



.....
Marcus Lacerda Santos
 Instituto de Física
 Universidade de Brasília
 e-mail: marcus@fis.unb.br

Motivação

As ondas gigantes que se abateram sobre países asiáticos banhados pelo Oceano Índico (Fig. 1) no dia 26 de dezembro de 2004 chamaram a atenção do mundo pela devastação e o número extraordinário de vidas humanas perdidas, superior a 280 mil, segundo recontagem recente [1]. Tal desastre também despertou interesse para o fenômeno tsunami. O termo, formado pela junção das palavras japonesas para “onda” - tsu - e “porto” - nami [3], descreve uma série de ondas marítimas geradas por qualquer distúrbio brusco que cause um deslocamento vertical em larga escala da água dos oceanos. A maior parte das tsunamis é gerada por maremotos, como no caso focalizado aqui. Mas tsunamis também podem ser causadas por erupções vulcânicas, deslizamentos de terra e impactos de meteoros [4].

Naturalmente, várias questões científicas vieram à tona no noticiário da época, destacando-se especialmente aspectos geofísicos (terremotos, maremotos). No tocante a questões propriamente de Física, a mídia impressa geralmente limitou-se a “jogar” alguns números, tais como, “o maior abalo sísmico desde 1964, que liberou energia equivalente a 37 mil bombas de Hiroshima” [5], “velo-

cidade das ondas de 800 km/h” [6], etc.

Se o grande público aceita essa numerologia, em um misto de deferência e indiferença, tal certamente não é o caso do leitor dessas linhas. Para este, estudante, professor, ou simples interessado em Física, um tal festival de números desacompanhados de explicações tende a se tornar fonte perene de dúvidas, perplexidade e aflições, senão de *stress*, queda de cabelos e outros males!

O presente artigo tenta jogar uma luz no assunto, visando esse público alvo. Não sendo o autor, contudo, um especialista, não poderá oferecer mais

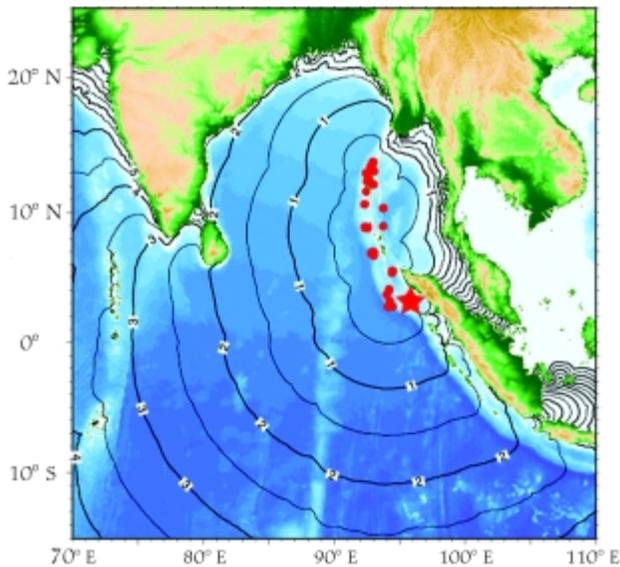


Figura 1. Mapa da região do Oceano Índico varrida pelas ondas gigantes em 26/12/2004. A estrela marca o epicentro do terremoto de Sumatra-Andaman. Os pontos (círculos) localizam tremores secundários ocorridos nas 24 h subsequentes (*aftershocks*). Os pontos com alinhamento externo (*i.e.*, voltados para o alto-mar) esboçam a fronteira entre placas tectônicas, ao longo da qual se deu a ruptura causada pelo terremoto. Os pontos internos ajudam a caracterizar a largura da região de subdução das placas. Números representam o tempo de viagem da tsunami, em horas (AIST, Japan [2]).

Este pequeno artigo visa ajudar o estudante a compreender um pouco do fenômeno tsunami, à luz de conceitos básicos da física geral, ondulatória e de fluidos.

que um paliativo para os males descritos acima, o que consistirá em: usar sua visão de físico para resumir e interpretar, em termos de modelos simples, uma espécie de “diário de bordo” que foi redigindo, à medida em que navegava pelo ciberespaço das inúmeras páginas da internet surgidas na época sobre o assunto. Algumas delas constam da lista de referências, assim como publicações mais recentes.

O artigo é organizado, após a presente introdução, em seções focalizando o maremoto e as ondas gigantes, nas quais procurou-se desenvolver estimativas numéricas usando conceitos de física básica aplicáveis ao problema. Para além do assunto em si, deseja-se mostrar ao estudante a utilidade de cálculos de ordem de grandeza, à condição de que os mesmos sejam guiados por uma busca persistente de consistência e razoável concordância com as observações.

O maremoto

Como terremotos geram tsunamis? Tsunamis podem ser geradas quando o fundo do mar é brutalmente deformado, deslocando verticalmente a coluna d'água que repousa acima dele [3]. Grandes movimentos verticais da crosta terrestre podem ocorrer nas fronteiras entre placas tectônicas, ou seja, nas chamadas falhas geológicas. Ao longo das margens do Oceano Pacífico, por exemplo, placas oceânicas mais densas deslizam sob placas continentais, em um processo conhecido como subdução. Terremotos de subdução são particularmente efetivos na geração de tsunamis. De fato, foi o que ocorreu no terremoto de magnitude 9,1 na escala Richter do dia 26 de dezembro de 2004, com epicentro ao largo da ilha de Sumatra, na Indonésia. Medidas e modelos computacionais [1, 7] demonstraram que a Placa Indiana deslizou cerca de 20 m sob a Placa da Birmânia. A energia irradiada pelo terremoto, medida através das ondas sísmicas [8], foi de $E_R = 1,1 \times 10^{18}$ J.

Como terremotos geram tsunamis? Tsunamis podem ser geradas quando o fundo do mar é brutalmente deformado, deslocando verticalmente a coluna d'água que repousa acima dele

Para expressar essa energia em termos daquela liberada pela bomba de Hiroshima (12,5 kilotons) [9], usamos o fator de conversão [10] 1 kiloton = $4,2 \times 10^{12}$ J. Portanto, a energia liberada pelo abalo sísmico equivale a algo como 21.000 bombas de Hiroshima.

O terremoto de Sumatra-Andaman teve sua magnitude recentemente revista para 9,3, e além de ser considerado o maior evento sísmico dos últimos 40 anos, provocou a tsunami mais devastadora de que se tem registro na história [1]. Outra característica inédita: trata-se do terremoto de maior duração já registrado [11, 12].

Tsunami: Geração e energia

Compreender o processo de subdução é importante, se quisermos estimar a parcela da energia liberada pelo terremoto para desencadear as ondas gigantes. Considerando inicialmente dados divulgados pela imprensa, lemos o seguinte na ocasião [6]: “A 9000 m de profundidade no Oceano Índico, a Placa Indiana deslocou-se sob a Placa da Birmânia. O movimento provocou uma súbita elevação de 15 m no leito do oceano em uma extensão de milhares de quilômetros quadrados”. Essa notícia, bem como a de outras matérias citadas, contém razoável dose de acerto, considerando-se a dinâmica jornalística. Mas não serve a nossos propósitos, devido a imprecisões de natureza quantitativa.

Por exemplo, para começar precisamos avaliar essa área. Também o valor mencionado para a elevação vertical (*uplift*) do assoalho marítimo é para ser tomado mais como um valor de pico. Valores médios situam-se por volta de 4 m, para a metade sul da falha, ou então 2 m, se considerarmos seu comprimento total, de cerca de 1300 km [8, 13, 14]. Entretanto, conforme pesquisas recentes demonstraram [14, 15], somente a metade sul desse comprimento, isto é, $L = 650$ km, contribuiu de fato para gerar a tsunami, em função da dinâmica do movimento de placas, como

se discutirá logo a seguir. Multiplicando esse valor de L pela largura W de aproximadamente 150 km, segundo as mesmas fontes, obtemos para a área da zona de subdução o valor $A = 9,7 \times 10^{10}$ m².

Na metade sul o deslizamento ocorreu em um tempo comparável ao tempo de ruptura, definido por $\tau_r = L/v_r$, onde v_r é a velocidade com que a ruptura se propagou ao longo da falha. O valor médio dessa velocidade é 2,7 km/s [14], de onde se conclui que τ_r vale cerca de quatro minutos. O que é importante enfatizar para o leitor nesse ponto é que, não apenas o *uplift* de 4 m, mas também a sua ocorrência em um tempo curto, permitem explicar o desencadeamento da tsunami, praticamente limitado à parte sul da falha. Repare que o *uplift* inferior a 2 m em média, ocorrido na metade norte, não seria em si desprezível a esse efeito, não fosse pela enorme lentidão com que se deu, literalmente se arrastando ao longo de meia hora [14].

Figuras genéricas que explicam o movimento de placas tectônicas podem ser vistas em algumas páginas da internet [16]. Com relação ao terremoto de Sumatra-Andaman, mapeamentos detalhados (*i.e.*, imagens computacionais baseadas em dados sísmicos), são comuns para *slip* (ou deslizamento, *i.e.*, deslocamento horizontal) [17, 18], mas não para *uplift*. Para esse último, que realmente importa na geração de tsunamis, os dados mais atualizados disponíveis parecem ser os dos artigos citados acima [15], embora dados parciais possam ser vistos na internet [17].

Energia potencial

Estamos agora em condições de estimar a energia potencial $U = mgd/2$ [19] associada à tsunami, por efeito do levantamento da massa de água situada sobre a região retangular de área $A = LW$ no fundo do oceano. Esse empuxo corresponderia à elevação de um bloco de água acima do nível médio do mar, bloco este possuindo espessura d e volume $V = Ad$ [20]. Substituindo os números obtidos acima, chegamos a $V \approx 3,9 \times 10^{11}$ m³.

Multiplicando V pela densidade da

água (10^3 kg/m^3), obtemos para a massa, $m \approx 3,9 \times 10^{14} \text{ kg}$. Inserindo na fórmula $mgd/2$, onde g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$), e d é o deslocamento vertical médio de 4 m, chegamos a $U \approx 7,6 \times 10^{15} \text{ J}$.

Naturalmente, pode-se argumentar que falta incluir a contribuição da energia cinética, mas essa é muitos milhares de vezes menor, como se verá a seguir.

Energia cinética

Dissemos anteriormente que houve também deslocamento lateral de placas (*slip*), e que ele atingiu valores máximos superiores a 10 m. Adotando 5 m para o valor médio, e dividindo por τ_r , chega-se a $v_{lat} \approx 2,1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$. A velocidade vertical é um pouco menor, $v_{vert} \approx 1,7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$. Substituindo na expressão da energia cinética $1/2 mv^2$, onde v^2 é calculada somando-se os quadrados de v_{lat} e v_{vert} , obtemos $1,4 \times 10^{11} \text{ J}$, um valor irrisório diante da energia potencial.

Portanto, nossa estimativa para a energia da tsunami corresponde praticamente à energia potencial calculada acima. Embora resultado de uma estimativa grosseira, esse valor é menos que o dobro do valor aceito de $E_{tsu} = 4,2 \times 10^{15} \text{ J}$ [8]. Vemos que a energia da tsunami, a despeito do enorme poder destrutivo que mostrou possuir, corresponde a apenas cerca de 0,5% da energia irradiada pelo terremoto, E_R , mencionada anteriormente. Note, contudo, que também aquela energia é apenas uma pequena fração da energia “intrínseca” do terremoto, o que nos permite vislumbrar um pouco da complexidade que cerca a energética desses eventos sísmicos.

Tsunami: A onda

Começando por uma questão básica: o que distingue uma tsunami de uma onda ordinária, produzida por ventos? Reproduzimos abaixo respostas a essa pergunta, provenientes de duas fontes credenciadas:

i) “Após o terremoto, ou outro impulso gerador, uma corrente de ondas simples, progressivas e oscilatórias é propagada por grandes distâncias na superfície do oceano, em círculos que vão ficando cada vez mais amplos, se-

melhantes às ondas produzidas por uma pedra que cai em uma piscina. Em águas profundas, as distâncias entre as ondas são enormes, de 100 km a 200 km, e as alturas das ondas são bem pequenas, de 30 cm a 60 cm. (...) Assim, uma partícula que esteja boiando na água ou um navio em mar aberto sentem a passagem de uma tsunami como insignificantes aclive e declive de apenas 30 cm a 60 cm, durando de cinco minutos a uma hora” (da Enciclopédia Britânica, segundo [6]).

A energia de uma tsunami, a despeito do seu enorme poder destrutivo, corresponde a apenas cerca de 0,5% da energia irradiada pelo terremoto que a gerou

ii) “Tsunamis são diferentes de ondas geradas por ventos (...), sendo caracterizadas como ondas de águas rasas, com períodos e comprimento de onda longos. Ondas geradas por ventos que vemos arrebentar em uma praia (...), originadas por tormentas em alto mar, quebrando ritmicamente, uma após a outra, podem ter período em torno de 10 s e um comprimento de onda de 150 m. Uma tsunami, por outro lado, pode ter um comprimento de onda de mais de 100 km e período da ordem de uma hora”(Ref. [3], tradução livre do autor).

Fica portanto claro para o leitor a que se refere o termo “ondas gigantes” quando se fala de tsunamis. Não é, com certeza, a altura da onda na arrebentação. Afinal, uma onda de 12 m de altura, mesmo sendo formidável, seria considerada modesta nas praias consagradas pelos surfistas, no Havaí ou em outras partes. O gigantismo da tsunami, em todos os aspectos, deriva sim do seu extraordinário comprimento de onda. É como se fosse uma enorme onda de maré, embora esse termo, às vezes utilizado pela mídia, seja impróprio, por não ter o fenômeno nada que ver com a atração gravitacional do Sol e da Lua.

Ondas rasas em mar profundo

Não parece estranho, porém, falar-se em ondas rasas em um mar de até 6000 m de profundidade? Essa questão nos remete a outra, de ordem geral, do significado de grande e pequeno em Física. Grande (ou pequeno)

em relação a que, eis a questão chave que nos auxilia a resolver tais dilemas. No caso, como vimos acima, o comprimento de onda da tsunami, λ_{tsu} , é de tal ordem que nos permite escrever, chamando de h a profundidade no local, $\lambda_{tsu} \gg h$. Ou seja, para ondas tão longas, o mar profundo do oceano (qualquer oceano) seria algo como um espelho d’água raso.

O comportamento de ondas de águas rasas é bem compreendido no contexto da dinâmica de fluidos [21]. Essas ondas movem-se a uma velo-

cidade igual à raiz quadrada do produto da aceleração da gravidade pela profundidade. Ou, em símbolos,

$$v_{tsu} = \sqrt{gh}. \quad (1)$$

O estudante versado em física ondulatória notará que não há dispersão, ou seja, v_{tsu} não depende de λ_{tsu} . Isso implica na igualdade entre as velocidades de fase e de grupo [22]. Para os menos afeitos a tais tecnicidades, basta saber que v_{tsu} é, efetivamente, a velocidade com que a energia da onda se propaga. Vemos, pois, que quanto mais profunda a água, mais veloz é a onda. De fato, substituindo os valores reportados [1, 7] para a velocidade da tsunami, de 800 km/h (ou 220 m/s), obtemos a profundidade correspondente de 5000 m, consistente com o valor médio para o Oceano Índico [23].

Finalmente, vale notar que a essa velocidade a onda gigante compete de fato com um avião a jato (como foi alardeado pela imprensa), atravessando o oceano em menos de um dia. Os valores de comprimento de onda da tsunami observados por satélites [24], por outro lado, freqüentemente ultrapassaram 100 km.

Notemos agora que, além de [1], v_{tsu} deve satisfazer também à equação

$$v_{tsu} = v\lambda_{tsu}. \quad (2)$$

Mas que freqüência é v ? Antes de responder, repare o leitor que, não sendo a tsunami um fenômeno estacionário (felizmente!), v não pode ser uma freqüência no sentido usual, mas sim o inverso de algum tempo carac-

terístico, τ . Qual? Para tentar responder, substituímos os valores dados acima para v_{tsu} e λ_{tsu} . O resultado é $1/\tau \approx 2,2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, que corresponde a um tempo $\tau \approx 450 \text{ s}$, ou cerca de sete minutos, *i.e.*, algo entre o τ_r já visto e o tempo total de duração do terremoto (cerca de 10 min, e portanto, da mesma ordem de grandeza).

Arrebentação

O que acontece quando a tsunami se aproxima da costa? Ao penetrar em águas mais rasas, vemos que a Eq. (1) prevê uma diminuição da velocidade de propagação. Esse efeito, contudo, é mais pronunciado na base da onda, o que desencadeia um movimento do fluido em direção ao topo, que tende a tomar dianteira em relação à base. É o mecanismo usual de arrebentação de uma onda na praia. A diferença, no caso da tsunami, é sua grande velocidade (na retaguarda, e agora também no topo) e volume d'água. Em muitos casos, dependendo da conformação do solo marinho na costa, essa corrente ascendente funciona como um poderoso aspirador, o que explica a tendência de recuo da água do mar numa praia prestes a ser atingida por uma tsunami.

Foi essa a “lição de Geografia”, lembrada com admirável sagacidade pela menina inglesa Tilly, de apenas 10 anos na época, que se encontrava em uma praia da ilha de Phuket, na Tailândia, naquele fatídico 26 de dezembro de 2004. Graças ao alarme dado por ela, ao perceber o recuo anormal do mar, relatando o que aprendera na escola e instando as pessoas a fugirem rápido para lugares mais altos, estima-se que cerca de 100 vidas foram salvas [25].

Conclusão

Concluindo, vimos neste pequeno artigo uma ilustração de como a aplicação de conceitos básicos da Física, aliados a estimativas de ordem de grandeza feitas sobre modelos simples, podem ser de grande valia na compreensão de fenômenos complexos. No contexto em pauta, isso obviamente contrasta com a enorme massa de dados que alimentam os cálculos geofísicos “profissionais”, provenientes de observatórios sismológicos espalhados pelo globo. Especificamente, no tocante ao fenômeno tsunami considerado, vimos que suas características físicas básicas (energia, comprimento de onda) puderam ser estimadas tendo em conta apenas três escalas de

comprimento (L , W , d) e uma escala de tempo (τ_r) (ou talvez duas, se incluirmos o tempo de duração do terremoto).

Como consideração final, permita-me caro leitor, tecer uma reflexão em um contexto mais amplo. Afinal, esta também é uma publicação formativa, não apenas técnica.

Toda a comparação feita, na mídia e também aqui, com a bomba de Hiroshima, mostra não somente a descomunal disparidade entre as forças da natureza e aquelas colocadas em ação pelo homem. Falamos de 20 mil ou 30 mil bombas de Hiroshima, esquecendo-se de mencionar que uma só, aquela efetivamente lançada pelo homem no final da Segunda Grande Guerra, matou 200 mil pessoas, número comparável ao da tsunami, metade delas em apenas um minuto, e numa área muito menor [26]. Donde se conclui que a estupidez humana ainda supera de longe qualquer cataclisma da natureza.

Agradecimento

Quero registrar aqui meu agradecimento ao árbitro, que me proporcionou a oportunidade de revisar o artigo após o aparecimento da edição da revista Science dedicada ao assunto.

Referências

- [1] The U.S. Geological Survey Website, <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/> (acess. 8/9/05).
- [2] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan, <http://staff.aist.go.jp/kenji.satake/Sumatra-E.html> (acess. 8/9/05).
- [3] University of Washington, Earth and Space Sciences, <http://www.geophys.washington.edu/tsunami/general/physics/physics.html> (acess. 18/1/05).
- [4] Para uma simulação desse caso hipotético, acessar <http://currents.usc.edu/02-03/06-02/tsunami.html> (acess. 9/9/2005).
- [5] Folha de São Paulo, Cad. Especial, domingo, 9/1/05.
- [6] Veja, ed. 1886 (seção ‘Internacional’), de 5/1/05.
- [7] <http://www.flashespace.com/html/tsunami.htm> (acess. 9/9/05).
- [8] T. Lay *et al.*, Science 308 (2005) 1127.
- [9] U.S. Navy, The Naval War College Review, <http://www.nwc.navy.mil/press/Review/2001/Spring/art1-sp1.htm> (acess. 2/2/05).
- [10] W.D. Smith, 1998, Units, Physical Constants and Data, http://www.math.temple.edu/wds/homepage/physcons_tsmmap (acess. 2/2/05).
- [11] Apolo11.com (página em português), <http://www.apolo11.com/tsunamiindo nesia2004.php> (acess. 9/9/05).
- [12] <http://www.cnn.com/2005/TECH/science/05/19/sumatra.quake/> (acess. 9/9/05).
- [13] C.J. Ammon *et al.*, Science 308, 1133 (2005).
- [14] R. Bilham, Science 308, 1126 (2005).
- [15] Para um sumário com figuras dos artigos da Science citados, ver <http://www.andaman.org/mapstsunami/2earthquake/2earthquake.htm> (acess. 10/9/2005).
- [16] The U.S. Geological Survey, <http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatraEQ/tectonics.html> (acess. 9/9/05).
- [17] Caltech’s Seismological Laboratory, <http://www.gps.caltech.edu/jichen/Earthquake/2004/aceh/aceh.html> (acess. 9/9/05).
- [18] Istanbul Technical University, <http://www.geop.itu.edu.tr/taymaz/sumatra/> (acess. 9/9/2005).
- [19] Justificativa do fator 1/2: O leitor se lembrará da expressão mgh para a energia potencial de uma partícula de massa m a uma altura h do solo. No caso do bloco de água de altura d , é preciso considerar uma distribuição uniforme de massa e integrar. O resultado, é como se toda a massa do bloco de altura d estivesse concentrada em uma placa fina a uma altura $d/2$.
- [20] Em princípio se poderia distinguir d , a altura de uma “corcova” na superfície do mar, de D , o levantamento no solo do fundo do oceano. No caso em pauta, contudo, o tempo de 4 min é muito curto para que haja um escoamento apreciável da água levantada, e ficamos praticamente com $d = D$.
- [21] T.E. Faber, *Fluid Dynamics for Physicists* (Cambridge U.P., Cambridge, 1995).
- [22] F.S. Crawford, *Berkeley Physics Course* (McGraw-Hill, New York, 1965), v. 3.
- [23] <http://indianocean.free.fr/faq.htm> (acess. 23/1/05).
- [24] <http://www.noanews.noaa.gov/stories2005/s2365.htm> (acess. 13/9/05).
- [25] <http://www.estadao.com.br/internacional/noticias/2005/jan/02/22.htm> (acess. 12/9/05).
- [26] The Official Homepage of Hiroshima Peace Memorial Museum, <http://www.pcf.city.hiroshima.jp> (acess. 24/1/05).