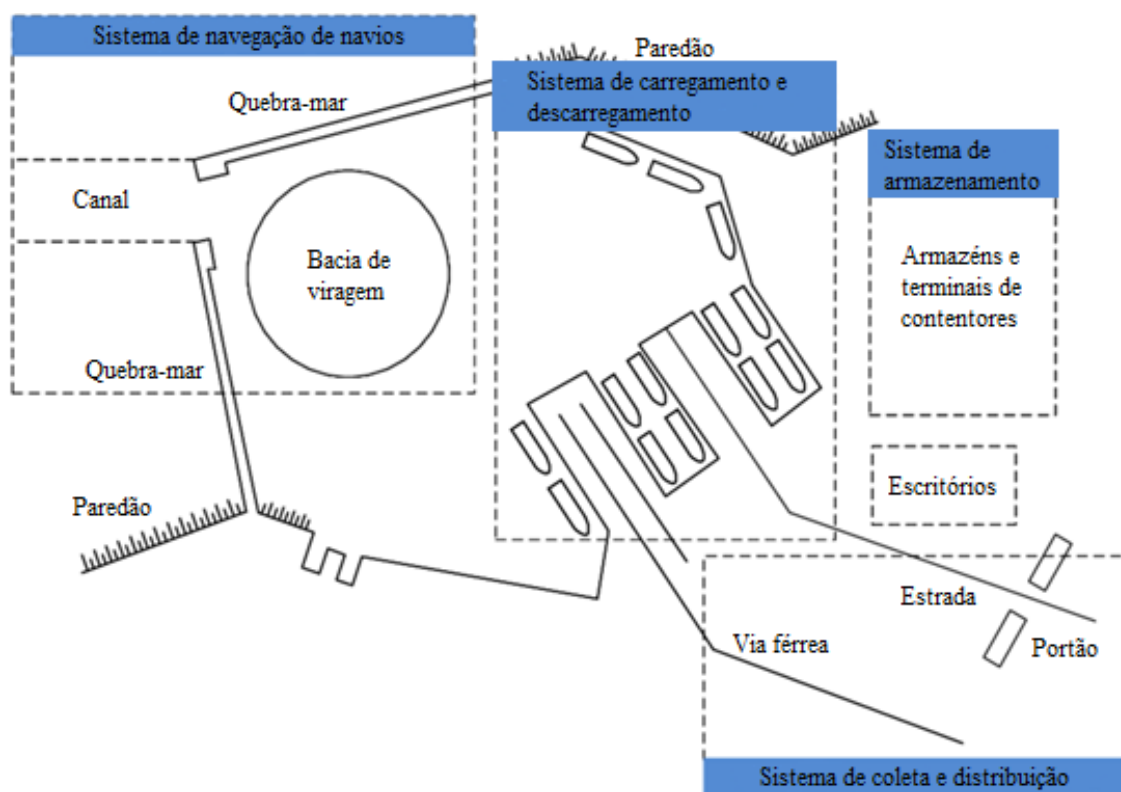


Figura 2. Layout típico dos subsistemas de um porto marítimo comercial, adaptado de [62].

2.2.6. Estruturas constituintes das infraestruturas portuárias

Como apresentado no subcapítulo 2.2, existe uma grande variabilidade de infraestruturas portuárias tipo, especializadas em servir uma função singular, ou um conjunto de funções que podem ser enquadradas dentro de um ramo específico de atividade. Para executarem as atividades que lhes são destinadas, as infraestruturas portuárias estão dependentes de uma série de estruturas internas que as constituem. Essas estruturas internas que totalizam as infraestruturas portuárias podem ser específicas ao tipo de porto em questão, no entanto, várias dessas estruturas são comuns a todos os tipos de portos.

De seguida apresenta-se uma breve lista das estruturas internas, mais comuns, que são possíveis de encontrar dentro dos vários tipos de infraestruturas portuárias, as quais são esquematizadas na Figura 3 [7]:

- **Armazéns:** Estão presentes em todas as infraestruturas portuárias e são usados para guardar mercadorias, máquinas, equipamentos, entre outros;
- **Receção:** Na receção do porto constam todas as informações relativas às embarcações que circulam no porto, assim como os horários dessas circulações. Além

disso, a receção representa um ponto de informação relativo a todas as outras instalações portuárias;

- Estação de carregamento e descarregamento: É imperativo a todos os portos permitirem aos navios fazerem o carregamento e descarregamento de carga, assim como o embarque e desembarque de pessoas;
- Oficina: Todas as infraestruturas portuárias de relativa importância possuem oficinas onde as embarcações podem ser reparadas ou modificadas consoante as exigências dos seus proprietários;
- Estruturas e equipamentos portuários: Em qualquer porto encontramos estruturas como, cais, docas, cabeços de amarração, zonas de deposição e empilhamento de carga e armazéns. Mas também inúmeras máquinas e equipamentos como dragas, gruas, empilhadoras, camiões, etc.
- Outras estruturas: Alguns portos podem ainda oferecer instalações especiais tais como hotéis ou restaurantes para os passageiros, ou então, instalações médicas aptas a prestarem auxílio a qualquer indivíduo no porto.

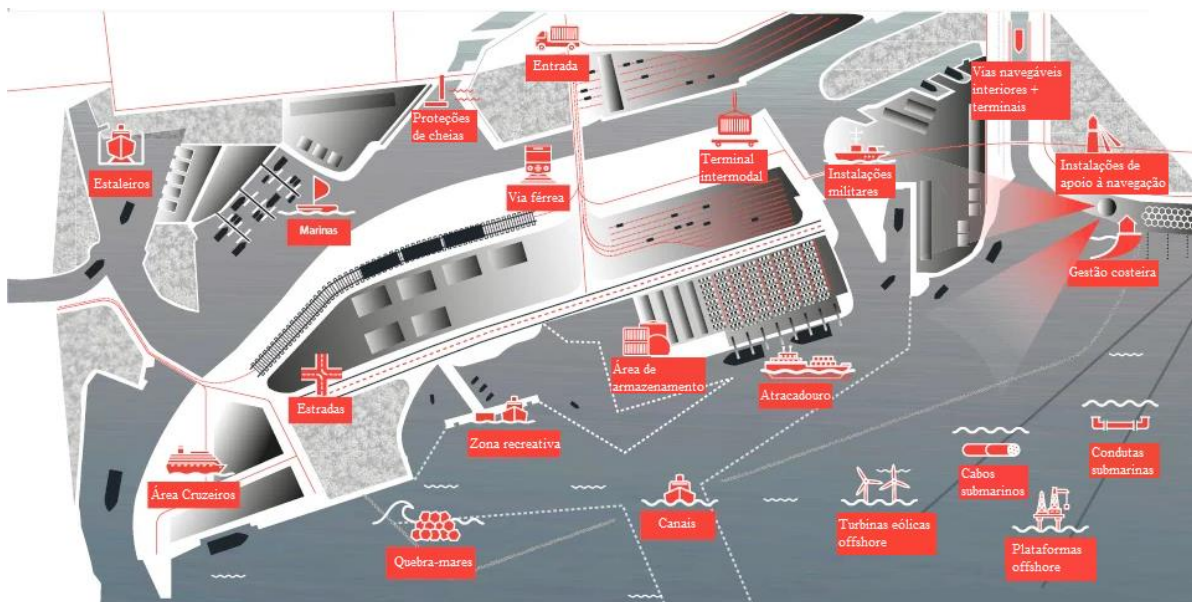


Figura 3. Estruturas constituintes típicas de uma infraestrutura portuária, adaptado de [63].

2.3. Infraestruturas Portuárias - Quem as legisla, e quem e como as gere

Cabe às autoridades portuárias controlar, legislar e gerir todos serviços portuários e marítimos, instalações e atividades realizadas nos corpos de água do país. Estão também encarregues de fazer a gestão do tráfego náutico, supervisão do cumprimento da navegação segura, assim como garantir condições de segurança e de responsabilidade ambiental nos portos. A autoridade portuária, em qualquer país, é constituída por uma entidade governamental, ou semigovernamental, que constrói, mantém e opera as rotas de transporte de bens e mercadorias através dos portos [7].

2.3.1. Organização da Autoridade Portuária

Uma autoridade portuária é composta pelos seguintes departamentos [7]:

- Equipa de supervisão: É o departamento que ocupa o topo da hierarquia da autoridade portuária, está encarregue de supervisionar todas as atividades dos subsequentes departamentos;
- Conselho executivo: É o departamento de maior importância visto ser aquele que elabora e executa todas as decisões relativas à manutenção, controlo, segurança e gestão de operações. É composto por dois atores principais, o Chefe do Conselho Executivo (CEO) e o Presidente do Conselho Executivo. As suas principais funções listam-se de seguida [7]:
 - Assuntos e estratégias corporativas: Chefe e Presidente do Conselho Executivo devem estar cientes de todas as questões corporativas e criar estratégias de expansão das relações empresariais;
 - Recursos humanos: Chefe e Presidente do Conselho Executivo devem planear estratégias para aumentar a produtividade dos seus trabalhadores portuários com base em avaliações de performance regulares;
 - Comunicações externas: Chefe e Presidente do Conselho Executivo devem gerir as comunicações internas, assim como externas, do porto, de forma a agilizar o fluxo das rotas internacionais;
 - Auditorias internas: Chefe e Presidente do Conselho Executivo devem realizar auditorias internas regulares;
 - Departamento Legal: Chefe e Presidente do Conselho Executivo devem legalizar o comércio e atender a todas as questões legais.

- O Chefe do Concelho Executivo (CEO) e o Presidente do Concelho Executivo fazem ainda a gestão dos seguintes subdepartamentos [7]:
 - Vice-Presidente Executivo e Chefe de Finanças: Cabe-lhes atender a todas as questões relacionadas com finanças, aprovisionamento, soluções de negócio digital, tecnologias digitais e da informação, inovação, etc.;
 - Vice-Presidente e Chefe de Operações: Trabalham diretamente no desenvolvimento do porto. Estão encarregues da gestão de todos os ativos, assim como da gestão ambiental.

2.3.2. Gestores das infraestruturas portuárias

Na gestão portuária existe um elevado número de intervenientes públicos e privados, que trazem grande complexidade ao processo de gestão dos portos comerciais. Para tentar desconstruir e analisar esta cadeia de interações, Wang *et al.* (2004)[11] propôs um modelo tridimensional de gestão portuária baseada numa comunidade de partes interessadas composta por vários atores. Entendam-se que as partes interessadas neste modelo, como as entidades com interesses económicos sobre uma empresa, que influenciam e são influenciados pela sua atividade. Posteriormente, Verhoeven (2010) identificou três categorias de partes interessadas nos portos que afetam os processos de decisão das autoridades portuárias, são eles: (1) As empresas de mercado, como transportadoras, operadoras de terminal e operadoras logísticas, (2) Governo, e (3) Grupos de interesse social [12]. Na discussão sobre o papel e a importância da gestão regional dos portos, Lam *et al.* (2013) aumentou a definição de partes interessadas de forma a incluir legisladores de diferentes níveis geográficos [13] e ainda as empresas e comunidades da região onde se insere o porto [14].

A presente abordagem de uma gestão portuária em torno das partes interessadas tem obtido grande interesse por parte dos mais recentes estudos, nomeadamente pela necessidade de uma gestão no equilíbrio da satisfação dos interesses e objetivos diversos das partes interessadas.

Apesar do papel preponderante dos inúmeros intervenientes que influenciam ativamente a atividade portuária, a entidade governamental ocupa um lugar central na mediação destas

infraestruturas. Como refere Brooks (2016), a legislação e regulamentação que guiam o funcionamento e operação dos portos são ditadas pelo governo e seus representantes, porém, apesar desses condicionamentos superiores, o porto possui internamente uma administração que define as suas próprias regras e estratégias de negócio, sobre as quais tem responsabilidade de servir os seus interesses e, consequentemente, alcançar também os objetivos das suas partes interessadas [15].

Esta abordagem levantada por Brooks (2016) aponta para a existência de duas categorias distintas de agentes com papel ativo na gestão dos portos: (1) as organizações governamentais que aplicam legislação e regulamentação nos portos nacionais, e (2) as organizações internas do porto, responsáveis pelas suas atividades fundamentais, como operações portuárias, planeamento, estratégia, inovação, entre outras [14], [15].

Para contextualizar o paradigma nacional da gestão portuária, segundo os pressupostos expostos nos parágrafos anteriores, Zhang *et al.* (2018), numa revisão da literatura apresenta um quadro onde sumariza, para vinte e três países, os principais intervenientes na gestão portuária e em que medida estes influenciam a atividade dos mesmos [14]. Em relação a Portugal, Caldeirinha *et al.* (2017), destaca a influência internacional, fruto das reformas feitas após a crise económica mundial de 2008, do Fundo Monetário Internacional, do Banco Central Europeu e da Comissão Europeia [16]. A nível nacional destacam-se: o Instituto da Mobilidade e do Transporte (IMT); Autoridade da Mobilidade e dos Transportes (AMT); Ministério das Finanças; Ministério do Planeamento e das Infraestruturas; Ministério do Mar; Autoridades portuárias; Operadores portuários privados; Associação dos Portos de Portugal (APP), etc. Neste contexto, Caldeirinha *et al.* (2017), salienta a crescente autonomia das autoridades portuárias, a forte liberalização do setor e a fusão regional entre portos [16].

As infraestruturas portuárias são geridas por organizações governamentais e pela administração interna, particular de cada porto. Sendo fácil e lógico de aferir que as organizações governamentais têm um papel fulcral na gestão portuária enquanto agentes legisladores e reguladores. Segundo Zhang *et al.* (2018), cabe a estas organizações centrais desempenhar funções de gestão institucional, entendam-se estas como o conjunto de regulamentações formais fundamentais e regras baseadas na gestão estrutural coletiva dos

portos, são elas decisões sobre: centralização/descentralização; comercializações; privatizações; integrações e junções [14] . Restam às administrações internas de cada porto a tomada de decisões relativas às funções específicas relativas aos trabalhos executados diariamente na operação do mesmo. Importante lembrar que, apesar do papel imutável da legislação e regulamentação governamental, que é soberana sobre todos os portos, cada porto através da sua administração interna tem a liberdade e o poder de ditar as suas próprias estratégias económicas, funcionais, entre outras. Tendo assim também um papel de grande autoridade e responsabilidade sobre a infraestrutura que opera. É evidente que a exercício destes poderes estará sempre constrangida aos limites impostos pelo governo central.

Sendo mais diretas, caso de portos públicos, ou mais indiretas, caso de portos privados, as organizações governamentais tiram grandes rendimentos das atividades portuárias. Nomeadamente no impacto positivo que esta pode ter na economia local, ou, dependendo do nível de importância do porto, grandes benefícios a nível nacional.

Em 1992, a UNCTAD (1992) dividiu, muito simplificadamente, os serviços e atividades portuárias em quatro categorias [17]:

1. Serviços portuários tradicionais, tais como, manuseamento e armazenamento de cargas/mercadorias;
2. Serviços industriais/ambientais, tais como, reparação de navios ou recolha de descargas de navios;
3. Serviços administrativos/comerciais, tais como, calendarizações dos trabalhos portuários;
4. Serviços logísticos/distribuição, tais como, armazéns ou atividades de valor acrescido.

É por isso essencial que haja uma sensibilidade especial por parte das organizações governamentais para que as infraestruturas portuárias trabalhem atentamente e em cooperação com os administradores internos para que todas as partes possam beneficiar ao máximo desta verdadeira simbiose económica.

2.3.3. Gestão de uma infraestrutura portuária

Dada a sua vasta amplitude e complexidade, não existe, à data atual, uma definição universal e concreta para o conceito de "gestão portuária", no entanto, Brooks e Pallis (2012: p.512) [18], apresentam uma proposta bastante concreta e completa onde descrevem a gestão portuária como "a adoção e aplicação de regras que regem a conduta e os direitos à propriedade (...) no caso de portos, os governos, ou outros agentes políticos relevantes, normalmente impõem estruturas governativas com vista a servir interesses regionais ou nacionais (...)". Assente nestas premissas, Zhang *et al.* (2019) desenvolveram uma extensa análise da literatura existente relativa à gestão portuária, da qual resultou um artigo onde se condensa e distribui, ao longo de três níveis de gestão distintos, os "instrumentos" que cada um tem ao seu dispor para melhor atingir os seus objetivos particulares [19]. Em que a interação global das estratégias adotadas por cada nível resulta na gestão final da infraestrutura portuária. Os três níveis de gestão: institucional, estratégico e de gestão. Os agentes com poder de decisão sobre estas realidades são, como já tivemos oportunidade de explorar nos subcapítulos anteriores, as organizações governamentais e as organizações portuárias.

Ao nível da gestão institucional, a natureza das decisões a tomar, ou como chamamos, os instrumentos de gestão, têm foco nas alterações ou ajustes da configuração governativa das infraestruturas portuárias, tais como, a reconfiguração da atribuição de responsabilidades ou a descentralização da administração portuária. Dado o seu carácter estrutural e fundamentalista, os instrumentos de gestão institucional, estão tipicamente a cargo das organizações governamentais.

Dentro do nível estratégico, as atenções centram-se nos instrumentos utilizados pelas organizações portuárias, que buscam continuamente alcançar posições cada vez mais competitivas no mercado, a relativo longo prazo. Nestes instrumentos incluem-se, "co-opetição" portuária, regionalização portuária, integração portuária, gestão estratégica dos stakeholders e gestão corporativa. Por fim, ao nível da gestão, temos presentes instrumentos orientados à gestão e operação de negócios do porto, como por exemplo, concessão de terminais, monitorização e medição da pegada de carbono e negociações comerciais com os clientes do porto.

Comparando com os instrumentos de gestão a nível estratégico com os instrumentos ao nível institucional, os instrumentos estratégicos têm maior foco nas relações internas e externas das organizações portuárias. No geral, os instrumentos de gestão estratégica são altamente utilizados pelos portos para desenvolverem as suas relações com os seus utilizadores, comunidades locais, ou até portos rivais. Importante referir ainda que, o investimento portuário é um importante "sub-instrumento" que se encontra incluído nos instrumentos estratégicos. Por exemplo, o investimento em estações aduaneiras e nos corredores de acesso que ligam o porto marítimo até essas estações é crucial para a regionalização portuária.

Ao nível da gestão portuária, a cargo dos gestores de operações e negócios do porto, encontram-se sete instrumentos principais, são eles a fixação dos preços dos serviços que o porto oferece, concessão portuária, o relacionamento com os utilizadores e clientes do porto, controlo regulamentar, controlo da segurança e, por fim, gestão das tecnologias de comunicação e informação e a monitorização e avaliação de performance do porto. Ao contrário dos instrumentos a nível institucional e estratégico, os instrumentos de gestão são mais operacionais, mais diretamente visíveis pela comunidade, e diretamente ligados ao sucesso do negócio do porto [19].

Assim, percebe-se que a gestão das infraestruturas portuárias como um todo é feita através da interação entre a forma como cada um desses instrumentos, afetos aos três níveis distintos, é utilizado. Esta abordagem demonstra claramente a complexidade inerente ao governo das infraestruturas portuárias. A natureza ramificada da gestão portuária impede-nos de atribuir responsabilidades, obrigações ou metas a uma entidade isolada, mas antes a uma interação simbiótica entre organizações governamentais e portuárias, por forma a procurarem conciliar os seus interesses e adotarem estratégias que não comprometam as ambições e objetivos que cada parte integrante procura alcançar [19].

Os Quadros 1 a 4 apresentam um resumo com a listagem dos vários instrumentos supracitados, afetos a cada nível de gestão, acompanhados de uma descrição geral.

Quadro 1. Instrumentos de gestão portuária [19].

Nível de atuação	Instrumento	Descrição Geral
Nível Institucional (Organizações Governamentais)	Descentralização da gestão portuária	Organizações governamentais transferem funções de autoridade portuária para organizações governamentais de nível mais baixo ou para novas entidades (não-governamentais).
	Re-centralização da gestão portuária	Ao contrário da descentralização da gestão portuária, na re-centralização, as principais organizações governamentais centralizam a administração portuária através de legislação e decretos.
Nível Estratégico (Organizações Portuárias)	Co-opetição portuária	Combinação entre cooperação e competição entre portos.
	Regionalização portuária	A regionalização portuária diz respeito à integração do porto marítimo com centros de distribuição interiores.

Quadro 2. Instrumentos de gestão portuária [19], continuação.

Nível de atuação	Instrumento	Descrição Geral
Nível Estratégico (Organizações Portuárias)	Integração portuária	É uma forma de cooperação portuária. A integração representa a mais íntima forma de cooperação entre portos. Normalmente manifesta-se sob forma de fusões ou aquisições.
	Gestão estratégica dos stakeholders	Foca-se em gerir e balancear os diversos objetivos dos grupos ou organizações interessadas ou relacionadas às questões da gestão portuária.
	Gestão corporativa	Representa a estrutura, os papéis e as responsabilidades que garantem os meios através dos quais a organização é gerida como uma entidade económica com base nos objetivos da empresa, dos seus acionistas ou sócios.
Nível da Gerência (Gestores de operações e de negócios do porto)	Fixação de preços	Inclui, principalmente, o estabelecimento das tarifas portuárias, assim como dos preços cobrados pelos serviços fornecidos pelo porto.

Quadro 3. Instrumentos de gestão portuária [19], continuação.

Nível de atuação	Instrumento	Descrição Geral
Nível da Gerência (Gestores de operações e de negócios do porto)	Concessão portuária	É a concessão dada, por uma autoridade governamental ou portuária, a um operador privado para que este possa fornecer serviços portuários (normalmente, movimentação de cargas) dentro de um período de tempo limitado.
	Gestão do relacionamento entre utilizadores/clientes com o porto	Refere-se aos princípios, práticas e diretrizes que a organização portuária segue ao interagir com os utilizadores dos serviços portuários.
	Monitorização e avaliação da performance do porto	É o processo de avaliação contínua que ajuda o porto a melhorar a sua performance e, consequentemente, atingir os resultados esperados.
	Controlo regulamentar	É uma ferramenta obrigatória usada para estabelecer uma estrutura de trabalho estável que oriente as atividades portuárias de forma transparente, previsível e responsável.

Quadro 4. Instrumentos de gestão portuária [19], continuação.

Nível de atuação	Instrumento	Descrição Geral
Nível da Gerência (Gestores de operações e de negócios do porto)	Controlo da segurança	Tem por objetivo garantir o cumprimento da operação segura do porto.
	Gestão das tecnologias de comunicação e informação	Na gestão portuária, as tecnologias de comunicação e informação são aplicadas sob a forma de sistemas informáticos para operação portuária.

2.3.4. Qual a razão de realizar uma gestão portuária

A abordagem que as entidades gestoras fazem perante estes instrumentos assim como as estratégias que irão adotar, são motivadas pelas metas que estas pretendem alcançar a curto, médio ou longo prazo. Muitos portos elegem o desenvolvimento económico como um dos seus principais objetivos, tendo em vista a criação de empregos e oportunidades de negócio ao invés de procurarem maximizar a eficiência e eficácia dos portos no seu serviço ao cliente [20]. No entanto, é muito difícil para um porto atingir um desenvolvimento económico duradouro sem considerar um aumento significativo na sua eficiência e eficácia [19]. A eficiência pressupõe, face às quantidades físicas de bens, o nível de esforços, a escala das atividades desenvolvidas e a eficiência em converter esses recursos num produto ou serviço com máximo valor acrescentado possível. Por outro lado, a eficácia diz respeito ao quão bem esta entidade ou organização aplica as suas estratégias, a sua estrutura e o seu ambiente de trabalho de forma a atingir os seus objetivos, assim como o nível de satisfação do cliente final. De uma forma mais direta, Brook *et al.* (2011) resumiu estes conceitos da seguinte forma: eficiência corresponde a "fazer corretamente as coisas", enquanto que eficácia trata-se de "fazer as coisas corretas", onde as "coisas corretas" são aquelas que serão valorizadas pelo utilizador ou consumidor final [21]. Importante salientar que, apesar da eficiência ser distinta da eficácia, estes dois conceitos são interdependentes. Há casos em que, medidas tomadas para aumentar a eficiência portuária, acabam por aumentar também a eficácia. Noutros

casos, a eficiência portuária foi alcançada por detrimento da sua eficácia. De uma forma geral, de maneira a um porto ser eficaz, tem de ser eficiente.

Na revisão da literatura feita por Zhang *et al.* (2019), perante a temática dos impactos das reformas na gestão portuária sobre a sua eficácia e eficiência, concluiu que, muitos estudos mostram que reformas portuárias no sentido da sua privatização trazem impactos positivos para a eficiência portuária. Por outro lado, ainda não existem resultados definitivos sobre o impacto ao nível da eficácia, sendo uma área que ainda carece de investigação por forma a obter respostas mais concretas e esclarecedoras [19].

2.4. Gestão Portuária - Panorama Internacional

Os "clusters" marítimos têm grande influência na economia regional e nacional, razão pela qual têm tido uma intervenção estratégica por parte dos governos de países como Portugal, Reino Unido, Canadá, Singapura e China [8]. Segundo Shinohara (2010), podemos definir "cluster" marítimo como o conjunto de indústrias que estão, direta ou indiretamente, relacionadas com a atividade portuária e se encontram localizadas dentro de uma determinada zona geográfica [22]. Estes podem ser divididos em clusters com funções logísticas, de serviço, ou mistas.

Num estudo realizado por Shi *et al.* (2020) [8] sobre os trabalhos de inovação realizados no porto de Shanghai para que este mantivesse a sua relevância mundial. Shi *et al.*, conclui que a maior parte dos clusters marítimos tiveram origem nos seus portos, cuja única função original era desempenharem serviços de carregamento e descarregamento. No contexto do mundo atual, a função destes clusters viu-se expandida para um leque muito mais abrangente de atividades, nomeadamente no papel de facilitarem a transação de bens numa cadeia mercantil global e terem em si integrados serviços logísticos e marítimos.

Apesar da expansão das suas competências, para os clusters marítimos com ambição de manterem, ou obterem, atenção internacional, este foco isolado no manuseamento de mercadoria já se demonstrou bastante insuficiente. Dentro do paradigma económico atual, para alcançarem uma posição de relevância mundial, os clusters marítimos têm de oferecer uma resposta integrada complexa que vise saciar todas as necessidades dos seus utilizadores e que, sobretudo, lhes garanta uma maior facilidade na execução das suas trocas comerciais.

Tendo para isso que possuir um elevado aglomerado de recursos marítimos, serviços logísticos de alta eficiência, um ambiente de negócios próspero e fluído, e uma grande capacidade de escoamento do tráfego marítimo e viário originado pela atividade portuária, sempre com constante atenção aos impactos ambientais [8].

Um ponto fulcral que ditará a atratividade do cluster é o fator cultural e o liberalismo das políticas económicas regionais. Por exemplo, um porto situado num país com políticas bastante restritivas face a investimento estrangeiro, ver-se-á em desvantagem face a outro onde vigorem políticas mais permeáveis. É nestas medidas, absolutamente diferenciadoras, que os agentes políticos têm a capacidade de intervir diretamente no sucesso e prosperidade dos seus clusters marítimos, devendo agir no sentido de flexibilizar a legislação com o intuito de incentivar um público-alvo de negócios mais amplo possível [8]. Como foi referido por Suire e Vicente (2014) [23], clusters com sucesso sustentável são aqueles que continuam a evoluir no sentido de atingirem um nível mais avançado, desconectando-se dos seus velhos ciclos de vida e exibindo uma tendência de crescimento contínuo.

Por forma a complementar quantitativamente o enquadramento internacional da atividade portuária, apresentam-se de seguida dois gráficos recolhidos do site da "TheGlobalEconomy" [24], que fazem o ranking mundial do número de TEU's (20-foot equivalent units, tamanho standard dos contentores de carga) que passaram em cada país no ano de 2019 (dados mais recentes à presente data) (Figura 4 e Figura 5). Assim como, um segundo gráfico que faz o ranking da qualidade das infraestruturas portuárias de cada país, com base nos dados recolhidos pela "WEF Executive Opinion Survey". A nota atribuída a cada país é feita com base numa única questão. Os inquiridos devem classificar, entre 1 (subdesenvolvido) e 7 (extensas e eficientes à escala internacional), as infraestruturas portuárias e vias navegáveis interiores nos países em que operam. Para os inquiridos que operam em países sem litoral, estes devem classificar, entre 1 (impossível) e 7 (fácil), o seu acesso a infraestruturas portuárias e às vias navegáveis interiores.

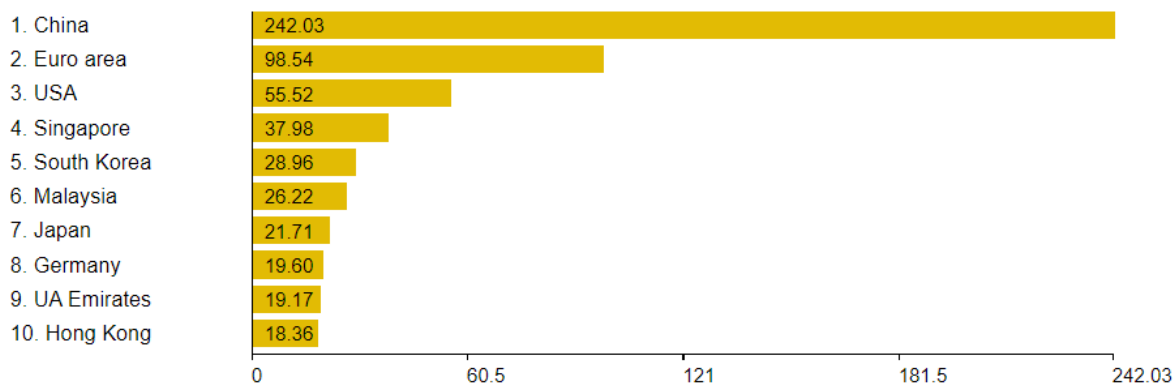


Figura 4. Número de TEU's, em milhões, que passaram pelos portos de cada país, em 2019, [24].

Portugal, segundo este mesmo ranking da TheGlobalEconomy, classificou-se mundialmente no 42º lugar, com um total de 2,92 milhões de TEU's com passagem pelos portos nacionais no ano de 2019. Ao nível do ranking mundial para a qualidade das infraestruturas portuárias, Portugal assume a 36ª posição com uma classificação de 4,9.

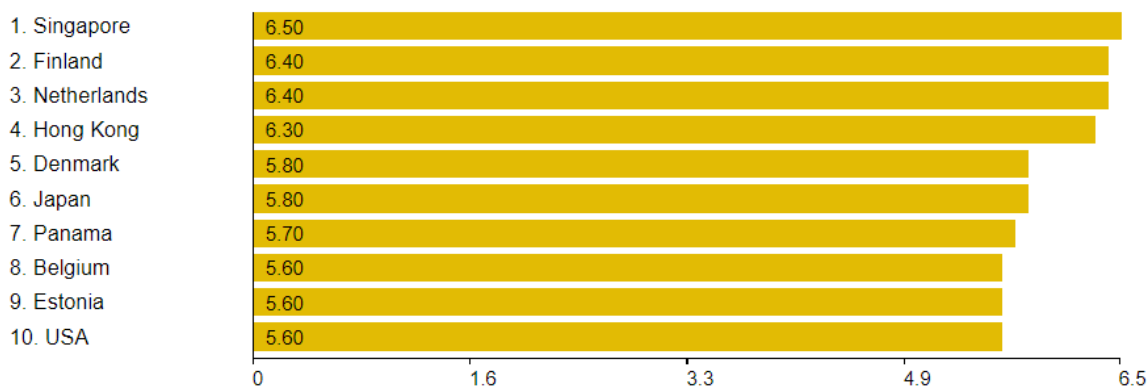


Figura 5. Ranking mundial da qualidade das infraestruturas portuárias, em cada país, de 1(baixa) até 7(alta), 2019, [64].

Um aspeto interessante que merece atenção e uma breve reflexão, é a tendência inversamente proporcional que Portugal tem registado na última década nestes rankings. Apesar da quantidade de TEU's ter aumentado anualmente, a avaliação da qualidade das infraestruturas portuárias portuguesas tem registado um padrão recessivo, como é visível nas Figura 6 e Figura 7. Face a estas observações, pode-se deduzir que Portugal, na última década, focou-se no aumento da eficiência dos seus portos, mas fê-lo em detrimento da eficácia. Ou seja, aumentaram, em termos brutos, as quantidades de mercadorias e bens que circulam diariamente nos portos (aumento da eficiência), no entanto, não acompanharam

essa evolução com um investimento ao nível do aumento do grau de satisfação dos seus clientes e utilizadores (aumento da eficácia), aspeto que se refletiu diretamente nos inquéritos da WEF Executive Opinion Survey, com base nos quais foi atribuída a classificação final relativa à qualidade das infraestruturas portuárias nacionais.

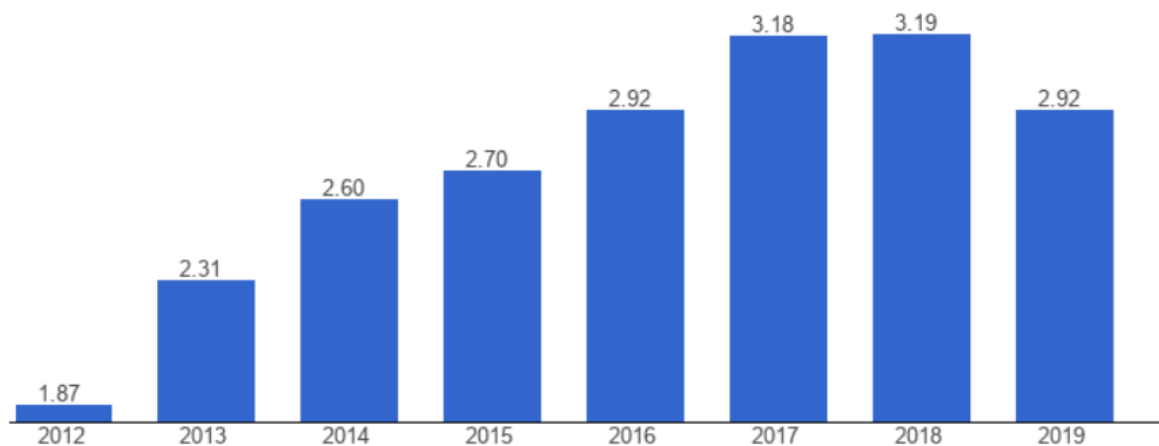


Figura 6. Número de TEUs, em milhões, que passaram pelos portos portugueses, entre 2012 e 2019, [65].

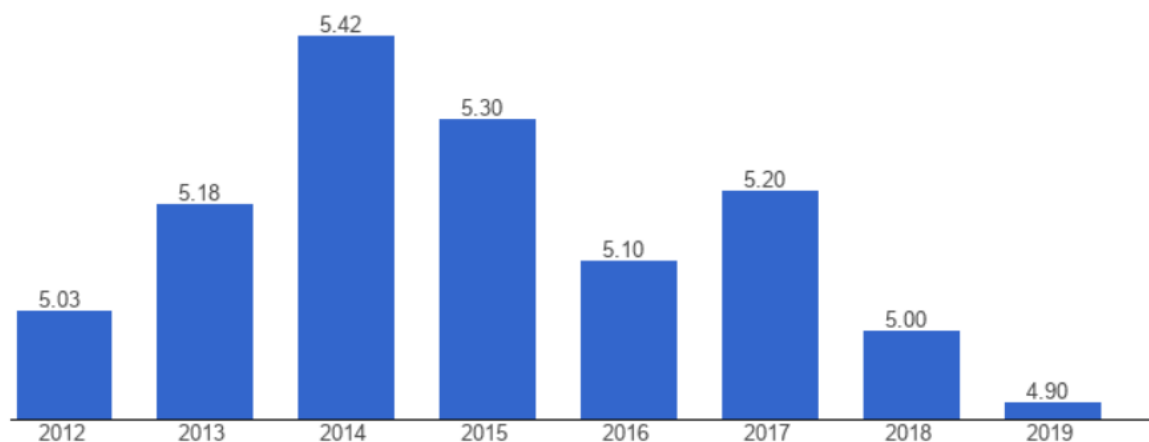


Figura 7. Classificação da qualidade das infraestruturas portuárias portuguesas, entre 2012 e 2019, [66].

Esta análise pode de uma maneira muito simplista, justificar estas tendências contraditórias nos rankings da TheGlobalEconomy relativos ao desempenho das infraestruturas portuárias em Portugal. A solução para inverter o sentido decrescente da classificação de qualidade pode justamente passar pelo investimento dos portos portugueses no melhoramento da sua eficácia. Realizando, por exemplo, estudos que procurem descobrir quais os principais objetivos e necessidades dos seus clientes de modo que os portos nacionais possam agir da

forma mais próxima e eficaz com os seus utilizadores no sentido de aumentarem o seu grau de satisfação.

2.5. Gestão Portuária - Panorama Nacional

Portugal tem uma relação histórica com o mar, tendo sido das nações pioneiras na descoberta do "novo mundo" no qual, de imediato, estabeleceu boas relações políticas e culturais das quais culminaram valiosas rotas comerciais, como por exemplo, a notável rota de especiarias da Índia. Passados mais de 500 anos desde a descoberta do caminho marítimo para a Índia, Portugal, localizado na cauda da Europa, continua a olhar para o oceano Atlântico como o meio de eleição para a expansão económica nacional [25].

A Comissão Especializada das Zonas Costeiras e do Mar (CEZCM) da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) [26], num artigo onde desafia as administrações dos portos portugueses a descrever a sua importância nacional e quais as inovações que perspetivam implementar até 2030, constata que "os portos nacionais constituem um pilar fundamental para o desenvolvimento económico de Portugal", tendo especial importância nas exportações.

Em consonância com o cenário descrito sobre as exigências que vigoram atualmente no panorama internacional, os portos portugueses sentem também eles a necessidade imutável de desenvolver e modernizar as suas infraestruturas, terem acesso a plataformas logísticas de alta eficiência, com grande aposta na digitalização e na descarbonização, com o intuito de manterem a sua competitividade no mercado global.

Ainda segundo a Comissão Especializada das Zonas Costeiras e do Mar (CEZCM) [26], os principais desafios do setor para a próxima década são referentes à sustentabilidade ambiental e crescente digitalização e inovação de forma a acompanhar as tendências do setor a nível internacional. Constata que estas medidas contribuirão para uma "maior transparência em todo o processo logístico", e que o aumento da digitalização irá contribuir para uma melhor comunicação entre todos os envolvidos ao longo da densa cadeia logística, o que, conseqüentemente, irá culminar num aumento significativo da eficiência do setor, o que por fim resulta numa diminuição dos impactos ambientais e na pegada ambiental da

indústria. Uma última intenção, particular dos portos portugueses, está na viabilização da entrada de navios de maiores dimensões, aumentando assim a oferta e a capacidade de serviço do cluster. Nomeadamente, no Porto de Leixões existem já planos de executar um prolongamento do quebra-mar exterior, com aprofundamento do canal de entrada, de modo a garantir precisamente uma melhor segurança e navegabilidade que viabilizarão a entrada de navios de maiores dimensões [26].

Graças ao seu posicionamento privilegiado no extremo sudoeste da Europa, assim como à sua longa linha costeira, Portugal, reúne todas as condições geográficas para criação de uma rede densa de portos marítimos. Essa predisposição geográfica, aliada a uma estratégia económica que visou atender às necessidades regionais e nacionais do tecido empresarial sem, no entanto, cometer excessos orçamentais que causassem encargos financeiros desnecessários para o país, pois as infraestruturas portuárias apresentam custos avultados quer em fase construtiva, quer na sua operação, assim como um evidente impacto ambiental sobre os ecossistemas onde são construídos. Restringiu as suas infraestruturas portuárias a um número bastante condensado, onde cada porto tem um papel fulcral na região onde se insere [27].

Deste modo, as principais infraestruturas portuárias em Portugal, de norte para sul (Figura 8), são [28]:

- Porto de Viana do Castelo: Alberga o maior estaleiro do país;
- Porto de Leixões: Referência na região norte do país;
- Porto de Aveiro: Representa uma solução intermodal competitiva;
- Porto da Figueira da Foz: Promotor da economia da região centro do país;
- Porto de Lisboa: O ponto de encontro do atlântico, é o principal terminal de transporte marítimo de Portugal;
- Porto de Setúbal: A solução ibérica na região de Lisboa, conta com ligação direta aos principais eixos rodoferroviários do país e a Espanha;
- Porto de Sines: O principal porto português assim como a principal porta de entrada de abastecimento energético da Portugal;
- Portos das ilhas dos Açores: A plataforma em pleno oceano Atlântico;
- Portos da ilha da Madeira: Um hub inquestionável para as rotas de cruzeiro.



Figura 8. Mapa de Portugal continental com a localização dos principais portos portugueses, adaptado de [67].

Apesar de todos os portos acima citados serem indispensáveis ao funcionamento estável do país, existem três portos que graças à sua singularidade, importância e influência nacional se destacam, sendo estes os portos de Viana, Leixões e Sines, onde uma breve análise será feita às suas infraestruturas, história recente e ao papel que estes portos desempenham atualmente ao nível da economia azul nacional.

2.5.1. *Porto de Viana do Castelo*

O porto de Viana do Castelo, Figura 10, situado junto à foz do rio Lima, na zona noroeste de Portugal, é um porto de referência nacional graças ao seu estaleiro naval, Figura 9, o maior do País. Os Estaleiros Navais de Viana do Castelo (ENVC) iniciaram a sua extinção no ano de 2014, estando os seus terrenos e infraestruturas desde então subconcessionados à empresa West Sea, Estaleiros Navais Lda. Neles são feitas reparações, conversões em navios de porte médio-alto e construção. Tendo, desde 2014, construído 17 navios, dos quais, navios de expedição polar, navios de cruzeiro de rio, dragas e ainda navios militares para marinha portuguesa [29], [30].



Figura 9. Estaleiros navais de Viana do Castelo [68].

O porto de Viana do Castelo possui uma oferta variada que inclui [29]:

- Porto comercial: Operação permanente com capacidade de movimentação de mais de 1 000 000 de toneladas de carga por ano;
- Porto de recreio: Constituído por duas docas, contando com um total de 307 pontos de amarração distribuídos por uma área molhada de 37 600 m²;
- Porto de pesca: Destinada aos pequenos barcos de pesca costeira, possui uma área molhada de 8 300 m²;
- Porto industrial: Alberga os estaleiros navais que ocupam uma área de implantação de 250 000 m² da qual 50 000 m² corresponde a área coberta, e empregam aproximadamente 866 trabalhadores, sendo o maior estaleiro naval do país.



Figura 10. Porto de Viana do Castelo [31].

O porto comercial, localizado na margem sul do rio, opera 24 horas por dias, todos os dias do ano. Possui uma capacidade instalada para a movimentação de mais de 1 000 000 de toneladas de carga por ano, recebendo navios com até 180 metros de comprimentos e até 8 metros de calado. Tem acesso relativamente fácil e é considerado um porto moderno e equipado com excelentes infraestruturas, movimentando carga geral fracionada (alumínio, aço, madeira em paletes, entre outras), granéis sólidos (cimento, fertilizantes, caulino, entre outros), granéis líquidos (asfalto) e carga *roll-on/roll-off* [29], [31].

2.5.2. *Porto de Sines*

O porto de Sines, Figura 11, localizado a 58 milhas náuticas a sul de Lisboa, é o atual líder nacional na quantidade de mercadorias movimentadas. É um porto de águas profundas que possui condições naturais singulares na costa portuguesa que lhe permitem acolher todos os tipos de navios. Está equipado com modernos terminais especializados onde podem ser movimentados vários tipos de mercadorias [32], [33].

Assume-se como um ativo estratégico preponderante para o país, uma vez que se trata da principal porta de entrada de abastecimento energético português, recebendo gás natural, carvão, petróleo e seus derivados. Adicionalmente, é líder nacional no total de carga movimentada nos portos nacionais, assim como o porto português que mais contentores

movimenta. Valores estes que fazem do porto de Sines o principal porto da fachada ibero-atlântica, assim como uma referência ibérica, europeia e mundial [33], [34].

É um porto artificial recente, a sua construção teve início em 1973 e entrou em exploração passados apenas 5 anos, em 1978. A sua localização estratégica, longe de pressões urbanas, assegura ao porto uma ímpar capacidade de expansão a longo prazo. Dispõe ainda de acessibilidades terrestre satisfatórias face à tráfego atual, no entanto, conta já com um plano de evolução rodoferroviário, que permitirá dar resposta às projeções futuras de crescimento do porto e da sua área de influência [33], [34].



Figura 11. Porto de Sines [69].

O porto marítimo de Sines em conjunto com a sua zona industrial e logística de retaguarda, com mais de 2000 hectares, constituem uma plataforma logística de âmbito internacional com capacidade para receber os grandes *players* dos setores marítimo-portuário, industrial e logístico. Este podem usufruir da área navegável direta do porto de Sines a toda a zona centro e sul do país, e da área navegável alargada que liga o porto, de forma muito competitiva, à Extremadura Espanhola e sobre todo o corredor até Madrid, como fica evidenciado na Figura 12, [32], [33].



Figura 12. Rotas estratégicas ao porto de Sines [32].

2.5.3. Porto de Leixões

Construído nos finais do século XIX, o Porto de Leixões, Figura 13, é atualmente o segundo maior porto artificial de Portugal e o principal porto exportador do país. Sozinho, contribui, direta e indiretamente, para 7% do emprego português e lida com cerca de 6% do PIB nacional, valores que o tornam num agente indispensável para o tecido empresarial e industrial nacional [26]. Estrategicamente localizado, 4 km a norte da foz do rio Douro, em Matosinhos, junto à cidade do Porto, situa-se na fachada Noroeste da Península Ibérica, região povoada por uma elevada densidade industrial. Para além do núcleo empresarial e industrial que intercepta. Estas características singulares fazem do Porto de Leixões um *player* indispensável para as rotas nacionais e internacionais [35].



Figura 13. Porto de Leixões, [35].

Segundo dados da Associação dos Portos de Portugal (APP) [35], o Porto de Leixões movimenta anualmente cerca de 20 milhões de toneladas de mercadoria, e é responsável por 20% do Comércio Externo Português por via marítima. Por ele cruzam cerca de 2700 navios por ano, mais de 670 mil TEU's (Twenty Foot Equivalent Unit), e todo o tipo de carga, nomeadamente: têxteis, granitos, vinhos, madeira, automóveis, cereais, sucata de ferro, sucata de vidro, ferro e aço, óleos, açúcar, torres de aerogeradores e outros componentes eólicos e produtos petrolíferos. Conta ainda com receção de passageiros de navios de cruzeiro.

O porto de Leixões, Figura 14, ao longo dos seus 5 km de cais, 55 hectares de área terrestre e 120 hectares de superfície molhada disponibiliza uma vasta gama de serviços e instalações portuárias que denotam claramente a sua escala de verdadeiro porto internacional, assim como o seu papel preponderante a nível regional e nacional. Estruturas internas essas das quais se enumeram [36]:

- Cais convencionais de carga geral e granéis sólidos: Compreendem a Doca 1 (Norte e Sul), a Doca 2 (Norte e Sul) e a Doca 4 Norte (ou terminal de Granéis Agroalimentares). As principais mercadorias que aqui se movimentam são: madeira em bruto, prensada e serrada; ferro e aço; rolos de chapa; pedras de granito; sucata; granéis alimentares;

maquinaria em geral e as cargas de projeto, como geradores eólicos e transformadores;

- Cais de movimentação de granéis líquidos: Corresponde à Doca 2 (Sul) e está atualmente destinada à Refinaria da Petrogal, localizada em Leça e da Palmeira, e à CEPISA. Além do Terminal Petrolero, a Doca 2 (Sul) tem também outros locais afetos à movimentação de outros tipos de granéis líquidos;
- Terminal de petroleiros: Foi construído sobre um quebra-mar submerso, com 700 metros de comprimento e uma altura de 15 metros acima do nível do mar, servindo também de proteção à entrada do porto. Está atualmente concessionado à Petrogal - Petróleos de Portugal, S.A.
- Terminal de contentores: Sob a forma dos Terminais de Contentores Norte e Sul, totalizam uma área de 22 hectares com capacidade de armazenagem de 19.000 TEU's (cerca de 12.600 contentores), e uma capacidade de movimentação de 650.000 TEU's/ano (cerca de 398.773 contentores/ano). São ambos atualmente operados pela empresa Yilport Leixões;
- Terminal Ro-Ro: O Terminal Roll-On Roll-off encontra-se localizado na Doca 1 e oferece serviços de embarque e desembarque de carga rolante no Porto de Leixões. Dispõe ainda de uma área de estacionamento para cerca de 100 trailers;
- Terminal multiusos: Situado no Molhe Sul do porto, o Terminal Multiusos destina-se, essencialmente, ao tráfego Ro-Ro, potenciando o desenvolvimento das Auto-Estradas do Mar a partir de Leixões. Este Terminal dispõe ainda de uma área de terrapleno com cerca de 8 hectares que serve de área de apoio;
- Terminal de cruzeiros: Recebendo anualmente cerca de 80.000 passageiros em navios de cruzeiro, vindos de todas as partes do globo, o porto de Leixões dispõe de dois terminais de cruzeiro. Terminal de Cruzeiros Norte e Sul com cais para cruzeiros, estação de passageiros, um cais fluviomarítimo para acostagem de embarcações que proporcionem itinerários turísticos no rio Douro, um porto de recreio náutico com capacidade para 170 embarcações e estacionamento para autocarros e viaturas;
- Doca de recreio: Localizada no enraizamento do Molhe Norte do porto de Leixões, encontra-se atualmente concessionada à Associação de Clubes Marina Porto Atlântico. Dispõe de uma capacidade de 248 lugares para amarração permanente para amarração temporária existe uma área de pontes com extensão total de 50

metros, tem ainda capacidade de acostagem para 4 a 5 iates. Prove serviços de abastecimento de água potável, energia elétrica, sistema de combate a incêndio e recipientes para lixos e óleos;

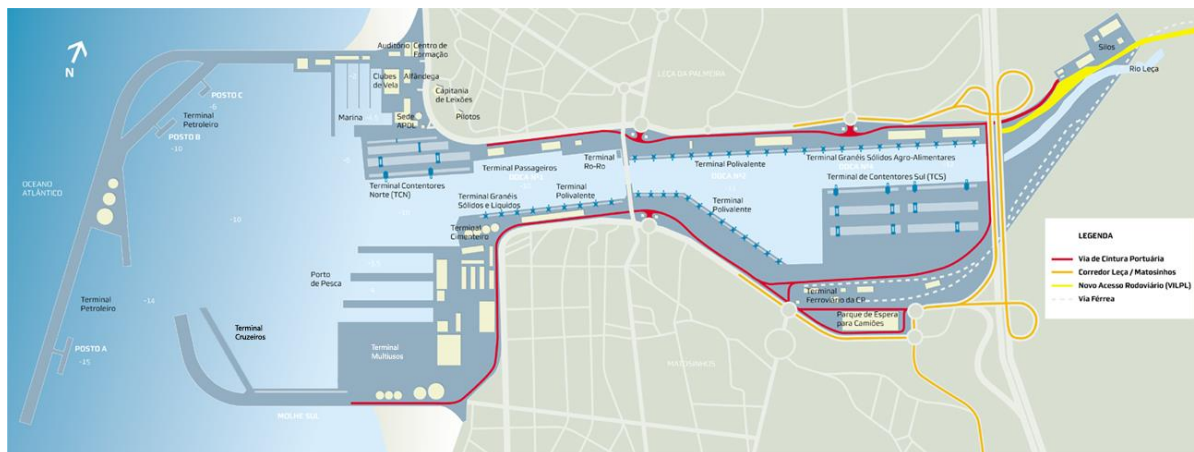


Figura 14. Mapa do Porto de Leixões, [70].

- **Porto de pesca:** Atualmente concessionado à DOCAPESCA - Portos e Lotas, S.A. É o mais importante porto sardineiro do país e o maior em capturas por arrasto costeiro. Dispõe de três pontes-cais onde podem acostar simultaneamente 46 traineiras e 20 arrastões. O entreposto frigorífico e a unidade de frio, por seu turno, garantem já o abastecimento de gelo e dispõe de uma capacidade de armazenagem de 5.500 toneladas;
- **Instalações especializadas (silos, depósitos e armazéns):**
 - Nos silos portuários, a empresa Silos de Leixões - Unipessoal, LDA opera numa área de 2,3 hectares. Vocacionados ao armazenamento de cereais, derivados, oleaginosas e outros produtos alimentares, possuem uma capacidade de 120.000 toneladas;
 - Os produtos fabricados pela Petrogal na Refinaria de Leça da Palmeira, ligada ao Terminal Petrolífero por duas dezenas de oleodutos e gasodutos, embarcam com destino a portos nacionais, para abastecimento interno, ou com destino a portos estrangeiros;
 - A CEPISA, localizada em Matosinhos, encontra-se ligada à Doca 2 Sul por dois pipelines para produtos asfálticos e fuelóleo. A capacidade de armazenagem é de 61.000 toneladas;

- Existem ainda dois armazéns, localizados na Doca 1, para a receção e expedição de cimento a granel, atualmente licenciados à empresa SECIL - Companhia Geral da Cal e Cimento, S.A., ocupando uma área total de 1500 m².

2.6. Problemáticas na gestão de infraestruturas portuárias

As infraestruturas portuárias constituem ativos críticos para a sociedade. São organismos complexos que estão profundamente ligados à realidade económica, funcional e social da região, ou país, onde se inserem. Desta ligação profunda ao meio constam também fortes dependências que deixam as infraestruturas portuárias à mercê do perfeito funcionamento simultâneo de todo o sistema. Falamos, por exemplo, dos sistemas de transporte que escoam os bens do porto, a normal operação dos terminais, e até mesmo, da integridade estrutural e funcional das próprias estruturas portuárias.

Dada a íntima conexão entre os diversos subsistemas portuários, eventos disruptivos, ou perturbadores, que podem causar desordem ou até mesmo danos irreversíveis no equilíbrio de todo o sistema. As infraestruturas portuárias têm assistido a um aumento do número de cenários disruptivos que se estendem desde a degradação das infraestruturas com a sua idade e tipos de utilização, ocorrência de desastres naturais, danos por ação humana, questões organizacionais, económicas, fatores tecnológicos, ou até interdependências com outras infraestruturas críticas [37].

Articulando os cenários de risco com o conhecimento sobre os graves impactos da interrupção das atividades portuárias, surge a necessidade da criação e implementação de sistemas preditivos e de resiliência para as infraestruturas portuárias. Cabe a estes sistemas reduzir a probabilidade de falha do porto através da antecipação do choque induzido por um evento disruptivo. O sistema preditivo deve prever atempadamente a ocorrência de tal evento, ou quando não for possível a sua previsão, o sistema de resiliência deve assegurar o retorno ao normal funcionamento da infraestrutura portuária o mais rapidamente possível.

Por forma a criar um sistema de resiliência, o primeiro passo a tomar é a elaboração de uma análise dos possíveis eventos de risco que podem ocorrer sobre a infraestrutura e de seguida desenvolver uma estratégia que os procure mitigar ou solucionar, caso ocorram [37]. Estes

sistemas podem surgir com foco nas mais variadas realidades da gestão portuária, neste trabalho será dado foco aos modelos preditivos de degradação no auxílio da gestão de infraestruturas portuárias.

3. Modelos preditivos de degradação e gestão da infraestrutura portuária

3.1. Introdução, objetivos e gestão dos modelos preditivos

A segurança estrutural assume um papel preponderante ao longo de todo o ciclo de vida das infraestruturas portuárias. Expostas a um meio com condições particularmente agressivas, onde a corrosão é uma consequência direta, bastante expressiva, que pode levar a uma redução da funcionalidade estrutural do porto, uma manutenção regular e atenta à performance da infraestrutura portuária é necessária para garantir o normal funcionamento das operações portuárias [38] [39].

Segundo Zhang *et al.* (2017) [39], a importância da manutenção das infraestruturas portuárias pode ser vista à luz de três aspetos: o longo período de operação, o meio agressivo onde se inserem e a necessidade de garantir um funcionamento ininterrupto. A maior parte das infraestruturas portuárias serão utilizadas durante um longo período. Durante todo o tempo em que porto está em serviço, as deteriorações estruturais ocorrem constantemente. Por esta razão, as operações de manutenção são um trabalho contínuo, inerente à operação portuária, que mantêm o estado de conservação das estruturas acima de um determinado nível.

As infraestruturas portuárias estão, normalmente, construídas ao longo da linha costeira, zonas que exigem constantes trabalhos de reparação. Como a maioria destas infraestruturas se encontra diretamente exposta a meios agressivos, são esperados mecanismos de deterioração rápidos nas suas instalações. Por exemplo, a corrosão induzida por cloretos é a principal causa de deterioração nas estruturas de betão armado construídas nas zonas costeiras [40]. Existe por isso uma necessidade, real e imutável, de um planeamento de manutenção eficaz e económico para estas estruturas de deterioração rápida. Assim, é de extrema importância lembrar que, as consequências associadas à falha da infraestrutura portuária, causada por falta de manutenção, podem ser enormes, o que pode trazer impactos adversos para a sociedade. É por isso fulcral que se compreenda que qualquer interrupção na atividade portuária não representa apenas uma perda para os portos, mas também uma possível paralisação de toda a cadeia económica adjacente. Por outras palavras, as condições de performance da infraestrutura afetam a eficiência das operações portuárias assim como

dos setores associados. Torna-se por isso essencial tomar as devidas precauções e cuidados durante a própria fase de projeto das infraestruturas portuárias, que devem ser sempre acompanhadas de ações de manutenção regulares quando entram em fase de exploração [40].

3.2. Degradação das Infraestruturas Portuárias

O principal desafio para as entidades gestoras das infraestruturas portuárias, perante as suas estruturas em processo de degradação inerente à sua exploração, está em manter a normal operação das mesmas enquanto garantem os níveis necessários de segurança, assim como custos razoáveis de operação. Adicionalmente, as oportunidades de expansão portuária estão cada vez mais limitadas fruto das crescentes preocupações associadas ao impacto ambiental, mas também devido à escassez de espaços disponíveis para a expansão dos portos, quando estes se encontram, por exemplo, próximos ou inseridos em núcleos urbanos [41].

Na Figura 15 é apresentado um mapa simplificado das principais etapas que gerem todo o processo de conservação dos ativos. Desde a tomada de conhecimento do património a gerir, até à decisão relativa à abordagem que será feita sobre o mesmo.

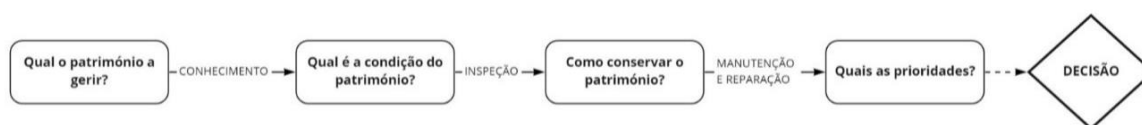


Figura 15. Mapa simplificado da gestão de risco em infraestruturas, adaptado de [41].

3.2.1. Inspeções de infraestruturas portuárias

Num estudo realizado por Boero *et al.* (2009) [41], onde foi feita uma análise nos portos franceses sobre as práticas e programas de manutenção aplicados e em desenvolvimento, foi concluído que a maior parte dos administradores portuários faz uma monitorização constante das suas estruturas por via do seu pessoal técnico do porto, através de equipamentos ou por meio de responsáveis estatais. Este tipo de inspeção permite identificar eventos causados por acidentes, como por exemplo: colisões de embarcações, falhas nos equipamentos de segurança do porto ou ausência de guarda-corpos. Mas também detetar o surgimento de defeitos em zonas abertas, tal como um eventual desalinhamento de carris.

Defeitos facilmente detetáveis como estes têm a capacidade de trazer graves consequências, a curto ou médio prazo, na segurança assim como na disponibilidade de operação das instalações.

Por forma a prevenir tais eventos que restringem a normal atividade portuária, é prática comum a realização de inspeções periódicas sobre as estruturas portuárias, complementada, se necessário, por uma inspeção particular mais detalhada. Consoante vários fatores, tais como o tipo de utilização do porto, se este desenvolve uma exploração mais ou menos intensa, o grau de importância regional ou nacional do mesmo, ou até questões de disponibilidade de pessoal ou orçamentais, vários tipos distintos de ações de inspeção podem ser levados a cabo, sob intervalos proporcionalmente ajustados. A abordagem mais simples e expedita, e por isso a mais comumente realizada, trata-se de uma inspeção periódica interna, onde uma equipa composta por engenheiros procuram detetar possíveis defeitos nas estruturas, apenas com recurso a observações *in situ*, ferramentas ligeiras de monitorização e instrumentos de medição comuns. A frequência deste tipo de inspeção é variável, devendo ser adequada às necessidades do porto em questão, é normalmente realizada bianualmente com um intervalo máximo que não deve passar os três anos. Quando uma inspeção periódica não for suficiente, uma análise completa será feita sob a forma de uma inspeção detalhada. As inspeções detalhadas consistem num diagnóstico completo de todos os componentes da estrutura inspecionada. Meios especializados de medição e testes podem ser implementados se necessário. Por exemplo, os componentes imersos podem apenas ser inspecionados por mergulhadores. Esta tarefa específica é normalmente realizada por entidades privadas [41].

Se necessário, uma inspeção localizada completa o processo de inspeção. Estas ações são semelhantes às inspeções periódicas, no entanto, são aplicadas particularmente nos seguintes casos [41]: Acidentes (tempestades, colisões, etc.); Surgimento de defeitos; Diagnóstico antes de reparação; Novas necessidades (substituição de equipamentos portuários) e eventos excecionais; Ações estratégicas; e Construções recentes. Por forma a garantir o seu conhecimento sobre o estado atual real das estruturas, as entidades portuárias levam a cabo investigações adicionais. As investigações mais frequentes são [41]:

- Medição da espessura residual das armaduras de aço através de ultrassons;

- Determinação dos perfis de penetração dos íões de cloreto nos componentes de betão armado ou pré-esforçado;
- Investigações do solo com recolha de amostras, análise em laboratório e in situ;
- Levantamentos topográficos;
- Instrumentação/sensorização de componentes de estruturas recém-construídas durante os primeiros anos após construção para acompanhar o seu comportamento global.

3.2.2. Ações de manutenção comuns e reparações das estruturas portuárias

As ações de manutenção comuns e reparações são definidas pelas entidades de gestão portuária segundo os seguintes critérios, propostos por Boero *et al.* (2009) [41]:

- Eventos acidentais, como colisões de embarcações. Neste caso, os reparos ou reconstruções necessárias causadas pelos danos provocados na colisão são pagos pela companhia de seguros afeta à embarcação responsável;
- Grau de urgência das ações para evitar o colapso global de uma estrutura;
- Detecção de defeitos importantes;
- Manutenção preventiva que evite danos irreversíveis na performance mecânica da estrutura;
- Para estruturas móveis, o respeito das condições de manutenção;
- Questões estratégicas associadas às estruturas;
- Eficiência das ações;
- Custo das ações;
- Capacidade das equipas de trabalho em garantir o sucesso dos projetos de reparação.

Desta forma, e ainda segundo Boero *et al.* (2009) [41], estas diferentes intervenções podem ser classificadas de acordo com o impacto medido na performance da estrutura. Neste estudo, os autores sugerem dois níveis distintos de intervenção: manutenções comuns e reparações. A manutenção diz respeito aos trabalhos recorrentes do dia-a-dia, periódicos, ou agendados que são desenvolvidos para garantir o normal funcionamento das instalações. Incluem trabalhos de rotina na prevenção de danos e degradação das instalações, que doutro modo seriam mais caros de restaurar. Reparções, por outro lado, são feitas sobretudo através da reconstrução ou substituição dos componentes degradados ou dos materiais que

não se conseguiram conservar através das ações de manutenção. Quando as ações de manutenção apresentam um carácter generalizado, são consideradas como ações de reparação.

Somam-se às ações de manutenção e reparação uma série de trabalhos mais ligeiros e rotineiros que procuram também proteger e conservar o estado dos diversos ativos. As ações de conservação visam desacelerar o processo de degradação, restituindo o ativo de pequenos danos que, caso não sejam tratados, podem progredir para danos comprometedores e de onerosa reparação. As ações de conservação mais comuns em instalações construídas à beira-mar são [41]: Pinturas de rotina, ou substituição de equipamentos de segurança; Preenchimento de assentamentos nas zonas abertas; Retoques localizados na argamassa de estruturas em alvenaria; Preenchimentos de rotina em fendas abertas no betão; e Pinturas e revestimentos protetores aplicados em cais, quebra-mares, paredões, etc.

3.2.3. Restrições na manutenção

Por forma a manter o nível exigido de performance, os gestores portuários têm de programar e executar várias ações de manutenção. O respeito pelo plano de manutenção traçado está dependente de vários fatores: restrições operacionais do porto e restrições técnicas e financeiras associadas às estruturas portuárias e a sua gestão técnica [41]. As restrições a essas operações são predominantes nas estruturas cuja operação não pode ser temporariamente interrompida, mesmo se a sua atividade for transferida para outra estrutura. Como é geralmente o caso de eclusas, pontes móveis e estruturas especializadas de atracagem e amarração. Nestas condições, a definição de intervenção preventiva tem de ser definida através do diálogo entre todos os utilizadores portuários. Dadas as dificuldades apresentadas, a manutenção destas estruturas é muitas vezes adiada, aumentando os riscos [41]. Erguidos sobre a orla costeira, os portos marítimos encontram-se sujeitos às ações da ondulação, das marés, dos fenómenos atmosféricos e às ações físicas e químicas da água do mar. Perante tais condições, estas infraestruturas exigem meios de manutenção específicos. Equipamentos e pessoal técnico qualificado para executar, por exemplo, obras subaquáticas, onde, como é evidente, os materiais a aplicar escolhidos têm de garantir a conservação do seu desempenho sob as ações do mar. Estas restrições técnicas, aliadas à dimensão das estruturas e aos requisitos de operação, aumentam os custos de manutenção. Ao mesmo tempo que nos deparamos com os custos avultados inerentes às ações de manutenção

portuária, lembramos que as estratégias de manutenção são definidas pelos gestores portuários altamente em função das restrições financeiras, restrições de orçamento e de pessoal [41].

Como concluiu Boero *et al.* (2009) [41], no seu estudo sobre as práticas e programas de manutenção aplicados, e em desenvolvimento, nos portos franceses, orçamentos limitados, mão-de-obra escassa e os avultados custos das ações de manutenção consolidam o facto de que os gestores portuários precisam de ferramentas acessíveis e de qualidade direcionadas à gestão do património por forma a otimizarem as ações de manutenção. Assim como, de indicadores globais que forneçam uma visão do controle de riscos aos agentes decisores.

É precisamente no sentido de responder a estas necessidades do setor portuário, acima apontadas por Boero *et al.* (2009) [41], que nos seguintes subcapítulos deste documento se apresentam, analisam e desenvolvem metodologias de gestão de manutenção em infraestruturas portuárias assentes na criação e implementação de modelos preditivos de degradação. Estes modelos surgem precisamente com o intuito de constituírem ferramentas de monitorização e gestão do património. Construídos sobre dados históricos de registos reais e modelos matemáticos probabilísticos sofisticados, estes modelos têm a particularidade de fornecerem previsões a médio e longo prazo do futuro estado de conservação da estrutura em análise, permitindo assim aos agentes decisores traçarem, muito atempadamente, planos de manutenção otimizados que condicionem ao mínimo o normal desenvolvimento das atividades portuárias. Podendo assim diminuir os custos diretos nas intervenções de manutenção, pois têm acesso à informação que dita o momento ótimo para executar a ação de manutenção/reparação. Assim como reduzir os avultados custos indiretos, económicos e sociais, que seriam provocados pela interrupção indevida das atividades portuárias [41].

3.3. Gestão das ações de manutenção em infraestruturas portuárias baseada em modelos preditivos de degradação

Perante uma nova infraestrutura, ou quando esta não tem disponível um histórico de manutenção, o primeiro passo no planeamento da manutenção é a monitorização de todos os ativos presentes na infraestrutura portuária. Pretende-se aqui avaliar a performance dos diversos elementos da infraestrutura portuária, assim como, o atual estado de conversação

das instalações, tendo em conta qual era o seu estado de conservação inicial e qual o seu tempo de serviço. Ao comparar o estado de conservação inicial com o estado atual, é possível determinar qual foi a deterioração que ocorreu nos elementos estruturais do ativo. Com recurso a estes registos, relacionando-os com o intervalo de tempo em que tal degradação ocorreu e tempo de serviço, é possível criar modelos de degradação para os elementos estruturais [39].

Atualmente, o método mais utilizados para registar os resultados das inspeções é através da atribuição de classificações sobre o estado de conservação ("condition ratings") dos elementos estruturais. A classificação sobre o estado de conservação genericamente mais aceite é baseada no conceito clássico de fiabilidade. Segundo esta classificação, a fiabilidade de cada elemento estrutural é avaliada com base no registo de inspeção feita no local. Comparando a fiabilidade observada com um valor de referência, os resultados podem então ser mapeados numa escala dividida numa série de classificações. Assim sendo, a condição do elemento estrutural pode ser simplesmente representada sob a forma de uma classificação característica. Por conveniência, a classificação é normalmente convertida num índice de condição estrutural, SHI, (SHI, "Structural Health Index") como guia para a gestão das operações de manutenção. Veja-se o seguinte exemplo, se a classificação da condição do elemento estrutural for feita sob a forma de quatro classificações, então, a equação 1 representa um cálculo típico deste indicador "SHI" [39]:

$$SHI = 1,0 * G_d + 0,75 * G_c + 0,50 * G_b + 0,25 * G_a \quad (1)$$

Onde G_d , G_c , G_b e G_a são as percentagens das condições de conservação do elemento estrutural desde G_d ("Muito bom") até G_a ("Muito mau"), respetivamente. Aqui, os valores dos coeficientes multiplicados pelas classificações são escolhidos arbitrariamente. Podem ser alterados consoante as experiências pessoais ou consoante o grau de importância [42].

As ações de manutenção podem ser agendadas face aos resultados obtidos no SHI, uma vez que este nos indica o estado de conservação estrutural do elemento. Quando o valor do SHI reduzir para um valor inferior ao exigido, ações de manutenção devem ser requeridas. Após feita a manutenção, um novo ciclo de degradação terá início. A Figura 16 ilustra como se pode

fazer o agendamento das ações de manutenção dos elementos estruturais com base na avaliação SHI [39].

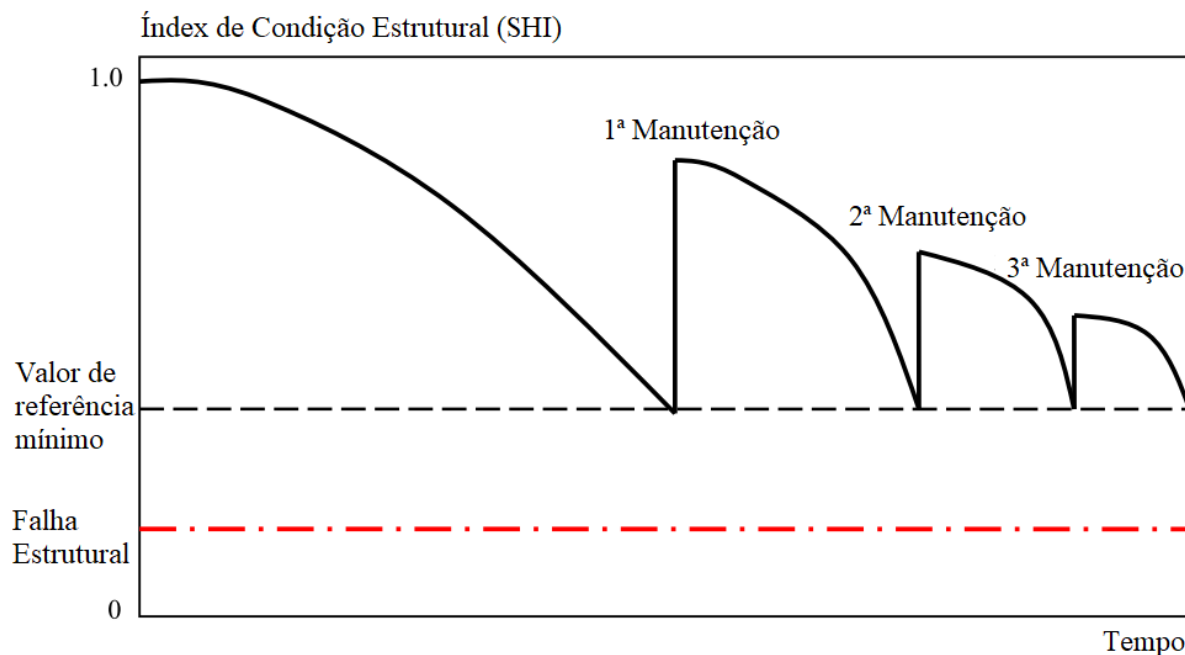


Figura 16. Ações de manutenção baseadas no índice de condição estrutural, SHI, adaptado de [39].

Apesar de muito útil ao alertar para a necessidade de uma ação de manutenção imediata, o índice de condição estrutural, SHI, por si só não é suficiente para estabelecer uma gestão da manutenção. Trata-se de um sistema demasiado simples, onde não é possível prever o processo de degradação do elemento, consequentemente, é também impossível de prever a performance futura da estrutura. O melhor método para fazer uma previsão da performance futura de uma estrutura em degradação é através de um estudo de simulação. Os modelos que empregam as cadeias de Markov já demonstraram ser uma abordagem eficaz, e vastamente aplicada, em diversas simulações para estudos afetos à degradação de estruturas [39].

3.3.1. Cadeias de Markov

Uma cadeia de Markov é um sistema matemático que experiencia transições de um estado para outro consoante certas regras probabilísticas, ver exemplo esquemático na Figura 17. A principal característica que define as cadeias de Markov é que, independentemente de como o processo estocástico chegou ao estado presente, os possíveis estados futuros são fixos [43]. Entendam-se processos estocásticos como o processo onde certas variáveis alteram o seu

valor "aleatoriamente" ao longo do tempo. Estes processos podem ser divididos em dois tipos distintos: temporalmente-discretos e processos estocásticos contínuos [44]. Por outras palavras, e muito simplificada, numa cadeia de Markov, a probabilidade de um estado transitar para outro depende apenas do estado atual e do intervalo de tempo. Muitas aplicações de cadeias de Markov exigem a utilização de métodos matriciais correntes para a sua resolução [43].

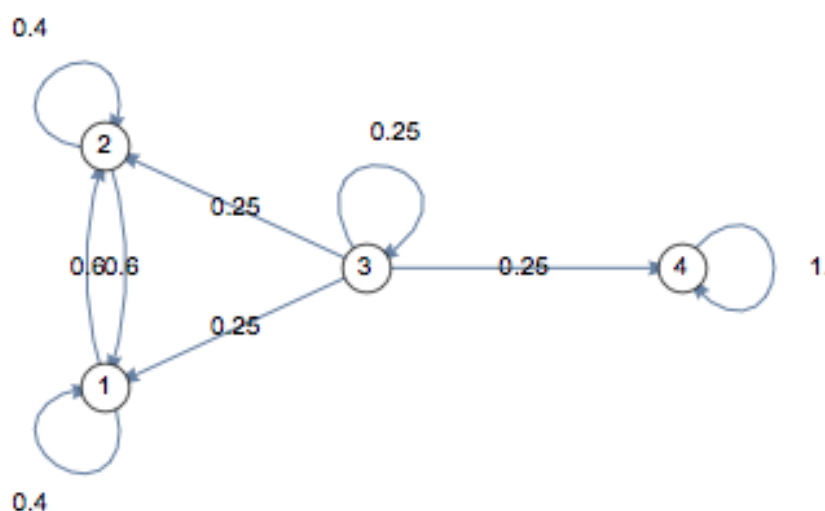


Figura 17. Exemplo de uma cadeia de Markov com quatro estados, [43].

3.3.2. Criação de modelos preditivos de degradação para gestão das I.P. através de modelos estocásticos de Markov

Num modelo de Markov aplicado à degradação estrutural, o processo de degradação estrutural é considerado como uma série de estados estruturais ("structural states") que se alteram ao longo de intervalos de tempo discretos. A transição de um estado estrutural para outro é tratada pelo modelo como uma "incerteza", que é caracterizada por uma probabilidade. Essas probabilidades de transição de estados são reunidas numa matriz única, à qual chamamos de matriz de probabilidade de transição $[P]$. Com base nesta matriz de probabilidade de transição, a condição estrutural $\{S_t\}$, no instante " t ", pode ser desenvolvida para o instante " $t-1$ " da seguinte forma [39]:

$$\{S_t\} = [P]\{S_{t-1}\} \quad (2)$$

Onde S_{t-1} e S_t representam o vetor da condição estrutural no instante $t-1$ e t , os quais podem ser descritos por um vetor que inclui todas as classificações do estado de conservação estrutural. Veja-se o exemplo, se a estrutura for avaliada consoante quatro notas distintas, como apresentado na Eq.(1), o vetor de condição estrutural assume a seguinte forma [39]:

$$\{S_t\} = \{G_d, G_c, G_b, G_a\}^T \quad (3)$$

É corrente fazerem-se inspeções nas infraestruturas portuárias entre um e cinco anos. Será expectável que dentro deste curto espaço de tempo a estrutura não apresente elevada degradação entre duas inspeções consecutivas. Por esta razão, o modelo de degradação baseado nas cadeias de Markov não considera a hipótese da estrutura descer duas, ou mais, classificações de degradação entre duas inspeções consecutivas. Sob esta premissa, a matriz de probabilidade de transição fica com todos os seus elementos com valor zero, excetuando os elementos da diagonal e os elementos abaixo dela. De seguida apresenta-se um exemplo típico de uma matriz de transição [39]:

$$\begin{matrix} \{S_t\} & & [P] & & \{S_{t-1}\} \\ \begin{bmatrix} G_d(t) \\ G_c(t) \\ G_b(t) \\ G_a(t) \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1 - P_{dc} & 0 & 0 & 0 \\ P_{dc} & 1 - P_{cb} & 0 & 0 \\ 0 & P_{cb} & 1 - P_{ba} & 0 \\ 0 & 0 & P_{ba} & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_d(t-1) \\ G_c(t-1) \\ G_b(t-1) \\ G_a(t-1) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

Onde P_{dc} , P_{cb} e P_{ba} indicam a probabilidade de transição de um estado de condição estrutural para o seguinte $G_d \rightarrow G_c$, $G_c \rightarrow G_b$ e $G_b \rightarrow G_a$, respetivamente, de relembrar que o estado de conservação da estrutura se degrada constantemente e é impossível de melhorar visto estarmos apenas a ter em análise a degradação natural da estrutura sem ações de manutenção. Desta forma, a Eq.(4) pode ser usada para estimar a performance do ciclo de vida da infraestrutura portuária. Por exemplo, a condição inicial de conservação de uma estrutura nova pode ser escrita como $\{S_0\} = [1, 0, 0, 0]^T$. Então, a condição de conservação da infraestrutura após um intervalo de tempo de operação, t , pode ser prevista segundo [39]:

$$\{S_t\} = [P]^t \{S_0\} \quad (5)$$

Uma vez estimada a condição de conservação atual $\{S_t\}$, a gestão das operações de manutenção pode ser conduzida com base na comparação do $\{S_t\}$ com um valor de referência, valor do estado de conservação mínimo aceitável para a estrutura. Na prática, as probabilidades de transição entre estados são desconhecidas. Desta forma, a matriz de probabilidade de transição tem de ser determinada com base num cálculo inverso, "reconstitutivo", baseado nos registos de inspeção acumulados ao longo dos anos. Assumindo que existe uma base de dados com um número considerável de registos de inspeções, representado sob a forma $\{S_t\}_{Inspeccionado} = [G_d^t, G_c^t, G_b^t, G_a^t]^T$, de uma infraestrutura existente em instantes discretos $t = 1, \dots, i$, a matriz de probabilidade de transição pode então ser estimada comparando-a com o vetor da condição estrutural teórico, $\{S_t\}_{Previsto}$. Esta operação pode ser feita através dos mínimos da seguinte equação [39]:

$$\begin{aligned} \theta &= \underset{t=1, \dots, i}{\operatorname{argmin}} \sum [\{S_t\}_{Inspeccionado} - \{S_t\}_{Previsto}]^2 \\ &= \sum_{t=1, \dots, i} \sum_{j=a, b, c, d} [G_{j, Inspeccionado}^t - G_{j, Previsto}^t]^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Sendo,

$$\theta = \{P_{dc}, P_{cb}, P_{ba}\} \quad (7)$$

Onde $\theta = \{P_{dc}, P_{cb}, P_{ba}\}$ representa o conjunto de probabilidades de transição entre estados que têm de ser determinadas para montar a matriz. Uma vez estabelecida a matriz de probabilidade de transição, a condição de conservação da estrutura pode ser determinada, em qualquer instante, com base no estado de conservação inicial, através de [39]:

$$\{S_t\}_{Previsto} = [P]^t \{S_0\} \quad (8)$$

É de extrema importância apontar que, no processo de minimização da Eq. (6), todas as probabilidades de transição na cadeia de Markov foram consideradas como determinísticas. No entanto, a degradação estrutural de uma infraestrutura portuária nunca é homogênea. Por outras palavras, o ritmo de degradação estrutural varia no tempo e pode alterar-se significativamente ao longo do ciclo de vida da infraestrutura. As probabilidades de transição determinadas na Eq.(6) representam apenas um valor médio obtido pelos registos históricos

das inspeções. Quando pretendemos prever o estado de conservação futuro de uma infraestrutura portuária, as incertezas associadas à não homogeneidade do processo de deterioração têm de ser consideradas. Para introduzir este critério, o presente modelo baseado nas cadeias de Markov incorpora um novo conjunto de variáveis no processo de transição entre estados, às quais chamamos de variáveis de incerteza. Desta forma, além de termos uma matriz de probabilidades limitada apenas aos valores médios, históricos, tem também uma componente de incerteza introduzida por estas novas variáveis. Ou seja, todas as probabilidades de transição de estado são agora modeladas como variáveis de incerteza. Adicionamos desta forma a realidade estocástica aquilo que era a matriz de probabilidade de transição, tendo agora uma matriz coerente com a natureza probabilista do fenómeno em estudo. Fruto destas alterações, a matriz de probabilidade de transição foi refinada para uma matriz de incerteza que se expressa da seguinte forma [39]:

$$\begin{matrix} \{S_t\} & & [P] & & \{S_{t-1}\} \\ \begin{bmatrix} G_d(t) \\ G_c(t) \\ G_b(t) \\ G_a(t) \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1 - P_{dc} - \varepsilon_{dc} & 0 & 0 & 0 \\ P_{dc} + \varepsilon_{dc} & 1 - P_{cb} - \varepsilon_{cb} & 0 & 0 \\ 0 & P_{cb} + \varepsilon_{cb} & 1 - P_{ba} - \varepsilon_{ba} & 0 \\ 0 & 0 & P_{ba} + \varepsilon_{ba} & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_d(t-1) \\ G_c(t-1) \\ G_b(t-1) \\ G_a(t-1) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

Onde ε_{dc} , ε_{cb} e ε_{ba} são os termos de incerteza associados às probabilidades de transição. Normalmente, estes termos estocásticos têm de ser determinados em função de registos de inspeção. Estudos levados a cabo por Zhang *et al.* (2016), [42], demonstraram que as probabilidades de transição variam segundo um coeficiente de variação que ronda os 10-20%. Assim, os passos para desenvolver um modelo baseado nas cadeias de Markov, com probabilidades de transição incertas, são os seguintes: i) para cada registo de inspeção, a matriz de probabilidade de transição é estimada com base na Eq.(6) de forma convencional, determinística; ii) análises probabilísticas são realizadas para estimar as probabilidades de transição entre estados e são identificados os modelos estatísticos mais apropriados; e iii) com o desenvolvimento das probabilidades de transição com incertezas, podem ser realizadas, por exemplo, simulações de Monte Carlo para simular vários processos de deterioração baseados em cadeias de Markov para a infraestrutura inspecionada. A performance da infraestrutura portuária pode então ser prevista com base nos resultados destas simulações[39].

Na Figura 18 apresenta-se um mapa conceptual que sumariza a aplicação de modelos preditivos estocásticos, baseados em cadeias de Markov, em quatro trabalhos distintos:

- Na previsão do comportamento/deterioração futuro/a de pontes em betão, com criação de curvas de degradação, por Moscoso *et al.* (2021) [45];
- Num estudo sobre a corrosão de paredões/cais de estacas prancha em aço, por Boéro *et al.* (2012) [46];
- No desenvolvimento de um modelo preditivo de degradação para um cais aberto na baía de Tóquio, baseado em cadeias de Markov, que dê conhecimento dos momentos em que ações de manutenção devam ser realizadas de forma otimizada, por Zhang *et al.* (2017) [39];
- Na criação de um "Analytical Hierarchy Process (AHP)" estocástico para caracterização de Portos Fluviais e identificação dos fatores que mais contribuem para a performance desses portos, assim como para a sua utilização em geral. Um trabalho desenvolvido por Nur *et al.* (2018) [47].

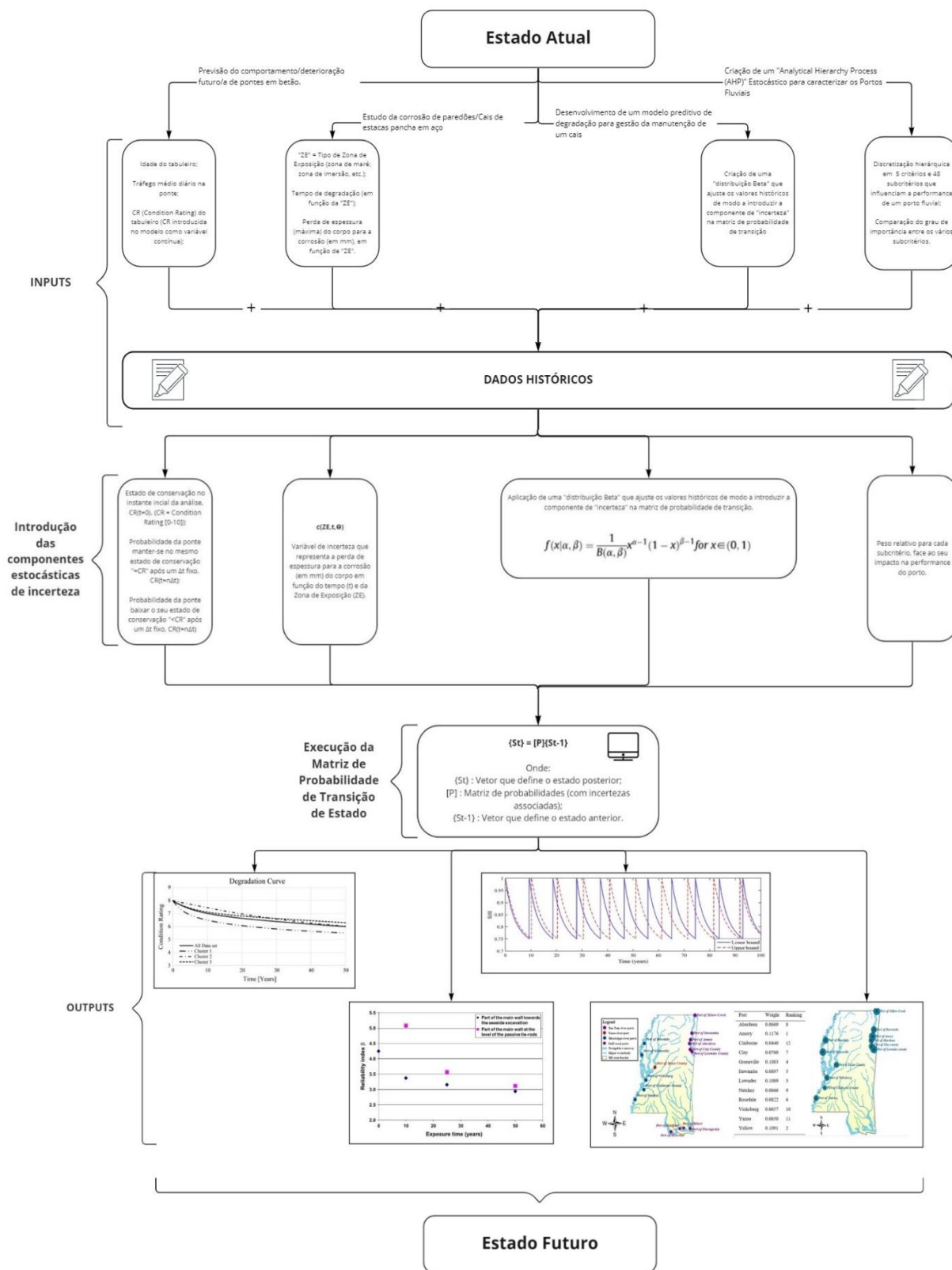


Figura 18. Mapa resumo do estado da arte da literatura de modelos de degradação, baseados em cadeias de Markov.

4. Implementação de ferramentas BIM e SIG na gestão da degradação em Infraestruturas Portuárias

Num estudo levado a cabo por Jofré-briceño *et al.* [48], no ano de 2021, sobre a introdução de tecnologias inovadoras no âmbito da gestão dos ativos das infraestruturas portuárias, os autores constaram que, atualmente, as ações de manutenção deste tipo de infraestruturas encontram-se amplamente comprometidas em inúmeros aspetos: as dificuldades de acesso, especialmente nas zonas submersas; a falta de documentação sobre os ativos, uma vez que muitos destes são antigos e já não existe acesso às memórias descritivas dos seus projetos; e os materiais que compõem estas infraestruturas, maioritariamente betão armado, que reagem quimicamente com o ambiente marítimo, gerando anomalias que evoluem progressivamente para danos que as degradam, podendo mesmo vir a inviabilizar as estruturas.

Numa tentativa de mitigar os impactos dos fenómenos naturais de degradação, os métodos tradicionais de manutenção das infraestruturas portuárias sempre seguiram, na sua generalidade, uma abordagem de manutenção corretiva. Por via da identificação clara de uma deterioração localizada sobre a qual deveria ser ordenada uma ação de manutenção ou reparação. Este tipo de procedimento, amplamente adotado pelo setor, era, no entanto, muitas vezes ineficiente devido a práticas de gestão de informação pobres [48].

Atualmente, as novas metodologias da era digital que têm vindo a ser implementadas no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) têm encorajado a adoção de um novo paradigma onde é feita uma gestão preventiva da manutenção das infraestruturas, ao invés de uma manutenção corretiva. Entre as novas tendências no campo da gestão, a gestão de ativos apresenta-se como uma disciplina que procura estabelecer o funcionamento ótimo dos edificios e/ou das infraestruturas através da integração das pessoas, espaços, processos e tecnologias, o que se traduz num serviço otimizado para gestão operacional, gestão da manutenção, entre outras [48].

Uma das "revoluções digitais" mais importantes no setor da construção, no âmbito das tecnologias da informação, foi dada ao longo da última década com a implementação da

metodologia BIM (Building Information Modelling). Muito sucintamente, o uso do BIM permite a visualização do projeto enquanto integra simultaneamente todos os agentes e ativos com vista à utilização, e gestão, otimizadas das instalações durante todo o seu ciclo de vida. A utilização de modelos paramétricos 3D permitem a identificação da tipologia de cada elemento que constitui a infraestrutura, enquanto garantem total controlo sobre as mesmas nas mais variadas vertentes da sua gestão. Desde a informação relativa aos materiais empregues na obra, plano de custos, tempo, assim como, sobre considerações ambientais, tais valências permitem aos utilizadores desta metodologia um maior controlo e eficiência na fase de projeto, construção, e operação dos ativos.

4.1. Métodos tradicionais de manutenção nas Infraestruturas Portuárias

Jofré-briceño *et al.* [48] desenvolveram uma análise preliminar afeta às práticas de manutenção que mais comumente têm vindo a ser adotadas nas infraestruturas portuárias. Desta análise, os autores concluíram que, tradicionalmente, por forma a elaborar uma estratégia de manutenção para uma infraestrutura portuária, existem quatro fases que devem ser desenvolvidas: (I) Análise da documentação existente; (II) Inventário, (III) Avaliação global, (IV) Registo de ações. A primeira fase, fase (I), consiste na análise de toda a informação existente (planos, registos fotográficos, histórico de reparações, entre outros). Na fase (II), através de uma inspeção visual, todos os elementos são identificados, sendo registadas todas as características geométricas e técnicas de cada elemento. Na fase (III), é obtida a informação relativa ao estado dos ativos da infraestrutura portuária, sendo registadas as anomalias de cada um desses ativos por via a definir posteriormente as técnicas de reparação a empregar, assim como a urgência da intervenção. Por fim, na fase (IV), são executadas as ações de reparação e atualizados os registos do estado dos ativos [48].

Estes métodos tradicionais baseiam-se na recolha de documentação e informação dos ativos no terreno, no entanto, as avultadas dimensões das infraestruturas portuárias tornam este processo muito demorado. A informação recolhida é registada em cadastros ou fichas de inventário, o que inclui, geralmente, referências gráficas ou indicações associadas a plantas existentes que referenciem a localização dos elementos por forma a facilitar o encontro do dano. Frequentemente, estas informações encontram-se digitalizadas, o que facilita o acesso à documentação existente, porém, é também comum a indução de erros durante o processo

de digitalização. Este atraso é responsável pela ineficiência dos métodos tradicionais baseados em registos físicos e digitais que estão meramente organizados por uma ordem definida, estando a perder todo o potencial das novas tecnologias e metodologias que fariam toda a gestão e visualização da informação e documentação recolhida. Adicionalmente à inspeção visual, ensaios *in situ* ou em laboratório são feitos frequentemente por forma a melhor definir o estado dos elementos da infraestrutura. Com base nos resultados destes ensaios, é possível evitar erros que seriam cometidos caso apenas tivesse sido levado a cabo uma inspeção visual, uma vez que, por exemplo, patologias como a corrosão das armaduras de elementos em betão armado não são visíveis [48].

Realizar inspeções, ensaios e recolher informação no geral de modo a desenvolver estratégias de conservação torna-se especialmente complexo em infraestruturas marítimas. Esporadicamente, são necessárias inspeções subaquáticas, como a que se pode observar na Figura 19, que apenas podem ser realizadas por mergulhadores profissionais munidos de ferramentas e equipamentos especializados para medirem danos e anomalias nos elementos imersos [48].



Figura 19. Medição realizada por mergulhador em inspeção subaquática [71].

Adicionalmente, se as infraestruturas estiverem classificadas como património protegido, existe ainda um aumento das restrições e cuidados a ter sobre os elementos estruturais, o que somado à escassa documentação existente, geralmente obsoleta, dificulta a criação de

um plano de manutenções baseado em critérios tradicionais. Fruto destas condicionantes, muitas vezes os danos não são detetados a tempo. Para além dos problemas relacionados com a natureza da infraestrutura portuária, somam-se ainda limitações aos recursos económicos, humanos, e ao uso de tecnologias que dificultam o estabelecimento de uma gestão de conservação eficiente [48].

4.2. Novas tecnologias no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC)

Segundo Jofré-briceño *et al.* (2021) [48], as novas metodologias e tecnologias que têm vindo a ser incorporadas no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) tornaram possível a otimização dos ritmos de trabalho através de ferramentas interoperáveis que enaltecem a colaboração e a integração de informação, representando por isso uma evolução dos métodos tradicionais.

A metodologia BIM permite a integração e colaboração entre as partes-interessadas num projeto através de modelos paramétricos, a vários níveis de detalhe distintos, que podem ser usados durante todo o seu ciclo de vida. Para além da visualização tri-dimensional, associada a uma base de dados com toda a informação do modelo, a metodologia BIM facilita uma constante atualização do modelo, quer dos parâmetros atribuídos, quer dos planos das diferentes especialidades, sem qualquer perda de informação. Desta forma, uma vez concluído o modelo, é sempre possível modificar os seus parâmetros assim como adicionar, ou remover, elementos com vista a ter um modelo completamente atualizado e fiável ao qual possam aceder todos agentes envolvidos no projeto. Este novo paradigma de trabalho trazido pelo BIM torna obsoletos os sistemas tradicionais, onde os projetos eram realizados, desde a fase de conceção até à sua entrada em utilização, com recurso a registos e cadastros manuais, documentação fragmentada de cada elemento da infraestrutura, e por especialidade, e do levantamento, organização e planeamento manuais das atualizações da informação assim como da gestão das ações de manutenção [48].

A par com as novas metodologias, a gestão de ativos permite a manutenção do correto funcionamento dos edifícios ou infraestruturas. A Associação Internacional da Gestão de Ativos (*International Association of Facility Management*) define "gestão de ativos" como a disciplina que engloba várias áreas por forma a garantir e gerir a operação de edifícios e/ou

infraestruturas assim como os seus serviços associados, através da integração das pessoas, espaços, processos e tecnologias específicas dos respetivos edifícios e/ou infraestruturas [49]. Neste sentido, a gestão correta e fiável da informação facilita a tomada de decisões na fase de operação e manutenção do ativo, por outro lado, os métodos tradicionais de gestão de ativos são realizados com base em informação fragmentada ou dispersa, o que exige mais tempo gasto na sua coleta, fruto da falta de integração da informação. Confrontado com as ineficiências dos métodos tradicionais, o setor tem sentido um grande aumento de popularidade na integração do BIM na gestão de ativos. Atualmente, tem sido usado na manutenção de ativos prediais ou de grandes infraestruturas, facilitando o acesso à informação, que se encontra presente na base de dados do modelo BIM, o que aumenta os níveis de eficiência e produtividade do setor através da otimização das trocas de informação através de formatos interoperáveis já existentes no mercado, o que por sua vez otimiza e reduz significativamente os custos de operação e manutenção do ativo [48].

4.2.1. O BIM como ferramenta de gestão da manutenção em infraestruturas portuárias

Em média, todos os anos, cerca de 11% dos custos de operação das infraestruturas portuárias estão alocados à manutenção das suas instalações. Quando olhamos ao custo do ciclo de vida, as ações de manutenção representam cerca de 25% do investimento inicial. Outros estudos afirmam ainda que a contribuição da manutenção ronda os 60%. Facilmente concluímos que a manutenção é uma área tão vital ao porto, quer ponto de vista funcional, assim como preponderante em relação ao impacto económico que tem sobre o mesmo. É por isso fundamental que a sua gestão seja eficiente, conciliando uma excelente capacidade de resposta física, garantindo o permanente funcionamento da infraestrutura, quer económica, adotando estratégias e soluções racionais que procurem sempre atenuar o impacto financeiro que esta atividade tem sobre o porto [50]–[53].

A metodologia BIM permite a redução de custos, uma construção mais eficiente, assim como a possibilidade de todos os agentes envolvidos no projeto executarem os seus trabalhos de uma forma perfeitamente integrada e cooperativa. Muito para além das extensivas vantagens que esta metodologia de trabalho traz para os projetos na sua fase de construção, contribuiu igualmente de forma muito vantajosa para a gestão, nomeadamente da manutenção, durante todo o ciclo de vida do ativo, no entanto, para usufruir ao máximo das capacidades que este método traz, é necessário implementar o BIM tendo em consideração,

desde o início, todas as fases do ciclo de vida do ativo: fase de projeto, construção e operação [53].

Num estudo conduzido por Valdepeñas *et al.* [53] (2020), justamente sobre a aplicação da metodologia BIM na gestão da manutenção das infraestruturas portuárias, numa revisão extensiva da literatura existente no tópico, concluíram que o uso da metodologia BIM se tem cingido à gestão da manutenção e conservação no setor da construção na manutenção de instalações. Aquando, dentro do setor das infraestruturas, essa prática encontra-se ainda muito subdesenvolvida, especialmente nas portuárias. Apesar da pouca literatura existente no âmbito da gestão da operação portuária baseada em BIM, todos os autores aparentam apontar as mesmas questões chave, sendo elas, a falta de documentação relativa às infraestruturas existentes, a grande conectividade inerente aos portos, assim como os efeitos que a operação contínua tem sobre os mesmos [53].

A adoção da metodologia BIM na manutenção das infraestruturas portuárias traz uma extensa gama de vantagens, uma das quais sendo o total controlo sobre toda a informação que é produzida, de forma ordeira. Existem já países, como por exemplo o Reino Unido, onde a utilização do BIM é obrigatória nos projetos públicos de AEC. Adicionalmente, é de extrema importância referir que no âmbito das empresas de projeto, nomeadamente as que procuram abranger um leque de clientes mais alargado, é fulcral que se mantenham atualizadas e a par dos movimentos externos precisamente no sentido de não perderem competitividade internacional, nomeadamente em países onde esta obrigatoriedade é já uma realidade [53], [54]. Pois existem inúmeras vantagens na aplicação prática em portos, já comprovadas como no caso do porto de Coruña, que se podem extrapolar para qualquer infraestrutura portuária análoga que adote a metodologia BIM como ferramenta de gestão da manutenção e degradação [53]:

- Representação tridimensional da infraestrutura num ambiente de dados integrado;
- Armazenamento do histórico de inspeções e reparações executadas na infraestrutura;
- Trabalho mais rápido e mais eficiente graças à parametrização de todos os elementos do modelo, permitindo a atualização automática de toda a informação contida nele sempre que é feita uma alteração;

- Promoção do trabalho cooperativo, através da facilitação das trocas de informação através das diferentes partes interessadas do projeto, em todas as suas fases;
- A grande facilidade de localizar os elementos e ativos da infraestrutura, o que permite um maior controlo e, consequentemente, melhor gestão;
- A conexão e trocas de informação entre o BIM e as ferramentas CMMS permitem um melhor planeamento das ações de manutenção a serem executadas, tornando ainda possível a visualização das alterações no modelo BIM tridimensional, assim como consultar toda a informação necessária de forma intuitiva e simples.

Apesar dos inúmeros benefícios apontados, existem ainda vários aspetos que estão a atrasar uma adoção mais generalizada e assertiva desta nova metodologia de gestão da manutenção das infraestruturas portuárias. Desses aspetos, destacam-se os seguintes [53]:

- Necessidade da criação de mais famílias paramétricas que permitam uma modelação mais fácil e fiel das infraestruturas portuárias;
- Criação de novas famílias que permitam uma modelação mais ajustada à realidade das patologias mais representativas deste tipo de infraestrutura;
- Resistência à mudança das partes interessadas;
- Falta de um método normalizado e estabelecido para estes trabalhos para a maior parte das infraestruturas civis;
- Elevados custos de implementação deste método;
- Necessidade de treino em software;
- Problemas de interoperabilidade entre softwares.

Assim, a implementação do BIM como ferramenta de gestão da manutenção em infraestruturas portuárias é um campo ainda muito recente e que manifesta atualizações e avanços diários, pelo que existe uma necessidade de fazer uma constante revisão do seu estado da arte. No Quadro 5 sumarizam-se as vantagens e desvantagens da utilização da metodologia BIM na gestão de ativos, nomeadamente na área da manutenção, face aos métodos tradicionais [53].

Quadro 5. Vantagens e desvantagens da utilização da metodologia BIM em comparação com os métodos tradicionais [53].

Vantagens	Desvantagens
Trabalho colaborativo.	Método novo: resistência à mudança.
Informação em todas as fases: projeto, construção e operação.	Ausência de um método normalizado para a maioria das infraestruturas civis.
Qualquer alteração num documento é diretamente implementada em todos os documentos do projeto.	Custo de implementação elevado e necessidade de treino em software.
Deteção fácil de erros.	Problemas na interoperabilidade entre softwares.

4.3. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

No livro "Application of GIS technologies in port facilities and operations management" de N. Wright e J. Yoon [55], os autores defendem que a chave para uma engenharia portuária de sucesso está na integração da informação vital da infraestrutura num Sistema de Informação Geográfica (SIG) robusto e funcional.

A aplicação de um SIG integrado numa infraestrutura portuária oferece aos gestores de ativos a oportunidade de catalogar informações dispersas, em contexto espacial, com recurso a normalizações estabelecidas e convenções de dados. A informação catalogada pode então ser gerida de acordo com parâmetros definidos pelos utilizadores de forma a melhorar a integração da informação assim como garantir um melhor produto de apoio à decisão. A informação deixa então de estar fragmentada ou isolada, e os diversos tipos de informação começam a fornecer correlações críticas e práticas dando apoio aos processos de toma de decisão, com efeitos a curto e longo prazo [55].

Muitas das decisões estão altamente dependentes dos seus contextos espaciais, pelo que é necessário acesso a tais informações relativas a locais específicos na superfície da Terra, e muitas vezes, abaixo da superfície também. Desta forma, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) acaba por ser um depósito de informação espacial que permite aos seus

utilizadores saber o quê, como, porquê e quando se dá determinado fenómeno numa localização específica [55].

Existem várias definições para os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), definições essas que foram evoluindo ao longo dos anos, de acordo com as necessidades. A definição dos SIG dependia, muitas vezes, da informação geoespacial aplicada. Entre elas, a mais frequente definição usada para os SIG era baseada na simples descrição dos seus componentes: (1) Mapa (=espacial), (2) Dados (=atribuíveis), (3) Software e Hardware (=georreferenciação), e (4) Utilizadores competentes (=resolução de problemas). Os SIG podem ainda ser considerados como modelos para integração e visualização de comportamentos em ambientes naturais ou influenciados pelo Homem. Por exemplo, um SIG pode ser usado para analisar e modelar muitos comportamentos dentro de uma infraestrutura portuárias, desde o fluxo de tráfego dos navios dentro de um canal de navegação, à acumulação de águas pluviais sobre superfícies impermeáveis, até à movimentação de contentores de carga a serem descarregados do navio para um pátio ferroviário próximo [55].

4.3.1. *Vantagens da aplicação dos SIG*

Ainda no seu livro, N. Wright e J. Yoon [55], defendem os benefícios claros trazidos pela implementação dos SIG, destacam a forma como estes permitem a visualização e manipulação de informação complexa num formato que é facilmente partilhável entre utilizadores. Relatam ainda que informação espacial estática como mapas, fotos aéreas, imagens de satélite são muito valiosas, no entanto, no contexto atual existem já maiores exigências e necessidades tais como informação não espacial multi-categoria, multicamada e dinâmica, associada indiretamente com a informação espacial. No entanto, essas informações são altamente heterogêneas na sua natureza, difíceis de obter, organizar e manter. Deve ainda ser mencionado que nenhuma dessas categorias de informação é de grande valor quando isolada, o seu enorme potencial surge quando toda a informação é integrada e relacionada. Uma plataforma SIG permite expressar os mais diversos contextos de um mapa ou imagem associando a estas informação não-espacial, esta justaposição de informação estática e dinâmica abre um enorme leque de possibilidades de comunicação, acessos, análises, modelação e processos de toma de decisão mais precisos. Os benefícios mais comuns obtidos com a implementação dos SIG são [55]:

- Correlações claras que de outra forma não estariam disponíveis durante os processos de toma de decisão;
- Maior precisão na informação;
- Menor duplicação da informação;
- Mais fácil armazenamento de mapas;
- Melhor coordenação multidisciplinar;
- Bases de dados mais flexíveis;
- Maior partilha de dados entre utilizadores;
- Maior Pontualidade;
- Maior eficiência;
- Maior complexidade do produto final.

Com foco na gestão de infraestruturas, podemos apontar os seguintes benefícios à implementação SIG [55]:

- Melhor gestão de ativos;
- Melhor comunicação de incidentes;
- Menor apropriação indevida de recursos (a curto e longo prazo);
- Melhor resposta a emergências;
- Maior segurança e preparação para eventuais desastres;
- Redução dos custos e tempos de construção graças aos projetos mais precisos que levam à sua não alteração durante a fase de construção;
- Capacidade de realizar análises que sem os SIG seriam impossíveis ou demasiado caras para serem executadas;
- Permitem uma gestão da manutenção mais eficiente, minimizando os tempos fora de serviço das infraestruturas críticas, maximizando a rentabilidade;
- Providenciam as fundações para a criação do Plano de Gestão Ambiental, essencial para garantir o total cumprimento de todas as normas ambientais na infraestrutura;
- Podem ainda ser usados como fontes de informação fulcral para os responsáveis do marketing de forma a terem uma visão muito mais informada sobre os clientes e poderem assim ajustar as suas estratégias e abordagens em função desses conhecimentos.

4.3.2. Implementação de plataformas SIG em Infraestruturas Portuárias

Inúmeros são os portos que implementaram plataformas SIG para a gestão das suas instalações e mais relevantes equipamentos. A complexidade destas plataformas varia largamente, assim como varia o objetivo inicial que levou à sua implementação e subsequente desenvolvimento [55]. Baseados numa análise a um amplo conjunto de implementações de plataformas SIG em infraestruturas portuárias, N. Wright e J. Yoon [55], detetaram um padrão que alegam estabelecer os princípios básicos para uma implementação SIG de sucesso sob qualquer contexto, são eles:

1. Conceptualização/justificação do problema e design do projeto:
 - a. Quatro elementos-chave: Porquê, O quê, Como e Quem?
2. Encontrar metodologia/SIG/Plataforma;
3. Avaliar necessidades de Informação/Dados:
 - a. Realizar entrevistas;
 - b. Analisar documentação;
 - c. Determinar os limites da área de estudo/projeto;
 - d. Analisar as necessidades de informação.
4. Coleta e avaliação da informação existente:
 - a. Seleção da melhor informação;
 - b. Agrupamento/Catálogo da informação existente;
 - c. Levantamentos de campo/Coleta de imagem;
 - d. Criação de um mapa base;
 - e. Garantia de Qualidade/Controlo de Qualidade.
5. Arquitetura do esquema da base de dados:
 - a. Classificação de dados/"Dicionário" de dados (DD);
 - b. Seleção da escala e resolução;
 - c. Estipulação da frequência das atualizações.
6. Integração de Dados/Mapas:
 - a. Geocódigos;
 - b. Georreferenciação.
7. Desenvolvimento das Aplicações/Frameworks;
8. Atualização/Edição da base de dados espacial (automação e iteração).

5. Caso de Estudo

O presente trabalho surge em resposta à ocorrência de um evento crítico na Doca 4 do Porto de Leixões, Figura 20, infraestrutura portuária esta já brevemente introduzida no subcapítulo 2.5.3. Uma das principais solicitações às quais a estrutura da doca está sujeita corresponde à ação das embarcações, quer na acostagem, quer quando presas aos maciços de amarração, por ação das oscilações resultantes das marés ou do vento. Quanto maior a massa das embarcações, maiores as forças aplicadas na estrutura.

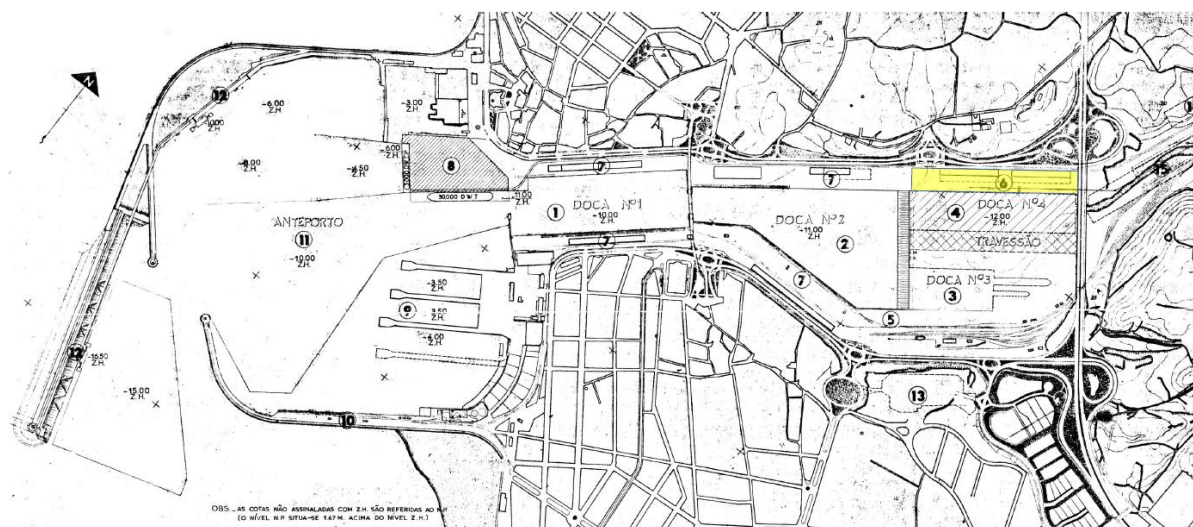


Figura 20. Planta de localização da Doca 4 (desenhos fornecidos pela APDL).

De acordo com a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL), e como seria de esperar numa infraestrutura deste tipo, podem ocorrer, por vezes, cargas muito elevadas, porventura, bastante superiores às cargas para as quais a doca foi dimensionada durante a fase de projeto, Figura 21. Esta discrepância entre os parâmetros de dimensionamento relativos às solicitações das embarcações sobre a doca no início dos anos setenta, aquando do dimensionamento da doca, em contraste com os significativamente mais acentuados valores atuais, levaram à cedência de serviço da Doca 4.

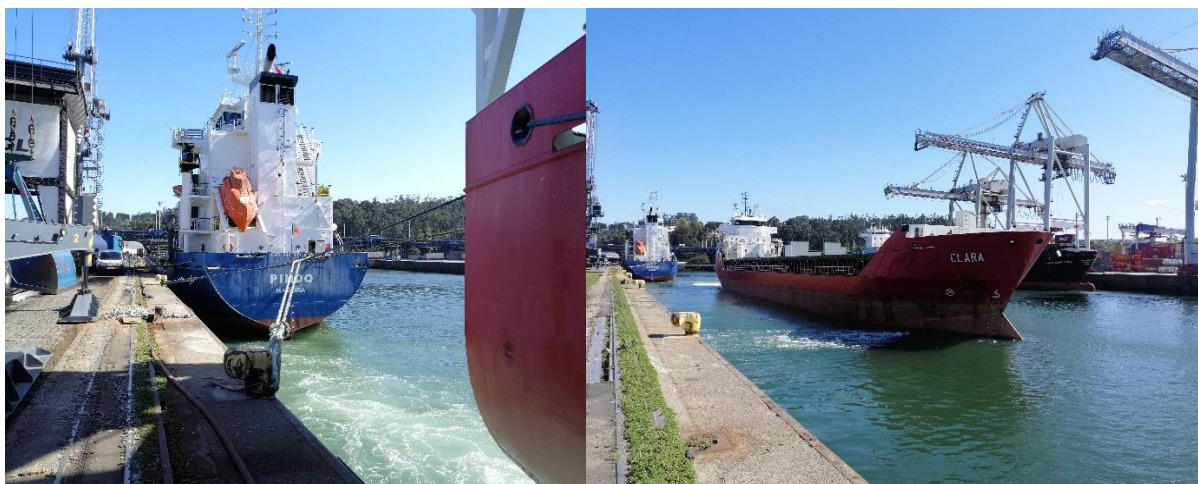


Figura 21. Embarcações típicas amarradas aos cabeços de amarração da Doca 4 (fotografias pessoais).

A cedência de serviço observada na Doca 4 caracterizou-se pela abertura de largas fendas, paralelas à linha do cais, fruto das excessivas ações de tração que as embarcações aplicavam enquanto amarradas através dos cabeços de amarração da doca, Figura 22.

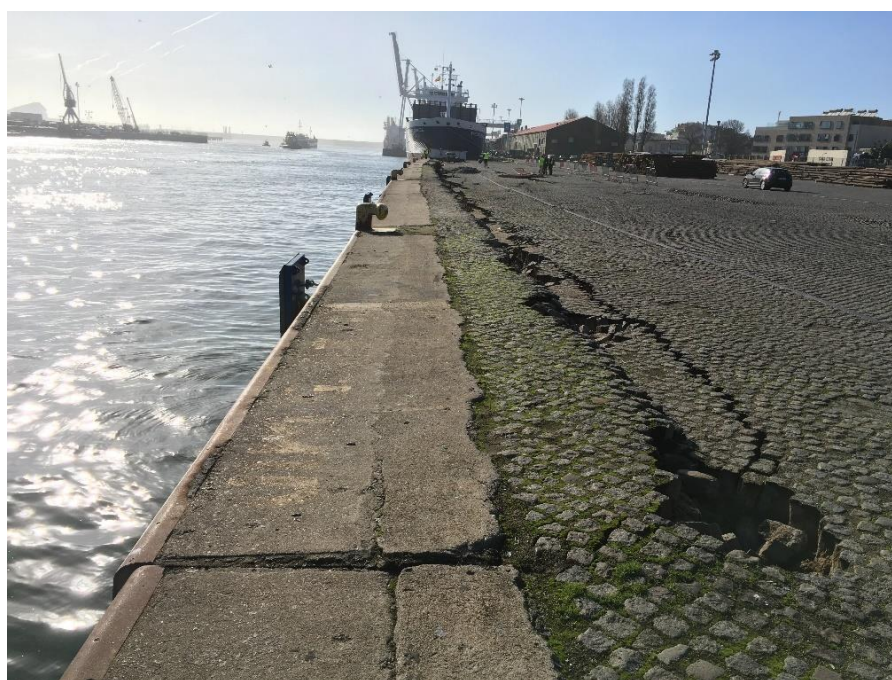


Figura 22. Abertura de fendas na Doca 4 fruto das ações de tração das embarcações amarradas sobre os cabeços de amarração (fotografia oferecida pela APDL).

Enquanto porto comercial de extrema relevância regional e nacional, o Porto de Leixões, cuja operação é ininterrupta de imediato se mobilizou à reparação da doca. No entanto, a ocorrência deste evento crítico inesperado com consequências tão preponderantes ao

funcionamento do porto levantou a questão de como agir de modo a não tornar a repetir tão grave e inesperado evento. Foi assente nesta premissa, em torno da gestão da degradação do porto de forma preventiva e inteligente, que surgiu o projeto GIIP - Gestão Inteligente de Infraestruturas Portuárias, numa parceria entre a empresa 3Maps, a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL), Universidade do Minho e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Aliando a criticidade das infraestruturas portuárias a nível nacional, preponderantes ao comércio externo, com a exposição destas ao ambiente agressivo envolvente, assim como às intempéries marítimas, este contexto conduz a processos de degradação acelerados. Desta forma, verifica-se como essencial um instrumento de gestão que permita alocar os recursos, cada vez mais escassos, à gestão e manutenção preventivas destas infraestruturas com base em modelos preditivos avançados.

Construído no decorrer do século XIX, o Porto de Leixões, como qualquer porto de enorme relevo internacional, enfrenta o desafio de gerir de forma otimizada os seus ativos, combatendo a degradação dos mesmos, para além de promover os seus planos de desenvolvimento. Atualmente, o Porto de Leixões depara-se com algumas fragilidades de gestão das infraestruturas. Apesar da monitorização e diagnóstico desenvolvidos através dos métodos tradicionais, nem sempre se consegue prever e avaliar, com os meios disponíveis, o nível de gravidade ou a urgência com que se deve intervir. Terá sido este contexto que levou à cedência de serviço no presente caso de estudo, Doca 4, com a abertura de fendas ao longo de toda a doca, paralelas à viga-cais, Figura 22. Face à gravidade do ocorrido, e numa ótica de realizar um estudo mais extenso sobre o estado atual e capacidade real da Doca 4, assim como preparar modelos de previsão e gestão que garantam o insight suficiente às partes interessadas e aos agentes decisores para que estes possam prevenir o mesmo de voltar a ocorrer numa outra doca, ou ativo do Porto de Leixões, que a Doca 4 foi eleita como o caso de estudo. Neste enquadramento, associados ao objetivo principal, encontram-se os seguintes objetivos específicos:

- Conceber e desenvolver um novo modelo (mais ajustado à realidade) de previsão da performance de infraestruturas portuárias, que permita:

- Definir níveis de performance, incluindo ou não respetivas consequências (risco);
 - Simular o efeito de medidas de mitigação, de forma a ser assegurado o cumprimento dos níveis de performance no futuro;
 - Gerar tipologias de intervenção em função do estado de condição, dos custos e do nível de serviço.
- Conceber e desenvolver uma plataforma modular de apoio à tomada de decisão, que permita:
 - Recolher e gerir dados provenientes de fontes de dados heterogéneas;
 - Estruturar a informação utilizando uma filosofia BIM (Building Information Modelling);
 - Integrar, de forma modular e transparente, diferentes modelos de performance de ativos portuários;
 - Otimizar os custos e benefícios dos vários cenários de intervenção;
 - Disponibilizar ao utilizador informação útil, de forma simples e intuitiva, sem necessidade de recorrer a ferramentas externas para perceção e orientação.

5.1.1. Constituição da Doca 4

A Doca 4, Figura 23, sobre a qual que são feitas descargas agroalimentares, está localizada no extremo interior do Porto de Leixões, precisamente em frente ao terminal de contentores sul. Estendesse ao longo de cerca de 550 metros, e é constituída por um conjunto estrutural, do qual foi modelado perfil-tipo, Figura 25. Este perfil-tipo representa um módulo que se repete ao longo do cais a cada 4,12 metros. Toda a estrutura da Doca 4 é constituída por betão da classe B225, é discretizada no seguinte conjunto de elementos (Figura 24 e Figura 25):

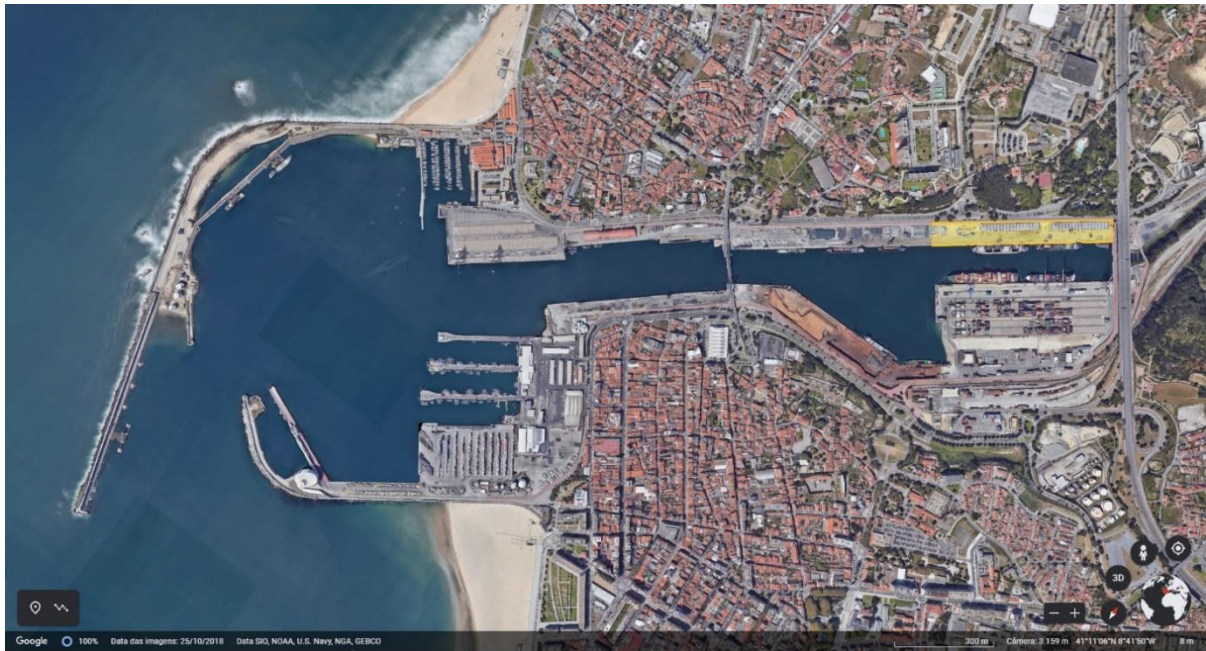


Figura 23. Imagem de satélite do Porto de Leixões, com Doca 4 salientada a amarelo, imagens obtidas através do Google Earth.

- Vigotas: A estrutura do cais conta com um total de 23 vigotas pré-fabricadas em betão armado, que se estendem ao longo do desenvolvimento de toda a doca, paralelas à viga-cais. Asseguram a ligação entre os diversos módulos apoiados no sistema de estacas. Relativamente ao comportamento estrutural do cais, as vigotas desempenham um papel secundário, uma vez que estas assumem apenas a função de materializar um suporte para o pavimento. As vigotas pré-fabricadas têm secção retangular vertical de 0,3m x 0,6m.

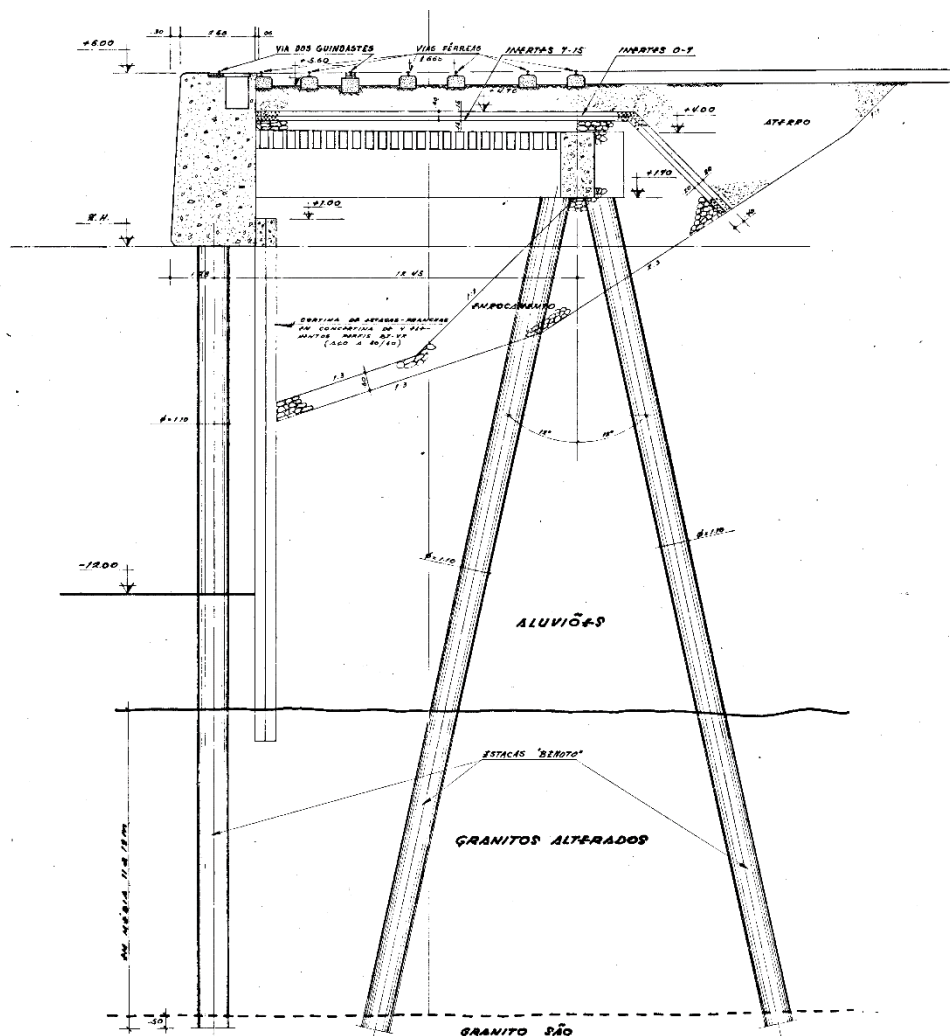


Figura 24. Perfil-tipo da Doca 4 (Desenhos técnicos fornecidos pela APDL).

- Estacas de betão armado:** O módulo transversal reproduzido da Doca 4 no modelo de elementos finitos, com base no perfil-tipo, que se repete a cada 4,19 metros, conta com uma estaca de betão armado diretamente sob a viga-cais e com um grupo de duas estacas de betão armado, em forma de "V", na parte mais interior do cais, ver Figura 24. As três estacas mencionadas têm secção circular com diâmetro de 1100 milímetros, o seu betão é de classe B225. O comprimento das estacas é de 27,5 metros para a estaca vertical, que se encontra diretamente abaixo da viga-cais, e de aproximadamente 29,9 metros para as duas estacas em "V" do grupo de estacas presentes na parte mais interior do cais, maior comprimento devido à inclinação de cerca de 80° das mesmas, face à horizontal. Todas as estacas atingem uma profundidade de 27,5 metros, em relação à base da viga-cais, onde assentam sobre um maciço rochoso de grande qualidade, granito são, estando as pontas destas 0,50 metros, verticais, cravadas no mesmo.

Face ao comportamento global da estrutura, as estacas de betão são elementos fundamentais no funcionamento da superestrutura do cais. Os deslocamentos associados à falha destes elementos, simulada no modelo através do método de cálculo mecânico com recurso a elementos finitos, são centimétricos ou subcentimétricos. Por outro lado, a falha de qualquer um destes elementos terá como resultado adicional a redistribuição dos esforços e a provável falha de outros estruturais com consequências mais gravosas no funcionamento do conjunto. Conclui-se que, a falha de qualquer um destes elementos traria graves consequências, enquadrando-se no conjunto dos cenários mais gravosos em termos das consequências no funcionamento do cais.

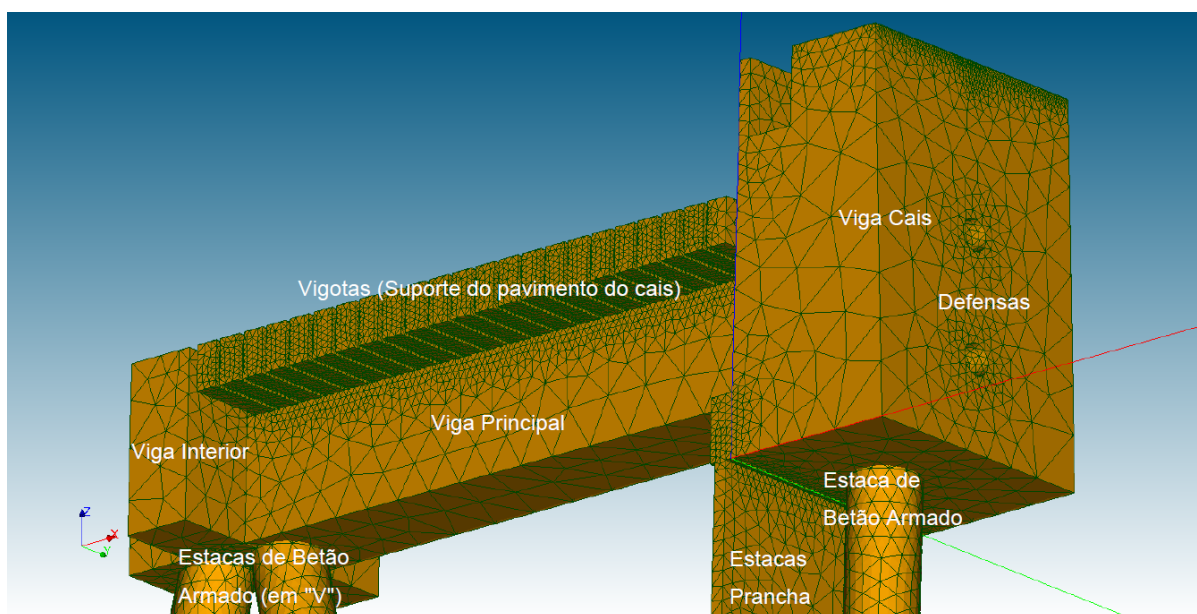


Figura 25. Constituição estrutural da Doca 4.

- **Estacas prancha**: O conjunto de estacas prancha, que atingem a profundidade de 17,5 metros, em relação à base da viga-cais, atuam como muro de contenção quer para o enrocamento, quer para os aluviões lodosos que estão depositados sobre a camada de granitos alterados. O tardo do muro de contenção, formado pelo conjunto de estacas prancha, encontra-se totalmente submerso durante toda a sua vida útil, tornando o conjunto especialmente suscetível à corrosão.
- **Viga principal**: A viga principal (Figura 25) é uma viga transversal à doca que liga a viga-cais ao apoio das estacas em "V", na retaguarda da estrutura. Tem uma secção retangular com 1,6 metros de largura e 2,3 metros de altura, conta com duas

indentações na parte superior que servem de apoio às vigotas pré-fabricadas, que por sua vez servem de suporte para o pavimento, Figura 27.

- Viga interior: A viga interior desenvolve-se longitudinalmente, paralela à viga-cais. Posicionada sobre o encontro do grupo de estacas em "V", que lhe confere um apoio muito rígido que limita a deformação do conjunto. A viga interior conta com uma secção retangular com 1,4 metros de largura por 2,3 metros de altura, constituída, mais uma vez, por betão da classe B225.
- Viga-cais: A viga-cais desenvolve-se longitudinalmente ao longo de toda a doca e materializa um elemento estrutural de importância fundamental para o funcionamento de todo o conjunto. É sobre esta que estão acopladas as defensas, assim como os cabeços de amarração dos navios, fazendo deste elemento aquele sobre o qual são mais diretamente aplicadas as ações dos navios, quer durante a acostagem, quer quando estão atracados e exercem trações sobre a viga, devido às ondulações que os deslocam e estão impedidas pelas amarrações, como se pode observar na Figura 26.

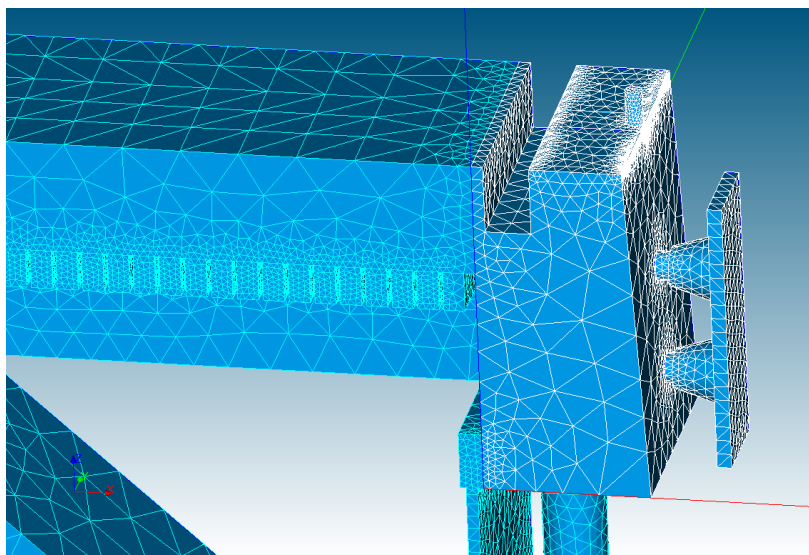


Figura 26. Pormenor da viga-cais, defensas e cabeços de amarração no modelo de elementos finitos.

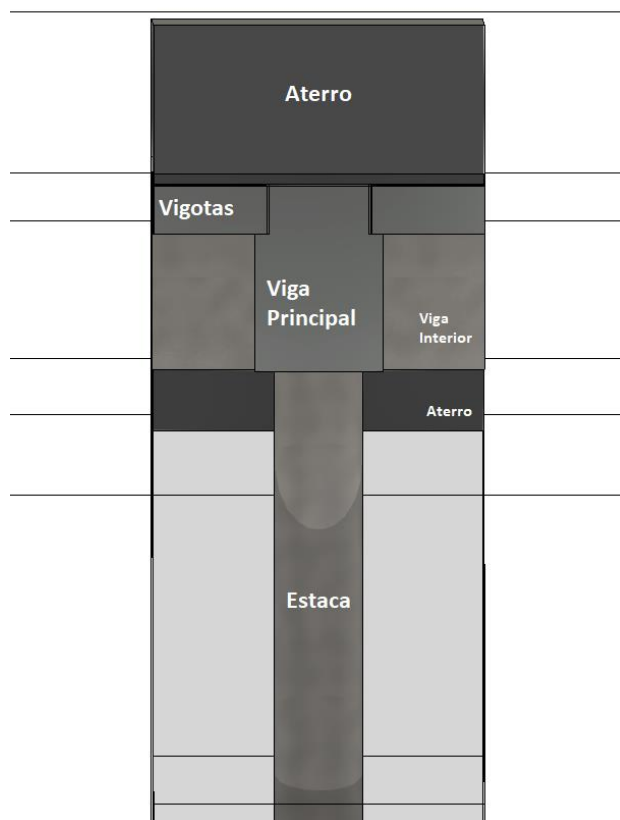


Figura 27. Corte do alçado Oeste, Doca 4.

- **Defensas e cabeços de amarração:** Uma das principais cargas sobre a estrutura do cais corresponde à ação das embarcações, quer na acostagem quer, quando presas aos maciços de amarração, por ação das oscilações resultantes das marés ou do vento. Como a massa das embarcações é muito elevada, as forças aplicadas também o são.

Como qualquer doca, a Doca 4 está equipada com cabeços de amarração, estes são elementos essenciais no apoio à atracagem dos navios assim como assegurar uma ancoragem estável, impedindo que estes fiquem instáveis perante as oscilações da água no cais. Os cabeços de amarração presentes na Doca 4 são do tipo "T-Head", este tipo de modelo é um dos mais comumente utilizados devido à sua simplicidade e elevada capacidade que pode atingir as 300 toneladas, Figura 28.

Além dos cabeços de amarração, a Doca 4, conta ainda com defensas do tipo célula (do inglês "Cell Fender"), estas têm como finalidade auxiliar a atracagem dos navios, impedindo que estes choquem contra a doca, dissipando a energia de possíveis embates, Figura 26 e Figura 29.

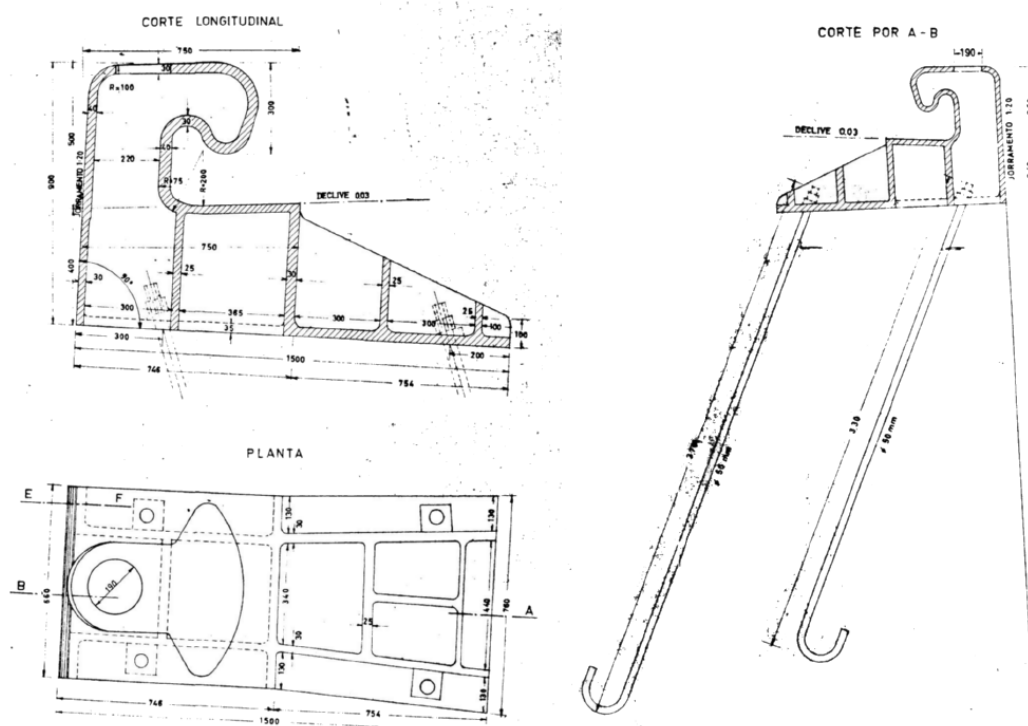


Figura 28. Geometria de projeto do cabeço de amarração (Desenhos técnicos fornecidos pela APDL).



Figura 29. Doca 4, com defensas tipo célula, semi-submersas, e cabeços de amarração (fotografia oferecida pela APDL).

5.2. Implementação de metodologia BIM na Doca 4

Em coerência com todas as potencialidades e vantagens trazidas pela implementação da metodologia BIM, não só em fase de projeto, mas também ao longo de toda a vida útil do

ativo como ferramenta de gestão da manutenção, tal como descrito no subcapítulo 4.3, foi feita a modelação BIM da Doca 4 do Porto de Leixões.

O software de modelação BIM escolhido para desenvolver o modelo da Doca 4 foi o *Autodesk Revit*, uma vez que a Universidade do Minho disponibiliza licenças dos softwares do ambiente *Autodesk* que engloba todo um conjunto de softwares, desde softwares de desenho assistido por computador (softwares CAD, como o *AutoCAD*), software de modelação numérica para análise de modelos de elementos finitos (*Robot Structural Analysis*), entre outros. Adicionalmente, estes já têm desenvolvidos entre si ferramentas que lhes garantem interoperabilidade, quer seja através de *plug-ins* descarregados para os próprios programas, através do *site* oficial da *Autodesk*, ou então através dos formatos de exportação/importação que estes softwares já são capazes de trabalhar, precisamente com o intuito de garantir essa permuta de modelos entre si. Acrescentar ainda que os softwares da família *Autodesk* estão extremamente disseminados no setor AEC, sendo utilizados por um vasto número de empresas, desde projeto a construção, o que garante o acesso e edição contínua dos modelos desenvolvidos, mesmo em softwares com licenças pagas como o caso dos supracitados.

Para a criação rigorosa deste modelo, a APDL - Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, forneceu um conjunto alargado de documentos, nomeadamente os desenhos técnicos que foram utilizados no projeto da Doca 4, tal como o apresentado na Figura 24. Foi com base nesses desenhos que foi realizada toda a modelação da doca. Na Figura 30 observam-se os parâmetros mecânicos definidos, com o exemplo do betão aplicado (B225), para cada um dos respetivos materiais que compõem o modelo BIM. Estes parâmetros servem simultaneamente como base de dados da composição do ativo e como caracterização mecânica do mesmo, tornando o modelo apto a ser integrado num software de cálculo estrutural.

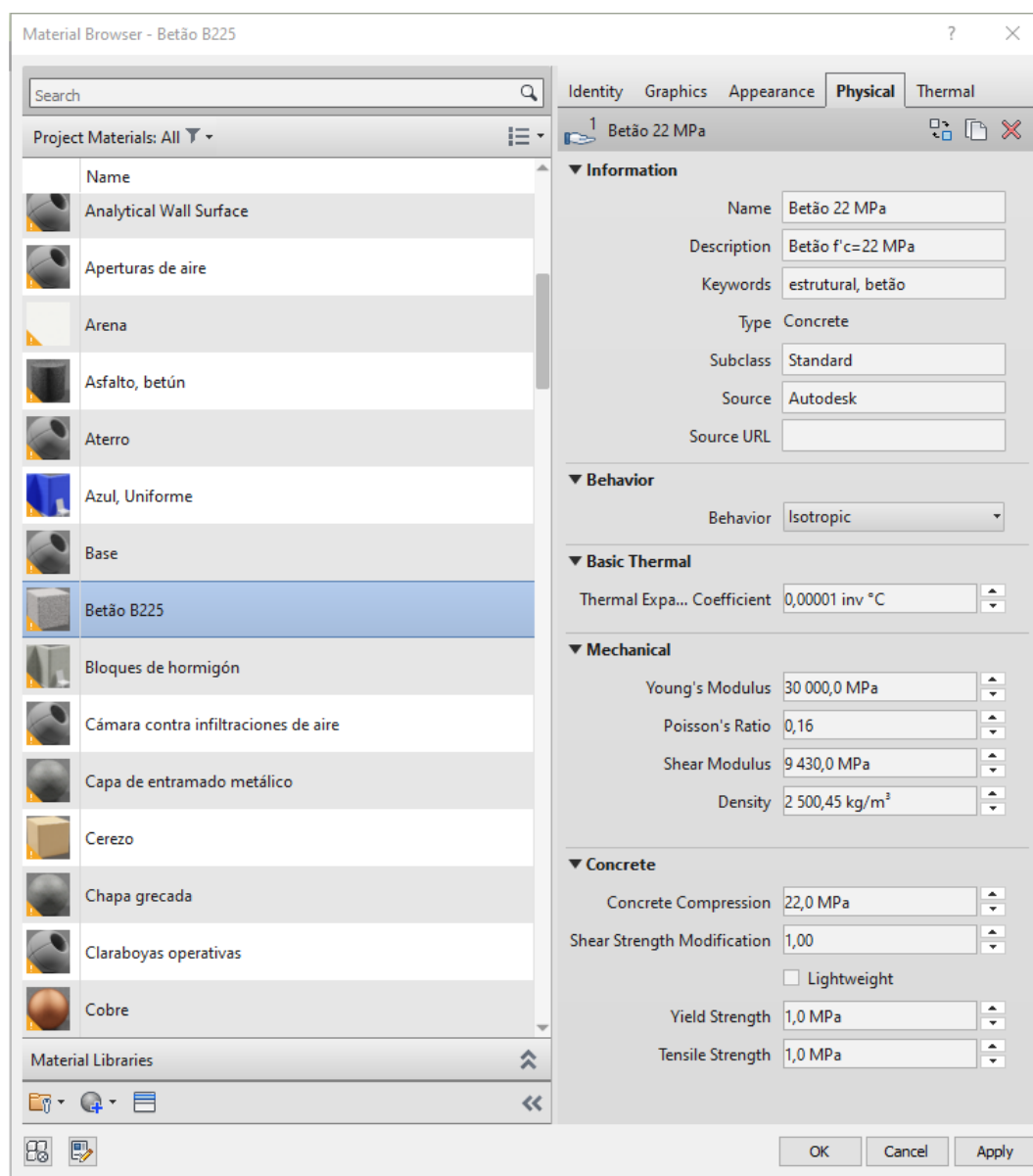


Figura 30. Propriedades do material betão (B225) utilizado nos elementos estruturais do modelo.

A Figura 24 representa o perfil tipo do cais, este é um módulo que se repete ao longo do cais a cada 4,12 metros. Face ao propósito da modelação, foi decido que esta secção seria a geometria a estudar, representada na Figura 31.

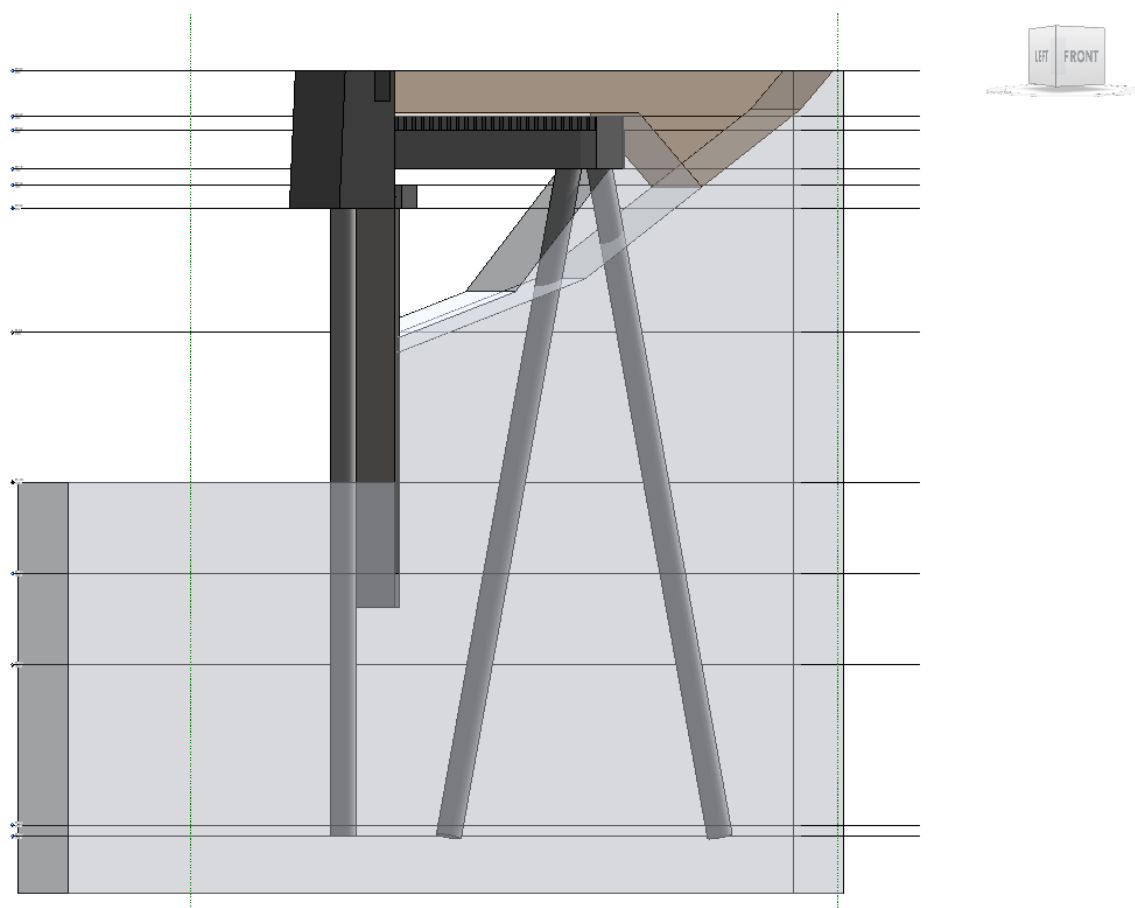


Figura 31. Modelo BIM (vista 3D) da Doca 4, em Revit.

Na Figura 33, apresenta-se o modelo da Doca 4, modelado em *Autodesk Revit*, à escala 1:1, onde foram atribuídas todas as características mecânicas aos respetivos elementos, de acordo com as memórias descritivas do projeto da Doca 4, fornecidas pela APDL. Todos os elementos estruturais (vigas, vigotas, estacas, cortina de estacas) foram modelados com o material Betão B225 com as características presentes na Figura 30. Não foram fornecidas informações relativas à quantidade nem disposição das armaduras nos elementos de betão armado, pelo que simplificadamente não foram modeladas.

O meio geotécnico envolvente à doca foi também discretizado de acordo com a informação fornecida pela APDL nas memórias descritivas disponibilizadas, nomeadamente através da Figura 24. Os elementos resultantes do modelo, divididos por tipo de maciço rochoso ou terroso, são apresentados na figura abaixo, Figura 32.

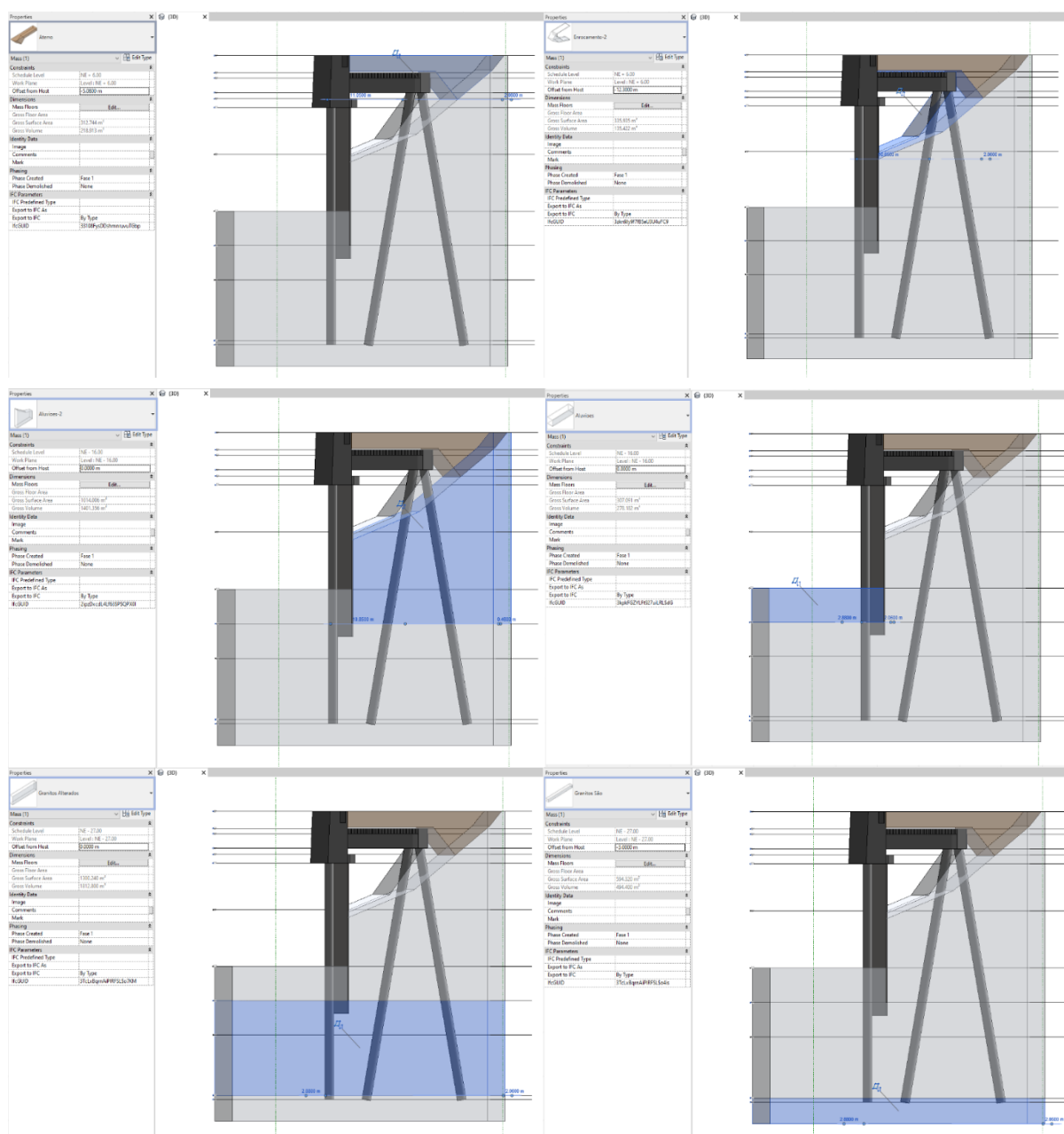


Figura 32. Meio Geotécnico envolvente da Doca 4 (modelado em Revit).

O modelo BIM da Doca 4, *per si*, serve de imediato como uma base de dados, com componente visual tridimensional, de toda a informação da infraestrutura. Permite a identificação da tipologia de cada elemento que a constitui com grande pormenor, com informação de todos os materiais empregues no local associados à sua posição exata, tendo como interface um modelo, em três dimensões, à escala real (Figura 33). Graças à parametrização de todos os elementos do modelo, garante ainda a possibilidade de ser fácil e rapidamente editado, fazendo as trocas necessárias nos elementos do modelo perante qualquer alteração real que seja feita na doca, mantendo-o assim sempre atualizado e perfeitamente coerente com a realidade.

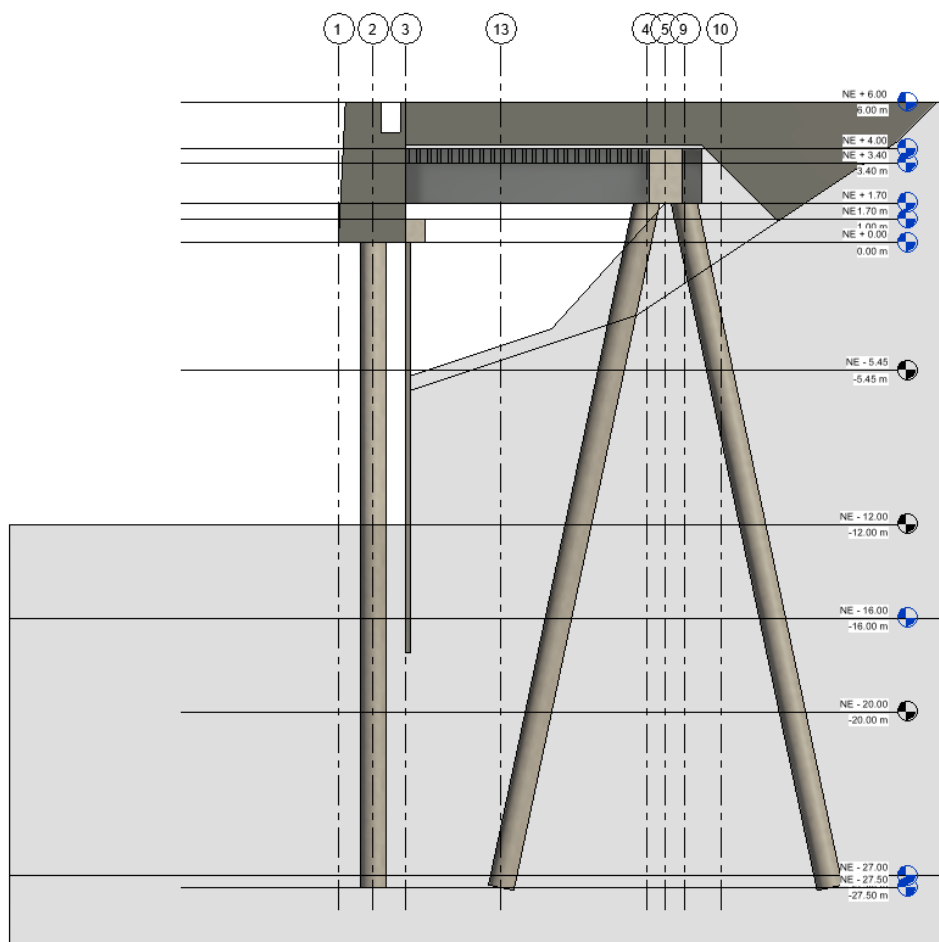


Figura 33. Modelo BIM (alçado Sul), escala 1:1, em Revit.

Um dos principais problemas da gestão da manutenção deste tipo de infraestruturas é a perda do acesso às memórias descritivas do projeto, tradicionalmente em formato papel. Com a concentração e armazenamento de toda a informação da infraestrutura num modelo digital único esta problemática fica mitigada.

Através da criação deste modelo, o recurso e a procura da informação original, fragmentada e muitas vezes perdida, só teve de ser feita uma única vez, para a modelação original. Doravante, o acesso a toda a informação da Doca 4 poderá ser feita com o recurso exclusivo ao presente modelo. Este pode ainda ser expandido, em termos de funcionalidades, nível de detalhe, entre outros, pode inclusive ser utilizado como armazenamento do histórico de inspeções e reparações executadas na infraestrutura. A sua potencialidade enquanto ferramenta de gestão é extremamente ampla. Adicionalmente, através da representação tridimensional da infraestrutura num ambiente de dados integrado, este promove o trabalho

cooperativo através da facilitação das trocas de informação entre as diferentes partes interessadas do projeto, em todas as suas fases.

5.2.1. Simulações de Carga na Doca 4

No decorrer do projeto, era do interesse da administração do porto, APDL, conhecer o limite real de carga cuja Doca 4, doca destinada aos carregamentos de granel do Porto de Leixões, tem capacidade de receber. Foi então decidido que seriam feitos uma série de ensaios para estudo do comportamento e eficácia da estrutura da doca, com base nas deformações sofridas pela estrutura perante os múltiplos valores e cenários de carga simulados, através de modelação numérica com recurso ao método dos elementos finitos.

O primeiro modelo ao qual se recorreu para desenvolver as análises propostas foi o modelo BIM da Doca 4, Figura 31. O modelo referido foi desenvolvido no *software* de modelação *Revit*, no entanto, o *Revit* não contém em si capacidades de cálculo estrutural, pelo que foi exportado, num formato interoperável, e importado num outro *software* do ambiente *Autodesk*, o *Robot Structural Analysis*. O *Robot Structural Analysis* é um *software* de cálculo estrutural, que executa análises mecânicas lineares através do método dos elementos finitos. Este possui fluxos de trabalho BIM integrados que garantem a troca de dados com o *Revit*.

Como a importação da Doca 4 no *Revit* foi feita de um modelo BIM, este contém muita mais informação do que aquela que é utilizada por um *software* de cálculo estrutural para desenvolver as suas análises mecânicas. Por esta razão, o *Robot Structural Analysis* não faz a importação do modelo *Revit* completo, mas sim do "modelo analítico" contido neste, tal como na Figura 34. O modelo analítico encontra-se "embebido" no modelo BIM do *Revit*, este discretiza todos os elementos do modelo BIM em elementos de barra, de casca, nós, apoios, etc., ou seja, nos componentes analíticos que o *Robot S.A.* necessita para desenvolver a análise da estrutura. A cada um destes elementos estão associadas todas as suas

características geométricas (dimensões, áreas, volumes, etc.) assim como todas as características mecânicas (módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson*, etc.).

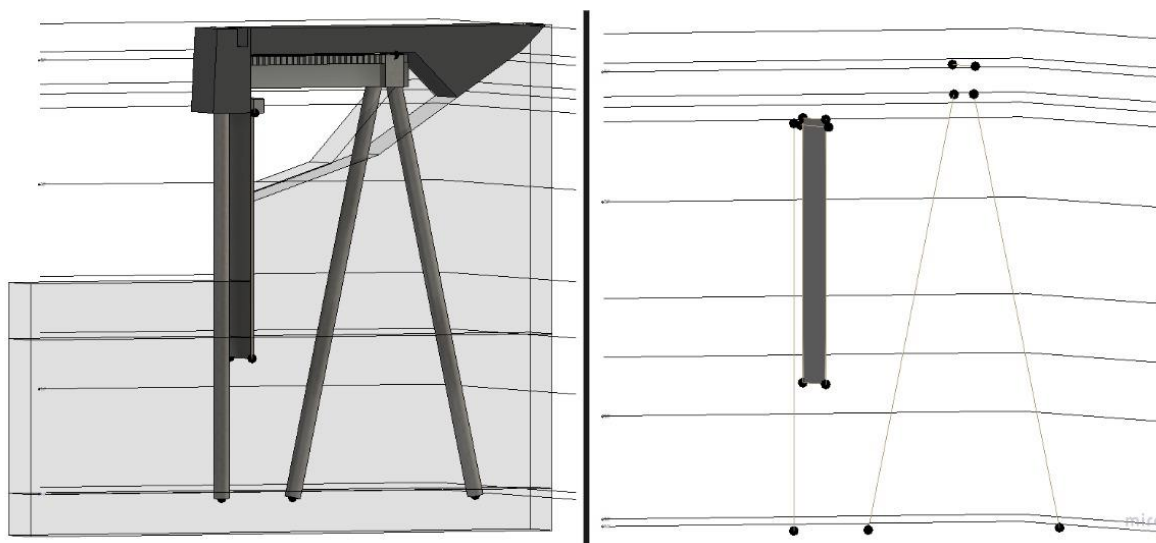


Figura 34. Modelo geométrico da Doca 4 (à esquerda) e modelo analítico da Doca 4 (à direita).

Porém, o próprio *software*, *Robot Structural Analysis*, apresenta algumas limitações e inconvenientes. Um primeiro inconveniente deve-se ao facto deste ser um *software* com licença paga em anuidade. Ao passo que em termos de limitações surge a questão de estarmos perante um *software* bastante expedito, utilizado maioritariamente por empresas de projeto, pois possibilita uma enorme velocidade de trabalho, porém, esta rapidez de aplicação provém das grandes simplificações de que este *software* usufrui, estando por exemplo orientado a análises lineares, ao contrário de outros softwares mais sofisticados em termos de cálculo como o *DIANA FEA* ou o *Salomé-Meca*, que possibilitam análises não-lineares complexas, logo mais rigorosas e detalhadas. Como consequência, estes dois últimos *softwares* apresentam uma curva de aprendizagem significativamente menos acessível que o *Robot S.A.*

Por fim, um impedimento condicionante à utilização do *Robot S.A.* foi a sua incapacidade para fazer uma análise mecânica ao meio geotécnico envolvente à doca, estando por isso limitado à análise isolada dos elementos estruturais (vigas, estacas, vigotas, etc.). Ora, a presença do meio nas análises era essencial para garantir um estudo completo com resultados pertinentes e viáveis para uma gestão global da utilização da doca, assim como para a avaliação de

capacidade de carga da mesma. No projeto GIIP tinha já sido implementado o uso do *software Salomé-Meca*, um *software* com inúmeras vantagens, nomeadamente a sua natureza *open-source*, a sua capacidade de desenvolver análises estáticas e dinâmicas não lineares, de natureza mecânica, térmica e acústica. Sendo ainda capaz de trabalhar com fluídos, extremamente pertinente para trabalhos futuros no modelo da doca onde será feita a adição do mar que a banha. Neste contexto, foi adotado o *Salomé-Meca* como o *software* onde serão feitas todas as análises e simulações de carga do projeto.

O capítulo seguinte procura oferecer ao leitor uma breve introdução ao *software* de análise estrutural adotado, *SALOME_MECA*, guiando-o através das motivações que levaram à sua escolha, assim como através dos passos fundamentais que foram seguidos na realização deste trabalho.

5.3. Modelo geotécnico e estrutural para análise mecânica da Doca 4

5.3.1. Modelação em *software open-source*: *SALOME_MECA*

O primeiro estudo a realizar com fim a averiguar a capacidade estrutural da doca e, por conseguinte, os limites de segurança na utilização da mesma, trata-se da execução de uma análise mecânica. Desta forma, efetuou-se uma análise estática com vários cenários de carregamento. Várias configurações de posicionamento de carga, assim como alternância dos valores das mesmas, foram simuladas com o objetivo de compreender a influência que diferentes utilizações têm sobre a estrutura global, podendo assim aferir a sua resposta de modo a definir um limite último às capacidades da mesma. Tornando assim possível balizar os limites para uma utilização segura.

Com vista à realização destas análises, o *software* de cálculo que se demonstrou mais adequado às necessidades do projeto foi o "*Code_Aster*", escolha fundamentada nas inúmeras valências descritas ao longo dos seguintes parágrafos. Trata-se de um *solver*, baseado na teoria da mecânica dos meios contínuos, que utiliza o método dos elementos finitos (FEA) para resolver problemas mecânicos, térmicos, acústicos, sísmicos, de fadiga, não-lineares, entre outros. É um *software* para simulação geral de problemas mecânicos e cálculo de estruturas [56]. Este *solver* consiste num pacote *open-source* desenvolvido desde 1989 pelo setor de "Análise Mecânica Avançada" do departamento de pesquisa e

desenvolvimento da francesa *EDF (Électricité de France)*. *ASTER* significa “Analyzes des Structures et Thermomécanique pour des Études et des Recherches”, em português: “Análise Estrutural e Termomecânica para Estudos e Pesquisa” [56].

A grande vantagem da utilização do *Code_Aster* advém da sua natureza open-source. O facto deste *software* ter sido/estar a ser desenvolvido em código aberto garante ao utilizador total controlo sobre o funcionamento do mesmo, logo, total controlo sobre as simulações que executa. Pode então configurar e personalizar qualquer etapa da sua análise. Liberdade essa que não é possível com o uso de softwares comerciais. O *Code_Aster* pode ser utilizado de forma gráfica, através do ambiente *AsterStudy*, que garante uma experiência mais “*user friendly*”, ou através de linhas de comando, através do ambiente *ASTK*, associado a maior produtividade [56]. Como tem vindo a ser mencionado, o *Code_Aster* trata-se somente de um *solver* de *FEA* (análise de elementos finitos), a sua utilização é feita de forma integrada com ambientes/módulos de criação de geometria, criação de malha, assim como de um pós-processador que permitirá a visualização dos resultados calculados pelo *solver*, como podemos observar nos esquemas das Figura 35 e Figura 36 [56].

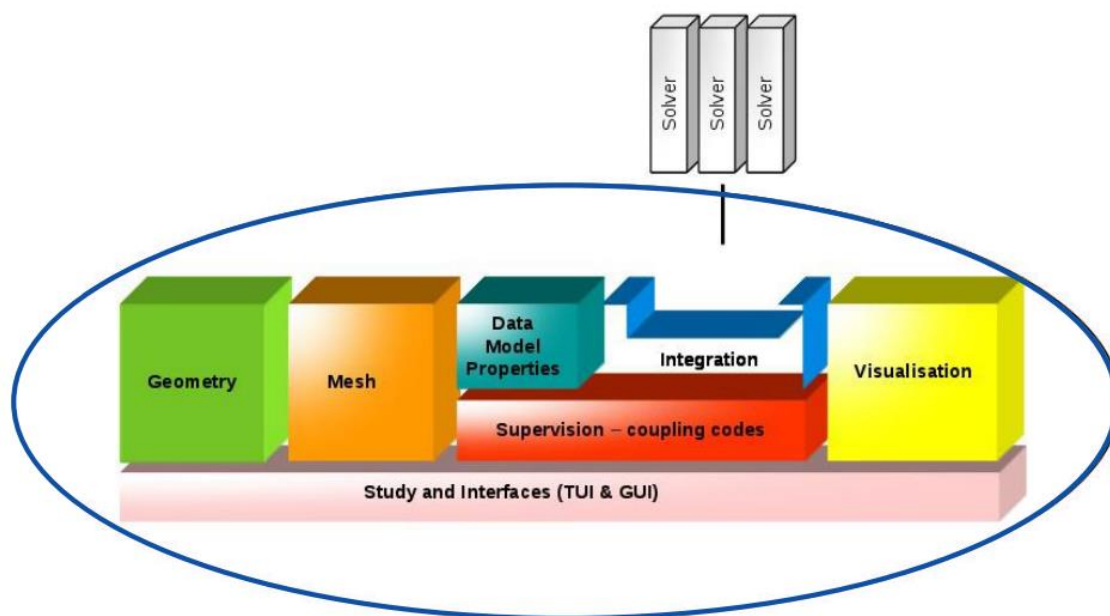


Figura 35. Arquitetura de um módulo de CAE (Computer Aided Engineering) [58].

Posto isto, um excelente pacote *CAE* (Computer Aided Engineering) a usar, também ele open-source, que condensa todos estes módulos interdependentes num único software é o “*Salome_Meca*”. Este consiste numa plataforma integrada de simulação onde constam todos

os módulos para que o utilizador possa ter uma experiência completa, desde a modelação geométrica, ao cálculo e visualização dos resultados. No qual está integrado o módulo "AsterStudy" da *Code_Aster* como componente solver do pacote, de acordo com a Figura 36 [56].

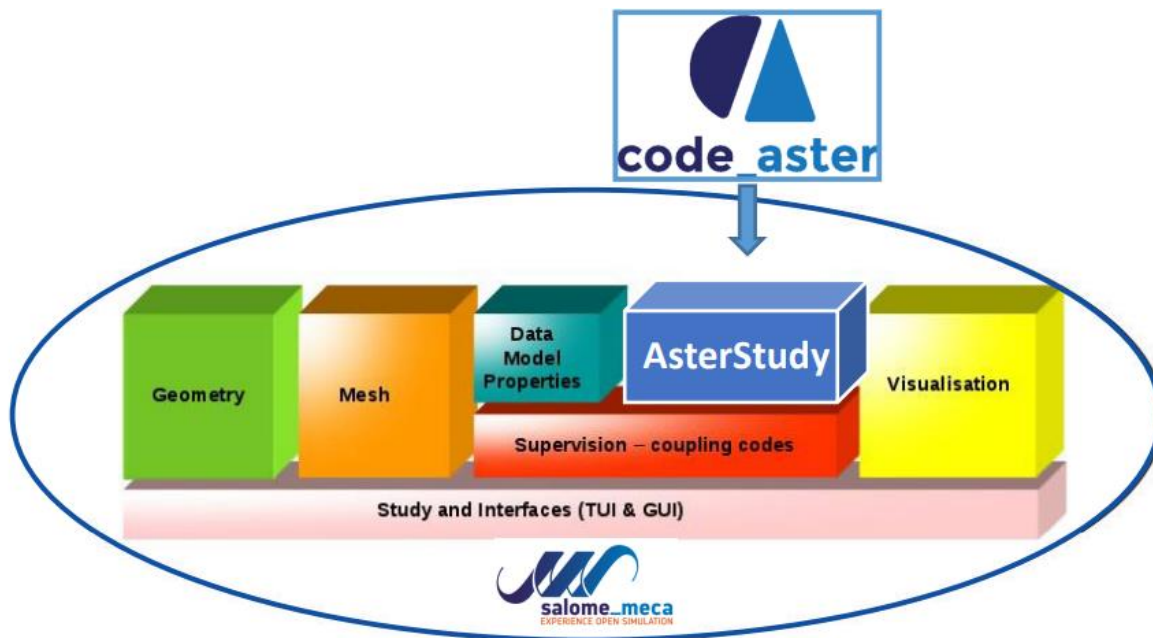


Figura 36. Arquitetura do módulo CAE: SALOME_MECA [58].

O pacote *Salome_Meca* conta com os seguintes módulos, que se apresentam na interface gráfica do software tal como na Figura 37 [56]:

1. Geometry: Para criação de CAD ("*Computer Aided Design*") de forma paramétrica;
2. Shaper: Possui um comportamento semelhante às ferramentas de CAD comerciais;
3. Mesh: Para a discretização de malhas; [57]
4. AsterStudy: Interface gráfica que permite realizar a configuração dos casos a serem executados no *Code_Aster*. Também permite iniciar os cálculos, acompanhar o desenvolvimento dos mesmos e ter acesso aos resultados;
5. ParaVis: Consiste numa poderosa ferramenta de visualização e pós-processamento.

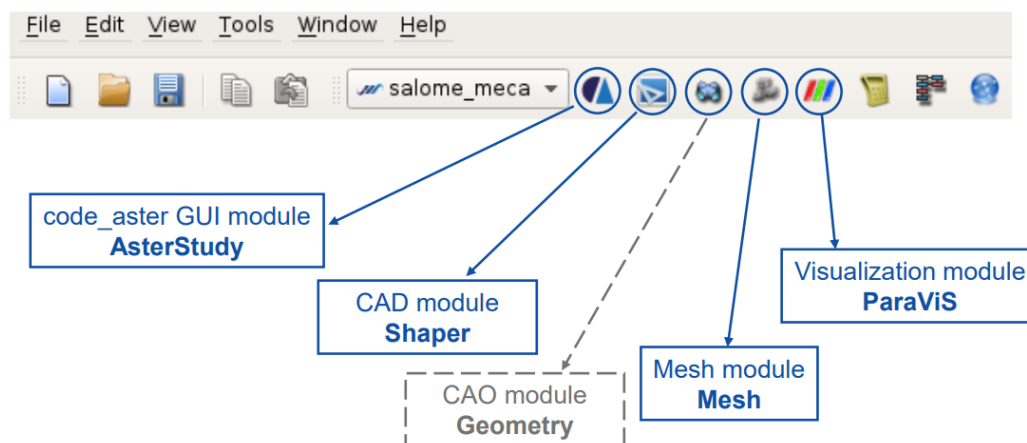


Figura 37. Interface gráfica do Salome_Meca, apresentação dos módulos do pacote [58].

Para desenvolver uma modelação geométrica, tal como a que será descrita para a Doca 4, é utilizado o módulo "Geometry" do pacote supracitado "Salome_Meca" (Figura 36 e Figura 37). Como explicitado anteriormente, dada a aplicação generalizada deste *software* nas mais diversas áreas, desde a análise estrutural a análises térmicas ou acústicas, este *software* não se encontra altamente parametrizado como outros *softwares* de modelação mais convencionais. Quer isto dizer que nele não encontramos objetos/instâncias pré-concebidas que podemos simplesmente selecionar e posicionar no modelo. Todos os elementos/objetos constituintes do projeto têm de ser manualmente modelados através da manipulação de elementos de volume, área ou linha.

Uma vez modelada a geometria sobre a qual se pretende correr as análises (mecânicas, térmicas ou acústicas), o módulo com interface gráfica que permite realizar a configuração dos casos de estudo a serem calculados pelo solver, *Code_Aster*, designa-se por "AsterStudy", Figura 38.

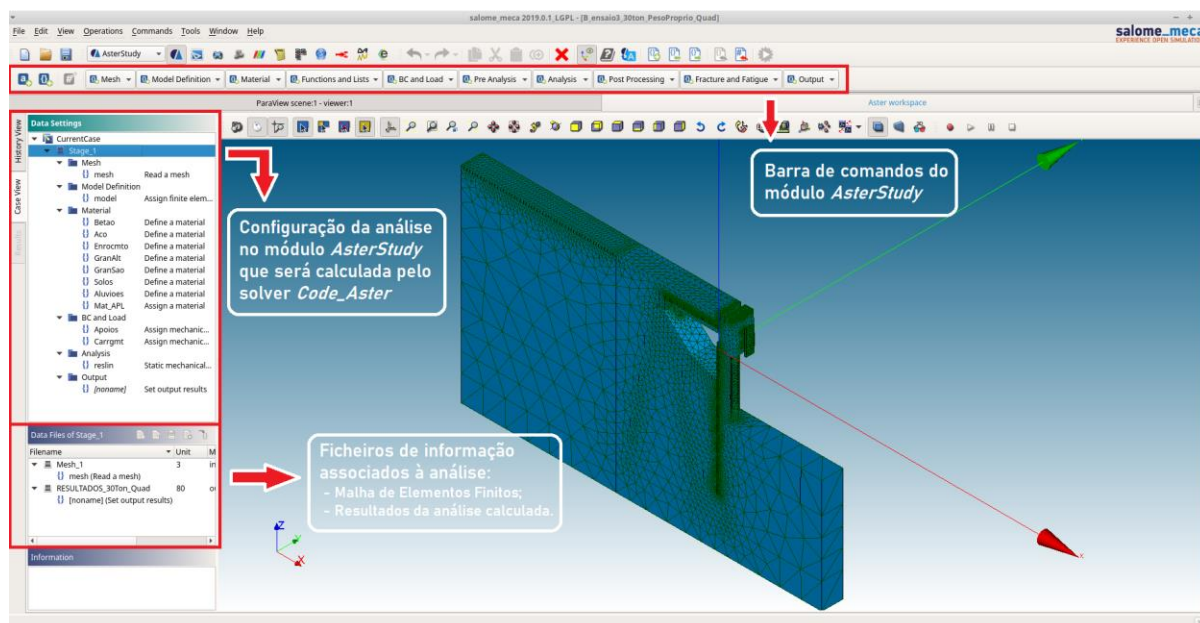


Figura 38. Interface do módulo AsterStudy.

De seguida apresentam-se todas as configurações, hipóteses de cálculo e parâmetros que devem ser considerados no módulo *AsterStudy* e que definem todos os aspetos das análises de simulação que foram desenvolvidas neste estudo.

Para configuração de análises recorre-se aos seguintes comandos, visíveis na Figura 38:

- Comando "*Mesh*": É o comando que atribui à análise a malha de elementos finitos a ser calculada.
- Comando "*Model Definition*": É o comando onde se define o tipo de análise a ser calculada sobre a malha de elementos finitos. Neste tipo de estudo define-se que será calculada uma análise mecânica sobre toda a malha com recurso a uma modelização 3D. De referir ainda que este software permite sectionar a malha em subgrupos onde se pretendam fazer análises distintas que podem ser mecânicas, acústicas ou térmicas.
- Comando "*Material*": É no comando "*Material*", pela opção "*Define Material*", que são definidos todos os materiais reconhecidos pelo *software*, através da introdução dos valores das suas características mecânicas (Figura 39). As propriedades mecânicas a introduzir devem estar em conformidade com o tipo de análise a realizar.

Após a definição de todos os materiais com os quais se pretende povoar o modelo, é também no comando "*Material*", através da opção "*Assign Material*", que se executa a atribuição de cada material ao respetivo elemento individualizado do modelo geométrico (Figura 39 e Figura 40). Essa mesma atribuição está igualmente registada nas Tabela 1 e Tabela 2, onde é possível observar a referência (nome de determinado elemento no modelo da doca) na segunda coluna das tabelas e o respetivo material que foi associado a cada um desses elementos, na coluna seguinte.

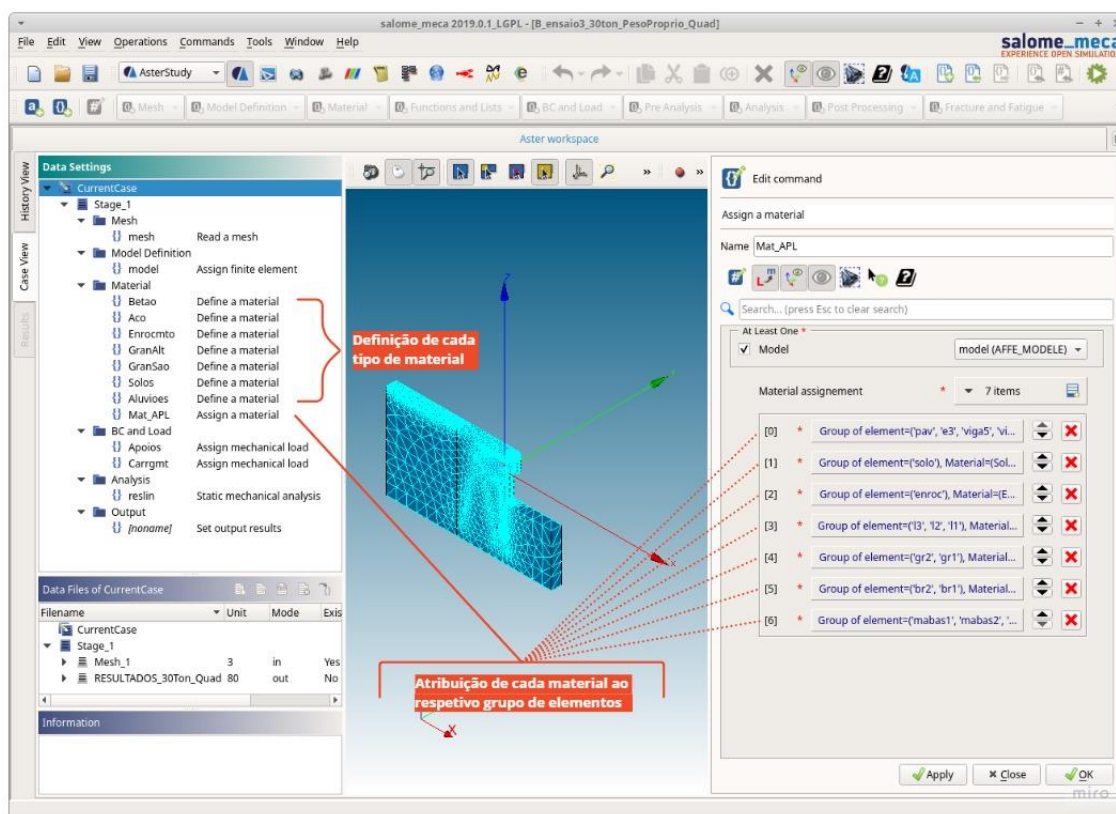


Figura 39. Definição e atribuição dos materiais ao modelo.

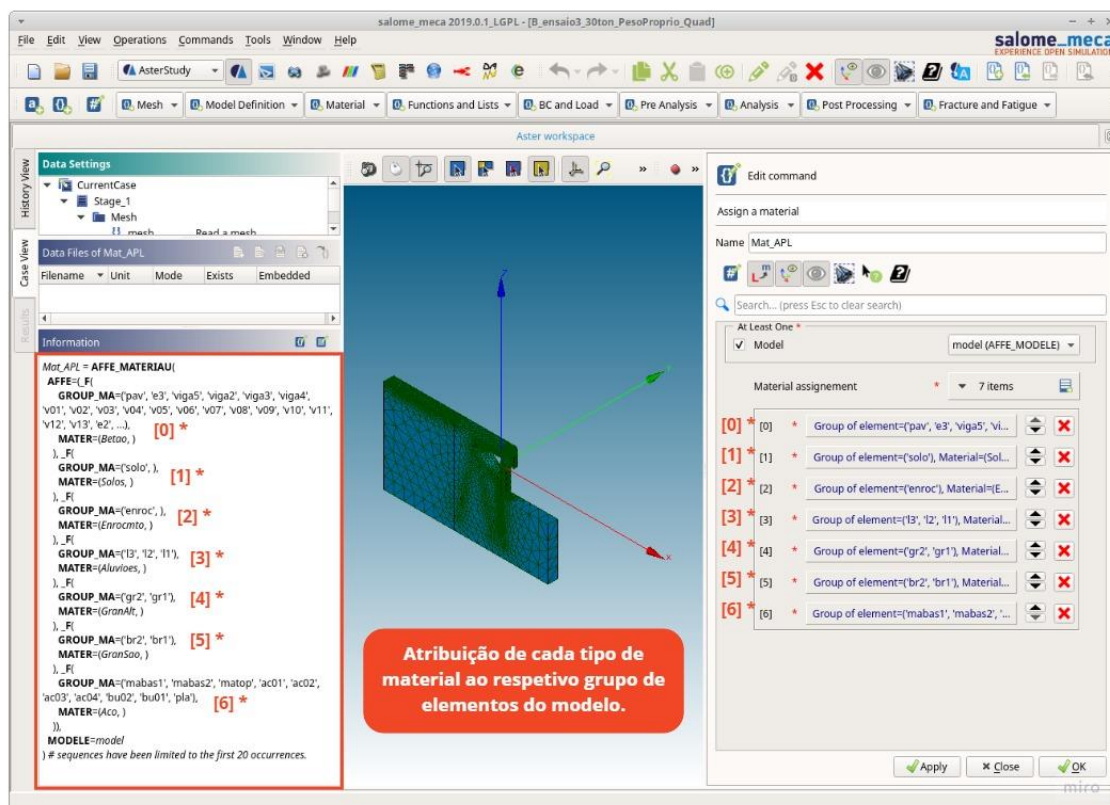


Figura 40. Atribuição de cada material ao respetivo grupo de elementos.

- **Comando "BC and Load":** No comando "*Boundary Conditions and Load*", como o próprio nome indica, são definidas as condições fronteira e os carregamentos a aplicar no modelo. Os apoios do modelo são definidos através da imposição de deslocamentos nulos nas faces que se pretendem imobilizar (através do comando "*FACE_IMPO*", nas respetivas direções onde se pretende que não haja deslocamento: $DX = 0$ e/ou $DY = 0$ e/ou $DZ = 0$).

Os carregamentos são aplicados através do comando "*FORCE_FACE*", onde é aplicada uma carga uniformemente distribuída na(s) face(s) selecionada(s), com determinado valor e na direção pretendida (FX e/ou FY e/ou FZ). Para que a análise inclua a ação do peso próprio dos elementos é necessária a introdução do valor da aceleração da gravidade manualmente, na direção vertical que corresponde, neste modelo, ao eixo- ZZ .

- Comando "Analysis": No comando "Analysis" é feita a seleção de quais os carregamentos e condições fronteira, que foram definidos anteriormente no comando "BC and Load", serão aplicados na análise.
- Comando "Output": No comando "Output" é definida a localização para a qual irá o ficheiro de resultados da análise.

Uma vez apresentados os princípios fundamentais do *Salomé-Meca*, assim como as etapas essenciais a seguir no *software*, far-se-à, no próximo subcapítulo, uma apresentação extensiva de toda a metodologia aplicada no estudo conduzido sobre a Doca 4.

5.3.2. Metodologia aplicada à modelação do caso de estudo: Doca 4

Estabelecidas as metas a alcançar no presente estudo, definiram-se os critérios fundamentais que seriam adotados ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho.

Um aspeto fundamental imediato a ter em consideração é o grau de complexidade que seria dado ao modelo. Neste aspeto, dado que o âmbito do presente trabalho não era a realização de um estudo detalhado da resposta mecânica da doca, mas sim a simulação de um número relativamente significativo de ensaios de carga, com fim a integrar os resultados na plataforma GIIP, com intuito de possibilitar um acesso e análise mais acessíveis, intuitivos e dinâmicos às entidades gestoras, somado aos limites temporais dados à realização deste trabalho, seriam adotadas algumas simplificações.

As simplificações do modelo, que consequentemente se refletem nos resultados obtidos dos ensaios de carga, foram as seguintes:

Simplificações da Análise:

Materiais em regime Elástico-Linear: Dado o âmbito do presente trabalho, considerou-se aceitável a limitação do comportamento dos materiais ao seu regime elástico-linear. Deste modo, consegue-se caracterizar os materiais de forma expedita, necessitando apenas de definir o seu módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e peso volúmico (γ).

Com a adoção deste comportamento, apesar de não serem aproveitadas ao máximo as capacidades dos materiais, explorando o seu regime plástico (comportamento não-linear), considerou-se de maior valor, face ao número relativamente elevado de simulações a conduzir, a rapidez com que se consegue correr cada análise (linear), especialmente quando comparada à mesma em regime não-linear.

Utilização de betão simples (não armado): Nas memórias descritivas que a APDL forneceu para basear a modelação da Doca 4 constavam apenas informações das armaduras relativas às vigotas. Nenhum dos restantes elementos de betão armado, como a viga-cais, a viga principal ou estacas, trouxeram qualquer informação referente à quantidade ou configuração das armaduras. Como o foco deste modelo está na integração do conteúdo e devido à enorme dificuldade, e tempo que tomaria modelar as armaduras nas peças de betão armado num modelo tão complexo, todos os elementos que seriam de betão armado foram modelados como betão simples. Como todos os ensaios foram realizados em regime elástico-linear, estes elementos estruturais supracitados foram mecanicamente caracterizados da seguinte forma, apresentada no Quadro 6:

Quadro 6. Parâmetros considerados na caracterização mecânica do betão.

Parâmetro mecânico:	Valor considerado:
Módulo de Elasticidade (E)	30 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,25
Peso Volúmico (γ)	2500 kN/m ³

Ausência do efeito do impulso horizontal dos solos: Assim como não houve acesso à informação relativa às armaduras dos elementos de betão armado, a informação referente ao material terroso foi também escassa, não sendo suficiente para caracterizar os materiais ao nível da determinação dos impulsos horizontais que exercem sobre o meio envolvente. Deste modo, a única ação exercida pelos solos, considerada, é o seu peso próprio.

À semelhança dos restantes elementos do modelo, todo o material rochoso e terroso foi simplificadamente assumido como um meio contínuo, homogéneo, isotrópico, em regime linear-elástico, sendo caracterizado mecanicamente através dos valores do: Módulo de Elasticidade (E); Coeficiente de Poisson (ν); e o Peso Volúmico (γ).

Ausência da água do cais: No âmbito simplificado da análise levada a cabo neste trabalho, o principal foco estava na observação do comportamento da doca face à solicitação de cargas que surgem sob a forma de carregamentos de granel que sobre esta são depositados.

Neste primeiro estudo, a intenção foi de realizar uma análise estática do problema. Ora, a grande pertinência do estudo do efeito da água sobre o cais surge sob a forma das ondulações, fortes impactos frutos das movimentações da enorme massa de água que banha o cais. Para acautelar a degradação infligida por estas ações, seria necessário o desenvolvimento de uma análise dinâmica, que como foi referido, encontra-se fora das ambições e objetivos deste trabalho, que como mencionado, é a integração de resultados na plataforma de gestão. Adicionalmente, de grande importância referir que a água, quando simulada em regime hidrostático, análise estática, exerce uma ação sobre o tardo do muro, composto pelas cortinas de estacas, que é favorável ao equilíbrio da estrutura, uma vez que a força horizontal que a água exerce sobre a doca contraria as forças de tração exercidas pelos navios amarrados nos cabeços, que a "puxam", criando grandes tensões de tração, sobretudo na viga principal. Este fenómeno já provocou graves danos na doca, ao nível do próprio pavimento, danos esses que têm vindo a ser inúmeras vezes explorados ao longo deste documento, ver Figura 22.

Com a consideração de todas estas premissas, conclui-se que a simplificação que exclui a modelação da água que banha o cais não seria preponderante em termos da gravidade da ação que esta exerce, uma vez que está limitada ao regime hidrostático, fruto da análise estática. Antes pelo contrário, a simulação da água nas condições citadas seria favorável ao comportamento da estrutura, pois contribui para o seu equilíbrio global. Assim, considerou-se mais conservador e mais pertinente, ao nível dos resultados a obter, a não consideração deste elemento nesta primeira modelação da Doca 4.

Uma vez fixadas as condições iniciais e simplificações a adotar no modelo, assim como nas consequentes análises, segue-se a caracterização dos materiais a implementar neste. Estabelecem-se ainda as fronteiras de interação entre os diferentes materiais que dão origem aos diversos elementos que irão constituir o modelo geométrico.

Materiais e características consideradas na análise:

Para caracterizar mecanicamente os materiais do modelo, com comportamento definido dentro do regime elástico-linear, foi necessária a determinação dos seguintes parâmetros relativos a cada material:

- Módulo de Elasticidade, ou Módulo de Young (E): Descreve a relação entre a tensão e deformação do material, sendo uma medida da sua rigidez;
- Coeficiente de Poisson (ν): É a relação entre a deformação transversal relativa e a deformação longitudinal relativa;
- Peso Volúmico: Representa o peso por unidade de volume.

Por forma a ter conhecimento das fronteiras de interação entre os elementos, estruturais e do terreno, aos quais serão atribuídos os distintos materiais constituintes, recorreu-se novamente às memórias descritivas do projeto da doca. Foi através destas possível seccionar o modelo, assim como identificar os materiais que estão alojados nessas mesmas secções, permitindo aferir os valores característicos adequados.

A atribuição dos diversos materiais que incorporam o modelo foi feita por blocos de elementos finitos. Esses blocos são definidos a partir dos diversos elementos geométricos usados na definição da geometria do problema, apresentados nas Figura 41 e Figura 42.

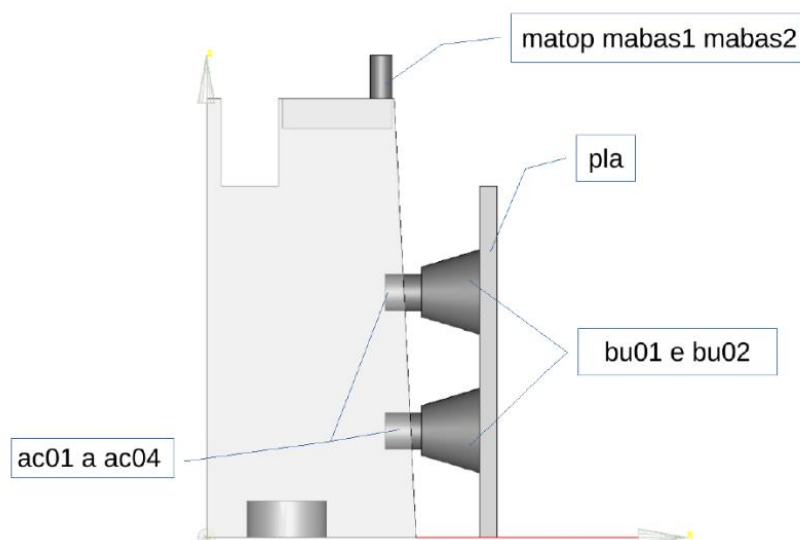


Figura 41. Localização dos grupos de elementos finitos, pormenor da viga-cais, defensas e cabeço de amarração.

Nas Tabela 1 e Tabela 2, apresentam-se os materiais, acompanhados de suas características mecânicas, que foram atribuídos a cada elemento geométrico na respetiva secção da malha do modelo. A atribuição do material está devidamente legendada, de acordo com a nomenclatura que foi dada a cada objeto dentro do modelo, tal como apresentado nas Figura 41 e Figura 42.

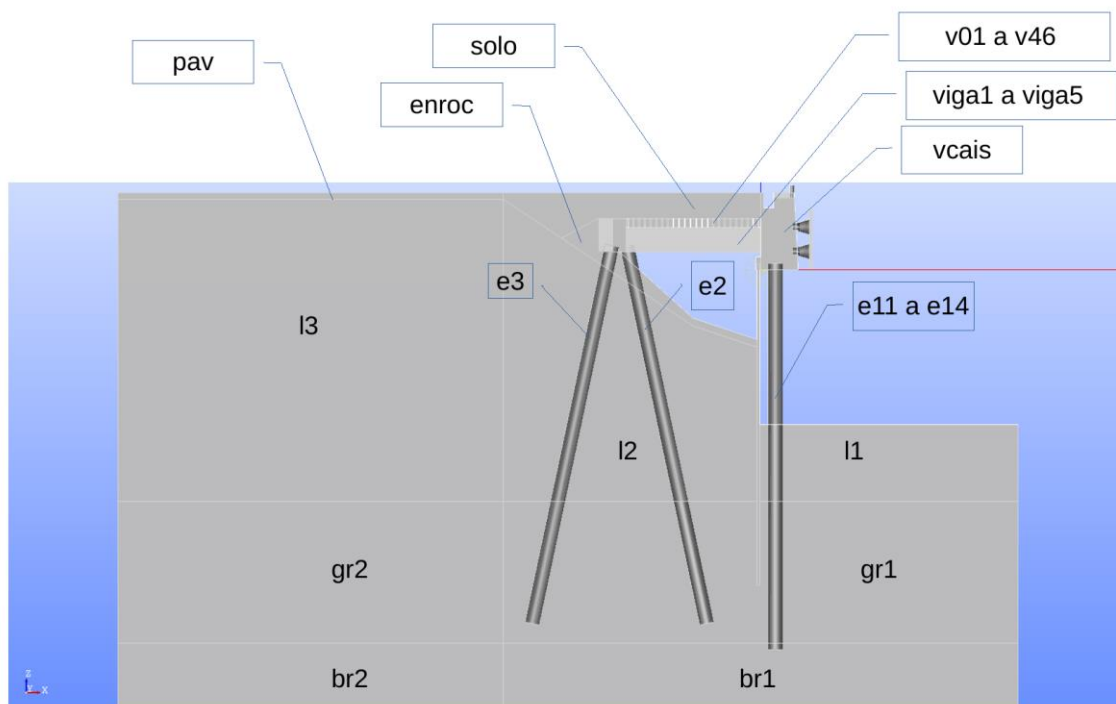


Figura 42. Localização dos grupos de elementos finitos, modelo global.

Tabela 1. Propriedades mecânicas atribuídas aos elementos da malha.

Objeto	Referência	Material	E (MPa)	Coef. Poisson - v	Peso Volumico - γ (kN/m³)
Pavimento	Pav	Betão (B225)	30 000	0.25	25
Solo	Solo	Solo	120	0.30	21
Enrocamento	Enroc	Enrocamento	120	0.25	21
Vigotas	V01 a v46	Betão Armado (B225)	30 000	0.25	25
Viga Principal	Viga1 a Viga5	Betão Armado (B225)	30 000	0.25	25
Viga Cais	Vcais	Betão Armado (B225)	30 000	0.25	25
Estaca	E3	Betão Armado (B225)	30 000	0.25	25
Estaca	E2	Betão Armado (B225)	30 000	0.25	25
Estaca	E11 a e14	Betão Armado (B225)	30 000	0.25	25
Aluviões	L3	Aluviões	30	0.30	21
Aluviões	L2	Aluviões	30	0.30	21
Aluviões	L1	Aluviões	30	0.30	21
Granito Alterado	Gr2	Granito Alterado	150	0.25	21

Tabela 2. Propriedades mecânicas atribuídas aos elementos da malha, continuação.

Objeto	Referência	Material	E (MPa)	Coef. Poisson - ν	Peso Volumico - γ (kN/m ³)
Granito Alterado	Gr1	Granito Alterado	150	0.25	21
Granito São	Br2	Granito São	210	0.25	21
Granito São	Br1	Granito São	210	0.25	21
Cabeço de Amarração	Matop mabas1 mabas2	Aço	300 000	0.25	79
Placas da defensa	Pla	Aço	300 000	0.25	79
Suporte da defensa	Bu01 e bu02	Aço	300 000	0.25	79
Apoio da defensa	Ac01 a ac04	Aço	300 000	0.25	79

Modelação Geométrica:

Após reunida toda a informação relativa aos materiais presentes *in situ* que compõem o ativo em estudo, é agora possível iniciar a modelação geométrica do mesmo, já com a povoação dos parâmetros que caracterizam mecanicamente cada um dos elementos que o constituem. Para tal, recorreremos novamente à Figura 24. Esta figura representa o perfil tipo do cais, este é um módulo que se repete ao longo do cais a cada 4,12 metros, pelo que será esta a geometria a modelar. Ter em atenção que esta simplificação implica necessariamente que a estrutura global, assim como os respetivos carregamentos, são obtidos pelo somatório deste módulo ao longo do cais.

É ainda pertinente incluir no modelo os maciços de amarração, assim como as defensas do cais. Estes elementos, apesar de fulcrais na simulação das interações entre as embarcações e a doca, não carecem de um detalhe geométrico exato, bastando implementar elementos

geométricos representativos que permitam a correta aplicação das cargas no modelo, e consequentemente, proporcionem uma simulação coerente com o fenómeno real.

Na Figura 28 pudemos ver em detalhe a configuração dos cabeços de amarração, em "*T-Head*", no entanto, como explicitado no último parágrafo, uma vez que neste trabalho não se pretende estudar especificamente o comportamento do cabeço de amarração, a sua geometria foi simplificada para um cilindro com o mesmo diâmetro externo ($\phi = 300 \text{ mm}$) e com a altura da zona de amarração dos cabos, aproximadamente $h = 650 \text{ mm}$.

No que diz respeito à geometria das defensas, não foram disponibilizados desenhos de pormenor, pelo que todas as características geométricas das mesmas tiveram de ser aferidas por inspeção visual e com recurso a fotografia (Figura 29). O resultado final das defensas modeladas apresentou-se na Figura 26.

Apesar dos fenómenos de interação mecânica entre as embarcações e a Doca 4 não serem diretamente estudados neste trabalho, o modelo está já preparado para as futuras análises que se seguirão na continuação do projeto. Na Figura 43 é representado o modelo geométrico da doca.

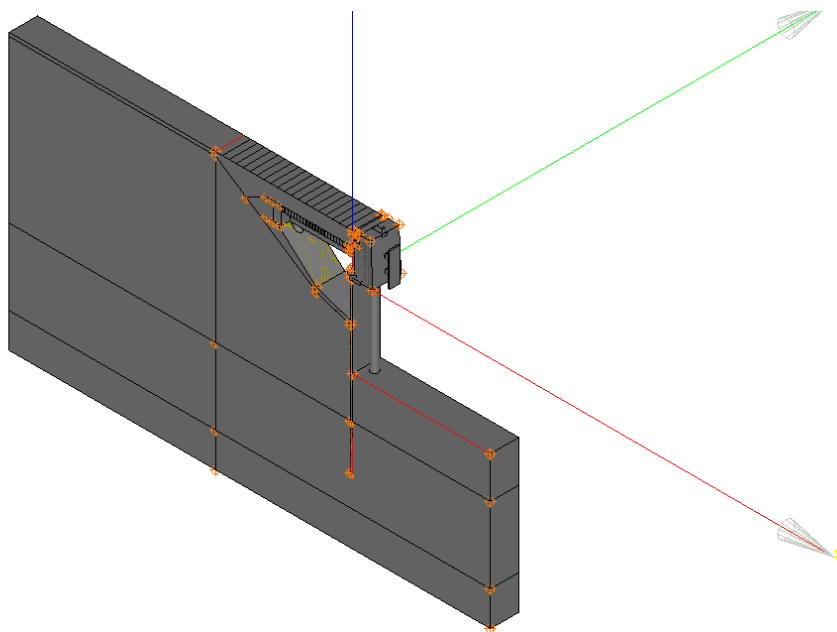


Figura 43. Modelo geométrico da Doca 4.

Condições de apoio:

Após modelada a doca, é necessário definir as condições de apoio sobre as quais o modelo assenta. Desta forma, para simular o contacto com o meio onde a doca está inserida, as faces extremas do modelo, faces externas dos blocos de solo e maciços rochosos (Figura 45 e Figura 46), foram imobilizadas através da imposição de deslocamentos nulos nas mesmas, em todas as direções ($DX = 0$; $DY = 0$; $DZ = 0$) (Figura 44).

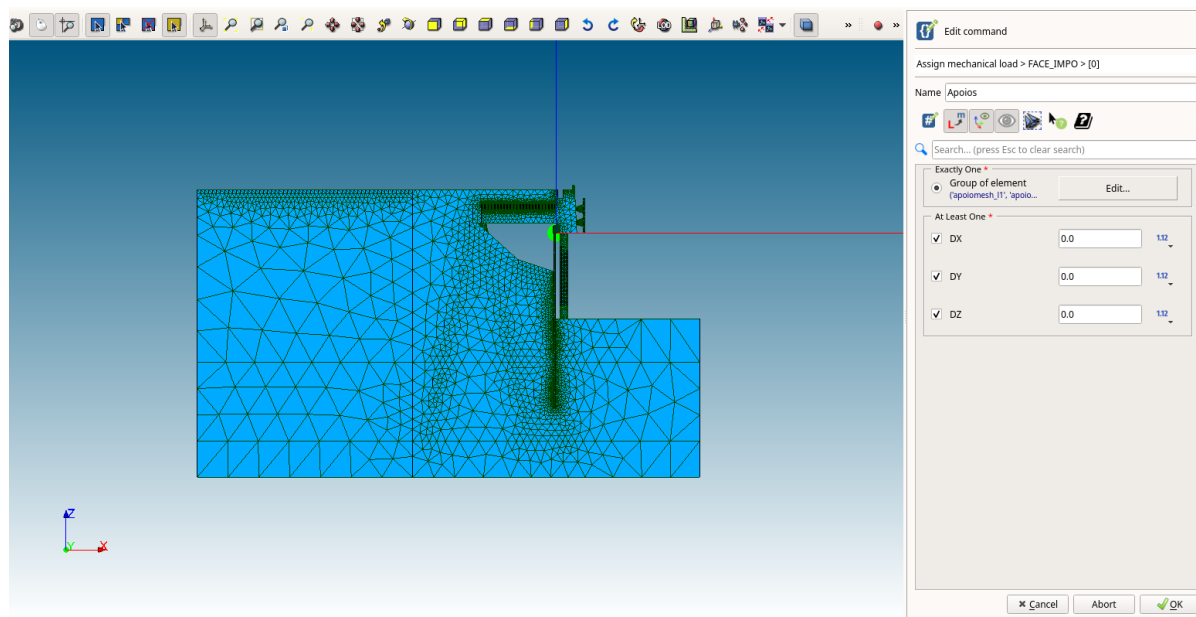


Figura 44. Imposição de deslocamentos nulos nas faces extremas do modelo.

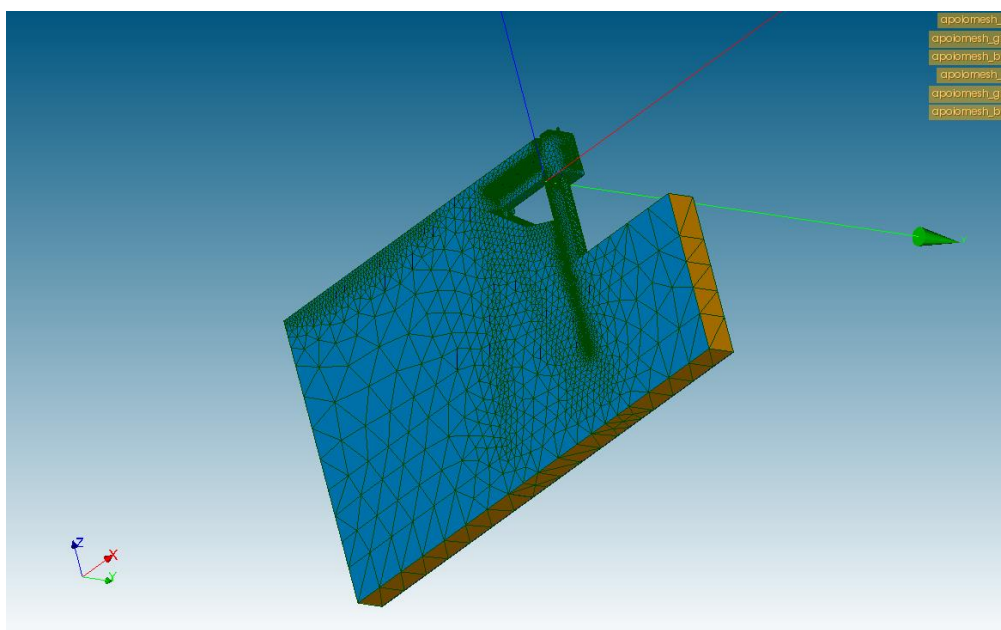


Figura 45. Definição das condições de apoio do modelo: Imobilização das faces extremas do modelo, a amarelo. [1/2].

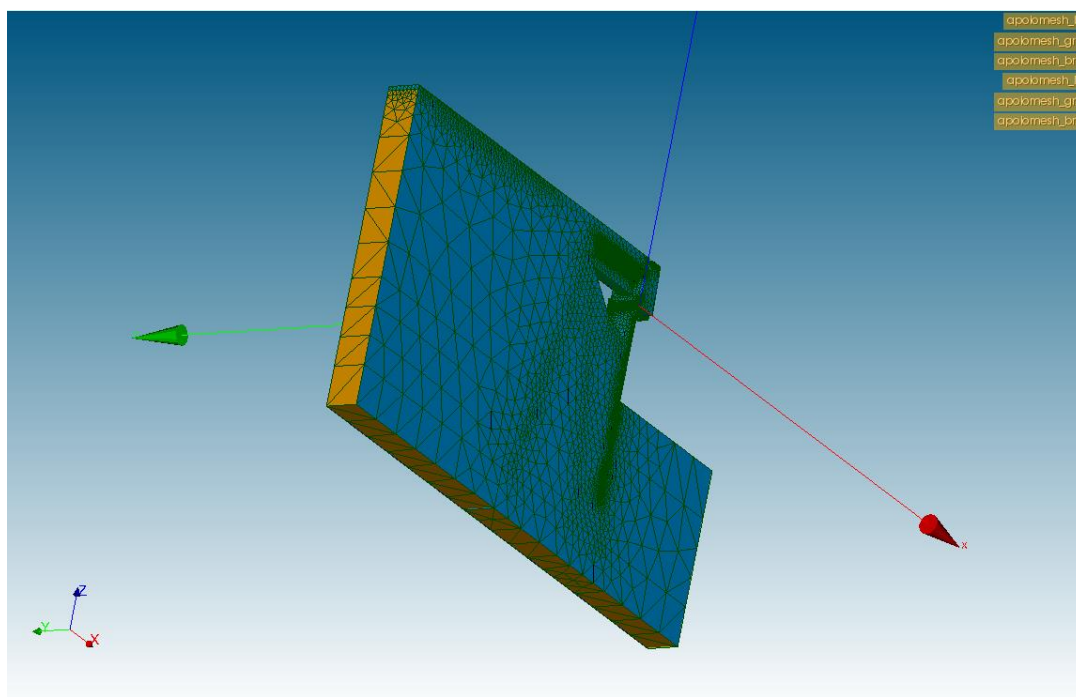


Figura 46. Definição das condições de apoio do modelo: Imobilização das faces extremas do modelo, a amarelo. [2/2]

Desta forma, assumimos o meio externo, que contacta e define a fronteira do modelo, como sendo indeformável e assim constituir uma condição de apoio perfeitamente rígida para que todas as deformações provenientes do peso próprio e das cargas aplicadas no modelo sejam acauteladas dentro do mesmo.

Definição da malha de elementos finitos:

Finalizada a modelação e apoio da Doca 4, resta apenas definir a malha de elementos finitos que povoará o modelo. Na criação de uma malha, a dimensão e quantidade de elementos e nós que a constituem são as características chave que ditarão a qualidade e precisão dos resultados. Quer-se por isto dizer que, quanto menor a dimensão dos elementos, maior o seu número, e consequentemente maior número de nós, melhores serão os resultados finais da análise mecânica do modelo.

Para se evitar um tempo excessivo por corrida de análise, uma forma inteligente de otimizar a qualidade/tempo dos resultados é definir estrategicamente a densidade de nós da malha consoante o nível de interesse na área em questão. Por outras palavras, nas zonas onde se sabe *à priori* que estarão instaladas maiores tensões/deformações, e por isso são o foco da análise, a malha é adensada precisamente para garantir resultados de maior qualidade.

Contrariamente, nas secções do modelo onde são espectáveis menores respostas, a malha encontra-se mais dispersa, e por isso, mais rápida de resolver. Desta forma otimizam-se os tempos por corrida e garantem-se resultados de grande qualidade nas secções críticas do modelo.

Em conformidade com as preocupações expressas, podemos observar na malha final gerada, Figura 47 e Figura 48, que as zonas de maior interesse ao estudo, como é o caso dos grupos e cortinas de estacas, da viga cais onde assenta o cabeço de amarração, das defensas, das vigotas, da viga principal, se encontram num tom verde mais carregado dado o aumento do número de elementos nesta zona, adensando a malha. Este cenário contrasta com as secções mais periferias do modelo onde a densidade da malha é significativamente mais baixa, uma vez que estas não representam zonas onde haja necessidade de obter resultados com tanta qualidade como nos outros elementos de maior interesse supracitados, cujos modos de rutura têm importância chave à estrutura global, pelo que devem ser rigorosamente avaliados.

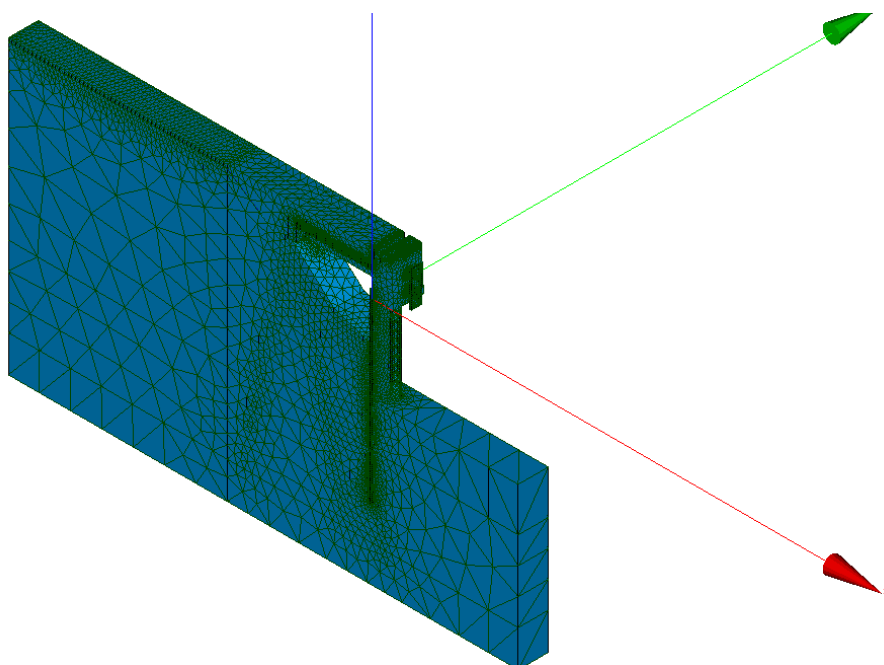


Figura 47. Malha de Elementos Finitos gerada sobre o modelo geométrico ("Mesh1").

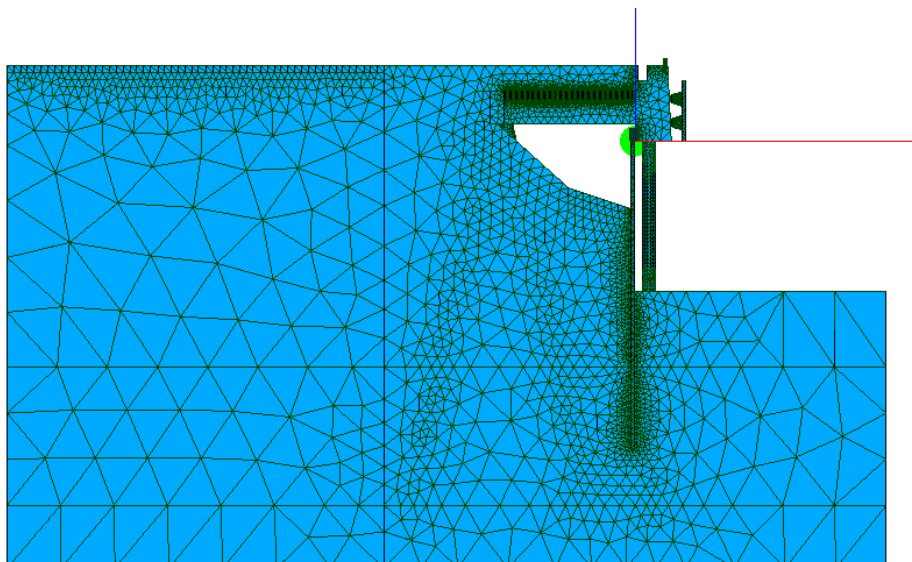


Figura 48. Malha de Elementos Finitos gerada sobre o modelo geométrico ("Mesh1"), em alçado.

Tendo todos estes aspetos em consideração, foi gerada automaticamente, com recurso ao algoritmo *Netgen3d*, Schöberl (1997), uma malha triangular de elementos finitos que já contempla todos os elementos do modelo, sejam eles linhas (elementos 1D), faces (2D) ou volumes (3D), com as seguintes propriedades:

- **Dimensão máxima: 15** - Sendo dimensão máxima a máxima dimensão linear para as células da malha [58];
- **Dimensão mínima: 0.05** - Sendo dimensão mínima a mínima dimensão linear para as células da malha [58];
- **Finura: Moderada** - A seleção da finura permite calibrar o nível de detalhe da malha [58];
- **Malha: Otimizada** - Faz com que o algoritmo modifique inicialmente a malha gerada com fim de melhorar a qualidade dos seus elementos [58];
- **Malha de segunda ordem** - Cria nós intermédios adicionais com fim a ajustar melhor a malha, obtendo resultados mais precisos [58];
- **Malha com dimensão limitada pela curvatura da superfície.**

Com estes parâmetros obteve-se uma malha de elementos finitos, "*Mesh1*" (Figura 49), com:

- **480 398** Pontos Nodais;
- **314 217** Tetraedros do 2º grau.

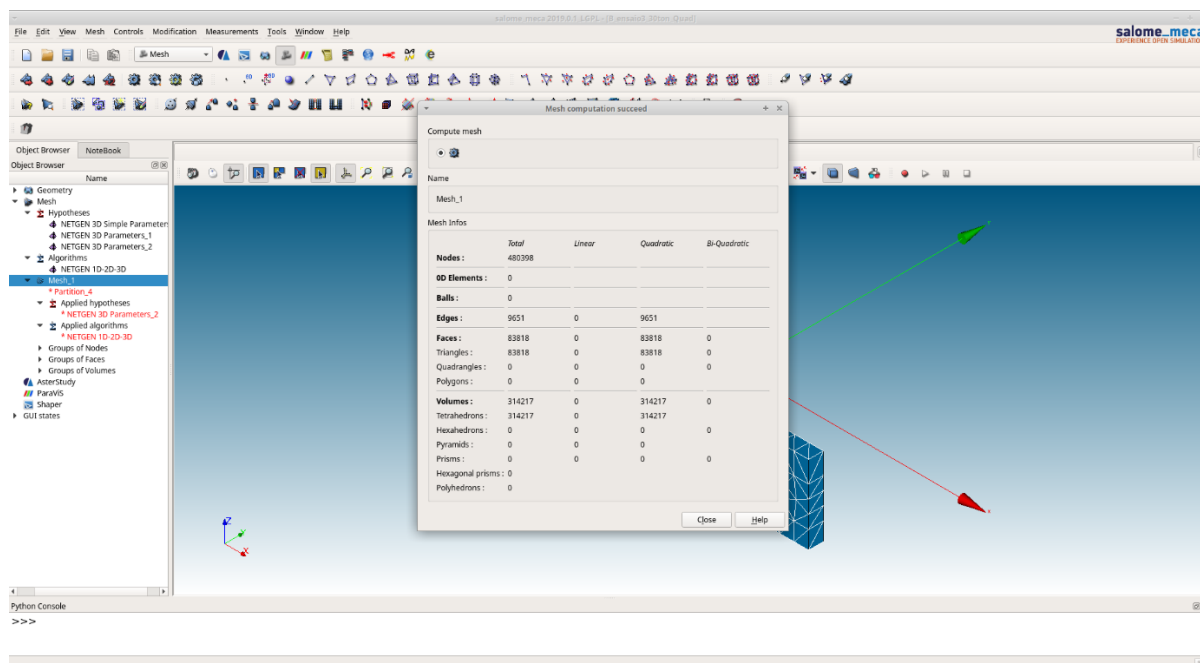


Figura 49. Cálculo da Malha de Elementos Finitos gerada sobre o modelo geométrico através do módulo Mesh do Salome_Meca.

De referir ainda que foram criados dois grandes grupos de ensaios onde se recorreu à *Mesh1* com discretização linear, análise mais rápida, porém resultados menos precisos, e um segundo grupo com discretização quadrática da malha, análises mais demoradas, mas com resultados de maior qualidade. O raciocínio por detrás desta abordagem será descrito com maior detalhe no capítulo afeto à análise dos resultados.

Tendo definidas todas as características geométricas e mecânicas que compõem o modelo, assim como as hipóteses de cálculo adotadas, o próximo subcapítulo dedicar-se-á a explicitar as configurações de todos os cenários de carga simulados nas análises que foram levadas a cabo no presente trabalho.

5.4. Ensaios de simulação de carga na Doca 4

As simulações de carga, desenvolvidas através do método dos elementos finitos, têm como intuito a realização de inúmeros cenários distintos. Estes cenários contam com variabilidade de configuração no posicionamento das cargas, assim como dos valores das mesmas. Variam ainda nas próprias configurações do modelo, consideração dos pesos próprios e restrições de deslocamentos. Todas estas variações têm em vista a obtenção de uma base de dados relativamente extensa, com resultados diversificados, que possam ser integrados na plataforma de gestão da manutenção, alimentando-a. Onde, depois de compilados, será facilmente observável a variação e evolução da resposta da estrutura face ao carregamento aplicado.

Para a organização da variabilidade de cenários em estudo, foram criados três grandes grupos. Estes distinguem-se pelos pesos próprios considerados e encastramento (ou ausência deste) da viga principal no modelo:

- **Grupo 1:** Foi considerado o peso próprio de todos os elementos do modelo;
- **Grupo 2:** Não foi considerado o peso próprio de qualquer elemento do modelo, através da omissão do parâmetro da aceleração gravítica;
- **Grupo 3:** Não foi considerado o peso próprio de qualquer elemento do modelo, através da omissão do parâmetro da aceleração gravítica. Adicionalmente, foram imobilizadas, através dos deslocamentos em todas as direções igualados a zero, as faces extremas/encontros da viga principal onde esta liga à viga-cais e à viga interior, (Figura 50).

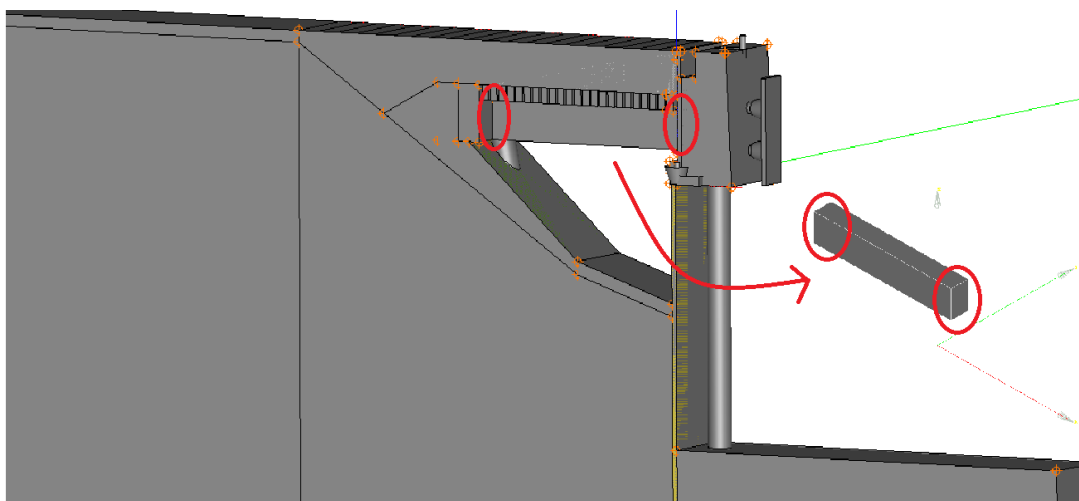


Figura 50. Faces encastradas da viga principal (Grupo 3).

Para fazer um estudo mais focado no comportamento localizado da viga principal, sobre a qual assenta toda a subestrutura do pavimento da Doca 4 e é feita a ligação da estaca frontal ao grupo de estacas em "V", interiores à doca, foi criado um terceiro grupo que se distingue dos restantes pelo aumento da rigidez nas ligações da viga. Esta condição foi conseguida através do encastramento das faces extremas/encontros da viga principal, imobilizando os deslocamentos onde esta se liga à viga-cais e à viga interior, tal como representado na Figura 50.

Na modelação da Doca 4 foi tido em atenção o aspeto do posicionamento das cargas, tendo sido criadas para o efeito um conjunto de 20 "fatias", como pode ser observado na Figura 51, que definem a área sobre a qual é feita a colocação do material a granel. Definindo-se ensaios distintos de posicionamento de cargas uniformemente distribuídas, descritos nos Quadro 7 e Quadro 8, assim como na Figura 52.

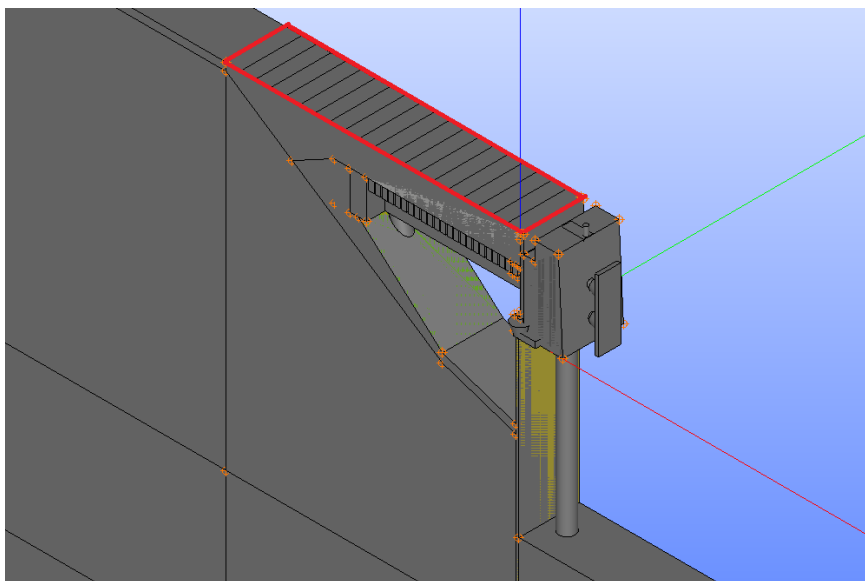


Figura 51. Área de carregamento dividida em 20 “fatias”.

Quadro 7. Listagem de ensaios de carga. [1/2]

Ensaio	Zona Carregada	Fatias Carregadas	Objetivo
Ensaio 1	Meio vão da viga	Fatias 13 a 18	Observar a deformação da viga principal quando a totalidade das cargas é aplicada na zona central do seu vão.
Ensaio 2	Totalidade da viga	Fatias 10 a 20	Observar a deformação da viga principal quando esta é carregada na sua totalidade.
Ensaio 3	Viga e Pavimento	Fatias 1 a 20	Observar a deformação da viga principal e assentamento do pavimento quando carregados na sua totalidade.

Quadro 8. Listagem de ensaios de carga. [2/2]

Ensaio	Zona Carregada	Fatias Carregadas	Objetivo
Ensaio 4	Totalidade até uma distância de 6 metros do tardo do cais.	Fatias 1 a 14	Cenário real: Nos trabalhos de descarregamento de granel na Doca 4, as cargas apenas começam a ser posicionadas a uma distância mínima de 6 metros a partir do tardo do cais.
Ensaio 5	Totalidade até uma distância de 4 metros do tardo do cais.	Fatias 1 a 16	Cenário conservador: Apesar das cargas, formalmente, serem apenas colocadas com uma distância mínima de 6 metros a partir do tardo do cais, para acautelar eventuais desvios/incorrecções do posicionamento da mesma, foram carregados 2 metros adicionais.

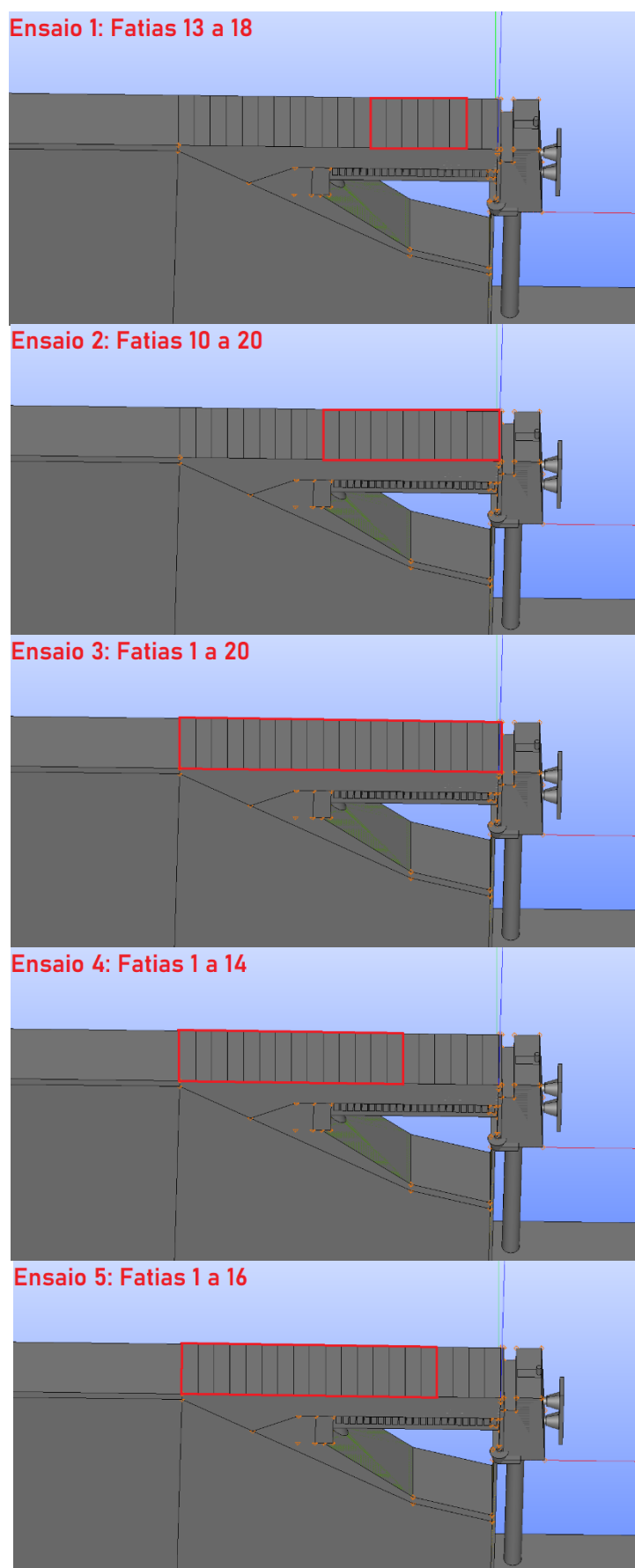


Figura 52. Configuração das áreas carregadas por ensaio.

Em diálogo direto com a APDL foi definido que a carga máxima, a qual é permitida aplicar sobre a Doca 4, são 10 ton/m^2 , ou seja, 100 kN/m^2 . Partindo deste valor de referência, definiu-se que o intervalo de cargas a aplicar nas simulações seria de: 5; 10; 15; 20; 25 e 30 ton/m^2 , por forma a procurar o limite último real da mesma, através da avaliação dos seus respetivos deslocamentos/deformações.

Em síntese, o estudo realizado dividiu-se em 3 grupos que definem as condições iniciais do modelo, em cada um desses três grupos foram corridos os 5 ensaios, que ditam o posicionamento das cargas ao longo da doca, sendo que, cada um desses ensaios foi repetido para todos os valores de carga enunciados, tal como esquematizado na Figura 53. Desta forma, o número de cenários/análises de carga calculados foi de 90, com recurso a uma interpolação linear da malha de elementos finitos.

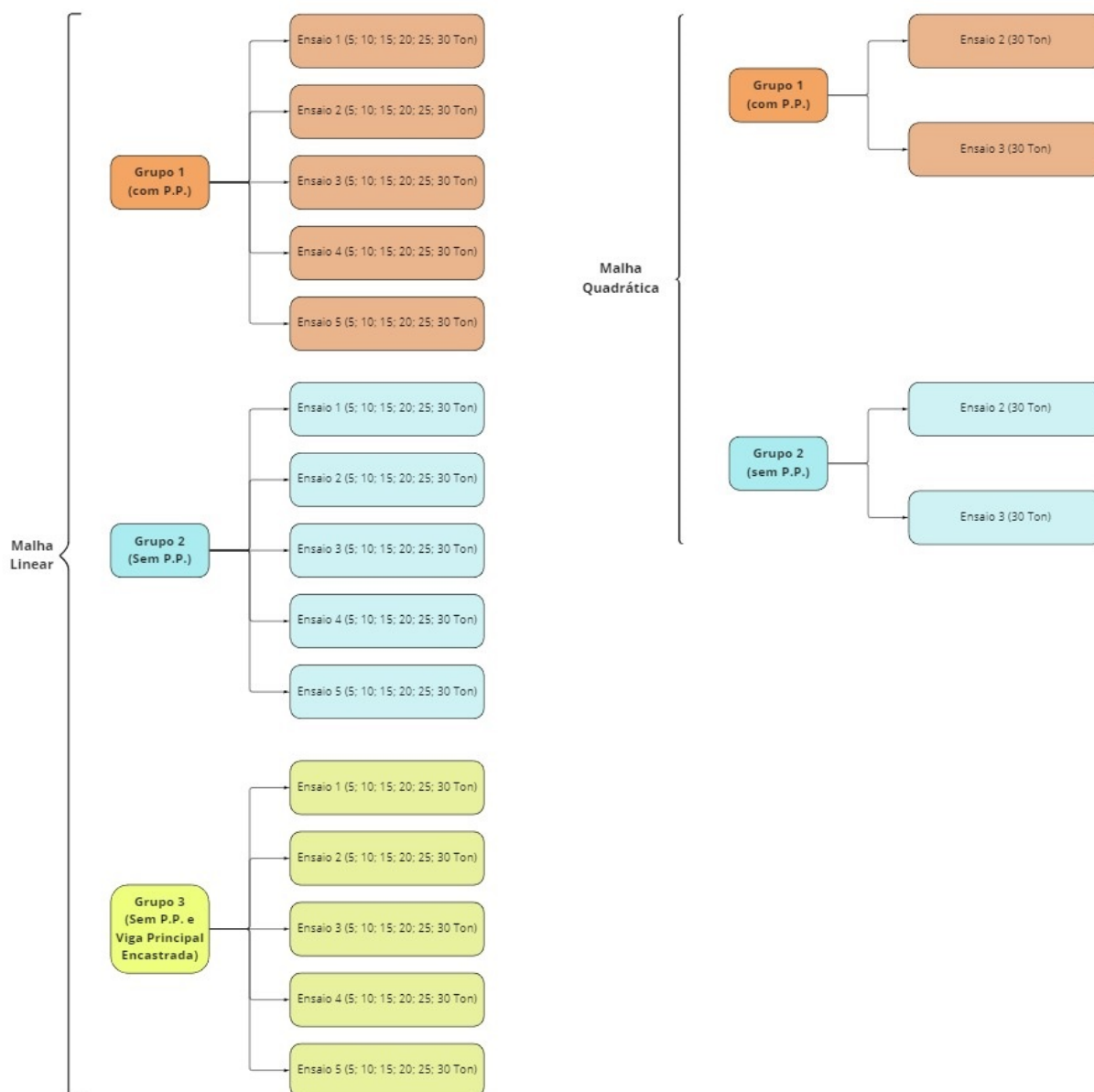


Figura 53. Cenários de carga calculados.

5.4.1. Ajuste ao modelo inicial

Posteriormente, foram repetidos os cenários mais gravosos com recurso a uma interpolação quadrática da malha de elementos finitos. Tratam-se de análises mais demoradas, mas que fornecem resultados mais rigorosos. Foram então repetidos, para condições com e sem peso próprio, o Ensaio 2 (cenário mais gravoso para a viga principal, maiores deformações) para a carga de 30 ton/m² e o Ensaio 3 (cenário mais gravoso para assentamentos no aterro que suporta o pavimento) também para a carga de 30 ton/m².

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos, acompanhados de sua análise e conclusões tiradas dos mesmos.

5.5. Análise de resultados

Em todos os grupos de ensaios, Figura 53, observou-se que, tal como se previu, o "Ensaio 2", cuja carga é aplicada sobre a totalidade da viga principal (fatias 10 a 20), para o valor de 30 ton/m², é o cenário mais gravoso para a viga principal, causando-lhe as maiores deformações verticais. Ao passo que, o "Ensaio 3", cuja carga é aplicada sobre a viga e pavimento, em simultâneo (fatias 1 a 20), para o valor de 30 ton/m², é o cenário mais gravoso para o aterro que se situa imediatamente abaixo do pavimento, causando-lhe os maiores assentamentos.

Dada a preponderância recém exposta dos ensaios 2 e 3, serão estes os alvos da análise de resultados desenvolvida próximos parágrafos, respetivamente. Reserva-se ainda, no final deste subcapítulo, uma apresentação geral e sintetizada dos resultados obtidos na totalidade das análises simuladas.

Relativamente ao Ensaio 2, inserido no Grupo 1, Figura 54, as considerações dos pesos próprios dos elementos do modelo demonstraram que os valores extremos das deformações ocorrem no aterro, fruto da influência conjunta da carga aplicada com a ação do peso próprio sobre este. Obviamente que a preponderância das deformações no aterro, a sua ordem de grandeza, não pode ser diretamente comparada às deformações que ocorrem noutros elementos estruturais, como o caso da viga principal, uma vez que falamos de elementos com valores de rigidez completamente díspares, e que, por consequência, possuem critérios de rotura, de Estado Limite Último e de Serviço, totalmente distintos. Quer isto dizer que, o acomodar de uma deformação/assentamento no aterro na ordem do decímetro pode ser aceitável, no entanto, é completamente inaceitável se nos referirmos à viga principal. Todavia, como o propósito destas análises é uma primeira integração numa plataforma de gestão da manutenção com fim de visualizar de forma expedita o comportamento dos diferentes elementos em função da variação da posição e valor das cargas aplicadas, foi retirado o peso próprio dos elementos nos Grupos 2 e 3, Figura 55 e Figura 56, respetivamente, para ser possível observar diretamente a influência das cargas, isoladamente, aplicadas sobre a doca.

Nos Grupos 2 e 3, Figura 55 e Figura 56, respetivamente, por outro lado, é possível apreciar a deformação na viga principal, que no ensaio do Grupo 2, Figura 55, condições mais próximas da realidade, atinge os 1,8 cm no aterro sobre a viga e está na ordem de grandeza do milímetro na própria, quando sujeita a uma carga de 30 ton/m². É ainda possível observar a influência que a carga aplicada sobre a viga tem nos grupos de estacas que acabam por sofrer também assentamentos na ordem do milímetro.

No Grupo 3, Figura 56, com a consideração de elevada rigidez nos encontros da viga, através do seu encastramento nas extremidades, a deformação resumiu-se, quase na totalidade, à camada de aterro e pavimento que assenta sobre esta, tendo a deformação da viga principal ficado, a meio-vão, abaixo do milímetro, praticamente nula. Os deslocamentos verticais, com sentido positivo nos Grupos 2 e 3, são fruto da não-consideração da ação da gravidade, que dada a sua ordem de grandeza tão reduzida são perfeitamente desprezáveis, de tal modo que, estes valores desaparecem quando a mesma análise é repetida com recurso à malha quadrática.

Ainda no Grupo 2, continua a ser visível a influência das cargas aplicadas sobre a doca nos grupos de estacas, cujos assentamentos aumentam de uma forma quase diretamente proporcional ao aumento do valor da carga distribuída aplicada sobre a doca, como é possível observar quando analisados os resultados do mesmo ensaio para o aumento progressivo de cargas de: 5; 10; 15; 20; 25 e 30 ton/m² (Figura 57).

De seguida apresentam-se os mapas de deformações obtidos nos três grupos para o Ensaio 2. Mencionar que estes resultados foram alcançados com recurso a interpolação linear da malha de elementos finitos.

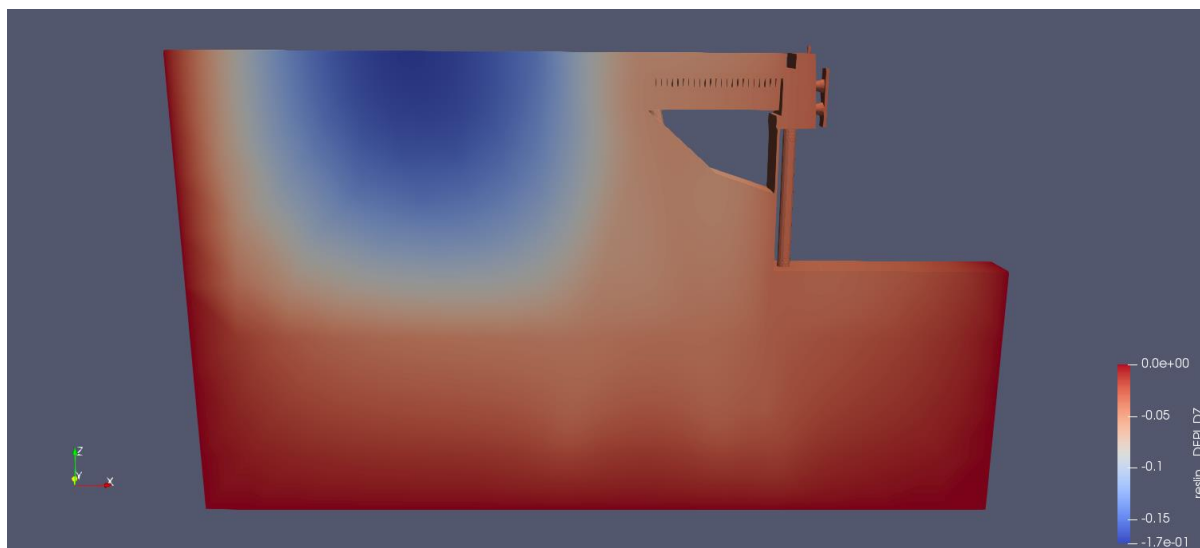


Figura 54. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m²), Grupo 1.

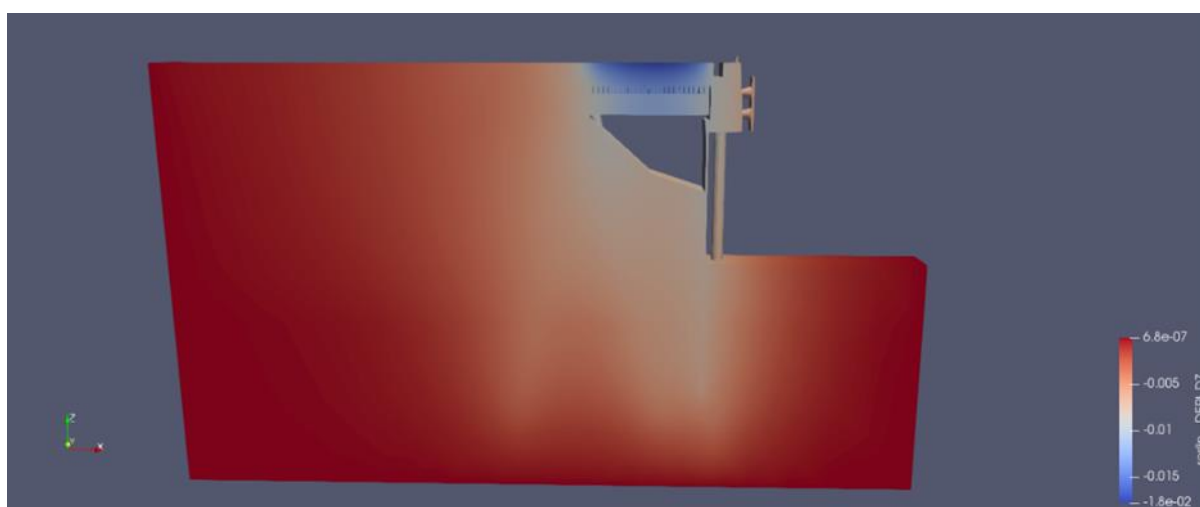


Figura 55. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m²), Grupo 2.

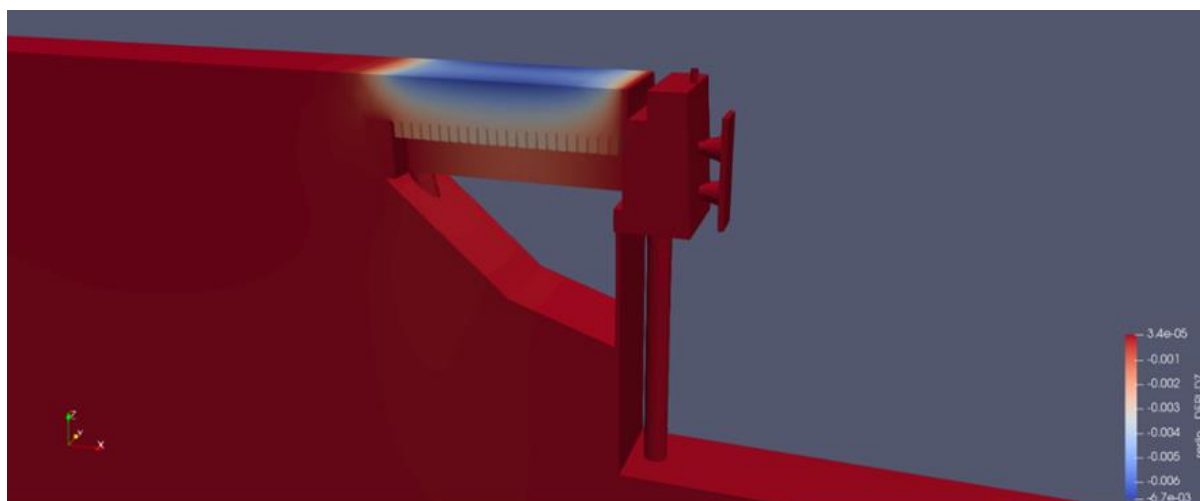


Figura 56. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m2), Grupo 3.

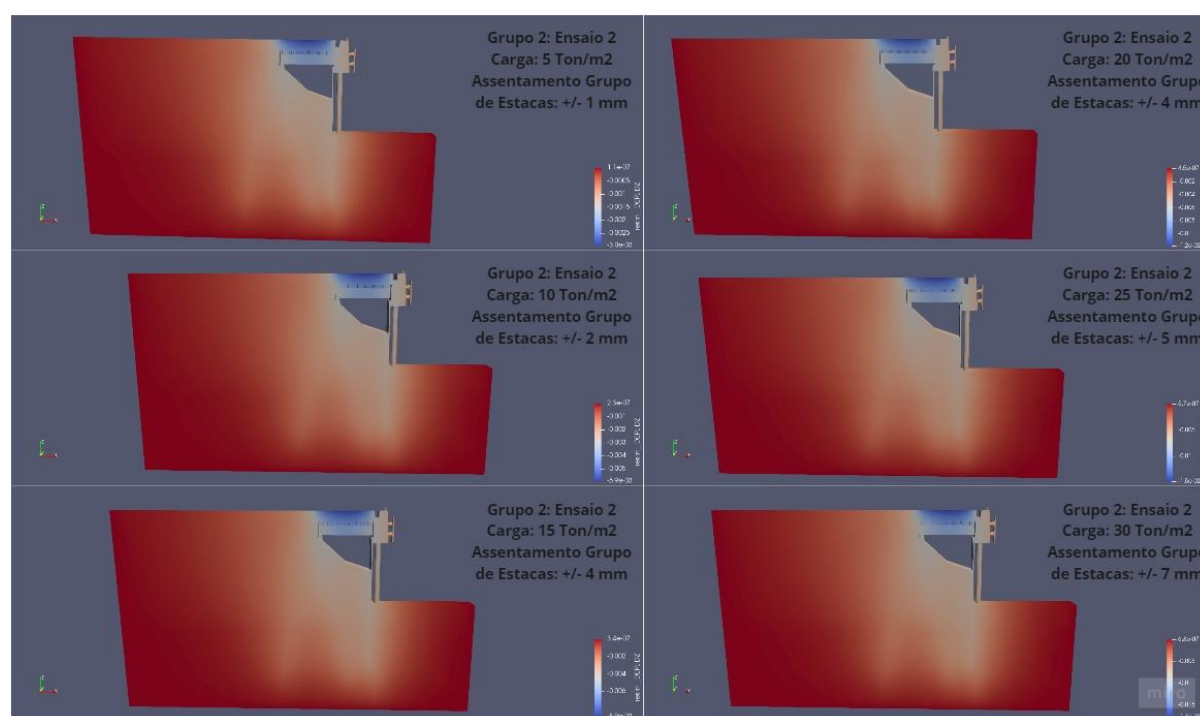


Figura 57. Evolução dos assentamentos, em metros, dos grupos de estacas com o aumento de carga (Grupo 2, Ensaio 2).

Relativamente ao Ensaio 3, os resultados apresentados pelo Grupo 1, Figura 58, têm por base um raciocínio análogo ao descrito para o Ensaio 2. O peso próprio dos elementos, associado ao carregamento mais recuado na doca, assume um papel preponderante no assentamento do aterro. Este reposicionamento da carga gera um pico do assentamento no aterro acrescido de 2 centímetros, passando de 17 para 19 centímetros, do Ensaio 2 (Figura 54) para o Ensaio 3 (Figura 58), respetivamente, relativamente ao Grupo 1.

Em relação ao Grupo 2, Figura 59, apesar dos valores de deformação no pavimento sobre a viga principal continuarem na ordem dos 2 centímetros, o assentamento no aterro assume grande ênfase no espectro de resultados da análise, pois como foi explicitado na discussão de resultados do Ensaio 2, a grande diferença de rigidez dos elementos estruturais, em betão, face ao material do aterro cria esta discrepância em termos de ordem de grandeza nas deformações, no entanto, como referido também, estes valores não podem ser comparados diretamente devido a critérios de rotura, de Estado Limite Último e de Serviço, completamente diferentes entre si. Um mesmo valor de assentamento considerado aceitável no aterro, pode representar uma deformação completamente inaceitável ao nível da viga principal.

Em relação aos resultados obtidos pelo Grupo 3, Figura 60, com a consideração de enorme rigidez nos encontros da viga, com o seu encastramento em ambas a extremidades, este Grupo apresenta deformação nula em termos da viga principal, o que consequentemente levou à não mobilização dos grupos de estacas, que não apresentam qualquer assentamento. O assentamento ao nível do aterro também se mostrou reduzido face aos valores obtidos para o mesmo ensaio no Grupo 2, reduzindo-se de 5,6 para 4,2 centímetros. A origem desta redução de assentamento no aterro pode estar na ausência de sobreposição de efeitos que se dá quando o pavimento (sobre o aterro) assenta em conjunto com a deformação da viga principal.

De seguida apresentam-se os mapas de deformações obtidos nos três grupos para o ensaio 3. Lembrando que estes resultados foram alcançados com recurso a interpolação linear da malha de elementos finitos.

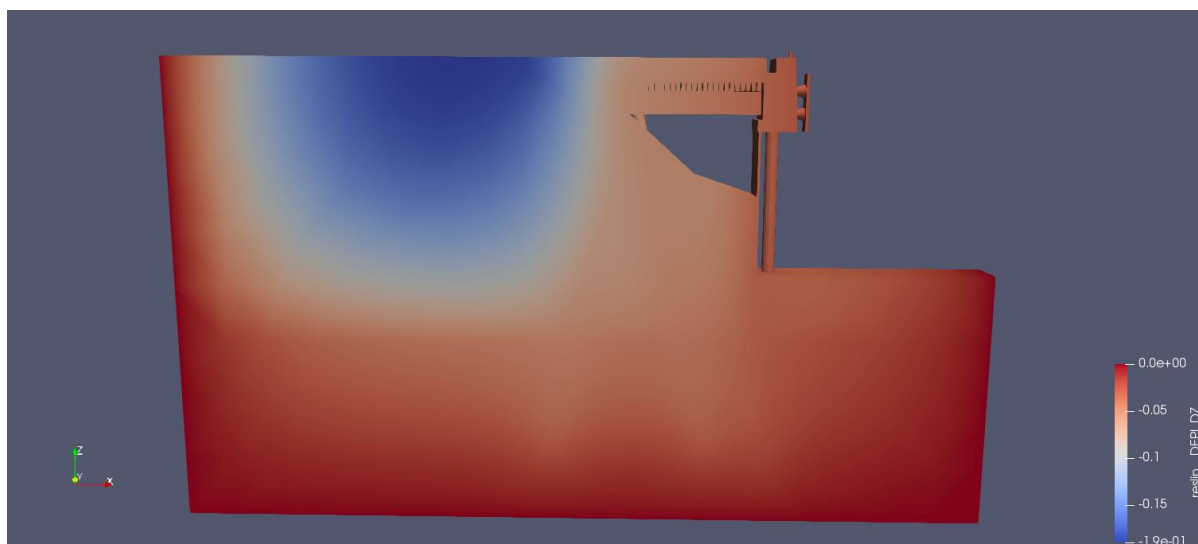


Figura 58. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m²), Grupo 1.

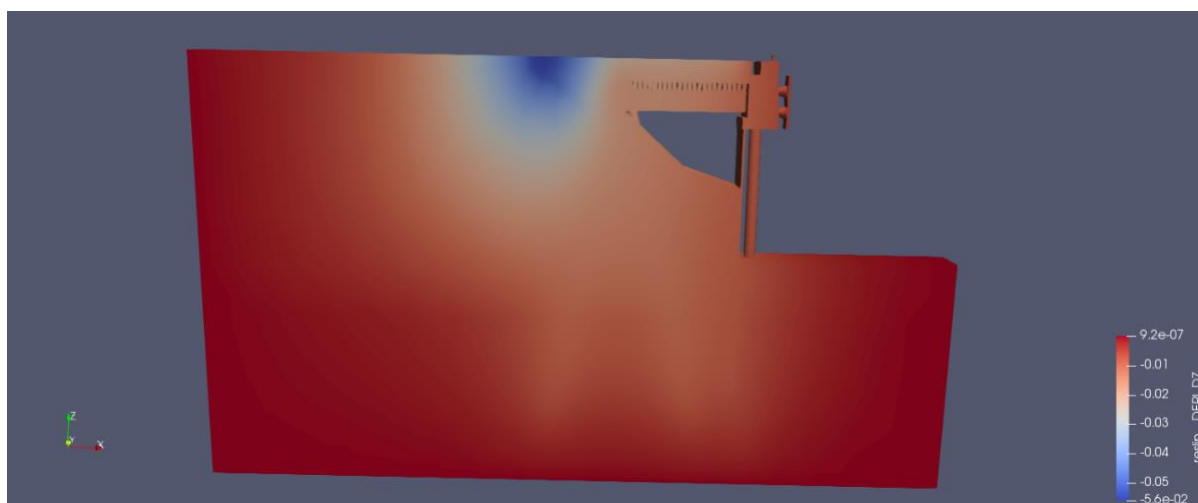


Figura 59. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m²), Grupo 2.

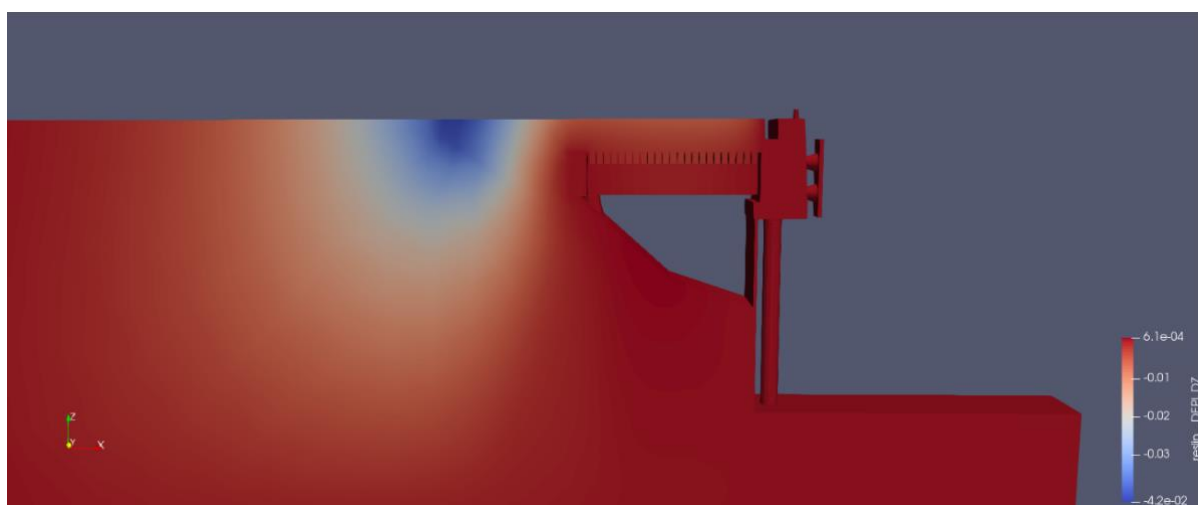


Figura 60. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m²), Grupo 3.

Finalmente, de forma a proporcionar uma visão geral sobre todos os resultados obtidos, apresentam-se nas seguintes imagens, Figura 61, Figura 62 e Figura 63, os valores extremos para cada Grupo em cada um dos cinco ensaios, para todas as cargas aplicadas. Por fim, apresentam-se os gráficos que condensam e estabelecem a comparação dos resultados de cada ensaio, ao longo de todas as cargas analisadas dentro do respetivo Grupo, Figura 64, Figura 65 e Figura 66.

Grupo 1 : Ensaio 1			Grupo 1 : Ensaio 2			Grupo 1 : Ensaio 3			Grupo 1 : Ensaio 4		
Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)
(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)
5	-1,70E-01	0,00E+00	5	-1,70E-01	0,00E+00	5	-1,70E-01	0,00E+00	5	-1,70E-01	0,00E+00
10	-1,70E-01	0,00E+00	10	-1,70E-01	0,00E+00	10	-1,80E-01	0,00E+00	10	-1,80E-01	0,00E+00
15	-1,70E-01	0,00E+00	15	-1,70E-01	0,00E+00	15	-1,80E-01	0,00E+00	15	-1,80E-01	0,00E+00
20	-1,70E-01	0,00E+00	20	-1,70E-01	0,00E+00	20	-1,80E-01	0,00E+00	20	-1,80E-01	0,00E+00
25	-1,70E-01	0,00E+00	25	-1,70E-01	0,00E+00	25	-1,90E-01	0,00E+00	25	-1,90E-01	0,00E+00
30	-1,70E-01	0,00E+00	30	-1,70E-01	0,00E+00	30	-1,90E-01	0,00E+00	30	-1,90E-01	0,00E+00

Figura 61. Resultados extremos das deformações para o Grupo 1.

Grupo 2 : Ensaio 1			Grupo 2 : Ensaio 2			Grupo 2 : Ensaio 3		
Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)
(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)
5	-2,20E-03	6,40E-08	5	-3,00E-03	1,10E-07	5	-9,40E-03	1,50E-07
10	-4,40E-03	1,30E-07	10	-5,90E-03	2,30E-07	10	-1,90E-02	3,10E-07
15	-6,50E-03	1,90E-07	15	-8,90E-03	3,40E-07	15	-2,80E-02	4,60E-07
20	-8,70E-03	2,60E-07	20	-1,20E-02	4,50E-07	20	-3,70E-02	6,20E-07
25	-1,10E-02	3,20E-07	25	-1,50E-02	5,70E-07	25	-4,70E-02	7,70E-07
30	-1,30E-02	3,80E-07	30	-1,80E-02	6,80E-07	30	-5,60E-02	9,20E-07

Grupo 2 : Ensaio 4			Grupo 2 : Ensaio 5		
Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)
(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)
5	-9,20E-03	8,60E-08	5	-9,30E-03	1,10E-07
10	-1,80E-02	1,70E-07	10	-1,90E-02	2,10E-07
15	-2,80E-02	2,60E-07	15	-2,80E-02	3,20E-07
20	-3,70E-02	3,50E-07	20	-3,70E-02	4,30E-07
25	-4,60E-02	4,30E-07	25	-4,60E-02	5,30E-07
30	-5,50E-02	5,20E-07	30	-5,60E-02	6,40E-07

Figura 62. Resultados extremos das deformações para o Grupo 2.

Grupo 3 : Ensaio 1			Grupo 3 : Ensaio 2			Grupo 3 : Ensaio 3		
Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)
(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)
5	-1,10E-03	9,40E-06	5	-1,10E-03	5,60E-06	5	-7,00E-03	1,00E-04
10	-2,20E-03	1,90E-05	10	-2,20E-03	1,10E-05	10	-1,40E-02	2,00E-04
15	-3,30E-03	2,80E-05	15	-3,30E-03	1,70E-05	15	-2,10E-02	3,00E-04
20	-4,40E-03	3,80E-05	20	-4,50E-03	2,30E-05	20	-2,80E-02	4,00E-04
25	-5,50E-03	4,70E-05	25	-5,60E-03	2,80E-05	25	-3,50E-02	5,10E-04
30	-6,60E-03	5,70E-05	30	-6,70E-03	3,40E-05	30	-4,20E-02	6,10E-04

Grupo 3 : Ensaio 4			Grupo 3 : Ensaio 5		
Carga	DZ (máx)	DZ (min)	Carga	DZ (máx)	DZ (min)
(Ton)	(m)	(m)	(Ton)	(m)	(m)
5	-7,10E-03	1,00E-04	5	-7,10E-03	1,00E-04
10	-1,40E-02	2,10E-04	10	-1,40E-02	2,10E-04
15	-2,10E-02	3,10E-04	15	-2,10E-02	3,10E-04
20	-2,80E-02	4,20E-04	20	-2,80E-02	4,10E-04
25	-3,50E-02	5,20E-04	25	-3,50E-02	5,10E-04
30	-4,20E-02	6,30E-04	30	-4,20E-02	6,20E-04

Figura 63. Resultados extremos das deformações para o Grupo 3.

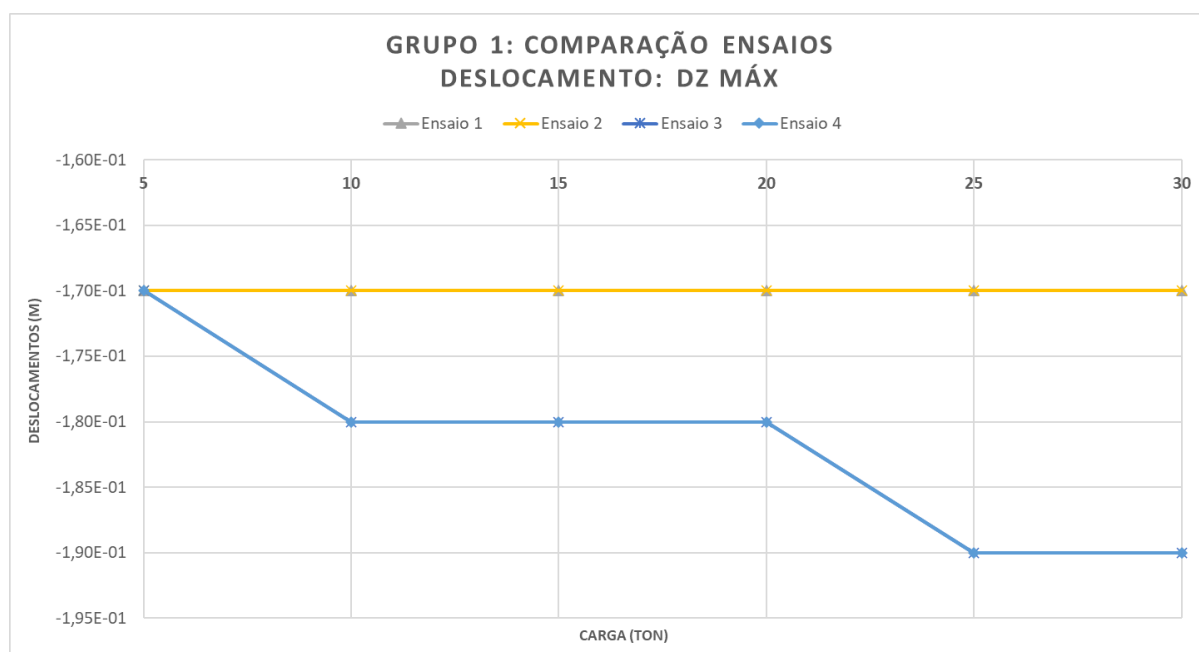


Figura 64. Comparação dos resultados dos ensaios para o Grupo 1.

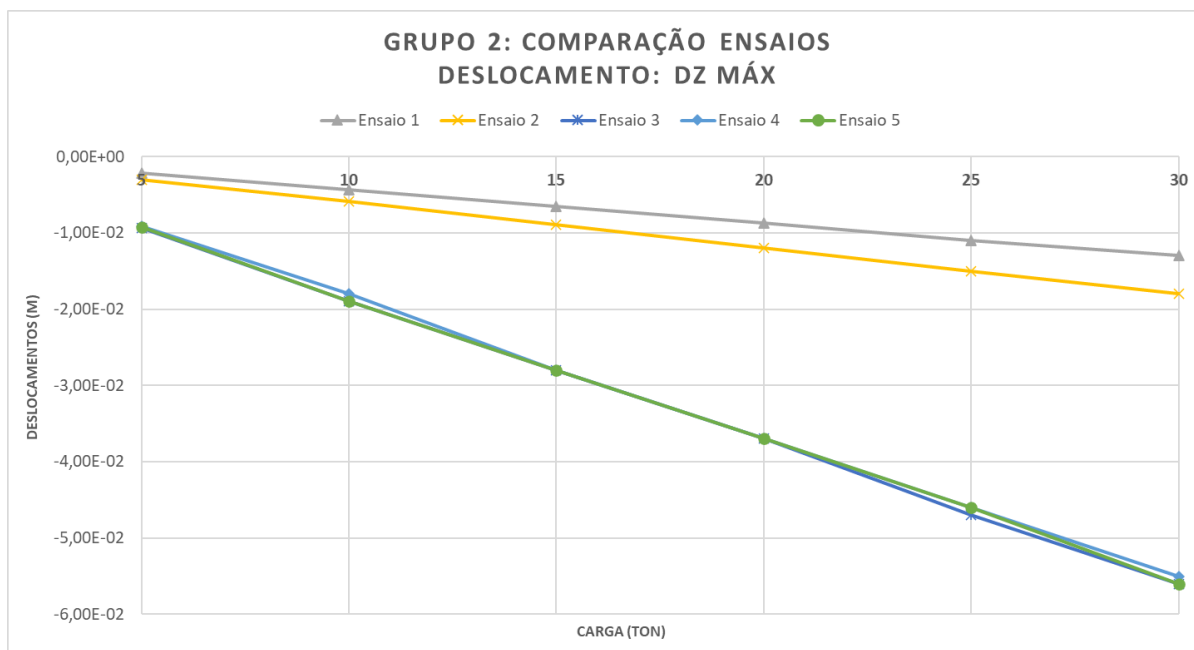


Figura 65. Comparação dos resultados dos ensaios para o Grupo 2.

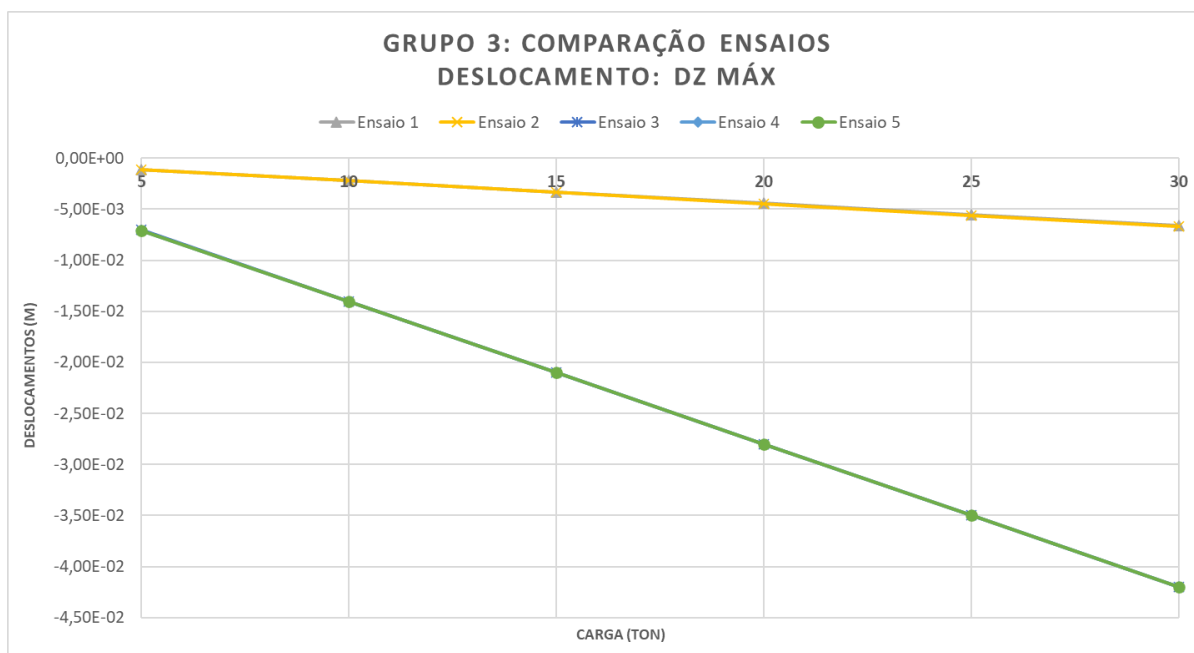


Figura 66. Comparação dos resultados dos ensaios para o Grupo 3.

Como afirmado anteriormente, os ensaios que resultaram nos cenários mais gravosos em termos de deformações tiveram o seu cálculo repetido com recurso, desta vez, a uma interpolação quadrática, que graças à interpolação não-linear que estabelece entre os nós da malha fornece resultados mais precisos que aqueles obtidos através da análise com malha interpolada linearmente. Assim, foram repetidos os ensaios 2 e 3 (com carga de 30 ton/m²) dos Grupos 1 e 2, para confirmação de resultados, Figura 67 até Figura 70.

Por fim, foram sumariados e comparados os resultados obtidos através da interpolação linear da malha com os obtidos através da respetiva quadrática, Quadro 9. É possível observar que os resultados convergem, quase em absoluto, não tendo ficado nenhum ensaio com uma diferença superior a 10%, garantindo a fiabilidade e confiança nos resultados obtidos nos ensaios corridos com recurso à interpolação linear entre os nós da malha.

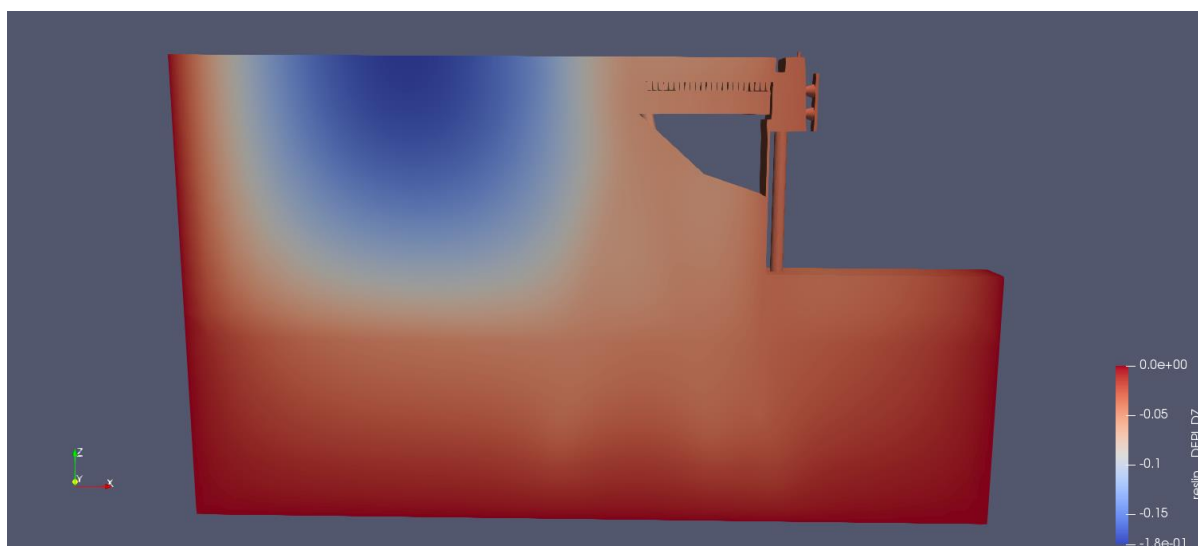


Figura 67. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m2), Grupo 1 (Interpolação Quadrática).

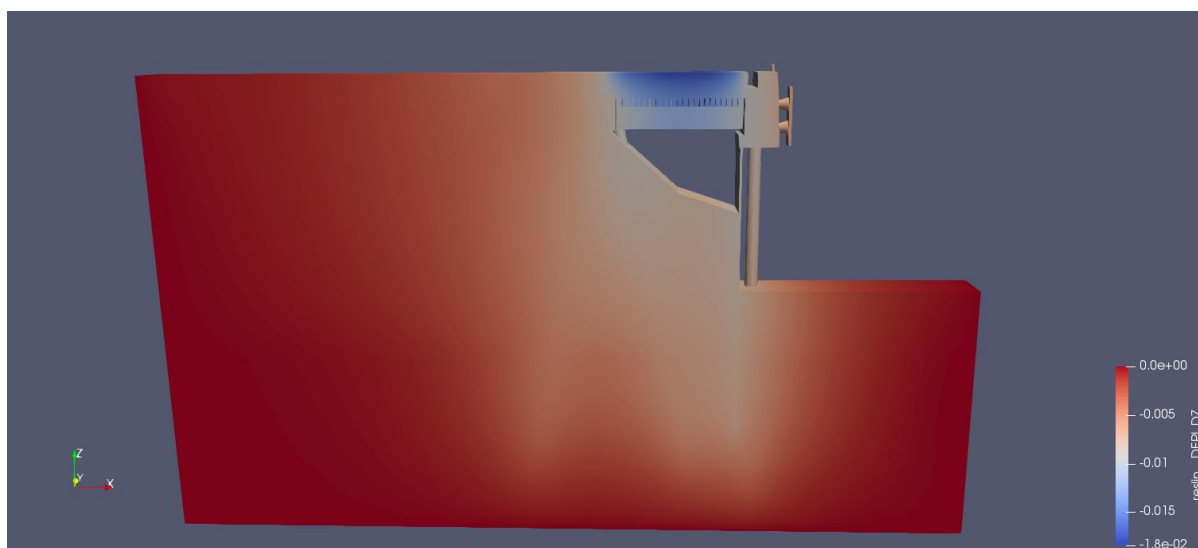


Figura 68. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 2 (30 ton/m2), Grupo 2 (Interpolação Quadrática).

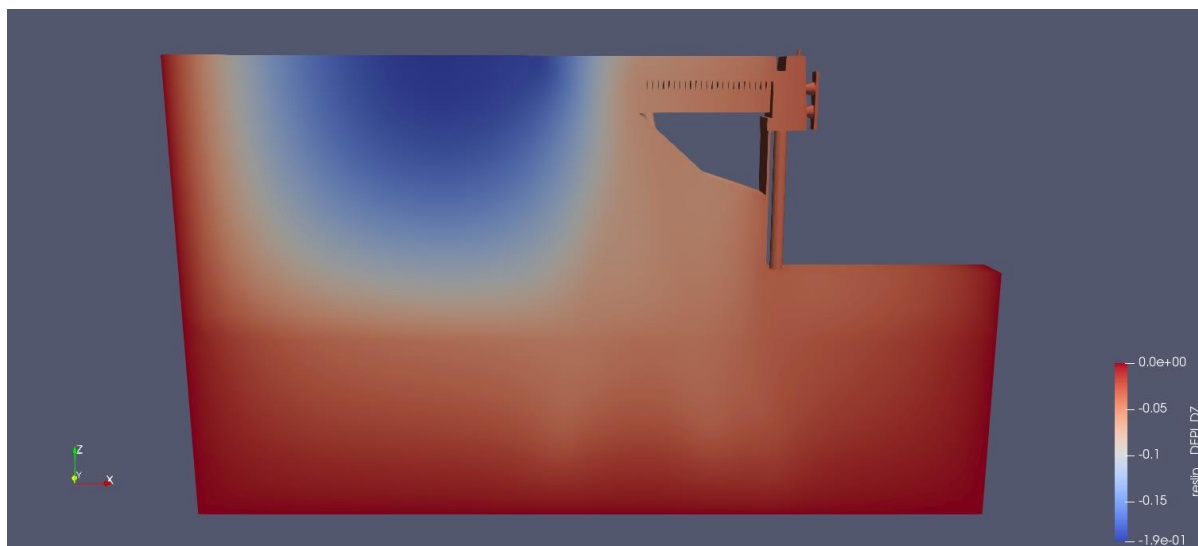


Figura 69. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m2), Grupo 1 (Interpolação Quadrática).

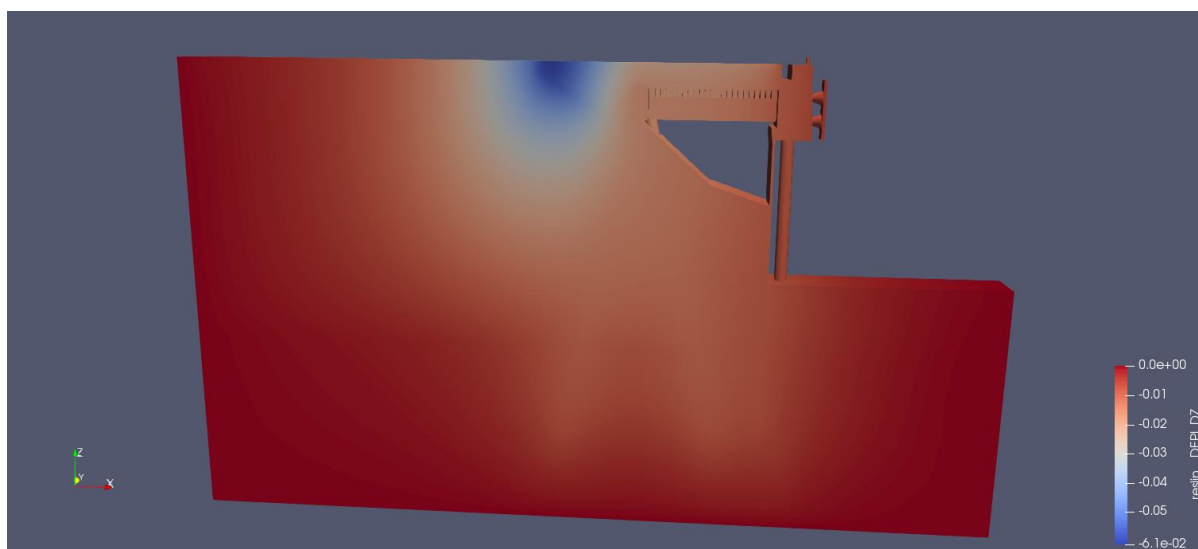


Figura 70. Mapa de deformação, em metros, para Ensaio 3 (30 ton/m2), Grupo 2 (Interpolação Quadrática).

Quadro 9. Comparação de resultados entre interpolação linear e quadrática da malha.

Valores DZ Máx: Ensaio 2 (30 ton/m²)			
	Int. Linear	Int. Quadrática	Diferença
Grupo 1	-0,17 m	-0,18 m	5,6 %
Grupo 2	-0,018 m	-0,018 m	0 %
Valores DZ Máx: Ensaio 3 (30 ton/m²)			
	Int. Linear	Int. Quadrática	Diferença
Grupo 1	-0,19 m	-0,19 m	0 %
Grupo 2	-0,056 m	-0,061 m	8,2 %

Finalmente, obtidos todos os resultados dos ensaios, estes serão agora integrados na Plataforma de Gestão da Manutenção, acompanhados do modelo da Doca 4. Uma vez integrados, será a interface da plataforma a garantir o acesso a toda a informação afeta ao ativo, incluindo todos os cenários de simulação, obtendo-se assim uma ferramenta de gestão preditiva e integrada da manutenção.

5.6. Integração de modelos na Plataforma de Gestão da Manutenção

5.6.1. Criação e funcionamento da Plataforma de Gestão da Manutenção

Com o intuito de fazer uma gestão inteligente, eficaz, integral e colaborativa da manutenção, esta deve ser baseada numa ferramenta unificada, sendo desenvolvidos os trabalhos de todas as entidades gestoras com recurso a uma única interface. Para esse efeito, foi criada pela empresa *3Maps* uma plataforma que integra as ferramentas de gestão desenvolvidas ao longo de todo o projeto GIIP (Gestão Inteligente de Infraestruturas Portuárias).

A plataforma criada tem por isso a função de acoplar as múltiplas ferramentas e modelos com o intuito final de estabelecer o seu funcionamento simultâneo conjunto. A base desta plataforma trata-se de um visualizador, com capacidades de edição, incluindo georreferenciação. A solução que se preconizou foi de uma aplicação Web multiplataforma que possui todos os requisitos base de uma plataforma BIM *standard*, além de permitir georreferenciar documentos *Industry Foundation Classes (IFC)* utilizando ortofotomapas e acesso gratuito à cartografia base disponível globalmente. Todos os componentes da solução foram desenvolvidos utilizando tecnologias *open-source* e de acesso universal gratuito.

A plataforma em desenvolvimento tem por base o conceito do *Digital Twin* na construção, dispondo de modelos digitais 3D, permanentemente atualizados, incrementados com informação, que permita o conhecimento da realidade da obra em *back-office*, em tempo real, e facilite a tomada de decisão, incluindo o ajuste constante da alocação de recursos e o desenvolvimento dos processos de produção em condições ótimas e a sobreposição do domínio virtual com o domínio físico.

As fontes de informação, assim como os motores que farão o tratamento da mesma, serão da mais variada natureza. A plataforma de gestão criada deve servir como uma interface de acesso única, gerindo e garantindo a interação e interoperabilidade entre toda a informação recebida, assim como do funcionamento conjunto de todos os motores que gerem essa mesma informação.

Num estado final de desenvolvimento, a plataforma deve integrar e permitir às ferramentas de gestão desempenharem as seguintes funções:

- **Motores de tratamento e gestão da informação:**

- **Plataforma SIG:**

A plataforma de gestão criada deve possuir, no seu cerne, uma plataforma SIG, com acesso ao contexto geográfico, numa escala macro, à doca e a todo o Porto de Leixões.

Possuir bases de dados dinâmicas com aptidão para gerirem e trabalharem as mais variadas coletas de informação geo-localizada. Deve também permitir a integração do modelo BIM, a receção e gestão dos dados recolhidos dos sensores colocados *in situ*, montados nos cabeços de amarração.

- **Modelo BIM:**

O modelo BIM da doca/porto deve ser exportado no formato interoperável IFC e ser integrado na plataforma SIG da plataforma de gestão, com georreferenciação do modelo. Neste modelo tridimensional devem estar contidas todas as informações geométricas e semânticas da doca/porto, servindo como uma base de dados de toda a informação interna das

estruturas. Este deve também ser editável, no sentido de ser possível atualizar o modelo de forma a garantir a sua coerência com a realidade *in situ* dos ativos.

Toda a informação presente neste modelo deve estar disponível para interagir, bidireccionalmente, com as restantes ferramentas de gestão da plataforma, quer sendo o modelo BIM a alimentar as restantes ferramentas com informação, quer sendo o modelo atualizado com as informações provenientes das mesmas.

- **Modelos Preditivos:**

Os modelos preditivos devem estar integrados na plataforma de gestão criada e interagirem como recetores e fontes de informação. Estes devem ser alimentados através das bases de dados SIG, assim como pelos dados dos sensores que estão emparelhados com a plataforma, sendo usados como fontes de informação dinâmica e em tempo-real, indispensáveis para o ajuste dos modelos preditivos à realidade (em constante variação) da doca/porto. Devem também usar a base de dados do IFC como fonte de informação, geométrica e mecânica, e usar o modelo 3D como uma interface visual e intuitiva para expor os resultados e avisos.

- **Fontes de informação (Inputs para as ferramentas de gestão):**

- **Dados dos sensores colocados nos cabeços de amarração:**

Devem ser transmitidos e armazenados na plataforma criada, servindo como *inputs* para os modelos preditivos, assim como estabelecerem os valores de entrada das ações em possíveis análises mecânicas a serem feitas sobre o modelo da doca, como por exemplo, análises de capacidade de carga com recurso ao método dos elementos finitos.

- **Inspeções periódicas, visuais e de outra natureza:**

Devem ser utilizadas para atualizar o estado de conservação atual quer no modelo BIM, quer nos modelos preditivos. Devem ainda ser comparados os

valores registados, realidade das estruturas inspecionadas, com as previsões feitas pelos modelos preditivos, de forma a viabilizar os seus resultados.

- **Manutenções, reparações e alterações executadas na doca/porto:**

Devem ser utilizadas como fontes de informação para atualização do modelo BIM por forma ao mesmo ser editado/atualizado com fim a manter-se uma representação, um "*twiin*", coerente com a realidade existente *in situ*. Estas intervenções na doca/porto devem ser registadas no respetivo modelo BIM, utilizando-o também como uma base de dados de todo o histórico de intervenções.

De seguida, na Figura 71, apresenta-se um resumo esquemático do funcionamento da plataforma de gestão da manutenção.

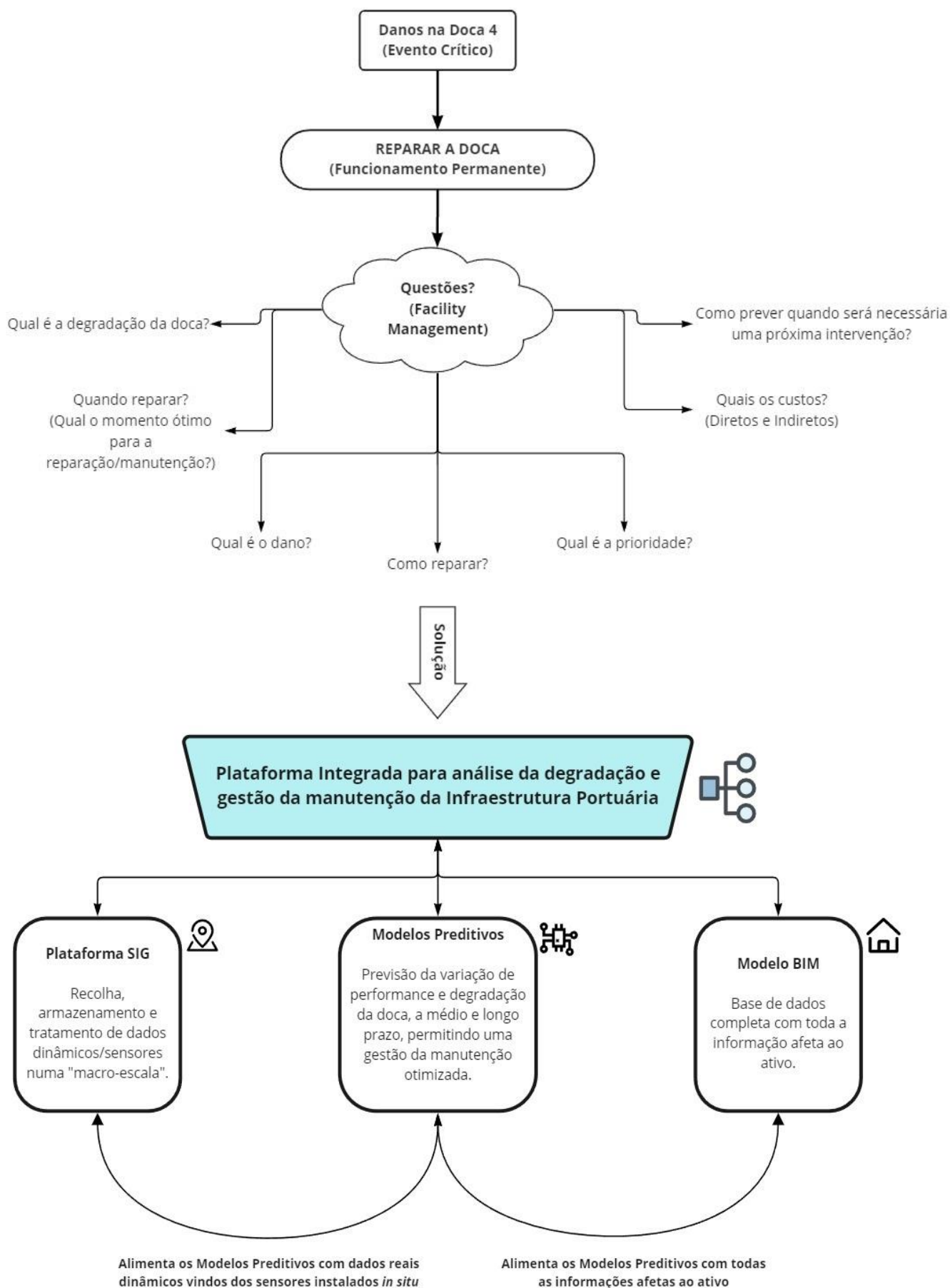


Figura 71. Esquema resumo do funcionamento da Plataforma de Gestão da Manutenção.

5.6.2. Integração do Modelo da Doca 4 na Plataforma de Gestão da Manutenção

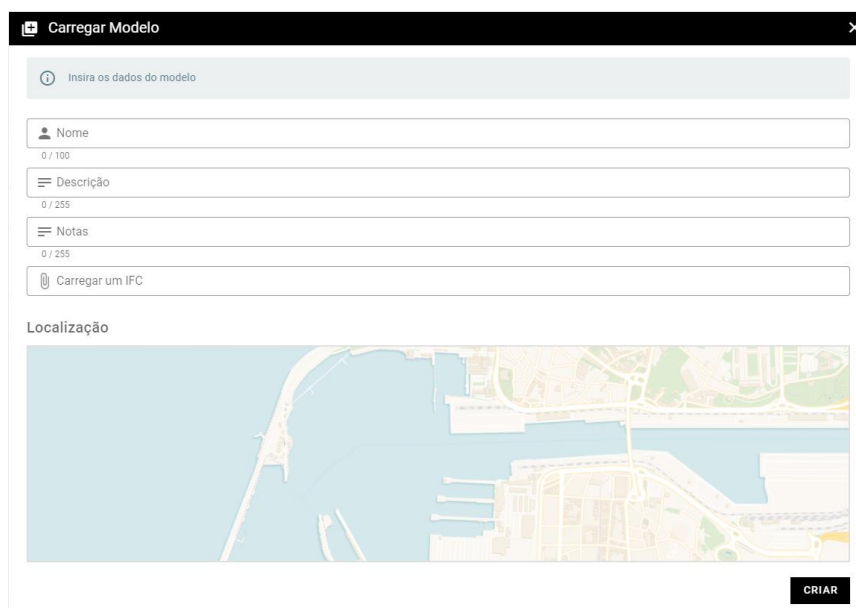
Após se registrar e entrar na plataforma, a primeira funcionalidade que surge ao utilizador é a criação de projeto, que consiste no preenchimento de vários formulários com os detalhes, fases, especialidades e funções específicas de um projeto multidisciplinar (Figura 72).

Figura 72. Formulário para a criação de um novo projeto [59].

Concluindo a criação do projeto, o utilizador pode entrar na pasta do projeto e modificar a sua informação ou até eliminar o próprio projeto (Figura 73).

Figura 73. Página de informações do projeto [59].

Dentro de cada projeto multidisciplinar há uma secção "Modelos" que contém o "Navegador de Modelos", a árvore de modelos que está dividida por fases e especialidades, sendo possível carregar modelos IFC nas especialidades existentes. Ao carregar um modelo no projeto é necessário preencher um formulário com os dados do modelo: o nome, a descrição, algumas notas sobre o modelo (opcional), a sua localização e o ficheiro IFC (Figura 74).



O formulário "Carregar Modelo" apresenta os seguintes campos:

- Insira os dados do modelo (título informativo)
- Nome (campo de texto, limite 0 / 100)
- Descrição (campo de texto, limite 0 / 255)
- Notas (campo de texto, limite 0 / 255)
- Carregar um IFC (botão de upload)
- Localização (mapa de satélite)
- Botão "CRIAR" (preto)

Figura 74. Formulário para o carregamento de um modelo IFC [59].

Após o preenchimento dos parâmetros de entrada e processos supracitados, foi carregado o modelo da Doca 4 na plataforma (Figura 75).

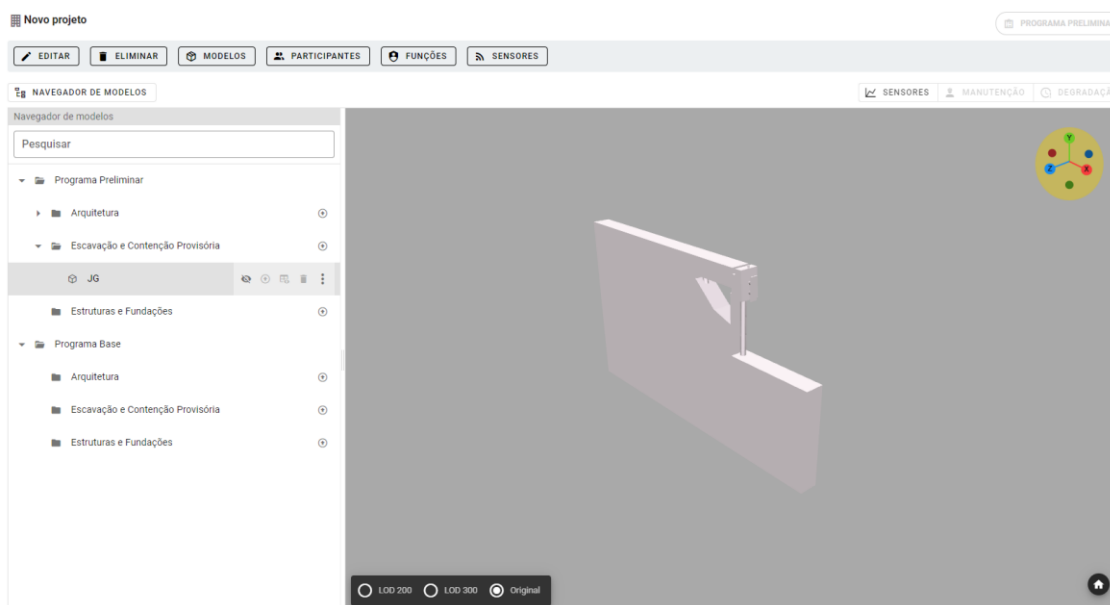


Figura 75. Modelo IFC da Doca 4 carregado na Plataforma de Gestão.

Na interface da plataforma, Figura 75, é possível observar um painel, barra a cinza sombreado, com seis botões. Ao nível das funcionalidades, a plataforma permite:

Visualizar modelos: Permite visualizar os modelos IFC numa cena 3D e controlar o modelo com o auxílio de controlos de arrastar, ampliar/reduzir e rodar. Sendo possível ainda alternar entre níveis de detalhe, LOD 200 e LOD 300.

Carregar revisões do modelo: Permite carregar versões modificadas do modelo atualmente carregado, através do preenchimento de um formulário que consiste num novo modelo IFC e notas sobre o modelo (opcional).

Consultar revisões de modelos: Permite consultar e descarregar todas as revisões do modelo atualmente carregado, podendo pesquisar pelo nome do ficheiro, pelas notas ou data de criação da revisão.

Eliminar modelos: Permite remover o modelo e as suas revisões do projeto.

Abrir o modelo no editor e abrir o modelo no visualizador: Redireciona o utilizador para o editor/visualizador, abrindo o modelo escolhido na aplicação (Figura 76).

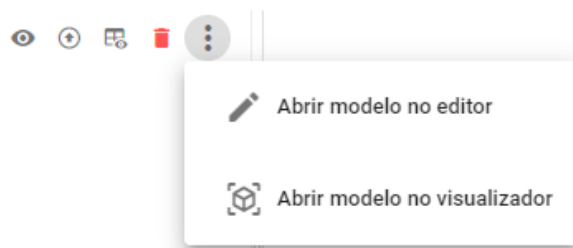


Figura 76. Botões com funcionalidades de um modelo [59].

A plataforma conta ainda com um editor, onde o utilizador tem acesso às seguintes funcionalidades:

Georreferenciar: Modificar ou adicionar as coordenadas do modelo com auxílio de um mapa de fundo através do preenchimento de um formulário com latitude, longitude e elevação (Figura 77).

Adicionar e remover elementos: Adicionar elementos IFC através de um catálogo com modelos, remover elementos selecionando o elemento pretendido e escolher a opção de remover.

Edição da Geometria e Propriedades: Ao selecionar um elemento é possível mudar a sua posição, a rotação, a escala, como também os detalhes e propriedades específicas.

Efetuar Medições: Permite efetuar medições entre dois pontos dentro do modelo, como o comprimento e a largura.

Efetuar Corte do Plano: Permite "cortar" o modelo em diferentes planos (X, Y, Z), com o objetivo de analisar os elementos constituintes do modelo.

Guardar Alterações Efetuadas no modelo: Para criar uma nova revisão com as alterações efetuadas durante a edição é necessário o utilizador guardar todas as alterações, fazendo o preenchimento de um formulário com o nome da nova revisão e notas sobre a edição.

Com recurso ao painel de edição supracitado, integrado na plataforma de gestão, foi feita a georreferenciação do modelo da Doca 4, utilizando o sistema de coordenadas WGS84 (Figura 77). Desta forma, e como podemos ver na Figura 78, obteve-se uma representação da Doca 4 na sua localização exata, no Porto de Leixões.

Altere as coordenadas do ponto central do modelo (em WGS84) e a elevação (em metros) da base do modelo

Latitude	Longitude	Altitude (m)
40,4205444	-3,7057694	677

Figura 77. Formulário para alterar a localização geográfica do modelo [59].

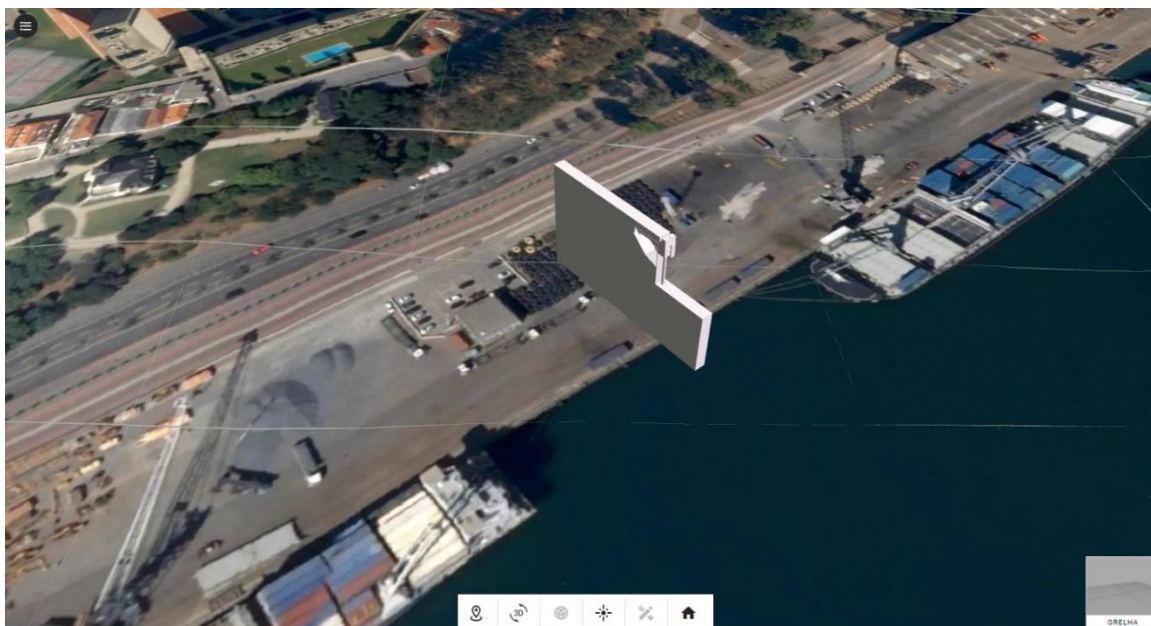


Figura 78. Modelo da Doca 4, integrado e georreferenciado na plataforma de gestão da manutenção, na sua posição real sobre o Porto de Leixões.

Com fim a atingir uma verdadeira plataforma integrada de gestão da manutenção, que unifique num local e numa interface única todo o controlo da degradação assim como o estudo/simulação das capacidades da Doca 4, foi também feita a integração do modelo de elementos finitos, usado nas simulações/ensaios de carga, com os respetivos resultados obtidos (Figura 79). Estes surgem sob forma de mapas de cores que traduzem as deformações verticais experienciadas pela estrutura, face às condições de carregamento impostas.

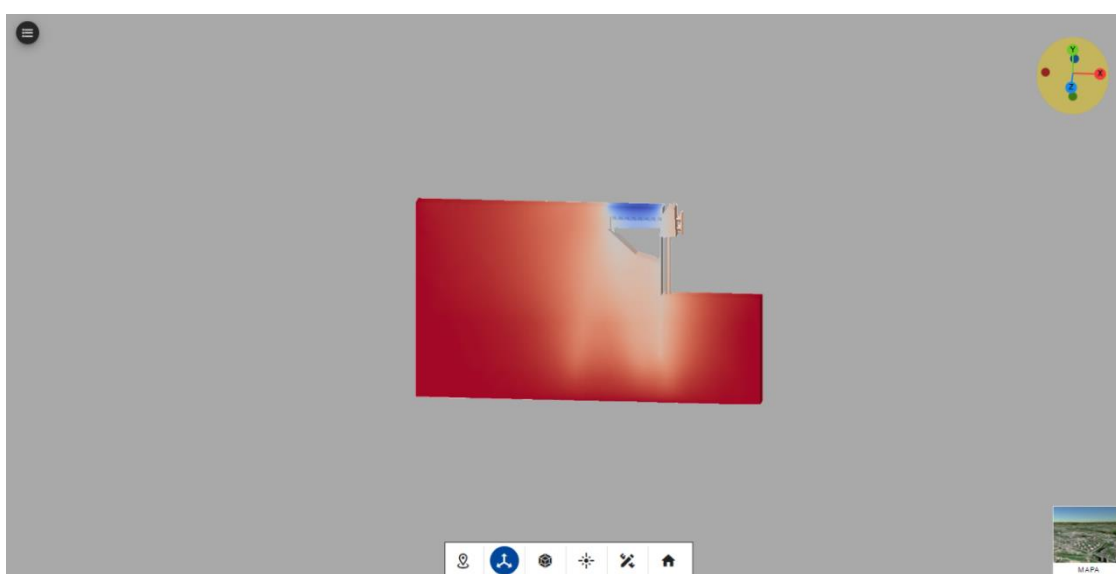


Figura 79. Integração do modelo de elementos finitos, com respetivos resultados, na plataforma de gestão.

Assim como o modelo original, o modelo povoado com os resultados, mapa de deformações, obtido através dos ensaios de carga com recurso ao método dos elementos finitos, foi também georreferenciado, representando-se na Figura 80 posicionado na sua localização, no porto.

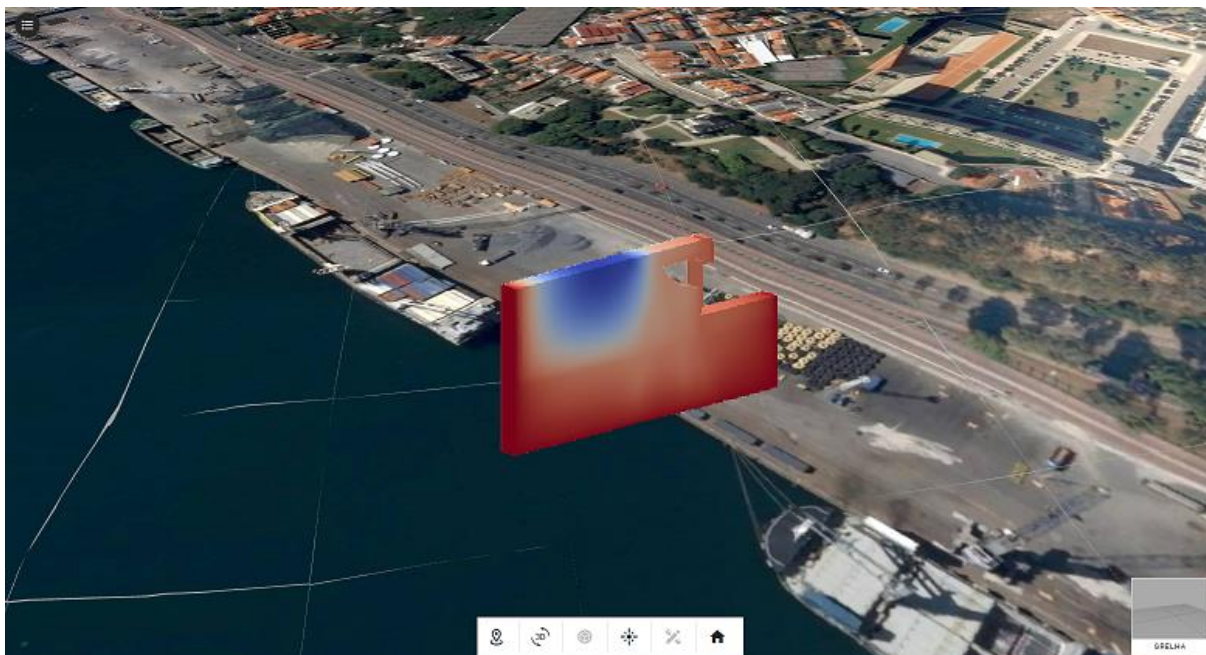


Figura 80. Georreferenciação do modelo de elementos finitos, com respetivos resultados, na plataforma de gestão.

A plataforma criada é acessível a qualquer utilizador autorizado com ligação à internet, uma vez que a aplicação está a ser executada por uma máquina na *Azure*, serviço de computação em nuvem da *Microsoft*.

De seguida apresenta-se o diagrama de implantação, ou seja, o diagrama utilizado para visualizar a instalação e execução do sistema desenvolvido através da representação dos nós/dispositivos de um sistema, os *links* de comunicação entre eles e o software guardado no hardware. A Figura 81 representa o diagrama de implantação, estando a solução desenvolvida em ambiente *docker* (virtualização aplicacional) alojada num servidor virtual privado (*VPS*) e *deployed* numa única máquina na *Azure*.

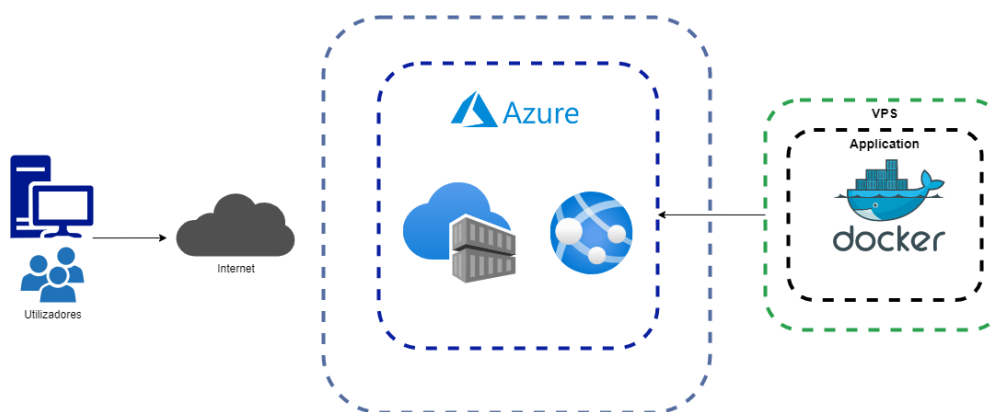


Figura 81. Diagrama de implantação [59].

5.6.3. Upgrade da Plataforma de Gestão da Manutenção

Apesar do sistema atual, descrito nos subcapítulos anteriores, constituir uma primeira abordagem fundamental para a criação de uma plataforma de gestão da manutenção integrada, várias funcionalidades e capacidades devem ser adicionadas à mesma por forma a obter-se um produto final que corresponda a uma plataforma de gestão autónoma e autossuficiente, onde todas as ferramentas de gestão da manutenção estão unificadas, interligadas e acessíveis a partir de uma única interface, numa única plataforma, colaborativa multidisciplinar e dinâmica.

Assim sendo, alguns aspetos que devem ainda ser desenvolvidos e implementados na plataforma são:

- **Representação 3D integrada no local:** Neste momento, como é possível observar na Figura 78, o modelo da Doca 4 está posicionado, "pousado", sobre o mapa na sua exata localização geográfica. No entanto, como é obvio, a estrutura do modelo da doca encontra-se abaixo da superfície, devendo, em boa verdade, a face superior do modelo, a face do pavimento, corresponder à superfície do mapa.

Neste sentido, o modelo da Doca 4, já georreferenciado e posicionado sobre o mapa, poderá ser integrado num modelo de nuvem de pontos da doca, executado através de um varrimento com tecnologia *Lidar*, de forma a ter o modelo posicionado, não só corretamente num plano aéreo 2D (num mapa, tal como está), mas também tridimensionalmente, ficando devidamente representado no contexto de toda a sua envolvente, integrado no local, tal como no exemplo da seguinte figura, Figura 82,

onde podemos ver que o modelo BIM, à direita, foi georreferenciado e integrado numa plataforma SIG com representação tridimensional completa da realidade *in situ*, à esquerda, estando perfeitamente integrado no local.

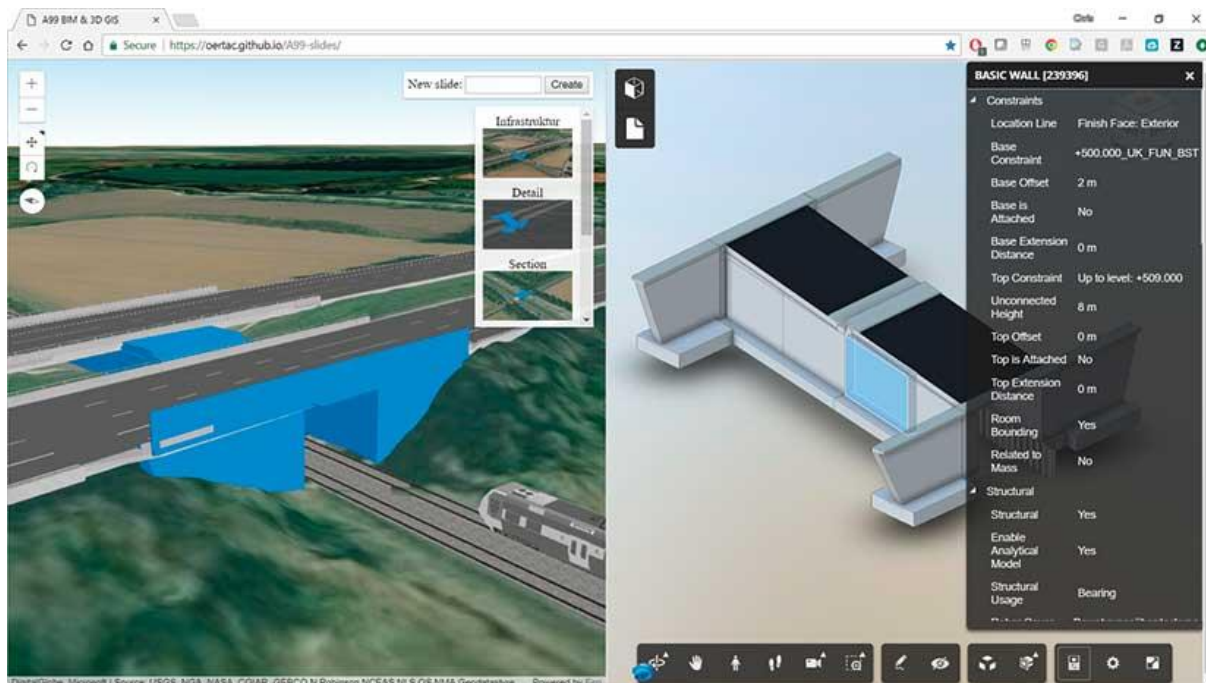


Figura 82. Integração SIG/BIM com representação tridimensional, [60].

- **Execução de todas as análises e operações das ferramentas de gestão diretamente através da interface da plataforma (integração total das ferramentas de gestão da manutenção na plataforma):** Procura-se na criação de uma plataforma de gestão da manutenção (preditiva) que esta seja autónoma, expedita e colaborativa, ao ponto que as entidades gestoras responsáveis consigam executar rapidamente todas as operações, simulações, que necessitam.

Neste momento, como demonstrado nos subcapítulos anteriores, a plataforma faz a integração dos modelos com os resultados das simulações de carga efetuadas, sendo capaz de integrar e representar os resultados das 90 simulações de carga distintas conduzidas sobre o modelo da Doca 4. No entanto, para ter uma verdadeira plataforma de gestão da manutenção integrada e eficiente, as simulações devem poder ser conduzidas diretamente dentro da plataforma de gestão. Isto é, se, por alguma razão, a entidade gestora quiser simular um cenário que não faça parte dos cenários de carga pré-feitos, o utilizador não deve ser obrigado a sair da plataforma,

dirigir-se a um software de cálculo estrutural, importar nesse o modelo, conduzir a simulação, extrair os resultados e voltar a integrá-los na plataforma. Este processo seria demasiado moroso e muito pouco otimizado, de modo que, o intuito final é de chegar a um ponto de desenvolvimento da plataforma onde possam ser-lhe introduzidos diretamente os *inputs*, da simulação a correr, diretamente na sua interface, e a própria faz todo o processo de cálculo, apresentando os resultados no visualizador de seguida, sem mais qualquer intervenção do utilizador, este apenas introduz os *inputs* na plataforma e esta encarrega-se de conduzir a análise e apresentar os resultados. De forma a garantir tal capacidade na plataforma esta terá, ou de incorporar um *solver* que calcule as simulações através dos *inputs* fornecidos pelo utilizador, ou ter um mecanismo de interação entre a plataforma e o *software* de cálculo a utilizar, sob a forma de uma extensão ou *plug-in* no tal *software*, para o qual a plataforma conduz os *inputs* introduzidos na sua interface e traz de volta para o visualizador os resultados obtidos, assim, o utilizador apenas contacta diretamente com a interface da plataforma de gestão da manutenção.

- **Garantia da acessibilidade da interface da plataforma:** Como plataforma de gestão da manutenção, esta será usada por vários utilizadores encarregues de gerir o funcionamento otimizado da infraestrutura. Estes utilizadores podem, e com certeza, provirão de outras áreas que não necessariamente da engenharia civil. Esta questão levanta a importância para que a interface da plataforma, a forma como esta apresenta os resultados, as suas mensagens e avisos, seja suficientemente intuitiva, sem perder o seu rigor, ao ponto de ser fácil e indubitavelmente interpretada pelo utilizador que a opera.

Quanto à apresentação dos resultados, mensagens ou avisos de perigo, seguindo esta ordem de pensamento, para o funcionamento quotidiano desta plataforma, os desenvolvedores deverão dar privilégio, por exemplo, na apresentação dos resultados sob a forma de mapas de cor legendados sobre o modelo tridimensional da doca, ao invés de gráficos com resultados "em bruto", de forma a procurar transmitir a informação essencial ao gestor da maneira mais visual possível, tornando-a mais intuitiva, menos dúbia, mais prática, e mais afeta a captar da atenção do utilizador.

6. Considerações finais

6.1. Conclusões

O objetivo principal da presente dissertação de mestrado consistiu no desenvolvimento e integração do modelo de degradação/desempenho de um ativo portuário numa plataforma de gestão da manutenção para previsão e melhoria da gestão das infraestruturas portuárias ao longo de todo o ciclo de vida. Para tal, foi escolhido como caso de estudo a Doca 4 do Porto de Leixões. Sobre esta, foi feita a modelação numérica com recurso ao *software open-source: Salomé-Meca*, onde foram configurados um conjunto de cenários distintos de carga por fim a aferir a resposta do ativo, ao nível das deformações/assentamentos, em função do carregamento aplicado. Posteriormente, este modelo, acompanhado dos respetivos resultados, foi integrado numa plataforma SIG por forma a obter uma plataforma de gestão da manutenção.

Através de uma revisão da literatura afeta ao domínio da gestão da manutenção de infraestruturas portuárias, é preponderante a discussão que versa sobre a mudança de paradigma em relação à metodologia aplicada na gestão destas infraestruturas. Os autores distinguem os métodos tradicionais de manutenção, utilizados há décadas no setor, dos novos métodos de manutenção, defendendo uma transição global para os últimos. Por forma a mitigar as ineficiências inerentes aos métodos tradicionais, foram adotadas novas tecnologias tais como: plataformas SIG, implementação da metodologia BIM, modelos preditivos da degradação. A implementação destas tecnologias constituiu um novo método de gestão da manutenção, permitindo realizar uma manutenção preventiva.

Foi feita a modelação BIM, em *Revit*, da Doca 4. A modelação deste ativo permitiu concluir que, apesar de ser amplamente implementada, nomeadamente ao longo da última década esta ainda não é expedita quando aplicada no âmbito de infraestruturas, nomeadamente portuárias, mesmo com recurso a um dos principais *softwares* do mercado (*Revit*). Quer isto dizer que a modelação da doca enfrentou limitações que dificultaram a sua realização, o que, inevitavelmente acabou por diminuir o realismo do modelo. Fala-se em particular da falta de parametrizações disponíveis para representar realisticamente os elementos do ativo em estudo. Desta forma, tiveram de ser feitas adaptações na modelação de alguns elementos

estruturais específicos, tais como nas cortinas de estacas, adicionalmente, é notória a falta de elementos essenciais a qualquer cais como cabeços de amarração ou defensas para os muro-cais. Todas estas ausências demonstram uma falta de prontidão dos *softwares* perante infraestruturas portuárias. A necessidade de adoção de soluções alternativas dificulta e diminuiu o realismo do modelo final, o que consequentemente aumenta a resistência à adoção desta metodologia e prejudica a sua utilização no controlo do ciclo de vida destes ativos.

Após concluída a modelação BIM do ativo em estudo, o objetivo seguinte foi a criação de um modelo de degradação/desempenho. Neste seriam conduzidos um número alargado de simulações de carga por fim a aferir a resposta da estrutura, ao nível das deformações/assentamentos, face ao carregamento aplicado.

Inicialmente ponderou-se a utilização do modelo BIM da doca como o modelo de simulação. Este seria exportado do *Revit* e importado num *software* específico de análise mecânica, nomeadamente no *Robot Structural Analysis*, também da família de *softwares* da *Autodesk*. Porém, este demonstrou várias limitações que fizeram dele uma solução pouco adequada para o contexto proposto. Nomeadamente, o facto do *Robot S.A.* ser mais adequado para o cálculo de análises lineares, a sua incapacidade de integrar o meio geotécnico e ainda a inconveniência associada ao facto deste ser um *software* comercial com licença anual paga. Dado que estas são análises de interesse contínuo ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, obrigaria a uma subscrição ativa, caso fosse intenção desenvolver cenários adicionais. Neste contexto, foi tido conhecimento de um *software open-source*, *Salomé-Meca*, que respondia perfeitamente a todas as questões e inconveniências levantadas, pelo que foi implementado o seu uso, obrigando a uma nova modelação da doca. Trata-se de um software com capacidade de cálculo de complexas análises em regime não-linear, permitindo que no futuro aquando forem desenvolvidas análises mais pormenorizadas ao comportamento da estrutura, seja explorado o comportamento plástico, dos materiais de forma a aproveitar todas as capacidades dos mesmos, tendo por isso resultados de simulação mais realistas e otimizados.

Foram realizadas 90 análises distintas de carregamento das quais foi possível acompanhar a evolução das deformações e assentamentos da doca. Nos piores cenários, os resultados globais obtidos mostraram uma deformação vertical de cerca de 1 mm a meio vão da viga principal, um assentamento de 7 mm relativo à ponta do grupo de estacas, e um assentamento de 19 cm na superfície do pavimento sobre o aterro. Estando a presente dissertação focada na integração de modelos de degradação numa plataforma de gestão da manutenção, não houve oportunidade para definir critérios de rotura para os elementos estruturais. Teria sido pertinente, caso fosse esse o âmbito deste trabalho, a definição de critérios de Estado Limite Último e de Serviço para cada elemento estrutural, comparando os valores desses critérios aos obtidos nos resultados por forma a aferir qual seria o limite real de carregamento na Doca 4. Como tal não foi possível, a avaliação dos resultados cingiu-se a uma análise comparativa da resposta da estrutura face à variação do carregamento aplicado. De mencionar ainda que, para um estudo criterioso, para aferir os estados limite da doca, seria pertinente voltar a correr os ensaios desenvolvidos, desta vez em regime não-linear, com a atribuição do critério de rotura de Mohr-Coulomb ao material geotécnico, de modo a aproveitar todas as suas capacidades e fornecer resultados mais realistas.

Obtidos os resultados, estes foram finalmente integrados numa plataforma SIG de gestão da manutenção, criada pela empresa especialista *3MAPS*. Foi feita a integração do modelo da doca, associada aos respetivos resultados. A solução preconizada para obtenção da ferramenta de apoio à decisão, foi precisamente o cálculo de um conjunto alargado de cenários de carga previamente num *software* especializado, *Salomé-Meca*, integrando de seguida todos os resultados obtidos na plataforma, de forma a criar uma base de dados para que o utilizador pudesse selecionar, na interface da plataforma, qual o cenário de carga ao qual gostaria de ver a resposta da estrutura. Esta solução tem a evidente limitação de não ser possível ao utilizador estudar um cenário de carga que não tenha sido previamente calculado e integrado na plataforma, ou seja, não faça parte da sua base de dados. Outro aspeto que deve ainda ser trabalhado é o da geolocalização e integração do modelo com o meio envolvente. Apesar de estar já geolocalizado e inserido no mapa, o modelo da doca aparenta “pousar” em cima da superfície, sendo que deveria estar abaixo desta, tendo apenas a face superior do pavimento alinhada com a linha de superfície do mapa. Para isso, e de modo aumentar o grau de perceção de toda a representação, o modelo poderia ser integrado com

um levantamento de nuvem de pontos de toda a doca, sendo o conjunto geolocalizado e inserido no respetivo mapa.

Todos os aspetos discutidos demonstram a inúmera potencialidade de expansão do presente trabalho. Alguns dos pontos cujo desenvolvimento assenta diretamente na continuidade desta dissertação estão partilhados no seguinte subcapítulo enquanto trabalhos futuros.

6.2. Trabalhos futuros

Relativamente aos ensaios de análise de cargas, conduzidos sobre o modelo de elementos finitos da Doca 4, com recurso ao *software Salomé-Meca*, estes representaram apenas uma primeira abordagem que traçou as linhas orientadoras daquelas que serão as próximas iterações do modelo e da configuração dessas mesmas análises.

Devido ao limite temporal fixado à elaboração desta dissertação de mestrado, as análises de simulação sobre a doca viram-se forçadas a ficar dentro das condições altamente simplificadas que foram assumidas na sua configuração, simplificações como: a limitação no realismo da resposta dos materiais, tendo estes ficado limitados a um comportamento dentro do regime elástico linear, regime considerado para todos os elementos do modelo sem exceção; ou mesmo a própria discussão dos resultados desses mesmos ensaios que ficou limitada a uma abordagem global e superficial, sem grandes focos pormenorizados em locais de maior criticidade na resposta da estrutura às ações solicitantes, uma vez que o principal intuito deste trabalho era a obtenção de resultados que ilustrassem de forma expedita o comportamento global da doca para que pudessem ser integrados na plataforma de gestão da manutenção. Não obstante, aquando da realização dos trabalhos conduzidos, foram também traçadas ambições que representam a evolução que seria dada ao trabalho caso houvesse a disponibilidade temporal. Deste modo, as próximas metas a cumprir seriam:

1. Usufruir das capacidades avançadas de análise mecânica do *Salomé-Meca*, atribuindo aos materiais do modelo regime não-linear, elásto-plástico, assim como o critério de rotura de Mohr-Coulomb ao material geotécnico (com definição da coesão e ângulo de atrito), assim como a implementação do coeficiente de impulso horizontal nos aterros.

A não-linearidade da análise permitirá aos materiais usufruir do seu regime plástico, aproveitando ao máximo as capacidades últimas do material, sem comprometer a fiabilidade dos resultados;

2. Atualizar as configurações do comportamento dos materiais do modelo, de acordo com as descritas no ponto anterior, ponto "1.", e repetir os ensaios de carga descritos no subcapítulo 5.4, (Figura 52 e Figura 53);
3. Definição de critérios de rotura para vigotas e viga-principal. As vigotas representam uma subestrutura da doca que suporta diretamente o pavimento, onde são aplicadas as cargas sob a forma dos descarregamentos de granel. Por sua vez, a viga-principal é a estrutura sobre a qual as vigotas se apoiam. Como falamos de elementos em betão armado, deve recorrer-se ao Eurocódigo 2 para definição dos critérios de falha das peças para estados limite últimos e de serviço.

Numa análise a sensibilidade, dadas as condições sob as quais se encontram o conjunto de vigotas e a viga-principal, é expectável que o estado limite condicionante destes elementos seja a largura excessiva de abertura de fendas (estado limite de serviço). Assim sendo, o primeiro passo a tomar será a definição da largura máxima admissível para abertura de fendas nestes elementos, recorrendo ao EC2. Como no atual modelo da doca, devido à sua complexidade, não foram modeladas as armaduras, será aconselhável fazer um estudo do comportamento destas vigas isoladamente num novo modelo, já com as respetivas armaduras modeladas. Nestes modelos isolados, de forma a garantir o máximo de rigor e realismo, deve ser aplicado um estado de tensão nestes elementos semelhante ao determinado nos ensaios de carga conduzidos previamente no modelo completo da doca, no *Salomé-Meca*;

4. Às análises de carga do modelo (*Salomé-Meca*), discutidas nos pontos "1." e "2." (Figura 52 e Figura 53), adicionar as forças aplicadas pelos navios, que resultam em esforços de compressão diretamente sobre as defensas durante o atracar, e de tração sobre os cabeços de amarração enquanto amarrados. Estes esforços de compressão e tração propagam-se ao longo de toda a estrutura do cais, com impacto direto e

especial criticidade ao nível da viga-principal, viga-cais, muro de estacas e grupo de estacas, pelo que deve ser feito um acesso às tensões experienciadas por estes elementos, em diversos cenários distintos de utilização, acautelando esses esforços seguindo-se estudos de afetação aos possíveis modos de rotura nas zonas críticas mencionadas.

Na seguinte figura, Figura 83, apresenta-se um esquema que, de forma muito simplista, ilustra a influência das ações na estrutura, assim como alguns dos aspetos que seriam de grande interesse o estudo, tais como: os esforços resistentes da viga-principal à tração e compressão, induzidos pelos navios atracados; a análise do possível modo de rotura da estaca e do muro de estacas, por flexão, no encontro com o leito do cais; o assentamento das estacas fruto do peso das cargas de granel depositadas sobre o pavimento da doca.

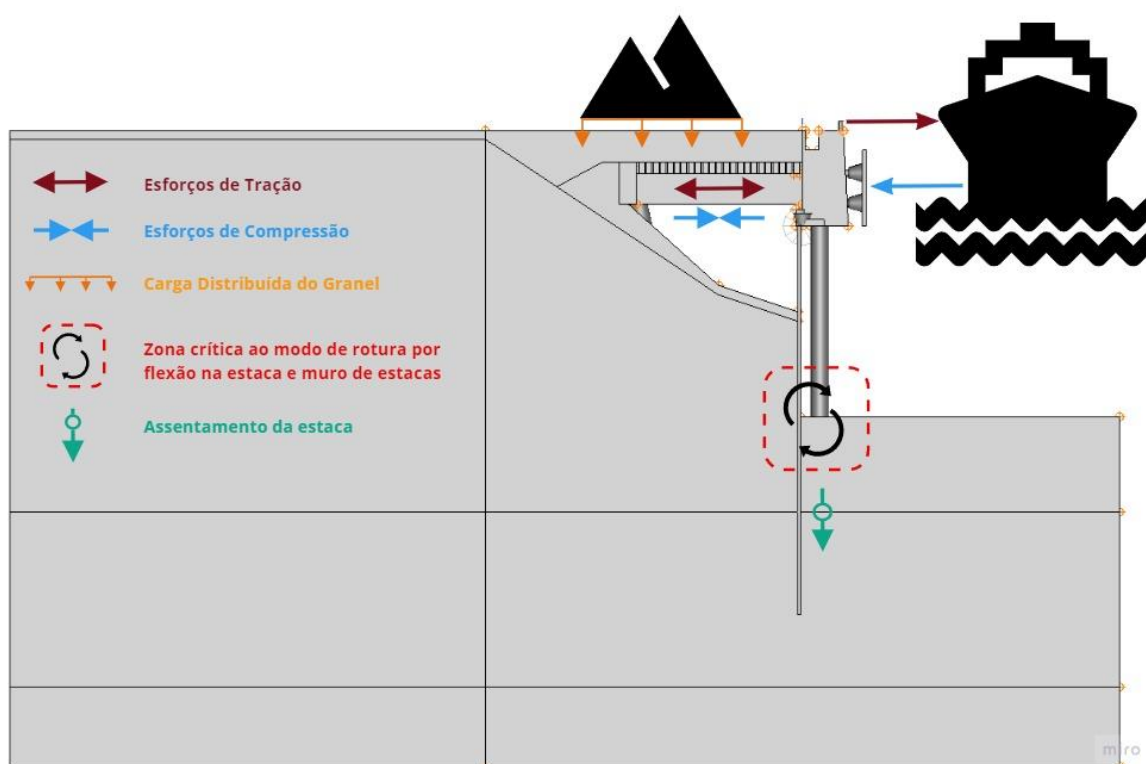


Figura 83. Esquema simplificado da influência das diversas ações na doca.

5. Desenvolvimento de um sistema de análise da resposta mecânica e previsão, a longo prazo, da redução da capacidade de carga da doca, ao longo do tempo. O sistema será composto pelo modelo de elemento finitos, pelo registo de ações solicitantes à doca,

fornecido pelos sensores colocados no local, e por um modelo preditivo da degradação das armaduras.

Utilizando um modelo preditivo, baseado em cadeias de Markov, este fará a previsão da degradação química/oxidação, ao longo do tempo, das armaduras dos elementos em betão armado. A oxidação das armaduras resulta numa perda da resistência mecânica das mesmas, que se traduz na redução da área útil das armaduras nos elementos de betão armado do modelo de elementos finitos. Esta redução da área de armaduras no conjunto de elementos de betão armado reduz diretamente a capacidade resistente da doca. São introduzidas as solicitações no modelo, baseadas na informação registada pelos sensores, e corre-se a análise para estudar a resposta da estrutura, em função da área efetiva de armaduras nesse instante.

A análise acima descrita é repetida iterativamente ao longo do tempo, com intervalos de tempo definidos, em que, a cada intervalo de tempo posterior, a área efetiva de armadura nos elementos vai reduzindo, simulando a degradação das mesmas, fruto da oxidação. Consequentemente, com a redução da área efetiva das armaduras, a capacidade resistente da estrutura diminuirá para cada intervalo de tempo seguinte.

Ou seja:

$$As_{\text{útil}}(T=0 \text{ U.T.}) > As_{\text{útil}}(T=1 \text{ U.T.}) > As_{\text{útil}}(T=2 \text{ U.T.}) \wedge Cap. Resist. (T=0 \text{ U.T.}) > Cap. Resist. (T=1 \text{ U.T.}) > Cap. Resist. (T=2 \text{ U.T.})$$

Onde:

As_{útil}: Área de armadura útil (Armadura efetiva);

Cap. Resist.: Capacidade resistente da estrutura;

U.T.: Unidade de tempo.

Através da montagem do sistema de análise da resposta mecânica e previsão da degradação da capacidade resistente da doca nesta configuração, estão potenciadas as melhores características de cada ferramenta.

Os modelos preditivos, baseados em cadeias de Markov, ao estarem orientados isoladamente ao estudo da oxidação (degradação química), ao longo do tempo, das armaduras, encontram-se aplicados nas condições ideais para a fiabilidade dos seus resultados: estudo de degradações "naturais". Ao invés de serem aplicados na previsão direta da capacidade resistente da estrutura, que dada a natureza tão variada e inconstante, quer do tipo, quer do valor das ações sobre ela aplicadas, diminuiria fortemente a fiabilidade dos resultados do modelo preditivo, baseado em cadeias de Markov.

Com a aferição das ações solicitantes na doca com base nos dados registados pelos sensores montados *in situ*, está assegurada a fiabilidade desses valores como sendo os mais próximos da realidade. Quanto mais dados de sensor forem integrados no estudo e análise, maior será a representatividade e realismo dos resultados a obter.

Por fim, ao calcular a resposta da estrutura com recurso a um modelo de elementos finitos, num *software* específico de análise mecânica/estrutural, dado o realismo, acima discutido, dos *inputs* fornecidos, a qualidade final dos resultados tem um nível de precisão que não poderia ser obtido de outra forma.

Na seguinte figura, Figura 84, está resumido, esquematicamente, a arquitetura do sistema idealizado para a análise do comportamento e previsão da capacidade resistente da doca, ao longo do tempo, em função da sua degradação - por meio da oxidação das armaduras dos elementos de betão armado.

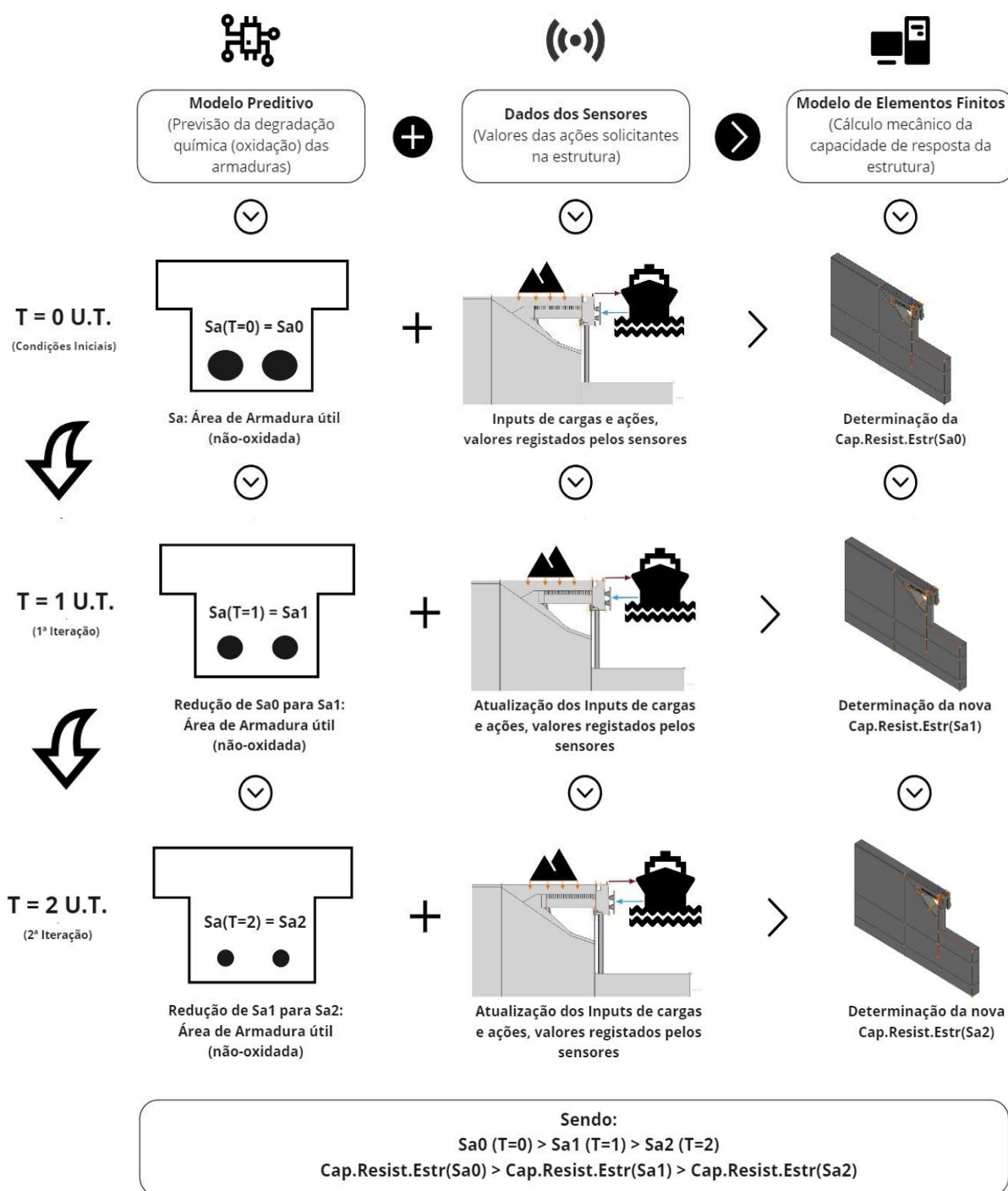


Figura 84. Arquitetura (simplificada) do sistema de previsão da capacidade resistente da doca, ao longo do tempo, em função da sua degradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Pasetto, A. Giordano, P. Borin, and G. Giacomello, “Integrated railway design using Infrastructure-Building Information Modeling. the case study of the port of Venice,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 45, no. 2019, pp. 850–857, 2020, doi: 10.1016/j.trpro.2020.02.084.
- [2] J. Carneiro, R. Rossetti, D. Silva, and E. Oliveira, “BIM, GIS, IoT, and AR/VR Integration for Smart Maintenance and Management of Road Networks: a Review,” 2018, pp. 1–7, doi: 10.1109/ISC2.2018.8656978.
- [3] I. de la Peña Zarzuelo, M. Freire-Seoane, and B. López Bermúdez, “Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 20, 2020, doi: 10.1016/j.jii.2020.100173.
- [4] E. Furlan, D. Slanzi, S. Torresan, A. Critto, and A. Marcomini, “Multi-scenario analysis in the Adriatic Sea: A GIS-based Bayesian Network to support maritime spatial planning,” *Sci. Total Environ.*, vol. 703, p. 134972, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134972.
- [5] L. Barazzetti and F. Banfi, “BIM and GIS: WHEN PARAMETRIC MODELING MEETS GEOSPATIAL DATA,” *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 4, no. 5W1, pp. 1–8, 2017, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-1-2017.
- [6] M. P. Repetto, M. Burlando, G. Solari, P. De Gaetano, M. Pizzo, and M. Tizzi, “A web-based GIS platform for the safe management and risk assessment of complex structural and infrastructural systems exposed to wind,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 117, pp. 29–45, 2018, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.03.002.
- [7] Soumyajit Dasgupta, “What Are Different Types of Ports For Ships?,” *Marine Insight*, 2020. <https://www.marineinsight.com/ports/what-are-the-various-types-of-ports/>.
- [8] X. Shi, H. Jiang, H. Li, and Y. Wang, “Upgrading port-originated maritime clusters: Insights from Shanghai’s experience,” *Transp. Policy*, vol. 87, no. August 2019, pp. 19–32, 2020, doi: 10.1016/j.tranpol.2019.11.002.
- [9] T. For, M. Windows, O. Money, S. Aims, and P. Policy, “What is the difference between natural Harbour and artificial harbour?” <https://www.sidmartinbio.org/what-is-the-difference-between-natural-harbour-and-artificial-harbour/> (accessed Apr. 16, 2022).
- [10] “A importância dos portos secos na logística de importação e exportação,” 2019. <https://www.rangel.com/pt/blog/importancia-portos-secos-logistica-importacao-exportacao/> (accessed Apr. 16, 2022).

- [11] J. J. Wang, A. K. Y. Ng, and D. Olivier, "Port governance in China: A review of policies in an era of internationalizing port management practices," *Transp. Policy*, vol. 11, no. 3, pp. 237–250, 2004, doi: 10.1016/j.tranpol.2003.11.003.
- [12] P. Verhoeven, "A review of port authority functions: towards a renaissance?," *Maritime Policy & Management*, 2010. <https://doi.org/10.1080/03088831003700645>.
- [13] J. S. L. Lam, A. K. Y. Ng, and X. Fu, "Stakeholder management for establishing sustainable regional port governance," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 8, pp. 30–38, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2013.06.001>.
- [14] Q. Zhang, H. Geerlings, A. El Makhoulfi, and S. Chen, "Who governs and what is governed in port governance: A review study," *Transp. Policy*, vol. 64, no. January, pp. 51–60, 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2018.01.019.
- [15] M. R. Brooks, "Port Governance as a Tool of Economic Development: Revisiting the Question," *Dyn. Shipp. Port Dev. Glob. Econ.*, no. 1990, pp. 128–157, 2016, doi: 10.1057/9781137514295_6.
- [16] V. Caldeirinha, J. Augusto Felício, and S. F. da Cunha, "Government policies and Portuguese port governance in the period from 2005 to 2015," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 22, pp. 11–20, 2017, doi: 10.1016/j.rtbm.2016.11.004.
- [17] "Port marketing and the challenge of the third generation port : report /," UN, Geneva :. 1992, 1992. [Online]. Available: <http://digitallibrary.un.org/record/138429>.
- [18] M. R. Brooks and A. A. Pallis, "Port Governance," in *The Blackwell Companion to Maritime Economics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 491–516.
- [19] Q. Zhang, S. Zheng, H. Geerlings, and A. El Makhoulfi, "Port governance revisited: How to govern and for what purpose?," *Transp. Policy*, vol. 77, no. February, pp. 46–57, 2019, doi: 10.1016/j.tranpol.2019.03.001.
- [20] M. R. Brooks and K. Cullinane, "Chapter 18 Governance Models Defined," *Res. Transp. Econ.*, vol. 17, pp. 405–435, 2006, doi: [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(06\)17018-3](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(06)17018-3).
- [21] M. R. Brooks, T. Schellinck, and A. A. Pallis, "A systematic approach for evaluating port effectiveness," *Marit. Policy & Manag.*, vol. 38, no. 3, pp. 315–334, 2011, doi: 10.1080/03088839.2011.572702.
- [22] M. Shinohara, "Maritime cluster of Japan: Implications for the cluster formation policies," *Marit. Policy Manag.*, vol. 37, no. 4, pp. 377–399, 2010, doi:

- 10.1080/03088839.2010.486648.
- [23] R. Suire and J. Vicente, “Clusters for life or life cycles of clusters: in search of the critical factors of clusters’ resilience,” *Entrep. Reg. Dev.*, vol. 26, no. 1–2, pp. 142–164, 2014, doi: 10.1080/08985626.2013.877985.
- [24] H. Air, C. Energy, I. Industry, and D. Health, “Port traffic - Country rankings,” 2019. https://www.theglobaleconomy.com/rankings/Port_traffic/ (accessed Mar. 18, 2022).
- [25] E. M. Foco, “J. Augusto Felício : « Os portos portugueses na economia do mar »,” 2022.
- [26] Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, “O papel dos portos portugueses na economia nacional e a respetiva estratégia para o futuro próximo (até 2030) [i],” 2020. <https://www.aprh.pt/pt/comissoes/zona-costeira/o-papel-dos-portos-portugueses-na-economia-nacional-e-a-respetiva-estrategia-para-o-futuro-proximo-ate-2030>.
- [27] E. B. Dias and J. F. Alves, “Ports, policies and interventions in ports in Portugal - 20th Century,” *Cah. la Méditerranée*, no. 80, pp. 41–64, 2010, doi: 10.4000/cdlm.5162.
- [28] Q. Somos, “SOLUÇÃO IBÉRICA NA REGIÃO D,” 1991. <http://www.portosdeportugal.pt/indexG.php> (accessed Mar. 19, 2022).
- [29] “(https://viana.apdl.pt/pt_PT/acessibilidades).” https://viana.apdl.pt/pt_PT/valencias (accessed Mar. 20, 2022).
- [30] W. Seaestaleiro, “Competência, conhecimento e experiência.” <https://west-sea.pt/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [31] Porto de Viana do Castelo, “Porto De Viana Do Castelo,” 2015. <http://www.portosdeportugal.pt/app/portos/viana-do-castelo.php> (accessed Mar. 20, 2022).
- [32] P. D. E. Sines, D. O. Algarve, and P. D. E. Sines, “COOKIES C ontinu a r E ste site utiliz a cookies p a r a um a melhor experiênci a . A o n a veg a r no site est a r á a consentir a su a utiliz a ç ã o .” <http://www.portodesines.pt/o-porto/hinterland/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [33] “Características gerais,” 1978. <http://www.portodesines.pt/o-porto/caracteristicas-gerais/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [34] APS, “Porto de Sines. <http://www.portodesines.pt/>,” 2013. <http://www.portosdeportugal.pt/app/portos/sines.php> (accessed Mar. 20, 2022).
- [35] H. Do and F. Tu, “Porto de leixões,” 2013. <http://www.portosdeportugal.pt/app/portos/leixoes.php>.

- [36] “Cais e Terminais Cais Convencionais de Carga Geral e Granéis Sólidos (<https://www.apdl.pt/historia>).” <https://www.apdl.pt/caracteristicas/cais-e-terminais> (accessed Mar. 20, 2022).
- [37] N. U. I. HOSSAIN *et al.*, “Modeling and assessing interdependencies between critical infrastructures using Bayesian network: A case study of inland waterway port and surrounding supply chain network,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 198, no. October 2019, p. 106898, 2020, doi: 10.1016/j.ress.2020.106898.
- [38] B. Strogen, K. Bell, H. Breunig, and D. Zilberman, “Environmental, public health, and safety assessment of fuel pipelines and other freight transportation modes,” *Appl. Energy*, vol. 171, pp. 266–276, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.059>.
- [39] Y. Zhang, C. W. Kim, K. F. Tee, and J. S. L. Lam, “Optimal sustainable life cycle maintenance strategies for port infrastructures,” *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 1693–1709, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.120.
- [40] Y. Zhang, “Comparing the Robustness of Offshore Structures with Marine Deteriorations — A Fuzzy Approach,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 18, no. 8, pp. 1159–1171, 2015, doi: 10.1260/1369-4332.18.8.1159.
- [41] J. BOERO, F. SCHOEFS, B. CAPRA, and N. ROUXEL, “Technical management of French harbour structures - Part 2: Current practices, needs – Experience feedback of owners,” *Rev. Paralia*, vol. 2, pp. 7.1-7.12, 2009, doi: 10.5150/revue-paralia.2009.007.
- [42] Y. Zhang and J. S. L. Lam, “Estimating economic losses of industry clusters due to port disruptions,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 91, pp. 17–33, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2016.05.017.
- [43] F. Biagini and M. Campanino, “Markov chains,” *UNITEXT - La Matematica per il 3 piu 2*, 2016. <https://brilliant.org/wiki/markov-chains/> (accessed Apr. 01, 2022).
- [44] “Stochastic processes,” *Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology*, 2005. <https://brilliant.org/wiki/stochastic-processes/> (accessed Apr. 01, 2022).
- [45] Y. F. M. Moscoso, M. Santamaria, H. S. Sousa, and J. C. Matos, “Stochastic Degradation Model of Concrete Bridges Using Data Mining Tools,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 153 LNCE, pp. 767–777, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-73616-3_59.
- [46] J. Boéro, F. Schoefs, H. Yañez-Godoy, and B. Capra, “Time-function reliability of harbour

- infrastructures from stochastic modelling of corrosion,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 10, pp. 1187–1201, 2012, doi: 10.1080/19648189.2012.688611.
- [47] F. Nur, M. Marufuzzaman, R. Burch, S. M. Puryear, and E. S. Wall, “Analyzing the competitiveness of inland waterway ports: An application of stochastic analytical hierarchy process,” *IISE Annu. Conf. Expo 2018*, pp. 47–52, 2018.
- [48] C. Jofré-briceño, F. M. La Rivera, E. Atencio, and R. F. Herrera, “Implementation of facility management for port infrastructure through the use of uavs, photogrammetry and bim,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, 2021, doi: 10.3390/s21196686.
- [49] “Latest News,” *Scientific American*, 1847. <https://www.ifma.org/> (accessed Apr. 25, 2022).
- [50] D. Lin, B. Jin, and D. Chang, “A PSO approach for the integrated maintenance model,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 193, no. September 2019, p. 106625, 2020, doi: 10.1016/j.ress.2019.106625.
- [51] M. N. Commission, *Life Cycle Management of Port Structures: Recommended Practice for Implementation*. PIANC, 2008.
- [52] S. I. Repository, “BI M b u si n e s s v a l u e f o r a s s e t o w n e r s t h r o u g h e f f e c t i v e a s s e t i n f o r m a t i o n m a n a g e m e n t.”
- [53] P. Valdepeñas, M. D. E. Pérez, C. Henche, R. Rodríguez-Escribano, G. Fernández, and J. S. López-Gutiérrez, “Application of the BIM method in the management of the maintenance in port infrastructures,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 12, pp. 1–22, 2020, doi: 10.3390/jmse8120981.
- [54] A. O’Malley, “BIM adoption in Europe: 7 countries compared,” *PlanRadar*, 2021. <https://www.planradar.com/gb/bim-adoption-in-europe/> (accessed Apr. 28, 2022).
- [55] N. T. Wright and J. Yoon, *Application of gis technologies in port facilities and operations management*. 2007.
- [56] M. Batista, “O que é o Code _ Aster ?,” 1989. https://www.wikki.com.br/post/o-que-e-o-code_aster.
- [57] G. N. U. Fdl, “Presentation of code_aster and Salome-Meca.” https://www.code-aster.org/UPLOAD/DOC/Formations/01-presentation_of_code_aster_and_salome_meca.pdf.
- [58] N. Parameters and N. Parameters, “Netgen 2D and 3D hypotheses.”
- [59] J. Pedro and B. Lima, “Plataforma 3D de Digital Twin para representação e edição

colaborativa de documentos IFC aplicados à metodologia BIM João Pedro Branco Lima Oliveira e Silva,” Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), 2022.