

SISTEMAS DE CONTROLO E ANÁLISE ESTRUTURAL DO QUEBRAMAR DO PORTO DO FUNCHAL

MÁRIO PEREIRA⁽¹⁾⁽²⁾, ANA CLÁUDIA TEODORO⁽¹⁾⁽²⁾, FERNANDO VELOSO-GOMES⁽³⁾,
MARIA JOÃO HENRIQUES⁽⁴⁾, JOSÉ NUNO LIMA⁽⁴⁾ e SÉRGIO OLIVEIRA⁽⁴⁾

- (1) Centro de Investigação em Ciências Geo-Espaciais (CICGE), FCUP.
- (2) Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
- (3) Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto (IHRH/FEUP)
- (4) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

Resumo

As infraestruturas portuárias, à semelhança de todas as infraestruturas construídas e usadas pelo Homem, estão sujeitas a modificações constantes decorrentes da sua utilização e do meio envolvente. Por estarem sujeitas a severas condições climáticas e ambientais, principalmente devidas ao seu meio envolvente marítimo, estas infraestruturas requerem uma atenção especial. Dos diversos elementos que constituem uma infraestrutura portuária, o quebramar é o que, pelas suas características e finalidade, carece de mais atenção devido à sua maior exposição aos fenómenos externos.

Os quebramares são infraestruturas portuárias destinadas à proteção de portos, concebidas e projetadas de modo a resistirem às mais adversas e extremas condições atmosféricas e ambientais. A agitação marítima, as marés, os ventos, as dinâmicas subaquáticas dos sedimentos, as atividades portuárias, são alguns dos fatores que provocam, ao longo do tempo, uma degradação natural dos quebramares, a qual pode impossibilitar a sua utilização no período de vida útil expectável. Torna-se assim indispensável que este tipo de infraestruturas tenha um acompanhamento temporal rigoroso, recorrendo a ferramentas e procedimentos de verificação próprios, minimizando, e se possível, antecipando os riscos inerentes a uma decadência acentuada, de forma a programar intervenções eficazes e proporcionar uma gestão e manutenção mais eficientes. O quebramar do Porto do Funchal tem evidenciado, ao longo dos últimos anos, algumas fragilidades principalmente na sua parte mais extrema, a cabeça, decorrentes das condições adversas a que se encontra exposto. Estas são o resultado dos efeitos da exposição a condições atlânticas típicas e da atracação e desatracação de navios de cruzeiro, cuja tonelagem e dimensão são cada vez maiores. De modo a identificar as ações responsáveis e a quantificar o grau de evolução da deterioração ao longo do tempo, foi planeada, e tem sido executada, a monitorização desta estrutura de modo a permitir identificar e quantificar as prováveis causas.

O principal objetivo deste trabalho é o de analisar o comportamento do quebramar do porto do Funchal através da medição dos seus movimentos (deslocamentos e acelerações) e deteção de alterações morfológicas, utilizando para o efeito sistemas de posicionamento por satélite (GNSS), técnicas clássicas de topografia, acelerómetros e através da simulação do seu comportamento com base em modelos numéricos e físicos, procurando conciliá-los de modo a identificar quais as principais causas para a deterioração encontrada e seu grau de evolução.

Na presente comunicação descreve-se o trabalho realizado, nomeadamente: i) as campanhas de observação *in-situ* (medição de deslocamentos e acelerações) e os principais resultados obtidos pelas diferentes metodologias de medição utilizadas; ii) as potenciais alterações morfológicas da estrutura, identificadas a partir da modelação física em laboratório; e ainda iii) os resultados obtidos numericamente (com um modelo de elementos finitos calibrado com base no ajuste das frequências naturais de vibração calculadas e identificadas *in-situ*) relativos à determinação dos deslocamentos expectáveis quando se consideram as forças devidas à atracação dos navios e devidas à agitação marítima. Na parte final da comunicação, discutem-se algumas das possíveis causas para a deterioração encontrada no quebramar do Porto do Funchal e salientam-se as vantagens da integração de diferentes metodologias de monitorização e de modelos físicos e numéricos para o controlo da segurança deste tipo de infraestruturas.

1. Introdução

O quebramar do Porto do Funchal tem evidenciado, ao longo dos últimos anos, e especialmente na sua parte mais extrema, denominada na literatura como a “cabeça” do quebramar, algumas fragilidades (Figura 1), decorrentes das condições adversas a que se encontra exposto, resultantes dos efeitos da exposição a condições atlânticas típicas e da atracação e desatracação de navios de cruzeiro, cuja tonelagem e dimensão são cada vez maiores.

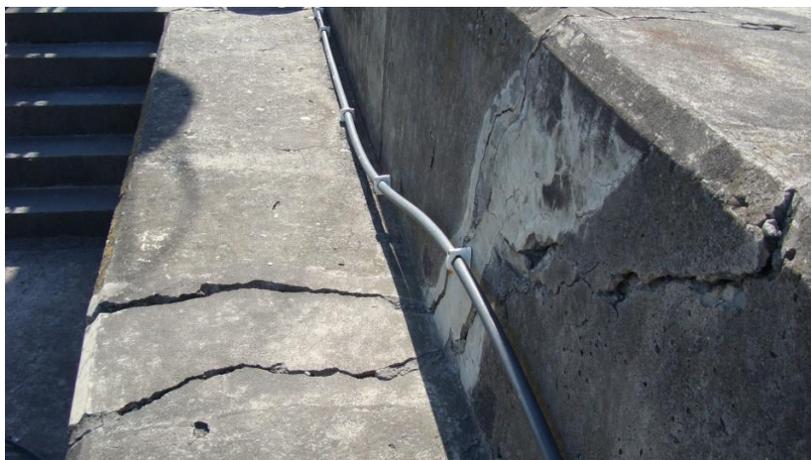


Figura 1 – Fendas identificadas na superestrutura do quebramar do porto do Funchal.

Fenómenos como os ventos, tempestades, sismos e atividades decorrentes dos seus propósitos, são alguns dos exemplos dos possíveis fenómenos responsáveis pela degradação do quebramar do porto do Funchal.

As infraestruturas portuárias são infraestruturas que requerem uma atenção especial por estarem sujeitas às mais severas condições externas. São também infraestruturas que não têm um acompanhamento tão minucioso como outras, sendo que hoje em dia, na maior parte das infraestruturas deste tipo, são efetuadas apenas inspeções visuais, importantes mas insuficientes pela sua natureza.

De modo a identificar as ações responsáveis e a quantificar o grau de evolução da deterioração ao longo do tempo no quebramar do porto do Funchal, foi planeada, e tem sido executada, a monitorização desta estrutura, de modo a permitir identificar e quantificar as prováveis causas.

O principal objetivo deste trabalho é o de analisar o comportamento do quebramar do porto do Funchal através da deteção dos seus deslocamentos e alterações morfológicas, utilizando para o efeito sistemas de posicionamento e navegação por satélite (GNSS), técnicas clássicas de topografia, acelerómetros e modelos numéricos e físicos. O trabalho apresenta-se inovador pela conciliação de métodos díspares, através da qual se procura concluir quais as principais razões para as deteriorações encontradas e também para o seu grau de evolução.

Neste trabalho pretende-se descrever o trabalho realizado, nomeadamente as campanhas de observação, os principais resultados obtidos pelas diferentes metodologias utilizadas, as potenciais alterações morfológicas da estrutura identificadas a partir da modelação física em laboratório e ainda a discussão dos cenários criados, resultantes das pressupostas variantes em modelo numérico. Na parte final da comunicação são apresentados os principais fundamentos para a deterioração encontrada no quebramar e ainda discutidas as vantagens e desvantagens da integração das diferentes metodologias de controlo para a correta monitorização deste tipo de infraestruturas.

2. Porto do Funchal

O Porto do Funchal é um porto de mar dedicado hoje em dia, exclusivamente, à atividade turística através da receção de navios de cruzeiro. Situa-se na parte sudoeste da ilha da Madeira numa pequena baía formada pela encosta natural da ilha entre a Ponta da Cruz e a Barreirinha, tratando-se de uma localização privilegiada pela proteção que daí advém. O Porto do Funchal foi construído de modo faseado. Primeiro a ligação de terra ao ilhéu de São José,

posterior ligação ao ilhéu da Pontinha e seu prolongamento, a melhorias contínuas que se iniciaram em 1762 e finalizaram com a construção da Gare Marítima do Funchal em 2010, mantendo-se com as suas dimensões e condições até aos dias de hoje (Pereira et al., 2012).

O quebra-mar do Porto do Funchal é um quebramar de estrutura mista que se caracteriza por uma superestrutura com cortina defletora e manto exposto protegido com tetrápodes com cerca de 1100 m de comprimento. Os fundos vão até aos -30 m, enquanto a crista da superestrutura se situa a cerca de 11 m de altura, ambos referidos ao Zero Hidrográfico (ZH).

O Porto do Funchal está dividido em três zonas de atracação distintas, a zona Norte, a Zona Sul e o cais da Cidade, sendo que cada uma possui características próprias para corresponder às diferentes necessidades de atracação de cada navio de cruzeiro. O estudo incidiu, sobre o quebramar de proteção da zona Sul pelo facto de ser a zona mais exposta às condições mais extremas e pelas fragilidades claramente evidenciadas.

O quebramar de proteção da zona sul de atracação dispõe de três áreas de atracação perfeitamente diferenciadas, sendo que cada uma delas com batimetrias diferentes o que implica que, dependendo das características de cada navio de cruzeiro, são usadas em conformidade.

Na Figura 2 é apresentado um ortofotomapa de parte da cidade do Funchal que enquadra o porto no seu contexto geográfico, enquanto o Quadro 1 são referidas as batimetrias de cada uma das zonas de atracação.

Zona de Atracção	Comprimento (m)	Profundidade ZH (m)
1	150	-3.0 a -6.0
2	425	-11.0
3	347	-11.0

Quadro 1 – Características das zonas de atracação 1, 2 e 3 do quebramar do porto do Funchal.



Figura 2 – Ortofotomapa da cidade e porto do Funchal

Os navios de cruzeiro apresentam dimensões cada vez maiores. Tal origina uma maior superfície exposta à ação do vento e uma necessidade de fundos mais profundos devido a calados de maiores dimensões, o que implica não só que as infraestruturas de atracação e proteção são cada vez mais solicitadas mas também que existe uma maior necessidade de zonas de atracação muito estáveis. Por estes motivos torna-se imprescindível o acompanhamento minucioso deste tipo de infraestrutura, de modo a avaliar-se se estão ou não preparados para níveis de exigência cada vez mais elevados.

3. Campanhas de Monitorização Estrutural

As campanhas de monitorização *in situ* tiveram como primeiro objetivo avaliar as condições de estabilidade e evolução estrutural do quebramar do porto do Funchal.

Posteriormente, e no evoluir do trabalho após o desenvolvimento dos modelos físico e numérico, os resultados obtidos nas campanhas de campo puderam ser confrontados com os

obtidos a partir de ambos os modelos, sendo até utilizados para calibração do modelo numérico para que os cenários considerados, relativos à modelação dos impactos da agitação marítima e da atracação, pudessem ser gerados com maior grau de confiança.

Na monitorização foram medidos deslocamentos com duas técnicas distintas: técnicas geodésicas por intermédio do GNSS e topografia clássica.

Foram também realizados ensaios de medição de vibrações (em fase de atracação e desatracação) utilizando acelerómetros de grande precisão (acelerómetros uniaxiais da Kinematics). Com base na análise espectral dos registos de acelerações obtidos foram identificadas as principais frequências naturais de vibração do quebramar.

A monitorização das referidas grandezas teve como objetivo o:

- controlo da Estabilidade Absoluta, para calcular o grau de evolução da instabilidade identificadas na superestrutura do quebramar;
- controlo dos Macro Movimentos dos Tetrápodes, para quantificar os deslocamentos dos tetrápodes de proteção e assim determinar as zonas do quebramar mais expostas à agitação marítima;
- controlo da Atracação e Desatracação de Navio de Cruzeiro, para analisar o impacto da atracação e desatracação de navios de cruzeiro no quebramar, particularmente importante pela crescente tonelagem desses navios.

3.1 Controlo de Estabilidade Absoluta do Quebramar

O sistema de Controlo de Estabilidade Absoluta destina-se a avaliar a estabilidade estrutural da superestrutura do quebramar, pois foram identificadas várias zonas deterioradas. Temia-se que essa evolução da deterioração fosse de tal forma elevada que pudesse por em risco a sustentabilidade da infraestrutura portuária a nível da segurança de todos os que a utilizam, bem como pela salvaguarda dos investimentos realizados.

A estabilidade foi avaliada com base em deslocamentos tridimensionais medidos por GNSS. Para tal foi constituída uma rede de monitorização composta por 12 pontos objeto materializados por marcas chumbadas nas zonas identificadas como sendo as mais sensíveis, situadas na crista da superestrutura do quebramar ao longo de uma extensão de 375 m (ver Figura 3(a)), e por um ponto exterior ao quebramar, considerado referência, e materializado pela estação permanente GNSS do Funchal pertencente a Rede Nacional de Estações Permanente ReNEP.

Definida a rede de monitorização, foi necessário definir a metodologia de observação. A metodologia adotada foi amplamente discutida em (Pereira et al., 2011) e caracterizou-se por períodos de observação de 2 horas, à cadência de 1 segundo, com uma máscara de elevação dos satélites de 10°, com órbitas precisas, modelo troposférico "Hopfield", modelo ionosférico calculado com as observações.

Como se tratava de um sistema de controlo a partir da comparação direta entre observações sequenciais, foi necessário definir uma época inicial para cada ponto de controlo. Definida a época inicial de controlo, foram realizadas 12 campanhas de observação, cobrindo um período de dois anos. Durante as campanhas foram instaladas antenas GNSS nos pontos objeto.

3.1.1 Resultados

Perante os resultados obtidos no período de Agosto de 2009 a Setembro de 2012, verificou-se que os pontos controlados sobre a superestrutura do quebramar apesar das fragilidades amplamente visíveis, não sofreram um grau de evolução suficientemente significativo para ter sido detetado no período de observação referido.

Sendo um sistema robusto, no sentido de que os pontos objeto estão materializados de forma a resistir a condições atmosféricas e de ondulação adversas, sempre que ocorrerem eventos que se possam considerar como suficientemente significativos (tempestades ou acidentes nas atracações e desatracações de navios de cruzeiro), estes podem continuar a ser controlados pela metodologia descrita de modo a se verificar se ocorrerem alterações nas coordenadas.

3.2. Controlo dos Macro Movimentos dos Tetrápodes

Os tetrápodes têm como objetivo proteger o quebra-mar dos impactos diretos da agitação marítima, sendo expectável que ao longo do tempo ocorram alterações na sua posição, resultado de ajustamentos entre várias posições de equilíbrio, maiores ou menores dependendo da intensidade da agitação marítima incidente.

O controlo dos macro movimentos dos tetrápodes destina-se a acompanhar a evolução da posição dos tetrápodes ao longo do tempo do controlo, utilizando para isso técnicas clássicas de topografia. A rede de monitorização é composta por 88 pontos de controlo demarcados sobre os tetrápodes subdivididos por três zonas de impacto (Figura 3 (b)), e oito estações de controlo distribuídas pelas mesmas três zonas, de acordo com as necessidades de visibilidade direta entre ambos.

As variações posicionais planimétricas e altimétricas foram determinadas através da medição de ângulos horizontais e ângulos verticais, respetivamente, entre dois pontos de coordenadas bem definidas e os tetrápodes (Pereira et al., 2011).



Figura 3 – (a) Distribuição espacial dos pontos de controlo pertencentes à rede de monitorização da Estabilidade Absoluta do Quebramar; (b) Subconjuntos de Tetrápodes (Pereira et al., 2011).

3.2.1. Resultados

Após a realização das diversas campanhas de controlo dos macro movimentos dos tetrápodes, verificou-se uma alteração generalizada da posição da maioria dos tetrápodes controlados, sendo que nos casos mais extremos a variação de posição chegou a 3 metros.

A título exemplificativo, o tetrápode identificado com o número 55 e que fazia parte do grupo oeste sofreu uma variação de 2.9 metros na componente paralela ao quebra-mar e de 1.8 metros na componente transversal. Verticalmente a sua variação foi de 0.41 metros.

3.3. Controlo da Atracação e Desatracação de Navios de Cruzeiro

O controlo da atracação e desatracação de navios de cruzeiro tinha como principal objetivo analisar o impacto dos navios de cruzeiro no quebra-mar aquando da sua atracação ou desatracação. A crescente dimensão e tonelagem destes navios em resultado de uma procura cada vez maior deste meio de transporte nos tempos mais recentes, leva a que seja necessário equacionar alterações na forma e dimensão dos quebramares.

Para estudar o impacto que os navios de cruzeiro têm sobre o quebra-mar do Porto do Funchal, definiu-se uma rede composta por três pontos de controlo. Esses pontos de controlo são os pontos MC09, MC10 e MC11 da rede constituída para o controlo da Estabilidade Absoluta do Quebramar, já descrita anteriormente. Para cada época de controlo da atracação dos navios de cruzeiro são utilizados dois desses pontos de controlo, escolhidos de acordo com o comprimento do navio de cruzeiro a atracar e os pontos de atracação (Pereira et al., 2012). A metodologia de observação foi também semelhante.

Foi também realizada uma campanha conjunta de observação GNSS e acelerómetros entre os dias 21 e 24 de Fevereiro de 2012. Foram utilizados 3 acelerómetros uniaxiais na proximidade do ponto MC10, sendo que dois foram montados para medições na direção vertical e o terceiro na direção horizontal perpendicular ao quebra-mar.

A monitorização do processo de atracação foi iniciada 15 minutos antes das manobras de aproximação e atracação do navio de cruzeiro, finalizando cerca de 15 minutos após a estabilização do navio ao quebra-mar. O estudo do processo de desatracação, em analogia ao processo de atracação, iniciou-se igualmente cerca de 15 minutos antes das manobras de desatracação se iniciarem, até aproximadamente 15 minutos após a saída por completo do navio (Pereira et al., 2012).

3.3.1. Resultados

Aplicou-se uma análise de Fourier, através da função FFT do Matlab®, para decompor o acelerograma medido em frequências e para calcular o espectro de amplitudes e assim identificar as principais frequências naturais de vibração da estrutura. Na Figura 4 apresentam-se os espectros obtidos para o primeiro e último intervalo utilizados: o gráfico da esquerda corresponde a uma fase em que o navio se encontrava muito longe do quebra-mar e o gráfico da direita corresponde ao período em que o navio já tinha terminado as manobras de atracação. Nos gráficos são visíveis alguns picos que podem corresponder a algumas das frequências de vibração naturais da estrutura. A análise do primeiro espectro mostra que, de entre as várias ondas em que se decompõe o acelerograma medido, destaca-se claramente, pela sua maior amplitude, a onda correspondente à frequência natural de 8.69 Hz. Na análise do segundo espectro verificamos não só que a amplitude aumenta consideravelmente, mas também que se destacam várias ondas: 4.34 Hz, dos 7.92 Hz, dos 8.69 Hz, dos 13.06 Hz e dos 17.38 Hz (Pereira et al., 2012).

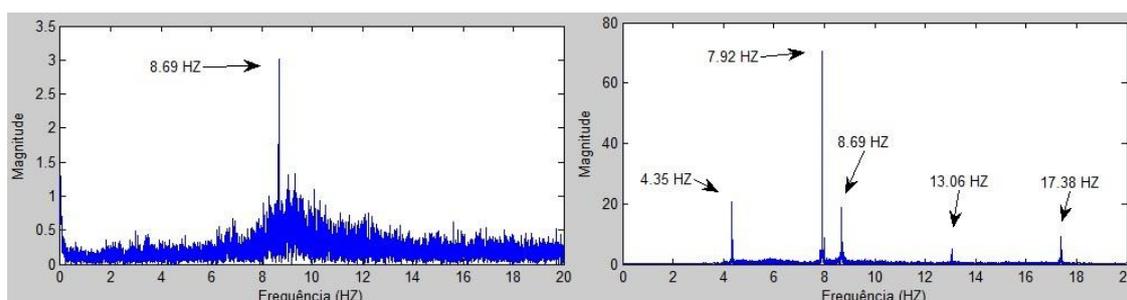


Figura 4- Análise do processo de atracação usando a FFT.

4. Modelo Físico

Um modelo físico, por definição, é uma representação aproximada, do todo ou parte, de algo que existe ou existirá na realidade e que se pretende representar de forma reduzida ou amplificada com a finalidade de recolher informação útil relativa ao objeto de estudo, proporcionando uma compreensão mais alargada sobre o mesmo.

Os modelos físicos são utilizados frequentemente como elementos orientadores para a própria definição em projeto das características das infraestruturas, bem como para *a posteriori*, com base nas condições existentes, já conhecidas, estudar e procurar compreender o comportamento e aplicar ajustamentos que se considerem fundamentais para a salvaguarda dessas infraestruturas.

São diversas as potencialidades dos estudos realizados sobre ensaios em modelos físicos reduzidos para qualquer tipo de análise ou elemento que se queira aprofundar. São complementos fundamentais para a compreensão geral de qualquer tipo de infraestrutura, promovendo a criação de cenários reais e consequentes respostas para as diversas condições limite que se queiram simular.

As principais limitações prendem-se com a identificação e quantificação dos efeitos de escala e de laboratório. Segundo Silva (2010), estes efeitos são possíveis de quantificar e minimizar através de metodologias próprias que possibilitam o uso destas técnicas de forma sustentável.

O principal objetivo dos ensaios realizados sobre o modelo físico do quebramar do porto do Funchal prende-se com a procura de respostas a nível da evolução morfológica das diversas camadas constituintes do perfil do quebramar desde a sua base submersa, até à

superestrutura, identificando as ações e fatores externos que potenciam as alterações morfológicas, de forma a tentar identificar as principais razões para as deteriorações identificadas.

Assim, para o desenvolvimento do modelo físico foi necessário contemplar quatro fases: i) de preparação e conceção dos ensaios a desenvolver, de acordo com a finalidade e especificidades próprias do quebramar; ii) de montagem do modelo em laboratório; iii) de realização dos ensaios e iv) análise dos resultados.

4.1 Especificações Gerais

Os testes desenvolvidos sobre o modelo físico reduzido foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LH-SHRHA-DEC-FEUP).

O tanque de ondas tem 28 metros de comprimento, 12 metros de largura e 1.3 metros de profundidade, do qual faz ainda parte integrante um sistema de geração de agitação do tipo pistão e uma sala de controlo com os equipamentos de geração, recolha e análise de dados.

O sistema de geração de agitação (Figura 5) é um sistema HR Wallingford do tipo pistão, multi-elemento, composto por 16 pás de fibra revestidas de vidro com 75 centímetros de largura cada, separadas em conjunto de 8 pás controladas por duas unidades modulares distintas, e por um sistema ativo de absorção de reflexão, de forma a eliminar as interferências que existiriam a quando da geração da agitação seguinte.

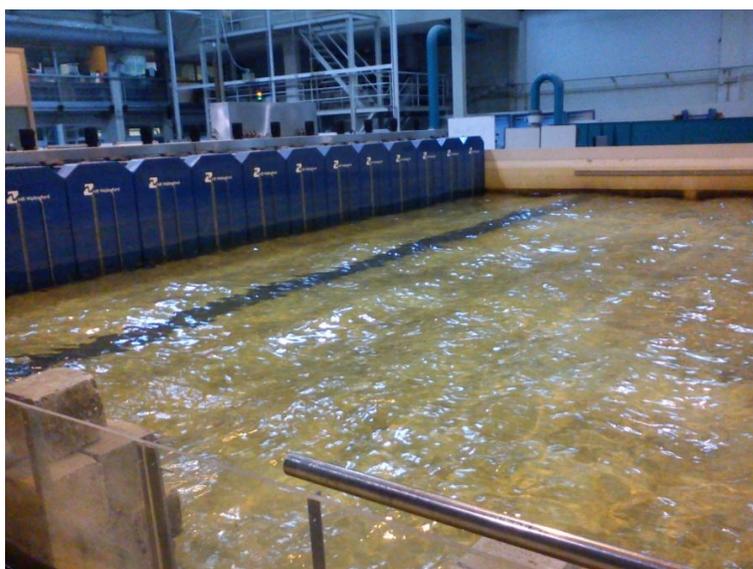


Figura 5 – Sistema de Geração de Agitação. Módulo de pás e tanque de ondas.

Os softwares utilizados nesta etapa foram o *HR Wave Generation* para o Sistema de Geração de Agitação e o *HR-DAQ-Data Acquisition and Analysis Software Program* para a recolha e análise de dados.

Dos equipamentos utilizados faziam igualmente parte, para a medição das alturas de ondas geradas pelo sistema de agitação, sondas hidrodinâmicas cuja finalidade era garantir as alturas de ondas que entravam efetivamente no canal orientador e alcançavam o modelo.

Os testes pretendiam simular as condições limite para períodos de retorno bem definidos, procurando compreender o comportamento da estrutura ao longo dos ensaios e as correspondentes fragilidades demonstradas, e conseqüentemente, fazer o paralelismo com o protótipo.

Os períodos de retorno foram escolhidos de acordo com os dados disponíveis de trabalhos de recolha anteriores (Ramos, 2009) e apresentados no Quadro 2.

Período de Retorno (Anos)	H MAX (metros)	Hs (metros)
5	9.38	5.31
10	10.66	6.03
15	11.37	6.43
20	11.87	6.72
25	12.26	6.93
30	12.58	7.11
50	13.45	7.61
75	14.14	8.00
100	14.63	8.28

Quadro 2 – Altura máxima (HMAX) e altura significativa de onda (Hs) para cada um dos períodos de retorno.

4.2. Definição da Escala e Construção do Modelo

A escala geométrica escolhida para o modelo físico reduzido do quebramar foi definida de acordo com as condicionantes existentes à partida. A escala foi definida de acordo com os materiais já existentes no laboratório, e que pudessem ser reutilizados de outros ensaios anteriores, de modo a otimizar os recursos existentes e possibilitar a poupança de tempo e recursos financeiros.

Dos materiais necessários para a construção do modelo, foram os tetrápodes que condicionaram a escala do modelo, uma vez que eram o material mais escasso e mais difícil de reproduzir, sendo necessário para tal, despender um período de tempo e recursos financeiros amplos.

Uma vez que os tetrápodes disponíveis para o modelo tinham 156.6 gramas de peso e os tetrápodes no protótipo 25 TF (Toneladas Força), obteve-se a escala geométrica pelas equações (1) a (4).

Seja:

$$\lambda_W = \lambda_V * \lambda_l^3 \quad (1)$$

se considerarmos $\lambda_V = 1$, temos que:

$$\lambda_W = \lambda_l^3 \quad (2)$$

logo:

$$\lambda_W = \lambda_l^3 = \frac{0.1566}{25000} = \frac{1}{159642.4} \Rightarrow \lambda_l = \frac{1}{54.25} \quad (3)$$

e

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} = 7.365 \quad (4)$$

onde,

λ_W → Escala dos Pesos

λ_l → Escala dos Comprimentos

λ_t → Escala dos Tempos

Assim, a escala de comprimentos e a escala de tempos são 1:54.25 e 7.365 respetivamente.

O modelo foi construído de acordo com o perfil tipo do quebramar obtido a partir das telas finais entregues pelo construtor à administração dos Portos da Madeira (APRAM).

O quebramar do porto do Funchal é um quebramar de estrutura mista que se caracteriza por ser uma superestrutura com cerca de 1100 m de comprimento, com cortina defletora e manto exposto protegido com tetrápodes.

Os fundos vão até aos -30 m, enquanto o topo da crista da superestrutura se situa a cerca de 11 m de altura, ambos referidos ao Zero Hidrográfico.

O perfil é composto por várias camadas de materiais, como é demonstrado na Figura 6.

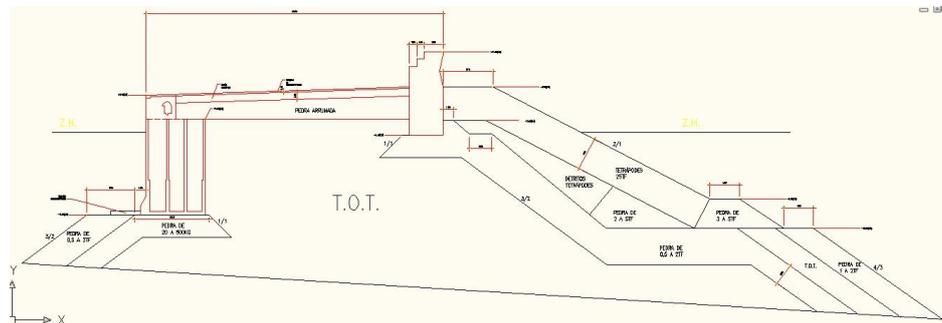


Figura 6 – Perfil Tipo do quebramar do porto do Funchal.

O quebramar é composto por: i) camadas de pedra de todo o tamanho (T.O.T) nas camadas mais interiores; ii) pedra de 0.5 a 5 TF nas camadas intermédias; iii) pedra de 3 a 5 TF na banqueta de enrocamentos; iv) detritos de tetrápodes nas camadas mais exteriores e v) tetrápodes (25 TF), no manto resistente. A superestrutura do perfil é composta por betão com um muro cortina defletor que chega aos 11 metros referidos ao Zero hidrográfico.

Foi construído um modelo a duas dimensões junto à parede do tanque na direção de uma das janelas existentes para que assim fosse possível acompanhar a sua evolução ao longo dos ensaios.

A Figura 7 representa o perfil do quebramar, pintado no vidro lateral do tanque de ondas a cor vermelha, à escala de modo a servir de base de orientação, balizando cada uma das camadas a construir assim como os materiais a utilizar.



Figura 7 – Perfil tipo do quebramar desenhado no vidro lateral do tanque de ondas.

Os materiais foram separados de acordo com a escala definida, sendo que para cada uma das camadas foram criados volumes de materiais especificamente atribuídos para cada um dos pesos, seguindo a escala imposta pelos pesos e tamanhos aproximados.

Na escala de pesos foram considerados os valores apresentados no Quadro 3.

Tipo	Peso (gramas)
1	2.2
2	5.4
3	8.3
4	15.0
5	25.0
6	51.0
7	70.0
8	96.0
9	228.0
Tetrápodes	156.6

Quadro 3 – Tipo e pesos dos grupos de materiais.

Todos os materiais, à exceção da superestrutura, foram aproveitados de projetos anteriores, sendo somente necessário a construção dos dois módulos da superestrutura.

A construção do modelo físico reduzido do quebramar desenrolou-se por diferentes fases, desde a colocação das divisórias e da camada de suporte posterior do modelo até à conclusão da construção da camada mais exterior de tetrápodes e posterior enchimento do tanque de água (Figura 8).



Figura 8 – Fase Inicial e fase final da construção do modelo físico.

4.3. Condições Teste

Uma vez que, o principal objetivo dos trabalhos era estudar a evolução morfológica das diversas camadas constituintes do perfil do quebramar, desde a sua base submersa à sua superestrutura, foi necessário definir as várias condições que fossem de encontro às necessidades de teste nessas diferentes camadas.

Com base nos dados disponíveis das alturas de onda significativa para cada um dos períodos de retorno apresentadas no Quadro 2, foram selecionados os períodos de retorno cujas variações de altura significativa de onda fossem suficientemente discrepantes, de modo a obter-se do ensaio resultados suficientemente esclarecedores e representativos. Foram escolhidos os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos pelas suas condições perfeitamente distintas. O nível de maré utilizado em todos os ensaios foi o equivalente ao PMAV (Preia Mar de Águas Vivas) de 2.5 metros referidas ao Zero Hidrográfico.

As condições de agitação marítima criadas nos ensaios foram a agitação irregular do espectro *Jowswap* (Silva, 2010), de acordo com as alturas significativas de ondas e períodos respetivos.

Uma vez que as características das alturas significativas das ondas e respetivo período diferiam entre cada período de retorno selecionado, as durações dos ensaios foram diferentes, sendo no entanto, constante a cadência de registo das variações do nível da superfície livre de água (60 Hz).

A duração dos ensaios para cada um dos períodos de retorno selecionados são apresentados no Quadro 4.

Período de Retorno (anos)	Duração (seg)
20	700
50	770
100	840

Quadro 4 – Duração dos Espectros *Jonswap* para os Períodos de Retorno dos Ensaios.

As sondas hidrodinâmicas, num total de cinco, foram colocadas dentro do tanque de ondas estando a primeira logo à entrada do canal para dar informação sobre a onda que entrava efetivamente no canal, e as restantes quatro, colocadas às distâncias específicas entre elas e referidas ao modelo. As distâncias ao modelo de cada um das quatro sondas foram de 4.57 m, 4.45 m, 4.26 m e 3.47 m.

4.4. Ensaios Realizados

Os ensaios realizados sobre o modelo físico reduzido foram efetuados em dois dias consecutivos: quatro ensaios no primeiro dia; os restantes 11 ensaios no segundo.

Uma vez que para cada um dos períodos de retorno se procurou “configurar” e alcançar as alturas de onda significativa e períodos específicos, foram necessários vários ensaios até se conseguir obter para cada um dos períodos de retorno escolhidos as correspondentes alturas significativas de ondas que entravam efetivamente no canal de ensaios.

Após cada ensaio, foram analisados os resultados estatísticos das alturas significativas das ondas geradas e que entravam efetivamente no canal em cada uma das sondas hidrodinâmicas colocadas dentro do tanque de ondas. No caso das alturas significativas das ondas serem superiores ou inferiores ao desejado (nos casos em estudo foram sempre inferiores ao desejado), era dado um incremento ou decréscimo no ganho das pás geradoras da agitação para que as alturas significativas de ondas fossem alcançadas, de forma a que os ensaios decorressem com as características de base desejadas.

Assim, foram realizados 15 ensaios de acordo com o apresentado no Quadro 5.

Ensaio	Período de Retorno (anos)	Ganho nas Pás
01	20	Sem Ganho
02	20	1.10
03	20	1.15
04	50	Sem Ganho
05	20	Sem Ganho
06	20	1.10
07	20	1.15
08	50	Sem Ganho
09	50	1.15
10	100	Sem Ganho
11	100	1.15
12	50	Sem Ganho
13	50	1.15
14	100	1.15
15	50	1.15

Quadro 5 – Ensaios realizados.

Os ensaios a partir do ensaio número 12 foram realizados a partir das condições iniciais. Para o efeito, foi necessário entrar no tanque de ondas e refazer, na medida do possível, o estado inicial do modelo.

O ensaio número 15 foi o único ensaio em que o tempo de duração diferiu do tempo dos ensaios dos períodos de retorno semelhante e já apresentados no Quadro 4. No ensaio número 15, como se tratava do último ensaio a realizar, decidiu-se realizar um ensaio de duas horas de modo a comprovar a evolução das camadas inferiores do quebramar.

Nestes ensaios a variação das camadas submersas mais exteriores não sofreram variação significativa como se pode comprovar no desenho CAD da Figura 9.

Verificou-se assim que, para os ensaios para períodos de retorno de 20 anos o comportamento da infraestrutura foi, na sua globalidade, estável.

No decorrer dos ensaios para os períodos de retorno de 50 anos, apesar de já existir um reforço dos tetrápodes no coroamento, as ondas geradas com altura significativa superior ao período de retorno de 20 anos, verificou-se que as ondas continuaram a rebentar sobre a superestrutura e não sobre o defletor.

Os galgamentos tornaram-se mais frequentes e de maior intensidade, tendo-se verificado uma pequena cedência da superestrutura aos embates da agitação.

As camadas submersas mais expostas, a banqueteta e o manto exposto submerso de enrocamentos sofreram alguns deslizamentos, sendo mais evidentes na banqueteta evidenciando um escorregamento progressivo, alinhando-se com o manto exposto submerso de enrocamentos.

No manto de tetrápodes, denotou-se o início de alguns movimentos na agitação mais pronunciada, revelando também alguns deslizamentos por ventura facilitados pelos movimentos na banqueteta. As instabilidades começaram a ser visíveis.

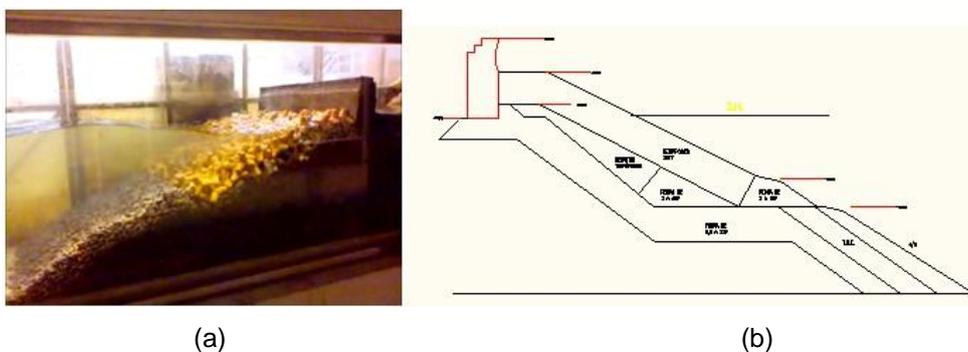


Figura 10 – Fotografia (a) e desenho CAD (a) após os ensaios para os períodos de retorno dos 50 anos.

Verificou-se assim que, para os ensaios para períodos de retorno de 50 anos o comportamento da infraestrutura foi ligeiramente instável na sua globalidade e em especial para o manto exposto de enrocamentos e banqueteta.

Nos ensaios para períodos de retorno de 100 anos verificou-se uma grande variação na banqueteta com movimentos ascendentes e descendentes, bem como no manto exposto submerso de enrocamentos que tenderam a se moldar num só.

Denotou-se claramente uma evolução para um declive uniforme nessas duas camadas, perdendo-se a separação evidente entre elas e começando por evidenciar uma forma de um “S” prolongado.

O manto dos tetrápodes tendeu igualmente a se prolongar na direção descendente, sendo agora claramente preenchido pelo material mais leve que foi sendo movimentado em ambas as direções. As protuberâncias existentes em projeto foram claramente suavizadas, deixando de se verificar qualquer fronteira entre as diferentes camadas (Figura 11).

Os galgamentos tornaram-se constantes e de intensidade significativa, provocando impactos de grande energia sobre a superestrutura, resultando em violentos abalos que a levaram a ceder inclinando-se no sentido contrário à incidência da agitação. A Figura 12 retrata a inclinação sofrida por um dos módulos da superestrutura.

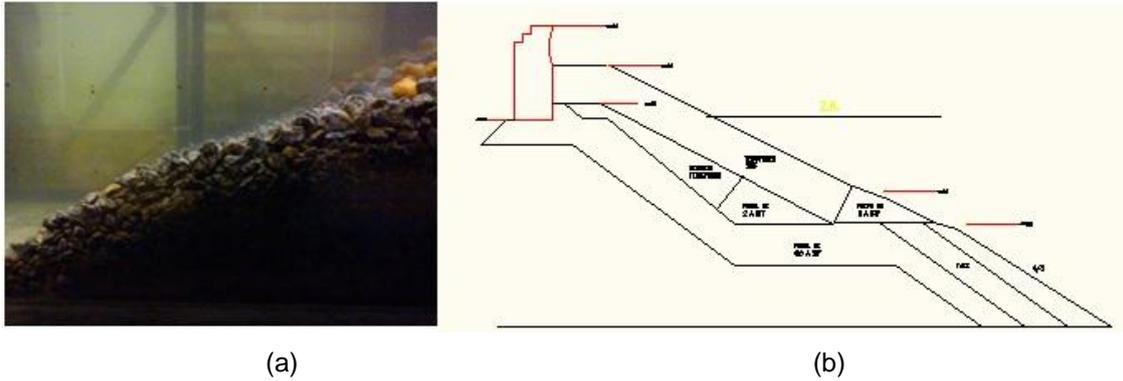


Figura 11 – Fotografia (a) e desenho CAD (b) após os ensaios para os períodos de retorno dos 100 anos.

Verificou-se assim que, para os ensaios para períodos de retorno de 100 anos, o comportamento da infraestrutura foi bastante instável, com galgamentos constantes e com a morfologia das suas camadas submersas em grande parte alteradas.



Figura 12 – Inclinação do módulo mais afastado da superestrutura evidenciando o impacto da agitação.

Os ensaios foram realizados sequencialmente até ao ensaio número 11, em conformidade com o que acontece na realidade no protótipo, uma vez que a evolução é sempre feita no sentido progressivo, isto é, quando existe alguma instabilidade após algum evento de maior intensidade que provoque alguma alteração nas camadas mais expostas do perfil do quebramar, não se efetua nenhuma operação de correção ou manutenção regular, salvo raras as exceções quando se verificam danos evidentes.

A partir do ensaio 12 até ao ensaio número 15, realizaram-se 4 ensaios distintos, sendo sempre repostas as condições iniciais (dentro do possível), de modo a verificar as evoluções somente para aquele ensaio.

Verificou-se que as evoluções das camadas mais expostas não era tão evidentes, contudo, as instabilidades na superestrutura e galgamentos foram semelhantes, tal como era expectável.

Como já foi referido, não se tratam de situações rotineiras no protótipo, mas que são úteis para demonstrar que o que provoca as instabilidades são um leque de acontecimentos sequenciais e não eventos isolados no tempo.

A quando do último ensaio, e uma vez que seria de duração bastante larga, optou-se por subir um pouco mais o coroamento do manto de tetrápodes de modo a proteger mais a superestrutura dos impactos violentos da agitação, privilegiando desse modo a dissipação de energia proveniente dessa ação. Concluiu-se que essa opção revelava-se ser muito vantajosa para a proteção da superestrutura, na medida que os galgamentos foram substancialmente reduzidos. Este cenário estudado no modelo, evidenciou a necessidade de uma recarga de tetrápodes no quebramar do porto do Funchal.

Foi igualmente evidente a evolução da tendência para o perfil em “S”. No entanto, não é tão evidente como no final do ensaio número 11, relativo ao período de retorno de 100 anos, como se encontra demonstrado e já referido na Figura 11.

5. Modelo Numérico

À semelhança do que já foi atrás referido relativamente aos modelos físicos, os modelos numéricos são utilizados como elementos de referência que contribuem para aprofundar o conhecimento do objeto de estudo, podendo também contribuir para melhorar a caracterização e configuração dos modelos físicos. Esta relação é bidirecional na medida em que o conhecimento gerado em ambos os casos poderá ser usado como complemento do outro.

São diversas as potencialidades dos estudos realizados utilizando os modelos numéricos pela facilidade de repetição de testes, bem como pela facilidade de ajuste das condições de teste em qualquer fase dos estudos (é fácil mudar os parâmetros dos modelos numéricos). No caso do presente trabalho os principais objetivos dos estudos realizados em modelo numérico foram:

- i) determinar numericamente as principais frequências naturais de vibração da infraestrutura com vista a calibrar os parâmetros de deformabilidade do modelo por forma a que as frequências calculadas se ajustem às frequências naturais identificadas *in-situ* a partir dos resultados dos ensaios de medição de acelerações; e
- ii) calcular os deslocamentos expectáveis quando aplicadas forças correspondentes à atracação de navios de cruzeiro (zona protegida da agitação) e forças associadas à agitação marítima (zona exposta à agitação).

5.1. Especificações Gerais

Para a modelação numérica do quebramar do porto do Funchal foi desenvolvido um programa de Elementos Finitos 2D (Zienkiewicz, O., Taylor, R., 2000) em Matlab® que permite simular o comportamento estrutural do quebramar sob ações estáticas e dinâmicas, admitindo a hipótese de equilíbrio de placa e materiais isotrópicos com comportamento elástico linear (estado plano de deformação). O referido programa em Matlab®, foi desenvolvida no âmbito de um curso de modelação computacional denominado “Programação em FreeMat/MatLab – Desenvolvimento de Aplicações para Engenharia Civil” que decorreu em Setembro de 2012 no Instituto Superior Técnico de Lisboa (Oliveira, S.; Espada, M., 2012).

A análise dinâmica do quebramar foi efetuada numericamente com o objetivo de determinar as frequências naturais e configurações dos principais modos de vibração da superestrutura do quebramar. Os parâmetros de deformabilidade (E e ν) dos materiais utilizados na zona em aterro e do betão da superestrutura são calibrados por forma a que as frequências calculadas numericamente coincidam aproximadamente com as frequências naturais identificadas *in-situ* com base nos ensaios de medição de vibrações efetuados.

Como se mostra mais à frente, para simular numericamente a resposta do quebramar às forças devidas à atracação dos navios e às forças devidas à agitação marítima consideram-se, simplificada, forças estáticas equivalentes aplicadas no modelo após a referida calibração dos parâmetros de deformabilidade da zona em aterro e do betão da superestrutura.

5.2. Malha de Elementos Finitos do Quebramar do Porto do Funchal e Caracterização do Modelo

Na modelação numérica foram utilizados elementos finitos isoparamétricos do 2º grau do tipo quadrado com 8 pontos nodais (nos vértices e a meio dos lados). Foi inicialmente elaborada uma malha de elementos finitos de 4 pontos nodais (Figura 13) a qual, em seguida, foi convertida automaticamente numa malha de 8 nós acrescentado nós intermédios a meio dos lados dos elementos já existentes (Figura 14).

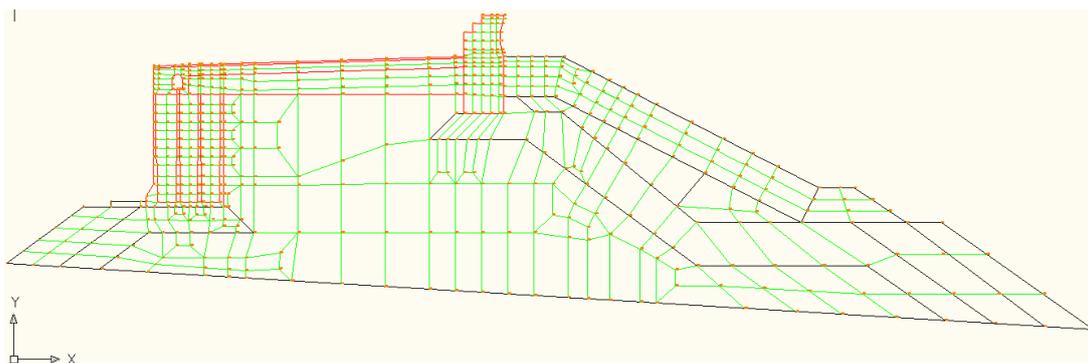


Figura 13 – Malha de Elementos Finitos de 4 nós.

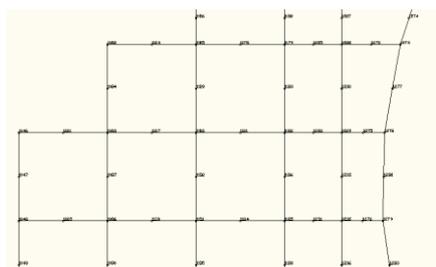


Figura 14 – Pormenor da malha de Elementos Finitos de 8 nós (zona superior da superestrutura).

A atribuição das características a cada um dos elementos de acordo com o material foi efetuada considerando os 15 materiais constituintes do perfil do quebramar, apresentados no Quadro 6.

Material	Tipo	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)
1	Betão	2.00E+07	0.20	--
2	Betão Ciclópico	1.00E+07	0.25	-
3	Caixões de Betão	2.00E+07	0.20	-
4	Calçada/Betuminoso	4.00E+06	0.40	-
5	Pedra Arrumada	1.00E+05	0.30	-
6	Pedra de 0.5 a 2 TF	5.00E+04	0.30	-
7	Pedra de 1 a 2 TF	2.50E+04	0.30	-
8	Pedra de 2 a 5 TF	2.50E+04	0.30	-
9	Tetrápodes	1.00E+05	0.30	-
10	Detritos de Tetrápodes	1.00E+05	0.30	-
11	TOT	1.00E+05	0.30	-
12	Pedra de 20 a 500 Kg	5.00E+04	0.30	-
13	Blocos Paralelepípedos	2.00E+07	0.20	-
14	Outro Betão	2.00E+07	0.20	-
15	Betão Superestrutura	2.00E+07	0.2	24

E – Módulo de Elasticidade; ν – Coeficiente de Poisson; γ – Peso Próprio

Quadro 6 – Características das camadas de materiais.

Na análise da resposta dinâmica da superestrutura do quebramar (betão) admitiu-se a hipótese de fundação elástica com massa nula. Dado que no cálculo dos deslocamentos não se consideram as forças associadas ao peso próprio (são consideradas apenas as forças associadas à atracação e à agitação marítima) optou-se por apresentar na tabela anterior apenas o valor do peso específico para o material da superestrutura (material 15, Betão).

5.3. Estudo Paramétrico. Calibração do Modelo com Base no Ajuste das Frequências Naturais Calculadas e Identificadas *in-situ*

Após a elaboração da malha de elementos finitos foi realizado um estudo paramétrico com vista a calibrar os parâmetros de deformabilidade do modelo por forma a que as frequências calculadas numericamente se ajustem às frequências naturais identificadas *in-situ*. Os principais resultados desse estudo apresentam-se seguidamente.

No primeiro cálculo efetuado consideram-se as características dos materiais e camadas base de projeto, apresentadas no Quadro 6. Na Figura 15 mostra-se o zonamento considerado.

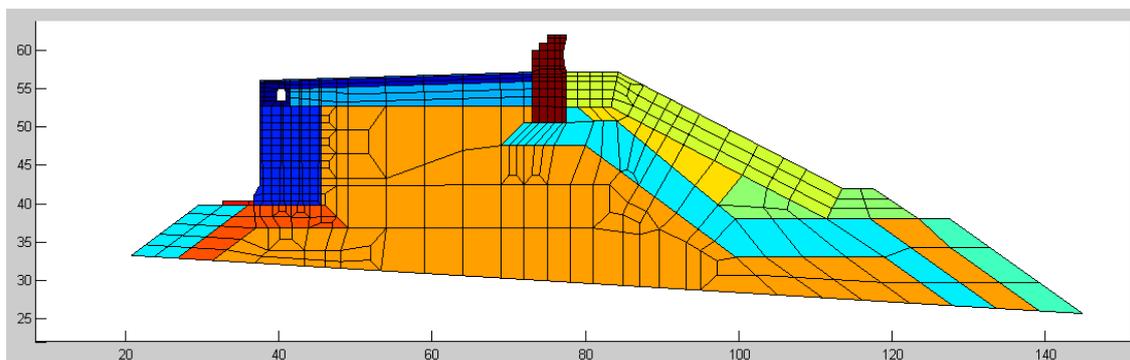


Figura 15 – Perfil do quebramar. Representação das camadas com diferentes materiais.

No quadro 7 apresentam-se as seis primeiras frequências naturais de vibração calculadas numericamente considerando as propriedades elásticas referidas no quadro 6.

Modo	Frequência Natural (Hz)
1	4.60
2	4.86
3	10.14
4	79.53
5	132.02
6	146.81

Quadro 7 – Frequências naturais de vibração calculadas para as condições base.

Segundo Pereira et al., (2012) nas campanhas de campo realizadas na superestrutura do quebramar do porto do Funchal, as frequências dos picos espectrais mais importantes são: 4.34 Hz, 7.92 Hz, 8.69 Hz, 13.06 Hz e 17.38 Hz.

Como se pode ver, as frequências obtidas numericamente para as condições base (parâmetros elásticos E e ν apresentados no Quadro 6), não correspondem às obtidas nas campanhas de campo.

Com vista a determinar os parâmetros E e ν das várias camadas do aterro para os quais se obtêm frequências naturais do modelo mais próximas das frequências identificadas *in-situ* foi efetuado um estudo paramétrico, envolvendo uma sequência de 10 cálculos que conduziu a uma solução otimizada que se considerou aceitável. Esta solução caracteriza-se por condições de maior deformabilidade nas camadas mais expostas à agitação marítima (manto de tetrápodes e detritos de tetrápodes), nas camadas sob a superestrutura e na zona sob os detritos de tetrápodes.

São apresentadas no Quadro 8, as características elásticas dos materiais para a solução resultante do estudo paramétrico efetuado (modelo calibrado).

Material	E (kPa)	ν
7	1.25E+04	0.3
8	1.25E+04	0.3
9	1.00E+05	0.3
10	1.00E+05	0.3
17	5.00E+04	0.3
18	2.50E+04	0.3
21	7.50E+04	0.3

Quadro 8 – Características elásticas dos materiais para a solução resultante do estudo paramétrico efetuado (modelo calibrado).

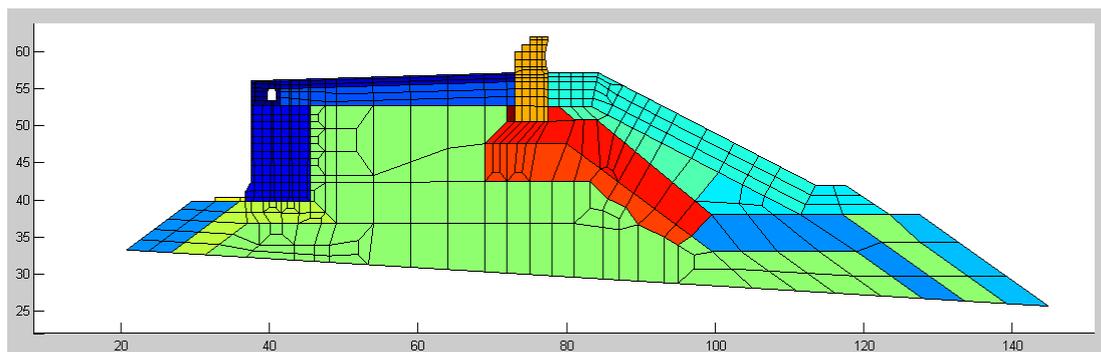


Figura 16 – Perfil do quebramar representado pelas camadas de materiais para o cenário escolhido.

As frequências calculadas com o modelo calibrado apresentam-se no Quadro 9.

	Frequência (Hz)
1	3.81
2	4.41
3	8.69
4	79.12
5	131.93
6	146.49

Quadro 9 – Frequências naturais de vibração calculadas com o modelo calibrado.

5.4. Deslocamentos devidos às Forças da Atracção de Navios de Cruzeiro e Forças Equivalentes da Agitação Marítima

Para o modelo calibrado (que se admite representar adequadamente as condições existentes no perfil do quebramar do porto do Funchal), foram considerados cenários para estudar os deslocamentos expectáveis quando aplicadas forças máximas devido à atracção de navios de cruzeiro, bem como devido à força equivalente à pressão da agitação marítima aquando da ocorrência de tempestades.

Segundo Ramos (2009), a reacção transmitida pelas defensas à estrutura aquando de uma atracção típica é de 2786 kN, enquanto as forças horizontais e as forças verticais devidas à agitação marítima são de 4632 e 1322 kN/m, respetivamente.

Para determinar as forças a aplicar no modelo foi utilizado o método de Goda (Figura 17).

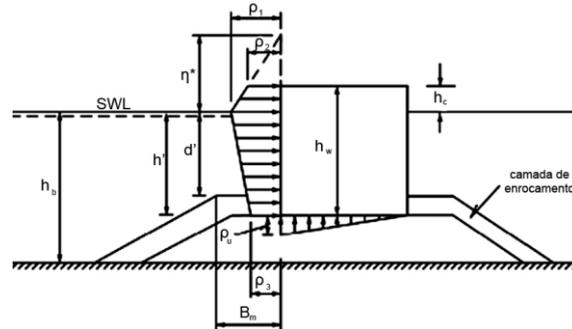


Figura 17 – Método de Goda (Fonte: Coastal Engineering Manual, 2006).

Na Figura 18 indicam-se as zonas onde foram aplicadas as forças de atracção e da agitação marítima, tendo em consideração a Preia Mar de Águas Vivas (PMAV) de 2.5 metros referidas ao Zero Hidrográfico.

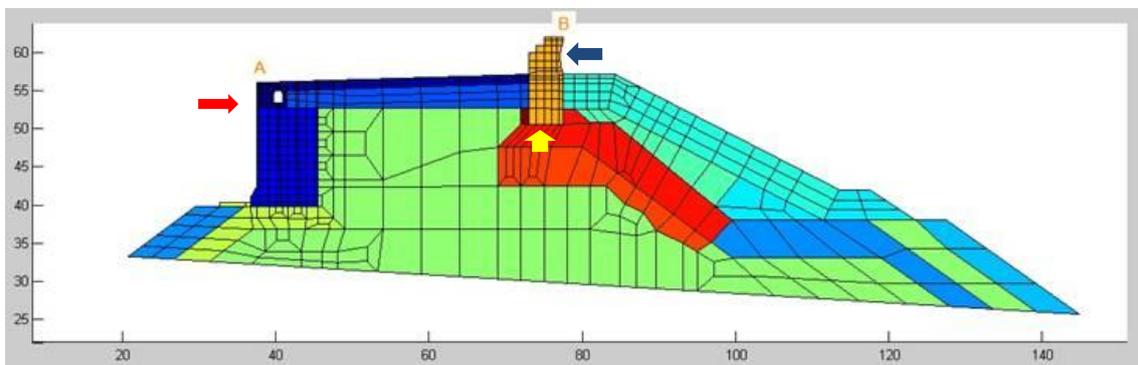


Figura 18 – Forças Aplicadas Representadas na Malha de Elementos Finitos.

A força estática equivalente à força máxima estimada para a atracção de navios de cruzeiro (seta a vermelho) é aplicada como uma força de superfície distribuída em dois elementos finitos (na direcção horizontal). A força estática equivalente à agitação marítima (seta azul) é aplicada como uma força distribuída normal, nos 13 elementos finitos situados na parte lateral direita da superestrutura. Consideraram-se também as forças devidas à subpressão as quais foram aplicadas (na direcção vertical, de baixo para cima) nos 5 elementos de contacto betão-aterramento, na parte inferior da superestrutura.

5.5. Resultados Obtidos para as Forças Aplicadas

Com os cálculos efetuados simularam-se: i) as condições de atracção de navios de cruzeiro na parte protegida do quebramar e ii) as condições para a força equivalente exercida pela agitação marítima. Nos dois casos, consideraram-se as condições de PMAV de 2.5 metros referidas ao Zero Hidrográfico. Foi considerada a hipótese de ocorrência de deterioração das condições de fundação das camadas submersas, nomeadamente no manto de tetrápodes e detritos de tetrápodes, na banquetta e manto submerso de enrocamentos, bem como nas camadas mais interiores sob a superestrutura (hipótese considerada anteriormente). Os deslocamentos obtidos para as duas hipóteses de carga apresentam-se no Quadro 10.

Tipo de Força Aplicada	Deslocamento Máximo X (m)	Deslocamento Máximo Y (m)
Navio	0.0311 (Ponto A)	0.0086 (Ponto A)
Agitação	0.0297 (Ponto B)	0.0200 (Ponto B)

Quadro 10 – Deslocamentos máximos para as componentes X (horizontal) e Y (vertical).

6. Considerações Finais

Os resultados apresentados neste trabalho fazem parte do estudo que se realizou no quebramar do porto do Funchal com a finalidade de perceber quais as principais razões para a deterioração encontrada na sua superestrutura, quantificando o seu grau de evolução.

Procurou-se ainda definir uma metodologia de estudo de forma a generalizar a sua aplicação a outros portos, contribuindo dessa forma para o melhor conhecimento de todas as condicionantes envolventes e que influenciam a solidez deste tipo de infraestruturas.

A interligação dos três tipos de controlo aplicados provaram ser complementares entre si, uma vez que as campanhas de campo possibilitaram a recolha de informação útil para o conhecimento das condições atuais na infraestruturas e a sua aplicação nos modelos físico e numérico. A informação recolhida no modelo físico e no modelo numérico possibilitam transpor os resultados obtidos para o protótipo, permitindo ainda a possibilidade da utilização desses mesmos resultados de forma recíproca.

As campanhas de campo comprovaram a alteração generalizada da localização dos tetrápodes que foram controlados. O modelo físico identificou a alteração da banqueteta e das camadas mais externas do perfil, tendendo a forma superficial destas para um "S" prolongado. O modelo numérico comprovou a ocorrência de alterações das camadas do perfil através das discrepâncias entre os valores das frequências naturais calculadas e as obtidas das medições realizadas nas campanhas de campo.

Futuramente, os três tipos de controlo poderão ser conjugados de forma a criar uma metodologia de controlo, compacta e generalizada, deste tipo de infraestruturas, de modo que estas possam estar num futuro próximo melhor monitorizadas, de uma forma mais abrangente. Todas as alterações que possam ser identificadas em cada uma das campanhas, contribuem diretamente para o melhor conhecimento da infraestruturas e para um controlo mais bem programado.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Portos da Madeira pelo apoio logístico e financeiro disponibilizado até à data nas pessoas da sua administradora a Dr.^a Alexandra Mendonça e do Eng.^o Pedro Camacho. Os autores agradecem igualmente ao Instituto Geográfico Português pela cedência de dados da estação permanente do Funchal ao abrigo do Programa FIGIEE, à Secretaria Regional do Ambiente da Região Autónoma da Madeira pela colaboração e cedência de alguns dos equipamentos utilizados. À Leica Geosystems Portugal pela cedência de equipamentos geodésicos para a realização de campanhas de monitorização GNSS na pessoa do Eng.^o Luís Santos.

Referências

Oliveira, S.; Espada, M. – "Curso de Programação em FreeMat / MATLAB. Desenvolvimento de Aplicações para Engenharia Civil". Folhas de apoio ao 1º Curso de FreeMat/Matlab, ISEL, 2012.

Pereira, M., Teodoro, A.C., Veloso-Gomes, F. (2011). Avaliação de Deslocamentos e Alterações Morfológicas em Infraestruturas Portuárias – Porto do Funchal. Porto: Atas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (in press).

Pereira, M., Teodoro, A.C., Veloso-Gomes, F. (2011), Henriques, M.J., Lima, J.N., Oliveira, S. (2012). Controlo Estabilizacional e Comportamental de Quebramares através de Acelerómetros e GNSS – Porto do Funchal. Lisboa: Atas do III Encontro Nacional de Geodesia Aplicada.

Silva, R.C.A.F. (2010). Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha da Costa. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Sousa, J.F. (2004). O Porto do Funchal no Contexto do Sistema Portuário Insular Regional: As Infraestruturas, os Tráfegos e as Funções Portuárias. Lisboa: Faculdade de Ciências Sociais e Humanas.

Ramos, R.L. (2009). Potencialidades e Condicionismos Físicos, do Desenvolvimento Portuária da Região Autónoma da Madeira. Caso de Estudo – Ampliação do Porto do Funchal. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Zienkiewicz, O., Taylor, R., (2000). The Finite Element Method, Volume 1: The Basis. 5th Edition, Butterworth-Heinemann. Oxford.