



Estimativa da energia liberada na explosão em Beirute

.....

Diogo Amaral de Magalhães

Instituto Federal Catarinense, Campus São Francisco do Sul, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

RESUMO

O artigo apresenta uma estimativa da energia liberada na explosão de Beirute. Para isso, é utilizada a técnica da análise dimensional e o Google Maps, obtendo-se a mesma ordem de grandeza dos dados oficiais. O resultado obtido é comparado com a energia liberada nas explosões de bombas atômicas, verificando-se que é significativamente menor do que as energias envolvidas nos episódios bélicos.

Palavras-chave: Beirute; análise dimensional; bombas atômicas

.....

1. Introdução

O mundo ainda está chocado com a explosão em Beirute, no Líbano, no dia 4 de agosto de 2020. Cerca de 2.750 toneladas de nitrato de amônio, produto utilizado como fertilizante e na fabricação de explosivos, foram responsáveis por uma das maiores tragédias da humanidade, com quase duas centenas de mortos e milhares de feridos.

Do ponto de vista da educação científica, muitas questões podem ser exploradas em diferentes níveis de ensino e profundidade. Qual é a natureza físico-química do nitrato de amônio e suas implicações para a sociedade contemporânea? Como criar um modelo físico-matemático para descrever explosões como essa? A explosão de Beirute foi tão poderosa quanto uma bomba atômica? Dentre muitas outras, como as que passam pela esfera política.

Neste pequeno texto, apresentamos uma estimativa da energia liberada nesse triste episódio. Para isso, lançamos mão da técnica da análise dimensional e utilizamos o Google Maps (gratuito). Comparamos os resultados com a explosão de bombas atômicas.

2. Comentários sobre a análise dimensional

A análise dimensional é um método investigativo que permite estimar ordens de grandeza e obter relações funcionais de dependência entre as grandezas relevantes para um dado problema. O princípio fundamental subjacente à técnica é o da homogeneidade, que impõe algumas restrições pa-

ra qualquer representação matemática: i) ambos os lados de uma equação devem ter a mesma dimensão; ii) se uma soma aparecer em uma função f , todos os termos que são somados (ou subtraídos) devem ter a mesma dimensão; iii) todos os argumentos de funções exponenciais, logarítmicas e trigonométricas, bem como de outras funções especiais que apareçam em f , devem ser adimensionais.

Ressaltamos que este trabalho não tem o objetivo de ensinar a técnica da análise dimensional;

para esse fim, o leitor não familiarizado pode procurar, por exemplo, o artigo de Trancanelli [1]. No entanto, apresentamos uma síntese do procedimento:

1. Identificar as grandezas físicas relevantes para o problema, construindo, assim, uma relação funcional do tipo $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$;
2. Escrever a grandeza de interesse como um produto de potências das outras grandezas físicas envolvidas, onde K é uma constante que não pode ser determinada pelo método, mas somente por meio da solução completa do problema por outros métodos;
3. Fazer o estudo das dimensões de todas as grandezas envolvidas e resolver o sistema de equações lineares.

No caso deste artigo, vamos considerar o comprimento, a massa e o tempo como as dimensões primitivas, as quais serão representadas, respectivamente, pelas letras L , M e T . Dessa forma, qualquer grandeza física poderá ser escrita em função dessas três.

#Autor de correspondência. diogo.magalhaes@ifc.edu.br

3. Equacionamento do problema

Autoridades e veículos de notícias mundiais têm divulgado que as 2,7 toneladas de nitrato de amônio foram convertidas em cerca de 1,1 quilotons de TNT durante a explosão.¹

Como pretendemos obter o valor da energia liberada na explosão do nitrato de amônio (E), precisamos identificar quais são as grandezas físicas relevantes. A partir de imagens extraídas de vídeos, podemos ler o tamanho da frente da onda (R) da explosão em função do tempo (t). Como o fato ocorreu no ar, a densidade volumétrica do ar (ρ) é outra grandeza relevante para o problema, ao passo que a pressão do ar ao redor da explosão pode ser ignorada. Dessa forma, podemos escrever a relação funcional:

$$E = E(\rho, R, t). \quad (1)$$

Escrevamos a energia como um produto de potências dessas três grandezas:

$$E = K\rho^a R^b t^c. \quad (2)$$

Assim, os números a , b e c devem ser determinados: eles vão nos dizer de que forma a energia depende dessas grandezas.

Em termos das dimensões primitivas, a dimensão de energia é dada por: $[E] = L^2MT^{-2}$. Por sua vez, as dimensões da densidade, do raio da onda de choque e do tempo transcorrido serão dadas, respectivamente, por: ML^{-3} , L^1 e T^1 . Dessa forma, substituindo na Eq. (2), temos o seguinte sistema de equações lineares para resolver:

$$\begin{aligned} L^2MT^{-2} &= (ML^{-3})^a(L^1)^b(T^1)^c, \\ \Rightarrow L^2MT^{-2} &= L^{-3a+b}M^aT^c. \end{aligned} \quad (3)$$

Este sistema de três equações tem solução é única: $a = 1$ (potência de ρ), $c = -2$ (potência de T) e $b = 5$ (potência de R). Logo, a energia, em termos da densidade do ar, do raio da onda de choque e do tempo, é dada pela seguinte expressão:

$$E = K \frac{\rho R^5}{t^2}, \quad (4)$$

lembrando que K não pode ser deduzida com esse método, mas seu valor não é significativo para nossa análise. Esse resultado foi obtido pelo físico G.I. Taylor quando ele estimou o valor da energia liberada na primeira explosão de uma bomba atômica em Trinity, Novo México, em 1945 [2].

A partir da Eq. (4), podemos obter uma estimativa da energia liberada na

explosão. O valor da densidade do ar é conhecida: $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, ao nível do mar. Resta-nos obter o valor de R para um dado t . Ressaltemos que se trata de uma aproximação: um estudo estatístico com vários valores de R e t diminuiria os erros intrínsecos à simplória abordagem deste texto. Vejamos.

4. Coleta dos dados e cálculo da energia da explosão

Foi utilizado o Google Maps para procurar um ponto de referência nas proximidades do porto e que estivesse visível no momento da explosão a partir de uma única perspectiva. Foi escolhido um prédio no próprio porto de Beirute, cujo tamanho é de 150 m, aproximadamente (Fig. 1)

O ponto de referência deveria estar nítido a partir de uma dada perspectiva. Assim, selecionei duas imagens de um mesmo vídeo,² de tal forma que a primeira revelasse o momento da explosão, definido como o primeiro sinal luminoso emitido no meio da fumaça (Fig. 2).

Após 1 s, aproximadamente, uma nova imagem foi extraída do mesmo vídeo, a partir da qual observamos uma circunferência com raio da ordem de cerca de 300 m – aproximadamente duas vezes o tamanho do ponto de referência (Fig. 3).

Portanto, considerando as aproximações $R \sim 300 \text{ m}$ e $t \sim 1 \text{ s}$ na Eq. (4), obtemos que a energia liberada na explosão de Beirute é aproximadamente $2,9 \times 10^{12} \text{ J}$, o que equivale a cerca de 0,7 quilotons de TNT.

5. Análise do resultado

O valor estimado para a energia que foi obtido neste trabalho ($E \sim 0,7$ quilotons de TNT) tem a mesma ordem de grandeza dos valores divulgados pela imprensa internacional. Trata-se de um resultado extremamente satisfatório, especialmente do ponto de vista didático. Em outras palavras, mesmo com as limitações instrumentais, o tratamento adotado neste texto foi capaz de obter um resultado razoável e coerente com os dados oficiais.

É instrutivo que os dados da explosão de Beirute sejam comparados com as energias liberadas pelas bombas atômicas, observando que o poder destrutivo das últimas é muito maior do que o poder energético do nitrato de amônio. A Tabela 1 é autoexplicativa.

Do ponto de vista químico, o nitrato de amônio é decomposto em vapor de água e óxido nítrico, o qual também se

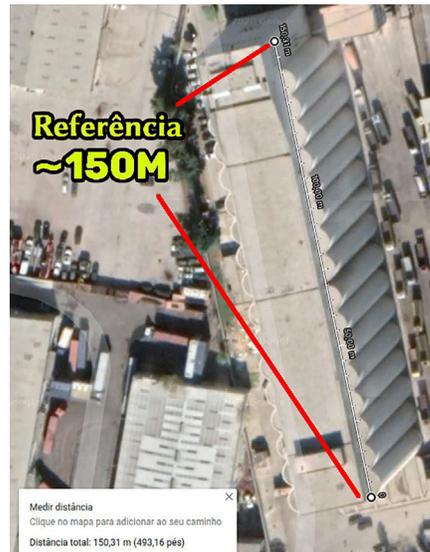


Figura 1 - Prédio localizado no porto de Beirute que foi escolhido como referência para estimativa das dimensões espaciais da explosão.



Figura 2 - Dimensão de referência no momento da explosão.

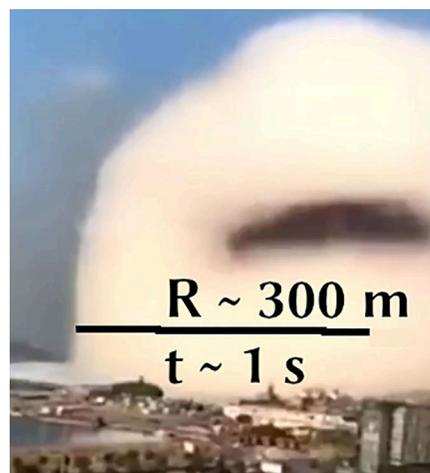


Figura 3 - Imagem extraída do vídeo após 1 s do momento da explosão, aproximadamente.

Tabela 1: Comparativo entre explosões de bombas nucleares e a de Beirute.

Explosão	Data	Carga explosiva	Massa da carga (kg)	Energia liberada (kt TNT)
Experiência Trinity	16/7/45	Plutônio	desconhecida	20-22 (oficial) / 25 (estimada [2])
<i>Little Boy</i> (Hiroshima)	6/8/45	Urânio	65	15
<i>Fat Man</i> (Nagasaki)	9/8/45	Plutônio	6,4	21
Beirute	4/8/20	Nitrato de Amônio	2750000	1,1 (oficial) / 0,7 (estimada)

decompõe em moléculas de gás oxigênio e nitrogênio. Essa reação química é caracterizada pela conservação da matéria e é essencialmente diferente do processo de explosão de uma bomba atômica. Essa última tem o seu poder destrutivo oriundo da fissão nuclear, em que há a ruptura de átomos de urânio (por exemplo) em átomos mais leves, que são bombardeados por nêutrons, dando origem a uma reação em cadeia com grande liberação de energia. Portanto, a maneira como a matéria se transforma é crucial para entendermos o poder energético das explosões.

6. Considerações finais

Neste breve texto, estimamos a energia liberada pela explosão ocorrida no porto de Beirute, Líbano, no dia 4 de agosto de 2020. O resultado obtido

(0,7 kt de TNT) mostra-se aceitável quando comparado com os que são divulgados (1 kt de TNT).

Utilizando o Google Maps para ter noções sobre as ordens de grandeza das dimensões espaciais envolvidas no episódio, a técnica da análise dimensional me permitiu chegar ao resultado aproximado de 0,7 quilotons de TNT. Embora a abordagem tenha suas limitações quanto à precisão das medidas, e também a respeito

do desconhecimento da constante multiplicativa K , o resultado é satisfatório quando comparado com os dados divulgados pela imprensa mundial: cerca de 1 quiloton. Em comparação com as bombas atômicas, a explosão de Beirute liberou uma energia significativamente menor do que as armas nucleares para uma carga explosiva consideravelmente maior.

Em comparação com as bombas atômicas, a explosão de Beirute liberou uma energia significativamente menor do que as armas nucleares para uma carga explosiva consideravelmente maior

Friso a potencialidade didática e pedagógica da análise dimensional. Trata-se de uma poderosa técnica que exige um tecnicismo matemático acessível para estudantes do Ensino Médio, inclusive. E, principalmente, a abordagem trabalha um aspecto central do pensamento crítico sobre a natureza da física, que é o entendimento das grandezas que são relevantes no estudo de um dado problema. O cientista, ao utilizar a técnica da análise dimensional, tem uma boa dica acerca do que esperar de suas pesquisas, ressaltando-se que o cálculo completo (incluindo o valor da constante K) é desenvolvido a partir da solução das equações dinâmicas do problema.

Por fim, destaco que episódios dessa natureza enriquecem o ensino crítico sobre a ciência e que a análise dimensional precisa ser reconsiderada como elemento obrigatório nos currículos.

Referências

- [1] D. Trancanelli, Revista Brasileira de Ensino de Física, **26**, e-2505 (2016).
 [2] <http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/people/codoban/PHY138/Mechanics/dimensional.pdf>.

Notas

¹O quiloton de TNT é uma medida de energia que representa o equivalente em TNT de energia liberada em explosões. 1 quiloton equivale a 4,184 GJ e indica a quantidade de energia libertada pela detonação de uma tonelada de TNT.

²Link do vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=QzptHbxgVt0&t=36s&pbjreload=101>.