Tira Teimas

Desde a sua abertura em Maio de 2005 que o **CENTRO CIÊNCIA VIVA DE ESTREMOZ** tem tido uma relação de proximidade com as escolas, que constituem sem dúvida o seu principal grupo de visitantes. Desde sempre que temos procurado que esta relação não se esgote nas visitas dos grupos escolares ao Centro dinamizando, em estreita colaboração com a **ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE ÉVORA**, actividades/produtos que possam ser úteis para os professores.

Surgem então, por exemplo:

- as acções de formação (em ambiente de sala de aula ou no campo), que são actualmente realizadas de uma forma regular no nosso **Centro de Formação** (www.ccvestremoz.com/formacao)**;**
- a orientação de visitas de campo para grupos escolares (www.ccvestremoz.com/actividades-escolares);
- a elaboração de material didáctico sobre diversas temáticas na área das **Ciências da Terra** (www.ccvestremoz.com/ccvestremoz-recursos).

Desde 2014 que algum deste material tem surgido com regularidade sob a forma de Conversas da Terra, um conjunto de textos profusamente ilustrados com desenhos originais que temos vindo a distribuir de uma forma aberta (ccvestremoz.wixsite.com/ccvestremoz-recursos/conversas).

Criámos também há alguns anos o **TIRA-TEIMAS**, onde respondemos de uma forma individual a dúvidas que nos sejam colocadas (www.ccvestremoz.com/tira-teimas).
Pela frequência com que alguns professores têm recorrido a este serviço e pelos temas abordados percebemos que, apesar das respostas do TIRA-TEIMAS não terem a forma elaborada e mais completa dos textos das Conversas da Terra, seria útil difundir algumas junto da comunidade escolar, evidentemente omitindo a identidade de quem nos colocou a questão.

Centro Ciência Viva de Estremoz

CCV ESTREMOZ CENTRO CIÊNCIA VIVA · UNIVERSIDADE DE ÉVORA · ICT Instituto de Ciências da Terra · CIÊNCIA VIVA Desde 1996 · MUNICÍPIO DE ESTREMOZ · VIVE ESTREMOZ
PESSOAS 2030 · PORTUGAL 2030 · Cofinanciado pela União Europeia

Tira-Teimas 11.1

Das Descontinuidades aos Zonamentos do interior da Terra

PERGUNTA

Como foi possível prever a existência de um zonamento interno da Terra antes da descoberta das ondas sísmicas e como a sua descoberta permitiu evidenciar a existência de descontinuidades separando zonas com comportamentos distintos?

RESPOSTA

Apesar da importância dos conceitos de litosfera e astenosfera para uma perspetiva dinâmica da evolução da Terra, o caminho para os intuir não foi fácil. Perceber como isso foi conseguido (Davies, 1999; Livermore, 2019) implica recuar aos levantamentos de geodesia detalhados na América do Sul em meados do século XVIII, quando Pierre Bouguer (1698-1758) fez observações cuidadosas de gravimetria, em que, quantificava o efeito que os grandes relevos tinham no desvio de um fio de prumo colocados na sua vizinhança. Para sua surpresa, a deflexão observada, tanto em torno do grande vulcão equatoriano do Chimborazo (altitude de 6263 metros) como dos próprios Andes, era cerca de um terço inferior à esperada utilizando as leis de Newton (figura 30A).

O mesmo comportamento veio a verificar-se em torno da cadeia montanhosa dos Pirenéus nos levantamentos realizados pelo astrónomo francês Frédéric Petit em 1849, ou dos Himalaias durante o Grande Levantamento Trigonométrico da Índia (1802-1871). Seguiu-se uma longa controvérsia sobre possíveis explicações e, em 1855, o matemático e astrónomo inglês George Airy (1801-1892) publicou um trabalho no qual considerou que a crosta rígida superficial era menos densa e flutuava num substrato fluido mais denso, que até poderia ter uma viscosidade extremamente baixa semelhante à que os mineiros encontram nas zonas mais profundas das minas e que leva à deformação do chão das galerias após a sua abertura. De um modo semelhante ao que acontece num bloco de gelo a flutuar em água, o excesso de massa existente nas cadeias de montanhas era compensado pela existência de zonas de raízes que se afundavam no substrato (figura 30B), um processo que ficou conhecido por **ISOSTASIA** (do grego *isos*, igual e *stasis*, parada ou em equilíbrio), e que atuaria ao longo de centenas de milhar ou milhões de anos[1].

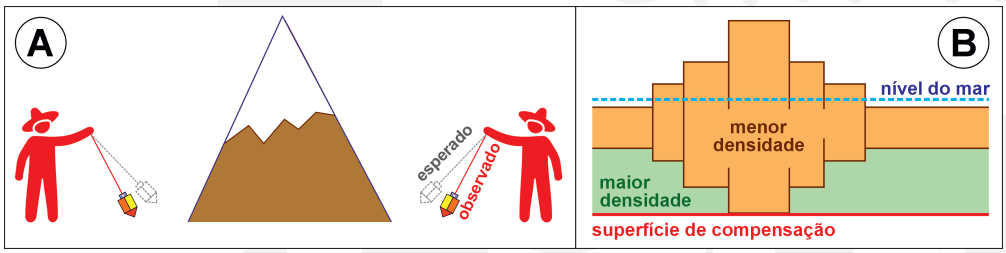


Figura 30 - Representação esquemática do conceito de isostasia segundo Airy:
A - Deflexão de um fio de prumo na vizinhança de grandes relevos;
C - Existência de zonas de raízes associadas às cadeias de montanhas e de depressões associados às bacias oceânicas.

[1] *Para uma descrição mais detalhada dos mecanismos associados à recuperação isostática da erosão de cadeias de montanhas, consultar Dias, 2019, páginas 111-117.*

CCV ESTREMOZ Centro Ciência Viva · Universidade de Évora · ICT Instituto de Ciências da Terra · Ciência Viva Desde 1996 · Município de Estremoz · ViVE Estremoz · Pessoas 2030 · Portugal 2030 · Cofinanciado pela União Europeia

Tira-Teimas 11.2

Das Descontinuidades aos Zonamentos do interior da Terra

A dimensão destas zonas de raízes era tal, que o aumento do poder de flutuação seria suficiente para compensar o excesso de peso da cadeia de montanhas. Se este processo fosse perfeito, isto deveria levar a que, ao contrário do observado, os fios de prumo não sofressem qualquer desvio na proximidade dos grandes relevos. Isto levou-o a admitir que a fluidez do substrato seria imperfeita e que este tivesse alguma viscosidade, causando algum atraso no reajuste isostático, e fazendo com que as anomalias da atração gravitacional fossem menores (Airy, 1855). Airy também salientou que esta situação só se aplicaria a relevos com uma certa dimensão, pois no caso de pequenos relevos, a resistência da crosta seria suficiente para os sustentar (Davies, 1999).

Em breve o modelo de Airy viria a ser apoiado pelos trabalhos realizados pelo cientista escocês Thomas Jamieson (1829-1913) que, ao estudar as superfícies rochosas estriadas pela ação da deslocação dos gelos mostrou (1865) que, durante o último período glaciar, o Norte de Inglaterra e a Escandinávia tinham estado cobertos por uma calote glaciar com espessuras consideráveis.

A formação destas calotes e a sua posterior fusão, eram contemporâneas de um período de subsidência importante, seguido de uma subida acentuada destas regiões, como indicado pela existência de depósitos marinhos recentes a algumas centenas de metros de altitude. A existência destes depósitos não podia ser explicada por variações do nível do mar, pois a fusão dos gelos deveria conduzir a uma subida deste nível e não à sua descida. Por isso, propôs que a crosta teria um comportamento elástico, que se manifestava em resposta a tensões aplicadas ao longo de milhares ou milhões de anos, e que tenderia para uma situação de equilíbrio com o seu substrato. Isto levava a que o enorme peso do gelo provocaria o afundar da crosta e que, uma vez liberta das espessas calotes, tenderia para uma nova situação de equilíbrio levando à sua subida. Para que isto acontecesse, o substrato mantélico teria de apresentar um comportamento viscoso, capaz de fluir ao longo de períodos de bastante tempo longos (divergindo da zona subjacente à calote de gelo e voltando quando ela fundia), pelo que não deveria de estar num estado de fusão total. Estes conceitos viriam a ser refinados a partir dos levantamentos sistemáticos da aceleração da gravidade realizados nos Estados Unidos da América no final do século XIX, princípios do século XX.

Embora a sua interpretação tenha sido objeto de enormes controvérsias, elas deram origem a um conjunto de artigos importantes publicados pelo geólogo americano Joseph Barrell (1869-1919), em 1914 e 1915 sob o título geral *THE STRENGTH OF THE EARTH'S CRUST*. Um dos aspetos fundamentais do seu trabalho resulta de ter percebido de que, ao longo do tempo, as cadeias de montanhas são profundamente erodidas e os sedimentos resultantes transportados pelos rios para as margens dos oceanos adjacentes, onde se vão acumulando originando espessas sequências sedimentares; por isto, as montanhas vão-se tornando menos pesadas e as zonas oceânicas marginais mais pesadas. De modo a manter o equilíbrio isostático, os continentes tenderão a subir, o que implica que algures em profundidade terá de haver transporte de massa em sentido contrário, ou seja, na direção dos continentes. Isto não poderia acontecer a nível da crosta como era normalmente admitido pois esta, bem como a parte superior do manto, teriam um

CCV ESTREMOZ Centro Ciência Viva · Universidade de Évora · ICT Instituto de Ciências da Terra · Ciência Viva Desde 1996 · Município de Estremoz · Vive Estremoz
Pessoas 2030 · Portugal 2030 · Cofinanciado pela União Europeia

comportamento predominantemente frágil devido às condições de temperatura e pressão aí existentes.

Por baixo desta parte mais superficial, que denominou **LITOSFERA** (do grego *lithos*, pedra e *sphaira*, esfera), situa-se um manto mais quente (que designou de **ASTENOSFERA** do grego *asthenós*, sem resistência e *sphaira*, esfera) que, embora não seja propriamente fluido, é capaz de fluir lateralmente ao longo de períodos de tempo muito longos (ver neste livro *À Margem… de certa maneira! M1_Convecções em sólidos e outras confusões…*), como resultado das variações de pressão induzidas a partir da litosfera sobrejacente.

A existência de uma litosfera mais resistente, sobrepondo-se a uma astenosfera com um comportamento mais dúctil, que como vimos Holmes soube incorporar nos seus modelos, foi fundamental para o estabelecimento futuro da teoria da tectónica de placas. Com efeito, estes conceitos associados a um zonamento físico da Terra, marcavam uma rotura conceptual em relação à hipótese da deriva continental de Wegener, que se baseava essencialmente num zonamento químico, no qual blocos continentais de Sial se deslocavam em cima de um leito contínuo de Sima (figura 4).

Estas tentativas de inferir o comportamento dos materiais rochosos existentes em profundidade, a partir da observação das variações da superfície topográfica, sofreram um enorme impulso com os notáveis progressos na área da sismologia, ocorridos na transição entre os séculos XIX e XX. Estes resultaram essencialmente da descoberta, acidental, pelo astrónomo e geofísico alemão Ernest von Rebauer-Paschwitz (1861-1895) de que um pêndulo horizontal poderia ser utilizado para registar as rápidas oscilações da superfície topográfica induzidas por sismos intensos distantes.

O primeiro registo foi obtido a 17 de abril em Potsdam na Alemanha, referente ao sismo de magnitude 5,8 ocorrido a mais de 8000 km de distância na península de Izu no Japão (von Rebauer-Paschwitz, 1989). Esta descoberta permitiu levar os estudos de sismologia de uma escala regional para uma compreensão global da Terra pois, conforme se veio a verificar, para sismos com uma magnitude 5 ou superior, as ondas geradas pela energia subitamente libertada são capazes de serem detetadas e interpretadas em qualquer lugar da superfície da Terra (Lay, 2002). Os esforços então encetados por von Rebauer-Paschwitz para dinamizar a cooperação internacional na área da sismologia, conduziram à criação em 1903 da *International Seismological Association* (que desde 1951 se denomina *International Association of Seismology and Physics of the Earth's*) e à instalação de uma rede de sismógrafos abrangendo diversas regiões do Mundo. Por essa altura o geólogo britânico Richard Oldham (1858-1936), fez três contributos particularmente significativos para o desenvolvimento da sismologia:

- Em 1897, enquanto trabalhava nos Serviços Geológicos da Índia, Oldham assistiu ao destrutivo sismo de Assam, com uma magnitude de 8,2-8,3 o qual originou um rejeito vertical na falha de Chedrang superior a 10 metros. Isso levou-o a concluir que os sismos resultam da libertação súbita da tensão acumulada em falhas pré-existentes, a qual é libertada sob a forma de ondas elásticas (Oldham, 1899). A mesma conclusão viria a ser proposta como explicação do grande sismo com uma magnitude de 7,9 que em 1906 destruiu a cidade de

CCV ESTREMOZ Centro Ciência Viva · Universidade de Évora · ICT Instituto de Ciências da Terra · Ciência Viva Desde 1996 · Município de Estremoz · Vive Estremoz
Pessoas 2030 · Portugal 2030 · Cofinanciado pela União Europeia

Das Descontinuidades aos Zonamentos do interior da Terra

San Francisco na Califórnia, começando a tornar-se claro que a magnitude da energia libertada dependia da quantidade de energia elástica que estava acumulada nas rochas da área da falha que rompia durante o sismo (Livermore, 2019).

- Em 1900, Oldham viria a fazer aquela que é normalmente considerada a sua mais importante contribuição para o desenvolvimento da sismologia. Ao analisar sismogramas de várias estações referentes ao sismo de 1897 de Assam, apercebe-se que os registos mostravam a chegada de três fases distintas de **ONDAS SÍSMICAS**, que se tinham propagado a diferentes velocidades e seguindo caminhos distintos: as primeiras a chegar (que por isso viriam a ser denominadas ondas ***P*** ou primárias) exibiam características compressivas e por isso denominou-as de condensação, seguiam-se as ondas com movimentações laterais, que denominou de distorção (que atualmente se designam ondas ***S*** ou secundárias, exibindo características cisalhantes) e, finalmente, umas ondas de superfície caracterizadas por grandes ondulações, que por isso são as mais destrutivas. Os tempos de chegada destas ondas mostravam que as duas primeiras tinham viajado através do interior da Terra, sendo denominadas ondas volúmicas (*i.e., body waves*), enquanto que as terceiras apenas se propagavam ao longo das zonas mais externas do planeta, sendo por isso consideradas ondas de superfície. Como estas observações estavam de acordo com a teoria das ondas elásticas, isto mostrava que, no que respeita à propagação da energia libertada durante os sismos, a Terra apresentava um comportamento elástico (ver neste livro *À Margem… de certa maneira! M1_Convecções em sólidos e outras confusões…*).

- A importância desta descoberta viria a ser demonstrada pelo próprio Oldham logo em 1906, quando, aproveitando o facto das ondas associadas às primeiras e segunda fases serem capazes de se propagar através do interior da Terra, apresentou a primeira evidência clara de que a Terra tinha um núcleo central distinto. Com efeito, tendo verificado a forte variação de comportamento destas ondas nos registos das estações sísmicas localizadas a mais de 120° de arco em relação ao epicentro do sismo, evidenciou a existência de um núcleo no interior da Terra mais denso, que considerou sólido, cujo raio corresponderia a cerca de 40% do raio da Terra (*i.e.*, ≈2550 km).

A caracterização da fronteira do núcleo terrestre viria a ser substancialmente melhorada em 1913 pelo sismólogo germano-americano Beno Gutenberg (1889-1960), que utilizou modelos matemáticos para tentar perceber as anomalias reconhecidas por Oldham relativas à propagação das ondas sísmicas registadas em estações localizadas a grande distância do local de ocorrência do sismo. Partindo da inexistência de ondas sísmicas ***P*** diretas recebidas em estações sísmicas localizadas entre os cerca de 104° e 140° (*i.e.*, **ZONA DE SOMBRA** para as ondas ***P***: figura 31A), e acima dos cerca de 104° para as ondas ***S*** (*i.e.*, zona de sombra para as ondas ***S***: figura 31B), identificou a existência de uma descontinuidade sísmica no interior da Terra, a cerca de 2900 km de profundidade, que correspondia à fronteira núcleo – manto, valor que é muito próximo do admitido atualmente; este limite é usualmente denominado **DESCONTINUIDADE DE GUTENBERG** (por

CCV ESTREMOZ Centro Ciência Viva · Universidade de Évora · ICT Instituto de Ciências da Terra · Ciência Viva Desde 1996 · Município de Estremoz · ViVE Estremoz
Pessoas 2030 · Portugal 2030 · Cofinanciado pela União Europeia

Tira-Teimas 11.5
Das Descontinuidades aos Zonamentos do interior da Terra

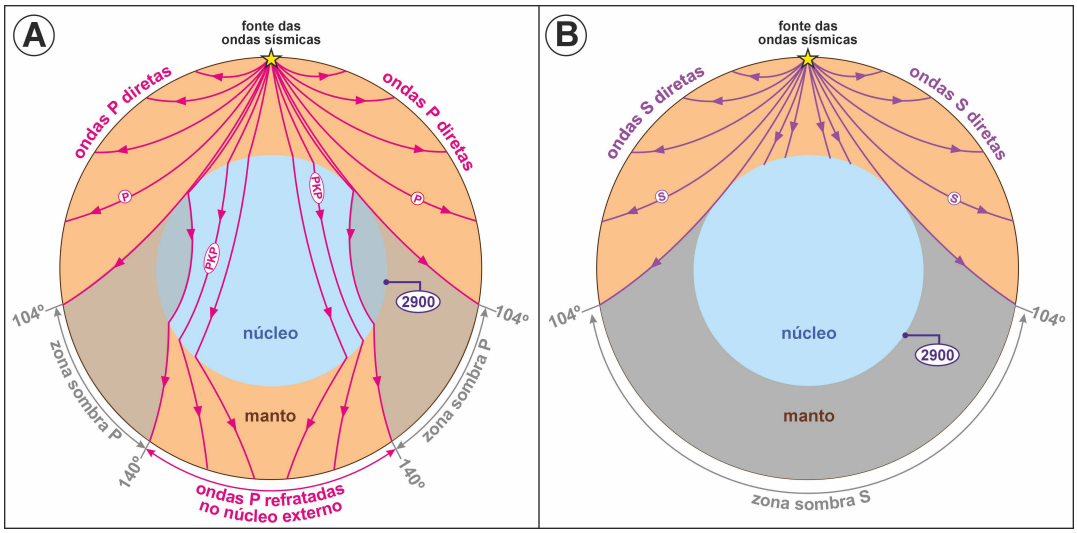


Figura 31- Padrão esquemático da propagação dos raios sísmicos (considerados perpendiculares às frentes das ondas sísmicas) através do interior da Terra, enfatizando o conceito de zonas de sombra utilizado por Gutenberg para caracterizar a fronteira núcleo-manto:
A - As ondas sísmicas ***P*** propagam-se mais lentamente no núcleo externo líquido, sendo por isso refratadas e deixando uma zona de sombra entre os cerca de 104° e 140°;
B - As ondas sísmicas ***S*** não se propagam através do núcleo líquido, por isso deixam uma zona de sombra no lado oposto ao do foco sísmico.

vezes denominada de Oldham-Gutenberg).

A determinação desta descontinuidade, veio no seguimento da abordagem que o geofísico jugoslavo Andrija Mohorovičić (1857-1936) tinha utilizado em 1909, para identificar a descontinuidade entre a crosta e o manto.

Ao analisar os dados referentes ao pequeno sismo que a 8 de Outubro 1909 atingiu a região de Zagreb, recolhidos em diferentes estações sísmicas da zona envolvente (figura 32A), apercebeu-se, não só da existência de dois conjuntos separados de ondas sísmicas ***P*** e ***S*** (o que indicava que tinham seguido percursos diferentes) mas também que, para as estações sísmicas situadas a mais de 200 km de distância do epicentro, as ondas volúmicas chegavam mais cedo do que o esperado, sendo por vezes detetadas mais cedo do que o que acontecia em estações mais próximas (é o caso da estação **s4**). Estas observações traduziam-se por uma descontinuidade na curva tempo do percurso versus distância para as ondas sísmicas (figura 32B). Isto permitiu-lhe deduzir a existência de uma superfície de descontinuidade (que viria a ser denominada de **DESCONTINUIDADE DE MOHOROVIČIĆ**, ou simplesmente **MOHO** em sua homenagem), entre uma crosta superficial com uma espessura de cerca de 54 km, onde a velocidade de propagação das ondas sísmicas era menor e um manto subjacente, mais denso, onde ela era maior, provocando a refração das ondas. Os estudos realizados desde então evidenciaram a existência global da descontinuidade Moho.

CCV ESTREMOZ Centro Ciência Viva · Universidade de Évora · ICT Instituto de Ciências da Terra · Ciência Viva Desde 1996 · Município de Estremoz · ViVE Estremoz
Pessoas 2030 · Portugal 2030 · Cofinanciado pela União Europeia

Tira-Teimas 11.6

Das Descontinuidades aos Zonamentos do interior da Terra

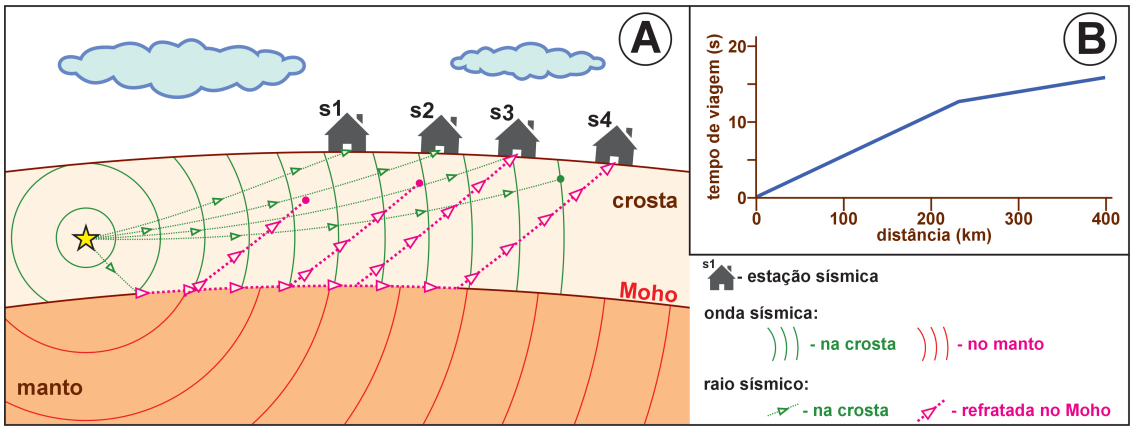


Figura 32 - Representação esquemática das principais características da propagação das ondas sísmicas primárias para a região envolvente do sismo de Zagreb de 1909, que levaram à identificação da superfície de descontinuidade de Mohorovičić:

A - Representação esquemática dos trajetos de propagação das ondas de corpo na crosta e no manto superior;

B - Descontinuidade na curva de propagação tempo *versus* distância.

A identificação das descontinuidades de Mohorovičić e de Gutenberg mostrou que, a quase-elasticidade da Terra para uma ampla gama de movimentos sísmicos, combinada com uma estrutura interna em camadas essencialmente concêntricas, permite uma correlação direta entre as ondas sísmicas registadas a várias distâncias do hipocentro e as características do interior do nosso planeta. Um dos aspetos que se revela particularmente útil neste contexto, é a propriedade das ondas elásticas se refletirem e refratarem em interfaces entre materiais com propriedades fortemente contrastantes (*e.g.* densidade, compressibilidade ou rigidez; Lay, 2002).

este texto é parte do livro JANGADA DE PEDRA; DA DERIVA DOS CONTINENTES À TECTÓNICA DE PLACAS E… MAIS ALÉM… da autoria de Rui Dias, geólogo da Universidade de Évora que será lançado em breve.

CCV ESTREMOZ CENTRO CIÊNCIA VIVA
UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ICT Instituto de Ciências da Terra
CIÊNCIA VIVA Desde 1996
MUNICÍPIO DE ESTREMOZ
VIVE ESTREMOZ
PESSOAS 2030
PORTUGAL 2030
Cofinanciado pela União Europeia

Tira-Teimas 11.7

Das Descontinuidades aos Zonamentos do interior da Terra



CCV ESTREMOZ CENTRO CIÊNCIA VIVA
UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ICT Instituto de Ciências da Terra
CIÊNCIA VIVA Desde 1996
MUNICÍPIO DE ESTREMOZ
VIVE ESTREMOZ
PESSOAS 2030
PORTUGAL 2030
Cofinanciado pela União Europeia