

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

### 1. Introdução

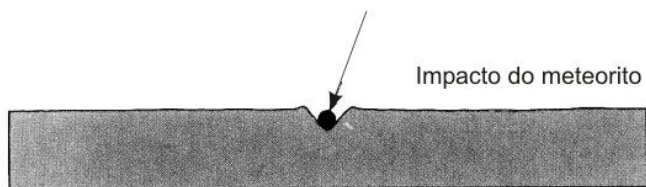
Todos os planetas e luas do sistema solar (com superfície sólida) apresentam evidências de crateras produzidas pelo impacto de meteoritos e/ou cometas. A formação de crateras de impacto é, assim, um processo universal e a exploração da Lua veio mostrar que esse processo foi fundamental na formação e 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

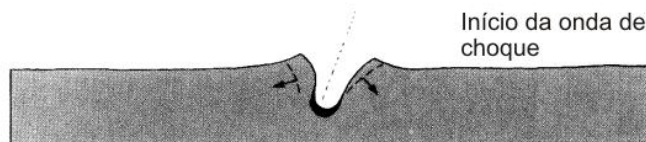


*Figura 1 - A superfície da Lua mostra 2 paisagens contrastantes: i) as terras altas densamente perfuradas por crateras; ii) as planícies escuras formadas por gigantescos mares de lava.*

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.



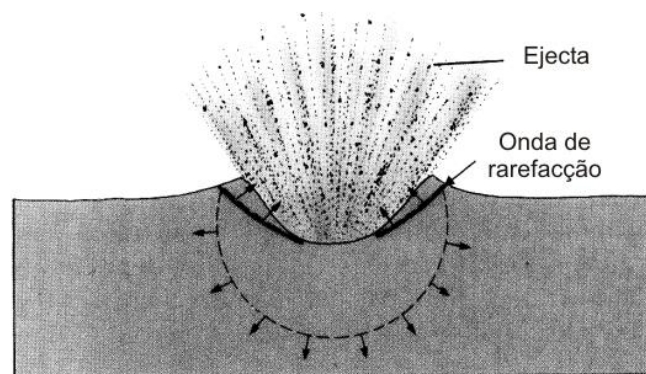
A O impacto do meteorito causa a fracturação instantânea da rocha, a sua fusão e metamorfismo parcial



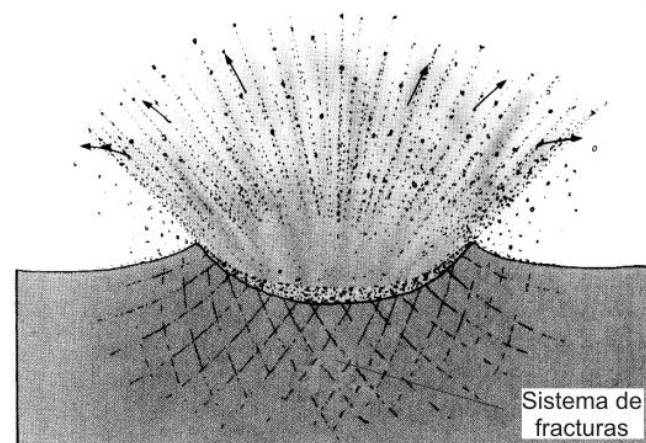
B Uma onda de choque propaga-se para baixo e para fora do ponto de impacto



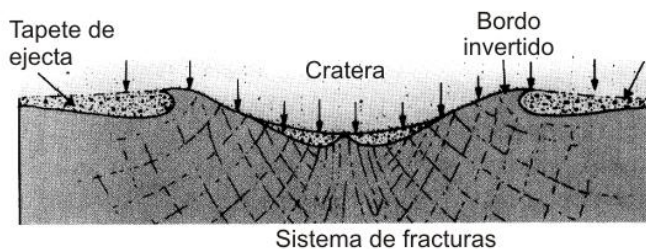
C A onda de choque expande-se



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,  $\theta$  é o ângulo de impacto medido a partir da vertical,  $\rho_i$  e  $\rho_t$  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  $\rho_m$  a densidade da matriz e  $\rho_v$  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.

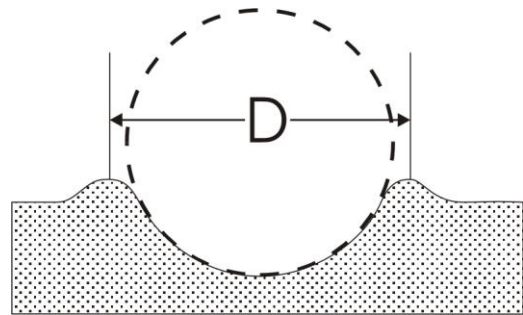
**2.2.3** Use a bisnaga de água para obter a areia *completamente* ensopada, *sem nenhuma água a cobrir*. Meça o volume da areia saturada e a massa do conjunto proveta+areia+água.

### 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  $\delta_i^{\max}$  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.								
$\bar{D}$	-----							
$s_m$	-----	-----	-----					
$\delta_i^{\max}$	-----							
$\bar{\delta}$	-----							
N.	9	10	11	12	13	14	15	16
Diam.								
$\bar{D}$								
$s_m$								
$\delta_i^{\max}$								
$\bar{\delta}$								

**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  $1.00 \text{ g/cm}^3$ , 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.
-