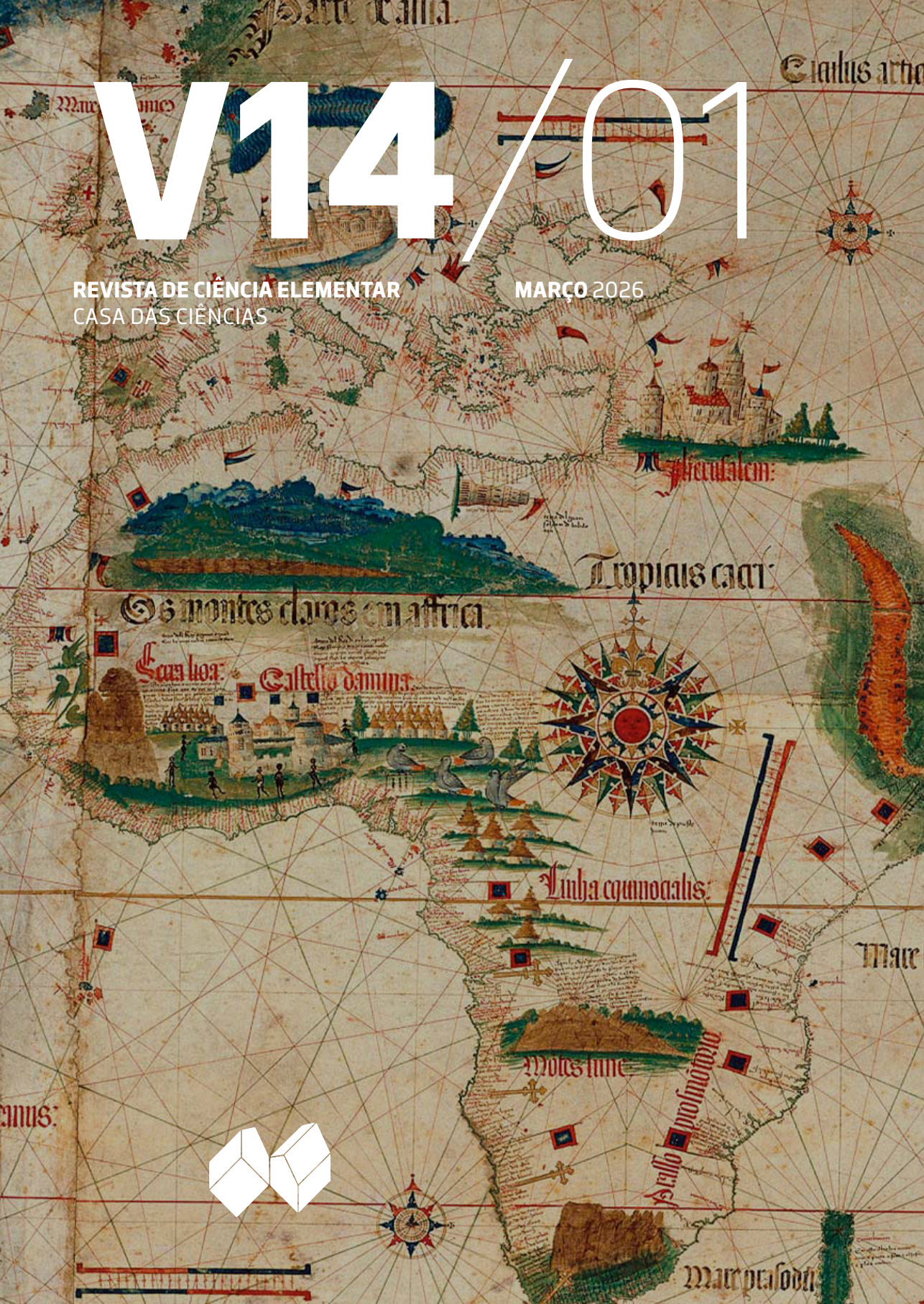


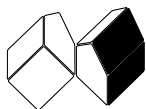
# V14/01

REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR  
CASA DAS CIÊNCIAS

MARÇO 2026



# REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR



## FICHA TÉCNICA

Rev. *Ciência Elem.*, V14(01)

Publicação trimestral  
da Casa das Ciências

ISSN 2183-9697 (versão impressa)

ISSN 2183-1270 (versão online)

[rce.casadasciencias.org](http://rce.casadasciencias.org)

DEPÓSITO LEGAL

425200/17

COORDENAÇÃO EDITORIAL

**Alexandra Coelho**

DESIGN

**Rui Mendonça**

PAGINAÇÃO

**Raul Seabra**

IMAGEM NA CAPA

**Planisfério de Cantino**

**Autor desconhecido**

© Todo o material publicado nesta revista pode ser reutilizado para fins não comerciais, desde que a fonte seja citada.



## PROPRIETÁRIO

Casa das Ciências/ICETA

Faculdade de Ciências,

Universidade do Porto

Rua do Campo Alegre, 687

4169-007 Porto

[rce@casadasciencias.org](mailto:rce@casadasciencias.org)

## CORPO EDITORIAL DA REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR

### EDITOR

João Nuno Tavares (UNIVERSIDADE DO PORTO)

### EDITORES CONVIDADOS

Paulo Ribeiro-Claro (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

Mariela M. Nolasco (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

### CONSELHO EDITORIAL

Alexandre Lopes Magalhães (UNIVERSIDADE DO PORTO)

Jorge Manuel Canhoto (UNIVERSIDADE DE COIMBRA)

Paulo Ribeiro-Claro (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

José Cidade Mourão (INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO)

Rute Coimbra (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

Sónia Gouveia (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

José Francisco Rodrigues (UNIVERSIDADE DE LISBOA)

João Lopes Santos (UNIVERSIDADE DO PORTO)

### PRODUÇÃO e SECRETARIADO

Alexandra Coelho

Raul Seabra

### NORMAS DE PUBLICAÇÃO NA RCE

A Revista de Ciência Elementar dirige-se a um público alargado de professores do ensino básico e secundário, aos estudantes de todos os níveis de ensino e a todos aqueles que se interessam pela Ciência. Discutirá conceitos numa linguagem elementar, mas sempre com um rigor superior.

### INFORMAÇÃO PARA AUTORES E REVISORES

Convidam-se todos os professores e investigadores a apresentarem os conceitos básicos do seu labor diário numa linguagem que a generalidade da população possa ler e compreender.

Para mais informação sobre o processo de submissão de artigos, consulte a página da revista em [rce.casadasciencias.org](http://rce.casadasciencias.org)



MARÇO 2026

# V14/01

## Índice

- 02 AGENDA
- 03 NOTÍCIAS
- EDITORIAL
- 05 **Percursos Cruzados pela Ciência.**  
Paulo Ribeiro-Claro, Mariela M. Nolasco
- ARTIGOS
- 07 **Espectroscopia de Raman.**  
Paulo Ribeiro-Claro *et al.*
- 12 **Separar para conhecer.**  
Mara E. M. Braga, Patrícia Matos
- 16 **O conceito de massa molecular e as propriedades dos polímeros.**  
Vinícius de Paula
- 19 **O Princípio da Equivalência.**  
Eduardo Lage
- 24 **O método de aproximação poligonal de Feynman.**  
João Nuno Tavares
- 29 **Polígono Funicular.**  
José Moreira, Cláudio Gomes
- 33 **Breve guia de Paleontologia urbana.**  
Carlos Marques da Silva, Sofia Pereira
- 38 **Tricópteros.**  
Verónica Ferreira
- AOS OLHOS DA CIÊNCIA
- 42 **Da aridez do Sinai à savana queniana.**  
Luís Vítor Duarte
- IMAGEM EM DESTAQUE
- 48 **Entre dois mundos: “ver” para além da imagem ótica.**  
Helena Isabel Nogueira  
João A. Rodrigues  
Francisco Trindade

**02/04**  
a **03/05**<sup>(2026)</sup>

Exposição “Hyperobjects”

Instalada num antigo laboratório de química, esta exposição propõe uma reflexão crítica sobre a forma como a história natural e a ciência têm sido construídas e apresentadas. Longe de se assumirem como sistemas neutros, surgem aqui como estruturas que moldam a observação, a classificação e a normalização da vida, do poder e da violência. No espaço, obras em vidro e cerâmica são integradas como se dele fizessem parte, evocando um ambiente de experimentação e controlo, onde o olhar científico se afirma como elemento central. O resultado é uma experiência imersiva que convida o visitante a questionar os limites entre conhecimento, autoridade e representação.

Mais informações em

[www.museus.ulisboa.pt/exposicao-hyperobjects](http://www.museus.ulisboa.pt/exposicao-hyperobjects)

LABORATÓRIO DE QUÍMICA ANALÍTICA

MUSEU NACIONAL DE HISTÓRIA NATURAL E DA CIÊNCIA

**29/05**  
a **31/05**<sup>(2026)</sup>

Feira de Minerais

A cidade do Porto recebe, entre os dias 29 e 31 de maio, mais uma edição da Feira de Minerais, Rochas e Fósseis, um evento imperdível para entusiastas da geologia, colecionadores e curiosos de todas as idades. A iniciativa decorre na Fundação Dr. António Cupertino de Miranda, reunindo expositores nacionais e internacionais com uma vasta seleção de minerais, cristais, fósseis e peças raras. Seja para adquirir peças únicas, aprofundar conhecimentos ou simplesmente explorar um universo fascinante, esta feira promete uma experiência enriquecedora num ambiente acessível e envolvente para toda a família.

FUNDAÇÃO DR. ANTÓNIO CUPERTINO DE MIRANDA

**07/07**  
a **09/07**<sup>(2026)</sup>

XI Encontro Casa das Ciências

O XI Encontro Casa das Ciências, subordinado ao tema *Por Cidades de um só Planeta: Mobilidade, Sustentabilidade, Recursos e Governança no Contexto Educativo*, onde vamos reunir professores, investigadores e divulgadores científicos em torno dos desafios contemporâneos da educação para a sustentabilidade volta a Guimarães.

Ao longo de três dias, propomos um programa diversificado que inclui conferências, oficinas, sessões práticas e momentos de partilha de experiências, explorando o papel da ciência e da educação na construção de cidades mais sustentáveis e conscientes dos limites do planeta. A inovação pedagógica e a integração de temas como mobilidade, economia verde e governança assumem particular destaque.

Dirigido sobretudo à comunidade educativa, mas aberto a todos os interessados, o encontro afirma-se como um espaço de reflexão, aprendizagem e colaboração, contribuindo para o reforço de uma cultura científica comprometida com um futuro mais sustentável.

Mais informações em

[www.casadasciencias.org/11encontro](http://www.casadasciencias.org/11encontro)

GUIMARÃES – CC VILA FLOR E E.S. MARTINS SARMENTO



**POR CIDADES  
DE UM SÓ PLANETA:  
CAPACITAR PROFESSORES  
PARA UM FUTURO  
SUSTENTÁVEL.**

## Molécula complexa no espaço (com enxofre)

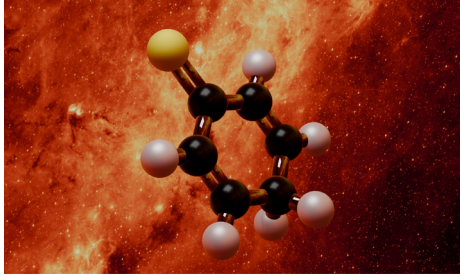


FIGURA 1. Molécula de 2,5-ciclohexadien-1-thiona numa visão artística.

Uma equipa internacional de astrónomos anunciou a deteção de uma molécula complexa no centro da Via Láctea, reacendendo o debate sobre a origem da vida no universo (DOI: [10.48550/arXiv.2511.23299](https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.23299), 24 jan. 2026). A molécula, que contém enxofre, é uma das mais sofisticadas já identificadas no espaço interestelar.

A descoberta foi possível graças a radiotelescópios capazes de analisar a composição química de nuvens de gás e poeira entre as estrelas. Estes ambientes, apesar de extremamente frios e aparentemente inóspitos, funcionam como verdadeiros “laboratórios naturais”, onde se formam moléculas cada vez mais complexas.

O interesse desta descoberta vai muito além da química. Moléculas deste tipo são consideradas potenciais “blocos de construção” da vida, podendo dar origem a compostos essenciais como aminoácidos. Ao encontrá-las no espaço, os cientistas reforçam a ideia de que os ingredientes básicos da vida podem ser comuns no universo.

Isto levanta uma questão fascinante: será que a vida pode surgir noutros planetas com rela-

tiva facilidade? Embora ainda não haja provas diretas, descobertas como esta aumentam a probabilidade de que não estamos sozinhos.

## Exoplaneta desafia a lógica

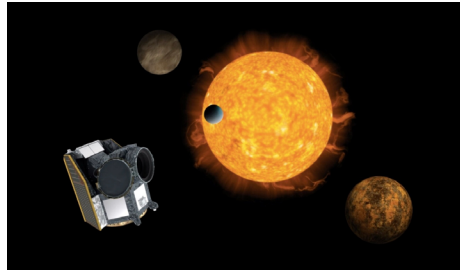


FIGURA 1. Telescópio espacial CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite), da ESA.

Uma equipa internacional com participação de investigadores portugueses anunciou a descoberta de um exoplaneta invulgar que poderá mudar a forma como os cientistas entendem a formação dos planetas. O estudo, publicado na prestigiada revista *Science* (DOI: [10.1126/science.adl234](https://doi.org/10.1126/science.adl234), 12 fev. 2026), analisou um sistema planetário em torno da estrela LHS 1903, utilizando o telescópio espacial Cheops, da Agência Espacial Europeia. O que torna esta descoberta particularmente surpreendente é a natureza do planeta identificado. Trata-se de um planeta rochoso localizado numa região onde, segundo as teorias atuais, deveriam existir apenas planetas gasosos. Nos modelos clássicos, os planetas mais próximos da estrela são rochosos, enquanto os mais distantes acumulam gases e tornam-se gigantes gasosos, como Júpiter ou Saturno.

No entanto, neste sistema, os cientistas encontraram um planeta rochoso numa órbita

mais afastada, contrariando essa lógica. Após analisarem diferentes hipóteses – como colisões ou migração orbital – os investigadores concluíram que o planeta poderá ter-se formado mais tarde do que os restantes, num ambiente já pobre em gás.

Esta possibilidade sugere que os planetas nem sempre se formam ao mesmo tempo, podendo surgir em diferentes fases da evolução do sistema planetário. Se confirmada, esta ideia poderá obrigar a rever os modelos atuais de formação planetária, utilizados para explicar a origem de sistemas como o nosso.

---

## Um novo tipo de ser vivo?



**FIGURA 1.** Reconstrução artística da proliferação de *Prototaxites* numa paisagem do Devónico. Imagem de [Wiki Commons](#).

Uma descoberta científica recente está a desafiar uma das bases mais fundamentais da biologia: a forma como classificamos os seres vivos. Investigadores que estudam fósseis de organismos antigos conhecidos como *Prototaxites* sugerem que estes não pertencem a nenhum dos reinos atualmente reconhecidos – nem plantas, nem animais,

nem fungos (DOI: [10.1126/sciadv.aec627](https://doi.org/10.1126/sciadv.aec627), 21 jan. 2026).

Os *Prototaxites* viveram há cerca de 400 milhões de anos e tinham dimensões impressionantes, podendo atingir vários metros de altura. Durante décadas, os cientistas debateram a sua natureza, com hipóteses que os classificavam como fungos gigantes. No entanto, novas análises químicas e estruturais indicam que a sua composição é muito diferente de qualquer grupo conhecido.

Esta descoberta levanta uma possibilidade fascinante: poderá ter existido, no passado, uma forma de vida completamente distinta das que conhecemos hoje, pertencente a um “ramo perdido” da árvore da vida. Se confirmada, esta hipótese obriga os cientistas a repensar os modelos de evolução e diversidade biológica.

---

# Percursos Cruzados pela Ciência.

Este é mais um fascículo da *Revista de Ciência Elementar*, que temos o gosto de apresentar aos leitores neste editorial – uma “última tarefa” que cabe aos editores convidados,

Ser editor é um pequeno (mas intenso) projeto, que se abraça pela vontade de manter viva uma componente meritória da *Casa das Ciências*. A *Revista de Ciência Elementar* é alimentada pelos contributos dos autores e cada fascículo representa naturalmente o fluxo de textos submetidos para publicação num dado momento. Deste modo, a responsabilidade dos editores não é apenas a de selecionar para o “seu” fascículo os trabalhos que consideram mais adequados entre os já disponíveis; é também garantir que o fluxo se mantém e o editor convidado seguinte terá novamente a possibilidade de escolher entre muitos e bons textos. A primeira tarefa é a que se torna imediatamente visível nas páginas seguintes, a segunda é mais uma tarefa de bastidores, para garantir a continuidade. Os leitores julgarão do sucesso da primeira, mas estamos apostados em que o editor do próximo fascículo aprecie os resultados da segunda!

E este é o momento adequado para agradecermos a todos os autores que aceitaram a tarefa de alimentar esta Revista com os seus contributos – aqueles cujos trabalhos completam este fascículo e aqueles cujos trabalhos farão parte dos seguintes.

De uma forma geral, cada fascículo da *Revista* tenta abordar as várias áreas das ciências naturais e este não é exceção.

O *Polígono Funicular* apresenta um texto para quem aprecia a elegância intrínseca das fórmulas e equações matemáticas. O artigo *O método de aproximação poligonal de Feynman* dá continuidade ao trabalho sobre a relação entre as leis de Kepler e a lei de atração universal de Newton, enquanto *O Princípio da Equivalência* aborda as bases da teoria da relatividade geral de Einstein. São dois trabalhos rotulados como “matemática”, mas com evidente ligação à física e que agradarão aos interessados nestas áreas.

No campo da Geologia temos dois trabalhos cuja dimensão não cabe nas páginas da revista versão “impressa” e merecem a visita à versão *online*. O *Breve guia de Paleontologia urbana* oferece um interessante roteiro para o paleontólogo amador não precisar de ir à montanha (já que a montanha vem à cidade). A rubrica “Aos olhos da Ciência” leva-nos de novo a uma viagem científica de interpretação de paisagens naturais. Dá-nos também o olhar da ciência sobre uma região geográfica infelizmente mais conhecida pelos conflitos armados.

Recordamos aqui que textos na edição impressa da revista estão limitados no seu número de páginas por opção editorial, mas a versão completa dos mesmos pode ser encontrada na edição digital, disponível no portal da Casa das Ciências.

O tema *Tricópteros – arquetetos aquáticos* é o contributo da biologia para este fascículo. E é um fascículo oportuno, já que é normalmente na primavera que as larvas fazem a metamorfose para a pupa. Um passeio pelos campos com uma lupa de mão é uma sugestão para o entomólogo amador.

Para a área de química foram selecionados dois trabalhos: *Separar para conhecer* apresenta os princípios básicos da cromatografia, uma técnica cada vez mais completa e complexa; *O conceito de massa molecular e propriedades dos polímeros* é o primeiro trabalho de um autor que assumiu a tarefa de produzir uma série dedicada aos polímeros.

Por fim, e com co-autoria dos editores deste fascículo, merece referência a *Espectroscopia de Raman*. Este texto dá continuidade a um desafio que nos foi lançado já há alguns anos: publicar uma coleção de artigos de introdução à espectroscopia, em que cada artigo pudesse funcionar como entrada da *Wikiciências*, a enciclopédia digital da *Casa das Ciências*. A classificação da área científica é na fronteira entre a química e a física. Física se nos focarmos no processo (C.V. Raman, a quem deve o nome, era um físico) e química se a aplicarmos na compressão da estrutura e propriedades da matéria (tal como fazem os autores do trabalho).

Por último, uma breve referência à Imagem de Destaque. Com o título *Entre dois Mundos*, faz a sobreposição entre a imagem de microscópio óptico e a imagem de “cor falsa” obtida por espectroscopia de Raman. O comentário é de Francisco Trindade, mestre em Criação Artística Contemporânea.

Paulo Ribeiro-Claro, Mariela M. Nolasco

Universidade de Aveiro

# Espectroscopia de Raman.

Paulo Ribeiro Claro, Mariela M. Nolasco, Catarina Araújo e João T. S. Martins

U. Aveiro

A espectroscopia de difusão de Raman, ou apenas “espectroscopia de Raman”, é uma técnica baseada no espalhamento ou difusão inelástica da luz (efeito Raman, assim designado em homenagem a C. V. Raman, 1888–1970). Embora possa ser usada para observar movimentos de baixa frequência de um sistema (incluindo movimentos rotacionais e libracionais), é normalmente descrita como uma técnica de espectroscopia vibracional.

Enquanto técnica de espectroscopia vibracional, a espectroscopia de Raman fornece informação sobre os níveis de energia dos modos normais de vibração de um sistema – os mesmos modos vibracionais estudados pela espectroscopia de absorção no infravermelho. Como os níveis vibracionais dependem da composição do sistema (tipo de átomos, força das ligações, geometria, interações intermoleculares, etc.), tanto os espectros de Raman como os de infravermelho funcionam como uma “impressão digital” da estrutura química, permitindo identificar e caracterizar uma amostra.

A diferença entre a espectroscopia de difusão de Raman e a espectroscopia de absorção no infravermelho resulta das diferenças nos processos físicos que governam a interação entre a radiação e a matéria. Tal como ilustrado na FIGURA 1 A), a espectroscopia no infravermelho mede diretamente a diferença de energia entre níveis vibracionais: para que ocorra absorção, a energia da radiação incidente tem de coincidir exatamente com a diferença de energia entre o nível vibracional fundamental e o nível excitado (identificados como  $v=0$  e  $v=1$  na FIGURA 1).

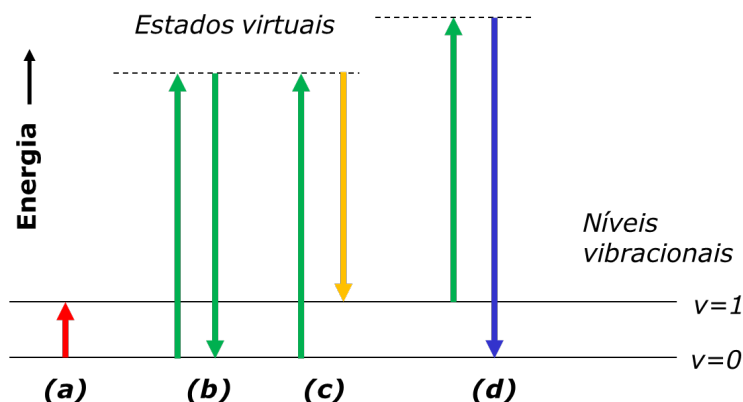


FIGURA 1. Representação esquemática dos processos de absorção e de difusão. Processo de absorção (a). Difusão de Rayleigh (b). Difusão de Raman (c, d). ( $v=0$  e  $v=1$  correspondem, respetivamente, aos níveis vibracionais fundamental e excitado de um modo normal ativo em Raman).

Para provocar a difusão de Raman, a amostra é iluminada com radiação monocromática cuja energia é superior à diferença entre  $v=0$  e  $v=1$ . A descrição física do processo assume que o fóton incidente é absorvido, levando o sistema a um estado de energia virtual (linhas tracejadas na FIGURA 1), a partir do qual o fóton difundido é imediatamente emitido. Os fótons incidentes podem ser difundidos de forma elástica (difusão de Rayleigh, FIGURA 1 B)) ou inelástica (difusão de Raman, FIGURAS 1 C) e 1 D)). A diferença de energia entre os fótons incidentes e os fótons difundidos de forma inelástica,  $\nu - \nu_0$ , chama-se desvio de Raman e corresponde à mesma diferença de energia medida diretamente na absorção no infravermelho.

Quando os fótons difundidos têm menor energia do que os incidentes, os desvios observados são negativos e correspondem aos desvios de Stokes, ou região de Stokes (FIGURA 1 C)). Os desvios de anti-Stokes (FIGURA 1 D)) correspondem a valores positivos de  $\nu - \nu_0$ , uma vez que o nível inicial é  $v=1$  ou superior. Normalmente, o espectro de Raman é registado apenas na região de Stokes, pois a região anti-Stokes contém a mesma informação sobre os níveis de energia, mas apresenta menor sensibilidade: a intensidade das transições anti-Stokes diminui exponencialmente com o aumento de  $\nu - \nu_0$ , devido à menor população dos estados vibracionais excitados  $v=1$  (FIGURA 2).

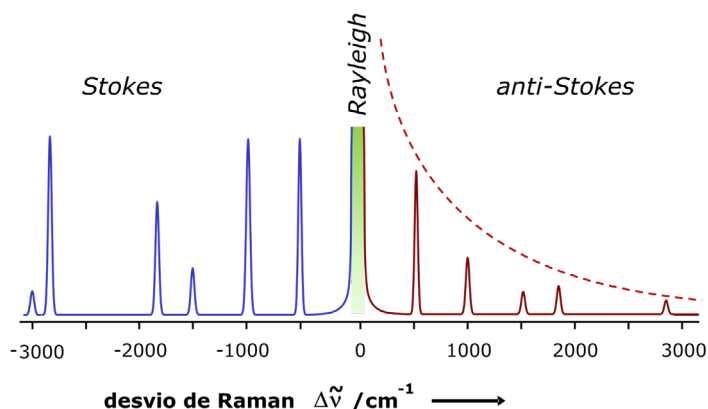


FIGURA 2. A intensidade das bandas anti-Stokes diminui de acordo com a distribuição de Boltzmann das populações, representada pela linha a tracejado. (Note-se que os desvios de Stokes são normalmente apresentados sem o sinal negativo usado nesta figura.)

Na espectroscopia de absorção no infravermelho, a intensidade das bandas é determinada pela variação do momento dipolar durante o movimento vibracional. Uma grande variação do momento dipolar resulta numa absorção intensa; se não houver variação do momento dipolar durante a vibração, não ocorre absorção. Isto explica porque o modo de estiramento do grupo carbonilo,  $\nu(\text{C}=\text{O})$ , origina a conhecida banda intensa por volta de  $1750 \pm 90 \text{ cm}^{-1}$ , característica de compostos orgânicos como aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos, enquanto o modo de estiramento  $\text{C}=\text{C}$  é geralmente descrito como uma banda de absorção fraca.

Na espectroscopia de Raman, a intensidade da interação entre a radiação e a matéria – isto é, o número de fótons difundidos por um determinado modo vibracional – depende da variação

da polarizabilidade molecular durante o movimento vibracional. A polarizabilidade, que traduz a facilidade de distorção da nuvem eletrônica, tem de variar de forma assimétrica ao longo da vibração. Este conceito é um pouco menos intuitivo do que a “variação do momento dipolar”, mas o resultado prático é que os modos fortemente ativos no infravermelho tendem a ser fracos em Raman, enquanto os modos fracos ou mesmo invisíveis no infravermelho aparecem frequentemente como bandas intensas no espectro de Raman.

A FIGURA 3 ilustra este comportamento ao comparar os espectros de infravermelho e de Raman do ácido trans-cinâmico, um composto orgânico com ligações C=O e C=C duplas: no espectro de Raman, a banda mais intensa corresponde ao modo  $\nu(\text{C}=\text{C})$ , enquanto a banda  $\nu(\text{C}=\text{O})$ , dominante no espectro de infravermelho, é praticamente inexistente.

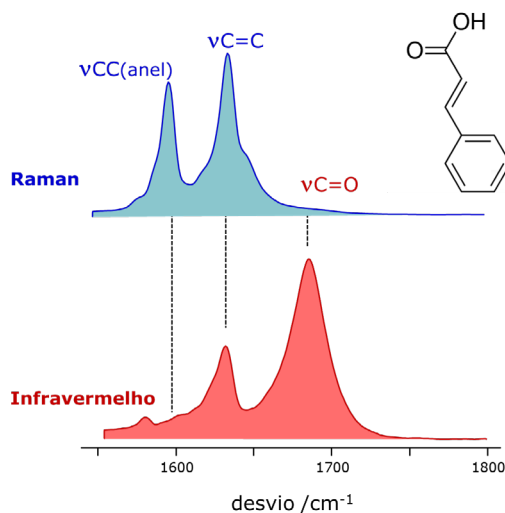


FIGURA 3. Espectros de infravermelho e de Raman do ácido trans-cinâmico na região de 1550–1800  $\text{cm}^{-1}$ .

Isto significa que, para estudos estruturais, estas duas técnicas são complementares – e são frequentemente usadas em conjunto. No entanto, do ponto de vista analítico, é importante ter presente que os padrões de bandas que caracterizam um determinado sistema são diferentes em absorção no infravermelho e em difusão de Raman. Para um espectroscopista vibracional, a escolha entre estas técnicas deve basear-se nas suas vantagens relativas face ao objetivo pretendido.

De acordo com a descrição anterior, a espectroscopia de Raman requer uma fonte de radiação monocromática – a frequência  $\nu_0$  em relação à qual são medidos os desvios Raman. Como o efeito Raman é muito fraco, é desejável também um feixe intenso, idealmente com trajetória pouco divergente. As características “monocromático”, “não divergente” e “alta intensidade” descrevem quase perfeitamente a radiação LASER (o LASER acrescenta ainda a coerência do feixe – todas as ondas elementares emitidas mantêm uma diferença de fase constante no espaço e no tempo). Por esta razão, os espectrómetros de Raman utilizam fontes laser.

Vale a pena introduzir aqui uma nota histórica: C. V. Raman observou pela primeira vez o “efeito Raman” usando um feixe de luz solar filtrado e colimado (com seleção de raios de trajetória paralela). O equipamento incluía um telescópio para recolher a luz difundida pela amostra, filtros de vidro colorido para selecionar o comprimento de onda da luz incidente e bloquear a difusão de Rayleigh, e os próprios olhos de Raman como detector. O primeiro “espectro de Raman” foi obtido por C. V. Raman com uma lâmpada de arco de mercúrio em quartzo, um filtro azul para selecionar a linha de 435,8 nm e uma placa fotográfica como sistema de registo.

A frequência da fonte laser,  $\nu_0$ , tem várias implicações práticas (por exemplo, tamanho do foco do feixe, profundidade de penetração na amostra, intensidade da luz difundida, entre outras), mas há uma que merece destaque: quando  $\nu_0$  é elevada, o estado virtual pode coincidir com um estado electrónico excitado da amostra, originando fluorescência (FIGURA 4 C)). O efeito Raman de ressonância, também representado, é um caso particular do efeito Raman que produz uma amplificação muito forte da difusão associado aos modos vibracionais ligados à alteração geométrica da molécula no estado electrónico excitado.

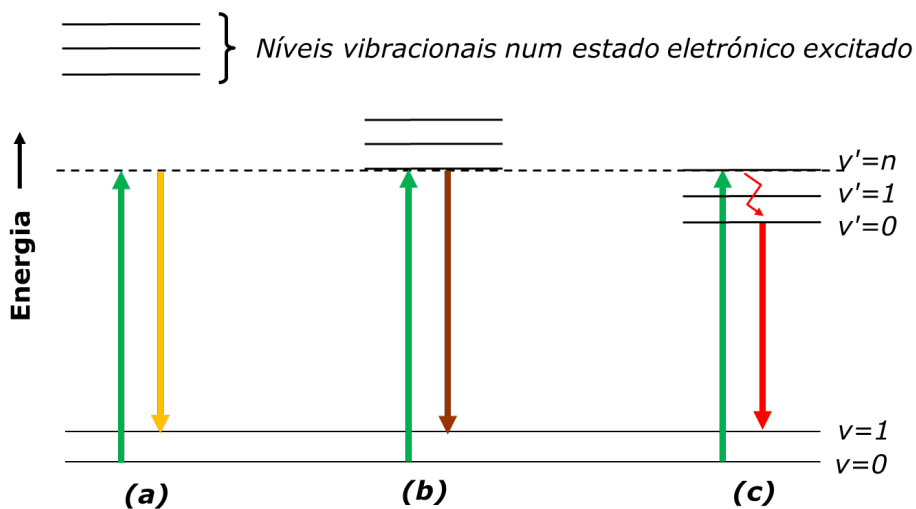


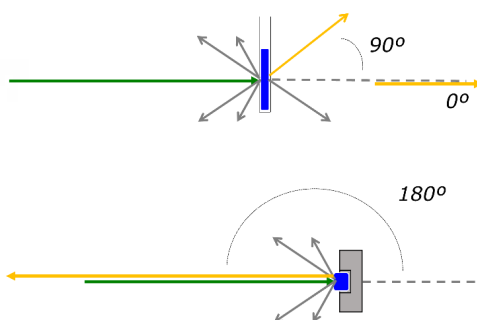
FIGURA 4. Representação esquemática dos processos de fluorescência e de Raman de ressonância. Efeito Raman normal (a); efeito Raman de ressonância (b); fluorescência (c).

A fluorescência é várias ordens de grandeza mais intensa do que o efeito Raman, o que constitui um problema mesmo quando – e muitas vezes precisamente quando – o sistema fluorescente é apenas uma impureza da amostra. Até há poucas décadas, eram necessários processos de purificação longos e trabalhosos para eliminar a fluorescência causada por impurezas. Este foi o principal motivo que impediu a espectroscopia de Raman de competir com a espectroscopia no infravermelho como técnica de rotina em muitas aplicações práticas (por exemplo, química alimentar, indústria petroquímica, indústria da pasta e papel, aplicações biomédicas, entre outras).

A solução para este problema passa por afastar a energia do laser das transições electrónicas indesejadas. Isto é normalmente conseguido alterando a frequência da fonte laser (por exemplo, da linha verde de comprimento de onda 514,5 nm de um laser Ar<sup>+</sup> para a região do infravermelho próximo, de um laser Nd:YAG com radiação de comprimento de onda 1064 nm). A desvantagem dos lasers de maior comprimento de onda é a sensibilidade do detetor, que geralmente diminui com o aumento do comprimento de onda (ou diminuição da frequência e, portanto, da energia). Além disso, ocorre uma perda direta de sinal, uma vez que a eficiência da difusão Raman é proporcional a  $\nu_0^4$ , sendo  $\nu_0$  a frequência da radiação incidente. Esta limitação foi ultrapassada com a aplicação da Transformada de Fourier à espectroscopia de Raman (FT-Raman). No FT-Raman, todas as frequências chegam ao detetor em simultâneo, compensando a menor sensibilidade do detetor (vantagem multiplex, ou vantagem de Fellgett).

Como resultado, lasers de frequência mais elevada são usados em espectrómetros dispersivos “convencionais” – com monocromador e detetores fotomultiplicadores ou dispositivos CCD – enquanto lasers de menor frequência são usados nos espectrómetros FT, equipados com interferómetro, filtro de rejeição de faixa (“notch”) e detetores de estado sólido.

Uma característica muito importante da espectroscopia de Raman é o tamanho da amostra – ou, mais precisamente, o tamanho da porção da amostra que é efetivamente analisada. Isto tem implicações tanto no tamanho das partículas que podem ser estudadas por Raman como nas aplicações em imagem. A colocação da amostra é relativamente simples e são possíveis várias geometrias de recolha da radiação (FIGURA 5).



**FIGURA 5.** Geometria da radiação incidente e da radiação recolhida: 0° ou 90° e 180°, também conhecida como “retro-difusão”. Ambas as geometrias são possíveis para líquidos (por exemplo, tubos capilares de vidro) ou sólidos (por exemplo, tubo capilar de vidro ou disco de alumínio). A geometria de difusão frontal, 0°, depende da transparência da amostra.

---

# Separar para conhecer.

Cromatografia, um processo físico-químico de separação de moléculas.

**Mara E. M. Braga, Patrícia Matos**

DEQ/ CERES/ FCTUC/ U. Coimbra

ARTIGO

12

A cromatografia é uma técnica que permite separar os diferentes componentes de uma mistura complexa, funcionando como um “filtro seletivo” que distingue moléculas com base nas suas propriedades físico-químicas. Este artigo apresenta uma introdução clara aos conceitos de fase móvel e estacionária, clarifica as diferentes tipologias de cromatografia segundo a sua geometria e mecanismo, e explica a interpretação de perfis de separação (cromatogramas). Finalmente, demonstra-se a utilidade prática da técnica na indústria alimentar, recorrendo a exemplos reais como a caracterização aromática de vinhos e a monitorização de contaminantes, essenciais para garantir a segurança do consumidor.

A origem da cromatografia remonta ao início do século XX, sendo atribuída ao botânico Mikhael Tswett, que utilizou a técnica para separar pigmentos vegetais, como as clorofilas.

Desde então, evoluiu de um método simples de laboratório para uma das ferramentas analíticas mais poderosas da ciência moderna. Através dela, é possível identificar (análise qualitativa) e medir (análise quantitativa) substâncias em concentrações extremamente baixas, sendo indispensável em áreas que vão da medicina forense ao controlo de qualidade industrial.

## **Princípios básicos: o jogo das duas fases.**

Para compreender a cromatografia, deve-se imaginar um sistema composto por duas fases:

Fase estacionária: um material que permanece fixo (pode ser um sólido ou um líquido retido num suporte).

Fase móvel: um fluido (líquido ou gás) que transporta a mistura a separar através da fase estacionária.

A separação ocorre porque cada componente da mistura interage de forma diferente com estas duas fase. As moléculas que têm maior “afinidade” pela fase estacionária movem-se mais lentamente, enquanto as que preferem a fase móvel avançam mais depressa. Esta diferença de velocidade é o que permite a separação física dos componentes ao longo do tempo ou do espaço.

A FIGURA 1 representa o processo de forma simplificada: 1.º, a mistura é inserida no sistema; 2.º, a fase móvel transporta as moléculas que estabelecem um equilíbrio com a fase estacionária; 3.º e 4.º, sucessivas etapas de equilíbrio separam as moléculas consoante a sua afinidade; 5.º, o gráfico (cromatograma) mostra o sinal do detetor com a sequência de saída das moléculas.

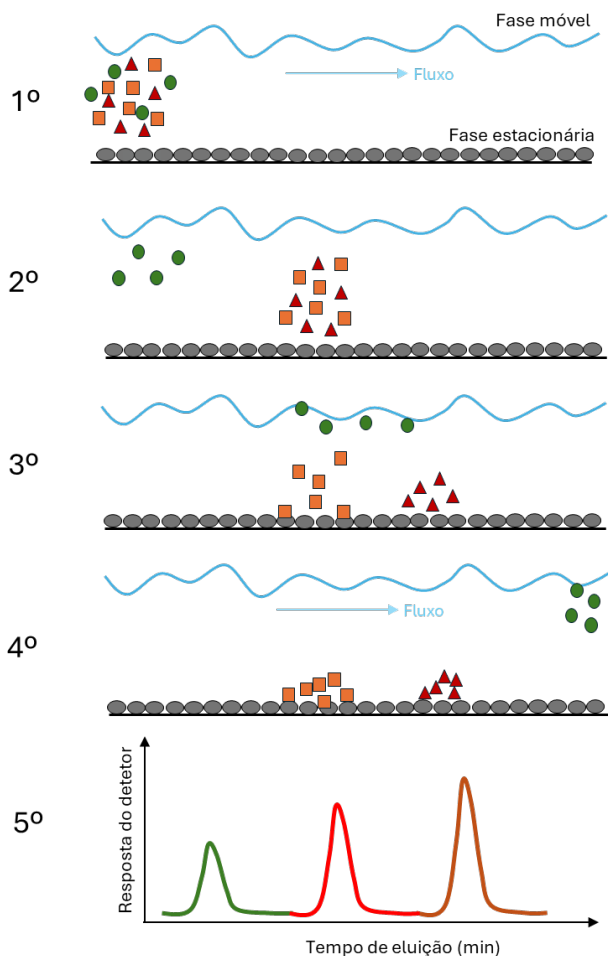


FIGURA 1. Separação de três moléculas numa coluna cromatográfica.

### Classificação e mecanismos (clarificação técnica).

Para evitar confusões comuns, é importante distinguir a geometria do sistema do mecanismo químico de interação:

Quanto à geometria e fase móvel (TABELA 1).

TABELA 1. Classificação da cromatografia segundo a fase móvel e a geometria do sistema.

Critério	Tipo de Cromatografia	Fase Móvel	Aplicação Comum
<b>Geometria Planar</b>	Em Camada Fina (TLC*)	Líquida	Testes rápidos, pureza de síntese.
<b>Geometria de Coluna</b>	Gasosa (GC)	Gás Inerte	Compostos voláteis, aromas, gases.
	Líquida de Alta Resolução (HPLC*)	Líquida (Solventes)	Proteínas, vitaminas, fármacos.

\*TLC – do inglês Thin Layer Chromatography; HPLC – do inglês High Pressure Liquid Chromatography.

**Cromatografia planar:** realizada em superfícies planas, como papel ou placas de sílica (Cromatografia em Camada Fina).

**Cromatografia em coluna:** a fase estacionária está contida dentro de um tubo (coluna). Dependendo da fase móvel, divide-se em:

**Cromatografia líquida (LC, do inglês Liquid Chromatography):** usa solventes líquidos.

**Cromatografia gasosa (GC, do inglês Gas Chromatography):** usa gases inertes (ideal para substâncias voláteis).

A FIGURA 2 apresenta exemplos visuais dos materiais usados para as geometrias usadas.

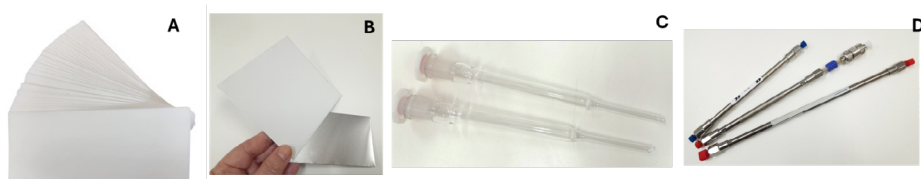


FIGURA 2. Material utilizado em cromatografia planar, como papel (A) e placa revestida de sílica (B), ou tubular, como coluna aberta de vidro (C) e coluna metálica (D).

Quanto ao mecanismo de separação (o processo molecular), independentemente de ser em coluna ou planar, a separação pode ocorrer por:

**Afinidade:** baseada em interações biológicas específicas (ex: anticorpo-antígeno).

**Adsorção:** o analito adere à superfície da fase estacionária sólida.

**Exclusão molecular:** as moléculas são separadas pelo seu tamanho, como um peneiro.

**Troca iônica:** baseada na atração entre cargas elétricas opostas.

**Partição:** o analito distribui-se entre a fase móvel e uma película líquida na fase estacionária (baseado na solubilidade).

A FIGURA 3 apresenta essa classificação de forma simplificada.

Tempo de retenção (tR): o tempo que uma molécula demora a atravessar o sistema (correr pela coluna ou pela placa). É característico de cada substância (identidade).

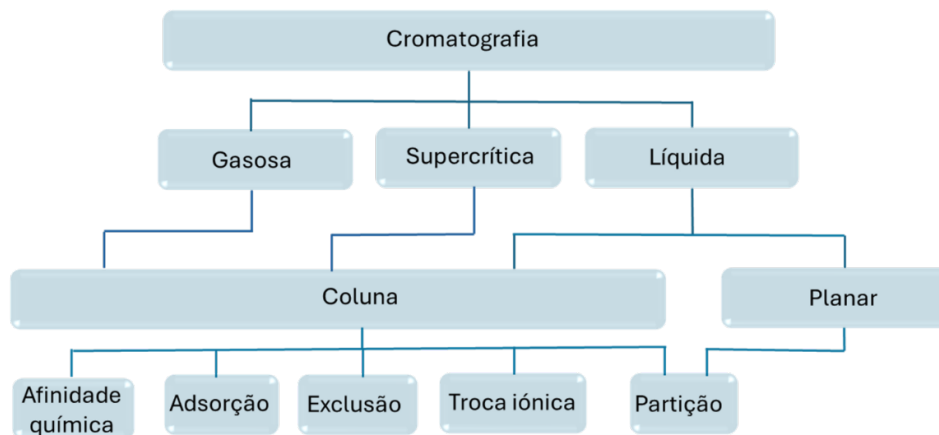


FIGURA 3. Classificação dos tipos de cromatografia em função do solvente, da geometria e composição da fase estacionária.

Área do pico ou da mancha: é proporcional à quantidade de substância presente (quantidade).

Resolução (Rs): mede quão bem dois picos ou manchas estão separados. Uma boa resolução é crítica para garantir que um contaminante não está “escondido” sob o pico ou mancha de outro componente.

A FIGURA 4 apresenta um cromatograma feito em coluna, com picos bem separados e em destaque um pico com a área em azul para exemplificar. Também apresenta uma imagem de TLC, com manchas sobrepostas à esquerda, amarela e azul, e as arroxeadas - uma separada e outras que se arrastam com grande afinidade com a placa, e a última alaranjada com boa resolução.

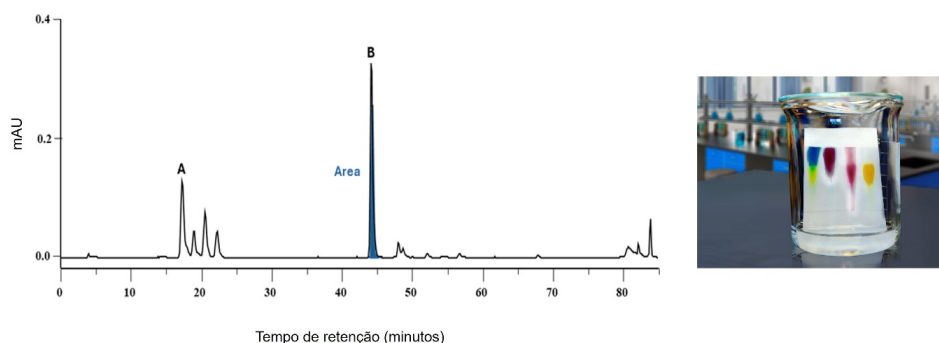


FIGURA 4. Exemplo de um cromatograma com a separação de várias moléculas, exemplificado pelas moléculas A e B, obtido por HPLC (esquerda) e TLC (direita). Os picos do cromatograma são analisados por tempo de retenção (tR, minutos), área e resolução (Rs) em azul.

---

# O conceito de massa molecular e as propriedades dos polímeros.

**Vinícius de Paula**

CICECO – IMA/ DQ/ U. Aveiro

Os polímeros distinguem-se de outras moléculas de pequena dimensão por serem macromoléculas constituídas por unidades de repetição ligadas entre si em cadeias longas. No entanto, numa amostra real de polímero, nem todas as cadeias têm o mesmo comprimento, o que significa que não existe uma única massa molecular capaz de descrever completamente o material. Por essa razão, recorre-se ao conceito de massa molecular média, em particular à massa molecular média numérica e à massa molecular média ponderal. Estas grandezas são fundamentais para compreender o comportamento dos polímeros, uma vez que influenciam propriedades físicas e mecânicas como a viscosidade, a resistência e a deformabilidade.

Os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades estruturais ao longo de uma cadeia. Estas unidades de repetição resultam, em muitos casos, da transformação química de monómeros; isto é, moléculas de menor dimensão que reagem e se ligam entre si para dar origem a oligómeros (espécies de dimensão intermédia), e eventualmente ao polímero (quando as cadeias já são significativamente grandes).

Ao contrário das moléculas pequenas, que possuem uma massa molecular bem definida, os polímeros são normalmente constituídos por cadeias de diferentes comprimentos. Esta característica é uma das razões pelas quais a sua descrição exige conceitos próprios. Numa amostra de um polímero sintético, como o poli(tereftalato de etileno) (PET, do inglês *poly (ethylene terephthalate)*), o poliestireno ou o poli (cloreto de vinilo) (PVC, do inglês *poly (vinyl chloride)*), coexistem geralmente cadeias curtas, médias e longas. Embora todas sejam quimicamente semelhantes, diferem no número de unidades de repetição que contêm. Assim, quando se pergunta qual é a massa molecular de um polímero, a resposta não pode ser dada por um único valor absoluto, como acontece para uma molécula mais simples. Em vez disso, é necessário recorrer a médias que representem a distribuição de tamanhos das cadeias presentes.

Uma das grandezas mais utilizadas é a massa molecular numérica média, habitualmente representada por  $\bar{M}_n$ . Esta média resulta de considerar o número de moléculas existentes para cada tamanho de cadeia, atribuindo o mesmo peso estatístico a cada molécula. Em termos simples,  $\bar{M}_n$  corresponde à média aritmética das massas moleculares das cadeias presentes. É, por isso, uma medida útil para descrever o tamanho médio das moléculas de uma amostra polimérica e para controlar parâmetros como o ajuste da estequiometria em reações de polimerização.

Outra grandeza importante é a massa molecular ponderal média, representada por  $\bar{M}_w$ . Neste caso, as cadeias de maior massa molecular contribuem mais fortemente para o valor final. Isso significa que  $\bar{M}_w$  é particularmente sensível à presença de moléculas longas, mesmo que estas não sejam as mais numerosas. Como as cadeias maiores tendem a influenciar de forma marcante o comportamento global do material, é muitas vezes considerada mais representativa em termos de propriedades físicas.

A diferença entre  $\bar{M}_n$  e  $\bar{M}_w$  mostra que um polímero não deve ser entendido como um conjunto de moléculas todas iguais, mas sim como uma população de cadeias com vários comprimentos. Quando todas as cadeias têm exatamente o mesmo tamanho, diz-se que o polímero é monodisperso, e nesse caso verifica-se que  $\bar{M}_n = \bar{M}_w$ . Contudo, a maioria dos polímeros obtidos industrialmente é polidispersa; isto é, apresenta uma distribuição de massas moleculares. Essa distribuição pode ser mais estreita ou mais larga, dependendo do processo de síntese e das condições de polimerização, e quanto mais larga, maior a razão entre  $\bar{M}_w$  e  $\bar{M}_n$ , e maior o índice de polidispersividade ( $PI$ ).

Como se pode verificar no exemplo da FIGURA 1, para um sistema constituído por  $N = 1$  homem ( $M = 100$  kg) e os seus ( $N = 2$ ) cães ( $M = 1$  kg) a média ponderada é mais realista. Isto é, fica mais perto da massa real do sistema, uma vez que a massa dos cães é praticamente desprezável neste contexto.

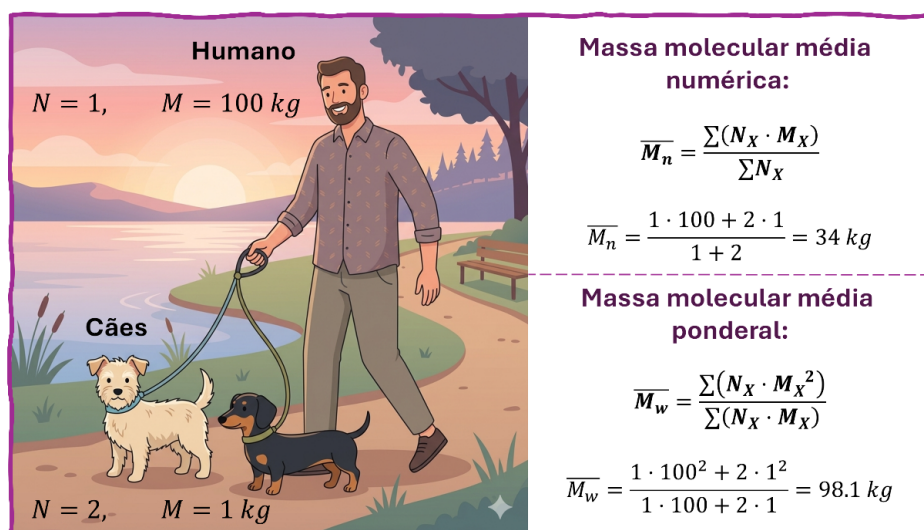


FIGURA 1. Exemplo ilustrativo da diferença entre o valor a massa molecular numérica ( $\bar{M}_n$ ) e a massa molecular média ponderal ( $\bar{M}_w$ ) para um sistema constituído por  $N = 1$  homem de  $M = 100$  kg e  $N = 2$  cães de  $M = 1$  kg.

O facto de os polímeros apresentarem diferentes massas moleculares não é apenas uma curiosidade estatística: tem consequências muito concretas nas suas propriedades. Em geral, à medida que a massa molecular aumenta, as cadeias tornam-se mais longas e mais propensas a entrelaçar-se. Esses entrelaçamentos dificultam o movimento relativo das cadeias e tornam o material mais coeso. Como resultado, a resistência mecânica tende a aumentar e o material pode suportar maiores deformações antes de fraturar, como ilustrado na FIGURA 2.

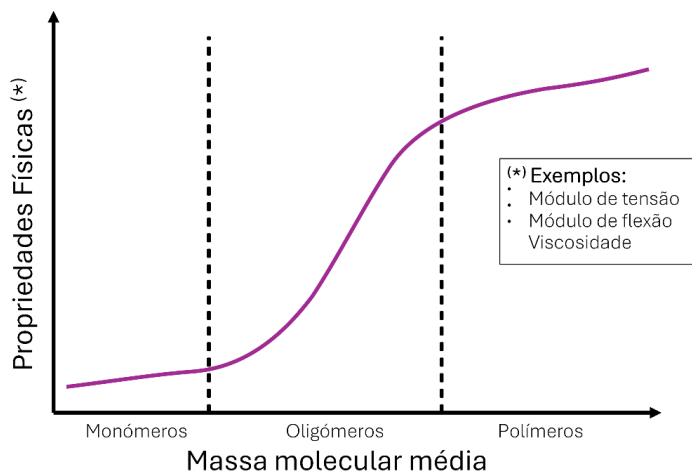


FIGURA 2. Relação entre a massa molecular média e as propriedades físicas dos polímeros.

A massa molecular também influencia fortemente a viscosidade. Um polímero com cadeias mais longas escoia com maior dificuldade, quer em solução, quer depois de fundido. Esta relação é particularmente importante no processamento de materiais plásticos, por exemplo em operações de extrusão, moldação por injeção ou formação de fibras. Um aumento da massa molecular pode melhorar certas propriedades mecânicas, mas também pode dificultar o processamento, exigindo temperaturas mais elevadas ou maiores esforços mecânicos. Por outro lado, a presença de uma mistura de cadeias de diferentes comprimentos pode ser benéfica. Cadeias mais curtas podem facilitar o movimento das cadeias maiores, atuando como lubrificante, e contribuindo para ajustar o equilíbrio entre rigidez, processabilidade e resistência. Assim, não é apenas o valor médio da massa molecular que importa, mas também a forma como essa massa se distribui entre as várias cadeias presentes na amostra.

As propriedades dos polímeros dependem, naturalmente, de outros fatores para além da massa molecular. A estrutura química da unidade de repetição, o grau de ramificação, a presença de reticulações, a organização estereoquímica e a maior ou menor cristalinidade influenciam igualmente o comportamento do material. Ainda assim, a massa molecular média continua a ser um dos conceitos mais fundamentais em ciência dos polímeros, porque estabelece uma ponte direta entre a escala molecular e as propriedades observadas à escala macroscópica. Mais do que simples números, estas grandezas permitem perceber porque é que dois materiais com composição química semelhante podem exibir comportamentos muito diferentes.

---

# O Princípio da Equivalência.

**Eduardo Lage**

U.Porto

Após a formulação da Teoria da Relatividade Restrita em 1905, Einstein considerou dois problemas: generalizar a teoria a movimentos não uniformes e elaborar uma teoria relativista da gravitação. Em 1907, apercebe-se que estes problemas são um só e apresenta o seu Princípio da Equivalência: um observador acelerado no espaço livre e um observador em repouso num campo gravítico uniforme devem obter os mesmos resultados para qualquer experiência. Aplicou o Princípio para deduzir que relógios em repouso num campo gravítico não sincronizam e estimou o desvio para o vermelho do raio de luz que sobe num campo gravítico e o desvio do raio de luz pelo campo gravitacional do Sol. Apercebe-se que o espaço-tempo não é apenas uma forma conveniente de representar acontecimentos, mas é um “tecido” que se deforma por ação do campo alterando a sua métrica e transformando o efeito da gravidade num problema de geometria onde o intervalo desempenha o papel da métrica na geometria tradicional. A noção de curvatura do espaço-tempo é discutida e exemplificada. O movimento de partículas e raios de luz é brevemente considerado. O Princípio é a base onde assenta a Teoria da Relatividade Geral.



FIGURA 1. Funcionário de classe no gabinete de patentes em Berna (1900-1909).

A Teoria da Relatividade Restrita estabelece a equivalência de todos os observadores em movimento uniforme e retilíneo, baseando-se em dois simples postulados: a covariância das leis da Física (i.e., essas leis têm a mesma forma para tais observadores) e a invariância da velocidade da luz no vácuo ( $c$ ). Daqui decorre que a relação entre coordenadas espaciais e tempos do mesmo acontecimento atribuídos por dois observadores é a transformação de Lorentz, originando a noção de espaço-tempo onde cada acontecimento é identificado por<sup>a</sup>  $x^\mu = (ct, x, y, z)$  e definindo uma métrica invariante designada por intervalo:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \equiv \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (1)$$

Aqui,  $\eta_{\mu\nu}$  é o tensor métrico simples com a forma:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{cases} 1 & \mu = \nu = 0 \\ -1 & \mu = \nu = 1, 2, 3 \\ 0 & \mu \neq \nu \end{cases}$$

O uso de coordenadas cartesianas na eq. (1) é convencional; poder-se-iam usando coordenadas cilíndricas, esféricas ou outras, com uma correspondente redefinição do tensor métrico, de modo que a última expressão naquela equação é mais geral e tem importância no que se segue.

Da invariância do intervalo resultam dois importantes resultados:

1.º O intervalo é nulo para um raio de luz:

$$ds = 0 \text{ raio de luz} \quad (2)$$

2.º No referencial de uma partícula, o intervalo reduz-se ao seu tempo próprio  $\tau$  (multiplicado por  $c$ ), o tempo “marcado” pelo seu relógio.

O tempo próprio permite caracterizar o movimento uniforme e retilíneo da seguinte maneira: uma partícula com tal movimento está, evidentemente, em repouso para um dado observador. Considerando esse observador, a linha de mundo da partícula entre dois instantes  $t_A < t_B$  é o segmento entre  $A$  e  $B$  no eixo  $x^0 = ct$  representado (a cheio) na FIGURA 2, tendo-se:  $\tau_B - \tau_A = t_B - t_A$ . Mas imagine-se uma outra linha de tempo começando em  $A$  e terminando em  $B$  (a vermelho na figura); para tal linha, o movimento não será retilíneo ou uniforme. O tempo próprio da partícula é:

$$\tau'_B - \tau'_A = \int_{t_A}^{t_B} dt \sqrt{1 - \frac{\mathbf{v}^2}{c^2}} < t_B - t_A = \tau_B - \tau_A$$

Assim, o movimento uniforme e retilíneo caracteriza-se por dar um máximo ao tempo próprio da partícula:

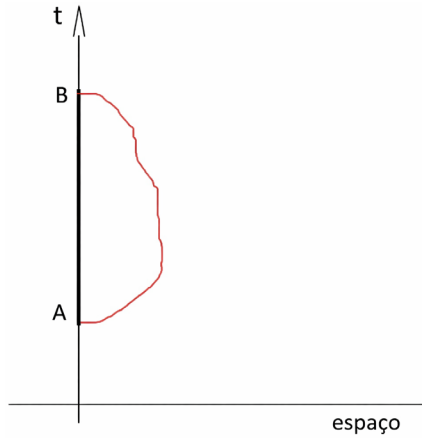


FIGURA 2. Linha de mundo da partícula em repouso (cheio) e para uma linha imaginada (vermelho).

$$\text{movimento uniforme e retilíneo} \Rightarrow \int d\tau \text{ máximo} \quad (3)$$

Este resultado é análogo ao bem conhecido teorema da geometria Cartesiana: de todas as linhas contínuas ligando dois pontos no espaço, o segmento de reta unindo esses pontos dá um mínimo à distância entre esses pontos.

A teoria da Relatividade Restrita não alterou a primeira lei de Newton, conhecido por Princípio da Inércia: uma partícula livre está em repouso ou em movimento uniforme e retilíneo; adaptou a segunda lei de Newton ao Princípio da Relatividade; e descartou a terceira lei de Newton, a lei da ação e reação, porque tal lei assume forças instantâneas à distância, antes fazendo sobressair a noção de campo. Quanto ao Eletromagnetismo, apenas reescreveu as equações de Maxwell sob forma covariante, garantindo, assim, a sua validade para qualquer observador.

Apesar dos seus sucessos, a teoria da Relatividade Restrita não contempla nem o campo gravítico nem movimentos genéricos de observadores, sendo conveniente rever sucintamente como a Mecânica Clássica trata estes problemas.

1.ª A lei da atração universal de Newton define a força de gravidade que um corpo exerce sobre outro através de um potencial gravítico  $\varphi$  que satisfaz a equação<sup>6</sup>:

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \quad (4)$$

onde  $G$  é a constante de Newton e  $\rho$  é a densidade de massa. A massa é, assim, a fonte do campo gravítico; para uma massa pontual  $m'$ , o potencial é  $\varphi(\vec{r}) = -G\frac{m'}{r}$ , originando a intensidade  $\vec{g} = -\nabla\varphi = -Gm'\frac{\vec{r}}{r^3}$  que atua sobre uma massa  $m$  com a força atrativa

$\vec{F} = m \vec{g} = -Gmm' \frac{\vec{r}}{r^3}$  pelo que a aceleração da partícula atuada é  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \vec{g}$ , independente da sua massa, como bem verificou Galileu.

2.º O Princípio da Inércia separa os observadores em dois grupos: num, ele é verificado (observadores inerciais) e no outro, ele não é verificado (observadores não inerciais) porque tais observadores se encontram acelerados em relação aos primeiros. A Segunda Lei de Newton é válida para os observadores inerciais (as forças que atuam sobre uma partícula resultam dos campos gravítico ou eletromagnético ou de colisões entre partículas). Contudo, pode relacionar-se a aceleração de uma partícula definida para um observador não inercial com a aceleração da mesma partícula definida para um observador inercial; substituindo esta aceleração por aquela na Lei Fundamental da Dinâmica obtém-se uma expressão em tudo idêntica àquela Lei mas onde, às forças reais atrás referidas, são adicionados termos que se interpretam como novas forças tais como a força centrífuga ou de Coriolis caracterizadas por serem proporcionais à massa da partícula. Estas forças adicionais, colectivamente designadas por forças inerciais, têm, pois, uma origem puramente geométrica: existem para um observador não inercial, não existem para um observador inercial.

Ora, sendo a força da gravidade proporcional à massa da partícula, tal como as forças inerciais, poderá ser eliminada mudando de observador? Isso é possível para um campo gravítico uniforme  $\vec{g}$ : um observador em queda livre não tem peso como bem se percebe com astronautas em órbita. Tal observador é realmente um observador inercial: se largar um objeto, este fica em repouso ou animado de um movimento uniforme e retilíneo, satisfazendo a Primeira Lei de Newton.

Inversamente, pode ser criado um campo gravítico uniforme  $\vec{g}$  sem existirem forças de atração universal? Se se considerar um observador acelerado uniformemente no espaço livre com a aceleração  $-\vec{g}$ , para tal observador (não inercial) qualquer partícula largada livremente está submetida à força inercial  $-m(-\vec{g}) = m\vec{g}$  que o observador interpreta como peso.

Um observador situado num campo gravítico uniforme  $\vec{g}$  é equivalente a um observador acelerado uniformemente com aceleração  $-\vec{g}$ . Equivalente significa que os resultados das mesmas experiências são idênticos para esses observadores.

É fundamental sublinhar que existem relógios e réguas universais que funcionam da mesma maneira para qualquer observador que com eles esteja em repouso e na mesma posição - as frequências e os comprimentos de onda da luz emitida ou absorvida por um átomo são os mesmos seja onde for que se situe o observador ou qual o seu estado de movimento. Tal não significa, porém, que os relógios estejam sincronizados ou que réguas sejam comparáveis como já se havia concluído na Teoria da Relatividade Restrita para relógios ou réguas em movimento relativo uniforme e retilíneo.

Com base no Princípio, Einstein fez as previsões que se seguem.

1.ª No campo gravítico uniforme  $\vec{g}$  um emissor (E) envia verticalmente um trem de ondas eletromagnéticas de frequência  $\nu(0)$  e duração  $\delta t(0)$  de modo que  $\nu(0)\delta t(0) = n =$  número de nodos. O trem é recebido num detetor (D) à altura  $H$  (FIGURA 4). Qual a duração  $\delta t(H)$  e frequência  $\nu(H)$  do trem recebido, sendo evidentemente  $\nu(H)\delta t(H) = n$ ?

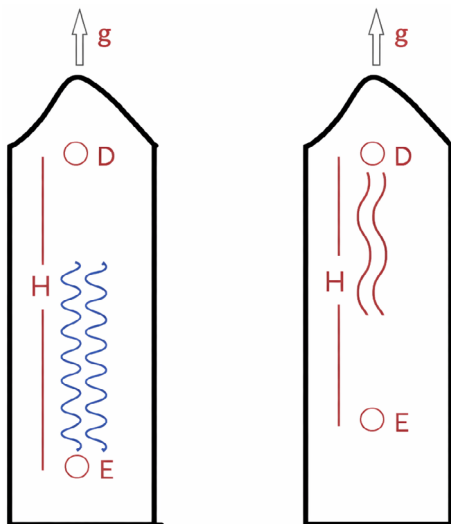


FIGURA 3. O raio de luz é recebido com frequência menor do que quando foi emitido.

Imagine-se um foguetão que acelera ( $-\bar{g}$ ) no espaço livre e que transporta os mesmos emissor e recetor separados pela distância  $H$ . O trem de ondas é emitido na base do foguetão com frequência  $\nu(0)$  e duração  $\delta t(0)$ ; quando é recebido, já o recetor está em movimento em relação ao emissor no momento da emissão, verificando-se, pois, o efeito Doppler (FIGURA 3).

### Notas

<sup>a)</sup>No que se segue, os índices gregos  $\mu, \nu$  tomam os valores 0 para coordenada temporal e 1, 2, 3 para as coordenadas espaciais, e  $g, x, y, z$ . A diferença entre índices "em baixo", covariantes, e "em cima", contravariantes, é explicada no Apêndice. Soma sobre índice repetido é convenção adoptada.

<sup>b)</sup>Esta equação é semelhante à equação de Poisson do Eletromagnetismo e deduz-se por simples comparação.

# O método de aproximação poligonal de Feynman.

João Nuno Tavares

U. Porto

Este é o segundo de dois artigos sobre a relação entre as leis de Kepler e a lei de atração universal de Newton. O primeiro, com o título *A Proposição XI dos Principia Mathematica de Newton* foi publicado na edição de dezembro de 2024 da *Revista de Ciência Elementar*. Neste segundo artigo o objetivo é descrever como Feynman resolve o chamado problema inverso relativo à força central, usando apenas argumentos de geometria elementar, detalhados no texto que a seguir se apresenta.

## 1. Os problemas direto e inverso.

Para começar, suponhamos que temos um campo de forças central (ou radial)  $F$ , isto é, em cada ponto  $P$  (o Planeta),  $F(P)$ , a força aplicada numa partícula teste de massa 1, colocada em  $P$ , tem a direção da reta que une  $P$  a um centro de forças fixo  $S$  (o Sol).

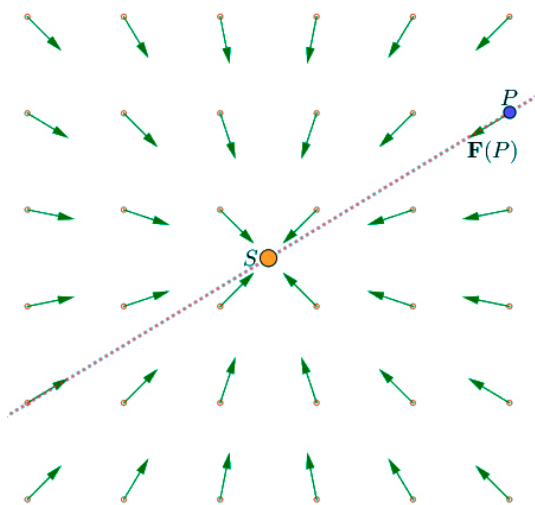


FIGURA 1. Campo de forças central  $F$ , de centro de forças fixo  $S$ . Em cada ponto  $P$ ,  $F(P)$ , tem a direção da reta que une  $P$  ao centro de forças  $S$ . Na figura o campo é de atração. O Sol  $S$  atrai o planeta  $P$ . A força é dirigida de  $P$  para  $S$ .

Neste contexto, podemos formular dois problemas, que queremos discutir e resolver – o Problema direto e o Problema inverso, definidos como segue:

- Problema direto... Dada uma determinada trajetória,  $t \mapsto P(t)$ , da partícula  $P$ , e um centro de forças fixo,  $S$ , determinar como é que a intensidade da força depende da distância  $|PS|$ , entre  $P$  e  $S$ :

$$F(P) \stackrel{?}{=} \text{função de } |PS| \quad (1)$$

onde  $F(P) = \|F(P)\|$  é a intensidade da força  $F(P)$ .

- Problema inverso... Conhecido o campo de forças central  $F$ , de centro de forças fixo  $S$ , determinar a trajetória,  $t \mapsto P(t)$ , de um ponto  $P$  que se move sob a ação desse campo de forças.

Como vimos no primeiro artigo, em 1687, Newton, na *Proposição I dos Principia*, usou a sua segunda lei: “força = massa  $\times$  aceleração”, e um método de aproximação poligonal, para demonstrar a lei das áreas de Kepler, válida para qualquer força central, independentemente da sua intensidade! Por comodidade recordamos aqui essa proposição:

### Proposição I dos Principia de Newton...

Seja  $S$  um ponto fixo (o Sol) e  $P$  um ponto móvel (um planeta) sobre o qual, em cada instante, a única força,  $F(P)$ , que nele atua é central, isto é, tem a direcção de  $P$  para  $S$ . Então:

- a trajetória de  $P$  é plana.
- o vetor  $\overrightarrow{SP}$  varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais (Lei das áreas de Kepler).

Já na Proposição XI dos Principia, que também aqui se recorda:

### Proposição XI dos Principia de Newton...

Suponhamos que  $P$  se move numa elipse  $\varepsilon$  e que a aceleração de  $P$  é sempre radial, isto é, tem sempre a direcção de  $P$  para  $S$ , onde  $S$  é um foco da elipse  $\varepsilon$ .

Então a intensidade dessa aceleração, e portanto da força radial atrativa que atua em  $P$ , é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre  $P$  e  $S$ :

$$F(P) \propto 1 / |SP|^2$$

Usando este resultado e novamente argumentos de aproximação, Newton criou um método geral para resolver o problema direto, isto é, um método geométrico que permite determinar a intensidade da força central responsável por um dado movimento orbital, em torno de um centro de forças fixo  $S$ . Este método genial foi exposto no primeiro artigo publicado na RCE de dezembro de 2024.

Os exemplos ilustrativos deste método geral, incluídos na sua grande obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, foram os seguintes:

	Órbita	Centro de forças	Força
1.	Circunferência	Centro de circunferência	$F(P) \equiv \text{constante}$
2.	Circunferência	Um ponto qualquer na circunferência	$F(P) \propto 1/ SP ^5$
3.	Eclipse	Centro da elipse	$F(P) \propto  SP $
4.	Eclipse	Um foco da elipse	$F(P) \propto 1/ SP ^2$
5.	Espiral	Polo da espiral	$F(P) \propto 1/ SP ^3$

Onde o símbolo  $\propto$  significa “proporcional a”.

A linha 4, refere-se obviamente à lei de atração universal de Newton: “Se a órbita é uma elipse, e o centro de forças,  $S$ , é um foco dessa elipse, então a intensidade da força central é proporcional ao inverso do quadrado da distância de  $P$  a  $S$ :  $F(P) \propto 1/|SP|^2$ ”.

## 2. A aula esquecida de Feynman. A aproximação poligonal de Feynman.

Feynmann resolve, na sua *Lost lecture*, o problema inverso relativo à força central

$$F(P) \propto \frac{1}{|SP|^2} \quad (2)$$

Por outras palavras, sabendo que a intensidade do campo de forças central, é proporcional ao inverso do quadrado da distância do planeta ao Sol, ele prova a primeira lei de Kepler (lei das elipses) – “Esse planeta move-se sobre uma elipse, com o sol  $S$  num dos focos” – usando apenas argumentos de geometria elementar!

Como vimos, Newton considera uma aproximação poligonal da órbita, constituída por uma série de pontos separados por um mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ . Em cada um desses pontos, a trajetória do planeta é desviada do movimento rectilíneo, por inércia, por uma força impulsiva que o “empurra” em direcção ao Sol (ver a FIGURA 5, que aqui se reproduz de novo: FIGURA 2).

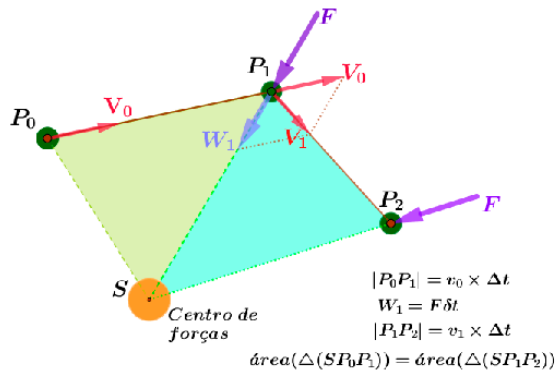


FIGURA 2. Método de aproximação poligonal de Newton.

Por outro lado, Richard Feynman usa uma aproximação poligonal diferente: os vértices da poligonal, em vez de estarem separados por um mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ , estão agora separados por um mesmo ângulo ao centro  $\Delta\theta$ . Veja a FIGURA 3, onde se comparam as duas abordagens, respectivamente, de Newton e Feynman, e ainda a FIGURA 4.

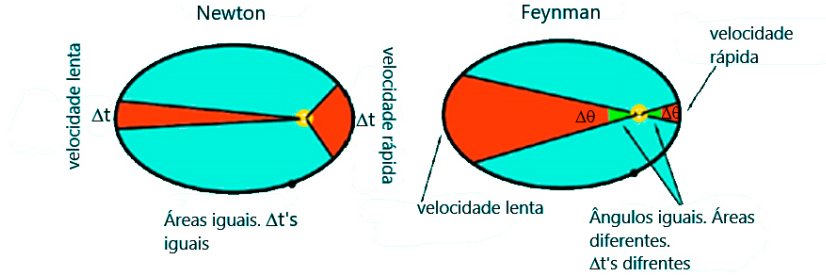


FIGURA 3. Diferenças nas abordagens de Newton e Feynman.

Na FIGURA 4 os dois segmentos têm um mesmo ângulo ao centro, mas delimitam áreas diferentes e, portanto, correspondem a tempos de percurso diferentes.

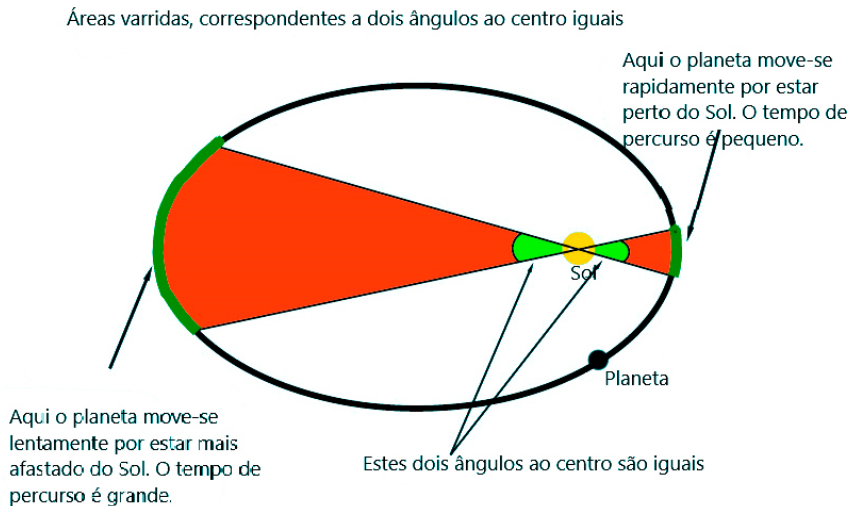


FIGURA 4. Os dois segmentos têm um mesmo ângulo ao centro mas delimitam áreas diferentes e portanto correspondem a tempos diferentes de percurso.

Analisemos agora a FIGURA 5. Do lado da órbita, mais próximo do Sol, o planeta vai de  $A$  para  $B$ . Aí é desviado por  $\Delta v$  e continua de  $B$  para  $C$ . Do outro lado da órbita, mais afastado do Sol, o planeta vai de  $D$  para  $E$  sofre um novo impulso  $\Delta v$ , e segue de  $E$  para  $F$ . Os percursos,  $AB$ ,  $DE$ , e  $BC$ ,  $EF$ , correspondem todos ao mesmo ângulo ao centro.

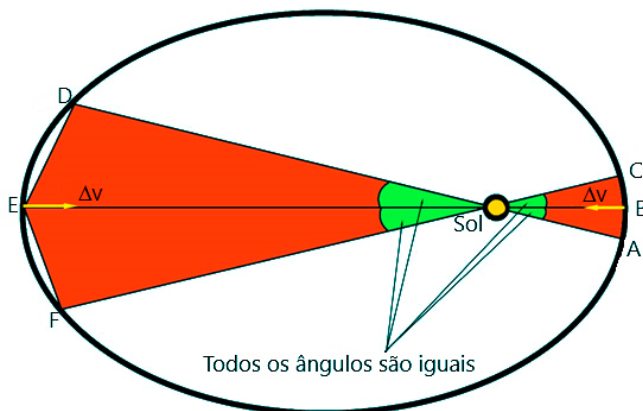


FIGURA 5. De um lado da órbita mais próximo do Sol, o planeta vai de  $A$  para  $B$ . Aí é desviado por  $\Delta v$  e continua de  $B$  para  $C$ . Do outro lado da órbita, o planeta vai de  $D$  para  $E$  sofre um novo impulso  $\Delta v$ , e segue de  $E$  para  $F$ .

Sabemos que o planeta se move mais rapidamente ao longo de  $BC$  do que ao longo de  $EF$ . De facto, de acordo com a lei das áreas, o planeta move-se mais rapidamente quando está mais perto do Sol do que quando está mais afastado.

Para saber quão mais rapidamente, temos que comparar as áreas dos triângulos  $\Delta(SBC)$  e  $\Delta(SEF)$ , uma vez que os tempos são proporcionais às áreas (lei das áreas de Kepler).

Para isso, vamos ter que usar a fórmula (3):

$$\Delta A \propto R^2 \Delta \theta \quad (3)$$

onde  $R = |SP|$  é a distância de  $P$  a  $S$ , e  $\theta$  é medido em radianos.

# Polígono Funicular.

José Moreira\*, Cláudio Gomes†

\* IFMA/NF/U. Porto | † CF/U. Minho | U. Porto

O polígono funicular é uma ferramenta gráfica útil para determinar o eixo central ao longo do qual o vetor resultante não nulo de um sistema de vetores desliza, e foi introduzida pelo matemático francês Pierre Varignon.

Há formulações adicionais do polígono funicular, como por exemplo o polígono funicular dos momentos e o polígono funicular espacial. Iremos aqui seguir a formulação habitual nos livros de texto de Estática. Assim, a melhor forma de entender o método gráfico do polígono funicular é através de um exemplo concreto. Assim, consideremos um sistema de três vetores deslizantes no plano  $xOy$ , os quais são aplicados a uma caixa bidimensional, como na FIGURA 1:

$$\begin{aligned}\vec{V}_1 &= (-2, -1), \\ \vec{V}_2 &= (-2, -3), \\ \vec{V}_3 &= (3, -2),\end{aligned}$$

e escolhamos o sistema de coordenadas solidário com o centro da caixa (isto é, a origem deste sistema está centrada na caixa).

$$\begin{aligned}A_1 &= (-5, 2), \\ A_2 &= (-2, -3), \\ A_3 &= (5, -1).\end{aligned}$$

Deste modo, um dos pontos de cada uma das suas linhas de ação, que permitem a definição da equação vetorial da reta associada, podem ser escolhidos de modo que os vetores apareçam aplicados nas fronteiras da caixa, embora os seus efeitos físicos sejam iguais independentemente do ponto de aplicação ao longo das suas linhas suporte respetivas:

Agora, vamos construir uma figura auxiliar, o polígono de forças, começando com o vetor  $\vec{V}_1$ , e colocando na sua extremidade final a extremidade inicial/origem do vetor  $\vec{V}_2$ , e colocando na extremidade final deste a extremidade origem do vetor  $\vec{V}_3$ . De seguida, desenhamos o vetor que é a soma vetorial do sistema,  $\vec{R} = (-1, -6)$ . Escolhemos aleatoriamente um ponto do espaço,  $H$ , e desenhamos as linhas que vão deste às extremidades da construção gráfica da FIGURA 2.

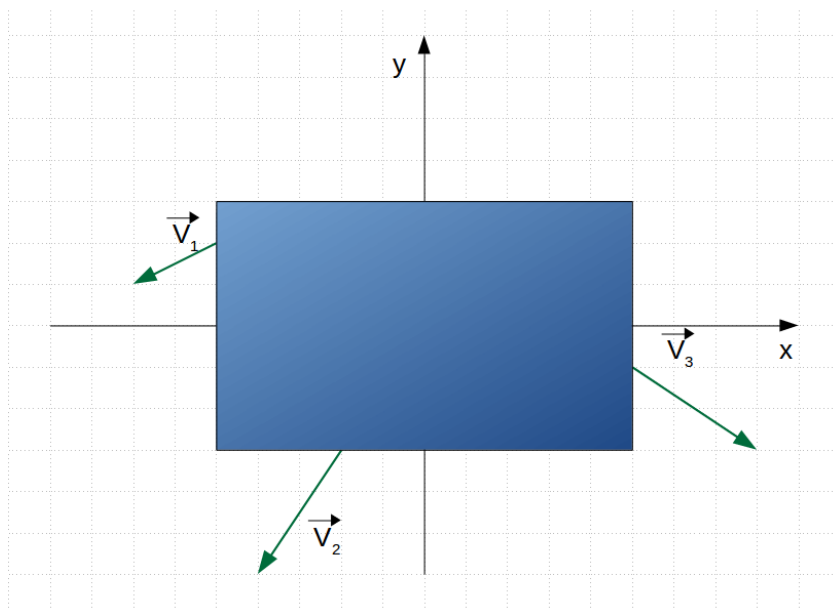
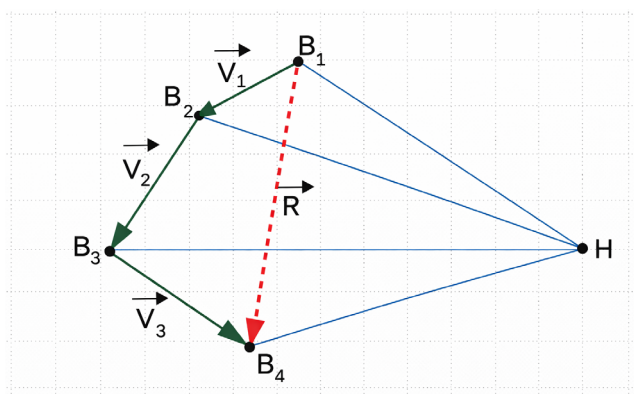


FIGURA 1. Sistema de três vetores deslizantes aplicados a uma caixa.

FIGURA 2. Polígono de forças do sistema de três vetores em análise, onde  $H$  é um ponto arbitrário no espaço.

De modo a determinar o eixo central, ao longo do qual o vetor resultante desliza, desenhamos uma linha paralela ao segmento de reta  $[B_1, H]$  passando por um ponto da linha de ação de  $\vec{V}_1$ , e uma linha paralela a  $[B_2, H]$  passando pelo mesmo ponto de modo que cruze a linha de ação de  $\vec{V}_2$ , tal como na FIGURA 3 A). Neste ponto, desenhamos uma linha paralela a  $[B_3, H]$  até que interseste a linha de suporte do vetor  $\vec{V}_3$  tal como na FIGURA 3 B). Finalmente, desenhamos uma linha paralela a  $[B_4, H]$  até que esta interseste a linha paralela a  $[B_1, H]$  inicialmente traçada, como na FIGURA 3 C). Este ponto de interseção é um ponto do eixo central. Agora,

colocamos a linha de ação do vetor resultante passando por este ponto e desenhamos o vetor principal ao longo do eixo central, tal como na FIGURA 3 D).

O polígono funicular é a construção geométrica da FIGURA 3 D). Adicionalmente, a linha funicular é a linha flexível e inextensível que se obteria ao fazer passar por um ponto da linha paralela a  $[B_1, H]$ , que chamaremos  $T_1$ , e terminar num ponto da linha paralela a  $[B_4, H]$ , que chamaremos  $T_2$ , tendo vértices em  $A_1, A_2$  e  $A_3$ .

Também podemos encontrar o eixo central por via analítica. O vetor momento relativamente à origem do eixo é dado por:

$$\vec{M}_O := \sum_{i=1}^N A_i \vec{r}_i \times \vec{V}_i,$$

peço que neste caso, fica:

$$\vec{M}_O = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -5 & 2 & 0 \\ -2 & -1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -2 & -3 & 0 \\ -2 & -3 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 5 & -1 & 0 \\ 3 & -2 & 0 \end{vmatrix} = (0, 0, 2).$$

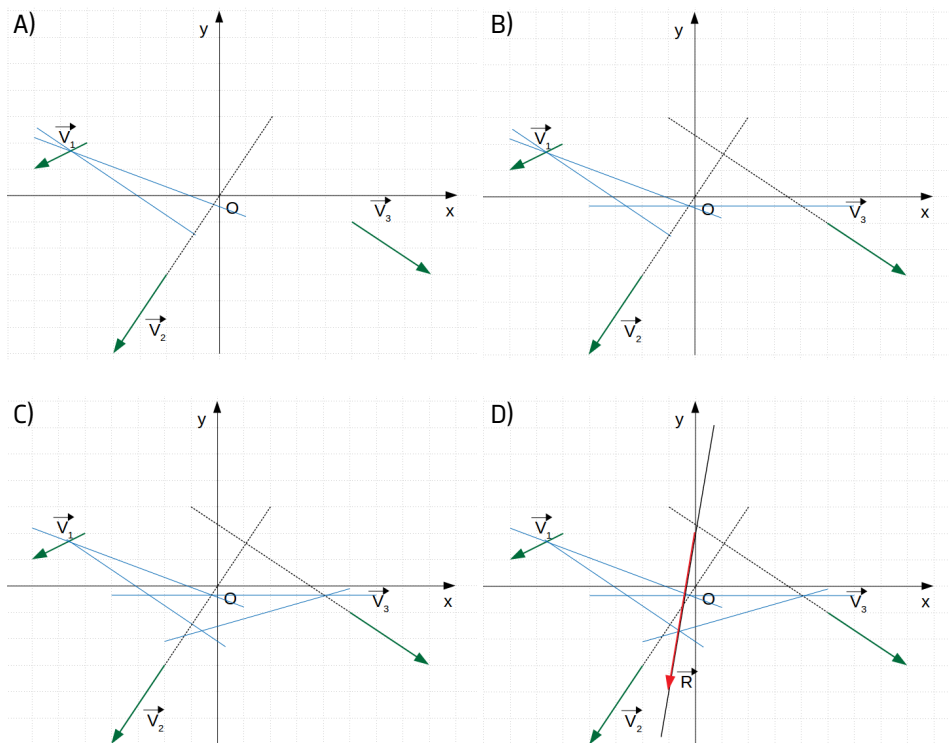


FIGURA 3. Construção gráfica do eixo central recorrendo ao método do polígono funicular. A) Traçar duas linhas paralelas a  $e_1$  e  $e_3$  intersectando num ponto aleatório da linha de ação do vetor  $V_1$ . B) Intersectar  $e_1$  com a linha de ação de  $V_3$  e traçar a linha paralela a  $e_1$  passando por esse ponto de interseção. C) Traçar linha paralelas a  $e_1$  e  $e_3$  e fazê-la passar pelo ponto de interseção entre a linha de ação de  $V_1$  e a linha paralela a  $e_3$ . D) No ponto de interseção entre as linhas  $e_1$  e  $e_3$ , traçar a linha paralela ao vetor resultante, o eixo central.

O invariante escalar é obviamente nulo,  $I = \vec{R} \cdot \vec{M}_O = 0$ , uma vez que o vetor resultante e o vetor momento são ortogonais entre si. Assim, a equação do eixo central é dada pela teoria dos vetores deslizantes:

$$\vec{M}_O + O \vec{O}' \times \vec{R} = \frac{I}{R^2} \vec{R} ,$$

pelo que neste sistema de três vetores fica:

$$(0,0,0) = (0,0,2) + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0-x & 0-y & 0-z \\ -1 & -6 & 0 \end{vmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} z = 0 \\ y = 6x + 2 \end{cases}$$

É imediato verificar que esta linha é paralela ao vetor resultante e é a mesma determinada pelo método do polígono funicular. Notamos aqui que este método pode ser utilizado para situações muito mais complexas que a que foi explorada, e em alguns casos ser mais simples que o método analítico.

---

# Breve guia de Paleontologia urbana.

Fósseis de cefalópodes.

**Carlos Marques da Silva\***, **Sofia Pereira<sup>‡</sup>**

\* DG/FC/U. Lisboa | <sup>‡</sup>CG/DCT/U. Coimbra

## **Os cefalópodes, da imaginação à realidade.**

São vários os grupos biológicos que, estimulando a sugestionável imaginação humana, geraram figuras mitológicas, fantásticas. Contudo, quimeras, grifos, unicórnios, harpias, dragões, hidras, o Pégaso – entre muitas outras – são todas, de algum modo fabuloso e desconcertante, organismos vertebrados. Entre os invertebrados apenas os cefalópodes – e alguns artrópodes como o infame crustáceo Carcino, ou Câncer – habitando as insondáveis profundezas marinhas, têm potencial para gerar, mas só na nossa mente, seres simultaneamente prodigiosos e temíveis.

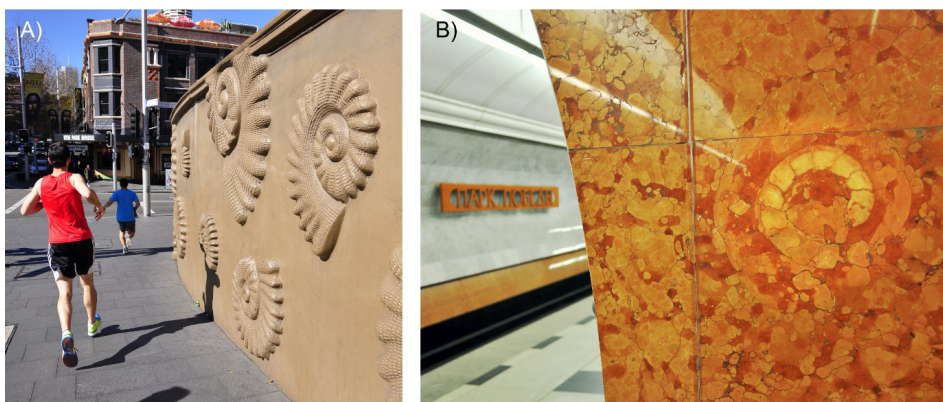
O Kraken, criatura tremenda capaz de gelar o sangue do mais audaz marinheiro e de arrastar, sem dó, nem piedade, navios inteiros para as assombrosas profundezas do Mar do Norte, era descrito como um polvo gigantesco e aterrador. Conseil, o criado do Professor Aronnax, a bordo do Nautilus nas 20.000 Léguas Submarinas de Jules Verne, fala dele com apreensão. O mítico submarino do Capitão Nemo, o Nautilus, o navegador, foi nomeado em honra de outro cefalópode, mas este bem real.

Olhando apenas para os cefalópodes da atualidade, para as lulas e os polvos deste final de Cenozoico, seria difícil imaginar quão mais diversificado este importante grupo de moluscos foi no passado. Seria uma tarefa igualmente desafiante entender a sua vasta representação no registo fóssil do Fanerozoico, em rochas com idades que variam entre os cerca de 538 e os 66 milhões de anos (Ma) de idade, do Câmbrico ao final do Cretácico, e qual a razão da sua extrema importância para a biostratigrafia, ou seja, para a datação das sequências de estratos de génese marinha do Paleozoico e do Mesozoico.

Esta circunstância deve-se ao facto de a esmagadora maioria dos cefalópodes atuais não possuírem partes esqueléticas mineralizadas, conchas duras. Mesmo os chocos, outro grupo de cefalópodes que nos é bem familiar, apresentam esqueleto interno delicado, algo frágil – o sepion, ou osso de siba – e, por isso mesmo, menos propício à fossilização. Consequentemente, os fósseis de chocos são escassos e os de polvos extremamente incomuns.

Contudo, na atualidade existe um outro grupo de cefalópodes, os náutilos, que nos poderão ajudar a esclarecer o aparente paradoxo entre as características pouco favoráveis à fossilização da maioria dos cefalópodes atuais e a sua ampla representação no registo fóssil. Os náutilos, hoje em dia representados pelos géneros *Nautilus* e *Allonautilus*, totalizando umas nove espécies, cerca de 10% da diversidade dos cefalópodes atuais, ostentam concha externa biomineralizada, resistente. Além disso, existiram no passado outros grupos de cefalópodes, elementos cruciais dos ecossistemas marinhos de então que, entretanto, se extinguíram, desaparecendo para sempre da face do planeta. É o caso dos amonoides, cujos representantes mais conhecidos são as amonites, para além de muitos outros.

Daí que não seja incomum encontrar vestígios fossilizados destes seres preservados nos elementos da geodiversidade utilizados nas construções das nossas cidades, nas rochas ornamentais das fachadas e pavimentos dos edifícios. No caso das amonites, cefalópodes emblemáticos do Mesozoico, até os podemos ver como motivos artísticos, embelezando as paredes exteriores de museus (FIGURA 1 A)). Em Portugal, são menos comuns que os fósseis dos rudistas, é um facto, mas estão lá! Basta – saber – procurá-los! Estão também nos pavimentos e nas paredes urbanas um pouco por todo o mundo (FIGURA 1 B)). Assim, o propósito deste segundo opúsculo do Breve Guia de Paleontologia Urbana é, precisamente, ajudar a reconhecê-los e a interpretá-los.



**FIGURA 1.** Eles andam aí! Cefalópodes mesozoicos, extintos, que encontramos representados nas nossas cidades por esse mundo fora. A) Espectacular representação artística de conchas de amonites na parede do parque de estacionamento do Australian Museum, na esquina da Williams St. com a Yurong St., em Sidney, Austrália. B) Fóssil de amonite em corte subequatorial numa parede da estação de metro Park Pobedy, em Moscovo, Rússia. A rocha ornamental, avermelhada, é o famoso calcário Rosso Ammonitico Lombardo, do Jurássico de Itália. (Fotos dos autores).

### **Origem e evolução dos cefalópodes.**

Para entender que fósseis de moluscos cefalópodes encontramos em meio urbano e porquê, temos de entender, por exemplo, como eles se originaram e diversificaram, desde o Câmbrio até à atualidade (FIGURA 2). Também teremos de compreender por que ocorrem nas rochas

em que os encontramos, rochas essas que são um registo dos ambientes em que viviam. Assim sendo, o que são os cefalópodes e como se originaram? E onde vivem?

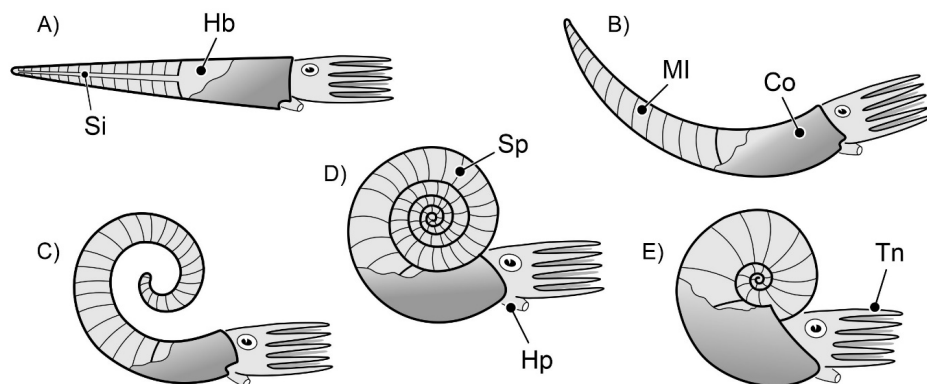
Os cefalópodes são organismos marinhos, ocorrendo a diversas profundidades, desde a superfície do oceano até às profundezas abissais. Polvos e chocos podem ainda ocorrer em ambientes estuarinos. São pescados no estuário do Tejo, por exemplo. Parte significativa deles – lulas e náutilos – tem modo de vida pelágico neotónico, nadando na coluna de água dos oceanos. Os polvos, contudo, são organismos demersais, isto é, mantêm a capacidade de nadar, mas vivem na dependência do fundo, abrigando-se nele e caçando presas bentónicas que lá vivem. O mesmo, em termos gerais, para os chocos. Todos são carnívoros, predadores ativos, possuindo braços – ou tentáculos, ou ambos – munidos de ganchos ou de ventosas, dotados de bicos córneos na boca e providos de olhos bem desenvolvidos. Os cefalópodes deslocam-se por meio de um sistema de propulsão a jato de água, expelindo água aspirada para o interior da cavidade do manto através do hipónoma, do funil do corpo mole (FIGURA 3). Têm em comum com os restantes moluscos, com os bivalves e os gastrópodes, por exemplo, o facto de serem organismos com simetria bilateral e possuírem um órgão, o manto, responsável, nomeadamente, por segregar a concha calcária, quando presente. Entre os cefalópodes contam-se os maiores invertebrados conhecidos, a lula gigante *Architeuthis dux*, podendo atingir 13 m de comprimento total, e aqueles que – tendo um sistema nervoso central sofisticado, para um animal invertebrado – são tidos como mais inteligentes, ou seja, que manifestam comportamentos mais complexos e demonstram capacidade de aprendizagem mais elevada. Sim, é possível ensinar “truques” a um choco!

No modelo lineano de organização da biodiversidade atualmente aceite, os Cephalopoda constituem um grupo biológico, um táxone, de categoria classe no seio do Filo Mollusca, o grupo dos moluscos. O termo, do grego κεφαλή kephalé + ποδός podós, significando cabeça e pé, foi cunhado em 1795 pelo grande naturalista francês Jean Léopold Nicolas Frédéric Cuvier, conhecido como Georges Cuvier (1769–1832), o famoso “Pai da Paleontologia”. Cuvier iniciou a sua caracterização do grupo, curiosamente, com: “Leur tête est libre, mobile et couronnée de grands tentacles sur lesquels ils marchent. (...)”, seguramente aludindo ao polvo.

Entre os cefalópodes atuais reconhecem-se dois subgrupos, duas subclasses: Coleoidea, incluindo os polvos, as lulas e os chocos, e Nautiloidea, os náutilos. Estão representados nos ecossistemas marinhos da atualidade por cerca de 800 espécies. No passado, os cefalópodes incluíam outras subclasses, hoje extintas. A mais conhecida é a dos Ammonoidea, os amonoides, que existiram do Devónico Inferior, desde os 410 Ma, até aos finais do Cretácico, até aos 66 Ma.

A história destes moluscos é extremamente antiga. É possível que remonte aos primórdios do Fanerozoico, aos inícios do Câmbrico (FIGURA 2). Contudo, os mais antigos registos fidedignos destes organismos são umas dezenas de milhões de anos mais recentes, datando dos finais do Câmbrico. Estes primeiros cefalópodes eram animais de pequenas dimensões, entendidos como sendo representantes dos Nautiloidea s.l. Possuíam conchas externas cónicas





**FIGURA 3.** Formas mais comuns de conchas de cefalópodes nautiloides. A) Ortocone, concha ortocónica. O molde interno mostrado em corte, para se ver o sifão subcentral e os septos pró-célicos. B) Cirtocone. C) Girocone. D) Tarficone. E) Nautilicone. As conchas nautilicónicas são prevalentes nos nautiloides meso-cenozoicos. Veja-se o caso de *Nautilus* e *Allonautilus* na atualidade. As restantes, havendo mais formas, eram comuns nos nautiloides paleozoicos. A mais frequente era a forma ortocónica. Existem mais formas de conchas, para além destas. Hb. Habitáculo, última câmara da concha. Si. Sifão, estrutura da concha que aloja o sifúnculo do corpo mole. Note-se que, nos nautiloides, o sifão ocupa geralmente uma posição subcentral no septo. MI. Molde interno, no caso dos fósseis destes organismos, depois de perdida a parede externa da concha, vendo-se as linhas de sutura à sua superfície. (Esquemas dos autores). Co. Concha, ou melhor, parede externa da concha. Sp. Septo ou tabique, subdividindo o interior da concha em câmaras. No caso dos nautiloides, com a concavidade dirigida para diante, i.e., septos pró-célicos. Hp. Hipónoma ou funil. Tn. Tentáculos.

Nos mares da atualidade, os coleoides, Classe Coleoidea, são os cefalópodes mais abundantes, perfazendo 99% da diversidade total do grupo. Encontram-se amplamente distribuídos por todos os oceanos, dos polos aos trópicos e de ambientes litorais a abissais. Polvos e chocos ocorrem também em estuários. Anatomicamente, distinguem-se por possuírem uma concha interna reduzida (nos chocos) ou vestigial (lulas), podendo nem apresentar esqueleto biomineralizado (polvos). Possuem 10 a oito apêndices – braços e ou tentáculos – associados à boca, circum-orais, i.e., circundando-a.

A origem dos coleoides remonta ao Paleozoico. Terão tido como antepassado um grupo de cefalópodes distinto, os Bactritida, dotados de concha externa ortocónica a circocónica (FIGURA 2). Fósseis do Devónico Inferior foram interpretados como representando coleoides, contudo, vários autores contestam a classificação destes exemplares. Os espécimes fossilizados mais antigos atribuídos incontestavelmente a este grupo datam do Paleozoico superior, do Carbónico, tendo cerca de 325 Ma. Tratando-se de animais com elementos biomineralizados reduzidos ou ausentes, o seu registo fóssil é – com a exceção das belemnites – escasso, o que dificulta bastante o estudo da sua origem e evolução.

Os polvos, um outro grupo de cefalópodes coleoides bem representado na atualidade, terão surgido no Jurássico Inferior. Estes animais não possuem esqueleto biomineralizado, concha dura, conseqüentemente, os fósseis de polvos são extremamente incomuns. O mais famoso exemplar fossilizado de um destes animais, devido à preservação excecional dos seus tecidos moles, é seguramente o de *Proteroctopus ribeti*, do Jurássico Médio de França.

---

# Tricópteros.

Insetos aquáticos holometabólicos.

**Verónica Ferreira**

MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente | ARNET – Rede de Investigação Aquática/ U. Coimbra

ARTIGO

38

Os tricópteros são um grupo de insetos muito diverso, mas pouco conhecido. Isto deve-se ao fato de terem larvas aquáticas, que habitam principalmente ribeiros de floresta de águas limpas e bem oxigenadas. Já os adultos são pequenos e discretos e têm hábitos crepusculares vespertinos ou noturnos. As larvas e os adultos são muito diferentes (insetos holometabólicos) e por isso o ciclo de vida tem quatro fases: ovo, larva, pupa e adulto, e a metamorfose é completa e decorre dentro dum casulo pupal. Completam geralmente o ciclo de vida num ano (ciclo univoltino), passando a maior parte do tempo como larvas. As larvas de muitas famílias constroem casulos portáteis de seda ou com materiais do meio (folhas, areia), cuja forma é típica de cada família. Estes casulos portáteis desempenham várias funções, incluindo proteção contra predadores. Outras famílias produzem redes de seda para capturar partículas finas ou pequenos organismos arrastados pela corrente, ou têm larvas de vida livre. As larvas alimentam-se de diferentes recursos e modos consoante a espécie/família; mais comumente raspam biofilme das rochas (raspadores), fragmentam folhas em decomposição (fragmentadores), recolhem detritos finos (coletores) ou predam pequenos animais (predadores). A grande diversidade funcional dos tricópteros permite que tanto as larvas como os adultos desempenhem vários papéis essenciais ao funcionamento dos ecossistemas ribeirinhos, onde participam no ciclo dos nutrientes, integram as teias alimentares, são engenheiros do ecossistema, contribuem para a qualidade da água, promovem a fertilização do solo e fazem polinização. Os tricópteros também fornecem vários serviços diretos às populações humanas: são indicadores de qualidade ambiental, consumidos como iguaria, usados na pesca, no artesanato, na investigação e na educação. No entanto, os tricópteros enfrentam ameaças como a poluição, as mudanças climáticas, as alterações à floresta e as barreiras nos cursos de água. É essencial proteger os ecossistemas de água doce para preservar os tricópteros, as funções ecológicas que desempenham e os serviços que fornecem às populações.

## **Diversidade e filogenia dos tricópteros.**

A ordem Trichoptera compreende mais de 16 mil espécies atuais de insetos (classe Insecta, filo Arthropoda), conhecidos como tricópteros ou frigânios (*caddisflies* em Inglês e “João-pedreiros” no Brasil) (FIGURA 1). São considerados insetos aquáticos pois a fase larvar da

generalidade das espécies decorre em meio aquático. A maioria das espécies está associada a ambientes de água doce (salinidade < 0,5 g sal/L, espécies dulçaquícolas), mas as larvas de algumas espécies das famílias Hydropsychidae, Leptoceridae e Limnephilidae podem ser encontradas também em ambientes de água salobra com baixa salinidade (p. ex., secções oligo-halinas dos estuários, com salinidade entre 0,5 e 5,0 g sal/L), e as larvas da família Chathamiidae (nativa na Austrália e Nova Zelândia) estão adaptadas ao ambiente salino das poças de maré. A ordem só não inclui unicamente espécies aquáticas porque a espécie *Enoicyla pusilla* (e possivelmente outras espécies do mesmo género; família Limnephilidae) tem todo o seu ciclo de vida em meio terrestre, encontrando-se principalmente em bosques temperados maduros de França, Alemanha e Reino Unido, onde a larva habita a manta morta.

Estão registadas cerca de 185 espécies de tricópteros em Portugal continental, todas espécies dulçaquícolas. Várias espécies são endemismos Ibéricos, incluindo *Hydroptila idex* (família Hydroptilidae), *Barypenthus concolor* (família Odontoceridae), *Rhyacophila obelix* (família Rhyacophilidae) e *Sericostoma vittatum* (família Sericostomatidae). A diversidade de tricópteros nos arquipélagos da Madeira e dos Açores é substancialmente mais baixa. No arquipélago da Madeira estão registadas 15 espécies dulçaquícolas de tricópteros, sendo nove delas endémicas: *Polycentropus flavostictus* (família Polycentropodidae), *Mesophylax oblitus* (família Limnephilidae), *Stactobia atra* e *Stactobia nybomi* (família Hydroptilidae), *Tinodes cinereus*, *Tinodes griseus* e *Tinodes merula* (família Psychomyiidae), *Synagapetus punctatus* e *Synagapetus laurilsilvanicus* (família Glossosomatidae). No arquipélago dos Açores estão registadas cinco espécies dulçaquícolas de tricópteros, sendo uma endémica: *Limnephilus atlanticus* (família Limnephilidae).

A ordem Trichoptera está filogeneticamente próxima da ordem Lepidoptera (borboletas e traças), incluindo-se ambas na superordem Amphiesmenoptera. As relações filogenéticas dentro da ordem Trichoptera têm sido alvo de debate, mas considera-se presentemente a existência de duas subordens: Annulipalpia e Integripalpia. A subordem Annulipalpia inclui todas as famílias cujas larvas produzem abrigos fixos e redes (p. ex., famílias Hydropsychidae, Philopotamidae, Polycentropodidae; FIGURA 1). Já a subordem Integripalpia inclui todas as famílias cujas larvas constroem casulos portáteis (p. ex., famílias Helichopsychidae, Lepidostomatidae, Limnephilidae, Sericostomatidae; FIGURA 1). As famílias de micro-tricópteros (p. ex., família Hydroptilidae), de tricópteros que fazem casulo portátil em forma de domo (p. ex., família Glossosomatidae) e de tricópteros de vida livre (p. ex., família Rhyacophilidae) (FIGURA 1) são consideradas linhagens basais dentro da subordem Integripalpia, embora alguns autores considerem que poderão integrar uma terceira subordem (Spicipalpia). Registos fósseis mostram que os tricópteros já existiam no período Triássico Superior (aproximadamente há 230 milhões de anos), mas é possível que o seu surgimento tenha ocorrido ainda no período Pérmico.



**FIGURA 1.** Larvas de tricópteros de diferentes famílias, de vida livre (A), que produzem redes e abrigos fixos (B–C) e que constroem casulos portáteis (D–J) que podem ser de detritos vegetais (D), uma mistura de detritos vegetais e elementos minerais (E), unicamente de elementos minerais (F–I) ou de seda (J): A) Rhyacophilidae, B) Hydropsychidae, C) Polycentropodidae, D) Lepidostomatidae, E) Limnephilidae, F) Beraeidae, G) Sericostomatidae, H) Goeridae, I) Glossosomatidae e J) Hydroptilidae. As imagens não estão na mesma escala. Fotos: A–I, Hallvard Elven, Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo (Wikimedia Commons); J, Esteban Peláez Sánchez (Flickr).

### Morfologia dos tricópteros.

Os tricópteros têm larvas completamente distintas dos adultos (são insetos holometabólicos), e por isso o conjunto das características típicas dos insetos está presente apenas nos adultos (TABELA 1).

**TABELA 1.** Características morfológicas típicas dos insetos nas larvas e adultos de tricópteros.

Características morfológicas típicas dos insetos	Tricópteros	
	Larvas	Adultos
Corpo dividido em três partes: cabeça, tórax e abdômen	Presente	Presente
Um par de olhos compostos na cabeça	Ausente (ocelos laterais)	Presente
Um par de antenas na cabeça	Presente (antenas vestigiais)	Presente (antenas longas)
Três pares de patas, um par por cada segmento do tórax	Presentes	Presentes
Dois pares de asas, um no segundo e um no terceiro segmentos do tórax	Ausentes	Presentes

As larvas dos tricópteros são cilíndricas e possuem o corpo dividido em três partes: cabeça, tórax e abdômen. A cabeça é rígida (esclerotizada), tem um par de ocelos (olhos simples), um par de antenas vestigiais e mandíbulas bem desenvolvidas. O tórax tem três segmentos, sendo o

dorso do segmento anterior (próximo da cabeça) completamente esclerotizado, enquanto o dorso dos outros dois segmentos torácicos pode ser completamente esclerotizado, ter placas esclerotizadas ou ser membranoso (FIGURA 1). O tórax apresenta três pares de patas bem desenvolvidas, um par por cada segmento torácico. O abdómen tem nove segmentos e um par de prolongamentos anais que terminam em garra (FIGURA 1). O abdómen pode ser livre de brânquias ou apresentar brânquias filamentosas dispostas isoladamente ou em pequenos grupos por todo o abdómen ou em grupos dispostos lateral ou ventralmente (FIGURA 1), e pode ter 2 ou 3 protuberâncias no primeiro segmento abdominal. Uma das características mais distintas das larvas é possuírem glândulas labiais produtoras de seda — estas são difíceis de observar, no entanto tornam possível a produção de redes de seda e a construção de abrigos fixos e casulos portáteis.

Já os tricópteros adultos caracterizam-se por terem as asas cobertas de pelos, característica que dá o nome à ordem [Trichoptera deriva do grego *trichos* (pelos) + *ptera* (asas)], com coloração (mais ou menos homogênea) entre o castanho-claro e o preto e dispostas em forma de telhado sobre o corpo. As antenas são longas e filiformes, e os olhos são compostos e dispostos lateralmente na cabeça. As mandíbulas são vestigiais e por isso os adultos não conseguem consumir alimentos sólidos; em algumas famílias, os adultos possuem haustelo (peças bucais com estrutura sugadora em forma de tubo) e alimentam-se de néctar, enquanto nas famílias em que o haustelo está ausente os adultos não se alimentam e têm períodos de vida mais curtos.

A generalidade das espécies atinge tamanhos máximos de 1–2 cm (excluindo as antenas e as asas nos adultos), mas as espécies de micro-tricópteros (p. ex., família Hydroptilidae) têm tamanhos máximos de 5 mm e algumas espécies das famílias Calamoceratidae, Limnephilidae, Phryganeidae e Stenopsychidae podem chegar aos 3–4,5 cm.

---

# Da aridez do Sinai à savana queniana.

Contrastes da natureza no lado oriental africano.

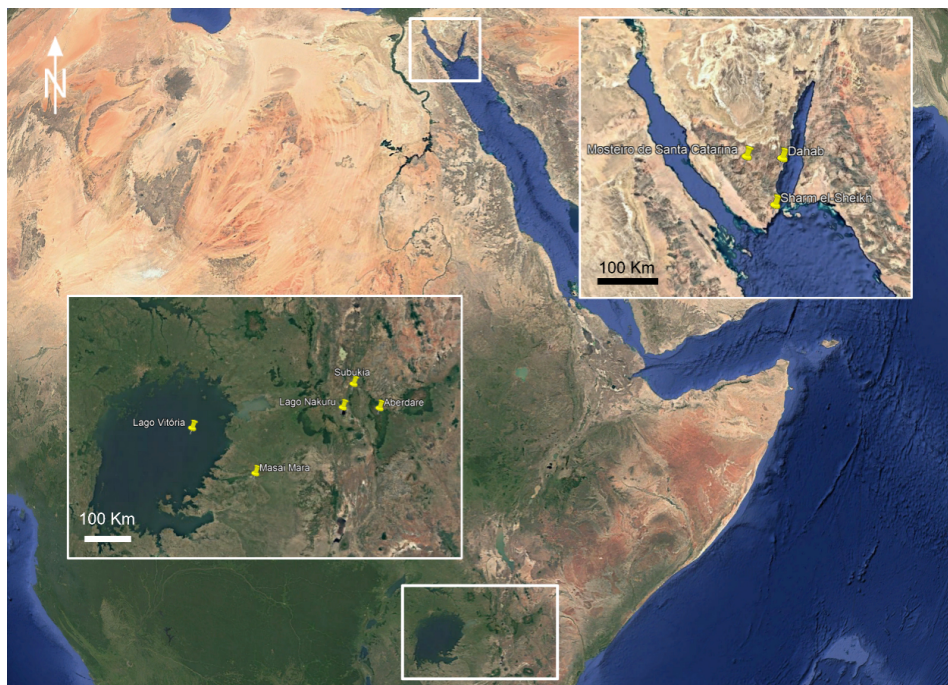
**Luís Vítor Duarte**

U. Coimbra, DCT e MARE

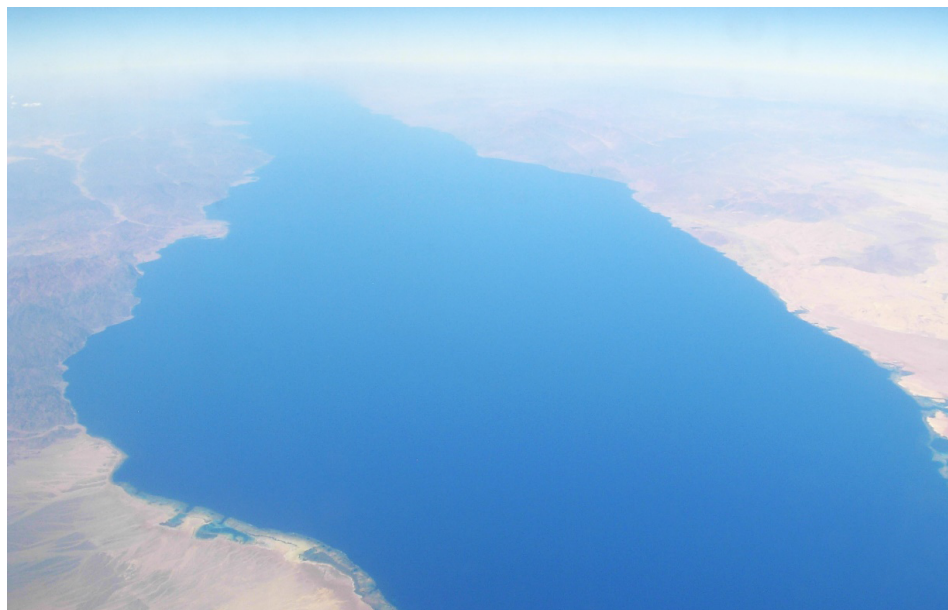
Regressamos ao continente africano, mantendo-nos inspirados pelo acumulado de imagens armazenadas na nossa vivência e, acima de tudo, pelas boas sensações, que dificilmente se irão esgotar. E, desta vez, somos impelidos pelo lado do “Sol nascente” daquele que é o terceiro maior continente do planeta. E os motivos vão muito para além das vertentes geológica e geomorfológica, embora estas estejam lá, com as suas idiosincrasias, como mais adiante constataremos. À semelhança de alguns outros capítulos, escolhemos para esta viagem dois territórios, mas que têm muito pouco em comum relativamente às paisagens, à geodiversidade e à biodiversidade. Contrastes que podem ser sentidos no Egito e no Quênia.

Na terra dos “faraós”, circunscrevemo-nos à porção mais meridional da península do Sinai, entre Sharm el-Sheikh e o Monte Sinai. Ou vice-versa. É daqui, pelos 28° de latitude norte, que iniciamos o nosso itinerário, contando chegar à linha imaginária do equador, nas zonas montanhosas do Quênia (FIGURA 1), que alberga a região dos magriços e “alongados” Masai e de tantos e famosos corredores de fundo do mundo. Todavia, apesar de todos os contrastes, existirá entre os dois lugares selecionados um denominador comum muito especial, e que é geológico. É que entre o Quênia e o Egito desenha-se o alinhamento de rifte intracontinental e de jovem oceano mais marcante da superfície terrestre. E assim, encontramos um outro mote para a presente narrativa.

Começamos num lugar do planeta com uma grande diversidade de contextos geográficos marinhos, entre o Mar Vermelho e os golfos do Suez e de Aqaba (FIGURA 2). Canais de ligação entre o Mediterrâneo e o Índico. Estamos no bordo oriental da placa litosférica Núbia (ou Africana), não muito longe da zona de divergência desta com a placa Arábica. As paisagens, despidas de vegetação, que caracterizam toda a porção meridional da Península do Sinai, denotam que estamos num ambiente claramente desértico. As mesmas franjas de latitude de lugares já visitados, como a vizinha Jordânia, ou a Namíbia, onde os efeitos conjugados da circulação atmosférica com as correntes oceânicas, são responsáveis pela muito baixa pluviosidade destas regiões do planeta.



**FIGURA 1.** Localização dos pontos de visita pela península do Sinai (Egito) e pela zona equatorial do Quênia. De notar a diferença clara na vegetação entre os dois locais, algo que se reflete, necessariamente, nas paisagens. Imagem do Google Earth.



**FIGURA 2.** O Golfo de Aqaba, na sua porção mais meridional, ligeiramente a norte de Sharm el-Sheikh, faz a fronteira entre a Península do Sinai (Egito) e a Arábia Saudita. De notar a aridez de ambas as margens. Imagem obtida durante um voo entre as Seicheles e Paris.

Como tal, sem grande resquício de flora a atrapalhar as observações, as rochas emergem da superfície do solo, mostrando facilmente as suas geometrias, cores e texturas. Sejam elas rochas sedimentares, metamórficas ou magmáticas, localmente cobertas por areias transportadas pela ação eólica (FIGURA 3). No Monte Sinai, tão retratado no *Antigo Testamento*, e onde nos vem imediatamente à memória o não menos bíblico *Dez Mandamentos*, já referenciado na memorável volta à Jordânia, despontam morfologias de contornos bastante irregulares. Está visto, e pela própria cor, que se tratam de rochas plutônicas ácidas, tal como as da cidade do Rio de Janeiro. Na envoltura do curioso Mosteiro ortodoxo de Santa Catarina, lugar de introspeção e de peregrinação turística, localizado no sopé do Monte Sinai (FIGURA 4 A)), são evidentes os tradicionais blocos de granito, tipologia pouco dada à inclusão de minerais máficos, o que confere uma cor mais clara à rocha, amplificada pela forte ambiência árida (FIGURA 4 B)).



FIGURA 3. O ambiente árido da península do Sinai, região montanhosa, onde sobressai toda uma paisagem de rocha plutônica. Vista do Mosteiro de Santa Catarina.

Estes e outros tipos de rochas granitoides, que ocupam uma vasta área da Península do Sinai, correspondem às unidades mais antigas da região, sendo datadas do final do Precâmbrico: o Neoproterozoico. Com os corpos mais jovens a mostrarem idades com cerca de 600 milhões de anos, muito próximos da idade do mesmo tipo de rocha plutônica observado, como já visto, em lugares tão longínquos como o Rio de Janeiro. Umas coincidências mais.

Mas, na estrada que nos fez chegar ao coração do Sinai e que nos leva de volta a Dahab, no Golfo de Aqaba, sobressaem na paisagem muitos outros tipos de morfologias e, consequentemente, de rochas.



FIGURA 4. A) Mosteiro de Santa Catarina, envolvido por uma paisagem granítica. B) Aspetto dos granitos aflorantes em torno do mosteiro.

A estratificação que se observa à distância não engana quanto ao facto de serem litologias sedimentares, normalmente de idade cretácica e cenozoica, de origem continental ou marinha. Entre corpos sedimentares isolados, tipo inselbergs, completamente erodidos, a lembrar muitas outras paragens de ambientes desérticos (FIGURA 5), a sucessões sedimentares mais completas e diversificadas (FIGURA 6 A).



FIGURA 5. Pequenos inselbergs, no caso, pequenas morfologias de rochas sedimentares, estratificadas, que se individualizaram na paisagem por processos de erosão.

Mas a chegada a Dahab onde, curiosamente, se pode apreciar um *Chicken Portuguese* (FIGURA 6 B)), somos presenteados com mais uma soberba imagem geológica, que domina por este lado do mundo. Mais uma vez, os granitoides sobejam por aqui, entre os parentes



FIGURA 6. A) Aspeto das sucessões sedimentares meso-cenozoicas, bem estratificadas, que afloram entre Dahab e o Mosteiro de Santa Catarina. B) Cardápio de restaurante de Dahab, bem junto ao Golfo de Aqaba.

À semelhança da chegada a Aqaba, para quem vem de Wadi Rum, os granitoides estão intensamente recortados por filões de rocha básica, mais certinhos em termos de atitude, e de outros diques de rocha mais clara (FIGURA 7). Não é possível negar a magnitude deste registo, que se destaca a vários quilómetros de altitude, facilmente discerníveis para quem sobrevoe esta parte do planeta.

Em Sharm El-Sheikh, um outro lugar de intensa atração turística e balnear, são os recifes de coral, atuais, a grande imagem de marca deste sítio tão famoso à escala mundial (FIGURA 8).



FIGURA 7. Filões de rocha básica a cortar os granitos do Neoproterozoico (afloramento junto a Dahab).

Os mergulhos, sejam à apneia ou autônomos, são uma obrigação, já que a barreira recifal é de altíssimo nível, dada a diversidade e espetacularidade da vida marinha aqui observada. Praticamente na extremidade sul da Península do Sinai, o mesmo é dizer, do próprio Golfo de Aqaba. Na transição para o verdadeiro Mar Vermelho, a geologia patente em Sharm El-Sheikh é constituída por rochas sedimentares essencialmente neogénicas, que bordejam e que, segundo as leis da estratigrafia, se sobrepõem aos corpos granitoides acima referidos. Sendo compostas por várias litologias siliciclásticas e carbonatadas, que se acumularam desde o Miocénico. Uma idade de que datam os primeiros diques basálticos intracontinentais, associados ao processo que, mais tarde, originou a crosta oceânica do Mar Vermelho.

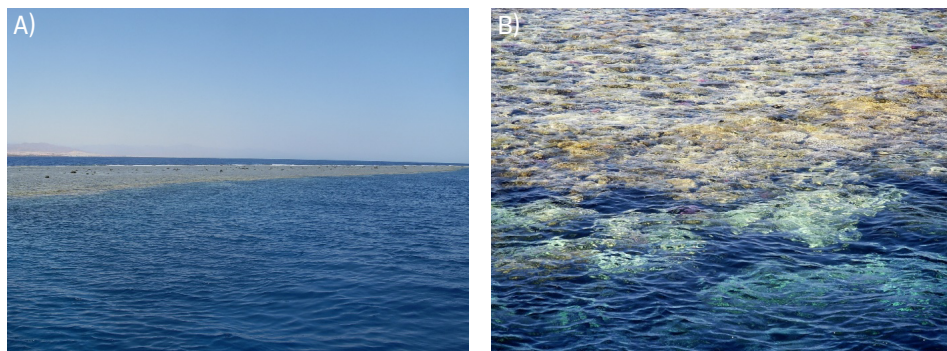


FIGURA 8. A) Expressão da barreira recifal nas proximidades de Sharm El-Sheikh. B) Detalhe da franja recifal da figura A.

É à boleia destes conceitos, do revisitado Ciclo de Wilson, que nos deslocamos para sul, para Nairobi, onde aterrámos três anos depois do pequeno périplo pelo Sinai. Relativamente ao Quênia, facilmente encontramos uma motivação adicional para a viagem. O filme *África Minha*, de 1985, que reúne dois “pesos pesados” da arte da representação, para além do não menos conceituado realizador, Sydney Pollack, de tantas outras magníficas produções cinematográficas. A passagem pela capital do Quênia é sumária, mas dá logo para sentir a ambiência de grande parte do país, já que Nairobi está a mais de 1600 metros de altitude e a cerca de 1° de latitude sul. Há que ganhar tempo para o programa ambicioso que se avizinha. Desta vez, como principal objetivo, o de observar os *big five* em seu espaço natural, a savana. E, já agora, todos os outros mamíferos selvagens a que se tem direito. No caso da geologia, será mais fácil imaginá-la do que vê-la pois, contrariamente ao Sinai, a vegetação é algo que não falta na paisagem, que tem a particularidade de esconder grande parte dos maciços rochosos. São três os parques nacionais selecionados nesta incursão: Aberdare, Lago Nakuru e, o mais famoso de todos, Masai Mara, onde foi rodado parte de *África Minha*. Tal como Nairobi, todos eles a grande altitude e envolvidos por antigos aparelhos vulcânicos, ocultos pela vegetação. Em Aberdare, rodeado de montanhas bem altas, desenvolve-se o espaço mais húmido dos três parques, tendo como principal atrativo a observação noturna da vida animal.

---

# Entre dois mundos: “ver” para além da imagem ótica.

*in casadasciencias.org/banco-imagens*

A imagem resulta da sobreposição de uma fotografia de células estaminais, obtida num microscópio confocal, com um mapa bidimensional da distribuição espacial de componentes lipídicos na célula central. O mapa é obtido no mesmo microscópio, utilizando a técnica designada por microscopia confocal de Raman, que regista um espectro em cada pixel da área selecionada na amostra (o quadrado central). Foi criado um mapeamento de Raman, usando os valores de intensidade da banda da vibração de elongação C-H das moléculas de lípidos, que são representados numa escala de gradiente de cor do vermelho-escuro ao amarelo (com o aumento de intensidade). A transparência da imagem de Raman (sobreposta sobre a imagem ótica) mostra que a distribuição dos componentes lipídicos acompanha a morfologia da célula estaminal analisada. Temos assim uma representação visual de uma informação adicional que dá uma nova dimensão à imagem ótica, entre o mundo das células e o mundo dos dados científicos.

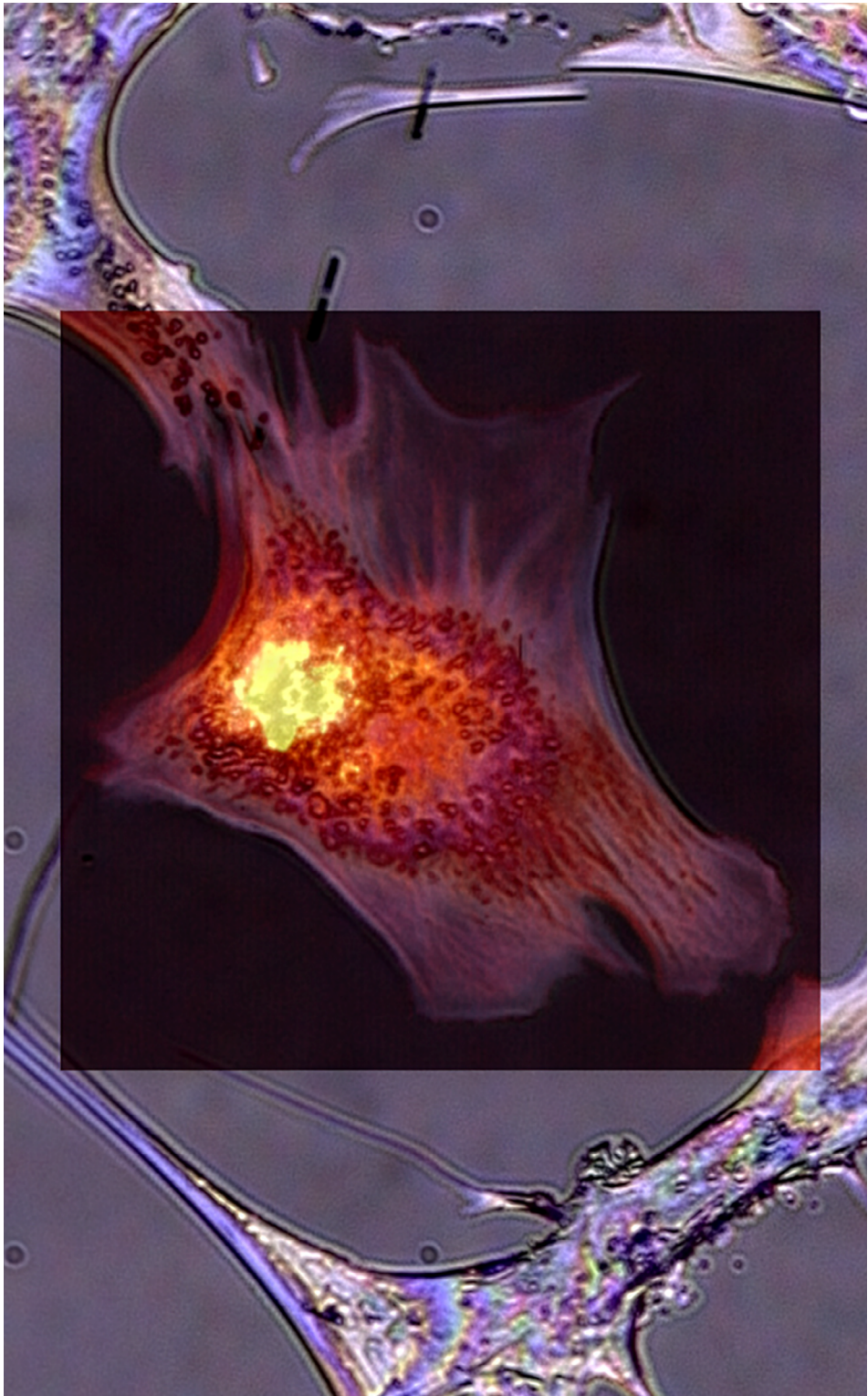
A ciência e a arte são frequentemente vistas em separado, de um lado os factos e a objetividade, do outro a subjetividade do artista. No entanto, estas duas áreas coexistem e interligam-se, ambas procurando responder aos mistérios e desafios do nosso mundo. Desde as maiores às mais pequenas coisas.

Pode perguntar-se: a que mistério responde esta imagem? Talvez à realidade das células e aos dados de microscopia. Mas e se a questão for o que ela nos faz sentir? Será possível manter neutralidade perante uma fração da imensidão do mundo celular? Terá a sua criação servido apenas a objetividade?

Há também subjetividade: escolhas de forma, cor, composição e intenção. O processo de partilha científica aproxima-se, assim, do ato criativo. A imagem conta uma história, do resultado final ao percurso de investigação que a originou. É um encontro entre células e dados, mas também entre o cientista e a realidade microscópica, onde ciência e arte se cruzam.

Helena Isabel Nogueira, João A. Rodrigues  
Universidade de Aveiro

Francisco Trindade  
Mestre em Criação Artística Contemporânea





# XI ENCONTRO

CASA DAS CIÊNCIAS

07 a 09

JULHO

2026

GUIMARÃES

CC VILA FLOR • E.S. MARTINS SARMENTO