



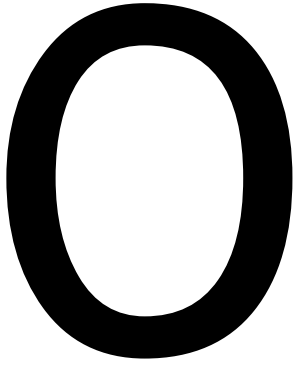
Terremotos *e tsunamis* no Japão



FÁBIO RAMOS DIAS DE ANDRADE

**FÁBIO RAMOS
DIAS DE ANDRADE**

é professor do
Departamento
de Mineralogia
e Geotectônica
do Instituto de
Geociências da USP.



s *tsunamis* são grandes movimentações de água do oceano, em geral causadas por terremotos no fundo oceânico. Apesar de haver outras causas e tipos possíveis de *tsunamis*, neste artigo vamos enfatizar aqueles que afetam o Japão e que talvez possam ser considerados *tsunamis* clássicos.

O mundo contemporâneo despertou para o potencial catastrófico dos *tsunamis* em 2004. A tragédia desencadeada por um terremoto no fundo oceânico próximo à Indonésia matou mais de 230 mil pessoas em quatorze países banhados pelo Oceano Índico. Ela está entre os desastres naturais com maior número de mortos na história da humanidade. Parte importante dessas mortes poderia ter sido evitada com um sistema de alarmes mais eficiente, um recurso tecnológico relativamente simples e disponível em outras regiões costeiras. No Japão, os alertas de *tsunami* e os procedimentos de evacuação da população salvaram muitas vidas. Mesmo assim, os dados oficiais da Agência Nacional de Polícia do Japão registram 15.668 mortos, 5.712 feridos e 4.836 desaparecidos (http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index_e.htm, acessado em 5/8/2011).

Não é por acaso que herdamos do japonês a palavra que denomina esse tipo de desastre natural. Em japonês, *tsunami* significa literalmente “onda no porto” (*tsu* = porto, *nami* = onda), termo que prevaleceu sobre o português, “maremoto”. No Japão os *tsunamis* são frequentes devido à alta incidência de terremotos. Ao longo da história, os danos sempre foram significativos, dada a alta densidade demográfica nas regiões costeiras japonesas. O Japão tem registros históricos de *tsunamis* e terremotos que remontam a mais de 1.300 anos. O primeiro uso conhecido da palavra *tsunami* data de 1612 e consta dos registros do xogum Tokugawa Ieyasu (1542-1616), o primeiro dos quinze xoguns que governaram o Japão desde a cidade de Edo, atual Tóquio. Aquele *tsunami*, ocorrido em dezembro de 1611, atingiu locais situados 30 m acima do seu nível médio e matou milhares de pessoas nas cidades de Miyako, Tsugaruishi e

Otsuchi. Mesmo antes do surgimento da palavra *tsunami*, há registros de fenômenos desse tipo no Japão a partir do ano de 684 d.C., com denominações como “grande maré alta” ou “grandes ondas”.

O Japão é o país com a maior quantidade de *tsunamis* registrados e é a principal fonte de *tsunamis* sísmicos no Oceano Pacífico.

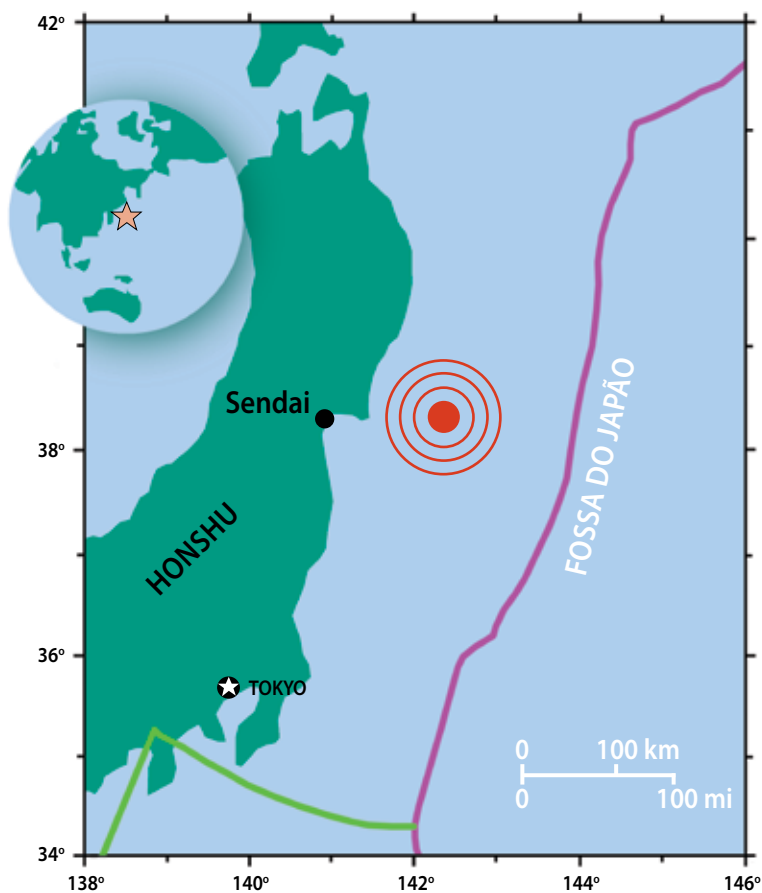
JAPÃO, 10/3/2011

O *tsunami* foi causado por um terremoto de magnitude 9 que ocorreu próximo à costa do Japão no dia 11 de março de 2011 às 14h46, hora local. A magnitude do terremoto, inicialmente classificada como 7,9, foi rapidamente elevada a 8,8, 8,9 e

finalmente 9. O terremoto principal durou seis minutos. Ele foi precedido por vários terremotos fortes: no dia 7 de março, quatro dias antes do terremoto principal, ocorreu um de magnitude 7,2. Meia hora após o principal, ocorreu um com magnitude 7,7, e mais de 900 secundários ocorreram nas semanas e meses seguintes ao principal, cinco deles com magnitude alta (≥ 7), 85 de magnitude moderada a forte (≥ 6) e centenas de magnitude moderada (≥ 5).

O epicentro foi no fundo oceânico, a 130 km de Sendai, a maior cidade próxima, e a 373 km de Tóquio. Seu hipocentro foi relativamente raso, com profundidade estimada em 32 km. Esse foi o maior terremoto já registrado no Japão desde o início das medições sísmicas instrumentais, há 130

FIGURA 1
Localização do epicentro do terremoto principal



Fonte: adaptado de <http://soundwaves.usgs.gov/2011/03/TsuLocnMap8LG.jpg>

anos, e foi o quarto mais forte no mundo desde 1900. Sua magnitude foi próxima à do terremoto de magnitude 9,1 que causou o trágico *tsunami* de 2004 no Índico.

A catástrofe foi impressionante, sob todas as perspectivas.

A quantidade de informações veiculadas sobre o terremoto e o *tsunami* no Japão, principalmente pela Internet, é enorme. Nunca antes na história houve um *tsunami* tão bem documentado em imagens. As cenas da água avançando sobre as regiões costeiras nos deram uma visão bastante clara do fenômeno e foi possível notar que os *tsunamis* não são como ondas convencionais ou como ondas de tempestade. Por outro lado, é difícil selecionar as informações confiáveis, principalmente quanto aos dados numéricos. Além das diferentes medições e estimativas realizadas por várias organizações japonesas e internacionais, há uma profusão de dados equivocados e propagações de erros. Optei, portanto, por me restringir a um pequeno conjunto de fontes de informação, entre elas a Agência Meteorológica do Japão, o Serviço Geológico dos EUA, a Nasa e o periódico científico *Science* (referências ao final deste artigo).

Alertas de *tsunami* foram emitidos oito segundos após a chegada das primeiras ondas sísmicas na estação mais próxima ao tremor. A Agência Meteorológica do Japão emitiu o alerta de perigo mais alto de sua escala, classificando o evento como um grande *tsunami* e prevendo ondas de pelo menos três metros de altura. As ondas foram muito maiores e transpuseram com facilidade os muros de contenção construídos em algumas cidades costeiras. Até embarcações de médio porte foram carregadas sobre esses muros. As maiores ondas foram avistadas em Fukushima (9,3 m), Miyako (8,5 m) e Miyagi (6 m). Outro dado importante, além da altura das ondas, é a altura máxima atingida pela água acima do nível médio do mar. A água chegou a locais até 40 m acima do nível médio do mar e até 10 km de distância da costa. Cerca de uma hora após o terremoto principal, o *tsunami* inundou o aeroporto de Sendai.

Um dado impressionante: a ilha de Honshu, a maior das ilhas japonesas, com 227.960 km², onde estão Tóquio e outras grandes cidades, foi deslocada 2,4 metros para leste, segundo medições de GPS (*global positioning system*). No fundo oceânico, o deslocamento horizontal total da placa tectônica do Pacífico foi de 24 metros no local do epicentro, e o deslocamento vertical (soerguimento) do fundo oceânico chegou a três metros, na costa de Miyagi. A zona de falha teve cerca de 400 km de comprimento e 150 km de largura, sendo aproximadamente paralela à costa do Japão. Uma faixa litorânea de 400 km de extensão sofreu um afundamento (subsidência) de cerca de 60 cm, o que permitiu um avanço ainda maior do mar para o interior do território japonês. A área inundada foi de aproximadamente 560 km².

O movimento das placas tectônicas redistribuiu ligeiramente as massas crustais na superfície do planeta e causou um deslocamento de 10 a 25 cm no eixo de rotação da Terra. Com isso houve um aumento ínfimo na velocidade de rotação da Terra, com respectivo encurtamento de 1,8 microssegundo na duração dos dias. Essa alteração não é perceptível na vida cotidiana, mas deverá ser levada em consideração no controle de missões espaciais.

Uma das causas da mortandade no Japão foi a magnitude inesperada do *tsunami*. Além de os muros de contenção terem sido projetados para *tsunamis* de menores dimensões, muitas pessoas acreditavam estar a salvo em áreas surpreendentemente atingidas pela água. O *tsunami* se espalhou pelo Oceano Pacífico e atingiu a costa oeste das Américas. O Chile é o país mais distante do Japão na costa do Pacífico, a cerca de 17.000 km do local do terremoto, e foi atingido por ondas de cerca de dois metros de altura.

A magnitude do *tsunami* se deveu a alguns fatores, entre eles o contexto geológico local. O Japão se situa sobre uma zona de subducção, um local onde há colisão de placas tectônicas, com a entrada das placas de fundo oceânico para o manto terrestre. A configuração das placas tectônicas nes-

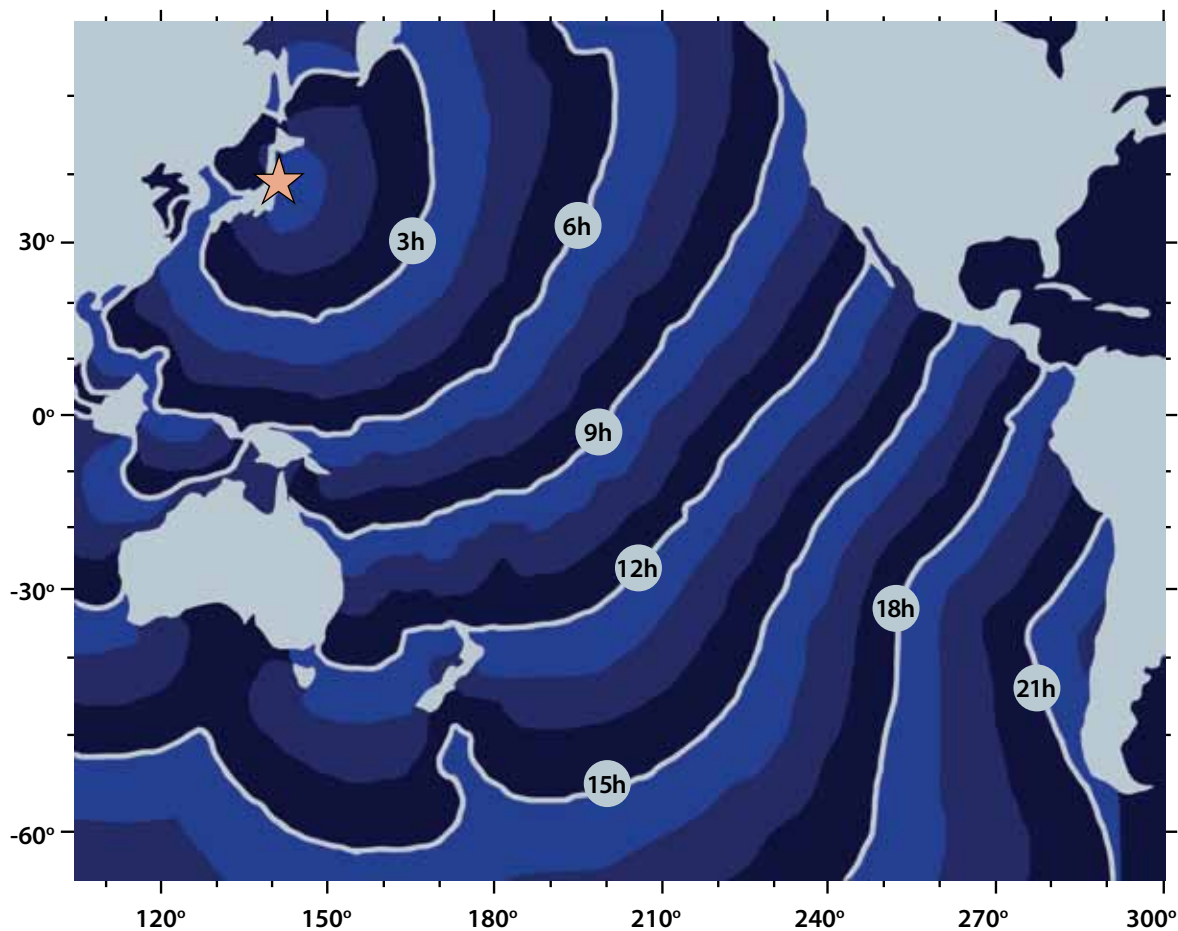
se local é bastante complexa: o Japão se localiza numa extensão da placa tectônica da América do Norte, que está em colisão com as placas oceânicas do Pacífico e das Filipinas. No local do terremoto, a placa do Pacífico se move para oeste-noroeste com uma velocidade média de 80 mm por ano.

A energia superficial liberada pelo terremoto ($1,9 \pm 0,5 \times 10^{17}$ joules) foi cerca de duas vezes maior que a energia superficial liberada pelo grande terremoto do Índico em 2004. A diretora do Serviço Geológico dos EUA, dra. Marcia McNutt, afirmou em entrevista à agência de notícias CBS que a energia superficial liberada pelo terremoto principal seria suficiente para abastecer a cidade de Los Angeles por um ano. A ener-

gia total liberada (momento sísmico) foi mais de 200 mil vezes maior que a energia superficial, algo equivalente a 600 milhões de bombas de Hiroshima.

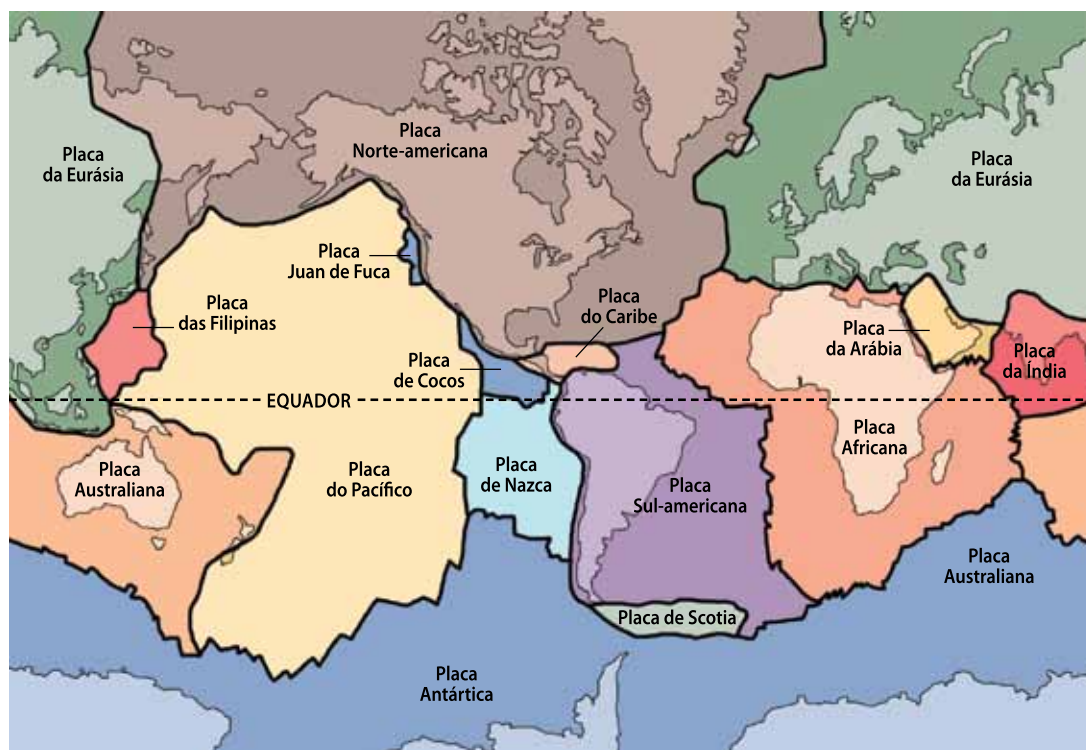
No Japão há uma relação próxima entre atividade sísmica e *tsunamis*. Entretanto, o país não está sujeito apenas aos *tsunamis* de terremotos locais, mas também àqueles de origem distante, conhecidos como *tsunamis* telessísmicos e produzidos em outros locais no Oceano Pacífico. O mais famoso deles ocorreu em 1960, em decorrência do grande terremoto do Chile, o maior do século XX, com magnitude 9,5. Um episódio similar ocorreu em 1700, quando houve *tsunami* sem vítimas fatais, mas que destruiu casas, plantações e instalações portuárias. O que

FIGURA 2
Propagação da onda de tsunami a partir do Japão (★) através do Oceano Pacífico.
A posição da frente de onda é indicada em função do tempo em horas após o terremoto



Fonte: adaptado de <http://usgshandbook.com/files/2011/03/california-tsunami-warning-map.jpg>

FIGURA 3
As placas tectônicas



Fonte: adaptado de <http://soundwaves.usgs.gov/2011/03/TsuPlatesScrShLG.jpg>

causou estranheza na época foi o fato de o *tsunami* não ter sido precedido por um terremoto – uma relação causal já percebida. Apenas no final do século XX a possível origem desse *tsunami* foi encontrada, atribuída a um terremoto de magnitude 9 na costa oeste da América do Norte, na região geologicamente conhecida como Cascadia, que se estende do norte da Califórnia até o sul do Alasca.

TSUNAMIS GERADOS POR TERREMOTOS

Os *tsunamis* podem ser causados por diferentes processos, incluindo terremotos, deslizamentos de sedimentos em taludes submarinos, erupções vulcânicas, furacões e impactos de meteoritos e asteroides. Essa variedade de processos faz com que eles

possam ocorrer em praticamente qualquer região costeira do mundo, incluindo as margens dos mares interiores e grandes lagos. A causa mais frequente de *tsunamis* são os terremotos em fundo oceânico, ainda que nem todos os terremotos desse tipo possam causar *tsunamis*. Os principais fatores que contribuem para a formação de grandes *tsunamis* sismogênicos são:

- terremotos de grande magnitude em fundo oceânico e com hipocentro raso, que transmitem parte significativa de sua energia para a água do mar. Quanto mais raso for o terremoto, mais energia será transmitida para a água e maior será o *tsunami*. A energia dos terremotos profundos é dissipada em ondas sísmicas no interior da Terra. O terremoto de março de 2011 no Japão foi relativamente raso (hipocentro 32 km), considerando-se que os hipocentros em zonas de subducção podem ter profundidade de até 700 km;

- existência de uma espessa lâmina de água sobre o epicentro do terremoto, pois, quanto maior for o volume de água deslocada, maior será o *tsunami*. O epicentro do terremoto principal no Japão se localizou em águas relativamente profundas, a cerca de 4.000 m de profundidade;
- contexto tectônico com esforços compressivos em zonas de subducção, onde há planos de ruptura e deslocamento de blocos rochosos em falhas de cavalgamento ou falhas inversas. Veremos a seguir que terremotos submarinos desse tipo são os mais eficientes na produção de *tsunamis*, pois tendem a causar soerguimento do fundo oceânico e subsidência (afundamento) das regiões litorâneas;
- a proximidade do foco do terremoto em relação à costa não influencia na magnitude absoluta do *tsunami*, mas os *tsunamis* são maiores e mais destrutivos nas regiões costeiras mais próximas ao seu foco.

Os terremotos são episódios de liberação de energia mecânica acumulada nas placas tectônicas através da deformação plástica. O movimento das placas tectônicas nas zonas de convergência ou de colisão (regime compressional) faz com que os blocos rochosos se movam uns em relação aos outros ao longo de planos de falhas, que são planos de ruptura e deslocamento. Há, entretanto, um enorme atrito entre os blocos rochosos e, por esse motivo, os movimentos tectônicos não são contínuos. É necessário que haja acumulação de deformação elástica nas bordas de placas até que o limite de resistência do atrito nos planos de falha seja superado, quando então ocorrem os terremotos.

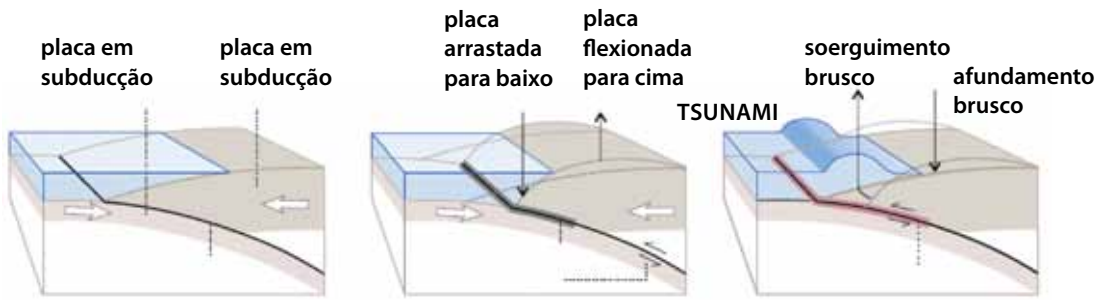
Na colisão de blocos em zonas de subducção, a deformação elástica se concentra na placa superior. Com o acúmulo de deformação, a placa tectônica superior sofre um progressivo arqueamento, enquanto sua borda é arrastada para baixo pela placa que se move em direção ao manto. Durante um terremoto, a tensão de arqueamento da placa é subitamente liberada e as placas tectônicas se acomodam. A energia potencial contida na borda da placa é instantaneamente con-

vertida em energia cinética e transferida para a massa de água do oceano. O deslocamento vertical da água se dissipa na forma de uma onda de pequena amplitude e grande comprimento. Uma analogia pode ser feita com uma haste flexível sendo empurrada sobre uma superfície irregular, com uma de suas extremidades tocando a superfície em ângulo oblíquo. Quando a extremidade da haste fica retida, ela se flexiona, até que a energia nela acumulada exceda a resistência do atrito, fazendo com que a haste se solte bruscamente e retorne à sua forma original.

A fonte de energia dos movimentos da crosta é o calor interno da Terra, que tem duas origens principais: o calor remanescente da formação do planeta e o calor do decaimento radioativo de alguns elementos contidos nas rochas, principalmente urânio, tório e potássio.

Os planetesimais eram os blocos rochosos de material cósmico que se aglutinaram para dar origem aos planetas do Sistema Solar. O calor remanescente da formação da Terra, há 4,56 bilhões de anos, está relacionado à conversão da energia cinética dos planetesimais em energia térmica durante os processos de acreção gravitacional dos planetas no Sistema Solar jovem. Ao calor gerado por esses impactos, somou-se uma grande produção de calor radioativo inicial, pois havia, no início do Sistema Solar, uma maior quantidade de elementos radioativos em comparação com os teores atuais. Alguns dos elementos que contribuíram para a geração inicial de calor já não existem mais no Sistema Solar, como, por exemplo, o isótopo alumínio 26 (^{26}Al). No início de sua história, houve calor suficiente para fundir grande parte das rochas do protoplaneta Terra, permitindo que os materiais se separassem por densidade e afinidade química. A formação do núcleo terrestre, composto por ferro e níquel, foi uma fonte adicional de calor, pela liberação da energia potencial gravitacional. Quanto à produção atual de calor por decaimento radioativo, apesar de a concentração média dos elementos U, Th e K ser muito maior na crosta continental (U = 1,42 ppm; Th = 5,6 ppm; K = 15.772 ppm) que no manto (U = 0,020 ppm; Th =

FIGURA 4
Produção de tsunami em falhas de cavalgamento



SITUAÇÃO GERAL
 uma placa tectônica desce para o manto em uma zona de subducção.

ENTRE TERREMOTOS
 nas partes rasas, o movimento da placa em subducção é bloqueado pelo atrito com a placa superior, que acumula deformação elástica.

DURANTE UM TERREMOTO
 a borda da placa em subducção é subitamente liberada; seu movimento empurra a água do mar para cima, produzindo o tsunami.

Fonte: adaptado de Atwater et al., 2005

0,079 ppm; $K = 240$ ppm), o volume total do manto é muito maior que o da crosta e permite significativa geração de calor. Uma parte importante desse calor está retida no interior da Terra porque as rochas são isolantes térmicos eficientes.

Evidências geológicas e geofísicas indicam que a Terra é dividida em domínios aproximadamente esféricos e concêntricos. O núcleo, composto por ferro e níquel, é dividido em uma parte interna sólida e outra externa líquida. Em torno do núcleo se localiza o manto, o maior dos compartimentos internos da Terra, formado principalmente por silicatos de magnésio e ferro, e subdividido em manto superior e inferior. O manto se estende desde a periferia do núcleo até a base das crostas continental e oceânica. Os limites entre essas várias porções internas foram determinados por meio de dados sísmicos, que trazem informações sobre o estado físico, a reologia e, indiretamente, as condições de pressão e temperatura das regiões profundas da Terra. A lenta cristalização do núcleo externo líquido libera calor, que é dissipado pelas correntes de convecção no manto. Essas correntes de convecção se dão em estado sólido, com as rochas se movendo por deformação em alta temperatura.

Vale mencionar a lenda urbana do manto líquido. Segundo ela, a crosta terrestre estaria flutuando sobre um manto líquido e o vulcanismo seria o extravasamento desse líquido através de fraturas abertas na crosta. Apesar de ser um modelo intuitivo e, por esse motivo, bastante popular, as evidências sísmicas e geológicas indicam que o manto está no estado sólido, ainda que possa conter pequenas frações de rochas fundidas e em estado líquido, que são os magmas. A propagação de ondas de cisalhamento (ondas secundárias ou tipo S) no manto é uma evidência de que ele é sólido, já que ondas desse tipo não se propagam em meio líquido.

O movimento dos continentes, ou deriva continental, foi inicialmente reconhecido pelo geógrafo e glaciologista Alfred Wegener em 1912, mas se consagrou como paradigma apenas na década de 1960, a partir de estudos geológicos e paleomagnéticos da crosta terrestre nos fundos oceânicos. O movimento dos continentes é lento, da ordem de milímetros a poucos centímetros por ano, mas provocou mudanças radicais ao longo do tempo geológico.

O movimento das placas tectônicas se dá a partir de cadeias de vulcões existentes nos fundos oceânicos. Esses vulcões são alimentados por magmas basálticos forma-

dos pela fusão parcial do manto superior. O vulcanismo nas cadeias meso-oceânicas é um processo contínuo de produção de nova crosta oceânica (fundo oceânico). Como o volume da Terra permanece praticamente inalterado ao longo do tempo geológico, a produção de nova crosta é compensada pela destruição de crosta oceânica mais antiga, mais fria e, portanto, mais densa. A crosta oceânica antiga retorna ao manto nas zonas de subducção. Nessas regiões ocorre o mergulho das placas oceânicas, um processo que está diretamente ligado aos terremotos, ao vulcanismo e à formação de cadeias de montanhas. As regiões em torno de praticamente todo o Oceano Pacífico são marcadas por zonas de subducção, formando um cinturão conhecido como Círculo de Fogo. Essa faixa se estende desde o sul do Chile até o norte do Alasca, de onde passa pelas Ilhas Aleutas e para a Península de Kamchatka, depois para o Japão, até se encontrar com outras zonas de subducção de geometria mais complexa no sudeste asiático. O Círculo de Fogo contém importantes cadeias de montanhas e boa parte da atividade sísmica e vulcânica da Terra.

Os terremotos são captados por uma rede mundial de sismógrafos em estações sísmicas, que permitem localizar seus hipocentros (focos em profundidade) e epicentros (projeção dos focos na superfície). A integração de uma enorme quantidade de dados sísmicos permitiu desenvolver um modelo tridimensional do interior da Terra a partir da velocidade de propagação e da refração dos diferentes tipos de ondas.

Os sismógrafos amplificam as ondas recebidas e as registram em função do tempo. A magnitude dos terremotos pode ser medida pela escala Richter, uma escala logarítmica referente à amplitude da onda registrada nos sismógrafos. Em uma escala logarítmica na base dez, os números indicam ordens de grandeza e, portanto, um terremoto de magnitude 9 é dez vezes mais intenso que um de magnitude 8 e dez mil vezes mais intenso que um de magnitude 5. Essa escala de magnitude sísmica foi proposta em 1935 pelos sismólogos Charles Richter e Beno Gutenberg, inicialmente para medir

a magnitude dos terremotos na Califórnia. A escala Richter original (M_L) era baseada na amplitude da onda, considerando o deslocamento horizontal do terreno e a distância entre o sismógrafo e o epicentro. Essa escala foi aprimorada nas décadas seguintes para permitir medidas globais, surgindo assim as magnitudes de ondas de superfície (M_S) e de ondas de corpo (m_b). Essas escalas de magnitude são consistentes entre si e podem ser usadas com precisão em sismos de magnitude até 8. Para permitir medições acima dessa magnitude, foi desenvolvida a escala de magnitude de momento (M_w), que também é logarítmica e com escala concordante com as demais escalas.

ONDAS DE TSUNAMI

A *Grande Onda de Kanagawa* é uma das gravuras tradicionais japonesas mais famosas. Ela foi feita por Katsushika Hokusai por volta de 1831 e faz parte de uma série de 36 gravuras de vistas do Monte Fuji. Na base das ondas vemos os barcos, que servem como referência de escala. Esse tipo de onda, com crista alta e espumante, não é típica dos *tsunamis*, mas sim de ondas de tempestade. As imagens amplamente divulgadas do *tsunami* de março de 2011 mostram claramente que os *tsunamis* são diferentes das ondas comuns que vemos nas praias, que dissipam sua energia na zona de rebentação, através de movimentos de turbilhão sobre si mesmas. As ondas de *tsunami* se assemelham a uma maré alta, que avança rapidamente sobre as terras emersas.

O deslocamento da onda de *tsunami* é muito rápido em águas profundas (cerca de 800 m/s) e há uma perda de velocidade quando as ondas chegam às águas rasas (cerca de 15 m/s). Além de serem retardadas, as ondas de *tsunami* são compactadas quando atingem o litoral, ou seja, há um aumento de sua amplitude (altura) e um encurtamento de seu comprimento de onda. A altura pode chegar a vários metros em relação ao nível médio do mar. Ao avançar sobre o terreno costeiro, as ondas de *tsunami*

perdem velocidade pelo atrito com objetos (construções, árvores) e pelas irregularidades da topografia. A chegada do *tsunami* é precedida por um grande recuo da linha de ondas, abaixo da linha da maré baixa.

TSUNAMIS NA HISTÓRIA DA TERRA

Assim como muitos fenômenos naturais, os terremotos e *tsunamis* apresentam uma relação inversa entre magnitude e frequência. As regiões sismicamente ativas podem sofrer dezenas ou centenas de pequenos abalos por ano, mas os terremotos de grande magnitude são bastante raros. Portanto, os processos naturais que produzem e controlam os *tsunamis* não podem ser plenamente compreendidos apenas com base no registro histórico dos *tsunamis* vivenciados e rela-

tados pelo homem. Esse registro abrange apenas episódios ocorridos em poucos séculos e varia muito de uma região para outra, dependendo da densidade demográfica e da capacidade de registro dos grupos humanos ao longo da história. Os *tsunamis* antigos que afetaram o hemisfério sul não têm registro histórico, mas foram bem documentados em torno do Mediterrâneo e no Japão. É fundamental termos uma perspectiva no tempo geológico, em milhões e centenas de milhões de anos.

Terremotos e *tsunamis* de grandes proporções, como os que afetaram o Japão, são raros no registro histórico, mas comuns no tempo geológico. Seu estudo é feito com base em feições geológicas em regiões costeiras, tais como o deslocamento de grandes blocos de rocha por ondas, feições erosivas superlativas e alguns tipos de mudanças bruscas no registro estratigráfico, com soterramento de sedimentos pantanosos por camadas de areia e sedimentos grossos. Os

FIGURA 5

Grande Onda de Kanagawa, xilogravura de Hokusai (por volta de 1831), da série As Trinta e Seis Vistas do Monte Fuji



Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Great_Wave_off_Kanagawa.jpg

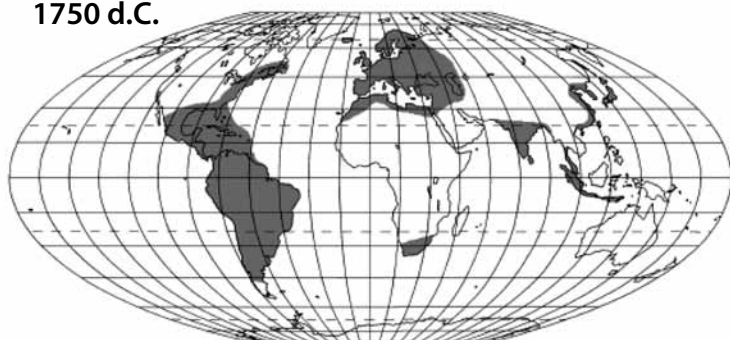
FIGURA 6

As áreas em cinza indicam as regiões costeiras do mundo onde teria sido possível o registro histórico de *tsunamis* no passado, por volta dos anos de 1500 e 1750

1500 d.C.



1750 d.C.



■ áreas com possibilidade de registro histórico de *tsunamis*

Fonte: adaptado de Bryant, 2008

tsunamis foram responsáveis por esculpir o contorno de áreas costeiras.

Além de seu lado destrutivo, eles foram provavelmente os meios de transporte de plantas e animais terrestres para o povoamento das ilhas mais isoladas do Pacífico, como o Havaí e as Ilhas Fiji, que distam milhares de quilômetros dos continentes mais próximos.

Vários *tsunamis* ficaram marcados na história da humanidade. Há desde mitos folclóricos que podem ser atribuídos a *tsunamis* pré-históricos, registros de naturalistas da Grécia e do Império Romano, até eventos medievais e contemporâneos.

Dentre os eventos mais conhecidos podemos destacar o *tsunami* de 1^o de novembro de 1755 em Lisboa, Portugal. De-

zenas de milhares de pessoas, que haviam sobrevivido a um terremoto que abalou a cidade, correram para o porto em busca de um lugar seguro e foram mortas por um *tsunami* que atingiu o local cerca de quarenta minutos após o terremoto. Estima-se que esse *tsunami* tenha atingido até quinze metros acima do nível do mar. O número total de mortos em Lisboa é estimado entre 60 mil e 100 mil pessoas. Outro episódio impressionante foi a erupção do vulcão Krakatoa, na Indonésia, em 28 de agosto de 1883. A erupção, do tipo explosivo, literalmente varreu a ilha de Krakatoa do mapa e, somada ao *tsunami* que se seguiu, causou cerca de 36 mil mortes; estima-se que a água tenha atingido até 40 m acima do nível médio do mar. Muitas outras tragédias desse tipo podem ser listadas.

Não há registro histórico de *tsunamis* gerados por impactos de meteoritos, mas há evidências geológicas e paleontológicas de eventos desse tipo. Há 65 milhões de anos, no final do período Cretáceo, o impacto de um asteroide promoveu uma catástrofe de dimensões planetárias. As mudanças climáticas em consequência do impacto causaram a extinção dos dinossauros, o que permitiu, posteriormente, a ascensão dos mamíferos. Recomendo a leitura do livro de Bryant (2008), que apresenta uma reconstituição impressionante desse desastre, baseada em dados geológicos e modelos numéricos. Estima-se que o asteroide que se chocou com a Terra tivesse entre 10 e 15 km de diâmetro. O impacto gerou uma cratera de cerca de 180 km de diâmetro, Chicxulub, na Península de Iucatã, às margens do Golfo do México. O impacto vaporizou a água e as rochas carbonáticas situadas na região, levantando uma nuvem de fuligem e de gases com temperatura em torno de 5.000°C. A vegetação foi incinerada em um raio de milhares de quilômetros em torno do local do impacto, sobrecarregando ainda mais a atmosfera com fuligem e bloqueando a fotossíntese por um período de dois a seis meses em escala global. O impacto causou um abalo sísmico de magnitude entre 9 e 11, com ondas de *tsunami* de até cem metros de altura, que teriam invadido e devastado

o continente norte-americano por centenas de quilômetros a partir do local do impacto.

Se incluirmos os impactos de meteoritos e asteroides nas possíveis causas de *tsunamis*, veremos que todas as áreas situadas nas proximidades de oceanos, mares ou lagos estão sujeitas a esse tipo de desastre natural. Dentre as possíveis causas de *tsunamis*, os

terremotos são as que têm maior controle geográfico. É mais simples identificarmos como de maior risco as áreas costeiras em regiões tectonicamente ativas, como, por exemplo, o Círculo de Fogo, em torno do Oceano Pacífico. Ainda que não seja possível prever um terremoto com antecedência, pode-se delimitar as áreas de maior risco.

BIBLIOGRAFIA

- ATWATER, B. F.; SATOKO, M. R.; KENJI, S.; YOSHINOBU, T.; KAZUE, U.; YAMAGUCHI, D. K. *The Orphan Tsunami of 1700: Japanese Clues to a Parent Earthquake in North America*. Seattle, USGS – University of Washington Press, 2005. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/pp/pp1707>.
- BRYANT, E. *Tsunami: The Underrated Hazard*. Chichester, Praxis, 2008.
- MCDONOUGH, W. F.; SUN, S. S. "The Composition of the Earth", in *Chemical Geology*, 120, 1995, pp. 223-53.

Sites

Agência Meteorológica do Japão

http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake.html

Agência Nacional de Polícia do Japão

http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index_e.htm

Serviço Geológico dos EUA (United States Geological Survey – USGS)

http://earthquake.usgs.gov/docs/sign_eqs.htm

<http://soundwaves.usgs.gov/2011/03/>

<http://usgshandbook.com/142/california-tsunami-warning>

<http://walrus.wr.usgs.gov/news/sendai.html>

<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/basics.html>

<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/links.html>

<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sendai11-computer-animations>

Science Magazine, volume 17, junho 2011

<http://www.sciencemag.org/content/332/6036.toc>

http://ioc3.unesco.org/itic/categories.php?category_no=142

<http://nctr.pmel.noaa.gov>

<http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/ocean/visualizations/tsunami.html>

<http://www.earthquakejapan2011.com>

<http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html>