

3

Avaliação Probabilística de Ameaça Sísmica no Sítio da Barragem de Rejeitos

Projetos de engenharia que envolvem análises sísmicas têm como meta produzir estruturas que resistam a certos níveis de vibração do solo sem danos excessivos. O nível de vibração é geralmente descrito em termos de um único parâmetro do movimento do solo que, ao ser ultrapassado, define a ameaça sísmica. A análise de ameaça sísmica envolve a quantificação deste parâmetro que pode ser feita de forma determinística, quando se assume determinado cenário para um terremoto particular, ou de forma probabilística, na qual incertezas na dimensão, na localização e no tempo de ocorrência são explicitamente consideradas (Almeida, 2002). Neste capítulo foi feito um estudo de avaliação probabilista de ameaça sísmica na área de uma barragem de construção de rejeitos de mina de bauxita situada em zona sísmicamente ativa na Jamaica.

3.1

Processo de Poisson

Sismicidade pode ser definida como a descrição das relações entre as datas, os locais, as dimensões e a periodicidade da ocorrência de eventos sísmicos, em uma dada região. A compreensão da sismicidade regional é a base fundamental de qualquer estudo envolvendo a resposta dinâmica de estruturas. Para se efetuar análises de ameaça sísmica são adotados, normalmente, métodos estatísticos ou métodos empíricos (Hu *et al.*, 1996).

Para uma detalhada análise da sismicidade regional requer-se consultas a:

- Bases de dados históricos - é necessária a obtenção de dados históricos, tão antigos quanto possíveis, que incluam a data do evento, intensidade epicentral ou a máxima verificada, intensidades locais, curvas de iguais intensidades, magnitude, localização do epicentro e profundidade do foco;

- Bases de dados instrumentais - obtidos por sismógrafos que permitem a obtenção de informações sobre os epicentros, profundidades dos focos e magnitudes, bem como outros registos (p.ex: acelerogramas) para descrever o movimento sísmico do terreno no local da instalação;
- Informações sismotectônicas - fornecem dados importantes sobre os movimentos tectônicos associados a sismos históricos de elevada magnitude, relacionando o padrão das fraturas tectônicas, o seu comprimento, profundidade, idade e o histórico das falhas, assim como o seu relacionamento a ocorrência de sismos anteriores (Wang e Law, 1994).

Ainda que a consulta a estas bases de dados seja fundamental, existe sempre uma grande incerteza na determinação dos parâmetros de sismicidade. Assim, normalmente os eventos sísmicos são tratados como um processo estocástico estacionário. Admite-se que existirá um acúmulo constante de energia que será dissipada aleatoriamente no tempo durante o terremoto e pode-se também afirmar que para certo intervalo de tempo, o número de sismos de determinada magnitude por unidade de tempo é constante (Oliveira, 1977; Hu *et al.*, 1996).

A consideração da ocorrência de eventos sísmicos como um processo de Poisson é um modelo bastante aceito, que permite calcular a probabilidade de um número de sismos acontecer em um intervalo fixo de tempo conhecida a taxa média de ocorrência de eventos λ . Um processo de Poisson pressupõe a verificação das seguintes hipóteses:

- Independência - dados dois eventos sísmicos A e B, a ocorrência do evento A não é afetada pela ocorrência do evento B, nem pelo momento em que ele ocorre ou pela sua magnitude. Isso significa que o processo não tem memória, pois os eventos do passado não afetam os eventos futuros. Logo, equivale a dizer que a probabilidade $P[A|B]=P[A]$;
- Estacionaridade - dado um intervalo de tempo $[t, t+\Delta t]$, a probabilidade de ocorrência de um evento em Δt depende do número de eventos ocorridos em $[t, t+\Delta t]$ e do intervalo Δt , porém não de t ;

- Não-multiplicidade - a probabilidade de dois ou mais eventos ocorrerem no intervalo de tempo Δt tende para zero à medida que o intervalo Δt também tende para zero. Assim, não são considerados eventos simultâneos (Lomnitz, 1994).

Do processo de Poisson obtém-se que a probabilidade P de N terremotos ocorrerem no intervalo de tempo t é dado por:

$$P(N, t, T_R) = \left(\frac{t}{T_R}\right)^N \frac{e^{-\frac{t}{T_R}}}{N!} \quad (3.1)$$

onde T_R é o período de retorno, igual ao inverso da taxa média de ocorrência λ .

Logo, a probabilidade de que nenhum terremoto ($N = 0$) ocorra no intervalo de tempo t é expressa por:

$$P(0, t, T_R) = e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (3.2)$$

ou a probabilidade de que ao menos 1 evento ocorra estimada como:

$$F(t, T_R) = P(N \geq 1, t, T_R) = 1 - e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (3.3)$$

onde $F(t, T_R)$ é a função de probabilidade de excedência.

A tabela 3.1 apresenta as probabilidades de excedência do parâmetro de movimento sísmico, e seus correspondentes períodos de retorno, para um tempo de vida útil da estrutura (t) de 50 e 100 anos.

Tabela 3.1 – Probabilidade de excedência e períodos de retorno para diversos tipos de sismo (Bertero, 1997).

Tipo de sismo	Período de retorno	Probabilidade de excedência
Frequente	43 anos	50% em 30 anos
Ocasional	72 anos	50% em 50 anos
Raro	475 anos	10% em 50 anos
Muito raro	950 anos	10% em 100 anos

3.2 Lei de Gutenberg-Richter

A relação entre a frequência e a magnitude mais conhecida foi sugerida por Gutenberg e Richter (1944), como citado por Hu *et al.*, (1996),

$$\log N = a - b \cdot M \quad (3.4)$$

sendo N o número de sismos ocorridos de magnitudes iguais ou maiores que M , contidos no intervalo $[M, M+\Delta M]$, em que ΔM é suficientemente grande para dar origem a um segmento de reta bem ajustado. O parâmetro “ a ” (atividade sísmica) está relacionado com o número total de sismos e “ b ” está relacionado com a distribuição de sismos pelas diversas magnitudes. Fazendo:

$$\alpha = a \cdot \ln 10 \text{ e } \beta = b \cdot \ln 10 \quad (3.5)$$

tem-se que

$$\ln N = \alpha - \beta \cdot M \text{ ou } N = e^{\alpha - \beta \cdot M} \quad (3.6)$$

Se o limite inferior da magnitude é M_0 , o número total de sismos N_T é dado por

$$N_T = e^{\alpha - \beta \cdot M_0} \quad (3.7)$$

e a probabilidade de ocorrência de sismos com magnitude não inferior a M será então

$$1 - F(M) = \frac{N}{N_T} = \frac{e^{\alpha - \beta \cdot M}}{e^{\alpha - \beta \cdot M_0}} = e^{-\beta(M - M_0)} \quad (3.8)$$

A probabilidade de ocorrerem sismos com magnitude não superior a M será

$$F(M) = 1 - e^{-\beta(M - M_0)} \quad (3.9)$$

sendo a função de densidade de probabilidade de M , expressa como

$$f(M) = \beta \cdot e^{-\beta(M - M_0)} \quad (3.10)$$

Embora esta relação de Gutenberg-Richter dê bons resultados para sismos moderados e em grandes regiões, subestima o número de sismos para as

magnitudes mais reduzidas e não limita o número de sismos para grandes magnitudes. Cornell e Vanmarcke (1969), como citam Hu *et al.*, (1996), sugeriram um limite superior de magnitude M_u (sismo máximo provável), definindo

$$F(M) = \frac{1 - e^{-\beta(M-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}} \quad (3.11)$$

e

$$f(M) = \frac{\beta \cdot e^{-\beta(M-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_u-M_0)}} \quad (3.12)$$

com $M_0 \leq M \leq M_u$. Quando M_u tende para infinito, as expressões (3.11) e (3.12) tendem para as expressões (3.9) e (3.10) propostas por Gutenberg e Richter (1944).

3.3 Modelo probabilístico de Cornell

Embora os sismos sejam considerados eventos incertos e aleatórios, por simplicidade muitas vezes são tratados por meio de análises determinísticas, estimando-se os futuros sismos máximos prováveis com base nos sismos históricos e na sismotectônica regional (Hu *et al.*, 1996).

A análise determinística da ameaça sísmica² é efetuada mediante as seguintes etapas:

- Localização das potenciais zonas sismogênicas que se relacionam geograficamente com o local de interesse, apoiada nos catálogos e relatos de sismos históricos e informações sismotectônicas disponíveis;
- Com base na magnitude M selecionada e na distância epicentral, avaliar os parâmetros máximos do movimento do solo, usando, na maioria dos casos, a aceleração horizontal do solo (PGA) como parâmetro de projeto;

² Foi aqui adotada a designação de ameaça sísmica para o conceito expresso na terminologia de língua inglesa como *seismic hazard*, embora vários autores também usem a designação perigo sísmico. Para descrição das consequências dos efeitos naturais dos sismos na sociedade, como perdas de vidas humanas, danos à infraestrutura, prejuízos ambientais, etc. reserva-se a designação risco sísmico.

- Efetuar os ajustes necessários aos parâmetros assim determinados de forma a levar em conta as características geográficas e geotécnicas locais (Wang e Law, 1994).

A análise probabilística de ameaça sísmica consiste em determinar a probabilidade de excedência de determinado parâmetro relacionado a movimentos sísmicos, num dado período de tempo, no local de estudo. Para se realizar uma análise probabilística são necessários os seguintes passos:

- Definição das potenciais zonas sismogênicas que afetam o local de interesse;
- Determinação dos parâmetros de sismicidade regional;
- Seleção de um modelo para caracterização da sismicidade regional;
- Escolha de lei de atenuação adequada dos movimentos sísmicos;
- Cálculo das probabilidades de excedência no local em estudo (Wang e Law, 1994).

Como citado por Miranda *et al.*, (2006), dos modelos probabilísticos existentes, o modelo proposto inicialmente por Cornell (1968), e modificado posteriormente por Der Kiureghian e Ang (1977) e por Bender (1984), é ainda um dos mais utilizados em todo o mundo. O modelo de Cornell é baseado no teorema da probabilidade total, onde a probabilidade de excedência de um parâmetro de movimento Y no local em estudo é a soma das contribuições de todas as n zonas sismogênicas consideradas,

$$P[Y > y] = \sum_{j=1}^n P[Y > y | E_j] \cdot P[E_j] \quad (3.13)$$

com

$$P[Y > y | E_j] = \int \int \dots \int P_j[Y > y | x_1, x_2, x_3, \dots] \cdot f_j(x_1) \cdot f_j(x_2 | x_1) \cdot f_j(x_3 | x_1, x_2) \dots dx_1 dx_2 dx_3 \quad (3.14)$$

onde y é o valor de referência do parâmetro Y ; E_j é o evento sísmico ocorrido na zona sismogênica j ; x_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) são variáveis aleatórias que consideram a influência da magnitude do sismo, da distância hipocentral e do comprimento do

segmento de falha; $f(x)$ é a função de densidade de probabilidade e $P[E_j]$ é a probabilidade de ocorrência do evento sísmico E_j .

Por simplicidade, é assumido que o evento sísmico tem origem num ponto, mas a zona sismogênica pode ser um ponto, uma linha, uma área ou um volume (onde falhas podem ter orientações definidas ou indefinidas). Desta forma, desprezando algumas incertezas e escolhendo para as variáveis aleatórias x_i a magnitude (M) e a distância hipocentral (R), tem-se que:

$$P[Y > y | E_j] = \iint P_j[Y > y | M, R] \cdot f_j(M) \cdot f_j(R | M) dM dR \quad (3.15)$$

Se λ_j é a taxa média anual de ocorrência de sismos de magnitude $M \geq M_0$ na zona sismogênica j , então a taxa anual total será:

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (3.16)$$

A probabilidade de um sismo com magnitude $M \geq M_0$ ocorrer na zona sismogênica j corresponderá a

$$P[E_j] = \frac{\lambda_j}{\lambda} \quad (3.17)$$

logo,

$$P[Y > y] = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n \lambda_j P[Y > y | E_j] \quad (3.18)$$

Assumindo que a ocorrência de eventos sísmicos em todas as zonas sismogênicas obedece a um processo estatisticamente homogêneo de Poisson com taxa anual média de ocorrência de evento λ_j , então a probabilidade anual de que o parâmetro do movimento Y exceda ao seu valor de referência y será dada pela seguinte expressão:

$$P_{1ano}[Y > y] = 1 - e^{-\sum_{j=1}^n \lambda_j P[Y > y | E_j]} \quad (3.19)$$

Para a probabilidade de excedência em T_R anos,

$$P_T[Y > y] = 1 - \{1 - P_{1ano}[Y > y]\}^{T_R} \quad (3.20)$$

ou, inversamente, para cálculo do período de retorno (anos),

$$T_r = \frac{1}{P_{1ano}[Y > y]} \quad (3.21)$$

Admitindo uma lei de atenuação do tipo:

$$\ln y = y_0 + y_1 \cdot M + y_2 \cdot \ln R + y_3 \cdot R \quad (3.22)$$

na qual é admitida independência entre as variáveis aleatórias M (magnitude) e R (distância hipocentral) vem,

$$P[Y > y | E_j] = \int_{r_0}^{r_1} P_j[Y > y | E_{j,r}] \cdot f_j(r) dr \quad (3.23)$$

onde $E_{j,r}$ significa um evento sísmico ocorrido na zona sismogênica j à distância hipocentral r .

$$P[Y > y | R = r] = P[M > m(y, r)] = 1 - F[m(y, r)] = 1 - \frac{1 - e^{-\beta[m(y, r) - M_0]}}{1 - e^{-\beta(M_u - M_0)}} \quad (3.24)$$

com probabilidade unitária para $m(y, r) \leq M_0$ e nula para $m(y, r) \geq M_u$ e

$$P[Y > y | E_j] = \int_{r_0}^{r_1} P_j[Y > y | R = r] \cdot f_j(r) dr \quad (3.25)$$

Este modelo pontual (*point-source model*) pressupõe que a energia liberada durante um sismo irradia toda de um ponto concentrado e correspondente ao foco. Esta hipótese pode ser válida para sismos de pequenas magnitudes, mas para sismos mais severos a energia é liberada ao longo de segmentos de falha que podem atingir dezenas de quilômetros. Neste caso, Der Kiureghian e Ang (1977), propuseram um modelo de ruptura finita que permite entrar em conta com o comprimento da ruptura na fonte. Para isso partindo da expressão proposta por Cornell, mas considerando que:

$$P[Y > y | E_j] = \int_{m_0}^{m_U} P_j[Y > y | E_{j,m}] \cdot f_j(m) dm \quad (3.26)$$

em que $E_{j,m}$ é um evento sísmico de magnitude m ocorrido na zona j . A probabilidade $P_j[Y > y | E_{j,m}]$ depende do tipo de zona geradora de sismos, podendo esta ser uma linha se for uma falha conhecida, uma área, com ou sem orientação

de falhas conhecidas. Esta probabilidade vai depender da distância ao epicentro, da distância focal $r(y,m)$, obtida de acordo com as leis de atenuação definidas e do comprimento de ruptura L (função da magnitude).

3.4 O sítio da barragem de rejeitos

O sítio de interesse situa-se em uma área com coordenadas geográficas - 77,24O de latitude e 17,89N de longitude, situado na Jamaica, onde será construído um alteamento de uma barragem de rejeitos. A figura 3.1 apresenta um mapa com a localização da mina de bauxita, na região centro-sul da Jamaica, bem como da capital Kingston e de importante infraestrutura do país (porto e uma refinaria onde fica a barragem de rejeitos).

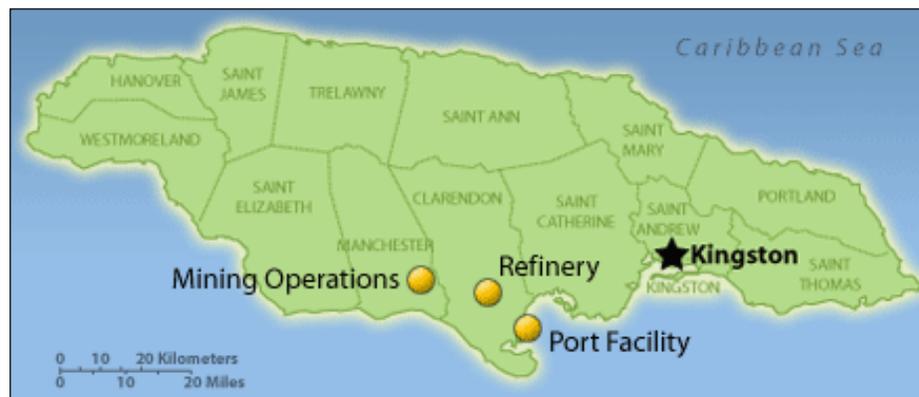


Figura 3.1 – Localização do sítio da barragem de rejeitos de mineração
(<http://www.alcoa.com/jamaica/en/home.asp>).

A primeira estimativa de ameaça sísmica para a Jamaica foi proposta por Shepherd (1971) e Shepherd e Aspinall (1980) que apresentaram uma revisão dos eventos sísmicos com base em catálogo histórico dos terremotos acontecidos na ilha durante 300 anos. Valores de intensidade na área da capital Kingston no período 1880 – 1960, onde ocorreram mais de 20 terremotos de grande intensidade ($MMI \geq VI$), foram convertidos em aceleração por Shepherd e Aspinall (1980) usando a relação proposta por Gutenberg-Richter (1954). Como resultado, aqueles autores constataram que a área de Kingston, em particular, e todo o território da Jamaica, em geral, apresenta níveis de alto risco de acordo

com a classificação do *United States Uniform Building Code*. Para movimento do terreno com intensidade IX na escala MMI Shepherd e Aspinall estimaram uma aceleração de pico de 0,3g com 30% de probabilidade de excedência em 50 anos no substrato rochoso da capital, valores estes que estão atualmente incorporados no código de obras da Jamaica.

Mais recentemente, outros estudos de ameaça sísmica foram realizados na Jamaica conforme referências apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resumo de metodologias e resultados de análises de ameaça sísmica na Jamaica.

Referência	Método/ Período de retorno	Modelo das fontes sísmicas	Catálogo	Lei de atenuação	PGA na rocha do sítio da barragem de rejeito
Shepherd <i>et al.</i> (1997)	APAS/ 475 anos	Histórico paramétrico	Shepherd <i>et al.</i> (1994a)	Joyner e Boore (1993)	PGA 0,155–0,17g
Final Report: Kingston Metropolitan Area SHA USAID & OAS (2001)	APAS/ 72 e 475 anos	Histórico paramétrico	Catálogo próprio	Joyner e Boore (1993)	Somente para Kingstone
García <i>et al.</i> , (2003)	APAS e árvore lógica/ 475 anos	Histórico paramétrico (3 fontes)	Tanner e Shepherd (1997)	Ambraseys (1996)	PGA 0,16 – 0,24g
Jamaica Spectral Seismic Hazard Maps (2006)	APAS/ 2.475 anos (IBC)	Histórico paramétrico	Catálogo unificado 1687-2004	Boore, Joyner & Fumal (1997)	Sa(T=0,2) = 0,43g Sa(T=1) = 0,20g
ENR, 2009	APAS/ 475 anos	Histórico paramétrico (15 fontes)	Catálogo próprio	Boore, Joyner & Fumal, (1997)	PGA = 0,2g Sa(T=0,2) = 0,45g

APAS = Análise probabilística de ameaça sísmica

IBC = *International building code*

ERN = Avaliação de riscos naturais – América Latina

Sa(T) = Aceleração espectral no período T

3.5 Sismicidade na Jamaica

O território jamaicano é uma porção elevada acima do nível do mar da plataforma vulcânica submarina da Nicarágua (*Nicaragua Bank*). As condições de sismicidade do país estão associadas à interação entre a placa Norte-Americana, a microplaca Gonâve e a placa do Caribe sobre a qual se situa a ilha (figura 3.2). A principal fonte regional de geração de sismos provem do movimento da

microplaca Gonâve, que é delimitada ao norte pela zona de falha Oriente (*Orient fault zone, OFZ*), ao oeste pelo centro de expansão Caiman (*Cayman Spreading Center, CSC*), ao sul pelas zonas de falha Walton (*Walton fault zone, WFZ*) e Enriquillo (*Enriquillo fault zone, EFZ*).

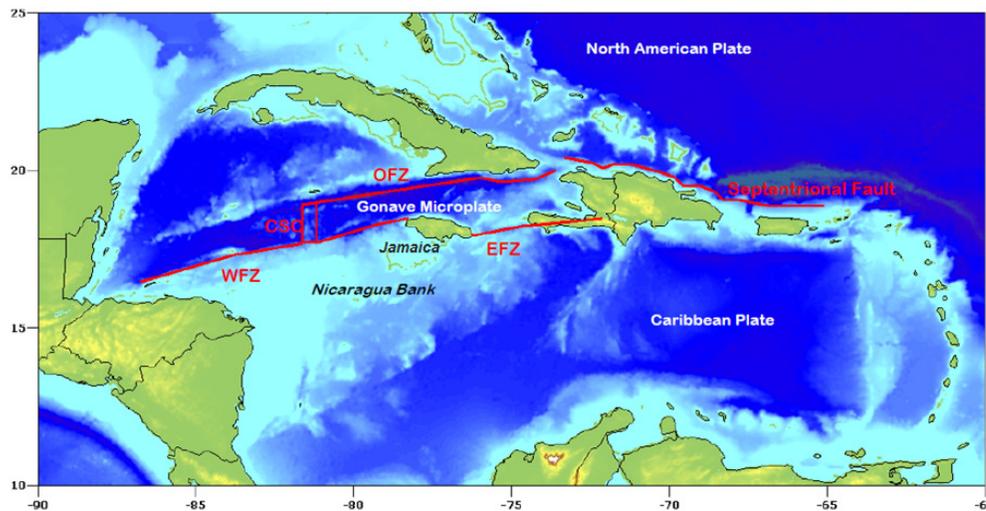


Figura 3.2 – Sismotectônica da Jamaica (ERN, 2009).

Cerca de 200 sismos acontecem anualmente na Jamaica e redondezas, a maioria dos quais com magnitude $M_w \leq 4$, porém outros de grande intensidade que causaram sérios danos, conforme lista histórica da tabela 3.3.

3.6 Curva de ameaça sísmica no sítio de interesse

3.6.1 Catálogos, padronização de magnitudes e depuração de eventos

Uma análise de ameaça sísmica tem como objetivo principal a determinação da curva de ameaça sísmica que indica para o local de interesse a probabilidade de excedência de um parâmetro de movimento do terreno (geralmente a aceleração de pico PGA no substrato rochoso) em um dado intervalo de tempo.

Nesta dissertação efetuou-se uma análise probabilística da ameaça sísmica, conforme procedimentos descritos anteriormente, considerando-se um tempo de vida útil da barragem de rejeitos $t = 50$ anos e probabilidade de excedência de 10% para um correspondente período de retorno de 475 anos.

Tabela 3.3 – Terremotos de grande intensidade na Jamaica
(<http://www.mona.uwi.edu/earthquake/equakedata.php>).

Data	Intensidade EMS-98	Localidades danificadas	Danos observados
1667	VIII	-	Deslizamentos
1/5/1688	VII	Port Royal	Casas e navios
7/6/1692	X	Port Royal, Kingston e Vere Plains, mas sentido em toda a ilha	3000 mortes, colapso de edifícios, liquefação, subsidência, deslizamentos e água ejetada.
3/9/1771	VII	Port Royal, Kingston	Estruturas danificadas
11/11/1812	VIII	Kingston	Muitas pessoas mortas, queda de paredes, edifícios danificados.
10/4/1824	VII	Kingston, Spanish Town, St. Catherine, Old Harbour, Clarendon	Um som forte acompanhou o tremor, algumas casas caíram.
5/11/1839	VII	Montego Bay, St. James	O edifício do governo foi declarado não seguro devido aos danos.
14/01/1907	IX	Kingston, Port Royal	1.000 mortes, incêndios em 56 acres, queda da maioria dos edifícios, colapso da rede de água, deslizamentos, tsunami local, destruição quase total – prejuízo estimado de 2 milhões de libras esterlinas.
3/08/1914	VII	Leste da Jamaica	Edifícios rachados, portas e janelas fora de prumo, relógios pararam.
15/07/1943	VII	St. Elizabeth	Deslizamentos, pessoas desabrigadas, queda de mercadorias em lojas.
1/05/1957	VIII	Montego Bay, St. James, mas sentido também em toda a ilha	4 mortes, deslizamentos, pontes danificadas, rotação de torres e monumentos, alagamentos, postes e linhas de transmissão de energia rompidas, queda de objetos de estantes.
13/01/1993	VII	Kingston e St. Andrew, mas sentido também em toda a ilha	2 mortes, queda e quebra de objetos, muitas pessoas feridas, mobiliário pesado deslocado, alagamentos, danos estruturais.
12/6/2005	VII	Jamaica central – sentido fortemente em Aenon Town, Clarendon, Silent Hill, Manchester, Wait-a-bit, Lemon Walk, Trelawny	Estruturas vulneráveis danificadas, pessoas enterradas sob escombros, queda de objetos.

EMS-98 = Escala Macrossísmica Europeia (Anexo 1).

A amplificação das vibrações sísmicas pelo efeito das camadas de solo localizadas entre o substrato rochoso e a base da geoestrutura será posteriormente levada em conta no estudo numérico do comportamento sísmico da barragem de rejeitos, assunto do próximo capítulo.

Os eventos sísmicos considerados na presente pesquisa foram obtidos do IRIS – *Incorporated Research Institutions for Seismology* e a USGS – *U.S. Geological Survey*, principalmente, complementados com os dados históricos disponíveis nas pesquisas de Tomblin e Robson (1977), catálogo apresentado no Anexo 2, e Shepherd e Aspinall (1980).

Todas as magnitudes reportadas foram convertidas para o padrão de magnitude de momento M_w (Tabela 3.4). A conversão das magnitudes M_L e M_C foi feita com correlações sugeridas para a Jamaica no documento *Preliminary results from the new Jamaica seismograph network* de Wiggins-Grandison (2001), enquanto que a conversão das magnitudes M_S e m_b foram feitas com correlações padrão recomendadas no estudo *Empirical global relations converting M_s and m_b to moment magnitude* de Scordilis (2006).

Tabela 3.4 – Relações de conversão de magnitude usadas neste estudo.

Magnitude	Faixa de magnitude	Correlação	Referência
M_L	-	$M_w = 0,81M_L + 0,66$ $r^2 = 0,97$	Wiggins-Grandison (2001)
M_c	-	$M_w = 0,92M_c - 0,05$ $r^2 = 0,87$	Wiggins-Grandison (2001)
M_s	$3,0 \leq M_s \leq 6,1$	$M_w = 0,67(\pm 0,005)M_s + 2,07(\pm 0,03)$, $r^2 = 0,77, \sigma = 0,17, n = 23.921$	Scordilis (2006)
M_s	$6,2 \leq M_s \leq 8,2$	$M_w = 0,99(\pm 0,02)M_s + 0,08(\pm 0,13)$, $r^2 = 0,81, \sigma = 0,20, n = 2.382$	Scordilis (2006)
m_b	$3,5 \leq m_b \leq 6,2$	$M_w = 0,85(\pm 0,04)m_b + 1,03(\pm 0,23)$, $r^2 = 0,53, \sigma = 0,29, n = 39.784$	Scordilis (2006)

M_c = magnitude de duração do terremoto

Os dados dos catálogos sísmicos utilizados foram previamente depurados para assegurar que os mesmos sejam estaticamente independentes (restrição da distribuição de Poisson) separando os eventos principais de suas réplicas (*aftershocks*).

Foi utilizado o método das janelas (van Stiphout *et al.*, 2011) no qual para eventos principais de magnitude M são identificadas suas réplicas, ou eventos precedentes, se estas ocorrerem dentro de certa janela de tempo $t(M)$ ou dentro de certa janela de distância $d(M)$. Eventos antecedentes são tratados do mesmo modo, i.e. no caso onde o evento principal acontece mais tarde na sequência de sismos. As seguintes equações foram usadas para definição do tamanho das janelas de espaço e de tempo.

$$d = e^{1,77+(0,037+1,02M)^{1/2}} [km] \quad (3.26)$$

$$t = \begin{cases} 10^{2,8+0,024M}, & M \geq 6,5 \\ e^{-3,95+(0,62+17,32M)^{1/2}}, & M < 6,5 \end{cases} [\text{dias}] \quad (3.27)$$

3.6.2 Fontes sismogênicas

Na região da Jamaica foram identificadas 13 fontes sismogênicas (ERN (2009), Shepherd e Aspinall (1980), USAID & OAS (2001), DeMets e Wiggins-Grandison (2007)). Na presente dissertação foram consideradas apenas as 7 mais próximas do sítio de interesse (tabela 3.5), que naturalmente apresentam uma maior influência nos resultados da estimativa da ameaça sísmica. A figura 3.3 apresenta a distribuição geográfica das fontes sismogênicas.

Tabela 3.5 – Fontes sismogênicas e seus parâmetros sísmicos.

j	Fonte Sismogênica	Sigla	Profundidad e média (km)	M_u	λ_j	β	M_0
1	Falhas do norte da Jamaica 1	JN1	11	6	0,506	1,346	3
2	Falhas do norte da Jamaica 2	JN2	11	6	0,505	1,348	3
3	Sistema de falhas Gonâve	GO	13	6,5	0,770	1,061	3
4	Sistema de falhas Jamaica centro	JC	13	6	1,040	1,243	3
5	Sistema de falhas Jamaica sul 1	JS1	12	6,3	0,490	1,214	3
6	Sistema de falhas Jamaica sul 2	JS2	12	7,8	0,749	1,281	3
7	Falhas Plantain Garden	PG	14	7	1,226	1,188	3

Os parâmetros sísmicos das fontes sismogênicas foram calculados seguindo a lei de Gutenberg-Richter (1944), através de regressões lineares com resultados de coeficientes de correlação superiores a 0,95 na maioria das fontes. No Anexo 3 os cálculos são apresentados.

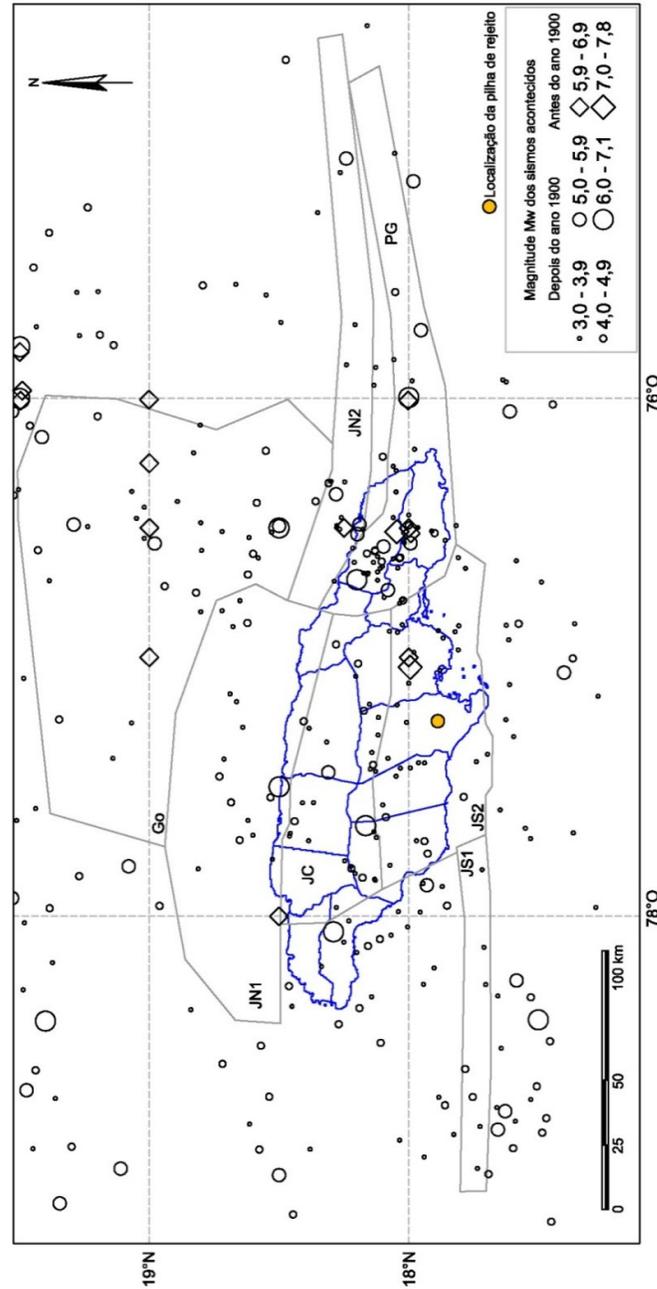


Figura 3.3 – Localização geográfica da barragem de rejeitos (círculo amarelo), fontes sismogênicas delimitadas pelas linhas claras e eventos sísmicos indicados pelos círculos, após depuração dos catálogos sísmicos.

3.6.3 Lei de atenuação

Dispondo de um modelo de ocorrência de eventos, formado pelo conjunto de fontes sismogênicas, e da localização geográfica do sítio de interesse, torna-se

necessário ainda estabelecer um modelo físico, mesmo que simplista, para relacionar a ocorrência do sismo com a probabilidade de ocorrência de um ou de vários parâmetros que descrevem o movimento do terreno. (Miranda *et al.*, 2006).

A Jamaica ainda não dispõe de uma lei de atenuação própria baseada na sismicidade regional, mas estudos recentes de ameaça sísmica (tabela 3.1) sugerem que para esta ilha a lei de atenuação proposta por Boore, Joyner e Fumal (1997) é aplicável. Por esta razão, neste trabalho foi utilizada esta lei de atenuação, desenvolvida com base nas medições de registros de aceleração na costa leste dos Estados Unidos, que define as acelerações espectrais como:

$$\ln(Sa(T)) = B_{IALL} + B_2(M - 6) + B_3(M - 6)^2 + B_5 \cdot \ln(r) + B_V \cdot \ln\left(\frac{V_s}{V_A}\right) \quad (3.28)$$

$$r = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2} \quad (3.29)$$

A variável $Sa(T)$ é a aceleração do movimento do solo (em relação à gravidade g), M é a magnitude de momento esperada, V_s uma velocidade média de propagação da onda S (m/s), V_A a velocidade de referência de onda S (m/s) medida de ensaios *downhole* feitos em solos classe A e, r_{jb} é a distância horizontal (km) mais próxima, medida da estação à projeção da superfície de ruptura.

Existem duas abordagens principais para classificar um sítio em termos da velocidade das ondas de cisalhamento (V_S). A primeira consiste em usar o valor médio de V_S nos 30m superficiais do depósito – V_{30} – enquanto a segunda utiliza o valor médio de V_S em uma profundidade igual a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda S com período ou frequência especificada – $V_{efetiva}$.

Neste estudo utilizou-se a primeira abordagem (V_{30}) considerando que a velocidade média próxima à superfície é de 620 m/s de acordo com a tabela 3.6. De acordo com a classificação da NEHRP (*National Earthquake Hazard Reduction Program*) este valor de velocidade corresponde a um material da classe tipo C – rocha mole (tabela 3.7). No sítio de interesse, o substrato rochoso é formado por calcário cujo topo está situado a 15,2m abaixo da superfície.

Tabela 3.6 – Parâmetros de crosta para a Califórnia (Atkinson, 2001; Boore e Joyner, 1997) e para Jamaica (Wiggins-Grandison e Havskov, 2004).

Parâmetros	Jamaica	Califórnia
V_S próximo à superfície (km/s)	0,62	0,62
V_S próximo à fonte (km/s)	3,80	3,50
Massa específica próxima à fonte (g/cm^3)	2,87	2,80
Atenuação sísmica ($\sqrt{\rho\beta}$)	3,30	3,13
Profundidade h da fonte (km)	10	15

Tabela 3.7 – Classificação de solos e correspondentes valores de V_{30} de acordo com o NEHRP (adaptado de Bozorgnia e Campbell, 2004).

Classe	Descrição	V_{30} (m/s)
A	Rocha dura	≥ 1500
B	Rocha	760 – 1500
C	Solo muito denso e rocha mole	360 – 760

Os valores dos coeficientes B_{IALL} , B_2 , B_3 , B_5 , B_V , V_A , h (km) e do desvio padrão estão listados na tabela 3.7. Note-se que h (eq. 3.29 e tabela 3.8) é uma profundidade fictícia obtida por regressão.

Tabela 3.8 – Parâmetros da lei de atenuação proposta por Boore, Joyner e Fumal (1997).

T (s)	B_{IALL}	B_2	B_3	B_5	B_V	V_A (m/s)	h (km)	σ_{Iny}
PGA	-0,242	0,527	0	-0,778	-0,371	1396	5,57	0,495
0,10	1,059	0,753	-0,226	-0,934	-0,212	1112	6,27	0,460
0,15	1,204	0,702	-0,228	-0,937	-0,238	1820	7,23	0,464
0,20	1,089	0,711	-0,207	-0,924	-0,292	2118	7,02	0,470
0,30	0,7	0,769	-0,161	-0,893	-0,401	2133	5,94	0,484
0,50	-0,025	0,884	-0,09	-0,846	-0,553	1782	4,13	0,514
1,00	-1,08	1,036	-0,032	-0,798	-0,698	1406	2,9	0,569
1,50	-1,55	1,085	-0,044	-0,796	-0,704	1479	3,92	0,601
2,00	-1,743	1,085	-0,085	-0,812	-0,655	1795	5,85	0,622

3.6.4 Curva de ameaça sísmica

Nos catálogos sísmicos já depurados foram impostos um limite inferior de magnitude $M_0 = 3$ e um limite superior de magnitude M_u variável de acordo com a fonte sismogênica considerada, conforme tabela 3.4. Definidas as fontes sismogênicas, seus parâmetros e a lei de atenuação, então uma avaliação probabilística de ameaça sísmica foi feita com auxílio do programa de computador CRISIS 2007, desenvolvido por Ordaz *et al.* (2007), Obtendo-se a curva de ameaça sísmica, apresentada nas figuras 3.4 e 4.5, e o espectro de projeto apresentado na figuras 3.6 e tabela 3.9.

O CRISIS faz uma subdivisão das fontes sísmicas originais em sub-fontes conformadas por elementos triangulares. Uma vez feita a subdivisão o programa atribuí num ponto toda a sismicidade correspondente à sub-fonte, finalmente uma integração espacial das contribuições de todas as sub-fontes é feita.

A figura 3.4 apresenta a curva de ameaça sísmica em função da taxa de excedência das acelerações enquanto, que a figura 3.5 apresenta a curva de ameaça sísmica em função da probabilidade de excedencia em 50 anos de tempo de vida da barragem de rejeitos, ambas as curvas para o período $T = 0$, ao nível do substrato rochoso.

A figura 3.6 e tabela 3.9 mostram o espectro uniformemente provável de resposta das acelerações, admitindo um período de retorno de 475 anos, isto é considerando 10% de probabilidade de excedencia em uma vida útil da barragem de rejeitos de 50 anos. A geração do espectro de acelerações envolveu a obtenção de curvas de ameaça sísmica para os diferentes períodos espectrais listados na tabela 3.8.

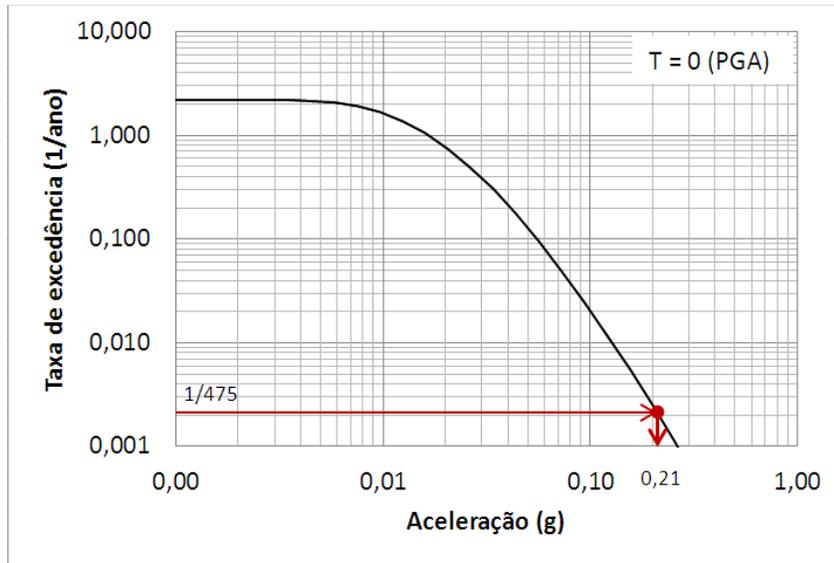


Figura 3.4 – Curva de ameaça sísmica para a zona do projeto em função da taxa de excedência das acelerações.

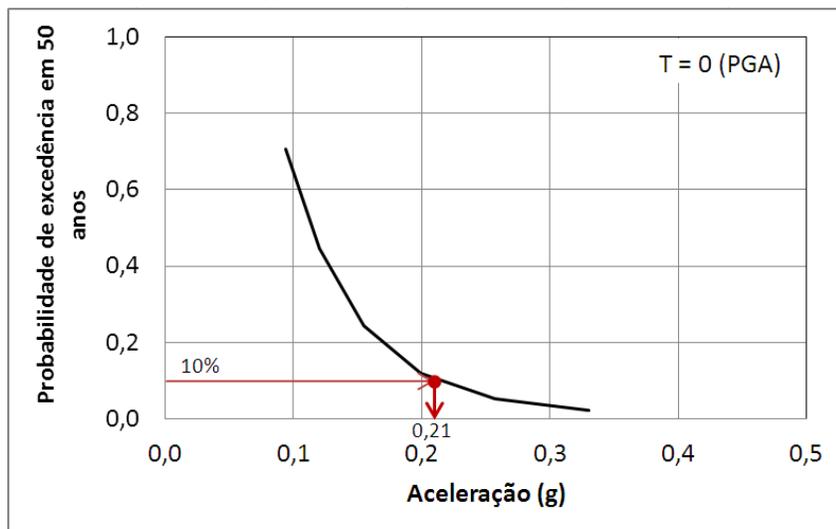


Figura 3.5 – Curva de ameaça sísmica para a zona do projeto em função da probabilidade de excedência das acelerações em 50 anos.

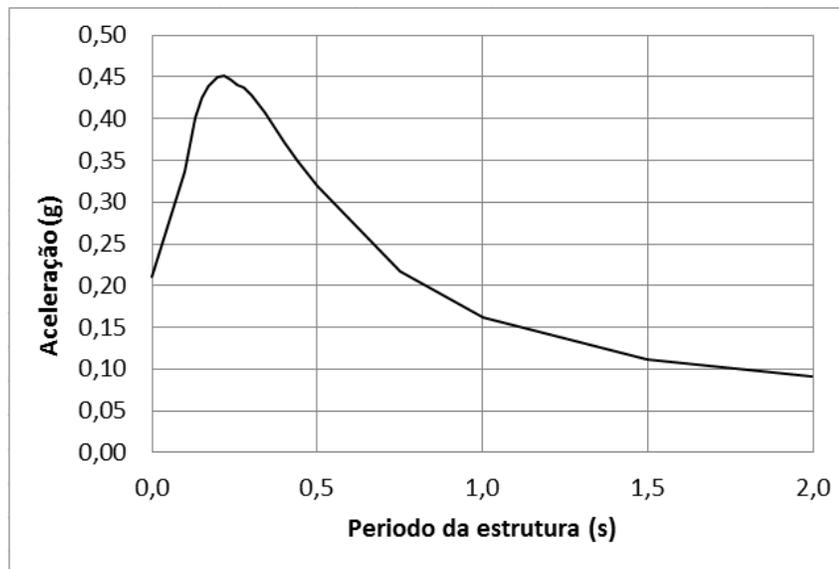


Figura 3.6 – Espectro uniformemente provável de resposta das acelerações para um período de retorno de 475 anos e vida útil de 50 anos.

Tabela 3.9 – Acelerações espectrais e de pico no embasamento rochoso determinados para um período de retorno de 475 anos e vida útil de 50 anos.

Acelerações espectrais (g) para diferentes períodos da estrutura (s)								
PGA	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	1,00	1,50	2,00
0,21	0,34	0,43	0,45	0,43	0,32	0,16	0,11	0,09