

PROJECTO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL PARA ENSAIO SÍSMICO DO MODELO DE UMA PLATAFORMA OFFSHORE

Correia, H.J.D.¹; Mendes, A.C.²

¹Assistente; ²Prof. Associado
Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidrodinâmica
Universidade da Beira Interior
6201-001 Covilhã, PORTUGAL



RESUMO

Neste artigo descreve-se o desenvolvimento do equipamento a utilizar no ensaio do modelo físico de uma estrutura offshore, sujeita à acção hidrodinâmica e sísmica. Este equipamento é constituído por uma mesa de excitação unidireccional, uma balança de esforços e a instrumentação e medida a instalar no modelo da plataforma. São ainda apresentados resultados predictivos do carregamento hidrodinâmico sobre a estrutura, obtidos por aplicação de um método numérico baseado na Fórmula de Morison.

1 - INTRODUÇÃO

Um grande número de questões têm sido levantadas relativamente à previsão do comportamento de estruturas offshore em ambiente marítimo, onde a severidade dos estados de mar extremos exigem uma boa compreensão do processo de carregamento ambiental – veja-se Vugts (1979).

Um dos pressupostos do projecto e da construção das estruturas offshore do tipo “Jacket” é sem dúvida a segurança. No caso particular de estruturas sismo-resistentes, este projecto deve verificar um certo número de especificações [Bea *et al.* (1999)], para que estas desempenhem as funções para as quais foram projectadas, do ponto de vista económico e funcional. Estas devem ser capazes de suportar as acções a que são submetidas durante a sua vida útil, nomeadamente o carregamento dinâmico que se deve à acção do vento,

das ondas e das correntes, bem como os esforços que são devidos aos abalos telúricos. Destes, o mais importante ao nível do projecto é o carregamento sísmico, que difere dos restantes na medida em que tem um maior período de recorrência e tem natureza transiente. A sua análise requer portanto algum conservadorismo e nela deverá ser avaliada a resposta a valores extremos, e não a valores médios do carregamento [Barltrop (1991)].

No projecto deste tipo de estruturas deverão ser tidos em consideração não apenas as cargas sísmicas, como também o grau de risco sísmico inerente às regiões onde são implantadas. Estes pressupostos são conseguidos com recurso a aproximações probabilísticas. Assim, a análise dos riscos sísmicos envolve três aspectos [Watabe & Tohdo (1997)]. O primeiro consiste em obter os dados

estatísticos sobre o número, localização e data de ocorrência dos sismos, sendo estes recolhidos a partir de bases de dados onde estão registados os dados históricos sobre a ocorrência de sismos, bem como dados sobre as falhas activas. O segundo caracteriza a intensidade dos movimentos terrestres num determinado local devido a um sismo, sendo esta avaliada através de uma fórmula de atenuação, na qual são utilizados os valores da magnitude do sismo e a distância focal. O terceiro aspecto da análise do risco sísmico diz respeito à probabilidade de ocorrência de um sismo com intensidade superior a determinado valor, num período definido.

Levando em consideração a frequência com que ocorrem sismos de intensidade apreciável, tornar-se-ia muito dispendioso projectar uma estrutura que pudesse suportar este tipo de sismos, sem ultrapassar a tensão de cedência, para operar num período de vida útil em que a maioria dos abalos têm fraca intensidade. No entanto, seria igualmente pouco realista ignorar a possibilidade de ocorrência deste acontecimento. Assim, nos últimos 15 a 20 anos surgiu uma tendência para que o projecto das estruturas seja feito com base em critérios de comportamento, e não tendo em vista um determinado factor de segurança [Roesset (1997)]. Esta corrente de opinião levou à aceitação de uma análise estrutural baseada nos seguintes dois critérios. As estruturas que são sujeitas a sismos do nível de resistência, que são aqueles com períodos de recorrência entre 100 e 200 anos, são projectadas para os suportar sem que seja ultrapassada a tensão de cedência. No caso de estruturas sujeitas a sismos do nível de ductilidade, que são os que têm períodos de recorrência de 500 a 5000 anos, as estruturas são projectadas de forma a que a energia seja absorvida no domínio elástico e dissipada no domínio plástico, sem que ocorra o colapso da estrutura [Barltrop (1991), Roesset (1997) e Clough & Penzien (1993)].

As directivas que dizem respeito ao projecto de estruturas offshore sujeitas a

carregamentos sísmicos têm sido desenvolvidas pela API (API RP 2A), nos últimos 20 anos, nomeadamente para estruturas em aço do tipo "Jacket". Estas orientações constituíram uma das bases de trabalho para a elaboração de uma norma internacional neste domínio, levada a efeito pelo Grupo ISO TCG7-WG3-P5, da Organização Internacional para a Normalização [Bea *et al.* (1999)]. Estas normativas preconizam um processo em 12 passos para a execução do projecto [Marshall (1997)], através dos quais são definidos todos os parâmetros que caracterizam o carregamento sísmico para a região de implantação da estrutura, sendo a análise posteriormente efectuada de acordo com os critérios de resistência e ductilidade referidos anteriormente.

2 – MODELO FÍSICO DA ESTRUTURA EM ANÁLISE

O modelo físico da plataforma é uma torre tubular em aço inoxidável, cujas dimensões se apresentam em seguida. Este modelo, realizado à escala 1:45, foi executado a partir do projecto de uma estrutura real fornecido pela Atkins Science & Technology. É constituído por 158 elementos estruturais soldados em 48 nós, tal como mostra a Figura 1. A altura total do modelo é de 1.97 m, dos quais 1.47 m estão submersos. O quadrado da base tem 0.750 m de lado e o quadrado do topo tem 0.375 m de lado. As quatro pernas têm um diâmetro externo $D = 0.035$ m e uma espessura de parede de 2.5 mm; os elementos transversais da estrutura têm diâmetro $d = 0.020$ m e uma espessura de parede de 2.5 mm. Um conjunto de 11 tubagens de elevação verticais correm desde a base até ao topo da estrutura. O modelo foi fabricado pela Sociedade Metalúrgica Inox, Lda, na Covilhã.

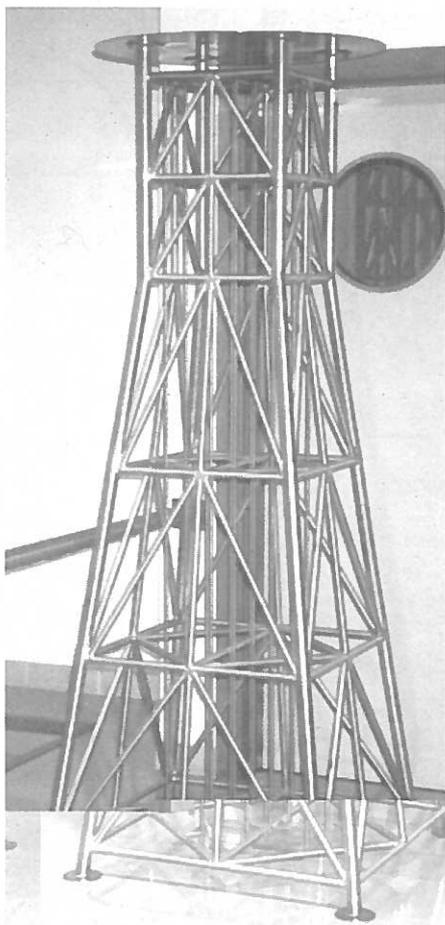


Figura 1 – Fotografia do modelo físico da estrutura

3 – ANÁLISE HIDRODINÂMICA

Os esforços hidrodinâmicos suportados pelo modelo da estrutura, quando sujeito à acção combinada de ondas e corrente, foram calculados com o auxílio da Fórmula de Morison.

A cinemática das partículas de água foi determinada mediante a utilização da teoria linear, num primeiro tempo, e mediante teorias de onda de ordem superior em seguida. A velocidade e aceleração do fluido foram calculadas de acordo com Rahman (1995) e Dean & Dalrymple (1991), para ondas lineares e de segunda ordem, respectivamente.

3.1 – Casos-tipo considerados

Nesta análise teórica foram avaliados as forças e momentos hidrodinâmicos produzidos sobre a estrutura pelos estados de mar correspondentes a 3 casos-tipo, cujos parâmetros meta-oceânicos são

mostrados na Tabela 1. Estes parâmetros, definidos inicialmente em condições reais, foram posteriormente transpostos para a escala do modelo a fim de avaliar o comportamento da estrutura em condições de carregamento ambiental extremas.

Tabela 1 - Parâmetros meta-oceânicos utilizados:
 H_s - altura de onda significativa; T_z - período significativo; V_c - velocidade da corrente

		Protótipo	Modelo
Caso 1	H_s [m]:	5.6	0.123
	T_z [s]:	8	1.186
	V_c [m/s]:	0	0
Caso 2	H_s [m]:	14	0.308
	T_z [s]:	14	2.076
	V_c [m/s]:	0	0
Caso 3	H_s [m]:	14	0.308
	T_z [s]:	14	2.076
	V_c [m/s]:	2	0.297

3.2 - Resultados predictivos

Em resultado dos cálculos efectuados nos três casos acima considerados, para teorias de onda de 1ª e 2ª ordens, obtiveram-se os resultados que se apresentam nas Figuras 2 a 7.

Nas figuras atrás apresentadas mostram-se os resultados predictivos obtidos para a força horizontal na base da estrutura - F_x - e para o momento de derrube resultante - M_y . Os valores máximos obtidos para estes esforços estão indicados na Tabela 2.

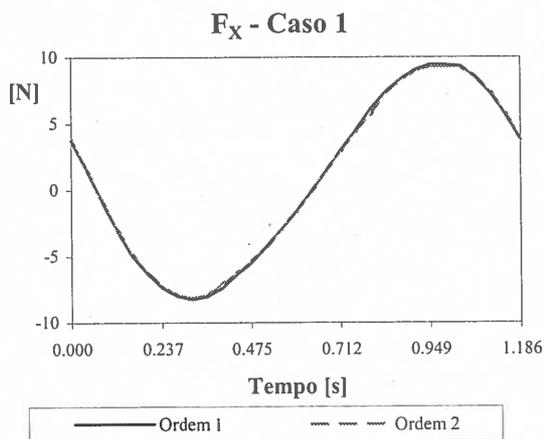


Figura 2 – Força horizontal para o caso 1

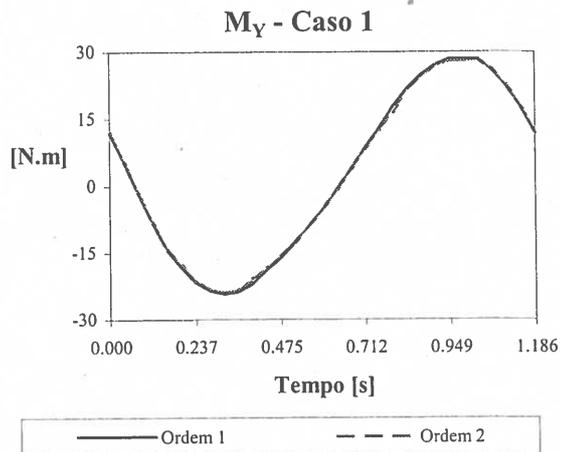


Figura 5 – Momento de derrube para o caso 1

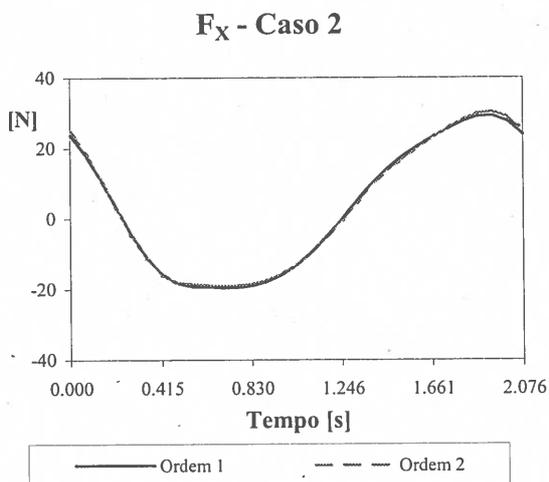


Figura 3 – Força horizontal para o caso 2

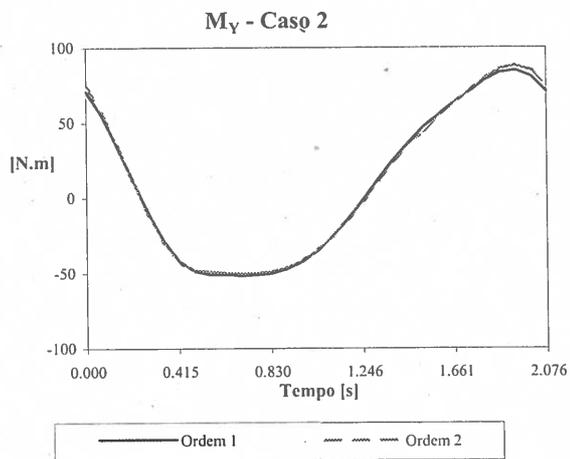


Figura 6 – Momento de derrube para o caso 2

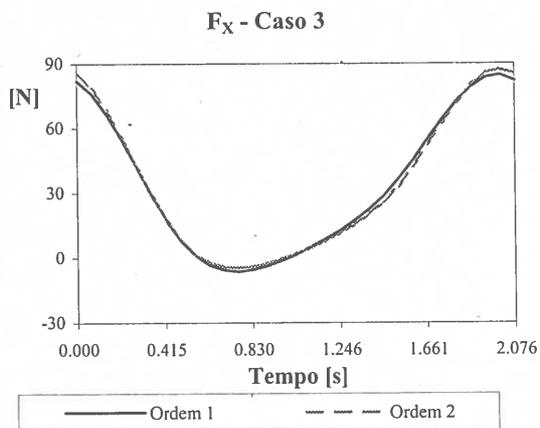


Figura 4 – Força horizontal para o caso 3

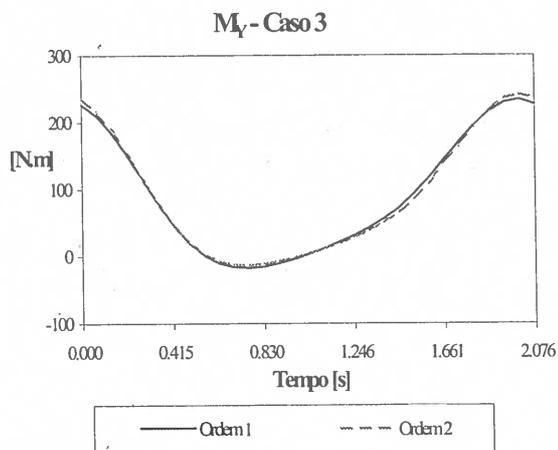


Figura 7 – Momento de derrube para o caso 3

Tabela 2 – Valores máximos da força horizontal e do momento de derrube

	F_x [N]	M_y [N.m]
Caso 1	9.445	28.420
Caso 2	30.330	88.100
Caso 3	87.360	241.100

Destes resultados é evidente a influência do aumento da amplitude de onda ($H_z/2$) e do respectivo período (T_s), que se traduz num aumento significativo dos esforços determinados. Isto pode constatar-se pela comparação entre os valores obtidos para os casos 1 e 2. Quanto à existência de corrente, verifica-se que esta provoca um aumento dos valores máximos de F_x e de M_y , revelando-se a sua influência dominante relativamente às ondas. Estes resultados podem ser verificados por comparação entre os casos 2 e 3. A presença da corrente leva ainda a um aumento do valor médio de F_x e de M_y .

Em qualquer dos três casos estudados, não é notória uma influência relevante da teoria de ondas utilizada.

Transpondo estes resultados para a escala real, verifica-se que se encontram dentro da mesma ordem de grandeza dos referidos em Mendes *et al.* (2000).

4 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental a ser utilizada no ensaio sísmico da estrutura consta de uma mesa de excitação, de uma balança de esforços e da instrumentação de controlo e medida acoplada à estrutura. O conjunto deverá ser ensaiado num tanque hidrodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidrodinâmica (9x6x3 m), na Universidade da Beira Interior.

4.1 - Mesa de excitação

A mesa de excitação unidireccional, sobre a qual é fixa a balança de esforços e o modelo da estrutura, é mostrada na Figura 8. Trata-se de uma estrutura metálica construída em aço inoxidável, utilizando tubo quadrado de 40 mm. O

acionamento desta mesa é conseguido a partir de um motor eléctrico com a potência de 1.1 KW e uma velocidade de rotação de 1500 rpm. A este motor está acoplado um redutor com uma relação de transmissão de 5:1 e um variador de velocidade, que permitirão excitar a mesa com uma frequência até 5 Hz. O conjunto motor/redutor/variador está localizado acima da superfície livre da água.

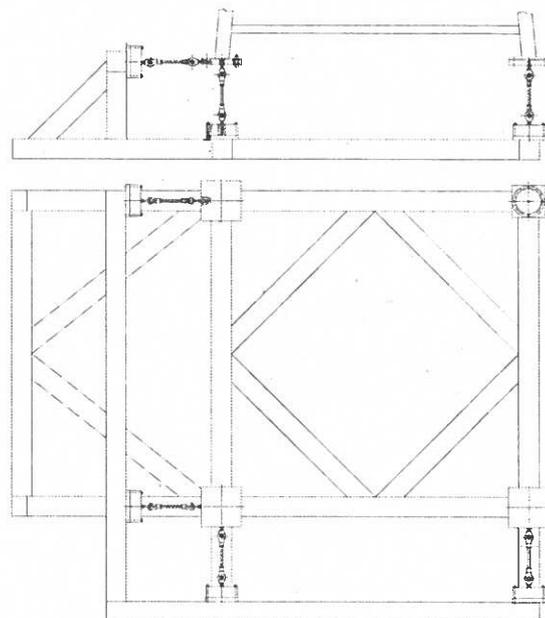


Figura 8 - Esquema da mesa de excitação e balança de esforços

Além da possibilidade de variação da frequência de excitação, é ainda possível variar a amplitude do movimento a que o modelo é submetido. Para realizar esta variação de amplitude o veio de saída do redutor é ligado a um prato rotativo localizado no fundo do tanque hidrodinâmico. É a partir deste prato que se procede à alteração da amplitude do movimento. O movimento de rotação é posteriormente transformado num movimento linear alternativo, que é transmitido à mesa de excitação através de um sistema biela-manivela (ver Figura 9). A mesa desliza sobre duas guias construídas em varão de aço calibre com 30 mm de diâmetro, fixas ao fundo do tanque. A ligação entre a mesa e cada uma das guias é feita por intermédio de 2 apoios com 160 mm de comprimento e com casquilhos em nylon.

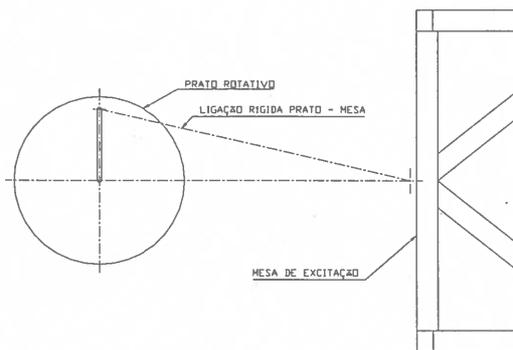


Figura 9 - Sistema rotativo que permite a obtenção do movimento alternativo e a variação da sua amplitude

4.2 – Balança de esforços

A balança de esforços projectada localiza-se sobre a mesa de excitação e suporta o modelo da estrutura, permitindo medir os deslocamentos segundo 3 graus de liberdade. Esta balança é constituída fundamentalmente por 8 células de carga, da DSEurope, idênticas à que se mostra na Figura 10. Estas células suportam cargas de tracção e de compressão. Quatro destas células localizam-se sob as pernas da plataforma, suportando as cargas verticais; duas estão colocadas lateralmente, segundo a direcção de excitação, e suportam as cargas horizontais; as outras duas situam-se também lateralmente e medem os esforços horizontais na direcção ortogonal à do movimento. As células que suportam os esforços verticais têm capacidade unitária de ± 100 Kg, e as localizadas lateralmente de ± 50 Kg. Cada uma destas células de carga está ligada à mesa de excitação por meio de 4 parafusos M4 e à estrutura através de ligações articuladas, conforme se pode ver na Figura 11. As ligações articuladas têm por função garantir que os esforços transmitidos às células de carga são apenas de tracção e de compressão. A alimentação das células de carga é feita a 24 V em corrente contínua, enquanto que o sinal que elas produzem se situa na gama $0 - \pm 5$ V ($+5$ V em tracção).



Figura 10 - Células de carga utilizadas na balança de esforços

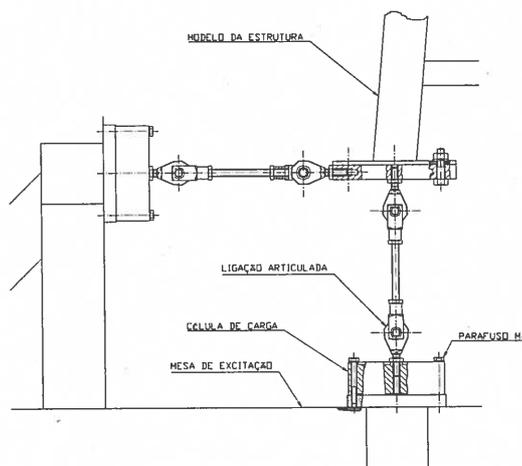


Figura 11 - Esquema da ligação entre as células de carga, a mesa de excitação e o modelo da estrutura

5 - INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Além da instrumentação referida anteriormente, que diz respeito à balança de esforços, o modelo físico da estrutura será também equipado com instrumentos que se destinam a efectuar a análise de tensões, e à medição de deslocamentos e acelerações. Em alguns elementos estruturais do modelo, a definir com recurso a um programa de análise por elementos finitos, serão colocados extensómetros TML da série WF. Estes extensómetros serão ligados em quarto de ponte a um sistema de condicionamento de sinal. Este sistema, da National Instruments, é composto por uma caixa de ligação (SC-2345), na qual se introduzem os módulos de condicionamento adequados ao sinal que se pretende tratar

(SCC-SG01). Após o condicionamento, o sinal situa-se na gama a $0 - \pm 10$ V.

Será ainda colocado no modelo um transdutor de deslocamento da DSEurope (Modelo PCS-S) - Figura 12 - e um acelerómetro. Este equipamento permitirá controlar com precisão o movimento de excitação da estrutura. Relativamente ao transdutor de deslocamento, será alimentado a 24 V em corrente contínua enquanto que o sinal produzido será $0 - 10$ V.

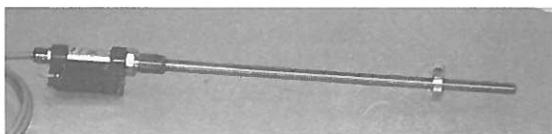


Figura 12 - Transdutor de deslocamento utilizado no modelo da estrutura

Os sinais produzidos por todos os sensores referidos são recolhidos num computador pessoal equipado com uma placa de aquisição de dados PCI 6024E, da National Instruments. Esta placa tem resolução de 12 bits e uma taxa de amostragem de 200kS/s, podendo o sinal de entrada situar-se na gama de ± 0.05 V a ± 10 V. Assim sendo, serão ligados directamente à placa os sinais provenientes das células de carga e do transdutor de deslocamento. Quanto ao sinal produzido pelos extensómetros, este será também ligado à placa de aquisição, mas apenas após a passagem pelo módulo de condicionamento.

A configuração do sistema de aquisição de dados é mostrada na Figura 13, onde a recolha e processamento dos sinais é conduzida em ambiente LabView.

6 - CONCLUSÃO

O esforços resultantes da acção do vento sobre esta estruturas offshore foram anteriormente determinados através de ensaios aerodinâmicos realizados em 1994,

num túnel de vento a baixa velocidade. No âmbito de um projecto COPERNICUS que decorreu entre 1995 e 1998, foram também realizados ensaios hidrodinâmicos num canal hidráulico existente em Varna, Bulgária. Nestes ensaios utilizou-se um modelo físico idêntico ao que estamos a considerar neste trabalho, mas em maior escala - 1:24. Foram então determinados experimentalmente os esforços produzidos sobre este modelo por ondas e correntes, podendo ver-se os resultados obtidos em Mendes *et al.* (2000).

A montagem experimental anteriormente descrita será utilizada para determinar os esforços produzidos por carregamentos sísmicos sobre este tipo de estruturas. Os resultados a obter com estes ensaios serão em seguida articulados com os dados fornecidos pelos ensaios hidráulico e aerodinâmico da estrutura, por forma a conseguir definir uma metodologia a utilizar no projecto de estruturas offshore sismo-resistentes.

A análise das tensões e deformações do modelo em oscilação forçada permitirá enfim reunir dados que permitam conceber um dispositivo fusível de protecção da estrutura, em ambiente marítimo.

AGRADECIMENTOS

A investigação conduzida enquadra-se na actividade desenvolvida pelos autores no Centro de Ciência e Tecnologias Aeroespaciais, da Fundação para a Ciência e Tecnologia. Estes gostariam ainda de agradecer ao Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior o apoio financeiro para a execução da montagem experimental, bem como os meios disponibilizados no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidrodinâmica para a realização dos ensaios da estrutura.

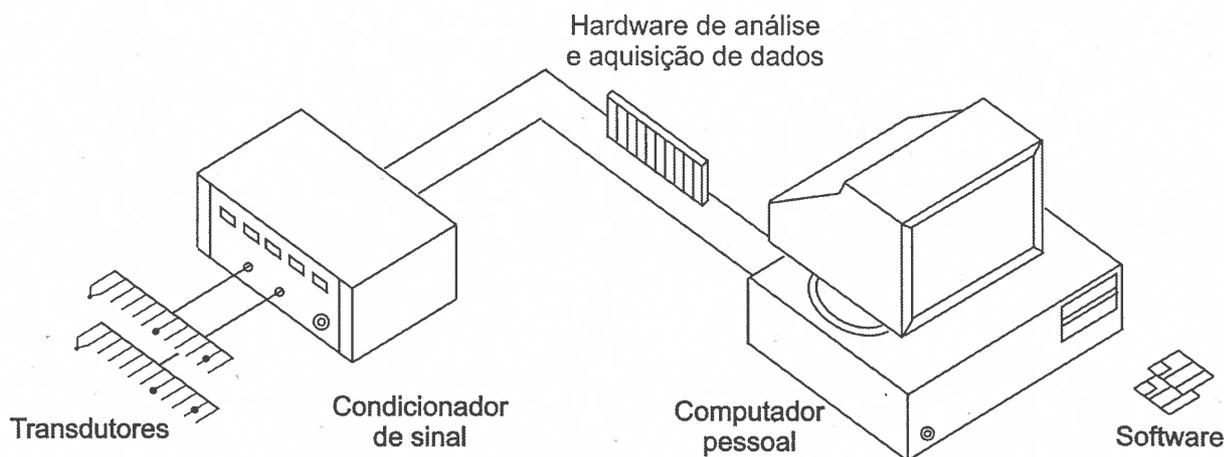


Figura 13 - Configuração do sistema de aquisição de dados

REFERÊNCIAS

- Bartrop, N. D. P. & Adams, A. J., *Dynamics of Fixed Marine Structures*, Butterworth Heinemann, London, 1991.
- Bea, R.G., Craig, M.J.K., Gudmestad, O.T., Karthiaghian, V. & Pradayana, G., "Developments in Proposed ISO Guidelines for Design of Offshore Platforms to Resist Earthquakes", *Paper OTC 11069, presented at the 1998 Annual Offshore Technology Conference in Houston, Texas, USA*, pp. 1-26, 3-6 May 1999.
- Clough, R. W. & Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Dean R. G. & Dalrymple R. A.: *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific, 1991.
- Marshall, P.W., "Offshore Structures", in Eds. Beskos, D.E. and Anagnostopoulos, S.A., *Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures - A Handbook*, Advances in Earthquake Engineering, Vol 3, pp. 695-724, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1997.
- (Mendes, A.C., Kishiev, R., Chaplin, J.R. & Tomchev, S., Experimental determination of the hydrodynamic loading on a model of offshore platform in waves and current, *Proc. of the 10th Int. Offshore and Polar Engineering Conf.*, ISOPE: Seattle, vol. I, pp.196-203, 2000.)
- Rahman, M., *Water Waves: Relating Modern Theory to Advanced Engineering Applications*, Oxford University Press, 1995.
- Roesset, J.M., "Principles of Earthquake Resistant Design", in Eds. Beskos, D.E. and Anagnostopoulos, S.A., *Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures - A Handbook*, Advances in Earthquake Engineering, Vol 3, pp. 333-368, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1997.
- Vugts, J., A review of hydrodynamic loads on offshore structures and their formulation, *Proc. of the Int. Conf. on the Behavior of Offshore Structures*, London, 1979.
- Watabe, M. & Tohdo, M., Seismic Hazard Analysis for Design Earthquake Loads, in Eds. Beskos, D.E. and Anagnostopoulos, S.A., *Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures - A Handbook*, Advances in Earthquake Engineering, Vol 3, pp. 241-269, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1997.