

Intensidades
sísmicas
de terremotos:
formulação de
cenários sísmicos
no Brasil

The background of the entire page is an abstract, geometric landscape rendered in various shades of orange and red. The shapes are angular and layered, creating a sense of depth and texture, reminiscent of a stylized mountain range or a rugged terrain. The colors transition from a deep, dark red in the foreground and some mountain peaks to a lighter, more vibrant orange in the sky and some of the mid-ground elements.

AFONSO EMIDIO DE VASCONCELOS LOPES
LUCIANA CABRAL NUNES

**AFONSO EMIDIO
DE VASCONCELOS
LOPES** é professor de
Geofísica/Sismologia
do Instituto de
Astronomia,
Geofísica e Ciências
Atmosféricas da USP.

**LUCIANA CABRAL
NUNES** é consultora
independente em
geologia.

RESUMO

O nível de atividade sísmica no Brasil é classificado como baixo, com ocorrência média de menos de dois sismos com magnitudes maiores que 4 m_b por ano, um sismo com magnitude maior que 5 m_b a cada seis anos, e um sismo de magnitude 6 m_b a cada 45 anos. Mesmo com frequência muito baixa, não é impossível a ocorrência de sismos com magnitudes de até 7,5 m_b , sendo que, nesse caso, o período de recorrência desse tipo de evento no Brasil é em torno de 885 anos. Neste trabalho iremos explorar a elaboração de cenários sísmicos considerando eventos com magnitudes comuns ($m \leq 5$), moderadas ($5 < m \leq 6$) e grandes ($6 < m \leq 7,5$). Para satisfazer a curiosidade das pessoas e ajudar a entender a grandeza dos eventos sísmicos, também serão mostrados cenários sísmicos para eventos com magnitudes improváveis e extremas (maiores que 8 M_w) sobre regiões densamente povoadas e com um grande número de obras importantes, como usinas hidrelétricas, nucleares e grandes fábricas.

Palavras-chave: terremotos, cenários sísmicos, Brasil.

ABSTRACT

The level of seismic activity in Brazil is classified as low, and it has been calculated that the average recurrences are: less than 2 seismic events of over 4 m_b magnitude every year, one seismic event of over 5.0 m_b magnitude every six years, and one seismic event of 6.0 magnitude every 45 years. Despite the very low recurrence, seismic events of magnitudes up to 7.6 m_b are possible, and in that case, their recurrence interval in Brazil is of around 885 years. In this work we will explore the elaboration of seismic scenarios, taking into account events with light magnitudes ($m \leq 5$), moderate ($5 < m \leq 6$) and strong ($6 < m \leq 7.5$). To satisfy people's curiosity and help them understand the extent of seismic events, we will also show seismic scenarios for events with extreme and improbable magnitudes (over 8 MW) in highly populated regions with a big number of important buildings, such as dams, nuclear plants and big factories.

Keywords: earthquakes, seismic scenarios, Brazil.

Com a proximidade da Copa do Mundo de 2014 e dos Jogos Olímpicos de 2016 a serem realizados no Brasil, a Defesa Civil Nacional e as defesas civis estaduais começaram a estudar os planos de emergência para diferentes tipos de cenários inesperados, como a ocorrência de problemas meteorológicos, sociais, e até mesmo terremotos. Uma das questões levantadas pela Defesa Civil do Estado de São Paulo, por exemplo, é qual seria o cenário e o que fazer no caso da ocorrência de um evento sísmico de magnitude moderada na capital de São Paulo no momento em que estivesse ocorrendo um jogo da Copa do Mundo. Trata-se de uma questão hipotética improvável, mas que certamente deve ser considerada em um bom planejamento estratégico.

Ao mesmo tempo, a população como um todo costuma questionar qual é a magnitude de um sismo que pode derrubar uma casa, e o que ocorreria no Brasil se o país sofresse um terremoto como o do Japão. No primeiro caso a pergunta é válida e deve ser explorada, enquanto no segundo caso o cenário é impossível, visto que não há falhas geológicas no Brasil com dimensões suficientes para gerar um terremoto como o do Japão. Por outro lado, mesmo sendo impossível a ocorrência de um sismo com magnitude 8 M_w no Brasil, é conveniente mostrar o cenário sísmico correspondente, pois ajuda a população a ter uma ideia da grandeza dos fenômenos sísmicos sobre a superfície.

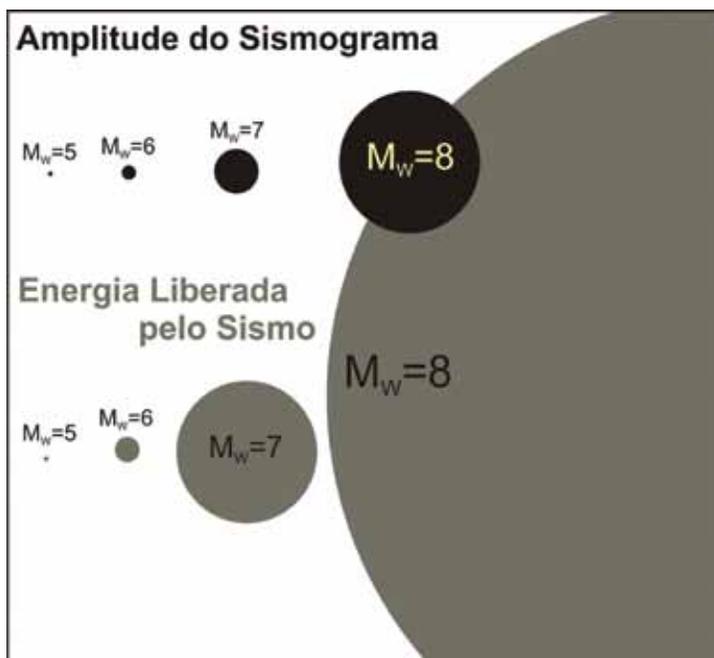
Dentro dessa perspectiva, neste trabalho iremos explorar os cenários sísmicos das mais diversas magnitudes e intensidades, indo desde sismos com magnitudes comuns até com magnitudes extremas, com foco na cidade de São Paulo e em estados das

regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, onde está concentrado o maior número de hidrelétricas, fábricas de processamento e usinas nucleares do país.

A intensidade sísmica representa a forma como um determinado tremor de terra é sentido na superfície, e é a maneira mais antiga de se buscar informações sobre os terremotos. Trata-se de uma escala qualitativa e bastante subjetiva que depende muito das perguntas do entrevistador e da qualidade das observações anotadas. Um dos problemas na determinação da intensidade sísmica é que o sismólogo deve sempre tentar remover o efeito das emoções das pessoas que sentiram o evento sísmico, e isso é feito com perguntas simples e diretas como “Algum objeto sobre a mesa sofreu movimentação? Você viu o lustre balançando? Você estava de pé ou deitado no momento do sismo?”.

FIGURA 1

Exemplificação de como varia o tamanho (círculos pretos) e a energia liberada (círculos cinza) pelos terremotos para diferentes valores de magnitudes. A área referente ao sismo de magnitude 5 M_w é igual nos dois casos, e as áreas dos sismos de magnitudes 6, 7 e 8 M_w são dadas em função da área do sismo de magnitude 5 M_w



Neste trabalho iremos adotar a escala de intensidade Mercalli Modificada (MM), que é a mais utilizada nos países americanos, porém existem outras escalas, como a EMS-98 (*European Macroseismic Scale*), adotada pela União Europeia, e a JMA (*Japan Meteorological Agency seismic intensity scale*), adotada no Japão e parte da Ásia. As equações de atenuação das intensidades sísmicas mais adequadas a grande parte do Brasil também são mostradas, e foram determinadas para regiões tectonicamente estáveis (centro-leste dos Estados Unidos e região central do Canadá).

MAGNITUDE E INTENSIDADE SÍSMICA

A “força” dos terremotos é medida com duas escalas distintas, que são as escalas de magnitude e de intensidade. A magnitude de um tremor de terra é um valor que mostra o quanto um sismo é maior que outro. Para se ter uma ideia, um sismo de magnitude 5 m_b é dez vezes maior que um sismo de magnitude 4 m_b e cem vezes maior que um sismo de magnitude 3 m_b , ou seja, para cada aumento de uma unidade no valor da magnitude, o tamanho do sismo (forma como ele vibra o chão) aumenta em dez vezes. A magnitude de um tremor de terra também pode ser relacionada de forma empírica à energia liberada pelo mesmo, mas, nesse caso, para cada aumento de uma unidade no valor da magnitude, a energia do sismo aumenta em 33 vezes. Dessa forma, um sismo de magnitude 5 m_b libera mil vezes mais energia que um sismo de magnitude 3 m_b . A Figura 1 ilustra na forma de áreas de círculos como ocorre o crescimento do tamanho dos terremotos e da energia sísmica liberada.

A intensidade sísmica é um parâmetro que representa os efeitos e danos produzidos pelos terremotos (veja Tabela 1) na superfície da Terra. Embora haja algumas escalas de intensidades sísmicas, a mais comum no Ocidente é a escala Mercalli Modificada (MM), que é dada em algarismos romanos

TABELA 1
Escala de Intensidade Mercalli Modificada

Intensidade Mercalli Modificada	Aceleração (%g)	Descrição do nível de intensidade
I [Imperceptível]	-	Não sentido, exceto em condições extremamente favoráveis. Leves efeitos de período longo de terremotos grandes e distantes. Registrado ("sentido") apenas pelos sismógrafos.
II [Muito fraco]	< 0,3	Sentido apenas por algumas pessoas, especialmente em prédios altos. Objetos leves podem balançar.
III [Fraco]	0,4 – 0,8	Sentido por algumas pessoas em casa, especialmente em prédios altos. Alguns objetos pendurados oscilam. Vibração parecida com a da passagem de um caminhão leve. Duração estimada. Pode não ser reconhecido como um abalo sísmico.
IV [Moderado]	0,8 – 1,5	Sentido em casa por muitas pessoas, e na rua por poucas pessoas durante o dia. À noite algumas pessoas despertam. Pratos, janelas e portas vibram, e as paredes podem ranger. Os carros e motos parados balançam visivelmente. A vibração é semelhante à provocada pela passagem de veículos pesados ou à sensação de uma pancada de uma bola pesada nas paredes.
V [Forte]	1,5 – 4	Sentido por praticamente todas as pessoas; muitos despertam. As pessoas conseguem identificar a direção do movimento. Líquido em recipiente é perturbado. Objetos pequenos e instáveis são deslocados. Portas oscilam, fecham, abrem. Os movimentos de pêndulos podem parar.
VI [Forte]	4 – 8	Sentido por todas as pessoas; muitos se amedrontam e saem às ruas. Pessoas andam sem firmeza. Algumas mobílias pesadas podem se movimentar. Louças e alguns vidros de janelas são quebrados. Objetos e livros caem de prateleiras. Observação de danos moderados em estruturas civis de má qualidade. Pequenos sinos tocam em igrejas e escolas.
VII [Muito Forte]	8 – 15	Efeitos sentidos por pessoas que estão dirigindo automóveis. Difícil manter-se de pé. Móveis são quebrados. Danos pequenos em edifícios bem construídos, danos moderados em casas bem construídas, e danos consideráveis em estruturas mal construídas. Algumas chaminés sofrem colapso. Queda de reboco, ladrilhos e tijolos mal assentados. Ondas em piscinas. Pequenos escorregamentos de barrancos arenosos. As águas dos açudes ficam turvas com a movimentação do lodo. Grandes sinos tocam.
VIII [Muito Forte]	15 – 30	Danos em construções normais, com colapso parcial. Algum dano em construções reforçadas. Queda de estuque e alguns muros de alvenaria. Queda de chaminés, monumentos, torres e caixas d'água. Galhos quebram-se das árvores. Trincas no chão. Afeta a condução dos automóveis. A mobília pesada sofre movimentações e pode virar. Mudanças nos fluxos ou nas temperaturas das fontes e poços.
IX [Muito Forte]	30 – 60	Pânico generalizado. Construções comuns bastante danificadas, às vezes colapso total. Danos em construções reforçadas e em grandes edifícios, com colapso parcial. Alguns edifícios são deslocados para fora de suas fundações. Tubulação subterrânea quebrada. Rachaduras visíveis no solo.
X [Catastrófico]	60 – 100	Maioria das construções destruídas até nas fundações. Danos sérios a barragens e diques. Grandes escorregamentos de terra. Água jogada nas margens de rios e canais. Trilhos levemente entortados.
XI [Catastrófico]	100 – 200	Poucas estruturas de alvenaria não colapsam totalmente. Pontes são destruídas e os trilhos dos trens são completamente entortados. As tubulações subterrâneas são completamente destruídas.
XII [Catastrófico]	> 200	Destruição quase total. A paisagem é modificada com a topografia sendo distorcida. Grandes blocos de rocha são deslocados. Objetos são jogados ao ar. Essa intensidade nunca foi observada no período histórico.

Fonte: adaptado de Assumpção & Dias Neto, 2000

no intervalo de I a XII, sendo que I é a intensidade dada aos locais em que o sismo não foi sentido, e XII é a intensidade que poderia ser dada a efeitos cataclísmicos, como mudança de topografia, desvio de cursos de rios, entre outros efeitos devastadores. Em tempos históricos, nunca foi observado um sismo que tenha provocado intensidade XII na superfície da Terra.

A Escala de Intensidade Mercalli foi elaborada em 1902 pelo vulcanólogo e sismólogo italiano Giuseppe Mercalli, e foi revisada em 1956 por Charles Richter (daí, modificada).

Embora a escala de intensidade seja qualitativa e mais passível de erro do que a escala de magnitude, que é quantitativa, ela é a forma mais antiga de se medir os terremotos. Trata-se de uma forma simples de descrever os efeitos dos sismos sobre pessoas (como as pessoas sentiram o abalo), em objetos e construções (barulho e queda de objetos, trincas ou rachaduras em casas, etc.) e na natureza (movimento de água, escorregamentos, liquefação de solos arenosos, mudanças na topografia, etc.).

A intensidade sísmica depende simultaneamente de pelo menos cinco fatores principais, que são:

- 1) a magnitude do tremor de terra: eventos com magnitudes grandes (por exemplo, 7 M_w) têm maior potencial de destruição do que eventos com magnitudes pequenas (por exemplo, 3 M_w);
- 2) a distância entre o evento e o local de interesse, também chamada de distância epicentral: com o aumento da distância epicentral os percursos das ondas sísmicas também aumentam, fazendo com que a energia dessas ondas seja diluída devido ao espalhamento geométrico delas e parcialmente perdida na forma de calor devido às imperfeições dos minerais das rochas por onde as ondas se propagam;
- 3) a profundidade do foco do sismo: com o aumento da profundidade do foco, também conhecida como profundidade focal, as ondas percorrem distâncias maiores até chegarem à superfície, acarretando diminuição da energia sísmica devido aos

mesmos efeitos citados anteriormente;

4) tipo de região tectônica e de suas rochas: a atenuação inelástica das ondas sísmicas ocorre devido à transformação da energia elástica em calor. Isso ocorre por diferentes motivos, indo desde as imperfeições dos minerais das rochas até o calor e as tensões a que as rochas de uma determinada região estão submetidas. Junto ao processo de perda de energia elástica, também temos os processos de atenuação elástica da energia sísmica, citada anteriormente. Sabe-se que regiões de borda de placas litosféricas, como a Califórnia, nos Estados Unidos, atenuam mais a energia das ondas sísmicas do que regiões tectonicamente estáveis como o Brasil. Por isso, é aconselhado o uso de leis de atenuação das ondas sísmicas apropriadas para cada tipo região de estudo;

5) a “qualidade” do terreno onde o tremor de terra é sentido: casas e prédios localizados sobre rocha dura, ou com alicerces nesse tipo de rocha, sofrem menos com as vibrações produzidas pelos terremotos do que casas e demais estruturas localizadas sobre solo. Uma pequena camada de solo com poucas dezenas de metros de espessura pode amplificar as vibrações produzidas pelos terremotos em até três vezes, sendo um fenômeno crítico na seleção dos locais de obras importantes.

A estrutura da escala MM é linear, e o intervalo de intensidade de I a V é pouco relevante em termos de risco sísmico. Em torno de 90% de todos os danos provocados por tremores de terra correspondem a áreas afetadas com intensidades VI, VII e VIII, que produzem acelerações horizontais entre 0,05g e 0,30g cm/seg.

A grande variação de intensidades observadas em bacias sedimentares mostra que, além da magnitude, distância e profundidade do tremor de terra, a intensidade depende dos efeitos de amplificação local, que depende exclusivamente da geologia superficial no entorno do local de interesse. Esse fator de amplificação local das vibrações sísmicas pode ser medido com um sismógrafo usando as vibrações sísmicas ambientais, como

demonstrado em estudos de microzonificação sísmica de grandes cidades com o Método de Nakamura (Gutierrez & Singh, 1992; Lanchet et al., 1996; Improta et al., 2005; Badrane et al., 2006; Fergany & Bonnefoy-Claudet, 2009).

Embora não haja uma relação direta e simples entre os vários parâmetros que relacionam a intensidade sísmica à magnitude e distância hipocentral dos sismos, Campbel (1982) e Toro et al. (1997) elaboraram relações empíricas entre esses parâmetros, denominadas “lei de atenuação de intensidade sísmica”. No caso desses dois trabalhos citados, essas funções empíricas são válidas para as regiões central e leste dos Estados Unidos, e atualmente ainda são as melhores funções a serem usadas no Brasil, visto a semelhança tectônica de ambas as regiões.

Dessa forma, para calcular o nível de aceleração que pode ser provocada nas partículas do terreno em um determinado local de interesse pelo sismo de projeto ou outros sismos, pode-se utilizar as funções de atenuação da amplitude máxima da aceleração do chão (*Peak Ground Acceleration*, PGA) das vibrações sísmicas em função da distância epicentral e magnitude do evento.

As equações citadas de Campbel (1982) são:

$$I_{MM} = 2m_b - 0,3 - 0,0011D - 1,17(\ln D) \quad (1)$$

$$\ln(a_h) = 1,05 - 0,158 m_b + 0,63 I_{MM} \quad (2)$$

onde I_{MM} é a intensidade na Escala Mercalli Modificada, D é a distância epicentral em quilômetros, m_b é a magnitude e a_h é a aceleração horizontal.

A equação de Toro et al. (1997) é dada por:

$$\ln Y = 2,07 + 1,2(m-6) - 1,28[\ln(r_m)] + 0,05 \max[\ln(r_m/100), 0] - 0,0018(r_m) \quad (3),$$

em que Y é a máxima aceleração horizontal (em unidades de g , com $g = 9,8 \text{ m/s}^2$), e:

$$r_m = (r^2 + 86,49)^{1/2} \quad (4).$$

r = distância epicentral em km

De acordo com Bender e Perkins (1987), a incerteza nas equações de Toro et al. (1997) pode subestimar os valores do risco sísmico, e por isso pode-se considerar adicionalmente um fator de correção de 1,5 para os valores de PGA.

PERIGO E RISCO SÍSMICO

O perigo sísmico varia de região para região da Terra, e representa o quanto uma determinada área é perigosa do ponto de vista sismológico. Por outro lado, o risco sísmico é um parâmetro definido pelo homem, visto que o mesmo é dado de forma geral pela equação abaixo:

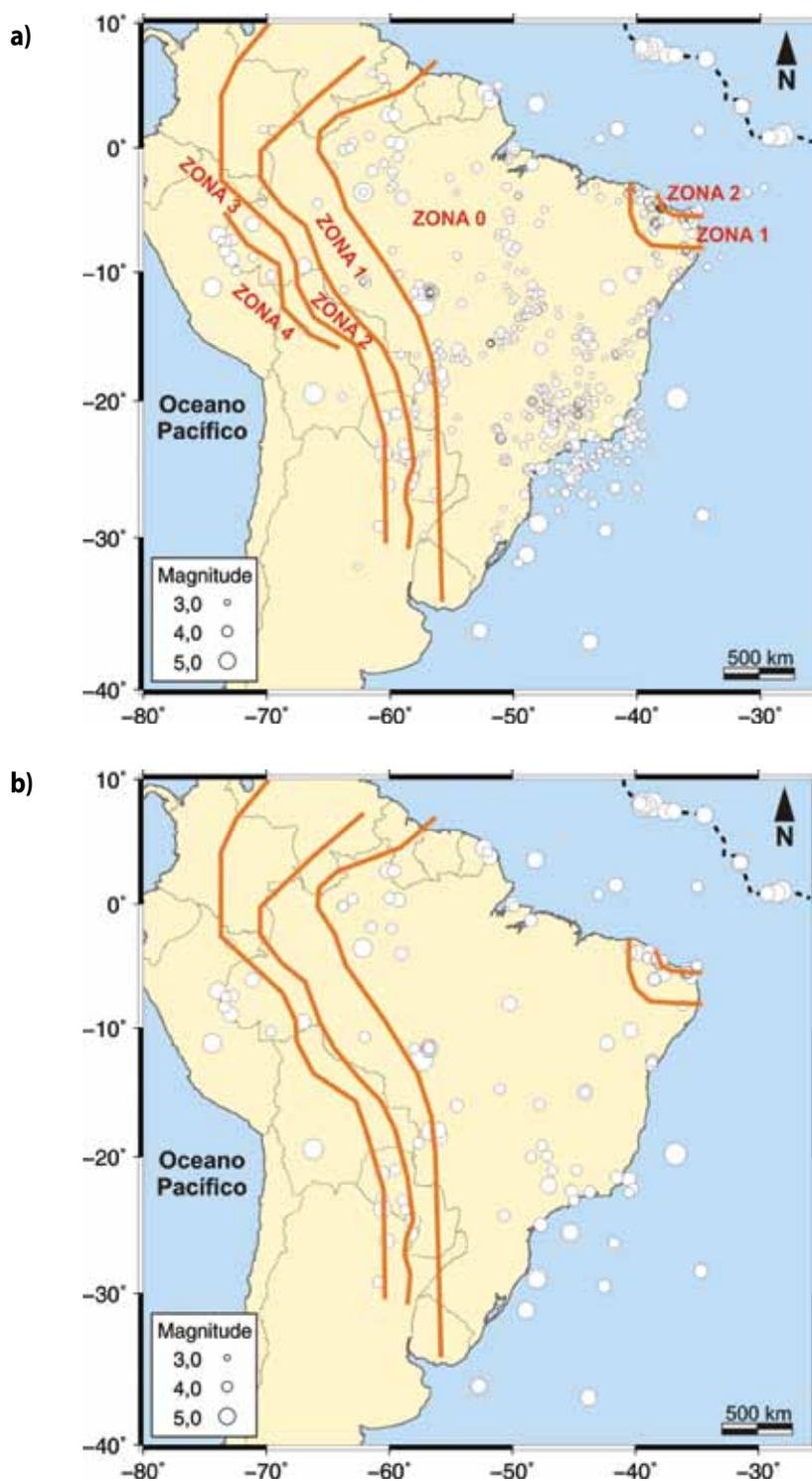
Risco sísmico = perigo sísmico x vulnerabilidade sísmica.

O perigo sísmico depende das características sísmicas da região e do tempo de exposição, enquanto o risco sísmico depende do perigo sísmico e da vulnerabilidade das construções. Dessa forma, se todas as hidrelétricas do mundo devem ter um risco sísmico dentro de valores aceitáveis, devemos alterar a vulnerabilidade sísmica de região para região. Com isso, em um país com um grande perigo sísmico como o Chile, as obras devem ser reforçadas para diminuir a vulnerabilidade sísmica com o objetivo de posicionar o risco dentro de padrões aceitos mundialmente.

Como mostrado por Lopes (2010), a avaliação de risco sísmico no Brasil vem se tornando popular para grandes obras como hidrelétricas, barragens de rejeito e grandes fábricas de nanotecnologia, principalmente devido à internacionalização do país e à adequação das empresas brasileiras a padrões internacionais. Embora o Brasil tenha uma norma sísmica relativamente adequada (ABNT, 2006), ela não respeita os padrões observados na sismicidade brasileira, tendo sido elaborada com base em um mapa de risco sísmico mundial.

A Figura 2 mostra a zonificação sísmica do Brasil segundo a norma ABNT NBR 15.421 (ABNT, 2006) sobreposta aos mapas

FIGURA 2
Mapa de sismicidade do Brasil



Fonte: Boletim Sísmico Brasileiro, IAG-USP, 2010.

Os epicentros dos sismos são representados pelos círculos, e os limites sugeridos de perigo sísmico pela norma brasileira ABNT NBR 15.421, pelas linhas laranja.

a) sismos rasos (profundidade menor que 30 km) com magnitude maior que 3 m_b ;

b) sismos rasos com magnitude maior que 4 m_b .

de sismicidade do país com os sismos de magnitudes maiores que $3 m_b$ e $4 m_b$. Pela norma da ABNT a Zona 0 tem o menor perigo sísmico e a Zona 4, o maior perigo, porém, pode-se observar na Figura 2 que os maiores sismos ocorridos no Brasil se encontram na Zona 0, enquanto o estado do Acre, que é atingido principalmente por sismos profundos pouco intensos na superfície, está localizado na Zona 4, o que evidencia a falta de conhecimento que ainda temos sobre o perigo sísmico no Brasil. Isso deve mudar nos próximos cinco a dez anos, quando começarem a surgir os primeiros mapas de perigo sísmico para algumas regiões do Brasil.

Para concluir, é importante destacar que os estudos de perigo sísmico são realizados com métodos estatísticos que permitem estimar qual a probabilidade de um evento sísmico de uma determinada magnitude atingir uma obra de engenharia durante sua vida útil. Esse parâmetro é denominado “sismo de projeto”. No caso do estudo do perigo sísmico com o método determinístico, posteriormente a essa primeira análise estatística da atividade sísmica na região de influência sísmica (região definida pela distância de 300 milhas do local de interesse), a magnitude e as informações sobre o sismo de projeto são aplicadas às equações (1), (2) e (3) para estimar qual é a máxima aceleração sísmica que atingirá uma obra durante a sua vida útil.

CENÁRIOS SÍSMICOS

Tremores de terra de pequeno impacto

Todos os dias ocorrem pequenos tremores de terra no Brasil e no mundo. A maior parte desses tremores não é sentida pelas pessoas e só é registrada por sismógrafos localizados muito próximos aos epicentros desses eventos (distância em geral menor que 50 km). Como não temos

muitas estações sismográficas operando no Brasil, temos condições de detectar apenas os eventos sísmicos mais fortes, em geral com magnitudes maiores que $4 m_b$. Até o final de 2012 teremos uma rede sismográfica nacional instalada, e a partir de então iremos conseguir detectar todos os sismos com magnitude maior que $3,5 m_b$ ocorridos no Brasil, e a maior parte dos sismos com magnitudes maiores que $3 m_b$. Quanto aos sismos menores, iremos conseguir detectar apenas uma pequena fração deles, principalmente se tivermos “sorte” de colocar uma estação sismográfica próxima a uma região epicentral.

Embora esses tremores de terra com magnitudes pequenas sejam pouco sentidos, em alguns casos geram desconforto, como, por exemplo, na região de Bebedouro, SP (Assumpção et al., 2010), onde sismos com magnitudes próximas de $1 m_b$ são sentidos como vibrações sutis acompanhadas de um forte “barulho” vindo do chão. Esse desconforto com sismos pequenos pode ocorrer quando os eventos sísmicos são rasos, com profundidades focais entre 100 e 500 metros. Além disso, mesmo os tremores de terra pequenos podem gerar muito desconforto em regiões pouco sísmicas como o Brasil.

No caso de ocorrência de um sismo pequeno em uma grande metrópole, como São Paulo, ele seria pouco sentido durante o dia, principalmente devido ao elevado nível de vibrações artificiais existentes nessas regiões (por exemplo, caminhões, vibrações em estádios de futebol, passagem de aviões, etc.).

Tremores de terra com intensidades moderadas

Os tremores de terra classificados aqui como de intensidade moderada são eventos com magnitudes próximas de $5 m_b$ com intensidades entre IV e VMM, referentes a um sismo de magnitude $5,2 m_b$, ocorrido a 100 km de distância, ou um sismo de magnitude $6 m_b$, ocorrido a 300 km de distância. Esse

tipo de evento produz vibrações que podem chegar a 0,02 g de aceleração na componente horizontal e não representa perigo para barragens hidrelétricas (preparadas para suportar vibrações de até 0,05 g) ou para usinas nucleares (preparadas para suportar vibrações de até 0,10 g no Brasil).

Por outro lado, sismos de magnitudes moderadas podem ser sentidos a mais de 100 km de distância com intensidades moderadas, e podem gerar pânico em regiões como o Brasil, onde a população não se encontra preparada para lidar com esse tipo de evento. No caso de um evento de intensidade entre IV e VI MM ser sentido durante um jogo de futebol ou um *show*, por exemplo, o cenário sísmico seria de confusão, porém sem risco de colapso de estruturas importantes. Pode haver queda de objetos sobre pessoas em locais fechados e, eventualmente, atropelamentos de pessoas que corram diretamente para as ruas, como já observado no México em 2010.

Tremores de terra perigosos para grandes obras

Eventos sísmicos com magnitudes próximas de 6 m_b ocorridos a menos de 50 km de distância de uma grande obra têm potencial de destruição, gerando intensidades próximas de VII MM para uma distância de 50 km e VIII MM para uma distância de 25 km, correspondendo a acelerações horizontais médias de 0,07 g e 0,15 g, respectivamente. As barragens hidrelétricas no Brasil são preparadas para suportar acelerações sísmicas de até 0,05 g, e as usinas nucleares são preparadas para suportar vibrações de até 0,10 g.

Os dois maiores sismos ocorridos no Brasil tiveram magnitudes próximas de 6 (6,2 em Porto dos Gaúchos, em Mato Grosso, e 6,1 no Alto de Vitória Trindade, na porção oceânica perto do estado do Espírito Santo). Esse tipo de evento sísmico é raro no Brasil, e, considerando-se as dimensões do território brasileiro, é improvável que um sismo dessa magnitude afete uma grande

obra. Por outro lado, um evento “improvável” não deve ser considerado “impossível”, pois existe uma pequena possibilidade de ocorrer em qualquer região do país.

No caso da ocorrência de um sismo com magnitude 6 m_b com epicentro na cidade de São Paulo, podemos esperar o colapso de muitas estruturas que suportam acelerações sísmicas de até 0,02 g, como casas, por exemplo. Além disso, pode-se esperar histeria generalizada e problemas de abastecimento temporário. Pode haver queda de energia elétrica pontual, sendo pequeno o risco de colapso da rede de gás, o que poderia gerar incêndios espalhados pela cidade.

Mesmo sendo um sismo com período de recorrência superior a 45 anos no Brasil, esse evento deve ser considerado em planos de emergência sísmica, pois não há obras no país capazes de suportar esse tipo de abalo sísmico a pequenas distâncias epicentrais. Trata-se de um evento raro, que não deve necessariamente ser usado como sismo de projeto para grandes obras, mas vale reforçar que deve ser considerado na elaboração de cenários sísmicos, incluindo estimativas de isossistas para determinação do tamanho de área afetada e outros parâmetros importantes para o planejamento relacionado à Defesa Civil.

Terremotos de magnitudes extremas

Pode-se afirmar sem sombra de dúvidas que é *impossível* ocorrer um sismo de magnitude maior que 8 no Brasil. Esse tipo de evento em geral ocorre nos limites convergentes das placas litosféricas, como no Japão e no Chile. Por outro lado, muitas pessoas curiosas e repórteres insistem em perguntar o que ocorreria com determinada obra se um sismo de magnitude extrema ocorresse no Brasil.

Essa pergunta tem duas vertentes, uma especulativa e sensacionalista e outra educativa. A primeira vertente deve ser combatida com a educação da população

como um todo, a qual deve entender a impossibilidade de se romper uma placa litosférica gigante em poucos dias. Para termos um sismo de magnitude tão extrema, devemos ter uma falha geológica muito grande (com centenas de quilômetros de extensão), ativa (que está gerando tremores de terra constantes), e que sofra uma grande movimentação (muitos centímetros ou alguns metros). A segunda vertente, que é a educativa, é importante e pode ajudar as pessoas a entenderem a dimensão desse tipo de fenômeno, principalmente para compreender por que o mundo se mobiliza sempre que ocorre esse tipo de evento sísmico (por exemplo, Haiti, Chile e Japão). Algumas pessoas ainda hoje questionam por que o governo brasileiro ajuda esses países durante esse tipo de evento se aqui também temos tantos problemas relacionados a pobreza e falta de condições básicas, como saneamento básico.

Utilizando as equações (1), (2) e (3) mostradas anteriormente, podemos montar alguns cenários sísmicos, como, por exemplo, “O que aconteceria se ocorresse um sismo de magnitude $8 M_w$ no sul de Minas Gerais?”. Para se ter uma ideia, um sismo de magnitude 8, com profundidade focal de 20 km, poderia gerar intensidades de IX MM a 200 km de distância, e seria sentido por toda a população em um raio de 2.500 km de distância. Se um sismo como esse ocorresse no centro do Brasil, quase toda a população brasileira o sentiria. Além disso, um tremor de magnitude $8 M_w$ (menor que o ocorrido no Japão recentemente) afetaria/destruiria grande parte das barragens hidrelétricas e de rejeito em um raio maior que 400 km, o que, no Sudeste do Brasil, poderia representar dezenas de barragens. Pode-se dizer que um sismo dessa magnitude afetaria quase todos os tipos de obra em um raio de 500 km, e que nenhum governo ou país está preparado para um evento dessa magnitude em uma região intraplaca. A única coisa que podemos fazer no caso de um desastre natural desse porte é ser solidários e trabalhar para mitigar os danos posteriores provocados por incêndios e doenças.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O nível de atividade sísmica no Brasil é relativamente baixo, principalmente quando comparado ao de países vizinhos, porém não deve ser negligenciado nos projetos de grandes obras de engenharia. O mapa preliminar e regional do perigo sísmico no Brasil usado na norma brasileira ABNT NBR 15.421 (ABNT, 2006) é pouco representativo da atividade do perigo sísmico real no Brasil, e deve ser usado de forma limitada para grandes obras, as quais devem elaborar estudo de risco sísmico específico para o local da obra, e preferencialmente considerando-se o fator de amplificação sísmica causado pela camada de solo.

Os estudos de microzonificação sísmica, que estão apenas começando no Brasil, são importantes para melhorar o conhecimento dos efeitos sísmicos em diferentes regiões, e podem ser usados para a realização de estudos de cenários sísmicos mais realistas. Em grandes cidades como São Paulo e Rio de Janeiro, esse tipo de estudo pode ser muito importante, principalmente em áreas onde há grandes obras de engenharia e elevada densidade populacional.

Com relação aos cenários sísmicos, o que se pode dizer com certeza hoje é que os tremores de terra são imprevisíveis e podem ocorrer a qualquer momento e em qualquer lugar. A experiência de New Madrid, nos Estados Unidos, mostra que regiões como o Brasil, com baixo nível de atividade sísmica, podem ser atingidas a qualquer momento por um sismo devastador com magnitude maior que $7 M_w$. Por outro lado, é quase impossível uma região intraplaca como o Brasil ter um sismo com magnitude maior que $8 M_w$, sendo esse cenário considerado hipotético e de uso educativo para ilustrar os efeitos de um grande terremoto como os ocorridos no Japão ou no Chile recentemente.

A sismologia no Brasil vem ganhando força nos últimos anos com o apoio da Petróbras e de empresas de energia elétrica, sendo que a primeira vem realizando investimentos superiores a R\$ 20 milhões para a instalação

e manutenção da rede sismográfica nacional, dos quais R\$ 8 milhões vêm sendo utilizados pelo Grupo de Sismologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo e parceiros estratégicos como a Universidade de Brasí-

lia (DF), Universidade Federal dos Pampas (RS), Universidade Federal de Pelotas (RS), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (MS), Universidade Estadual Paulista (SP), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SP), entre outros.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimentos*. Norma Brasileira ABNT NBR 15.421, 2006.
- ASSUMPÇÃO, M.; YAMABE, T. H.; BARBOSA, J. R.; HAMZA, V.; LOPES, A. E. V. & BIANCHI, M. "Seismic Activity Triggered by Water Wells in the Paraná Basin", in *Brazil, Water Resources Research*, 46, W07527, 2010 (doi: 10.1029/2009WR008048).
- ASSUMPÇÃO, M. & DIAS NETO, C. M. "Sismicidade e Estrutura da Terra Sólida", in W. Teixeira; C. M. Toledo; T. R. Fairchild & F. Taioli. *Decifrando a Terra*. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.
- BADRANE, S.; BAHI, L.; JABOUR, N. & BRAHIM, A. I. "Seismic Site Effect Estimation in the City of Rabat (Morocco)", in *J. Geophys. Eng.*, 3, 2006, pp. 207-11 (doi: 10.1088/1742-2132/3/3/001).
- BENDER, B. & PERKINS, D. M. "Seisrisk III: a Computer Program for Seismic Hazard Estimation", in *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1987.
- BLAKE, A. "On the Estimation of Focal Depth from Macroseismic Data", in *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 31, 1941, pp. 225-32.
- CAMPBELL, K. W. "A Ground Motion Model for the Central United States Based on Near-source Acceleration Data", in J. E. Beavers (ed.). *Earthquakes and Earthquake Engineering-Eastern United States*. Michigan, Ann Arbor Science, 1, 1982, pp. 213-32.
- CARLETTI, F. & GASPERINI, P. "Lateral Variations of Seismic Intensity Attenuation in Italy", in *Geophys. J. Int.*, 155, 2003, pp. 839-56.
- FERGANY, E. A. & BONNEFOY-CLAUDET, S. "Microtremor Measurements in the Nile Delta Basin, Egypt: Response of the Topmost Sedimentary Layer", in *Seismological Research Letters*, 80(4), 2009, pp. 591-8 (doi: 10.1785/gssrl.80.4.591).
- GUTIERREZ, C. & SINGH, S. K. "A Site Effect Study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of Results from Strong-motion and Microtremor Data", in *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82(2), 1992, pp. 642-59.
- HOWELL, B. F. & SCHULTZ, T. R. "Attenuation of Modified Mercalli Intensity with Distance from the Epicentre", in *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1975, pp. 651-65.
- IMPROTA, L.; DI GIULIO, G. & ROVELLI, A. "Variations of Local Seismic Response in Benevento (Southern Italy) Using Earthquakes and Ambient Noise Recordings", in *Journal of Seismology*, 9, 2005, pp. 191-210.
- LANCHET, C.; HAZFELD, D.; BARD, P.-Y.; THEODULIDIS, N.; PAPAIOANNOU, C. & SAVVAIDIS, A. "Site Effects and Microzonation in the City of Thessaloniki (Greece) Comparison of Different Approaches", in *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86, 1996, pp. 1.692-703.
- LOPES, A. E. V. "Risco Sísmico no Brasil e Seu Impacto sobre Grandes Obras", in *Revista do Instituto de Engenharia*, 58, 7, 2010.
- TORO, G. R.; ABRAHAMSON, N. A. & SCHNEIDER, J. F. "Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties", in *Seis. Res. Lett.*, 68, 1997, pp. 41-57.

textos