

F129 – Estudo de Crateras: Lei de Escala¹

Apresentação

Neste experimento soltamos uma esfera de alturas diferentes sobre uma caixa de areia e medimos os diâmetros das crateras de impacto formadas na areia. O objetivo da experiência é descrever a variação do diâmetro das crateras em função da energia cinética da esfera no momento do impacto. Embora este experimento seja uma simplificação sobre a formação de crateras por impacto de corpos celestes ocorridas contra o nosso planeta, a Lua e outros planetas do sistema Solar, ele possibilita o estudo em situação controlada de possíveis mecanismos agindo durante estes impactos. Permite ainda que ampliemos um pouco o entendimento sobre o nosso planeta e o sistema solar a respeito de fenômenos que são raros ou muito raros, mas que podem ter mudado de forma drástica a vida em nosso planeta.

Várias evidências levaram o físico Luis Alvarez (vencedor do prêmio Nobel) a formular em 1980 a hipótese de que um asteroide de cerca de 16 km de diâmetro caiu na província de Yucatan, México, formando a cratera Chicxulub, com cerca de 180 km de diâmetro, cujo material pode ser colhido e datado, resultando em uma idade de cerca de 65 milhões de anos para o impacto. A enorme energia liberada foi estimada em mais de 100 milhões de Megatons de TNT (ou 100.000 milhões de kilotonnes de TNT, sendo que a bomba atômica lançada sobre Hiroshima durante a 2ª guerra mundial tinha “apenas” 20 kilotonnes). Este impacto levantou grande quantidade de pó para a atmosfera, o que por um longo período não permitiu a passagem da luz solar, fazendo com que a fotossíntese deixasse de ocorrer. Estima-se que este evento levou à extinção de 75% dos animais e plantas existentes sobre a face de nosso planeta àquela época. Todos os animais de grande porte, incluindo os dinossauros, não resistiram.

A Fig. 1 mostra a frequência com que os corpos celestes atingem a Terra em função da energia liberada. Os corpos menores e que liberam menos energia no impacto são os mais frequentes. O impacto que ocorreu em Yucatan, comentado acima e denominado K/T nesta figura, é o mais energético registrado, tem a frequência de 1 em cada 100 milhões de anos, em média. Por outro lado, está documentado que um meteoro ou fragmento de cometa atingiu a região de Tunguska, Sibéria, veja no gráfico, em 30/06/1908. Presume-se que este corpo celeste explodiu a cerca de 5 a 10 km de altitude com a liberação de 5 a 10 Megatons de TNT de energia, causando a destruição de 2000 km² de floresta e gerando um terremoto de 5 graus na escala Richter. Eventos deste porte têm a frequência de 1 a cada 100 anos. Esta figura foi construída com dados de 190 crateras de impactos que ocorreram em nosso planeta nos últimos 290 milhões de anos, que puderam ser identificadas e datadas. Crateras mais antigas são apagadas por chuva, erosão, ventos, movimentos da crosta terrestre, etc.

¹ Versão adaptada da apostila “Descobrindo experimentalmente uma lei física”, de autoria do Prof. Luís E. E. de Araújo.

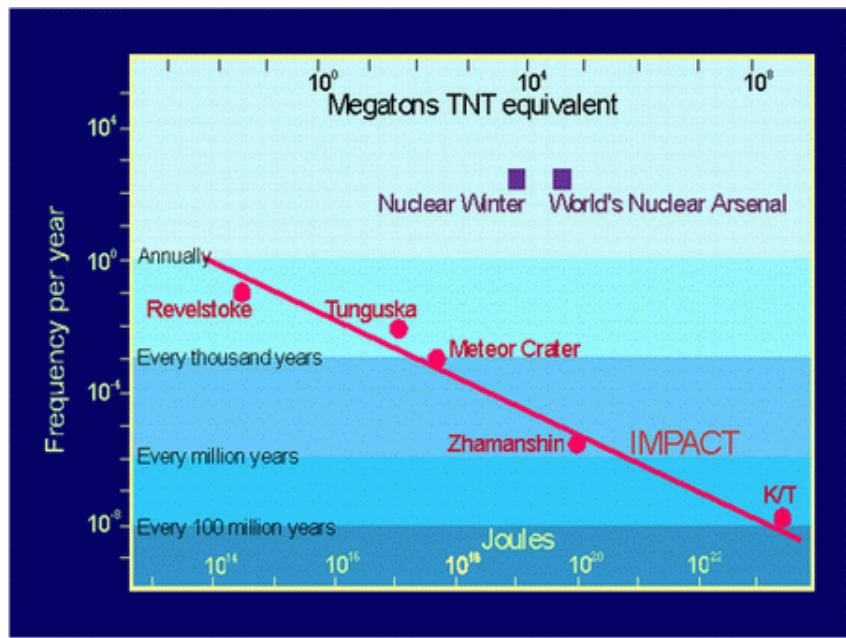


Figura 1. Frequência de colisões de meteoros com a Terra em função da energia liberada (retirada de: http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/IntrotoImpacts.html)

Por estar, astronomicamente falando, próximo a Terra e por sua enorme massa, Júpiter atua atraindo sobre si parte dos impactos de corpos celestes que alcançam a região dos planetas do sistema solar. De 1992 a 2016, ocorreram 6 impactos de grande escala (crateras de centenas de quilômetros) sobre Júpiter, 3 dos quais estão mostradas na Fig. 2.



Figura 2. Três dos seis impactos observados em Júpiter: Cometa Shoemaker-Levy 9 deixou uma série de enormes manchas (esquerda). A menos celebrada colisão de 2009 deixou a sua marca (centro). Recentemente, Gerrit Kernbauer da Áustria flagrou um impacto (direita). Credito: ESA/NASA/STScI; Anthony Wesley; Gerrit Kernbauer.

Investigando a Formação de Crateras

A relação matemática entre o diâmetro D da cratera e a energia cinética E da esfera no impacto pode ser determinada experimentalmente soltando-se a esfera sobre uma caixa

de areia a partir de alturas variadas e medindo-se o diâmetro da cratera para cada altura h .

Material (kit a ser retirado na Biblioteca do Instituto de Física): recipiente plástico com areia, fita métrica, régua plástica, esfera de neodímio com massa de 16,3829 g medida em uma balança digital cuja menor medida é 0,0001 g e diâmetro de $(15,85 \pm 0,05)$ mm medido com paquímetro, e bola de gude com massa de 5,0624 g medida em uma balança digital cuja menor medida é 0,0001 g e diâmetro de $(15,80 \pm 0,05)$ mm medida com paquímetro.

Objetivo Específico:

O objetivo específico deste experimento é responder às seguintes perguntas:

- Qual é a equação matemática que relaciona o diâmetro D da cratera com a energia cinética E da esfera no momento do impacto? Essa é a parte mais importante dessa atividade.
- Baseado na análise dos dados coletados, você consegue identificar no seu experimento o mecanismo mais provável através do qual a energia da esfera é gasta ao impactar com a areia: na deformação da areia ou na ejeção de material? **Dica:** Leia o artigo: *Crater formation in the laboratory: An introductory experiment in error analysis*, que está disponível no ambiente Moodle. Veja também o vídeo sobre a apresentação do experimento de formação de crateras disponível no Moodle.

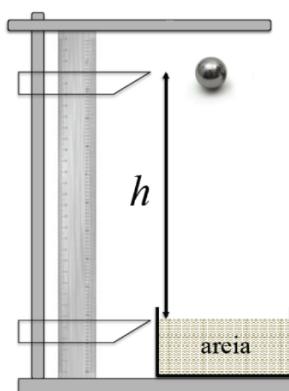


Figura 3. Esquema qualitativo da montagem experimental.

Observações Importantes sobre o Procedimento Experimental Adotado na Coleta dos Dados:

- A caixa plástica foi completamente preenchida com areia.
- Para que haja a formação das crateras, é necessário que a areia fique no sol para secar antes de as esferas serem soltas sobre ela.
- A altura h em que a esfera foi solta do repouso foi medida em relação ao nível da areia na caixa e não em relação ao tampo da bancada ou chão do laboratório.
- Devem ser desconsideradas as medidas das crateras que não pareçam ser esféricas. Em particular, não use medidas das crateras que estejam em contato com a parede da caixa plástica. Para aumentar a reproduzibilidade da cratera, procure fazer com que a esfera sempre caia próximo à região central da caixa.
- Medir o diâmetro D da cratera (em dois ou três ângulos diferentes) conforme a figura

abaixo. A esfera não deve ser retirada da areia para fazer a medição de modo a não perturbar a cratera formada.

- Para melhorar a visualização da cratera, iluminar (com celular) de forma rasante.
- Entre lançamentos da esfera, cavar a areia para descompactar e desfazer a cratera anterior. Chacoalhar a caixa gentilmente de modo a nivelar a areia. Não compactar a areia.
- Embora a fita métrica tenha 1,5 metros você pode desenvolver um procedimento para abandonar a esfera de alturas maiores. Quanto maior a altura máxima utilizada, mais preciso será seu resultado (cuidado para não quebrar a esfera de neodímio deixando que ela se choque com uma superfície muito dura).

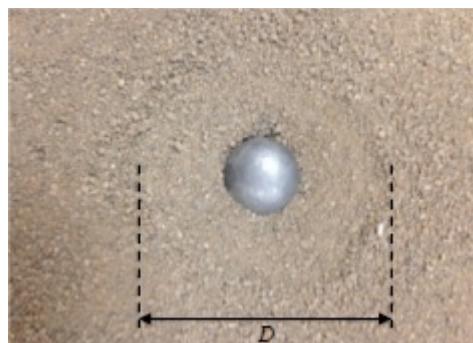


Figura 4. Exemplo de cratera formada pela queda da esfera metálica.

Análise para ser feita com a esfera de neodímio e com a bola de gude:

1. Calcule a energia cinética E no momento do impacto em função da altura h em que a esfera foi solta do repouso acima do nível superior da areia. Use $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Apresente uma tabela do diâmetro D da cratera em função da energia cinética E no momento do impacto com todas as grandezas no Sistema Internacional de Unidades.

2. Faça, à mão, um gráfico em papel milimetrado de D em função de E no Sistema Internacional de Unidades. Um gráfico para a esfera de neodímio e outro para a bola de gude.

3. Em uma folha de papel log-log, faça um gráfico de D em função de E novamente no Sistema Internacional de Unidades. (Observação: Em ambos os gráficos, o eixo horizontal é E e o eixo vertical é D.) Um gráfico para a esfera de neodímio e outro para a bola de gude.

Comentário: A partir dos seus gráficos, você deve tentar identificar uma relação entre as grandezas D e E. Note que há casos em que esta relação será desconhecida, pois pode não existir um modelo teórico para o fenômeno estudado. Muitas vezes, suspeitamos que as duas grandezas seguem uma relação do tipo Lei de Escala: $D = kE^n$, mas desconhecemos o valor das constantes k e n. Observe o seu gráfico log-log. Os valores experimentais aparecem se distribuir ao longo de uma reta? Se a resposta à pergunta for sim, então é bem possível que as duas grandezas experimentais D e E se relacionem através de uma Lei de Escala. Se a resposta for não, então a relação entre elas provavelmente é de outro tipo.

4. A partir da análise visual do gráfico log-log, determine o expoente “n” e a constante de proporcionalidade “k” da Lei de Escala $D = kE^n$ que modela a formação da

cratera. Isso deve ser feito separadamente para a esfera de neodímio e para a bola de gude. Não é necessário determinar Δk e Δn . Obter os valores de “k” e de “n” é o principal objetivo dessa atividade. Apresente seus valores numéricos com unidades (quando apropriadas) e com 2 algarismos significativos. O valor de “n” encontrado é mais consistente com a formação da cratera por deformação ou ejeção de material conforme o artigo citado acima? Justifique seu raciocínio.

5. A partir dos coeficientes obtidos dos dados experimentais, tente comparar com os dados de uma cratera real. A cratera de Yucatan, mencionada na introdução, apresenta um diâmetro de aproximadamente 180 km. Considerando seus dados experimentais e o diâmetro desta cratera, qual seria a sua estimativa da energia cinética do asteroide que deu origem a essa cratera no momento de sua colisão? Compare este resultado com o artigo *“Size and morphology of the Chicxulub impact crater”* que pode ser encontrado no Moodle. Lembre-se de citar corretamente a referência. E tente pensar também nas dificuldades de se medir diâmetro e inferir a energia liberada num impacto ocorrido há muitos milhões de anos, cuja assinatura foi se apagando ao longo do tempo devido a vários processos da natureza. Faça uma discussão sobre isso.

6. Observações: Nesse relatório não é necessário fazer cálculos de propagação de incertezas. Na sua análise discuta quais são as principais fontes de incerteza nessa experiência, ou seja, quais são as incertezas mais importantes que podem afetar nas estimativas dos valores de “k” e de “n”. Não é para listar todas as fontes de incerteza, apenas as que considera mais importantes.

Relatório

O relatório deve ser elaborado seguindo o padrão adotado até aqui na disciplina e descrito em “Formato do relatório”. Antes de começar a escrever, organizem os dados em tabelas. Os gráficos devem ser confeccionados à mão. Façam as análises pedidas no roteiro e identifiquem os principais resultados. Quaisquer dúvidas devem ser tiradas com os professores e monitores da disciplina antes da entrega do relatório.

Bibliografia

Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. e Michel, H. V., Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction, Science, Volume 208, páginas 1095-1108 (1980).

Amato, J. C. e Williams, R. E., Crater formation in the laboratory: An introductory experiment in error analysis, Am. J. Phys., Volume 66, páginas 141-143 (1998).

Halliday, Resnick e Walker. Fundamentos da Física, Volume 1, editora LTC.

Morgan et al. (1997). Size and Morphology of the Chicxulub impact crater. Nature, Vol. 390, páginas 472-476.