

4º Trabalho Prático: DETERMINAÇÃO DA LEI DE ESCALA NA FORMAÇÃO DE CRATERAS DE IMPACTO

1. Introdução

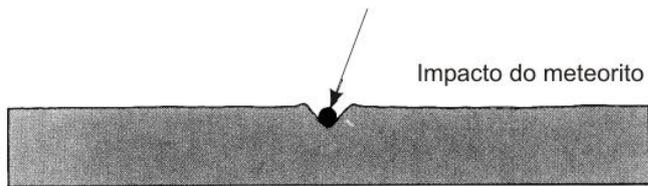
Todos os planetas e luas do sistema solar (com superfície sólida) apresentam evidências de crateras produzidas pelo impacto de meteoritos e/ou cometas. A formação de crateras de impacto é, assim, um processo universal e a exploração da Lua veio mostrar que esse processo foi fundamental na formação e desenvolvimento dos planetas. De facto, como a figura 1 mostra, a Lua encontra-se crivada de bilhões de crateras de impacto cuja dimensão varia desde o minúsculo orifício detetável em amostras de rocha até às gigantescas bacias circulares com centenas de quilómetros de diâmetro.

Na página seguinte (figura 2) pretende-se ilustrar esquematicamente o processo de formação de uma cratera produzida pelo impacto de um meteorito. Ao chocar com a superfície do planeta, a energia cinética do meteorito é quase instantaneamente transferida para o solo sob a forma de uma onda de choque que se propaga para baixo e para fora da zona de

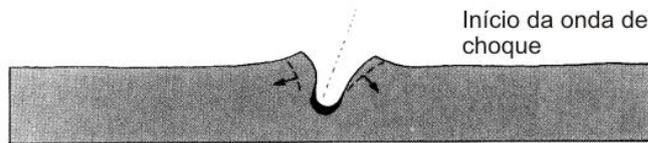


Figura 1 - A superfície da Lua mostra 2 paisagens contrastantes: i) as terras altas densamente perfuradas por crateras; ii) as planícies escuras formadas por gigantescos mares de lava.

impacto. A esta onda inicialmente compressiva segue-se uma onda de rarefação gerada pela descompressão da rocha. Esta descompressão brusca provoca a ejeção do material a partir da superfície segundo trajetórias balísticas, tal como numa explosão. O material fragmentado acumula-se em torno da cratera formando um tapete de ejeta e, em alguns casos, pode desenhar um sistema de raios (como na Lua). O ressalto da rocha no ponto de impacto pode originar um pequeno pico central e os bordos da cratera podem ser invertidos. As paredes da cratera quase verticais colapsam facilmente preenchendo o interior da cratera. Em certos casos, quando o diâmetro da cratera é da ordem da centena de km, este colapso pode originar um sistema de múltiplos anéis de elevações e depressões. A cratera e o ejeta formados pelo impacto são testemunhos geológicos deste processo catastrófico, podendo vir a ser parcial ou totalmente obliterados pela evolução geológica posterior. No caso da Lua, a ausência de agentes erosivos e de tectónica de placas permitiu que o registo dos impactos na Lua se mantivesse quase inalterável desde os primórdios da sua origem até aos dias de hoje.



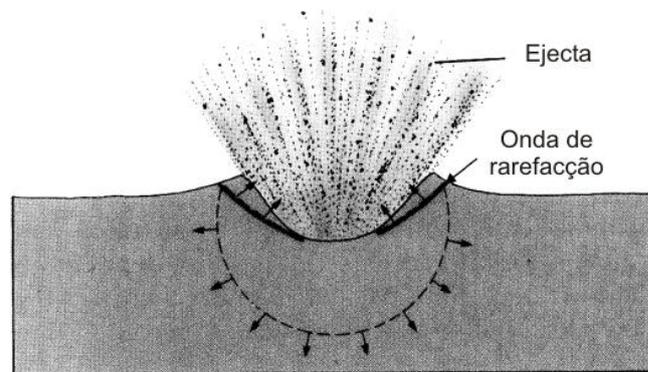
A O impacto do meteorito causa a fracturação instantânea da rocha, a sua fusão e metamorfismo parcial



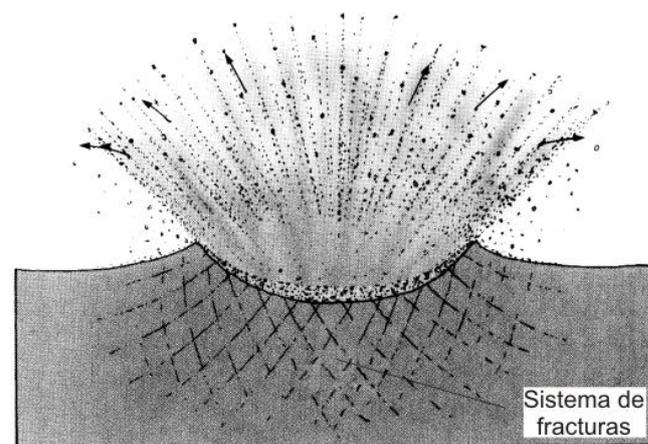
B Uma onda de choque propaga-se para baixo e para fora do ponto de impacto



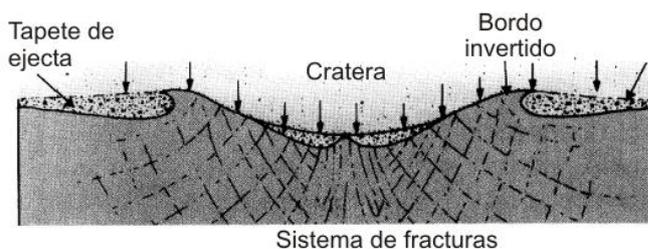
C A onda de choque expande-se



D A onda de choque reflecte-se para a superfície na forma de uma rarefacção. A cratera começa a formar-se e o material é fragmentado. O resultado é semelhante ao produzido por uma explosão.



E A rocha fragmentada é atirada em todas as direcções para cima e para fora. A rocha sólida autóctone é fracturada e deformada iniciando-se o desenvolvimento do rebordo elevado da cratera.



F O bordo da cratera pode ser invertido e um pico pode-se desenvolver no centro da cratera. As partículas do ejecta caem sobre a superfície formando um manto de detritos e podendo desenhar um sistema de raios (como na Lua).

Para além das crateras distinguem-se na superfície da Lua extensas superfícies lisas que são os mares. Estes mares foram identificados com tendo resultado de extensas extrusões de basalto que terão ocorrido entre 3 e 4 bilhões de anos atrás. A atividade tectono-vulcânica parece ter cessado há 3 milhões de anos. A ausência de um grande número de crateras de impacto sobre os mares, por contraste com outras áreas da Lua (ver figura 1), mostra que o início da vida da Lua foi um período de intenso bombardeamento meteorítico, com mais de 4 bilhões de anos de idade. Esta observação sugere que no sistema solar luas e planetas se terão formado por acreção, isto é, por um processo em que vários corpos colidem sucessivamente para dar origem a um corpo com dimensões planetárias. A energia libertada na acreção pelos impactos sucessivos teria sido suficiente para fundir as camadas externas da Lua e dar assim origem à sua diferenciação em camadas de diferente densidade. Ao processo de acreção e diferenciação seguiu-se o período de intenso impacto de grandes objetos celestes, testemunhado hoje em dia pelas gigantescas crateras multi-anéis existentes na Lua. De há 3 milhões de anos até ao presente, a superfície da Lua regista uma atividade de impactos reduzida, mostrando que no sistema solar o processo de agregação e desenvolvimento planetário terá absorvido a maior parte dos asteroides originais.

No planeta Terra a ação dos agentes erosivos e a Tectónica de Placas apagaram quase por completo os traços do período primordial da sua evolução como planeta, quando a Terra, tal como a Lua, terá estado sujeita ao intenso bombardeamento de meteoritos. Comparado com esse período, vivemos hoje em dia uma época muito mais calma, o que não quer dizer que não haja impactos e que estes não tenham efeitos catastróficos sobre a Vida na Terra. O exemplo mais famoso é sem dúvida o impacto de Chicxulub, na Península do Iucatão no México que terá coincido com a extinção dos dinossauros. Esta catástrofe terá aberto o espaço ecológico necessário para o desenvolvimento dos Mamíferos dos quais o Homem descende. De facto, terá havido um período de extinção maciça de espécies há cerca de 67 milhões de anos, na passagem do Cretácico para o Terciário, coincidindo com uma anomalia de irídio no registo geológico dessa fronteira, resultado da desagregação do meteorito de Chicxulub.

Apesar de raro, a repetição de um tal evento destruidor não é impossível, como o mostram o acontecimento de Tunguska na Sibéria em 1908 (um meteorito de algumas dezenas de metros de diâmetro terá explodido no ar a pouca distância do solo) ou o choque do cometa Shoemaker-Levy 9 com o planeta Júpiter em Julho de 1994. Estima-se que o impacto de um meteorito capaz de produzir uma cratera de 10 km de diâmetro pode ocorrer todos os 10.000 anos e um evento como Chicxulub se pode repetir todos os 100 milhões de anos. À escala da vida humana a probabilidade parece ser bastante baixa e por isso o risco de impacto é normalmente desprezado quando comparado com outros desastres naturais como sismos, cheias ou ciclones tropicais. Para ter uma ideia do risco de impacto, usaremos como termo de comparação a vida de uma pessoa que dura 50 anos e que todas as 52 semanas de cada ano joga com uma chave no totoloto, escolhendo 6 números de um total de 49 possíveis. Pois bem, a probabilidade de esta pessoa vir a ser afetada durante a sua vida por um impacto com a dimensão de Chicxulub é o dobro da probabilidade que ela tem de ganhar o totoloto nas 2600 semanas que terá jogado. E no entanto as pessoas continuam a jogar no totoloto mas não olham para o Céu com apreensão...

De facto, há autores que consideram os impactos de meteoritos como o maior risco natural que o homem tem de enfrentar, apesar da sua raridade. A importância e multiplicidade dos efeitos geológicos que acompanham os grandes impactos, tem ainda inspirado alguma comunidade científica marginal que considera serem esses impactos uma teoria completamente alternativa à tectónica de placas para explicar a geologia e geografia da superfície terrestre. Segundo os seus

defensores, a teoria MI (de *Meteor Impact*) é uma teoria explicativa da Terra segundo a qual apenas a energia exterior, isto é, a energia do Sol e dos impactos de meteoritos, é suficiente para modificar a face da Terra. Isto por oposição à tectónica de placas que exige a existência de "misteriosas" fontes interiores de energia para se justificar.

2. Objetivo e dispositivo experimental

Olhando para o esquema que traduz o impacto de um meteorito, podemos observar que a energia cinética do impactor se deve dissipar por 5 processos: i) aquecimento da rocha e do impactor; ii) criação de área à superfície do planeta; iii) deformação e fracturação da rocha+impactor; iv) ejeção do material fraturado; v) propagação de ondas sísmicas. A questão que se coloca no presente trabalho é determinar a lei de escala entre o diâmetro D da cratera e a Energia cinética E do impactor e aprender sobre o que nos diz, essa lei quanto ao principal processo energético envolvido.

Se o processo dominante de dissipação de energia for a deformação plástica e fracturação da rocha, então a energia E deve ser proporcional à quantidade de matéria. Para um planeta com uma densidade superficial homogénea, a massa M é proporcional ao Volume e este é proporcional ao cubo do diâmetro. O diâmetro da cratera deve por isso ser proporcional à raiz cúbica da energia do impactor:

$$\frac{D}{D_o} = \left(\frac{E}{E_o} \right)^{1/3} \quad (1)$$

Por outro lado, se for a ejeção do material fraturado o processo que absorve a maior parte da energia, então a energia cinética do impactor deve-se converter na energia potencial gravítica necessária para elevar um volume $V \propto D^3$ de uma altura pelo menos igual à profundidade da cratera. Para uma cratera circular esta profundidade é proporcional ao diâmetro, e por isso deve-se ter o diâmetro proporcional à raiz quarta da energia:

$$\frac{D}{D_o} = \left(\frac{E}{E_o} \right)^{1/4} \quad (2)$$

Conhecendo a lei de escala experimental é então possível distinguir qual dos dois processos é dominante na dissipação da energia cinética do impactor.

Admitindo que a mesma lei de escala é aplicável às grandes crateras, poderemos tentar determinar a energia do meteorito que terá produzido a cratera de Chicxulub, com um diâmetro estimado entre 170 e 300 km. Sabendo que a velocidade dos meteoritos que chocam com a terra é da ordem de 20 a 40 km/s, poderemos determinar a massa do meteorito e o seu diâmetro, admitindo por exemplo que ele é constituído essencialmente de ferro, $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$.

Estudos detalhados de crateras de impacto mostram que a energia do impactor não é o único parâmetro a ter em conta na determinação do diâmetro da cratera. Tem-se, por exemplo, a seguinte expressão empírica válida para crateras de diâmetro inferior a 3 km

$$D = 0.76 \left(\frac{Y}{\rho_t} \right)^a \left(\frac{v_a}{v_i} \right)^{0.087} (\cos\theta)^{0.44} \left(\frac{\rho_i}{\rho_t} \right)^{0.073} \text{ km} \quad (3)$$

onde Y é a energia cinética do impactor em mega-toneladas de TNT ($1\text{Mt} = 4.2 \times 10^{15} \text{ J}$), v_a é

uma velocidade de referência (20 km/s) e v_i é a velocidade do impactor, θ é o ângulo de impacto medido a partir da vertical, ρ_i e ρ_t são respectivamente as densidades do impactor e do terreno. Neste trabalho prático tentaremos obter o valor adequado para o expoente a .

Acessoriamente, e uma vez que a densidade do impactor é um fator que influencia o diâmetro da cratera de impacto, iremos também determinar densidades de materiais maciços e a densidade e porosidade de uma areia. Para um material maciço, a densidade ou massa específica define-se por

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

onde m é a massa e V o volume que esta ocupa. Para medir massas usaremos uma balança e para medir volumes uma proveta graduada. Uma rocha porosa é formada por uma matriz (m) na qual existem espaços vazios (v), comunicando uns com os outros e que por isso podem ser ocupados por um fluido. A porosidade da rocha porosa define-se como a fração do volume que não está ocupada pela matriz (os vazios)

$$f = \frac{V_v}{V_v + V_m} \quad (5)$$

e exprime-se normalmente em percentagem. A fração do volume ocupada pela matriz obtém-se então como

$$\frac{V_m}{V_m + V_v} = 1 - f \quad (6)$$

Se for ρ_m a densidade da matriz e ρ_v a densidade do fluido que preenche o espaço livre, então a densidade da rocha porosa vem dada por

$$\rho = \frac{m_m + m_v}{V_m + V_v} = \frac{\rho_m V_m + \rho_v V_v}{V_m + V_v} = (1 - f) \rho_m + f \rho_v \quad (7)$$

3. Leitura Complementar e Referências Bibliográficas

Física Experimental - Uma Introdução, de Abreu et al., 1994.

Hamblin, W. K. and Christiansen E. H., 1998. *Earth's Dynamic Systems (8th edition)*, Prentice Hall, pp 678-683.

Toon et al., 1997. Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets, *Reviews of Geophysics*, **35**, pp 41-78.

Butler, M. D., 1996. TheMI theory: A reply and further comments, *The Leading Edge*, May, pp 384-391.

Amato, J. C. and Williams, R.E., 1998. Crater formation in the laboratory: An introductory experiment in error analysis, *Am. J. Phys.*, **66**(2), pp 141-143.

4º Trabalho Prático: DETERMINAÇÃO DA LEI DE ESCALA NA FORMAÇÃO DE CRATERAS DE IMPACTO

1. EQUIPAMENTO NECESSÁRIO

- 4 esferas de materiais e massas diversas
- Suporte triangular de madeira
- Caixa com areia fina
- Lâmpada para iluminação rasante
- Balança
- Craveira e fita métrica
- Proveta graduada
- Gobelet
- Bisnaga de pera

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Notas:

- 1) Registe todas as medições no seu caderno de bordo.
- 2) Todos os valores medidos ou calculados devem ser apresentados com a despectiva incerteza.
- 3) Inclua sempre as unidades de cada valor medido ou calculado.

2.1 Medição da densidade de duas esferas maciças

2.1.1 Meça com a craveira o diâmetro das esferas que tem à sua disposição. Faça uma única medição para cada e indique o erro de leitura. No caso da esfera de ferro meça também o diâmetro e altura da carrapeta.

2.1.2 Meça com a balança a massa de cada das esferas.

2.2 Determinação da densidade e porosidade de uma areia

Nesta secção pretende-se determinar a densidade da matriz e a porosidade da areia fina que tem à sua disposição.

2.2.1 Meça a massa da proveta vazia, limpa e seca.

2.2.2 Coloque na proveta graduada um volume significativo de areia solta. Meça o volume da areia seca e meça a massa do conjunto areia+proveta.

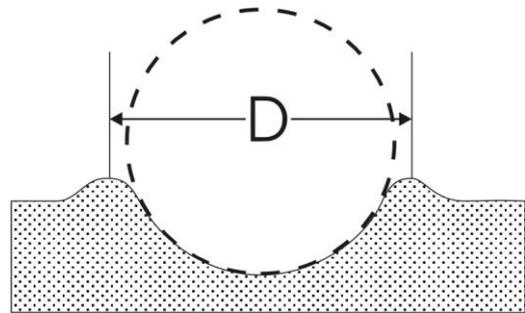
2.2.3 Use a bisnaga de água para obter a areia *completamente* ensopada, *sem nenhuma água a cobrir*. Meça o volume da areia saturada e a massa do conjunto proveta+areia+água.

2.3 Variação dos estimadores do erro estatístico com o número de medições

Quando se realizam N medições da mesma grandeza e se pretende avaliar o erro estatístico é aconselhado fazer a distinção entre 2 situações: A) $N < 10$; B) $N \geq 10$. Na situação A, deve-se usar para estimador do erro o maior dos desvios em relação à média δ_i^{\max} ou a média dos desvios $\bar{\delta}$. Na situação B é suficiente usar o desvio padrão da média s_m .

Para compreender a razão desta regra iremos realizar uma mesma experiência e acompanhar a variação dos estimadores do erro com o número de medições. A experiência a realizar é a medição do diâmetro da cratera de impacto produzida na areia pela queda de uma esfera.

A figura ao lado ilustra a forma típica de uma cratera de impacto e indica qual deve ser a referência a usar para medir o seu diâmetro: o bordo elevado da cratera. Para facilitar a leitura do diâmetro pode usar uma lâmpada com luz rasante. No fim de cada lançamento deve alisar a areia de modo a homogeneizar a areia.



2.3.1 Coloque o apoio de madeira contra a parede na posição 2, usando as marcas como referência. Coloque a esfera de ferro na posição de lançamento. Deixe cair a esfera sobre a caixa com areia e meça o diâmetro da cratera. Antes de cada lançamento homogeneíze a areia. Repita a experiência 16 vezes e com os resultados construa uma tabela como a seguinte.

N.	1	2	3	4	5	6	7	8
Diam.								
\bar{D}	-----							
s_m	-----	-----	-----					
δ_i^{\max}	-----							
$\bar{\delta}$	-----							
N.	9	10	11	12	13	14	15	16
Diam.								
\bar{D}								
s_m								
δ_i^{\max}								
$\bar{\delta}$								

2.4 Determinação da lei de escala na formação de crateras de impacto

Um corpo nas proximidades da superfície da Terra à altura h tem uma energia potencial gravítica dada pela expressão

$$E_p = mgh \quad (8)$$

onde g é a aceleração da gravidade. Se esse corpo for abandonado sem velocidade inicial, então ao chocar com a superfície toda a sua energia potencial se terá convertido em energia cinética (conservação da energia mecânica):

$$E = E_c = E_p \quad \text{ou} \quad E = \frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (9)$$

Esta é a energia que se encontra disponível para desencadear o processo de formação da cratera de impacto. Com 4 esferas diferentes, largadas de 4 alturas diferentes, teremos oportunidade de medir o diâmetro produzido por 16 energias distintas do impactor.

2.4.1 Comece por medir a altura do nível da areia em relação ao solo. Faça várias medições com a fita métrica.

2.4.2 Meça com a fita métrica a altura em relação ao chão de cada uma das 4 marcas feitas na parede.

2.4.4 Para cada esfera faça o lançamento de cada uma das 4 alturas e meça o diâmetro da cratera resultante. Cada altura deve ser *repetida 5 vezes*. Homogeneíze a areia após cada lançamento. Meça o diâmetro da cratera usando o seu bordo elevado como referência. Organize os dados obtidos, efetuando uma tabela para cada esfera como a que se segue.

Esfera 1 Massa =							
Lançam.	1	2	3	4	5	Média(*)	Erro(*)
Altura 1							
Altura 2							
Altura 3							
Altura 4							

(*) Secção 4

4. RELATÓRIO

Indique sempre a turma, o número e nome de cada aluno que constitui o grupo de trabalho assim como a data da realização do trabalho.

Em linhas gerais, o relatório deve ser uma exposição/relato escrito em que se descrevem e analisam todos os factos/dados recolhidos no decorrer de uma experiência. Os registos efetuados servem para responder aos objetivos que originaram a atividade experimental. Faz parte de um relatório o **RESUMO** (sucinto), a **DISCUSSÃO** e as **CONCLUSÕES**. Não se pretende uma introdução.

Em particular, este relatório deve responder às seguintes questões:

4.1 Usando os dados recolhidos em **2.1** calcule o volume de cada uma das esferas e o valor da

densidade dos materiais que as constituem. Indique a incerteza associada através da propagação de erros. Qual é o efeito da carrapeta na determinação da densidade da esfera de ferro?

4.2 Usando os valores obtidos em **2.2** e sabendo que a densidade da água vale 1.00 g/cm^3 , a densidade do ar vale $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, calcule:

- 1) A massa de areia;
- 2) A densidade da areia com os vazios preenchidos por ar;
- 3) O volume e massa de água que saturou a areia;
- 4) A densidade da areia com os vazios preenchidos por água;
- 5) A densidade da matriz da areia;
- 6) A porosidade da areia seca e saturada de água.

4.3 Usando os valores obtidos em **2.3** calcule vários estimadores do erro e organize os dados numa tabela como a apresentada.

4.4 Com esses dados apresente um gráfico da variação dos estimadores do erro em função do número de medições. Que pode concluir da evolução observada nesse gráfico? Comente.

4.5 Faça um outro gráfico com a variação do melhor estimador para o valor do diâmetro da cratera em função do número de medições. Represente as barras de erro adequadas e diga como as calculou. Comente.

4.6 Usando as medidas efetuadas em **2.4.1** calcule a altura média do nível da areia em relação ao solo, indicando a incerteza nessa medida.

4.7 Usando os dados recolhidos em **2.4.2**, determine a altura de lançamento das esferas em relação ao nível da areia para cada uma das 4 posições. Atendendo às dificuldades de posicionamento das esferas para o lançamento, faça uma estimativa realista do erro na medida da altura.

4.8 Calcule a média e o erro associado às medidas efetuadas em **2.4.3**. Organize os dados numa tabela como indicado nessa alínea. Indique justificando qual o método usado na estimativa do erro.

4.9 Usando os valores medidos para a altura e massa das esferas, calcule a energia de cada impactor. Com os valores dos diâmetros medidos (D) e a energia do impactor (E) construa uma tabela.

4.10 Pretende-se com os presentes dados determinar a lei empírica que relaciona o diâmetro da cratera com a energia do impactor:

$$\frac{D}{D_o} = \left(\frac{E}{E_o} \right)^a \quad \text{ou} \quad D = \frac{D_o}{E_o^a} E^a \quad \text{ou} \quad D = KE^a \quad (10)$$

Esta não é uma relação linear mas pode ser linearizável se aplicarmos logaritmos:

$$\ln(D) = \ln(K) + a \ln(E)$$

Num gráfico bi-logarítmico esta é a equação de uma reta $Y = A + BX$ em que a interseção na origem vale $A = \ln(K)$ e o declive vale o expoente que se pretende determinar $B = a$.

4.10.1 Com os dados da tabela anterior construa um gráfico do logaritmo do Diâmetro da cratera $\ln(D)$ em função do logaritmo da Energia do impactor $\ln(E)$.

- 4.10.2** Determine a melhor reta que se ajusta aos dados pelo método dos mínimos quadrados.
- 4.10.3** Usando os parâmetros da reta determine as constantes da lei empírica (10). Face aos resultados obtidos, diga justificando qual dos processos físicos é dominante na dissipação, da energia cinética do impactor: i) a deformação e fracturação da rocha; ii) a ejeção do material da cratera.

5 Problema (a apresentar em anexo ao relatório)

- a) Use a lei empírica determinada experimentalmente para calcular a energia cinética do impactor de Chicxulub, sabendo que a cratera tem um diâmetro de 200 km.
- b) Os asteroides embatem na Terra com uma velocidade entre 20 e 40 km/s. Usando o valor de 30 km/s como referência, calcule a massa do impactor de Chicxulub.
- c) Admitindo que o asteroide seria feito essencialmente de ferro $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ calcule o diâmetro do impactor de Chicxulub.
- d) Sabendo que as estimativas atuais apontam para um diâmetro do impactor de 20 km, tente encontrar razões que justifiquem o erro na sua estimativa anterior.
-