



MODELIZAÇÃO DA ENERGIA LIBERADA NA EXPLOÇÃO DA BOMBA H NO ATOL DE BIKINI – UMA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ANÁLISE DIMENSIONAL

MODELING THE ENERGY RELEASED IN THE H-BOMB EXPLOSION AT BIKINI ATOLL – AN APPLICATION OF THE DIMENSIONAL ANALYSIS PROCESS

João Michels Cardoso¹, Márcio Antônio Fiori²

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v44p337-353.2025

RESUMO: A modelagem de eventos físicos frequentemente requer previsões matemáticas para a compreensão das grandezas que influenciam os fenômenos analisados. Esse conhecimento é essencial na formação de engenheiros, demonstrando que, mesmo com modelos simples, a Física pode explicar e prever eventos. Este estudo apresenta a análise dimensional como técnica de modelagem aplicada à estimativa da energia liberada pela bomba H em um teste nuclear no Atol de Bikini, em julho de 1954, e sua utilização em uma turma de Física II em um curso de Engenharia. Os resultados indicam que, apesar da sensibilidade a erros de medida, o modelo forneceu estimativas satisfatórias, próximas às calculadas pela Marinha americana. A abordagem em sala de aula se mostrou eficaz na promoção de uma aprendizagem significativa, crítica e aplicada.

PALAVRAS-CHAVE: Física; análise dimensional; modelização; bomba nuclear.

ABSTRACT: The modeling of physical events often requires mathematical predictions to understand the quantities influencing the analyzed phenomena. This knowledge is essential in engineering education, demonstrating that even with simple models, physics can explain and predict events. This study presents dimensional analysis as a modeling technique applied to estimate the energy released by the hydrogen bomb in a nuclear test at Bikini Atoll in July 1954, and its use in a Physics II class for engineering students. The results indicate that, despite sensitivity to measurement errors, the model provided satisfactory estimates, close to those calculated by the U.S. Navy at the time. The classroom approach proved effective in promoting meaningful, critical, and applied learning.

KEYWORDS: Physics; dimensional analysis; modeling; nuclear bomb.

¹ Prof. Me. na Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), doutorando em Educação em Ciências na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), jnichels@hotmail.com

² Prof. Dr. do Departamento Acadêmico de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), marciofiori@utfpr.edu.br



INTRODUÇÃO

A análise dimensional é uma técnica que permite a dedução de equações de leis científicas com base na dimensionalidade das grandezas físicas, sem a necessidade de uma teoria prévia (Martins, 2004). Por meio desse método, é possível propor equações que expressam leis físicas, úteis para a construção de modelos e para a verificação da coerência dimensional. A técnica também facilita a simplificação de problemas, o desenvolvimento da intuição física e a detecção de erros em modelagens matemáticas. O princípio da homogeneidade, fundamental à análise dimensional, garante que as variáveis sejam combinadas de forma coerente, mas, apesar de ser necessário, não é suficiente para validar uma equação física sem a realização de experimentos (Trancanelli, 2016).

Este estudo explorou a aplicação da análise dimensional na modelagem de eventos físicos, focando na explosão da bomba H durante um teste nuclear no Atol de Bikini, em 1954. A aplicação foi realizada com uma turma de Engenharia Química em duas aulas de três horas, estruturadas em oito etapas, nas quais os conceitos fundamentais de análise dimensional foram introduzidos e associados à modelagem de eventos explosivos, de grande relevância científica e impacto social. A explosão da bomba H foi utilizada como estudo de caso, o que facilitou a pesquisa extraclasse realizada pelos alunos, em razão de sua ampla exploração na mídia e em publicações científicas.

Utilizando vídeos históricos, os alunos aplicaram a análise dimensional para estimar a energia liberada pela bomba H. O processo de modelagem seguiu uma sequência lógica, com exemplos ilustrativos e um passo a passo para estimar a energia liberada. A metodologia adotada foi dinâmica, com a integração ativa de professor e alunos, promovendo aprendizado crítico e significativo. A aplicação prática demonstrou a utilidade da análise dimensional na compreensão de fenômenos complexos, além de estimular a motivação dos alunos e a sua capacidade de resolver problemas em contextos reais.



A CONSTRUÇÃO DO MODELO

A Análise Dimensional

As variáveis consideradas para estabelecer uma relação matemática entre a energia liberada na explosão da bomba H são o raio da onda de choque esférica (R), o tempo de expansão da onda de choque (t) e a densidade da atmosfera local (ρ). A partir da análise dimensional, as dimensões dessas variáveis são definidas como segue: $[R] = L$ (dimensão de comprimento), $[E] = ML^2/T^2$ (dimensão de energia), $[t] = T$ (dimensão de tempo) e $[\rho] = M/L^3$ (dimensão de densidade). Inicialmente, pode-se considerar que uma maior energia liberada resulta em um maior raio da onda de choque, o que pode ser expresso matematicamente por:

$$[R] \sim [E]^\alpha$$

Também é possível considerar que o raio da onda de choque depende da sua densidade. Esta relação pode ser representada matematicamente da seguinte forma:

$$[R] \sim [\rho]^\beta$$

Por sua vez, é possível considerar que o raio da onda de choque deve depender do tempo de expansão e pode ser representado pela seguinte relação matemática:

$$[R] \sim [t]^\delta$$

Uma relação entre o raio da onda de choque com a energia liberada pela explosão, com o tempo e com a densidade pode ser expressa pela Equação 1:

$$[R] \sim [E]^\alpha [\rho]^\beta [t]^\delta \quad (1)$$

Para uma relação de igualdade é possível introduzir uma constante de proporcionalidade, denominada por k:

$$[R] \sim k[E]^\alpha [\rho]^\beta [t]^\delta$$

Assim, a relação dimensional equivalente pode ser expressa por:

$$[L] \sim k \left[\frac{ML^2}{T^2} \right]^\alpha \left[\frac{M}{L^3} \right]^\beta [T]^\delta$$

que resulta na Equação 2:

$$[R] = L = k M^{(\alpha+\beta)} L^{(2\alpha-3\beta)} T^{(-2\alpha+\delta)} \quad (2)$$

A Equação 2 pode também ser escrita para a determinação dos valores de α , β e δ em uma primeira aproximação considerando $k = 1$:

$$L = M^0 L^1 T^0 = 1 M^{(\alpha+\beta)} L^{(2\alpha-3\beta)} T^{(-2\alpha+\delta)}$$



A partir da relação de equivalência entre as potências e coeficientes, é possível escrever o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}\alpha + \beta &= 0 \\ 2\alpha - 3\beta &= 1 \\ -2\alpha + \delta &= 0\end{aligned}$$

A resolução desse sistema resulta em: $\alpha = 1/5$, $\beta = -1/5$, $\delta = 2/5$. Portanto, o raio da onda de choque é:

$$R = E^{\frac{1}{5}} \rho^{-\frac{1}{5}} t^{\frac{2}{5}}$$

Resolvendo para a energia, é possível escrever a relação que permite estimar o seu valor com a Equação 3:

$$E = \frac{R^5 \rho}{t^2} \quad (3)$$

A relação matemática entre a energia liberada e o raio da onda de choque pode ser utilizada para estimar a energia liberada pela explosão da bomba H, desde que seja conhecida a relação entre o raio da onda de choque e o tempo de sua propagação. Essa relação pode ser obtida por meio de observações diretas do evento da explosão.

Relação entre o raio da onda de choque e o tempo da sua propagação

A relação entre o raio da onda de choque e o tempo de sua propagação pode ser determinada a partir dos dados registrados durante a explosão da bomba H no Atol de Bikini. As imagens, capturadas de um vídeo produzido pelas forças armadas dos EUA durante os testes, mostram a evolução da onda de choque em diferentes momentos. Para construir uma escala de comprimento, foram utilizados os navios destróier da Marinha americana, que tinham 76 m de comprimento em 1954. Cada imagem inclui essa escala, permitindo a comparação e a definição dos valores do raio da onda de choque em diferentes tempos.

Figura 1 – Imagens dos testes da bomba H no Atol de Bikini em julho de 1954

Fonte: vídeo disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=d1up-TRMxdo>.

O instante zero, primeiro momento em que se pode observar a explosão, ocorre no momento de 7 s de vídeo, aproximadamente. Foram então realizadas tomadas de tempo entre 7 s e 15 s. O formato esférico se perde a partir de 16 s, conforme pode ser verificado na Figura 2. É importante destacar que o raio medido deve ser o da onda de choque, projetada na superfície da água, não o raio do cogumelo formado acima do ponto da explosão. Com esses valores e auxílio de um software gráfico, foi possível determinar o raio R como uma função linear nos primeiros segundos após a explosão.

Figura 2 – Imagem da explosão da bomba H. O formato da onda de choque deixa de ser esférico aproximadamente 9 s após a explosão.

Fonte: vídeo disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=d1up-TRMxdo>.



A estimativa da energia liberada pela bomba H no momento da explosão

A densidade apresentada na Equação 3 deve ser analisada particularmente, considerando que durante a expansão da onda de choque o seu valor é variável. De modo geral, a expressão deve considerar a dependência da densidade com o tempo.

No entanto, para uma estimativa da energia liberada no momento da explosão é possível considerar que o seu valor é aproximadamente o valor da densidade média da atmosfera, de $1,2 \text{ kg/m}^3$. Essa aproximação é razoável se for considerado que no momento da explosão, ou durante a ignição da bomba H, ainda não ocorreu a expansão do ar na região.

Da mesma forma, um valor razoável de tempo para representar o curto período de explosão, ou o tempo imediatamente após a explosão da bomba H pode ser adotado como sendo de 1 ms (um milissegundo), sem muito erro.

Sendo assim, é possível estabelecer condições de contorno razoáveis para que se possa estimar o valor da energia total liberada pela bomba H na a sua explosão. As condições de contorno na explosão da bomba H são:

$t = 1 \text{ ms} = 0,001 \text{ s}$ (curto período de tempo de explosão);

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (densidade da atmosfera no curto período de tempo de explosão).

O uso dessas condições de contorno permite estimar o raio da onda de choque gerada imediatamente após o curto período da explosão. Para validação, é possível estimar o raio da onda de choque no instante aproximado de 0,001 segundos com o uso da equação e de $R(t)$ e comparar com o raio estimado por uma imagem de vídeo no mesmo instante aproximado. Observa-se que para tempos inferiores é muito complicado o registro de imagens, a menos se usada uma câmera com altíssima resolução, o que não se tinha na época.

Com o raio estimado no instante de tempo 1 ms e com o uso das condições de contorno adotadas é possível aplicar a Equação 3 para estimar a energia liberada na explosão da bomba H.

A APLICAÇÃO DO PLANO DE AULA

O plano de aula foi aplicado em dois dias, das 19h15 às 22h15. As aulas foram divididas em momentos de 40 minutos, conforme os temas apresentados a seguir.



Momento 1 – A força do método da análise dimensional

No primeiro momento foi abordado o método da análise dimensional, com os objetivos de apresentar seus fundamentos teóricos, explorar sua aplicação na modelagem de fenômenos físicos e refletir sobre seu uso prático. Em uma turma de nove alunos, o professor iniciou o trabalho com uma breve introdução ao projeto e à sequência de atividades, justificando cada etapa. A primeira aula focou na introdução às grandezas fundamentais e às dimensões físicas, destacando o princípio da homogeneidade dimensional e aplicando exemplos práticos para construir modelos físicos.

Durante a aula, exemplos resolvidos em conjunto demonstraram o processo de análise dimensional na modelagem de fenômenos, mas revelaram dificuldades dos alunos com operações matemáticas básicas, essenciais para a aplicação do método. A abordagem buscou integrar teoria e prática, permitindo aos alunos compreender o processo de modelagem e refletir sobre sua relevância científica, ao mesmo tempo em que enfrentavam desafios relacionados aos conceitos matemáticos subjacentes.

Momento 2 – O teste nuclear no Atol de Bikini

No segundo momento foi abordada a contextualização do evento nuclear no Atol de Bikini, com os objetivos de exemplificar o uso da análise dimensional na modelização de eventos físicos, discutir a explosão da bomba H nesse contexto e instrumentalizar os alunos para aplicar o método na modelização de explosões. Para ilustrar o processo, foi apresentado o vídeo “A Ciência da Explosão em Beirute: Estimativa da Energia Liberada via Análise Dimensional”, de Diogo Magalhães (disponível em https://www.youtube.com/watch?v=X_pTm7LqLZo). O vídeo serviu como estudo de caso, demonstrando a aplicação do método em um exemplo prático e preparando os alunos para modelizar a energia liberada pela explosão da bomba H no Atol de Bikini.

A discussão guiada pelo professor utilizou o vídeo para fixar os conceitos e relacionar a modelagem apresentada com o evento nuclear em estudo. A estratégia de utilizar o vídeo foi decisiva para esclarecer o processo de análise dimensional em um tempo reduzido, garantindo que os objetivos pedagógicos fossem alcançados. Essa abordagem não apenas facilitou a compreensão dos alunos, mas também os preparou para aplicar o método na modelização da explosão da bomba H nas aulas subsequentes.

Figura 3 – Imagem do Atol de Bikini atualmente



Fonte: <https://jornalggn.com.br/historia/os-teste-nucleares-no-atol-de-bikini/>.

Momento 3 – A Física da explosão da Bomba H

No terceiro momento o tema central foi “Conceitos e equacionamentos de energia”, abordando energia mecânica (cinética e potencial) e energia nuclear (fissão e fusão). Os objetivos incluíram revisar esses conceitos, relacioná-los ao evento da explosão da bomba H e discutir sua aplicação no processo de modelização. Como os alunos já haviam cursado a disciplina introdutória de Física, o conteúdo foi tratado como revisão.

A revisão relacionou energia térmica, cinética e nuclear ao evento da explosão. Foram exploradas a massa e a velocidade da onda de choque, conectadas à equação da energia cinética, e discutidas as condições para aplicá-la na estimativa da velocidade média no instante da explosão. Além disso, refletiu-se sobre a conversão da energia nuclear em energia mecânica, abordando a simetria esférica de distribuição da energia e sua transformação parcial em energia sonora e luminosa, destacando o princípio da conservação de energia.

A aula foi conduzida sem *slides*, utilizando quadro branco e diálogo com os grupos de alunos, para promover uma dinâmica reflexiva e direcionada. Em cerca de 40 minutos, os alunos participaram ativamente, recuperando e discutindo conceitos-chave de energia, conservação e conversão, enquanto estagiários complementavam os debates com aprofundamentos. A abordagem simples e resumida atendeu ao objetivo de preparar os alunos para o processo de modelização nas aulas seguintes, com foco nos conceitos necessários.

A metodologia aplicada foi eficaz para o tempo disponível, embora de baixa profundidade, suficiente para relembrar os conceitos essenciais. A dinâmica de discussão em grupo proporcionou um ambiente colaborativo e reflexivo, atingindo



os objetivos da aula conforme planejado. O conteúdo e o tempo previstos foram bem executados, garantindo o progresso necessário no projeto de modelização.

Momento 4 – A Física da onda de choque

O momento da aula sobre “Gás ideal e sua cinética” teve como objetivo explorar os conceitos de gás ideal, discutir a teoria dos gases ideais e relacionar suas variáveis termodinâmicas (temperatura, velocidade, número de moles e pressão) com o sistema atmosférico e a onda de choque da explosão da bomba H. Foram apresentados os critérios para tratar um sistema gasoso como ideal e os mecanismos de interação molecular associados. O professor destacou a correlação entre a onda de choque e um sistema gasoso, abordando as condições necessárias para aplicar essa modelagem e suas implicações no contexto estudado.

Durante a discussão, foi enfatizada a relação entre densidade, temperatura e as variáveis de estado do sistema gasoso, introduzindo uma aproximação para a modelização: considerar a densidade atmosférica constante, ainda que simplificada. Refletiu-se também sobre a expansão da onda de choque como a expansão de um gás ideal, reconhecendo que as condições de contorno simplificadas poderiam gerar erros no modelo. Para consolidar os conceitos, exercícios foram resolvidos em conjunto com os alunos, proporcionando uma base para a aplicação prática nas etapas posteriores do projeto.

Momento 5 – Construindo o modelo

Já no segundo dia de aula, no quinto momento, intitulado “Construção do modelo para a estimativa da energia liberada pela explosão da bomba H no Atol de Bikini em 1954”, o objetivo central foi orientar os alunos na aplicação da análise dimensional para estimar a energia liberada pelo evento. Após resolver dúvidas relacionadas aos exercícios anteriores, o professor introduziu os objetivos das futuras atividades, conectando os conceitos já abordados com a aplicação prática no contexto do tema. Esse início serviu como preparação para a construção de um modelo geral, contextualizado pelo recorte do evento histórico.

Vídeos e fotografias da explosão foram exibidos, retomando materiais já apresentados anteriormente e introduzindo novas perspectivas visuais. A escolha criteriosa desses recursos visou maximizar o impacto visual e auditivo, ilustrando os detalhes da explosão de diferentes ângulos e tempos. Essa abordagem despertou



grande interesse nos alunos, que ficaram impressionados com a magnitude do evento e motivados a explorar sua modelização. A estratégia dos vídeos foi eficaz, considerando a limitação de tempo, ao promover uma contextualização envolvente e direta.

Por fim, iniciou-se o processo de modelização, no qual os alunos discutiram as variáveis e suas possíveis inter-relações para estimar a energia liberada pela explosão. Guiados pelo professor, os estudantes identificaram com relativa facilidade a equação geral necessária, demonstrando compreensão das etapas e conceitos apresentados anteriormente. A metodologia dinâmica e o uso de recursos visuais contribuíram para uma construção mais significativa do conhecimento.

Momento 6 – Relação entre o raio da onda de choque e o tempo da sua propagação

Na sexta etapa, intitulada “Construção da escala dimensional e a coleta de dados”, o foco foi guiar os alunos na criação de uma escala dimensional e na coleta de dados do raio da onda de choque em função do tempo, a partir dos vídeos da explosão da bomba H. A turma foi organizada em três grupos de trabalho, orientados a utilizar como referência o destróier de 76 metros, visível nos vídeos, para estimar os comprimentos e calcular os raios da onda de choque. Esse procedimento replicou o método apresentado anteriormente pelos professores pesquisadores.

Os alunos foram instruídos a registrar os dados em tabelas, correlacionando os valores do raio da onda de choque aos tempos correspondentes. Esses dados seriam posteriormente utilizados para criar um gráfico e ajustar uma equação linear, $R_{(t)}=f_{(t)}$, pelo método dos mínimos quadrados. Com o auxílio de *notebooks* e do *software* Excel, cada grupo foi responsável por gerar o gráfico, aplicar o ajuste linear, calcular a equação de correlação e determinar o coeficiente de correlação.

Durante a análise dos dados, os alunos identificaram que a simetria da onda de choque, inicialmente esférica, passava a se aproximar de um formato elipsoidal em determinado momento. Essa mudança implicava na perda de linearidade da relação $R_{(t)}$, exigindo que os grupos limitassem os dados analisados até a manutenção da simetria esférica. A observação dessa transição foi discutida e conectada à interpretação dos resultados obtidos.

A participação dos alunos foi intensa e motivada, com questionamentos sobre aspectos técnicos, como a extração de imagens dos vídeos, a associação com os tempos registrados, e a aplicação da escala para as medidas. A curiosidade gerada pelo método estimulou interações positivas e interesse pela abordagem prática. Os resultados obtidos pelos grupos, incluindo a tabela $R_{(t)}$ e o gráfico correspondente, refletem o sucesso do processo pedagógico aplicado.

Momento 7 – Estimativa da energia liberada pela bomba H no momento da explosão

A sétima etapa teve como foco a aplicação do modelo obtido por análise dimensional para estimar a energia liberada imediatamente após a explosão da bomba H. Os principais objetivos eram estabelecer uma relação linear entre o raio da onda de choque e o tempo de propagação, ajustar o modelo com essa relação e, por fim, aplicar o modelo para calcular a energia liberada. Essa etapa seguiu a dinâmica da aula anterior, em que os alunos já haviam medido os raios da onda de choque a partir das imagens do vídeo, e a tarefa principal foi ajustar essa relação linear e utilizar o modelo para os cálculos de energia.

Durante as atividades, os alunos realizaram as medições de forma independente, utilizando ferramentas computacionais como o software Word para medir os diâmetros das ondas de choque e, a partir daí, calcular os raios. Embora tenham ocorrido dificuldades iniciais no uso dessas ferramentas, o professor forneceu apoio constante, o que permitiu superar as dificuldades. A interação entre os grupos foi crucial, pois, à medida que um grupo avançava com suas medições, os outros grupos compreendiam melhor a metodologia. Ao final, todos os grupos conseguiram registrar os dados corretos em uma tabela, concluindo a atividade com sucesso.

Figura 4 – Fotos dos grupos de trabalho durante as atividades



Fonte: acervo dos autores (2024).



Momento 8 – Workshop: Explosão da bomba H no Atol de Bikini

O último momento de aula foi dedicado à apresentação dos resultados obtidos pelos grupos de alunos, que haviam aplicado o método da análise dimensional para modelar o evento da explosão da bomba H. O principal objetivo dessa etapa foi proporcionar um espaço para que os grupos apresentassem seus resultados e possibilitar o debate e a socialização das modelagens realizadas. Durante esse momento, os alunos fizeram ajustes finais nas relações lineares entre o raio da onda de choque e o tempo de propagação, corrigindo erros de medição e cálculo, até que todos os grupos estabelecessem uma relação satisfatória.

Com as relações lineares definidas, os grupos procederam para a construção da equação final para estimar a energia liberada na explosão. Esta equação, resultado do processo de modelização, foi considerada como a solução final do projeto, obtida por meio da análise dimensional. O professor revisou brevemente as condições de contorno para a aplicação da equação, especialmente a duração da explosão, que foi acordada com os alunos como sendo de 0,001 segundos (1 milissegundo), considerando a rápida liberação de energia durante o evento.

Após o estabelecimento dessa condição de contorno, os grupos aplicaram as equações obtidas e calcularam a energia estimada liberada na explosão da bomba H. Os valores encontrados foram apresentados em Megatons para facilitar a comparação, sendo então comparados com as estimativas feitas na época pela Marinha dos EUA. Ao final, os dados registrados, incluindo os valores do raio da onda de choque em função do tempo de propagação, foram organizados em uma tabela, permitindo uma análise mais detalhada dos resultados obtidos por cada grupo.

Tabela 1 – Dados coletados e registrados pelos grupos de alunos

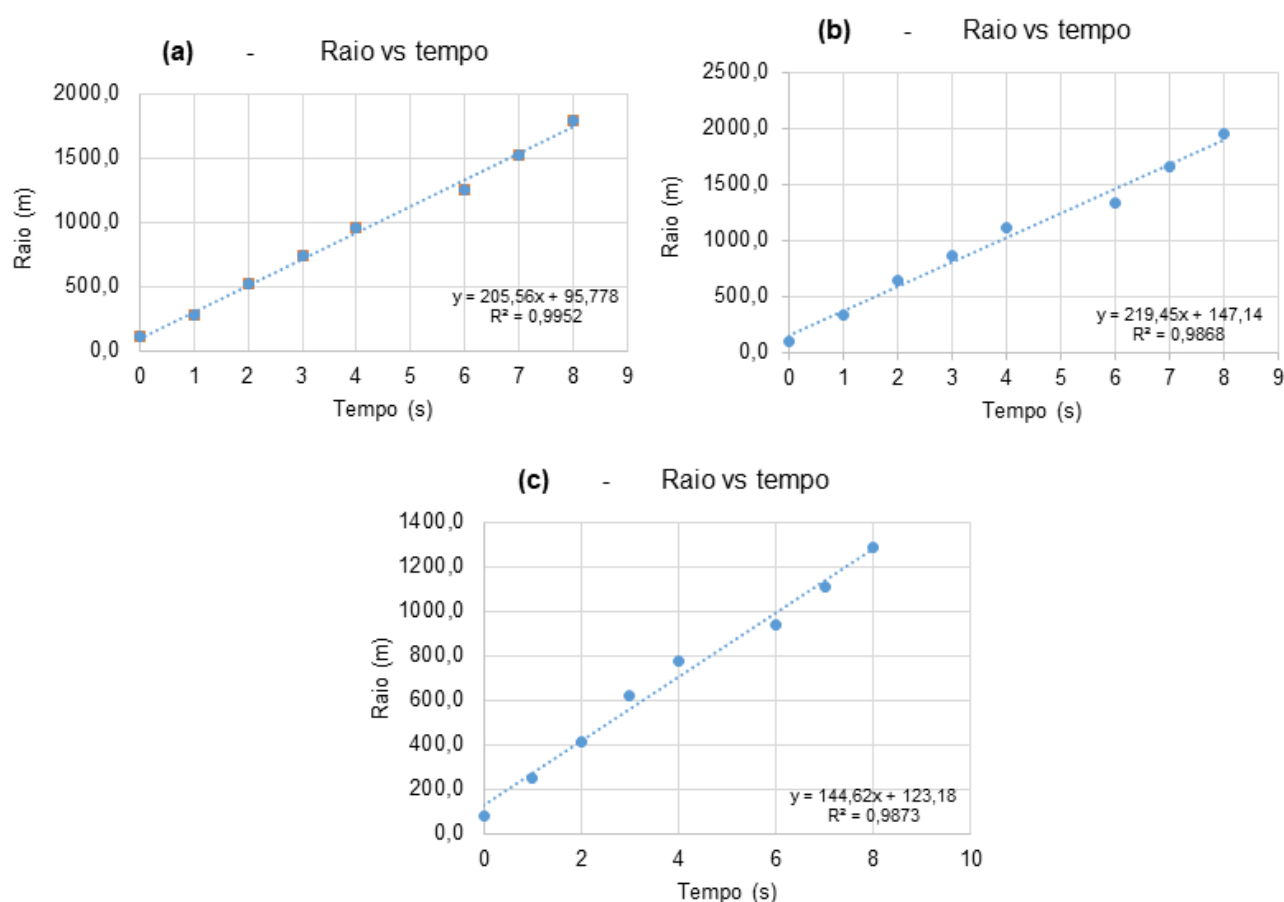
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Tempo	Raio (m)	Raio (m)	Raio (m)
0	108,6	95,0	79,0
1	271,4	332,5	250,5
2	515,7	641,3	410,4
3	732,9	855,0	622,2
4	950,0	1116,3	776,2
6	1248,6	1330,0	936,5
7	1520,0	1662,5	1107,6
8	1791,4	1947,5	1286,4

Fonte: elaborada pelos autores (2024).

Os dados coletados pelos grupos de alunos (Tabela 1) apresentam uma sequência lógica de aumento dos valores do raio da onda de choque com o tempo da sua propagação. Os valores dos raios da onda de choque atribuídos pelos alunos são diferentes, porém estão da mesma ordem de grandeza. Essas diferenças são esperadas, considerando que os grupos são constituídos por diferentes alunos e por terem trabalhado de forma independente um do outro. Estas diferenças não comprometeram as atividades.

A Figura 5 apresenta na forma gráfica a representação dos dados coletados pelos três grupos de alunos, sendo a Figura 5 (a) do grupo 1, a Figura 5 (b) do grupo 2 e a Figura 5 (c) do grupo 3. Para cada gráfico são apresentados os respectivos ajustes lineares, com a melhor reta, a equação linear e o coeficiente de correlação.

Figura 5 – Representação gráfica condicionada pelos grupos de alunos dos dados coletados pelos três grupos de alunos



Fonte: elaborada pelos autores (2024).



Na Tabela 2 são apresentadas as relações lineares e os respectivos coeficientes de correção, determinados por cada grupo de alunos e as respectivas equações para a estimativa da energia da onda de choque em função do tempo de propagação da onda de choque. Os três grupos obtiveram ótimas relações lineares, com coeficientes de correlação muito bons, praticamente iguais a 0,99. Este resultado indica que as relações lineares encontradas para a relação entre os raios da onda de choque e o tempo da sua propagação descrevem praticamente 99% dos resultados observados pelos grupos de alunos. Portanto, todas as três relações lineares $R(t)$ versus t são adequadas para o ajuste da equação obtida pela modelização com a análise dimensional para a estimativa da energia liberada pela bomba H.

Tabela 2 – Relações lineares e os respectivos coeficientes de correção

Grupo de Alunos	Relação Linear	Coeficiente de Correlação	Equação para a estimativa da energia liberada pela Bomba H
Grupo 1	$R(t) = 95,78 + 205,56.t$	0,995	$E = \frac{(95,78 + 205,56t)^5 \cdot \rho}{t^2}$
Grupo 2	$R(t) = 147,14 + 219,45.t$	0,986	$E = \frac{(147,14 + 229,45t)^5 \cdot \rho}{t^2}$
Grupo 3	$R(t) = 123,18 + 144,62.t$	0,987	$E = \frac{(123,18 + 144,62t)^5 \cdot \rho}{t^2}$

Fonte: elaborada pelos autores (2024).

A partir das equações ajustadas pelos grupos de alunos (Tabela 2) os alunos determinaram o valor estimado da energia liberada no instante 0,001 segundos, considerado o instante da explosão.

Tabela 3 – Valores estimados pelos grupos de alunos da energia liberada no instante 0,001 segundos, considerado o instante da explosão

Parâmetros	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Raio da onda de choque ($t = 0,001$ s) (m)	95,98	147,36	123,33
Energia liberada pela explosão (J)	$9,78 \times 10^{15}$	$8,34 \times 10^{16}$	$3,42 \times 10^{16}$

Fonte: elaborada pelos autores (2024).

Na sequência, os grupos de alunos efetuaram a conversão da energia estimada para o valor correspondente com a unidade em Megatons e fizeram a comparação com o valor disponibilizado pelos estagiários, considerado o valor estimado na época pela Marinha americana. Os respectivos valores estão apresentados na Tabela 4 em conjunto com o valor referência.

**Tabela 4 – Valores da energia estimada no instante da explosão da bomba H**

Valor referência* (Megaton)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
	Valor estimado (Megaton**)	Valor estimado (Megaton**)	Valor estimado (Megaton**)
10,00	2,34	19,90	8,18

* Valor estimado pela marinha americana na época do evento da explosão da Bomba H no Atol de Bikini.

** 4,184 GJ = 1 ton-TNT

Fonte: elaborada pelos autores (2024).

Após a estimativa dos valores de energia liberada pela explosão da bomba H, os resultados obtidos pelos grupos de alunos foram apresentados aos estagiários, que conduziram uma discussão aberta sobre as análises realizadas. Durante esse processo, o professor focou em três pontos principais: a coerência da ordem de grandeza dos valores de energia, as possíveis causas das diferenças observadas entre os resultados dos grupos e os fatores positivos e negativos do uso da análise dimensional como método de modelização. Foi destacado que, apesar de simplificada, a modelização gerou resultados com a mesma ordem de grandeza do valor de referência, o que foi considerado positivo para um evento tão complexo.

As diferenças entre os valores estimados e o valor de referência foram discutidas, e os alunos refletiram sobre diversos fatores que poderiam ter causado os desvios, como imprecisões nas medidas obtidas das imagens, a definição do momento exato da explosão e a variação da densidade da atmosfera durante a propagação da onda de choque. Como a energia depende fortemente do raio, pequenas variações nas medições resultaram em grandes diferenças nos valores da energia. Os alunos participaram ativamente das reflexões, propondo explicações para os erros observados e compreendendo as limitações do modelo simplificado adotado.

Por fim, o professor solicitou um diagnóstico dos alunos sobre a metodologia adotada e sobre as aulas ministradas. As observações foram unânimes e positivas, com os alunos destacando a eficácia da análise dimensional como uma metodologia interessante, prática e viável para análises preliminares em problemas de engenharia. Além disso, os alunos elogiaram a estruturação e organização das oito aulas do projeto, reconhecendo o valor pedagógico da abordagem aplicada e a relevância do conteúdo trabalhado.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo evidencia que a modelização de eventos físicos por meio da análise dimensional não é apenas uma abordagem interessante, mas também simples e abrangente. Essa metodologia se configura como uma ferramenta versátil e acessível para o ensino de Física no contexto da Engenharia, devido à sua clareza e aplicabilidade, desde que sejam disponibilizadas informações adequadas e condições favoráveis para sua implementação. A análise dimensional, enquanto estratégia de modelização, facilita a compreensão e explicação de fenômenos complexos de maneira simplificada, promovendo a interação dos alunos com conceitos fundamentais da Física.

O projeto se demonstrou, portanto, uma aplicação enriquecedora da metodologia, proporcionando uma experiência prática relevante e alinhada com a realidade educacional. A interação entre os grupos e a aplicação da modelização criaram um ambiente de aprendizagem dinâmico e eficaz, propício ao desenvolvimento de habilidades analíticas e práticas nos alunos.

Os alunos participantes do projeto manifestaram grande interesse e curiosidade pelo método da análise dimensional, reconhecendo suas amplas possibilidades de aplicação, particularmente em problemas iniciais da Engenharia. As expressões de satisfação, motivação e confiança dos alunos no uso da análise dimensional destacam sua relevância, especialmente no campo da Mecânica dos Fluidos, uma área central em várias engenharias. Esse envolvimento ativo reflete o impacto positivo da metodologia no processo de aprendizagem, além de contribuir significativamente para o desenvolvimento das competências docentes.

Em suma, o trabalho confirmou o sucesso da metodologia de análise dimensional na promoção de um ensino mais eficaz e interativo, ao mesmo tempo em que evidenciou a sua aplicabilidade prática e relevância para a formação de futuros engenheiros. A abordagem demonstrou ser um importante recurso pedagógico, não apenas no ensino de Física, mas também na aplicação de conceitos fundamentais da Engenharia.

REFERÊNCIAS

A CIÊNCIA da Explosão em Beirute: Estimativa da Energia liberada via Análise Dimensional. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=X_pTm7LqLZo. Acesso em: 20 dez. 2024.



- MARTINS, R. de A. A busca da ciência a priori no final do século XVIII e a origem da análise dimensional. In: MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. C.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H. (eds.). **Filosofia e História da Ciência no Cone Sul: 3º Encontro**. Campinas: AFHIC, 2004.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Física – Contexto & Aplicações**. Rio de Janeiro: Scipione Didáticos, 2017. v. 2, p. 85.
- NETO, M. L. da C. **Um estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a fluidodinâmica computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ORIGINAL Colour Film of Baker Atom Bomb at Bikini Atoll 1946**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=d1up-TRMxdo>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- OS TESTES nucleares no atol de Bikini**. Disponível em: <https://jornalggn.com.br/historia/os-teste-nucleares-no-atol-de-bikini/>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- SONIN, A. A. **The Physical Basis of Dimensional Analysis**. Department of Mechanical Engineering, Cambridge, 1997.
- TRANCANELLI, D. Grandezas físicas e análise dimensional: da mecânica à gravidade quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 1-12, jun. 2016.