

XIII CILAMCE

CONGRESSO IBERO
LATINO-AMERICANO
SOBRE MÉTODOS
COMPUTACIONAIS
PARA A ENGENHARIA



ANAIS

VOLUME 2

23-25 de Novembro
de 1992
Porto Alegre, RS, BRASIL

XIII CILAMCE

CONGRESSO IBERO
LATINO-AMERICANO
SOBRE MÉTODOS
COMPUTACIONAIS
PARA A ENGENHARIA

ANAIIS

VOLUME 2

23-25 de Novembro
de 1992

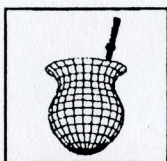
Porto Alegre, RS, BRASIL

ÍNDICE

ENCURVADURA DE PILARES DE BETÃO ARMADO EM EDIFÍCIOS Castro, P.M.R.P.; Cruz, P.J.S.; Sá, J.M.A.C. de e Delgado, R.M.	01
UM ALGORITMO PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR DE ESTRUTURAS EM CONCRETO PROTENDIDO Martins, P.C.R.; Nait-Rabah, O. e Casotti, M.L.F.	11
MODELO VISCOELÁSTICO PARA IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO Jácomo, M.; Fonseca, E.S. e Roehl, J.L.	21
DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA NO SISTEMA GAELI ATRAVÉS DE UMA BASE REDUZIDA AUTO-ADAPTATIVA DE LANCZOS-RIITZ Nascimento, J.A.O. e Groehs, A.G.	31
UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE HAN-POWEL NO BALANCEAMENTO MODAL DE ROTORES FLEXÍVEIS Zoratto, D.L.	41
AMORTECIMENTO INTERNO EM PLACAS SOB AÇÃO DE CARGAS SEGUIDORAS Landre Jr., J.	49
REFINAMENTO HIERÁRQUICO DO ELEMENTO FINITO DE AHMAD NA ANÁLISE DE PLACAS Moreira, L.A. e Iguti, F.	59
REFINAMENTO HIERÁRQUICO DE ELEMENTOS QUADRILATERAIS DISTORCIDOS Moreira, L.A. e Iguti, F.	69
MINIMIZAÇÃO DE PESO EM CASCAS DE REVOLUÇÃO MEDIANTE OTIMIZAÇÃO DA ESPESURA Cunha, D.J.S.; Taroco, E.O.; Feijóo, R.A. e Herskovits, J.	79
AValiação DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE AÇO À FLAMBAGEM LATERAL Fakury, R.H. e Santos, F.A. dos	89
FORMULAÇÕES PARA A CONSIDERAÇÃO DE TRECHOS RÍGIDOS EM ANÁLISE LINEAR E NÃO-LINEAR GEOMÉTRICA DE PÓRTICOS TRIDIMENSIONAIS DE EDIFÍCIOS Ramalho, M.A. e Corrêa, M.R.S.	97
ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA DE ESTRUTURAS PLANAS SUBMETIDAS A CARGAS MÓVEIS Nogueira, J.C. e Loeffler, C.F.	107
ANÁLISE DE DISCOS FISSURADOS EM ROTAÇÃO CONSIDERANDO CARREGAMENTO NO DOMÍNIO Casas, E.B.de las e Cimini Jr., C.A.	117
A FORMULAÇÃO HÍBRIDA-DESLOCAMENTOS DOS ELEMENTOS DE CONTOURNO: ACURÁCIA E CONVERGÊNCIA DOS RESULTADOS Defigueiredo, T.G.B. e Brebbia, C.A.	127
ANÁLISE DE PLACAS SOBRE FUNDAÇÃO DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTOURNO Calderón, E.F. e Venturini, W.S.	137

APLICAÇÃO DO M.E.C. NA ANÁLISE DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO ATRAVÉS DE UM SOLO HETEROGÊNEO POR REGIÃO E ORTOTRÓPICOS (Caso Bidimensional)	147
Barroca Neto, A.; Dória Neto, A.D. e Araújo, Z.A.de	
DETERMINAÇÃO E MONITORAMENTO DO DESLOCAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO FLUTUANTES ÂNCORADOS	155
Masetti, I.Q.; Assunção, R.B.; Dias, C.A.N.; Feres, A.N.; Petreche, J.R.D. e Cardoso, A.A.	
PROJETO AUTOMATIZADO DE PISOS DE EDIFÍCIOS COM VIGAMENTO METÁLICO	164
Fakury, R.H.; Silva, R.P.da; Reis, A.L.F.dos e Rosa, M.A.T.	
A FLEXO-TORÇÃO NA ANÁLISE EM SEGUNDA ORDEM DE NÚCLEOS RESISTENTES EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS ALTOS	174
Mori, D.D.; Souza, J.C.A.O. e Antunes, H.M.C.C.	
ELEMENTOS FINITOS UNIDIMENSIONAIS NA MODELAGEM DA ASSOCIAÇÃO DE PAREDES COM LINTÉIS E ENRIJECEDORES DISCRETOS	184
Savassi, W.	
A UNIFIED TECHNIQUE FOR THE EVALUATION OF GENERAL SINGULAR INTEGRALS	194
Dumont, N.A. e Souza, R.M.de	
PRECONDICIONAMENTO DO MÉTODO DOS GRADIENTES CONJUGADOS NUMA FORMULAÇÃO ELEMENTO-POR-ELEMENTO	204
Alquati, E.L.G. e Groehs, A.G.	
ESTUDOS DE AGITAÇÃO E RESSONÂNCIA EM BACIAS PORTUÁRIAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - APLICAÇÃO AO PORTO DE LEIXÕES (PORTUGAL)	214
Valente, P.A. e Gomes, F.V.	
ESCOAMENTOS TURBULENTOS PARIETAIS SUBMETIDOS A GRADIENTES ADVERSOS DE PRESSÃO	224
Rodrigues, J.L.A.F.; Brun, G. e Jeandel, D.	
O CÁLCULO DE CONDIÇÕES DE CONTO RNO NÃO LINEARES NOS ESCOAMENTOS TURBULENTOS BIDIMENSIONAIS	233
Rodrigues, J.L.A.F.; Brun, G. e Jeandel, D.	
MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS APLICADO À PROPAGAÇÃO DE ONDAS	243
Costa Jr., A.M.da e Ferreira, A.	
AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE DE UM ESCOAMENTO NÃO PERMANENTE UNIDIRECIONAL A PARTIR DA MEDIDA DA DIFERENÇA DE PRESSÃO EM UM TRECHO RETILÍNEO DE CANALIZAÇÃO	253
Arens, H.G.	
INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DE CALOR COM CONDIÇÕES DE CONTO RNO SENOIDAI S NO TEMPO	259
Gonçalves, E.M. e Pulino Filho, A.R.	
SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS INCOMPRESSÍVEIS NÃO-ISOTÉRMICOS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS COM FUNÇÃO DE PENALIDADE	268
Lange, C.F. e Awruch, A.M.	
EFEITO DE ESTEIRA E VELOCIDADES INDUZIDAS EM TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL	278
Alé, J.V. e Sadhu, D.P.	
RESOLUCION NUMERICA DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES	288
Nigro, N.; Storti, M. e Idelsohn, S.	
INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DE CALOR EM MEIOS NÃO HOMOGÊNEOS PELA TÉCNICA DOS OPERADORES DISCRETOS	298
Gonçalves, E.M. e Pulino Filho, A.R.	
PÓS-PROCESSAMENTO DE AUTOVALORES	308
Sarzeto, C.A.P. e Loula, A.F.D.	
MODELLING AND SIMULATION OF NATURAL CONVECTION FLOW IN A DILATANT FLUID-SATURATED POROUS CAVITY	314
Costa, M.L.M.; Sampaio, R. e Cama, R.M.S.da	
UTILIZAÇÃO DE UM ESQUEMA DE ORDEM VARIÁVEL EM PROBLEMAS DE ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS	324
Pinto, A.C.C. e Prais, F.	
USE OF VORONOI GRID TO SIMULATE PETROLEUM RESERVOIRS	334
Palagi, C.L.	
SINGULAR VALUE DECOMPOSITION IN THE INTEGRATION OF AN ATMOSPHERIC MODEL	344
Velho, H.F.C. e Claeyssen, J.C.R.	
ISO-3D - VISUALIZADOR TRIDIMENSIONAL PARA CAMPOS ESCALARES E VETORIAIS	354
Maliska Jr., C.R. e Dhlmann, A.	
UM PROGRAMA GRÁFICO INTERATIVO PARA ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	364
Silva, E.R.B.da e Dumont, N.A.	
ANASUPER - UM SISTEMA PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS FORMADAS POR SUPERELEMENTOS	374
Ellwanger, R.J.	
ANÁLISE POR SUBESTRUTURAÇÃO COM RECURSOS GRÁFICOS	384
Ellwanger, R.J.	
SICAD - SISTEMA INTEGRADO PARA PROJETOS	394
Campos, A.D.	
ESTUDO DO DESEMPENHO DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS UTILIZANDO A TÉCNICA DO BALANCEAMENTO ESTATÍSTICO	401
Canale, A.C. e Ruffino, R.T.	
VETORIZAÇÃO DE ALGORITMO PRIMAL SIMPLEX PARA PROBLEMAS DE GRAFO GENERALIZADO LINEAR	411
Correia, P.B. e wolff, M.C.	
SISTEMAS ESPECIALISTAS: CONCEITO E PRÁTICA	421
Bernardi, E. e Sardinha, P.R.C.	

MODELAGEM DE SISTEMAS ESTRUTURAIS ATRAVÉS DA TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO Silva, F.R.da	432
MODIN - UM CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DINÂMICOS, BASEADO NA TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO Speranza Neto, M. e Pedroza, B.C.	442
OPTIMIZATION EN EL DISEÑO DE REDES DE COMUNICACIONES Cancella, H.; Urquhart, M.E. e Rubino, G.	452
SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA NO MÉTODO DA COLOCAÇÃO ORTOGONAL Luize, A. e Biscaia Jr., E.C.	461
SIMULAÇÃO DINÂMICA DE PROCESSOS QUÍMICOS PELO MÉTODO DA RELAXAÇÃO EM FORMA DE ONDA EM COMPUTADORES PARALELOS Secchi, A.R.; Biscaia Jr., E.C. e Morari, M.	469
SIMULAÇÃO DO EFEITO GEL UTILIZANDO QUADRATURA DE GAUSS-CHARLIER PARA CÁLCULO DE MÉDIA Vianna Jr., A.S. e Biscaia Jr., E.C.	479
A REPARTIÇÃO ÓTIMA DE CARGA ENTRE GRUPOS GERADORES DIFERENTES DE UMA MESMA CENTRAL HIDRELÉTRICA: UMA COMPARAÇÃO DE MODELOS Santos, A.H.M. e Bortoni, E.C.	489
IPT-ESTAB1/PC, ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES - EXPERIÊNCIAS NO DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO Gomes, C.L.R.	498
ESCOVAÇÃO ESCORADA REALIZADA EM OSLO. ANÁLISE ELASTOPLÁSTICA POR ELEMENTOS FINITOS Trigo, J.F.C.; Fernandes, M.M. e Cardoso, A.S.	508
THE USE OF FINITE ELEMENT ANALYSES TO OPTIMIZE THE DESIGN OF BOUNDARY TOTAL STRESS CELLS Bica, A.V.D. e Clayton, C.R.I.	518
THE APPLICATION OF FINITE ELEMENTS TO GEOTECHNICAL PROBLEMS Gunn, M.J. e Woods, R.I.	528
ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APOIO NA FLAMBAGEM AXISSIMÉTRICA DE CASCAS CILÍNDRICAS Silva, R.R. e Oliveira, A.H.S.	538
AÇÕES DE ENGASTAMENTO PERFEITO EM BARRAS CURVAS DE SEÇÃO ABERTA E PAREDES DELGADAS LEVANDO EM CONTA OS EFEITOS DE FLEXO-TORÇÃO Menezes, F.A. e Figueiredo, R.G.de	548



XIII CILAMCE

Av. Oswaldo Aranha 99 3o Andar - CEP - 90035-190 - Porto Alegre - RS - Brasil
Fone (051) 228-16-33 - Ramal 3486 - Fax (051) 227-18-07

ESTUDOS DE AGITAÇÃO E RESSONÂNCIA EM BACIAS PORTUÁRIAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS — APLICAÇÃO AO PORTO DE LEIXÕES (PORTUGAL)

P. Avilez Valente¹, F. Veloso Gomes²

Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
P-4099 PORTO CODEX (Portugal)

RESUMO

Descreve-se o modelo numérico de propagação de ondas de superfície desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da FEUP. O cálculo dos potenciais de velocidade é feito por integração da equação de onda de Berkhoff pelo método dos elementos finitos. A determinação das velocidades horizontais é intrínseca à própria formulação. São referidos diversos tipos de condições fronteira possíveis e a sua formulação variacional. Finalmente o modelo é aplicado ao estudo de estados de agitação e das condições de ressonância do porto de Leixões, comparando a situação existente com um possível cenário de intervenção tendo em vista a expansão da actividade portuária.

1 MODELO DE AGITAÇÃO

1.1 Equação de Refracção e Difracção de Onda

O campo de velocidades resultante da propagação de ondas de pequena amplitude, num fluido homogéneo e incompressível, pode ser descrito, admitindo a irrotacionalidade do escoamento e uma variação suave da profundidade, por um potencial de velocidades complexo [3],

$$\bar{\phi}(x, y, z, t) = \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \phi(x, y) e^{-i\omega t} \quad (1)$$

¹Assistente

²Professor Associado

sendo

$$\bar{v}_x = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x}, \quad \bar{v}_y = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \quad \text{e} \quad \bar{v}_z = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z}. \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2), x , y e z são as coordenadas cartesianas — $z = 0$ corresponde ao nível médio da superfície livre —, $h = h(x, y)$ é a profundidade, w é a frequência angular do movimento, t é o tempo, $\bar{v}_x$, $\bar{v}_y$ e $\bar{v}_z$ são as componentes complexas da velocidade segundo os eixos coordenados e k é o número de onda.

A função complexa $\phi = \phi(x, y)$ obedece à equação de onda de Berkhoff [3]

$$\nabla(cc_g \nabla \phi) + \frac{c_g}{c} w^2 \phi = 0, \quad (3)$$

válida para qualquer profundidade, onde c é a velocidade de propagação da onda e c_g é a velocidade de propagação do grupo de ondas.

Para a completa formulação do problema é necessária a imposição de condições fronteira nas fronteiras laterais do domínio. Nas fronteiras sólidas esta condição é do tipo

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} - i \frac{w}{c} \alpha \phi = 0 \quad (4)$$

sendo n o versor da normal à fronteira dirigido para o exterior. O coeficiente de reflexão teórico α toma o valor $\alpha = 0$ para fronteiras totalmente reflectoras e $\alpha = 1$ no caso de fronteiras totalmente absorventes. O valor de α varia entre 0 e 1 para fronteiras parcialmente reflectoras. Quando existe diferença de fase entre a onda incidente e a onda reflectida, α toma valores complexos. No estudo experimental da reflexão de ondas, são geralmente utilizados, como parâmetros, o quociente entre as alturas de onda reflectida e incidente, $C_r = H_R/H_I$, e a diferença de fase entre essas ondas, φ . A relação entre α e os parâmetros C_r e φ é dada por

$$\alpha = \frac{1 - C_r^2 + i2C_r \sin \varphi}{1 + C_r^2 + 2C_r \cos \varphi}. \quad (5)$$

Nas fronteiras não limitadas fisicamente, a condição de fronteira corresponde à condição de radiação de Sommerfield [8]

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_R}{\partial r} - i \frac{w}{c} \phi_R \right) = 0, \quad (6)$$

a qual traduz o não retorno do infinito das ondas reflectidas. ϕ_R traduz o potencial da onda reflectida, sendo $\phi = \phi_I + \phi_R$, com ϕ_I representando o potencial da onda incidente. O potencial ϕ_I é conhecido e dado por

$$\phi_I = -\frac{gH_I}{2w} i e^{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)}, \quad (7)$$

H_I é a altura da onda incidente, g representa a aceleração da gravidade e β a direcção de propagação da agitação.

A condição de radiação da onda reflectida pode ser imposta numa fronteira finita utilizando amortecedores (*bumpers* na literatura anglo-saxónica). No caso de uma onda plana propagando-se para o infinito na direcção normal à fronteira, a condição de radiação é expressa pelo amortecedor plano [11]

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial r} - i \frac{w}{c} \phi_R = 0. \quad (8)$$

Se a onda irradiar de um ponto e incidir perpendicularmente a uma fronteira circular à distância r da origem da perturbação, pode-se definir um amortecedor cilíndrico como sendo [2]

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial r} + \frac{1}{2r} \phi_R - i \frac{w}{c} \phi_R = 0. \quad (9)$$

No caso de ondas incidindo não perpendicularmente à fronteira, podem-se ainda utilizar amortecedores de ordem superior [2]. O amortecedor de 2ª ordem para uma fronteira circular resulta

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial r} + \alpha \phi_R - \beta \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial \Gamma^2} = 0, \quad (10)$$

com

$$\alpha = \left[\frac{5}{4r^2} - 2 \left(\frac{w}{c} \right)^2 + \frac{3iw}{cr} \right] / \left(\frac{2}{r} + 2i \frac{w}{c} \right) \quad \text{e} \quad \beta = 1 / \left(\frac{2}{r} + 2i \frac{w}{c} \right).$$

1.2 Formulação Variacional

A função ϕ que verifica a equação (3) resulta da minimização do funcional Π em ordem a ϕ , sendo

$$\Pi = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \left[cc_g (\nabla \phi)^2 - \frac{c_g}{c} w^2 \phi^2 \right] d\Omega - \int_{\Gamma} I d\Gamma. \quad (11)$$

O integrando I toma diferentes formas conforme o tipo de fronteira:

- parede sólida

$$I = \frac{1}{2} i \alpha w c_g \phi^2; \quad (12)$$

- amortecedor plano

$$I = cc_g \frac{\partial \phi_I}{\partial \mathbf{n}} \phi + \frac{1}{2} i w c_g \phi^2 - i w c_g \phi_I \phi; \quad (13)$$

- amortecedor cilíndrico

$$I = cc_g \frac{\partial \phi_I}{\partial \mathbf{n}} \phi + \frac{1}{2} cc_g \left(i \frac{w}{c} - \frac{1}{2r} \right) \phi^2 - cc_g \left(i \frac{w}{c} - \frac{1}{2r} \right) \phi_I \phi; \quad (14)$$

- amortecedor de 2ª ordem

$$I = cc_g \frac{\partial \phi_I}{\partial \mathbf{n}} \phi + cc_g \alpha \phi_I \phi + cc_g \beta \frac{\partial \phi_I}{\partial \Gamma} \frac{\partial \phi}{\partial \Gamma} - \frac{1}{2} cc_g \alpha \phi^2 - \frac{1}{2} cc_g \beta \left(\frac{\partial \phi}{\partial \Gamma} \right)^2. \quad (15)$$

Os diferentes tipos de amortecedores foram testados para um problema de um porto rectangular e perpendicular a uma linha de costa de desenvolvimento infinito. Os resultados obtidos foram comparados com a solução analítica do problema [9]. Para uma fronteira situada a pequena distância da entrada do porto qualquer dos amortecedores conduzia a erros elevados. Com o aumento da distância r as soluções convergiam em qualquer dos casos para a solução correcta.

Zienkiewicz *et al.* [4,12] utilizam uma formulação de elementos finitos com amortecimento exponencial ou com amortecimento polinomial. Os autores encontraram no entanto algumas dificuldades na determinação prática do comprimento de amortecimento para a formulação exponencial. A formulação polinomial não chegou a ser testada por indisponibilidade de rotinas para integração numérica de integrais impróprios.

1.3 Discretização e Integração Numérica

A discretização do domínio foi feita com elementos finitos paramétricos de 8 nós. A solução numérica do problema é obtida por minimização do funcional $\hat{\Pi}$, obtido este por substituição em Π da função ϕ pela sua aproximação $\hat{\phi}$. $\hat{\phi}$ é definida por

$$\hat{\phi} = \sum N_i \hat{\phi}_i, \quad (16)$$

em que N_i é a função de forma dos elementos finitos associada ao i -ésimo nó e $\hat{\phi}_i$ o valor de $\hat{\phi}$ no mesmo nó, o qual se pretende determinar.

A integração numérica dos integrais resultantes da minimização de $\hat{\Pi}$ em cada elemento finito foi feita por quadratura gaussiana de nove pontos (3×3) sobre o domínio interior, Ω_e , e de três pontos sobre a fronteira, Γ_e . O sistema de equações lineares algébricas assim obtido tem coeficientes e variáveis complexas. A matriz do sistema é simétrica e esparsa, pelo que uma conveniente numeração dos nós conduz a uma estrutura em banda. Desta matriz foi feito o armazenamento da semi-banda superior, e o sistema resolvido por aplicação de um algoritmo directo para sistemas simétricos em banda, adaptado para coeficientes e variáveis complexos.

1.4 Velocidades Horizontais

O fenómeno de ressonância aparece geralmente ligado a ondas de longo período que, embora de altura reduzida, provocam movimentos horizontais de elevada amplitude. Estes movimentos, quando associados a elevadas velocidades horizontais, podem pôr em perigo as embarcações atracadas e as estruturas adjacentes.

Sendo o vector velocidade horizontal, $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$, tal que

$$v_x = \text{Re}(\bar{v}_x) \quad \text{e} \quad v_y = \text{Re}(\bar{v}_y), \quad (17)$$

resulta que à superfície livre, $z = 0$,

$$\begin{aligned} v_x &= \text{Re}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \cos(-wt) - \text{Im}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \sin(-wt) \\ \text{e} \quad v_y &= \text{Re}\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \cos(-wt) - \text{Im}\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \sin(-wt). \end{aligned} \quad (18)$$

Os valores máximos e mínimos do módulo do vector velocidade são obtidos para os valores de t que verificam a equação

$$t = \frac{1}{2w} \arctan \frac{2 \left[\text{Re}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \text{Im}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \text{Re}\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \text{Im}\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \right]}{\left[\text{Re}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \right]^2 - \left[\text{Im}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \right]^2 + \left[\text{Re}\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \right]^2 - \left[\text{Im}\left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \right]^2}. \quad (19)$$

Os valores numéricos de v_x e v_y resultam da substituição das derivadas parciais de ϕ em (18) e (19) por

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} = \sum \frac{\partial N_i}{\partial x} \hat{\phi}_i \quad \text{e} \quad \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial y} = \sum \frac{\partial N_i}{\partial y} \hat{\phi}_i$$

O facto de as funções de forma utilizadas terem condições de continuidade C^0 sobre a fronteira Γ_e dos elementos, impossibilita o cálculo da velocidade nos pontos nodais, pelo que este foi restringido ao ponto central de cada elemento.

2 APLICAÇÃO AO PORTO DE LEIXÕES

2.1 Introdução

Com o objectivo de testar a sensibilidade do modelo a alterações no estado de agitação no interior de um porto, resultantes de possíveis cenários de intervenção para a sua expansão e racionalização, procedeu-se a uma aplicação ao porto de Leixões.

2.2 Dados do Problema

Foram estudados três rumos da agitação ao largo, NW, W e SW. Os dois primeiros verificam-se com bastante frequência, enquanto o terceiro corresponde à orientação da entrada do porto. Para cada um dos referidos rumos foram ensaiadas ondas regulares com os seguintes períodos de oscilação: 6 s, 8 s, 10 s, 12 s, 14 s, 17 s, 19 s, 30 s, 45 s, 60 s, 90 s, 120 s, 133 s, 180 s, 240 s, 300 s e 360 s. Todos os cálculos foram efectuados para o nível de Preia-mar de Águas Vivas, + 4.00 m relativamente ao Zero Hidrográfico local.

Para garantir a existência de pelo menos 5 pontos de cálculo do potencial por comprimento de onda, utilizaram-se quatro malhas de elementos finitos. Duas para a actual geometria do porto, configuração 1, e duas considerando uma hipótese de construção de um aterro sobre a parte menos profunda da bacia portuária, configuração 2. As malhas para as simulações com $6s \leq T \leq 30s$ têm elementos com comprimento médio de 25 m no interior do porto e de 50 m no seu exterior, num total de 4012 elementos/12697 nós para a configuração 1 e de 3910 elementos/12391 nós para a configuração 2. As malhas utilizadas com $45s \leq T \leq 360s$ são constituídas por elementos com 50 m e 100 m respectivamente no interior e exterior do porto. Obtiveram-se assim malhas com 1145 elementos/3776 nós, configuração 1 (cf. fig. 1), e 1118 elementos/3697 nós, configuração 2 (cf. fig. 2).

Foi utilizado o amortecedor plano para modelação da condição de radiação para o infinito.

2.3 Coeficientes de reflexão

O coeficiente de reflexão foi considerado dependente do período. Para o seu cálculo foi utilizada a expressão proposta por Seelig [7] e referida por Allsop e Hettiarachchi [1] para taludes rugosos em situação de agitação irregular:

$$C_r = \frac{0.6Ir^2}{Ir^2 + 6.6}, \quad (20)$$

em que Ir é o número de Iribarren modificado, dado por

$$Ir = \tan \theta / \sqrt{(2\pi H_s) / (gT_{Hmax}^2)}, \quad (21)$$

sendo θ o ângulo do talude, H_s a altura significativa da ondulação e T_{Hmax} o período correspondente à onda de altura máxima. Nas praias, C_r foi tomado igual a zero.

Para a determinação dos valores de H_s e de T_{Hmax} correspondentes a cada um dos períodos modelados, foi feita uma análise estatística dos estudos existentes [6] para os registos da agitação ao largo de Leixões entre Outubro de 1981 e Janeiro de 1985, os quais incluem nove tempestades. Nestes estudos, os registos encontram-se divididos em

intervalos de tempo amostrais de três horas, para os quais foram determinados os valores de H_s , T_z (período médio de zero ascendente), T_{Hmax} e T_{max} (período máximo registado).

Os autores verificaram existirem correlações lineares fortes entre as distribuições de T_z e T_{Hmax} ($r = 0.763$) e de T_{max} e T_{Hmax} ($r = 0.767$), em condições de tempestade. Não foi no entanto encontrada correlação significativa entre a distribuição de H_s e as daqueles períodos característicos. Para H_s optou-se pelo cálculo da mediana condicionada pelo período característico — T_z , T_{Hmax} ou T_{max} — em estudo.

A análise dos dados da agitação permitiu dividir os períodos a simular nos seguintes grupos:

- $T = 6s$: período médio de zero ascendente bastante frequente em situação de acalmia. Utilizados os valores modais das distribuições de H_s e T_{Hmax} para situação de acalmia;
- $8s \leq T \leq 12s$: corresponde a períodos médios de zero ascendente, T_z , frequentes em situação de tempestade. T_{Hmax} obtido por correlação linear e H_s igual à mediana da distribuição condicionada de H_s dado T_z ;
- $12s \leq T \leq 17s$: períodos correspondentes a picos energéticos, T_{Hmax} , durante temporais. H_s igual à mediana da distribuição condicionada de H_s dado T_{Hmax} ;
- $17s \leq T \leq 19s$: períodos máximos, T_{max} , verificados em situação de tempestade. H_s igual à mediana da distribuição condicionada de H_s dado T_{max} . T_{Hmax} obtido por correlação linear;
- $30s \leq T \leq 360s$: períodos característicos de ondas de longo período. Tomou-se $T_{Hmax} = T$ e $H_s = 1.5m$.

T (s)	Tipo	H_s (m)	T_{Hmax} (s)	T (s)	Tipo	H_s (m)	T_{Hmax} (s)
6	T_z	1.5	8.0	14	T_{Hmax}	5.5	14.00
8	T_z	5.2	11.00	17	T_{Hmax}	6.0	17.00
10	T_z	5.89	13.15	17	T_{max}	5.68	12.61
12	T_z	5.6	15.31	19	T_{max}	5.61	14.09
12	T_{Hmax}	5.5	12.00				

2.4 Análise dos Resultados

Constatou-se ser a orientação de SW a mais desfavorável, em termos de propagação para o interior do porto, pelo que somente os resultados obtidos para esse caso são referidos. De entre os resultados obtidos, seleccionaram-se e apresentam-se: as curvas de resposta em três pontos, M no interior da marina (cf. fig. 4), D no interior das docas (cf. fig. 5) e C no cais de pesca (cf. fig. 6); o campo de coeficientes de altura de onda, $C_H = H/H_0$ em que H_0 é a altura ao largo da onda incidente, para $T = 30s$ e $T = 240s$ (cf. figs. 7 e 9) e o campo de coeficientes de velocidades horizontais máximas, $C_v = v_{max}/H_0$, para os mesmos períodos de oscilação (cf. figs. 8 e 10).

Marina: a análise da curva de resposta do ponto M indica a existência de condições de ressonância para $T = 30s$. Períodos desta ordem de grandeza tinham já sido referenciados como perigosos durante a fase de projecto da marina [10]. A curva parece também indicar

um novo máximo para valores do período na ordem dos 360 s, sendo necessário o estudo de períodos de maior grandeza para se poder tirar uma conclusão definitiva. Na gama dos longos períodos a configuração 2 conduz a um aumento da altura de onda na ordem dos 15%, enquanto que para $T = 17s$ esse agravamento será de 50%. Para longos períodos registam-se, para ambas as configurações, elevadas velocidades horizontais no canal de acesso à marina.

Bacia principal: foi detectada uma situação de ressonância da bacia principal, correspondente ao período de 133 s. A configuração 2 transfere um dos ventres de oscilação para a zona do cais de traineiras, podendo, junto das pontes cais aí existentes, provocar um aumento de cerca de 45% na velocidade horizontal máxima. Para períodos mais elevados o aumento na altura de onda situa-se na ordem dos 10%.

Docas: as docas interiores do porto de Leixões apresentam condições de ressonância para períodos na ordem dos 240 s, com velocidades horizontais elevadas na zona de contracção existente junto aos pilares da ponte móvel. Devido aos efeitos bidimensionais decorrentes da geometria das docas, as velocidades horizontais máximas verificam-se numa zona intermédia entre ventres e nodos da oscilação. Períodos próximos do referido foram registados em tempestades em que fenómenos deste tipo provocaram acidentes em navios atracados [5]. A configuração 2 conduz a em geral a valores de C_H superiores em cerca de 11% aos da configuração 1, excepto para $T = 133s$ em que o ponto M regista um aumento de 68% à oscilação em massa da bacia principal.

Anteportos: não foi detectado nenhum indício evidente de situações de ressonância. No entanto os coeficientes de velocidades máximas horizontais para ondas de longo período são bastante elevados, podendo colocar problemas aos navios que utilizem o terminal de petroleiros. Existem testemunhos de comandantes e pilotos que confirmam esse tipo de situação.

3 CONCLUSÕES

O modelo revela sensibilidade nos estudos de impacto na agitação interior associados a intervenções de expansão e racionalização portuária.

Para pequenos períodos de oscilação, não é possível fazer uma comparação global entre as configurações 1 e 2, dado que os resultados numéricos são extremamente dependentes do período e do ponto de observação. Deste modo só uma análise casuística bastante detalhada, que não cabe neste estudo, permitirá tirar conclusões de interesse. Para ondas de longo período, a configuração 2 apresenta, em geral, valores da altura de onda 10 a 15% superiores aos da configuração 1.

Os resultados referidos apontam para a necessidade de estudos das condições de ressonância para períodos acima dos 360s, nomeadamente para um completo esclarecimento do comportamento da marina e da bacia principal nessas circunstâncias.

A consideração do coeficiente de reflexão nulo nas praias é passível de crítica dado que, com sua utilização nas zonas assoreadas do interior do porto e do enraizamento do quebra-mar exterior, se poderá estar a criar um mecanismo de dissipação total de energia que na realidade não existe.

A não consideração dos mecanismos de dissipação de energia por atrito no fundo deverá afectar quantitativamente os resultados obtidos, mas espera-se que qualitativamente estes continuem a ser válidos.

Foi utilizado um computador DECsystem 5500. Os tempos de CPU foram de cerca de 7 min para cada simulação de ondas de grande período e de 2 horas para ondas de pequeno período. Ensaio realizado numa estação de trabalho HP9000/730 indicam que estes tempos de cálculo são nesta máquina reduzidos a cerca de metade. Não é portanto necessário um supercomputador para a realização destes estudos pelo método dos elementos finitos.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Engs. Álvaro Azevedo e Ricardo Santos a cedência dos programas para visualização gráfica dos resultados.

Referências

- [1] N.W.H. Allsop, and S.S.L. Hettiarachchi, "Reflections from coastal structures", Proc. 21st Int. Conf. Coastal Engng., Malaga, June 1988.
- [2] K. Bando, P. Bettess and C. Emson, "The effectiveness of dampers for the analysis of exterior scalar wave diffraction by cylinders and ellipsoids", Int. J. Numer. Methods Fluids, **4**, 599-617 (1984).
- [3] J.C.W. Berkhoff, "Linear wave propagation problems and the finite element method," Finite Elements in Fluids, Vol.1. (Eds. R.H. Gallagher et al.) Wiley, London, 1975.
- [4] P. Bettess, and O.C. Zienkiewicz, "Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements", Int. J. Numer. Methods Eng., **11**, 1271-1290 (1977).
- [5] C. Campos Morais and F. Abecasis, "Storm surge effects at Leixões", Proc. XIV Int. Conf. Coastal Engng., Denmark, 1974.
- [6] "Clima de agitação marítima. Análise dos dados existentes em Leixões", Relatório NATO PO-WAVES - 5/91-A, Instituto Hidrográfico e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1991.
- [7] W.N. Seelig, "Wave reflection from coastal structure", Proc. Conf. Coastal Structures '83, ASCE, Alington, 1983.
- [8] A. Sommerfeld, *Partial Differential Equations in Physics*, Academic Press, New York, 1949.
- [9] Ü. Ünlüate and C.C. Mei, "Effects of entrance loss on harbor oscillations", J. Waterways Harbor and Coastal Engng. Div., ASCE, **WW2**, 161-180 (1975).
- [10] F. Veloso Gomes, "Projecto da marina de Leixões", Vértice, Porto, 1985.
- [11] O.C. Zienkiewicz and R.E. Newton, "Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid", Proc. Symp. Finite Element Techniques. Institute für Statik und Dynamik der-und Baum-fahrtkonstruktionen, University of Stuttgart, Germany, 1969.
- [12] O.C. Zienkiewicz, K. Bando, P. Bettess, C. Emson, and T.C. Chiam, "Mapped infinite elements for exterior wave problems", Int. J. Numer. Methods Eng., **21**, 1229-1251 (1985).

FIGURAS

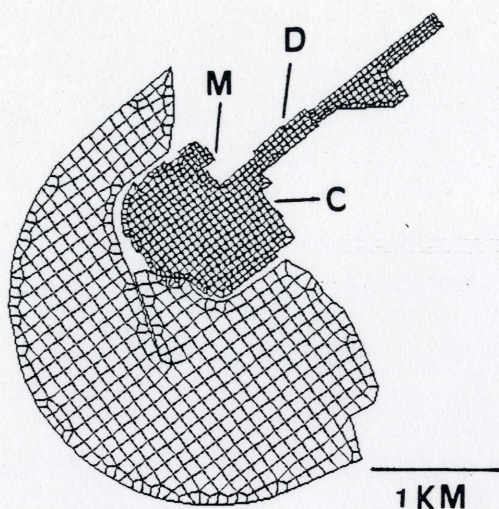


Fig. 1. Malha não refinada — configuração 1.

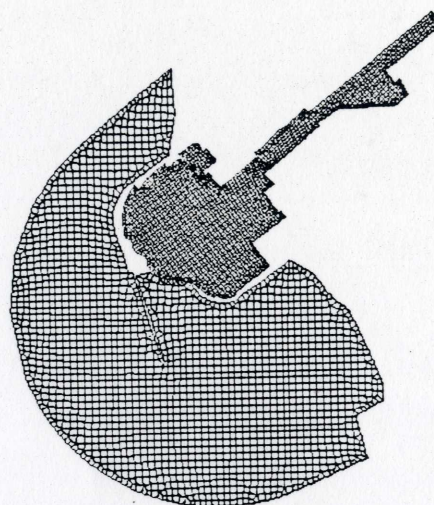


Fig. 2. Malha refinada — configuração 2.

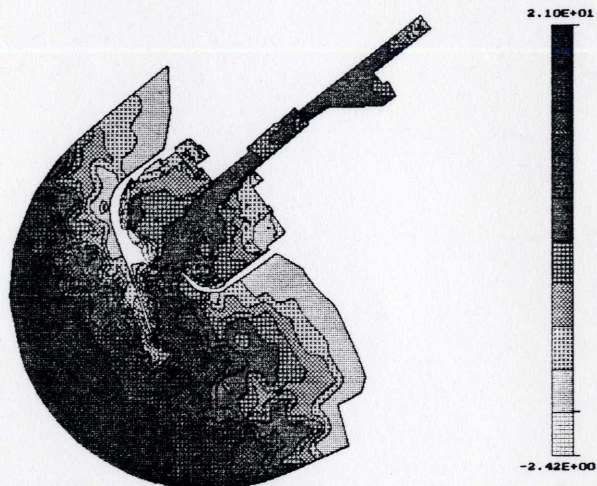


Fig. 3. Batimetria — referida ao Z.H..

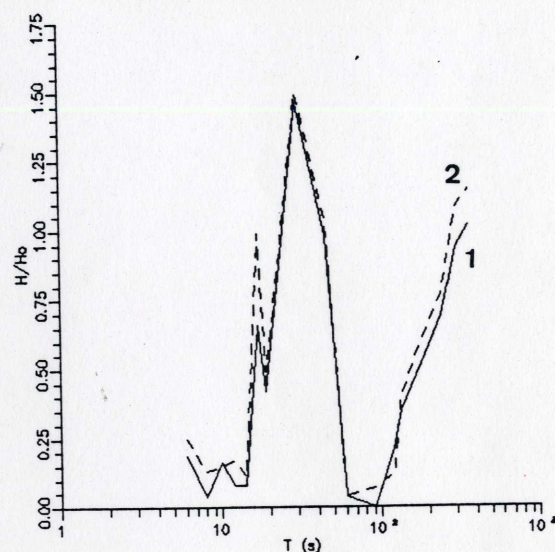


Fig. 4. Curva de resposta do ponto M.

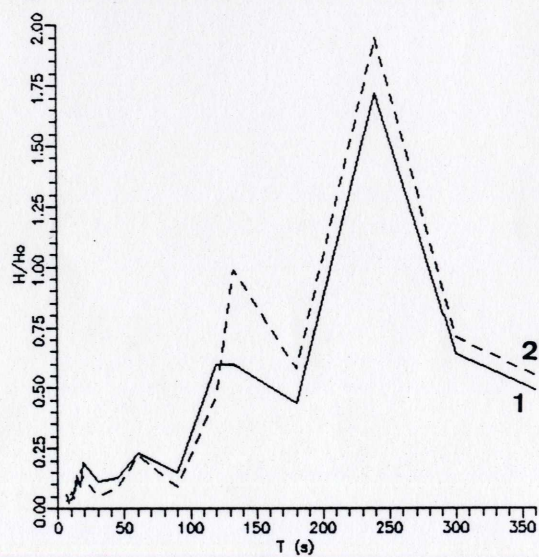


Fig. 5. Curva de resposta do ponto D.

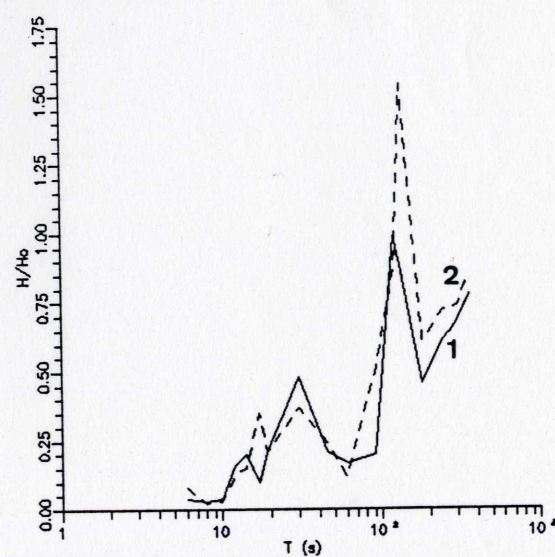


Fig. 6. Curva de resposta do ponto C.

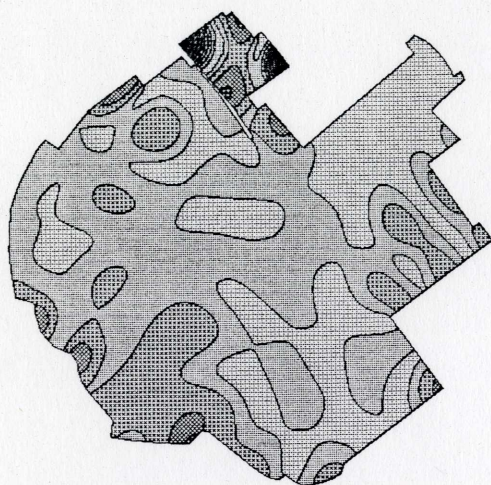


Fig. 7. Coeficiente de altura de onda.
Rumo SW, $T = 30s$.

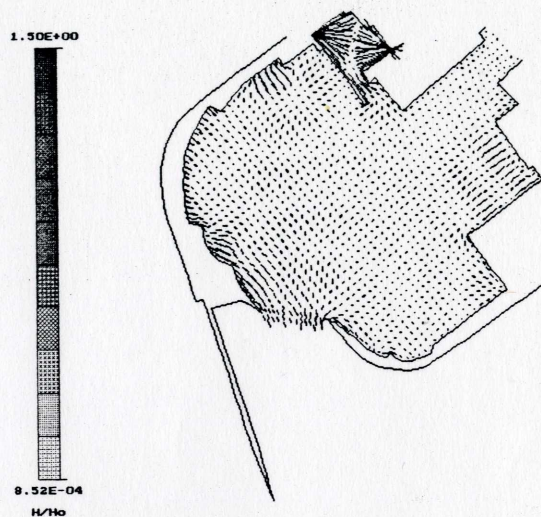


Fig. 8. Velocidade horizontal máxima.
Rumo SW, $T = 30s$.
Máximo = $0.55m/s/Ho$.

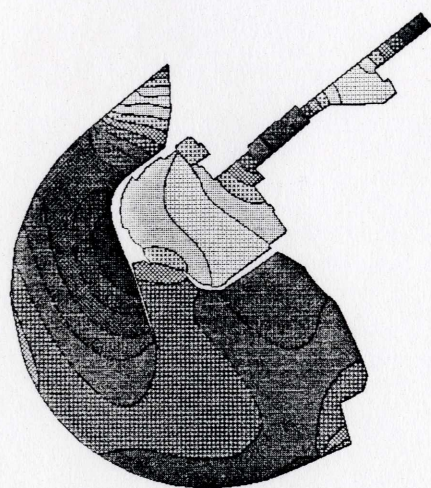


Fig. 9. Coeficiente de altura de onda.
Rumo SW, $T = 240s$.

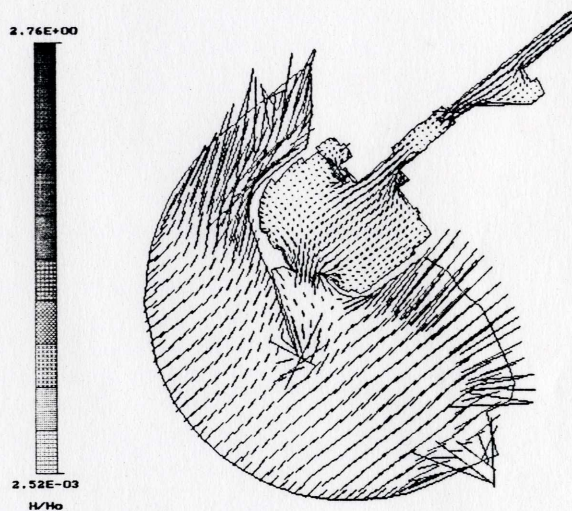


Fig. 10. Velocidade horizontal máxima
Rumo SW, $T = 240s$.
Máximo nas docas = $0.78m/s/Ho$.