



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

APROFUNDAMENTO DO MURO-CAIS NORTE DA DOCA Nº 2 DO PORTO DE LEIXÕES E PROBLEMAS RELATIVOS AOS PROCESSOS CONSTRUTIVOS FACE AOS CONDICIONAMENTOS IMPOSTOS PELAS ESTRUTURAS PORTUÁRIAS EXISTENTES

Fernando Oliveira¹, Andrade Campos²

¹OFM – Obras Públicas, Ferroviárias e Marítimas, S.A.
Lagoas Park, Edifício 1 Piso 2, 2740-264 Porto Salvo
fo@ofm.pt

²LEDAP - Laboratório de Energética e Detónica, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade
de Coimbra, Polo II – 3030 COIMBRA
andrade.campos@dem.uc.pt

RESUMO

A exploração do Porto de Leixões tem vindo a ser cada vez mais exigente em termos das condições de operação dos navios que demandam esta importante Infraestrutura Portuária, situada na Região Norte de Portugal Continental. São particularmente sensíveis a estas necessidades os Cais das Docas construídos na década de 70 e que agora se vêem mostrando, dia a dia, cada vez com menor capacidade, do que seria desejável, para responder à procura actual.

A Administração dos Portos do Douro e Leixões (APDL, S.A.) decidiu avançar com o aprofundamento do Muro Cais Norte da Doca nº 2, o qual tem uma infraestrutura em estacas de betão armado com um prisma de alívio contido por uma cortina de estacas prancha (perfil tipo Dinamarquês). Tanto as primeiras (estacas betão) como estas últimas (estacas pranchas) estão cravadas no maciço rochoso, pelo que o aprofundamento teria que ser efectuado apenas à frente da estrutura, sem interferir com a estabilidade desta.

Esta estrutura tem mais de 30 anos e nunca foi alvo de quaisquer obras de manutenção ou conservação, pelo que foram impostas severas restrições aos processos construtivos a adoptar na execução da obra.

Face às dificuldades técnicas associadas aos condicionalismos impostas pelo Caderno de Encargos para a execução dos trabalhos, e aos elevados riscos associados, nomeadamente para a integridade das estruturas adjacentes, apenas dois Empreiteiros se apresentavam a concurso com soluções construtivas muito distintas.

A OFM,SA, a quem viria a ser adjudicada a Empreitada, apresentou uma solução técnica inovadora em Portugal, em termos de demolição submersa de rocha, utilizada pela primeira vez nesta Obra. Esta tecnologia está no entanto já devidamente comprovada há muito tempo e foi utilizada com grande sucesso no Porto de Rotterdam e no canal de ligação entre o Rio e o Mar em Amsterdã, cujos cais são também em estacaria.

Trata-se de um processo construtivo que permite proceder à demolição da rocha submersa, junto a estruturas com vulnerabilidades, já que a onda de choque provocada pela deflagração dos



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

produtos utilizados para quebrar o maciço rochoso é desprezível, não introduzindo vibrações nas estruturas adjacentes, em consequência da sua deflagração.

Serão apresentados ensaios em modelo reduzido realizados no Aquarium Teste do LEDAP (Laboratório de Energética e Detónica, Associação de Apoio) utilizando esta tecnologia, que é também aplicável (pela ausência de ondas de choque), no desencalhe de submarinos e na exploração de rochas ornamentais.

O facto de se tratar de um material que não é classificado como um explosivo, permitirá no futuro uma utilização mais abrangente nos Açores, uma vez que os elementos constituintes da mistura deflagrante (que são misturados no local de aplicação) podem ser transportadas sem quaisquer riscos ou restrições Inter Ilhas e o mesmo acontecendo com o seu manuseamento nos Portos desta Região Autónoma.

ENSAIOS DE APLICAÇÃO DE DEFLAGRANTE PARA DESMONTE DE ROCHA SUBMERSA (Aprofundamento da bacia de acostagem de um cais no Porto de Leixões.) - Aplicação ao problema concreto do Porto de Leixões

1. – Estratégia e hierarquia de variáveis

A estratégia de abordagem do problema, partindo do estudo técnico da obra, foi assente sobre o estudo geológico. O traçado dos perfis e a trajectória a seguir no avanço da obra foram definidos de forma a evitar qualquer dano nas estacas da infraestrutura do cais.

No desmonte de rocha em geral, utilizando explosivos ou outros materiais energéticos, há que relembrar que se devem:

- analisar as propriedades dinâmicas da rocha a desmontar,
- seleccionar os possíveis materiais energéticos, explosivos ou deflagrantes, que assegurem o desmonte da rocha submersa,
- projecto e desenho do avanço da obra, assegurando uma boa “saída” da rocha desmontada
- estudo e avaliação do impacto ambiental, minimizando vibrações ,
- pré - corte ou “smooth blasting” de zonas periféricas, permitindo o seu bom acabamento
- desmonte com deflagrantes no caso em que não possa existir qualquer transmissão de choque a zonas envolventes,
- estudo mais detalhado da transmissão do choque e das vibrações, para definir os atrasos de iniciação por furo para a avaliação final dos avanços, vibrações e custos envolvidos.

2. Propriedades dinâmicas da rocha a desmontar

Não existem muitas referências da densidade nem das propriedades de choque das rochas encontradas, pelo que considerámos um seu valor médio, tendo por base os valores encontrados na bibliografia, transcritos na tabela seguinte (vd. Pers-Anders Persson, 1994).



	Detonation velocity D (m/s)	p-wave velocity c (m/s)	Density ρ (kg/m ³)	Impedance 10^6 kg m ² s ⁻¹
Explosive :				
ANFO ($d = 3$ in)	3200	—	900	2.9
Emulsion	5200	—	1200	6.2
Dynamite (low velocity)	2500	—	1450	3.6
Dynamite (high velocity)	5500	—	1450	8.0
Rock Material :				
Basalt, dense	—	5560	2761	15.4
Granite, Lithonia, GA	—	2710	2640	7.2
Granite, Valencia County, NM	—	5230	2800	14.6
Hematite, ore, Soudan, MN	—	6280	5070	31.8
Sandstone, Berea, Amherst, OH	—	2640	2182	5.8
Marlstone, Rifle, CO	—	3280	2310	7.6
Limestone, Marly, Rifle, CO	—	2380	2250	5.4
Limestone, Chalky, Pickstown, SD	—	1340	1410	1.9
Concrete	—	4580	2220	10.2

Figura 1: Detonation wave and p-wave velocities, densities, and wave impedances for several materials and rock materials

Os valores indicados permitiam desde logo afastar a utilização de explosivos de baixa densidade e de fraca impedância de choque, dado que estamos em presença de granitos, os quais se consideraram como de fraca coesão, dado que as amostras recolhidas apresentaram fendas e inúmeras microcavidades.

3. Material energético seleccionado

No nosso caso, tendo presente as limitações já referidas anteriormente, houve ainda de considerar que um explosivo, se fosse utilizado, teria de assegurar a sua boa performance em diâmetros compatíveis com a colocação de cargas de pequeno diâmetro, isto é, assegurar que o explosivo tem um pequeno diâmetro crítico. Na figura seguinte encontra-se evidenciado o que acabamos de referir.

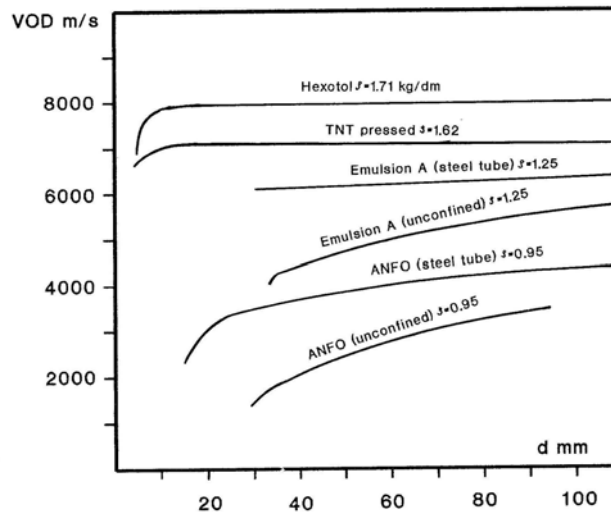


Figura 2: Exemplificação das velocidades de detonação em função dos diâmetros e confinamentos utilizados.

No entanto, dada a estrutura envolvente e a necessidade de evitar totalmente a existência de qualquer onda de choque, que originasse a fractura ou o corte de qualquer estaca de fundação, foi



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

seleccionado um deflagrante, que permitisse, pela energia de bolha, proceder ao desmonte da rocha submersa.

Para termos uma ideia do carregamento médio poderemos desde já adiantar que os valores encontrados na bibliografia para rochas semelhantes se encontram entre os 650 g a 950 g, por m³ de rocha desmontada, valor que considerámos para referência futura.

O deflagrante seleccionado, após reuniões com fabricante e aplicador, recaiu nos de tipo de termite, com aditivo de perclorato de potássio, de acordo com trabalhos anteriores do LEDAP, tendo por base composições de alumínio e óxido de ferro.

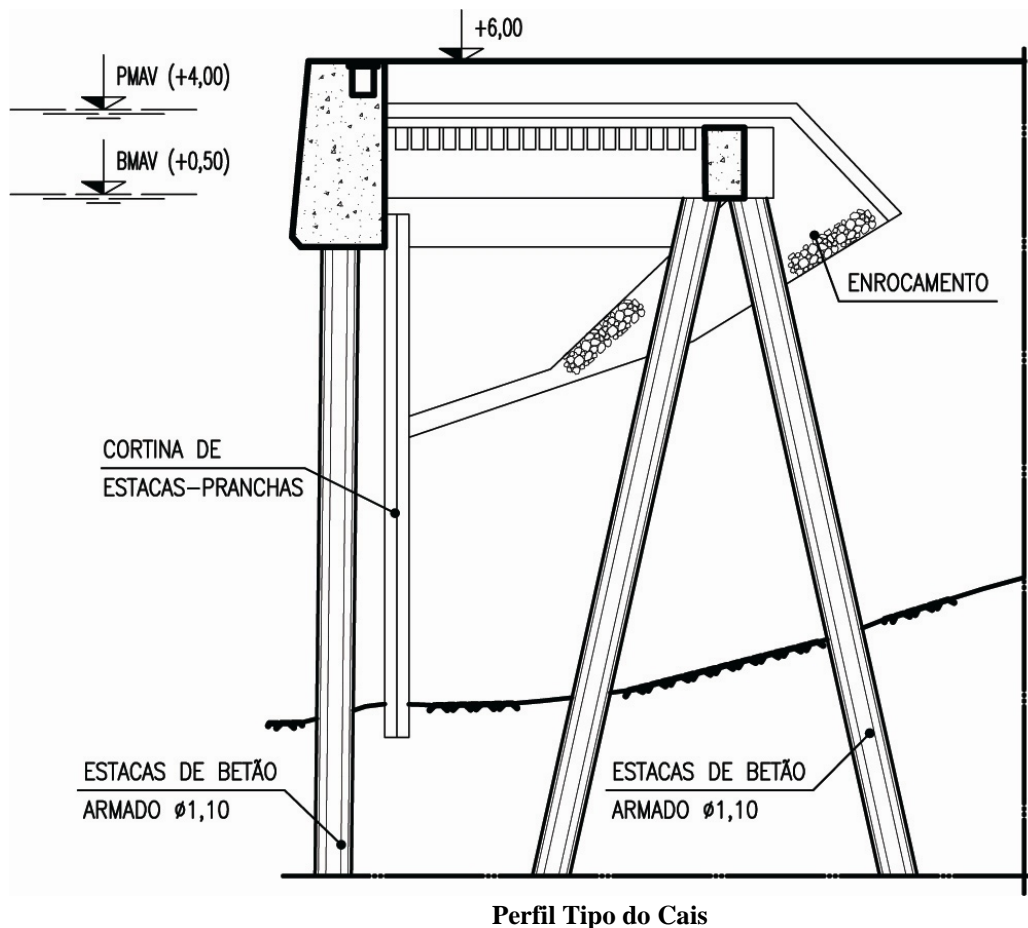
Estas composições, desenvolvendo uma grande temperatura de combustão, promovem a mudança de fase da água envolvente no furo, que, ao passar a ser vapor a alta pressão, executam todo o trabalho de desmonte.

4. Condições de projecto

- Desmonte submerso entre a profundidade de 8 a 11m.
- Cais de acostagem do Porto de Leixões com infraestrutura em estacaria de betão, com muitos anos de existência.
- Avaliação do maciço rochoso e definição do pré-corte.
- Proibição de existência de qualquer onda de choque.
- Pré-avaliação de deflagrante sem onda de choque em “aquarium test”.
- Registo de onda sísmica em equipamento de três eixos, com avaliação de energia absorvida.
- Cortina de ar e sugadora de ar respeitando normas ambientais e evitando qualquer destruição da fauna animal (peixes) envolvente.
- Avaliação por dragagem de material desmontado.

5. Material energético

- Material deflagrante.
- Composição baseada na reacção de nitratos e percloratos com metais e óxidos metálicos.
- Iniciação com ignidor.
- Velocidade de deflagração entre 800 a 1200m/s.
- Energia libertada cerca de 5 vezes maior do que um explosivo convencional.
- Inexistência de onda de choque.



6. Técnicas de validação e de aplicação de tecnite

- Princípios e cálculo para desmorte.
- Princípios e cálculo para desmorte em contorno.
- Montagem de furos e avaliação da performance do desmorte em tempo real.
- Elaboração de diagrama de fogo e relatório de desmorte ou de progresso – onda sísmica.

7. Estratégia de desmorte

- Furacão a 25mm, compasso de segurança por granulometria de destroço.
- Equipe de mergulhadores profissionais com experiência em marcação, furacão e aplicação.
- Controlo de disparo e verificação de energia de desmorte.
- Verificação com mergulhadores e vídeo de zona desmontada.

8. Projecto e justificação dos disparos e do seu carregamento.

Noções gerais. Os furos devem ser carregados com uma concentração de carga de fundo não inferior a 1/3 da profundidade total do furo, podendo ser cerca de $\frac{3}{4}$ da altura total do furo. Na prática o furo deve ser carregado durante um comprimento que corresponda até metade da distância igual à do espaçamento em profundidade (*burden distance*), no qual pode ser colocada a



tampa de retenção. O espaçamento frontal entre furos deve ser considerado como 1.1 vezes o espaçamento em profundidade (*burden distance*).



Figura 3: Cargas de material energético

Todo o plano de furacão e de fogo tipo foi acompanhado por mergulhadores profissionais, que avaliaram, em tempo real de avanço, o estado e a intensidade de fracturação da rocha.

9. Selecção de inflamadores e sistema de disparo.

Os valores dos atrasos nos disparos foram projectados de modo a só existir uma expansão de uma bolha, por carga, e aguardar que esta se dissipasse antes do disparo da carga seguinte. Para isso foi construída uma mesa de disparo com um sistema de controle central executado por um PLC, que assegurou um disparo programado com atrasos que podiam variar de 1 mts até 500 mts, com intervalos com precisão inferior a 1 mts. Cada carga foi conectada a um terminal, que assegurou assim a verificação da ligação, através da impedância do circuito, autorizando, por sua vez, o disparo do inflamador com o atraso pré - programado.



Figura 4: Colocação das cargas de material energético com mergulhador

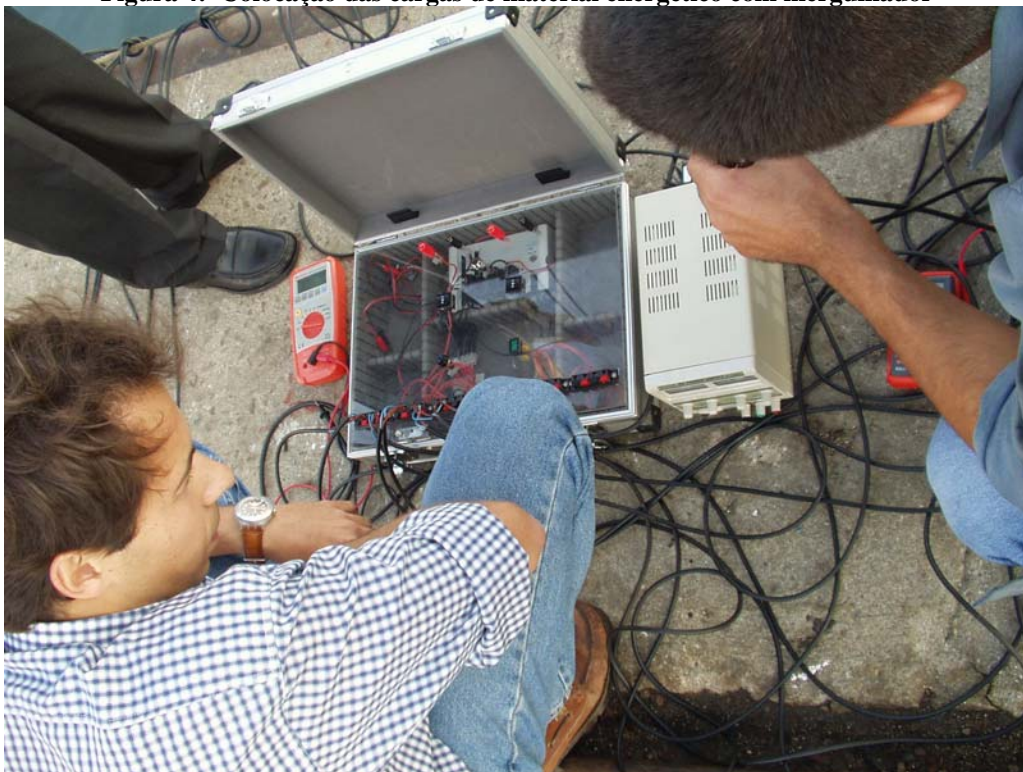


Figura 5: Mesa de disparo com atraso programável

10. Protecção ambiental – cortina de bolhas de ar



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Todo este trabalho teve presente a minimização do impacto ambiental, tendo sido utilizado sempre uma cortina de bolhas de ar, acoplada ao compressor existente, criando uma barreira eficaz de propagação e de atenuação da energia da bolha do deflagrante, criando uma parede eficaz que separou a zona de trabalho, definida pela vertical da frente de desmonte, e todo o espaço envolvente para o exterior desta cortina, como se pode observar na figura seguinte.



Figura 6: Cortina de ar de protecção de fauna

11. Sismógrafo, características, implantação e resultados

O método tradicional de redução de ondas sísmicas consiste na redução da massa de material energético disparado de cada vez, admitindo-se que ocorra a dissipação da energia de uma onda antes da que, sendo gerada a seguir, atinja o mesmo local. Este método exige o recurso a sistemas de disparo electrónicos, com tempos de disparo muito precisos. Consequentemente o sismógrafo utilizado tem de ter a capacidade de registar as ondas com frequências superiores aos atrasos programados.

Foi acordado que seriam instalados sismógrafos de registo, com 3 eixos coordenados, devidamente monitorizados. Foi convencionado que os registo sismográficos ficariam dependentes de um sismógrafo Brüel & Kjær, baseado num acelerómetro triaxial de acordo com a norma ISO 2631-2.

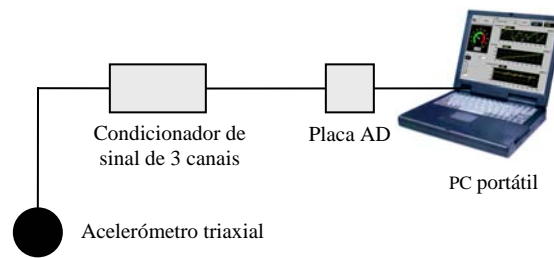


Figura 7: Sistema de aquisição triaxial Brüel & Kjaer

O sistema de aquisição triaxial Brüel & Kjær, do tipo 4322, de acordo com a figura anterior baseia-se num computador pessoal portátil equipado com uma placa de conversão analógica-digital PCMCIA à qual está ligado um condicionador do sinal proveniente de um acelerómetro piezoeléctrico triaxial. O sinal adquirido é armazenado e posteriormente tratado com software desenvolvido para o efeito. Nos testes efectuados, como elemento sensor primário utilizou-se um acelerómetro piezoeléctrico triaxial Brüel & Kjær, do tipo 4322 designados por sensor A. As sensibilidade axial do sensor, de acordo com as especificações do fabricante, estão indicadas na tabela 1.

Eixo	x	y	z	Unidades
Sensibilidade de carga (159,2 Hz)	1,001	1,008	1,014	pC/ms ⁻²
Sensibilidade de carga (1,25 Hz)	1,054	1,061	1,068	pC/ms ⁻²

Tabela 1 - Sensibilidades do acelerómetro triaxial da Brüel & Kjær do tipo 4322 (sensor A).

A saída do sensor é ligada a um sistema de condicionamento de sinal composto por três canais iguais, cuja saída se destina a ser ligada à referida placa de aquisição instalada no computador. Cada canal do sistema de condicionamento é composto por dois estágios distintos de amplificação. O estágio de entrada corresponde a um amplificador de carga, cuja função é transformar em tensão o sinal de carga correspondente à saída dos acelerómetros. Esta função é assegurada por um circuito integrado do tipo AD 549, o qual possui uma impedância de entrada da ordem de 10^{13} , e uma corrente de polarização de entrada, tipicamente, de 100 fA. O circuito implementado possui uma frequência de corte de 160 Hz, que é claramente superior à frequência máxima do sinal que se pretende analisar. A saída do amplificador de carga é ligado ao segundo estágio, constituído por um amplificador de instrumentação de precisão, do tipo AD 524. Para ser possível uma boa adaptação da amplitude dos sinais de tensão correspondentes à vibração, é possível seleccionar quatro valores de ganho diferentes: 1, 10, 100 ou 1000. Para além do ganho, é também possível regular o valor do desvio de zero na entrada e na saída, através de simples potenciómetros multipista. Cada um dos três canais do sistema de condicionamento é alimentado por um conversor DC/DC cuja saída é de ± 15 volt, o que, para além de possibilitar a alimentação de energia dos circuitos de cada canal, garante um melhor isolamento entre os três canais. Todo o conjunto, correspondente aos três eixos, encontra-se montado nas respectivas placas de circuito impresso, feitas em fibra "epoxy", devidamente encerradas no interior de uma caixa metálica o que lhe confere uma elevado grau de imunidade a ruídos eléctricos induzidos.

Programa de computador. Foi escrito um programa de computador no programa comercial de desenvolvimento de aplicações Testpoint que permite ao utilizador controlar todos os parâmetros relevantes de aquisição, tais como: a frequência de varrimento dos canais, o início e o fim da aquisição, etc. Este programa divide-se em duas partes fundamentais: uma de aquisição e armazenamento do sinal e outra de tratamento dos dados. Para a aquisição e armazenamento do sinal eléctrico proveniente do condicionador de sinal é apenas necessário atribuir um nome ao ficheiro onde serão registadas as leituras e definir a taxa de aquisição que deve ser escolhida com algum cuidado. Na escolha da taxa de aquisição é necessário ter em conta o teorema de Nyquist, que diz que “a taxa de aquisição de um sistema que está a adquirir um sinal deve ter uma frequência pelo menos dupla da frequência mais elevada do referido sinal”. Para sinais de vibração foi admitida uma frequência de aquisição de 160 amostras/segundo que é suficiente, dado que a gama de vibrações a considerar situa-se, de acordo com a norma ISO 2631, dos 0,1 aos 80 Hz. Para além deste teorema deve-se ter em conta o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), utilizado para filtrar o sinal, que utiliza séries com a dimensão de potência de base dois (Bendat, 1997). Logo, se a série de dados a tratar não tiver esta dimensão, o algoritmo de cálculo adiciona zeros até alcançar uma dimensão correspondente a uma potência de base dois, o que alterará de forma considerável o resultado final.

Atendendo ao supra exposto, deve-se ter em consideração o tempo de aquisição, e escolher, em função deste, uma taxa de aquisição que permita que os dados recolhidos tenham uma dimensão igual ou ligeiramente inferior a uma potência de base dois.

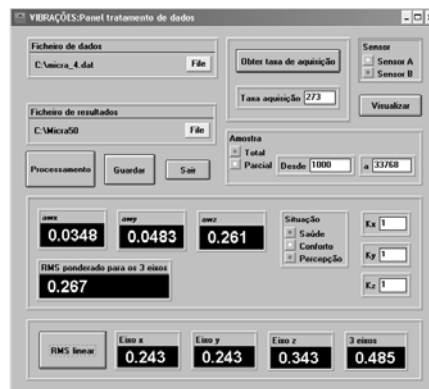


Figura 8: Interface gráfica do programa de tratamento de dados

Na figura apresentou-se uma imagem da interface gráfica do programa de tratamento de dados. Para proceder ao tratamento, o utilizador tem de aceder ao ficheiro de dados. Este ficheiro, quando gerado por uma aquisição deste programa, tem registado a data, a hora de início da leitura e a taxa de aquisição. Assim, deve-se obter a taxa de aquisição daquele ficheiro, pressionando o botão criado para o efeito. Quando a amostra a tratar tem dimensão pequena, o erro no cálculo dos valores ponderados poderá ser elevado, não fazendo sentido o seu cálculo, podendo calcular-se simplesmente o valor de RMS linear. No programa desenvolvido é possível visualizar graficamente os dados, o que permite tomar uma decisão sobre a dimensão da amostra que se quer tratar. O programa permite que se opte por fazer um tratamento de toda a amostra ou apenas de uma parte seleccionada.

O processamento do sinal consiste em primeiro lugar na leitura do ficheiro, separando o sinal de cada um dos três eixos. Este sinal, valor em tensão, é convertido para um valor de aceleração instantânea, através da recta de calibração determinada para cada eixo, consoante o acelerómetro definido pelo utilizador. A etapa seguinte, a mais crítica e demorada, consiste em fazer passar,



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

para cada eixo, o sinal por filtros de banda passante iguais às bandas de terço de oitava. Como entre 0,5 e 80 Hz há 23 bandas de terço de oitava, obtêm-se 23×3 sinais. Seguidamente é calculado o RMS do sinal de cada uma das bandas. Depois do cálculo destes obtêm-se a aceleração ponderada, para cada eixo, em função do RMS e do factor de ponderação de cada banda. Finalmente, calcula-se o valor da vibração total, em função da aceleração ponderada de cada eixo e dos factores de ponderação.

Os valores da aceleração ponderada de cada eixo e da vibração total são apresentados pelo programa. Depois do processamento concluído, podem-se alterar os factores de multiplicação e/ou a situação em análise.

Calibração do sistema. Para a calibração do sistema utilizou-se uma máquina de ensaios de fadiga (cf. figura 5), onde era possível gerar um movimento oscilatório de amplitude e frequência constantes, tendo-se obtido as rectas de calibração do sistema para os três eixos ortogonais de cada um dos sensores primários.

A referida máquina permite, através de um LVDT (“Linear Variable Differential Transformer”), medir o deslocamento imposto ao acelerómetro, previamente fixado. O sinal seleccionado para calibrar o sistema de aquisição foi o correspondente a um deslocamento harmónico simples.

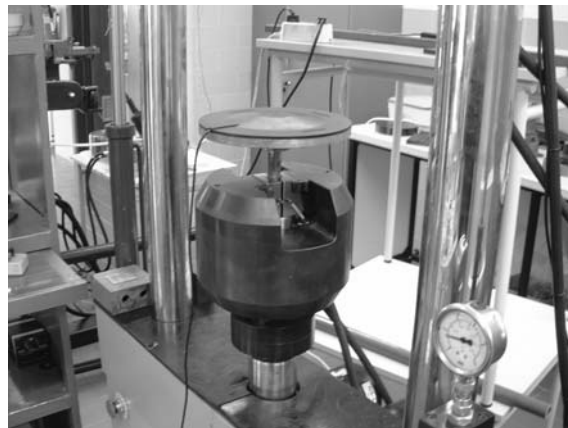


Figura 9: Calibração para o eixo z do sensor A.

Em virtude dos acelerómetros tri-axiais utilizados medirem as acelerações nas três direcções ortogonais, calibraram-se cada um dos seus eixos independentemente.

Foram feitas leituras em diversas frequências de forma a testar a independência do sistema em relação à frequência de oscilação.

As frequências utilizadas e as respectivas amplitudes de oscilação estão indicadas na tabela 2.

Frequência [Hz]	1	5	15	30
Amplitude [mm]	2,5	1,5	0,75	0,15
	2,0	1,2	0,60	0,12
	1,5	0,9	0,45	0,09
	1,0	0,6	0,30	0,06
	0,5	0,3	0,15	0,03

Tabela 2 – Frequências e amplitudes de calibração.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Convém referir que, apesar das frequências de utilização do sistema de acordo com a ISO 2631 serem de 0,5 a 80 Hz, apenas foi possível utilizar na calibração uma frequência máxima de 30 Hz em função das características da máquina disponível.

Na figura 10 representam-se os sinais das saídas em tensão do acelerómetro e do LVDT durante um dos ensaios de calibração realizados.

O sinal do LVDT é relativo ao deslocamento, enquanto que o sinal do acelerómetro é relativo à aceleração, pelo que, como seria de esperar, os sinais apresentam um desfaseamento de 180°. O processamento do sinal do LVDT consistia em determinar a amplitude média do sinal em tensão, converter esta amplitude, através do valor da sensibilidade estática do LVDT (0,015 m/V), no correspondente valor de deslocamento médio e obter o valor da aceleração linear máxima.

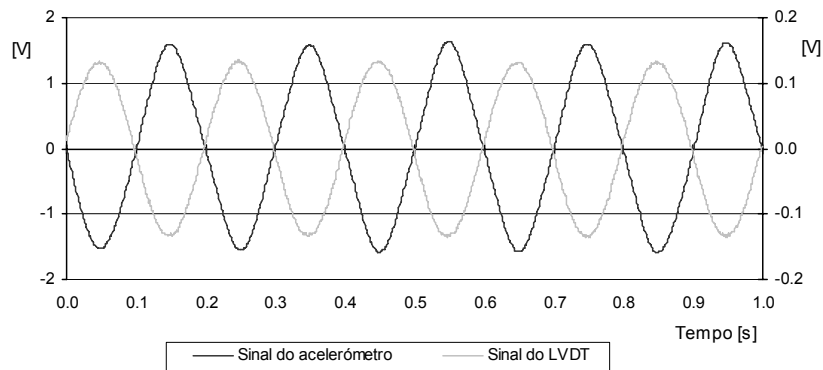


Figura 10: Sinal do acelerómetro vs. sinal do LVDT

Para o sinal do acelerómetro apenas se determinou a média das amplitudes máximas do sinal em tensão, ou seja o pico do sinal.

Com os valores da aceleração linear máxima imposta na máquina e da amplitude do sinal do acelerómetro obtiveram-se as rectas de calibração para cada um dos eixos.

Na tabela 3, apresentam-se os valores da sensibilidade estática e do coeficiente de correlação para os três eixos de ambos os sensores.

Sensor	Eixo	Sensibilidade estática	Factor de correlação
A	x	1,057	0,999
	y	1,070	0,997
	z	9,524	0,999

Tabela 3 - Sensibilidade estática e factor de correlação do sistema.

A implantação dos sismógrafos, ao longo do Porto de Leixões, foi efectuada criteriosamente de forma a permitir a aquisição, em tempo real da onda registada, no equipamento de medida referenciado na fig.11



Figura 11: Equipamento de medida e registo sismográfico

e provando a inexistência de qualquer onda de choque, como se pode observar no diagrama seguinte, em que as vibrações registadas se encontravam muito abaixo dos valores limites de 10 mm/s de acordo com a Norma NP 2074 e ISO 2631-2:

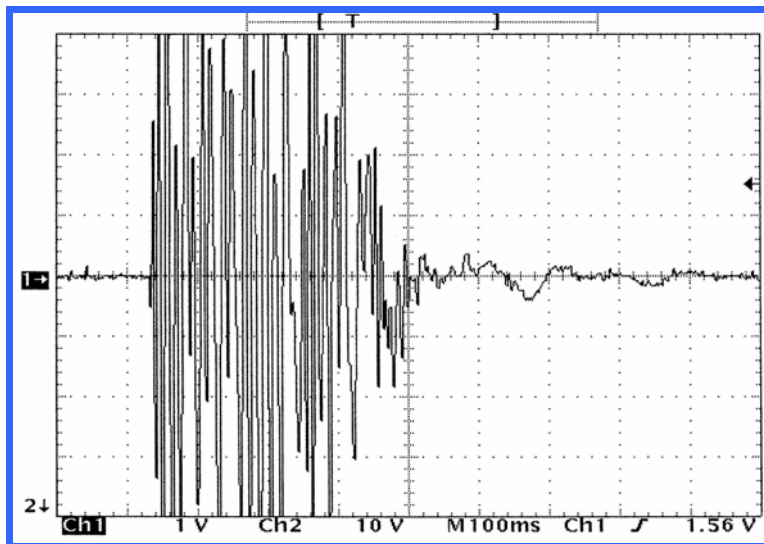


Figura 12: Registo da onda de choque

Posteriormente foi comprovada a fraturação da rocha, desmontada com este sistema de deflagrante, quando foi recolhida com uma draga, como se pode observar pela figura seguinte.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005



Figura 13: Equipamento de dragagem



Figura 14: Vista do Estaleiro / Execução dos Trabalhos