

AVALIAÇÃO DE ESPECTROS DE RESPOSTA EM EXCITAÇÕES SÍSMICAS RESULTANTES DE DESMONTES SUBAQUÁTICOS

Paulo José Costa Couceiro Júnior (MAXAM) E-mail: paulocouceiro@gmail.com

Resumo: A problemática das vibrações induzidas por detonações de cargas explosivas pode ver-se acentuada quando se trata de desmontes de rochas subaquáticas, uma vez que os eventos sísmicos gerados por essas atividades podem ser mais perigosos que aqueles produzidos por desmontes convencionais. A avaliação do potencial de danos às estruturas sensíveis pode ser eficazmente realizada através da aplicação de espectros de resposta. Assim, o entendimento dos fenômenos espectrais se torna fundamental para uma correta avaliação dos impactos associados aos projetos de derrocagem e dragado. Portanto, realizaram-se avaliações espectrais de 240 registros sismográficos, resultantes de dois importantes projetos de infraestrutura, a fim de identificar a presença de energia em baixas frequências dominantes.

Palavras-chave: Espectro de resposta, desmonte subaquático, vibrações, ondas hidrodinâmicas.

EVALUATION OF RESPONSE SPECTRUMS FROM SEISMIC EXCITATION GENERATED BY UNDERWATER BLASTING

Abstract: The problematic of ground-induced vibrations can be potentialized when it comes from underwater blasting, since seismic events generated by these activities can be more danger than those produced by conventional blasting. The potential damage evaluation of sensible structures can be efficiently carried out through the application of response spectrum techniques. Hence, the understanding of the spectral phenomena become essential for a correct assessment of the impact of underwater blasting and dredging projects. Thus, 240 seismographic records, resulting from two important infrastructure projects, were evaluated in order to identify the presence of energy in the low dominant frequencies range.

Keywords: Response spectrum, underwater blasting, vibrations, hydrodynamic waves.

1. Introdução

Os desmontes subaquáticos são essenciais para os processos de escavação e dragagem de rochas em ambientes aquáticos, sejam para o aprofundamento de portos, aberturas de canais de navegação, entre outros. Entretanto, os efeitos ambientais observados nas detonações de cargas explosivas em meios aquáticos podem ser potencialmente perigosos (ABRAHAMS, 1974). As ondas hidrodinâmicas produzidas durante a detonação, sejam por cargas confinadas ou não confinadas, geram perturbações sísmicas de grande relevância. O aporte extra de energia, que se produz através da presença de ondas hidrodinâmicas na convolução sísmica do evento, pode eventualmente potencializar o risco sísmico das estruturas civis.

Medearis (1976) foi um dos primeiros investigadores a demonstrar estatisticamente, após estudar a resposta de estruturas submetidas às vibrações geradas por desmontes de rocha de produção, como as frequências contidas nestes podem influenciar o nível de resposta das estruturas. Ainda que os níveis de dano potenciais são extremamente superiores em terremotos ou explosões nucleares, as técnicas de modelamento dinâmico desenvolvidas para estudar os mecanismos de resposta de estruturas submetidas a esses fenômenos podem ser estendidas ao estudo das vibrações geradas por desmontes de rocha (SISKING et al., 1980).

Muitos autores demonstraram a eficácia da aplicação de técnicas de análises com espectros de resposta para a compreensão e avaliação do potencial de dano das vibrações geradas por eventos sísmicos (MEDEARIS, 1976; NEWMARK & HALL, 1982; DOWDING, 1985; GUPTA, 1990; CLOUGH & PENZIEN, 1995; CHOPRA, 1995). Não obstante, até os anos 80, pouca investigação se havia realizado vinculando técnicas de dinâmica estrutural com o campo dos desmontes de rocha com explosivos.

Ainda que a energia liberada nas detonações de cargas explosivas seja extremamente menor que em terremotos, as distâncias às estruturas ou outros pontos sensíveis de interesse, podem ser relativamente pequenas. Nestas circunstâncias, as vibrações geradas pelas detonações ganham uma importância significativa.

Ao analisar a resposta estrutural de 22 residências submetidas a uma grande variedade de fontes energéticas, como desmontes em grande mineração e construção civil, Langan (1980) pôde comprovar que a resposta estrutural se correlaciona melhor com a resposta calculada de um sistema com um grau de liberdade do que com o movimento do terreno (DOWDING, 1985).

Portanto, o objetivo geral desse trabalho se encontra na necessidade de aplicar os conceitos de resposta estrutural no entendimento dos contornos espectrais de resposta resultantes do dimensionamento de desmontes de rochas subaquáticas, incluindo os eventuais efeitos da convolução de ondas hidrodinâmicas no conteúdo espectral de baixa frequência.

2. Bases teóricas do cálculo dos espectros de resposta

Chopra (1995) afirma que uma das mais significativas e importantes aplicações da teoria da dinâmica estrutural é a análise da resposta estrutural devido à um movimento do terreno causado por uma ação sísmica. As propriedades físicas essenciais de qualquer sistema elástico, estrutural ou dinâmico, submetido a uma fonte externa de excitação, são sua massa, propriedades elásticas (flexibilidade ou rigidez) e mecanismos de atenuação da energia ou amortecimento. O caso mais simples é definido por um sistema elástico-linear, com um grau de liberdade, onde se assume que cada uma de suas propriedades se encontram concentradas em um simples elemento físico, como se descreve na Figura 1 (CLOUGH & PENZIEN, 1995).

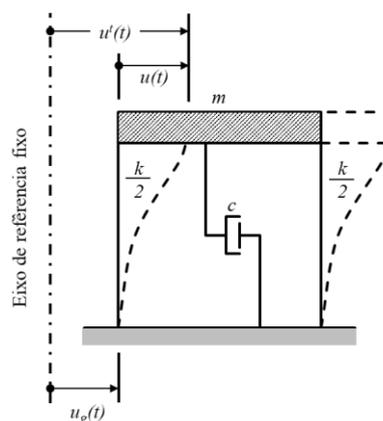


Figura 1 – Sistema de um grau de liberdade (CLOUGH & PENZIEN, 1995)

Quando um sistema dinâmico, como definido na Figura 1, sofre uma aceleração em sua base, esta experimenta um movimento relativo δ entre o seu movimento absoluto u_s e aquele sofrido pelo terreno u_g . Este movimento relativo da estrutura manifesta diversas forças ativas no sistema, tais como as forças elásticas $F_k(t)$, de atenuação $F_c(t)$, inerciais

$F_m(t)$ e externas $F_e(t)$. Assim, recorrendo às leis da mecânica clássica de Newton, o somatório de todas as forças atuantes no sistema deve ser zero, logo

$$F_m(t) + F_c(t) + F_k(t) + F_e(t) = 0 \quad (1)$$

Ao escrever essas forças em termos dos deslocamentos, velocidades e acelerações relativas, e considerando que as forças externas é zero, $F_e(t) = 0$, tem-se a clássica equação de um sistema dinâmico

$$m\ddot{\delta}(t) + c\dot{\delta}(t) + k\delta(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

onde $\delta(t)$, $\dot{\delta}(t)$ e $\ddot{\delta}(t)$ são os deslocamentos, velocidades e acelerações relativas do sistema, respectivamente; m , c e k são a massa, coeficiente de atenuação e rigidez do sistema; $\ddot{u}_g(t)$ é a aceleração do terreno, ou seja, a aceleração gerada pela detonação.

Entretanto, a solução da equação (2) não é trivial. Segundo o exposto por Clough & Penzien (1995) e Kramer (1996), uma função arbitrária de carga efetiva $p_{ef}(t)$ pode ser entendida como pulsos de carga infinitesimais. Cada pulso infinitesimal de duração $d\tau$ gera uma resposta no sistema ao transcorrer um tempo de $t \geq \tau$, tal que

$$d\delta(t) = e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \frac{p_{ef}(\tau) d\tau}{m\omega_d} \sin[\omega_d(t-\tau)] \quad (3)$$

Assim, a resposta total induzida no sistema pode ser obtida através da somatória de todos os pulsos individuais com duração de $t \geq \tau$. Uma vez que $d\tau$ é aproximadamente zero, a soma de todas as respostas diferenciais se torna a integral conhecida como a *Integral de Duhamel*, o que permite calcular a resposta total de um sistema elástico-linear.

Portanto, a resposta do deslocamento relativo $\delta(t)$ de um sistema com um grau de liberdade, submetido a uma aceleração $\ddot{u}(\tau)$ em sua base, pode ser expressa no domínio do tempo, tendo em conta que a carga efetiva é $p_{ef}(\tau) = -m\ddot{u}(\tau)$, por

$$\delta(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau \quad (4)$$

onde ω_n é a frequência circular natural do sistema; ω_d é a frequência circular de atenuação; ξ é a atenuação crítica da estrutura; t é o tempo; τ é o tempo de integração. A única limitação quanto sua aplicação reside no fato de que a resposta deve ser elástica-linear, porque a resposta linear é inerente a *integral de Duhamel* (CLOUGH & PENZIEN, 1995).

O espectro de resposta é definido como uma relação gráfica da máxima resposta de um sistema elástico submetido a uma influência dinâmica ou força, para um grande número de frequências naturais de vibração (NEWMARK & HALL, 1982). Esta relação é normalmente apresentada em um gráfico tripartite, que é construído ao considerar as relações senoidais entre o deslocamento, velocidade e aceleração. Consequentemente, os espectros de resposta construídos através de relações senoidais apresentam velocidades e acelerações espectrais conhecidas como pseudo-velocidades e pseudo-acelerações. Veletsos & Newmark (1964) demonstraram que tal simplificação estão muito próximas dos valores absolutos de aceleração e velocidades quando dotados de pequenas atenuações críticas (DOWDING, 1985). A Figura 2 apresenta um exemplo comparativo entre os espectros de resposta resultantes do famoso terremoto El Centro, em Imperial Valley de 1940, e outros típicos resultantes de desmontes de rochas.

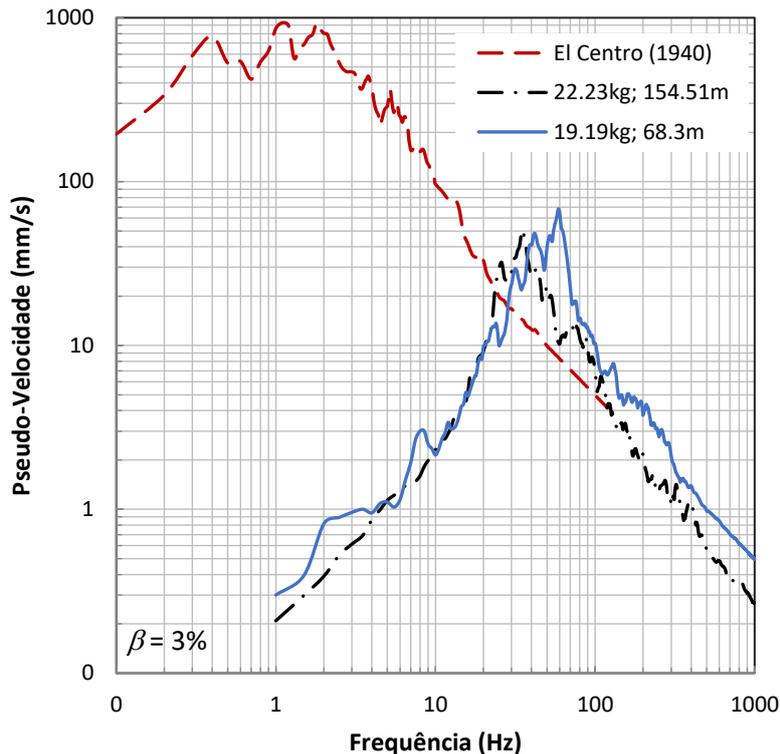
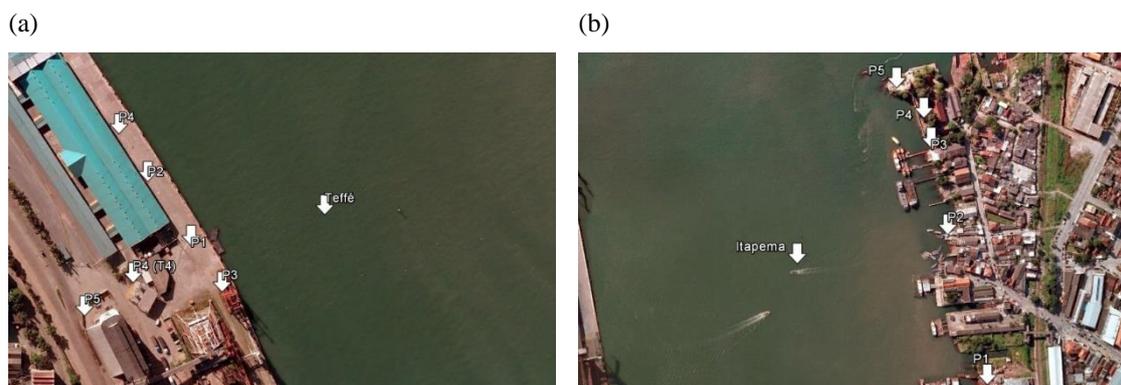


Figura 2 – Espectros de resposta para o terremoto e desmontes de rocha.

3. Resultados e discussões

Analisaram-se 240 registros sismográficos provenientes de desmontes de rochas subaquáticas de dois importantes projetos de infraestrutura. O primeiro se refere às obras de derrocagem das históricas pedras de Teffé e Itapema, localizadas no canal de navegação do Porto de Santos. O segundo projeto contempla as obras de expansão do Canal de Panamá, especificamente aos trabalhos de aprofundamento e alargamento do acesso sul da entrada do Pacífico. As respectivas áreas de monitoramento sismográficos são apresentadas na Figura 3.

Primeiramente, verificou-se que os contornos dominantes dos espectros de resposta de pseudo-velocidades sofrem mudanças significativas de acordo com a combinação de diversos fatores como as propriedades do meio de propagação, tempos de retardo usados na sequência de detonação, presença de frequências de ressonâncias específicos do ponto de interesse, distância entre a detonação e o ponto de monitoramento, ademais da incorporação dos efeitos hidrodinâmicos convolucionados na história temporal de vibrações.



(c)



Figura 3 – Áreas de monitoramento sismográfico do projeto de derrocagem das pedras (a) Teffé e (b) Itapema, no Porto de Santos e (c) na comunidade del Diablo, em Balboa, Ciudad de Panamá, durante os trabalhos no Canal de Panamá.

Um dos fatores que mais influenciam a frequência dominante das vibrações geradas por desmontes de rocha é a distância propagada pela onda. Como os materiais rochosos tendem a atenuar as frequências altas muito rapidamente, se esperam observar frequências mais baixas em regiões mais longínquas da detonação. Ao comparar dois espectros de resposta resultantes das detonações ST-PB-011 e ST-PB-018, realizados na pedra de Teffé, observam-se que, aumentando a distância de 102m para 294m, as frequências dominantes espectrais são atenuadas de 37Hz a 23Hz, respectivamente. Este comportamento pode ser apreciado na Figura 4(a), onde se apresentam os espectros de repostas normalizados pela velocidade pico de partícula.

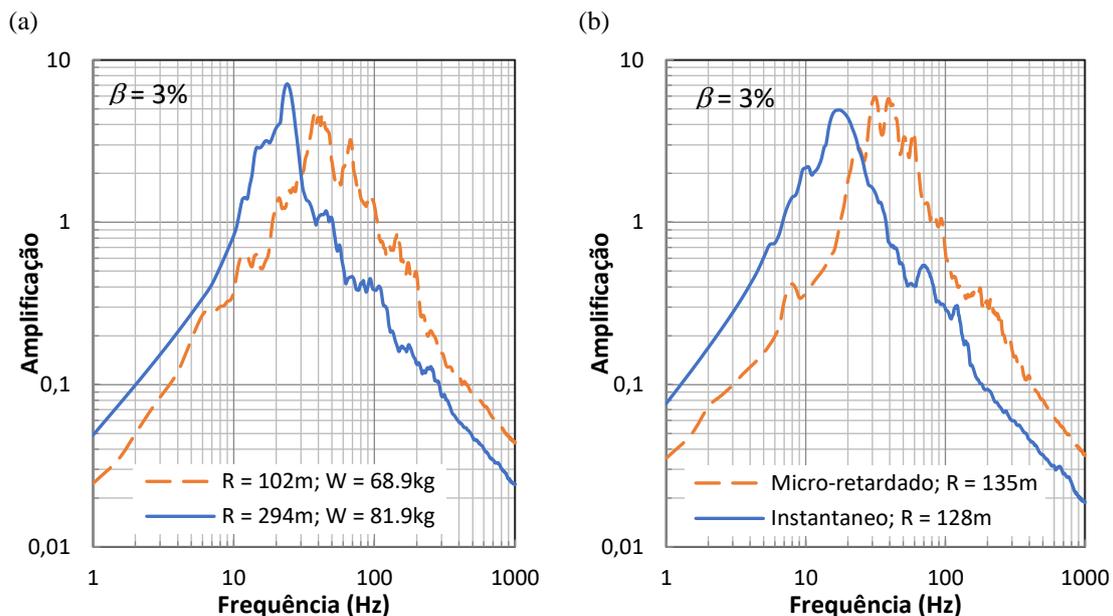


Figura 4 – Mudança de frequência dominante em função (a) da distância entre a detonação e ponto de monitoramento e (b) em função do uso de micro-retardos entre cargas

A Figura 3(b), por outro lado, apresenta os espectros de repostas para as detonações ST-PB-001 e ST-PB-009, obtidas no mesmo ponto de monitoramento, a umas distâncias absolutas de 128 e 135m, respectivamente. O primeiro desmorte compõe-se da detonação de uma única carga explosiva, de 6,7kg, enquanto o segundo desmorte consta de uma detonação de cargas micro-sequenciadas com 42ms – em cargas colineares –, com uma carga máxima de 19,2kg. A comparação entre ambos espectros de repostas põe em evidência como a liberação de energia em intervalos regulares de tempo modificam as frequências dominantes dos espectros. A frequência dominante da detonação instantânea foi de 16Hz ao passo que a frequência dominante observada na detonação sequenciada foi de 30Hz. Dowding (1985) observou que os contornos espectrais de resposta dominantes são afetados pelos tempos de retardos aplicados ao desmorte. Esse comportamento é uma consequência da incorporação de frequências resultantes da sequenciação utilizadas, que ao combinar-se com as frequências dominantes do terreno, podem ampliar o rango de frequências sob o domínio das velocidades.

Ao contrário dos terremotos, que tipicamente mobilizam energia em baixa frequências no rango dominado pelas velocidades de partículas, os espectros de resposta gerados por desmortes de rochas normalmente apresentam apenas um pico de amplificação significativo (DOWDING, 1985). Entretanto, observou-se, no presente trabalho, que alguns espectros de repostas de detonações subaquáticas podem apresentar picos de amplificação secundário no rango de baixas frequências.

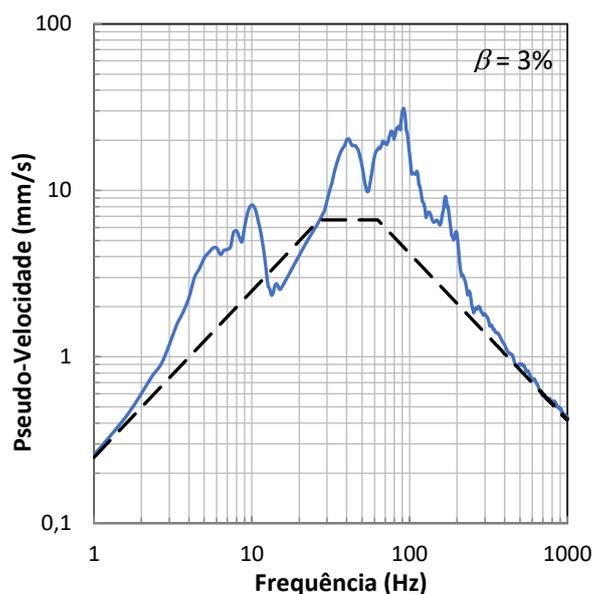


Figura 5 – Espectro de resposta e movimento do terreno calculado para o desmorte P-TP-002, nas obras de expansão do Canal de Panamá.

A presença de energia em baixas frequências promove o incremento das amplitudes dos deslocamentos, ainda que os níveis de velocidades de partícula no terreno não se vejam demasiadamente alterados. Este fenômeno pode ser consequência da chegada de ondas hidrodinâmicas transmitidas ao terreno como ondas superficiais de baixa frequência. Como exemplo desse fenômeno, apresenta-se o espectro de resposta calculado para a detonação P-TP-002, realizada no Canal de Panamá. Observam-se a presença de picos energéticos de amplificação secundarias, como consequência da ação de ondas hidrodinâmicas, em frequências menores que 10Hz. Ao considerar que as frequências naturais de vibração de estruturas civis se encontram entre 4-12Hz (SISKING et al., 1980), percebe-se o aumento do risco de ressonância sísmica associado com as vibrações

geradas por detonações subaquáticas que apresentam energia em baixas frequências.

A Figura 6 apresenta os contornos espectrais de resposta dos limites superiores, inferiores e médios, observados nas direções transversal, vertical e longitudinal, resultantes da análise de 39 registros da derrocagem da pedra de Itapema, no Porto de Santos, e 79 provenientes das obras de ampliação do Canal de Panamá. Outros 122 registros derivados da pedra de Teffé apresentaram resultados similares ao de Itapema. Os picos de amplificação secundários nos dados de Panamá, localizados na zona de baixa frequências, inferiores a 15Hz, são claramente superiores às observadas em Santos. Esse comportamento pode estar vinculado a que, durante toda a obra do Porto de Santos, medidas mitigadoras, tais como cortina de bolhas, foram usadas para atenuar as intensidades das pressões hidrodinâmicas, o que não foi necessário durante as obras no Canal de Panamá.

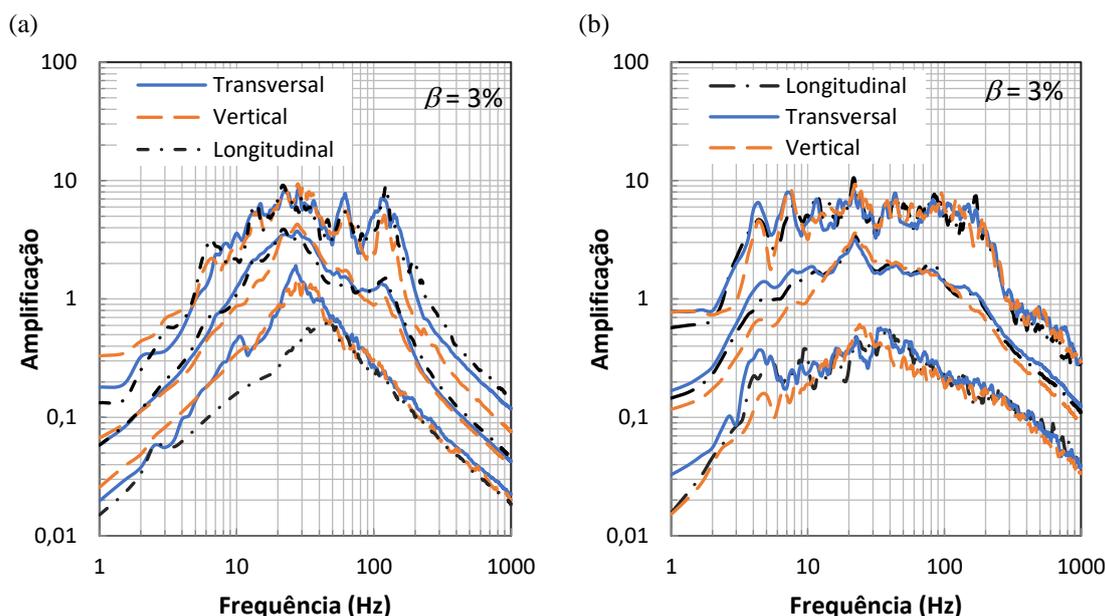


Figura 6 – Limites superior, inferior e médio das amplificações de pseudo-velocidades de partícula. Desmontes subaquáticos: (a) Porto de Santos e (b) Ampliação do Canal de Panamá.

4. Conclusões

Uma análise das características espectrais associadas aos fenômenos sísmicos gerados por detonações subaquáticas foi realizada. As ondas hidrodinâmicas, quando transmitidas ao terreno, são potenciais focos de energia em componentes de baixa frequência. Este aporte extra de energia, não observados em desmontes ordinários, são potencialmente perigosos para a integridade de estruturas civis, uma vez que estas apresentam frequências naturais de vibração da ordem de 4-12Hz. Portanto, as evidências encontradas nos registros sísmicos estudados neste trabalho sugerem que os projetos de derrocagem e dragado, que requerem desmontes subaquáticos, devem dotar-se de cuidados técnicos especializados para controlar os fenômenos de amplificação em baixas frequências.

Referências

ABRAHAMS, J. L. *Underwater drilling and blasting for rock dredging*. Proc. Instn. Civ. Engrs, Vol. 56, n.4, p.463–478, 1974.

CHOPRA, A. K. *Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. *Dynamics of structures*. 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc.,

1995.

GUPTA, A. K. *Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures*. New York: CRC Press, Inc., 1990.

DOWDING, C. H. *Blast Vibration Monitoring and Control*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall International Series, 1985.

KRAMER, S. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

LANGAN, R. T. *Adequacy of Single-Degree-of-Freedom System Modeling of Structural Response to Blasting Vibrations*. Tese de Mestrado, Northwestern University, Evanston, USA, 1980.

MEDEARIS, K. *The Development of Rational Damage Criteria for Low-Rise Structures Subjected to Blasting Vibrations*. Kenneth Medearis Associates, Final Report to National Crushed Stone Assn., Washington, D.C., 1976.

NEWMARK, N. M. & HALL, W. J. *Earthquake Spectra and Design*. Department of Civil Engineering. Illinois: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.

SISKIND, D. E., STAGG, M. S., KOPP, J. W. & DOWDING, C.H. *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Blasting*. U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8507, 1980.

VELETOS, A. S., & NEWMARK, N. M. *Design Procedures for Shock Isolation Systems of Underground Protective Structures, Volume III; Response Spectra of Single Degree-of-Freedom Elastic and Inelastic Systems*. Air Force Weapons Laboratory Technical Documentary Report RTD TDR-63-3096 AD44989-Volume III, 1964.