A física do Nautilus

Sete cartões para a sala de aula, a partir de Vinte Mil Léguas Submarinas, de Júlio Verne

No capítulo XIII da Parte I, "Alguns números", o capitão Nemo explica a Aronnax, com contas, como o *Nautilus* flutua, mergulha, aguenta a pressão e manobra. Cada cartão traz um trecho do livro, o conceito com a fórmula, uma cena para montar no simulador 3D e perguntas para a turma. As respostas estão no fim da folha, para o professor.

Simulador 3D
mjrovai.github.io/Vinte-Mil-Leguas/simulador

Como usar o simulador

Abra o endereço acima num computador e clique em **Física**, na barra de baixo. O painel da esquerda mostra, ao vivo, o peso, o empuxo, a resultante, a pressão, a força nos planos, a tração da hélice e a potência. O painel **Pilotagem**, à direita, controla a máquina, o leme, os planos inclinados e o lastro. As setas desenhadas no casco seguem estas cores:

- Peso P
- Empuxo E
- Resultante R = E − P (×10)
- Força nos planos (×40)
- Tração da hélice (×40)
- Resistência da água (×40)

Como Verne, contamos 1 m³ de água como 1 t no peso e no empuxo. No lastro, de 0 a 50 % enchem-se os reservatórios principais (150,72 t) e de 50 a 100 % os suplementares (100 t). A pressão usa água do mar (1 025 kg/m³) e g = 9,8 m/s². O simulador move o navio de forma simplificada e com a escala de profundidade comprimida; os números do painel Física seguem as contas do livro, para o casco pelo texto.

1 · Flutuar: Arquimedes

> *"Quis que, em equilíbrio na água, ele mergulhasse nove décimos e emergisse somente um décimo."*
> Parte I, cap. XIII

Um corpo na água recebe um empuxo para cima igual ao peso da água que ele desloca: $\mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{V_{sub}} \cdot \mathbf{g}$. Flutuando, o empuxo equilibra o peso, **E = P**. O *Nautilus* pesa 1 356,48 t, então afunda até deslocar 1 356,48 m³ de água: nove décimos dos 1 507,2 m³ do casco.

Dito de outro modo: a densidade média do navio, 1 356,48 ÷ 1 507,2 = 0,90 t/m³, é 90 % da densidade da água. Por isso 90 % do casco fica submerso.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: o *Nautilus* flutuando**. Os reservatórios estão vazios. Na Pilotagem, suba o lastro devagar até 50 % e veja a parte submersa passar de 90 % a quase 100 %, com E sempre igual a P.

Para a turma

1 Nemo contou 1 m³ de água como 1 t, que é a água doce. Na água do mar (1,025 t/m³), quanto do casco ficaria fora d'água?

2 · Mergulhar: o lastro

> *"Se os encho de água, o barco, deslocando então mil quinhentas e sete toneladas, ou pesando-as, ficará completamente submerso."*
>
> Parte I, cap. XIII

Com o casco todo debaixo d'água, o volume deslocado não muda mais, e o empuxo fica constante: **E = 1 507,2 t**. O que muda é o peso, com a água que entra nos reservatórios. A resultante **R = E − P** decide: R > 0, o navio sobe; R = 0, fica onde está; R < 0, desce.

Em densidade: o navio sobe se for menos denso que a água e desce se for mais denso.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: parado debaixo d'água**. A máquina está parada e o lastro em 50 %, o ponto de equilíbrio. Mova o lastro um pouco para cima ou para baixo e observe a seta amarela da resultante.

Para a turma

2 Por que é tão difícil manter o *Nautilus* parado numa profundidade usando só o lastro?

3 · Descer fundo: a pressão

> *"Uma atmosfera por trinta pés de água, ou seja, cerca de um quilo por centímetro quadrado."*
>
> Parte I, cap. XIII

A pressão cresce com a profundidade: $\mathbf{p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h}$. Na água do mar, cada 10 m somam quase 1 atm ($1\,025 \times 9{,}8 \times 10 \approx 100\,000$ Pa). Trinta pés franceses são cerca de 9,7 m: a regra de Aronnax está certa.

A força sobre uma superfície é $\mathbf{F = \Delta p \cdot A}$, em que Δp é a diferença entre a pressão da água lá fora e a do ar lá dentro.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: mergulho até 1 000 m**. O piloto automático leva o *Nautilus* para baixo. Acompanhe a pressão e a força sobre a janela do salão. Se o fundo do mar estiver mais acima, ele pousa antes.

Para a turma

3 A 1 000 m, que força a água faz sobre uma janela do salão? Neste modelo, ela é uma elipse de 3,0 m × 1,64 m, com área de ≈ 3,9 m².

4 · Manobrar: os planos e o leme

> *"Se estão inclinados, o Nautilus, segundo a disposição dessa inclinação e sob o impulso de sua hélice, ou afunda segundo uma diagonal tão alongada quanto me convier, ou sobe segundo essa diagonal."*
>
> Parte I, cap. XIII

Os planos inclinados e o leme funcionam como asas: a água que passa por eles os empurra. A força cresce com o quadrado da velocidade: $\mathbf{F = ½ \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C}$, em que S é a área e C cresce com o ângulo. Parado, v = 0 e não há força: o leme não vira o navio e os planos não o fazem mergulhar.

A mesma lei vale para a resistência da água contra o casco (seta cinza, sobre o convés), que a hélice precisa vencer (seta lilás, sob a quilha). Em velocidade constante, as duas são iguais: $\mathbf{T = D}$. Ao acelerar, a tração é maior, e a diferença é $\mathbf{m \cdot a}$. A potência da máquina é $\mathbf{T \cdot v}$, e por isso cresce com o cubo da velocidade.

Neste modelo, S ≈ 16 m² (os dois planos) e C ≈ 0,04 por grau, até no máximo 1. Na resistência, a área é a seção do casco, ≈ 50 m², com C ≈ 0,2. O simulador acelera bem mais depressa que um navio real, então a tração dá saltos ao mudar a máquina.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: descendo com os planos**. O *Nautilus* anda a 10 nós com os planos a 15°, descendo em diagonal. Passe a máquina para 20 nós: a força nos planos e a resistência ficam quatro vezes maiores. Antes de chegar ao fundo, ponha os planos para subir; no fundo, o atrito com a areia segura o navio.

Para a turma

4 A 15°, que velocidade os planos precisam para fazer a mesma força que os 150,72 t de água dos reservatórios principais?

5 · Subir "como um balão"

> *"Desligo a hélice, e a pressão das águas faz o Nautilus subir verticalmente, como um balão que, cheio de hidrogênio, se eleva rapidamente nos ares."*
>
> Parte I, cap. XIII

Nemo pode navegar com o casco um pouco mais leve que a água, com a resultante $\mathbf{R = E - P}$ para cima. Quem o segura lá embaixo são os planos inclinados, com a hélice dando velocidade. Ao desengatar a hélice, a velocidade cai, a força nos planos cai com o quadrado dela e só sobra R, que é vertical. O navio sobe reto.

É o mesmo Arquimedes do balão: no ar, o hidrogênio (0,09 kg/m³) é muito menos denso que o ar (1,2 kg/m³), e o empuxo vence o peso.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: desengatar a hélice**. O *Nautilus* anda a 15 nós, com o lastro em 45 % (R ≈ 15 t para cima) e os planos inclinados para baixo segurando o casco. Clique em **Desengatar hélice**, na Pilotagem, e veja a seta dos planos encolher e o navio subir.

Para a turma

5 Com R ≈ 15 t para cima e massa de 1 492 t, qual é a aceleração no começo da subida? E até que velocidade ele sobe?

6 · Correr: a potência da máquina

> *"Uma velocidade de cinquenta milhas por hora."*
> Parte I, cap. XII

Para manter a velocidade, a hélice precisa empurrar tanto quanto a água resiste: $\mathbf{T = D = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C}$. A potência é força vezes velocidade: $\mathbf{P = T \cdot v}$. Como D cresce com v^2, a potência cresce com $\mathbf{v^3}$. Dobrar a velocidade custa oito vezes mais potência.

Nemo diz que o poder de suas máquinas é "quase infinito". Para comparar, Verne conta no capítulo I que o vapor *Scotia* fazia 13,4 nós com mil cavalos-vapor.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: 50 nós debaixo d'água**. Leia a resistência e a potência no mostrador. Depois baixe a máquina para 25 nós e espere a velocidade se estabilizar.

Para a turma

6 Se a velocidade cai de 50 para 25 nós, o que acontece com a resistência e com a potência?

7 · Verne errou?

> *"Seu volume, mil e quinhentos metros cúbicos e dois décimos."*
> Parte I, cap. XIII

Verne fez questão de pôr números exatos na boca de Nemo, e eles podem ser conferidos com o lápis na mão, como faria Aronnax. Três pistas:

O volume. Nemo diz que o casco tem 1 500,2 m^3 e que flutua com nove décimos submersos, 1 356,48 m^3. Mas nove décimos de 1 500,2 são 1 350,18. Faça a conta com 1 507,2.

A hélice. No capítulo XII, ela tem passo de 7,5 m e "pode dar até cento e vinte rotações por segundo", para chegar a cinquenta milhas por hora. O passo é quanto a hélice avança a cada volta, como um parafuso.

A forma. As medidas do texto e o desenho das gravuras não dão o mesmo casco. O botão **Casco** mostra as duas formas.

No simulador

Abra o painel **Física** e clique em **Experimente: trocar a forma do casco (a página recarrega)**.

Para a turma

7.1 O que há de errado com o volume?

7.2 Com 120 rotações por segundo e passo de 7,5 m, a que velocidade iria o *Nautilus*?

Respostas

Para o professor.

1 *Nemo contou 1 m³ de água como 1 t, que é a água doce. Na água do mar (1,025 t/m³), quanto do casco ficaria fora d'água?*
O volume submerso cai para 1 356,48 ÷ 1,025 ≈ 1 323 m³, ou 87,8 % do casco. Ficariam fora d'água cerca de 12 %, não 10 %. A rigor, as contas de Nemo valem para um rio ou um lago.

2 *Por que é tão difícil manter o Nautilus parado numa profundidade usando só o lastro?*
Porque o equilíbrio é indiferente. Com R = 0 ele fica onde está, mas qualquer tonelada a mais ou a menos o faz descer ou subir sem parar, já que o empuxo não muda com a profundidade. Por isso Nemo conduz o navio com os planos inclinados e a hélice (cartão 4) e usa o lastro para os ajustes grandes. No mesmo capítulo, ele ainda lembra que a água se comprime um pouco no fundo, e que é preciso compensar com mais peso.

3 *A 1 000 m, que força a água faz sobre uma janela do salão? Neste modelo, ela é uma elipse de 3,0 m × 1,64 m, com área de ≈ 3,9 m².*
Δp = 1 025 × 9,8 × 1 000 ≈ 10 milhões de Pa. F = 10 000 000 × 3,9 ≈ 39 MN, o peso de cerca de 4 000 t: quase três *Nautilus*. A resposta de Verne são vidros de 21 cm de espessura no centro.

4 *A 15°, que velocidade os planos precisam para fazer a mesma força que os 150,72 t de água dos reservatórios principais?*
F = 150,72 × 1 000 × 9,8 ≈ 1,48 MN. $v^2 = 2F \div (\rho \cdot S \cdot C) = 2 \times 1\,480\,000 \div (1\,025 \times 16 \times 0{,}6) \approx 300$, então v ≈ 17 m/s, cerca de 34 nós. Os planos servem para conduzir e corrigir; o trabalho pesado é do lastro.

5 *Com R ≈ 15 t para cima e massa de 1 492 t, qual é a aceleração no começo da subida? E até que velocidade ele sobe?*
a = F ÷ m = (15 000 × 9,8) ÷ 1 492 000 ≈ 0,1 m/s², cerca de 1 % de g. A velocidade cresce até a resistência da água igualar R. Subindo de lado, a área é a vista de cima do casco, ≈ 70 m × 8 m = 560 m², com C ≈ 1: $v = \sqrt{(2F \div (\rho \cdot A \cdot C))} = \sqrt{(2 \times 147\,000 \div (1\,025 \times 560))} \approx 0{,}7$ m/s, uns 2,6 km/h.

6 *Se a velocidade cai de 50 para 25 nós, o que acontece com a resistência e com a potência?*
A resistência fica 4 vezes menor (de ≈ 348 t para ≈ 87 t), e a potência, 8 vezes menor: de ≈ 88 000 kW (≈ 119 000 cv) para ≈ 11 000 kW (≈ 15 000 cv). A 50 nós, o *Nautilus* pediria mais de cem vezes a potência do *Scotia*.

7.1 *O que há de errado com o volume?*
As contas de Nemo usam 1 507,2 m³, não 1 500,2. Nove décimos de 1 507,2 dão 1 356,48; os reservatórios de 150,72 t completam 1 507,2; e, mais adiante, ele diz que precisará pesar 1 513,77 t em vez de 1 507,2 t. Há ainda uma diferença de 0,1 t: as duas parcelas do peso do casco, 394,96 t e 961,62 t, somam 1 356,58 t, não 1 356,48. Os dois deslizes já estão no original francês. Este painel usa 1 507,2 m³, o número das contas.

7.2 *Com 120 rotações por segundo e passo de 7,5 m, a que velocidade iria o Nautilus?*
7,5 m × 120 = 900 m/s, ou cerca de 1 750 nós, mais de duas vezes a velocidade do som no ar. Para os 50 nós (25,7 m/s), bastariam ≈ 3,4 rotações por segundo, ou ≈ 206 por minuto. Se Verne quis dizer 120 rotações *por minuto*, a hélice daria 15 m/s, perto de 29 nós, sem contar o escorregamento na água.

Tradução, simulador e cartões gerados pelo Claude Opus 5.5, da Anthropic, sob a direção de Marcelo Rovai. Licença MIT. O livro completo, para ler e baixar: mjrovai.github.io/Vinte-Mil-Leguas