

# Estimando o tempo de implosão de objetos submersos em altas profundidades: uma abordagem de nível médio



Eder Dourado dos Santos<sup>1#</sup> 

<sup>1</sup>Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil

## Palavras-chave

implosão  
submersível  
altas profundidades  
pressão da água  
força

## Resumo

Neste trabalho é apresentado o passo a passo de como realizar a estimativa do tempo de implosão de dois objetos submersos em altas profundidades de formatos paralelepipedal e cilíndrico. As dimensões e massa dos objetos são as mesmas do submersível *Titan* da OceanGate, que implodiu na tentativa de visitar o *Titanic*. Verificamos que o tempo de implosão dos objetos está em torno de 1-10 ms. Dado que o cérebro humano leva de 200 a 300 ms para reagir a um estímulo externo, concluímos também, por meio dessa simples proposta, que a implosão causou a morte dos tripulantes instantaneamente.

## 1. Introdução

**A** grande curiosidade em conhecer e explorar as profundezas dos oceanos levou o ser humano a uma das criações mais fascinantes da história, o submersível. Esse veículo representa um marco importante para a exploração submarina e desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da ciência e tecnologia e na guerra naval.

O primeiro submersível conhecido na história é o do engenheiro holandês Cornelis Drebbel, que projetou e construiu um submarino rudimentar em 1620 (século XVII) [1, 2]. Seu veículo era feito de madeira e impulsionado por re-

mos. Sua primeira demonstração foi no rio Tâmesa, onde ele viajou a uma profundidade de 12 a 15 pés (cerca de 4 m) de Westminster a Greenwich [1, 2].

**O primeiro submersível conhecido na história é o do engenheiro holandês Cornelis Drebbel, que o projetou em 1620 (século XVII). Ele era feito de madeira e impulsionado por remos**

Nos próximos séculos, muitos avanços foram feitos em direção à construção de submersíveis cada vez mais sofisticados. Destacam-se as contribuições do inventor ame-

ricano Robert Fulton, que desenvolveu o submarino *Nautilus* em 1801 (século XIX), e do engenheiro francês Auguste Piccard [3], que construiu o famoso batiscafo *Trieste* em 1953. O batiscafo foi capaz de mergulhar e atingir grandes profundidades, cerca de 10 km [4].

#Autor de correspondência. E-mail: santosfisico2015@gmail.com.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Paralelamente aos avanços e inovações, aconteceram desastres. O mais recente foi o do submersível *Titan* da empresa OceanGate, que implodiu na tentativa de levar pessoas para observar os destroços do *Titanic*. Um dos principais motivos da catástrofe foi seu formato de pílula (um cilindro com hemisférios em suas extremidades). Geralmente, os submersíveis adotam um formato de esfera, porque ele distribui a força da pressão uniformemente ao longo do casco, a estrutura que protegia os tripulantes. Outros motivos foram o casco composto de material ineficiente para altas profundidades e a junção dos diferentes materiais do submersível [5].

Para analisar a implosão do *Titan*, simulações cuidadosas foram criadas tanto para ilustrar o evento quanto para estimar o tempo de implosão. As estimativas indicam que o tempo variou entre 1 e 10 ms [6, 7]. Nesse curto espaço de tempo, o cérebro humano não consegue processar a dor, pois a duração de todo o processo (estímulo externo e a ativação de nociceptores - os neurônios responsáveis pela detecção e transmissão dos estímulos dolorosos) é de centenas de milissegundos [8, 9]. Consequentemente, o acidente foi indolor para os tripulantes.

Uma forma de chamar a atenção dos alunos e despertar o interesse em estudar física, é usar acontecimentos reais como ponto de partida na apresentação dos conteúdos. Foi por isso que desenvolvemos esta proposta, para que possa ser usada por alunos, professores do Ensino Médio e até estudantes de graduação como material de apoio para o entendimento da implosão de corpos em altas profundidades.

A situação aqui analisada é a seguinte: dois objetos, um na forma de um paralelepípedo e outro em formato cilíndrico, implodem numa profundidade de 3500 m devido à imensa coluna vertical de água acima deles. Suas dimensões e massa são as mesmas do *Titan* da OceanGate. Os objetivos deste trabalho são mostrar o passo a passo da estimativa do tempo de implosão do objeto e servir de base para estimativas mais elaboradas.

## 2. Implosão subaquática

Quando um submarino ou qualquer outro objeto afunda no oceano e vai mais fundo, a pressão da água ao seu redor fica mais forte (Fig. 1). A água empurra de todos os lados. Se a estrutura do objeto afundando não for capaz de resistir a esse empurrão em todas as direções, ele pode ser “espremido” pela água. Esse fenômeno é chamado de implosão subaquática. Ela é causada por uma grande pressão externa devida à imensa coluna de água acima do objeto e pela pressão das correntes de água na posição do objeto. A implosão só acontece quando a pressão total ultrapassa os limites

**A implosão só acontece quando a pressão total ultrapassa os limites permitidos da estrutura do objeto submerso; a enorme força gerada por essa pressão é capaz de comprimir o objeto instantaneamente**

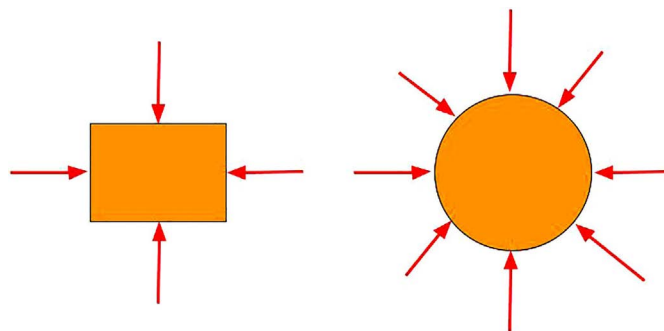


Figura 1 - As setas vermelhas indicam a força exercida pela água sobre os dois objetos vistos de cima.

permitidos da estrutura do objeto submerso. Consequentemente, a enorme força gerada por essa pressão é capaz de comprimir o objeto instantaneamente. Foi isso que aconteceu com o *Titan* da OceanGate.

Ao contrário de uma explosão, em que os destroços do corpo que explodiu são lançados para longe, em uma implosão, as forças fazem com que esse corpo seja comprimido em direção a um determinado ponto.

## 3. Estimativa do tempo de implosão de um objeto paralelepipedal

Para realizar uma simples estimativa do tempo de implosão, consideramos inicialmente um submersível fictício na forma de um paralelepípedo imerso em altas profundidades. Consideramos também que ele possui a mesma massa e as mesmas dimensões do submersível *Titan* (Fig. 2) e que está a uma profundidade próxima àquela em que ele implodiu, que consideramos como 3500 m abaixo da superfície do mar [5, 10]. A massa do submersível era de aproximadamente 10,5 toneladas e tinha as seguintes dimensões: comprimento de 6,7 m, altura de 2,8 m e largura de 2,5 m. A Fig. 3 ilustra nosso primeiro objeto de estudo.

O objeto paralelepipedal está a uma profundidade de 3500 m, ou seja, 3500 m abaixo da superfície da água. Usando a lei de Stevin [11]

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (1)$$

Podemos determinar a pressão  $p$  sobre a parte superior do objeto, sendo  $p_0$  a pressão atmosférica na superfície da água e  $\rho gh$  a pressão devida à coluna de água de 3500 m acima do objeto (Fig. 4). As constantes  $\rho$  e  $g$  são a densidade da água e a aceleração da gravidade, cujos valores considerados são  $1000 \text{ kg/m}^3$  e  $10 \text{ m/s}^2$ , respectivamente.

A pressão atmosférica é aproximadamente  $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Inserindo todas as informações na Eq. (1), obtemos  $p = 3,51 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ .

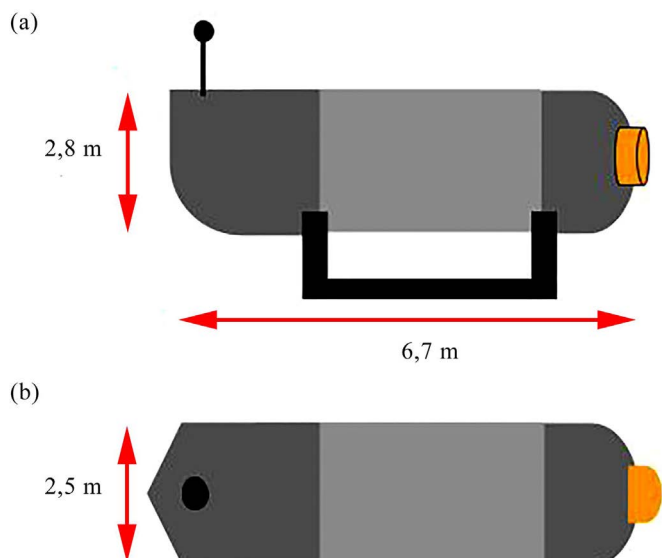


Figura 2 - Ilustração do submersível *Titan*. Em (a) vista lateral e (b) vista de cima.

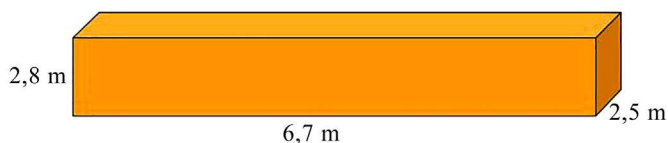


Figura 3 - O submersível fictício. Seu formato é o de um paralelepípedo com as mesmas dimensões e massa do submersível *Titan*.

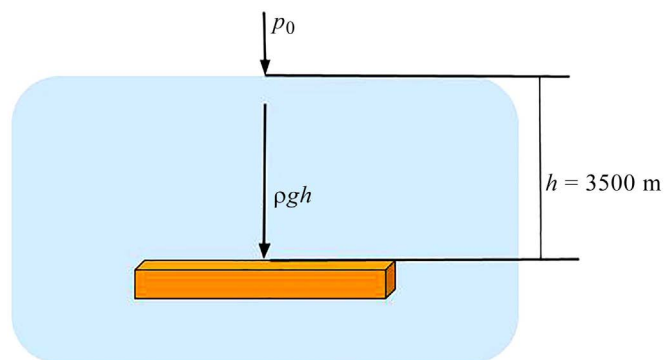


Figura 4 - Ilustrando a pressão total na parte superior do objeto.

A intensidade da força  $F$  sobre a parte superior do objeto é obtida usando a equação

$$p = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

onde  $A$  é a área da parte superior do nosso submersível, que é a área de um retângulo de base de 6,7 m e altura de 2,5 m (Fig. 5). Logo,  $A$ , que é a base multiplicada pela altura, é 16,8 m<sup>2</sup>. A partir da Eq. (2), obtemos

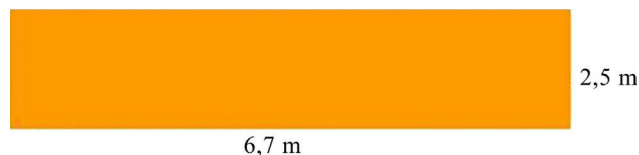


Figura 5 - Vista de cima do submersível paralelepipedal fictício.

$F = PA$ . Inserindo os valores de  $p$  e  $A$ , temos  $F = 5,9 \times 10^8$  N.

Em uma implosão real, forças agem em todas as direções sobre as partes do submersível, direcionando-as para algum ponto. No entanto, em altas profundidades a maior contribuição é a força na vertical, devido à enorme coluna de água imediatamente acima do submersível. Por isso, consideramos que a implosão do submersível paralelepipedal é uma consequência da enorme força sobre a parte superior do objeto, comprimindo-o até a parte inferior (Fig. 6). Ou seja, a implosão é devida apenas à enorme força na direção vertical.

O tempo de implosão é o tempo que a parte superior e as demais perpendiculares a ela levam para chegar à parte inferior do submersível paralelepipedal. É a mesma situação quando amassamos uma latinha de refrigerante com o pé, em que a parte superior da latinha e a face lateral são movidas até a base da lata fixa no chão, situação que tomamos como inspiração. Durante esse movimento, a parte superior e os quatro lados percorrem uma distância vertical  $y$  de 2,8 m sob a ação de uma força constante de intensidade  $5,9 \times 10^8$  N. Usando a segunda lei de Newton [12],

$$F = ma, \quad (3)$$

obtemos que o módulo da aceleração produzida por  $F$  é  $a = \frac{F}{m}$ , onde  $m$  é a soma das massas dos lados que são movidos até parte inferior. Supondo que a massa se distribui de forma igual ao longo dos seis lados, então a massa movida é  $\frac{5}{6}$  da massa do *Titan* paralelepipedal, ou 8,75 t. Combinando isso com uma das equações do movimento retilíneo com aceleração constante [12],

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \quad (4)$$

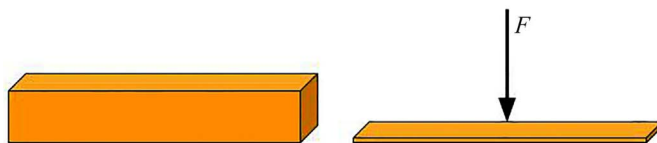


Figura 6 - Ilustração da implosão do submersível paralelepipedal. A força vertical  $F$  comprime todo o objeto até a parte inferior.

podemos calcular  $t$ , o tempo de implosão. Na Eq. (4),  $y$  é posição do corpo no instante  $t$  e  $y_0$  e  $v_0$  a posição e a velocidade no instante inicial.

Considerando que  $y_0 = 0$  e  $v_0 = 0$ , a Eq. (4) torna-se  $y = Ft^2/2m$ . Multiplicando ambos os lados por  $2m/F$ , obtemos  $t^2 = \frac{2my}{F}$ . Subtraindo ambos os lados por  $\frac{2my}{F}$ , obtemos  $t^2 - \frac{2my}{F} = 0$ , que é uma equação do segundo grau incompleta. Inserindo  $m = 8,75 \times 10^3$  kg,  $y = 2,8$  m e  $F = 5,9 \times 10^8$  N, obtemos

$$t^2 - 8,3 \times 10^{-5} = 0. \quad (5)$$

Para resolver a Eq. (5), devemos usar a fórmula de Bhaskara na variável  $t$

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (6)$$

A partir da Eq. (5), identificamos  $a = 1$  e  $b = 0$  e  $c = -8,3 \times 10^{-5}$ . Então, obtemos  $t = \frac{-0 \pm \sqrt{0^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-8,3 \times 10^{-5})}}{2 \cdot 1}$  resultando em  $t = \pm 9,1 \times 10^{-3}$  s. O tempo de implosão correto é  $t = 9,1$  ms, onde usamos o prefixo mili ( $10^{-3}$ ).

#### 4. Estimativa do tempo de implosão de um objeto cilíndrico

Outra estimativa interessante e mais realística é considerando o formato cilíndrico do submersível *Titan* e da maioria dos submarinos. No caso do *Titan* da OceanGate, para acomodar mais pessoas em seu interior, foi adotado um tubo cilíndrico formado por fibra de carbono [13]. O comprimento e o diâmetro externo desse tubo são 2,54 m e 1,68 m [13], respectivamente. Sua espessura é de aproximadamente 12 cm [14]. Desse modo, seu diâmetro interno é de aproximadamente 1,56 m (Fig. 7). Podemos estimar a massa desse tubo usando a densidade da fibra de carbono, cujo valor típico é  $\rho = 1750$  kg/m<sup>3</sup>. O volume  $V$  do tubo cilíndrico é a diferença entre os volumes de dois cilindros de mesma altura  $h = 2,54$  m e raios  $r_e = 0,84$  m (raio externo) e  $r_i = 0,78$  m (raio interno):  $V = V_e - V_i = \pi h(r_e^2 - r_i^2) = 0,78$  m<sup>3</sup>. A massa do tubo de fibra de carbono é produto

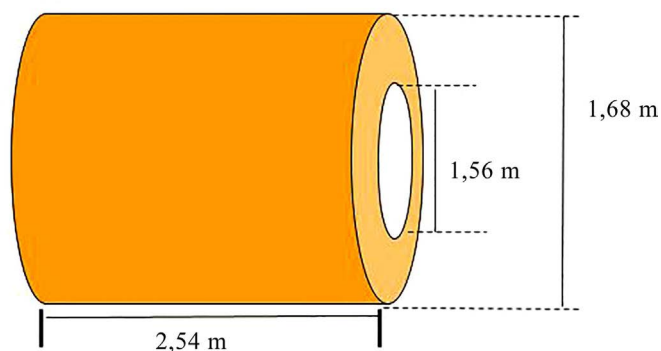


Figura 7 - Dimensões do tubo cilíndrico do *Titan* para acomodar os passageiros.

da densidade da fibra de carbono pelo volume do tubo:  $m = \rho V = 1365$  kg.

O tempo de implosão estimado é obtido considerando o tempo que a metade do tubo de fibra de carbono leva para chegar até o eixo central (Fig. 8). Nesse caso, a distância percorrida pela metade do tubo é igual à metade do diâmetro externo do tubo: 0,84 m. Agora,  $m = 682,5$  kg,  $y = 0,84$  m e  $F$  é a força distribuída uniformemente sobre a área de um retângulo de comprimento 2,54 m e largura igual a metade do comprimento de uma circunferência de raio  $r_e$ , que é  $F = P(\pi r_e 2,54)$  ou  $2,35 \times 10^8$  N. Em  $t^2 - \frac{2my}{F} = 0$ , obtemos  $t^2 - 4,88 \times 10^{-6} = 0$ . A solução correta é 4,42 ms.

As simples estimativas de implosão apresentadas estão entre 1 e 10 ms, o que concorda com os resultados obtidos por especialistas em flambagem de estruturas de casco de paredes finas usando simulações computacionais [6, 7]. Visto que a duração total do processamento da visão e da dor no cérebro humano pode levar até centenas de milissegundos [9,10], verificamos que a implosão dos submersíveis é um evento com duração muito menor do que a desses processos no cérebro. Essa simples modelagem também nos informa que as pessoas no interior do submersível *Titan* não viram as partes do veículo vindo em direção a elas nem sentiram as enormes forças de compressão.

#### 5. Conclusão

Usando dois submersíveis nas formas paralelepipedal e cilíndrica e a física apresentada no Ensino Médio, estimamos o tempo de implosão de um submersível real, o *Titan* da OceanGate. A implosão é uma consequência da ação da enorme força exercida pela coluna de água acima dos submersíveis. Os tempos calculados estão entre 1 e 10 ms, concordando com os resultados das simulações via análise de elementos finitos não lineares. Esse evento possui uma duração muito menor que o processamento da dor e da visão no

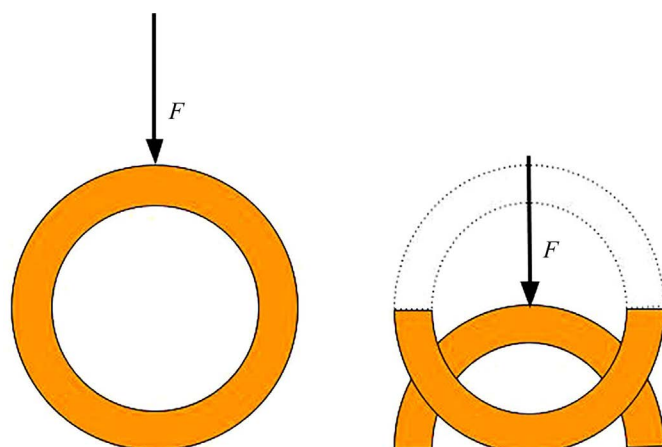


Figura 8 - Ilustração da implosão do tubo de fibra de carbono. Metade do tubo move-se por uma distância de 0,84 m devido à força da enorme coluna de água acima.

cérebro humano. Portanto, por meio de modelos simples de submersíveis concluímos também que o evento foi indolor para os tripulantes do *Titan* da OceanGate.

Recebido em: 8 de Abril de 2024

Aceito em: 14 de Maio de 2025

## Referências

- [1] N. Friedman, N.C. Polmar, *Submarine*. Encyclopedia Britannica, 25/10/2023, disponível em <https://www.britannica.com/technology/submarine-naval-vessel>, acesso em 23/10/2023.
- [2] A.L. Ferreira. *Os Primeiros Submarinos - 1578/1859*. Disponível em <https://museudomar.com.br/2016/12/30/os-primeiros-submarinos-1578-1859/>, acesso em 23/10/2023.
- [3] Marton, Fábio. *Aventuras na História*. Disponível em <https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/historia-batiscafo-rieste-o-segredo-do-abismo.phtml>, acesso em 23/10/23.
- [4] Lupa1, *Quando Foi Inventado e Usado o Primeiro Submersível do Mundo?*. Disponível em <https://lupa1.com.br/noticias/publicacoes/quando-foi-inventado-e-usado-o-primeiro-submersivel-do-mundo-27540.html>, acesso em 24/10/23.
- [5] L. Ventura, *Por que Titan Implodiu? Veja Três Principais Erros no Projeto do Submersível*. Disponível em <https://olhardigital.com.br/2023/07/15/carros-e-tecnologia/por-que-titan-implodiu-veja-3-principais-erros-no-projeto-do-submersivel/>, acesso em 23/10/23.
- [6] UOL, *Titan: Novo Vídeo Simula Implosão do Submersível em Detalhes*. Disponível em <https://noticias.uol.com.br/internacional/ultimas-noticias/2023/07/21/implosao-submersivel-video.html>, acesso em 27/10/23.
- [7] R. Tara, *Simulation Reveals Exactly How Titan Submersible Imploded*. Disponível em <https://www.engineering.com/story/simulation-reveals-exactly-how-titan-submersible-imploded>, acesso 27/10/23.
- [8] J.M. Castro Lopes, *Fisiopatologia da Dor*. Disponível em [https://www.aped-dor.org/images/biblioteca\\_dor/pdf/Fisiopatologia\\_da\\_Dor.pdf](https://www.aped-dor.org/images/biblioteca_dor/pdf/Fisiopatologia_da_Dor.pdf), acesso em 28/10/23.
- [9] M. Araújo, *Manual de Avaliação e Tratamento da Dor* (EDUEPA, Belém, 2020), 1 ed.
- [10] BBC, *Titan Sub Implosion: What We Know About Catastrophic Event*. Disponível em <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-65934887>, acesso em 27/10/23.
- [11] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica, 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor* (Blucher, São Paulo 2014), 5 ed., p. 11.
- [12] H.D. Young, R.A. Freedman, *Física 1, Mecânica* (Addison Wesley, São Paulo 2008), 12 ed.
- [13] R. Tara, *Titan Submersible Simulation Gets More Realistic*. Disponível em <https://www.engineering.com/titan-submersible-simulation-gets-more-realistic/>, acesso em 27/10/23.
- [14] V. Sahana, *Titan Submersible Deep Sea Tragedy*. Disponível em <https://www.thehindu.com/news/international/titan-submersible-deep-sea-tragedy/article67006308.ece>, acesso em 27/10/23.