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 13.1
Zonamento Físico do Interior da Terra

PERGUNTA

Afinal a mesosfera é um conceito que existe ou deve ser abandonado? E é equivalente ao manto inferior? E qual a extensão da astenosfera?

RESPOSTA

Mas a variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas em profundidade, pode ser interpretada numa perspetiva muito diferente, daquela que refletiu o zonamento composicional do interior da Terra, qualquer que ele seja (figura 37). Nesta abordagem alternativa tenta-se perceber a organização interna da Terra, não na perspetiva da variação química e/ou mineralógica dos materiais presentes, mas sim na maneira como eles reagem quando sujeitos a estados de tensão que tendem a provocar a sua deformação. Isto leva a estabelecer um zonamento interno da Terra baseado nas propriedades físicas dos materiais existentes em profundidade. Contudo, ao contrário do que aconteceu com o zonamento composicional, em que as diferentes sistemáticas que foram surgindo, resultaram essencialmente de uma melhoria dos métodos de estudo sem que daí tivesse resultado qualquer contradição entre os termos utilizados, com o **ZONAMENTO FÍSICO** isso não aconteceu. Infelizmente isto leva a que atualmente existam termos, como astenosfera ou mesosfera, que são utilizados com diferentes significados criando confusões, que seriam evitáveis se houvesse o cuidado de tomar em consideração o contexto em que eles foram propostos.

Como já foi referido, as primeiras tentativas de compreender o comportamento dos materiais, que constituem o interior da Terra, resultaram essencialmente da necessidade de perceber como estes materiais se adaptavam às variações de subida e descida vertical dos blocos superficiais inerentes ao modelo de isostasia de Airy (figura 30B). Neste contexto, o geólogo americano Joseph Barrell (1869-1919), propôs em 1914 que a isostasia implicava a existência de uma zona superficial mecanicamente resistente, que denominou de litosfera (termo criado pelo geólogo austríaco Eduard Suess), subjacente à qual existiria uma outra zona contínua menos resistente que designou de astenosfera. Abaixo da astenosfera a resistência dos materiais voltaria a aumentar, pelo que a generalidade dos movimentos de acomodação associados aos processos isostáticos superficiais teria de ocorrer na astenosfera. Os aspetos relacionados com a resistência dos materiais no interior da Terra, viriam a ser aprofundados no livro de referência publicado em 1924 pelo geofísico inglês Harold Jeffreys (1891-1989), *THE EARTH: ITS ORIGIN, HISTORY AND PHYSICAL CONSTITUTION*.

Em 1939 o geoquímico americano Henry Stephens Washington, propõe a designação de mesosfera para a zona concêntrica subjacente à astenosfera. Este modelo envolvendo três zonas, abrangendo a crosta e o manto terrestres foram desenvolvidos e popularizados principalmente a partir de 1940, com o livro *STRENGTH AND STRUCTURE OF THE EARTH* do geólogo canadiano-americano Reginald Aldworth Daly, (1871-1957).

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 13.2
Zonamento Físico do Interior da Terra

Mas o desenvolvimentos destes conceitos não pode ser desenquadrado dos progressos que estavam a ocorrer no campo da sismologia. Apesar das ondas sísmicas apenas terem sido evidenciadas por Richard Oldham em 1900, os dados que se foram acumulando no primeiro quartel do século XX desencadearam uma verdadeira revolução no conhecimento do interior do planeta, que vai muito para além da descoberta das descontinuidades de Mohorovičić em 1909 e de Gutenberg em 1913. Um dos aspetos que chamou a atenção a Beno Gutenberg em 1926 foi que, contrariando o padrão geral de aumento da velocidade de propagação das ondas sísmicas ***P*** e ***S*** com a profundidade (o que era expectável de acordo com a teoria das ondas elásticas; figura 36), era possível evidenciar uma região no manto superior em que a velocidade diminuía em profundidade (figura 38), a qual ele designou de "leito de baixa velocidade da astenosfera".

Num artigo de revisão sobre a existência desta zona (***LVZ*** – da sigla inglesa para ***LOW VELOCITY ZONE***), o mesmo autor enfatizou em 1959 que:

- A existência da ***LVZ*** resultava de o material existente nesta região estar próximo do ponto de fusão, o que o tornava menos resistente, levando a que a propagação das ondas sísmicas volúmicas (em especial as ondas secundárias ***S***) fosse mais lenta (figura 38).

- A existência da ***LVZ*** resultaria, provavelmente, do efeito do aumento de temperatura com a profundidade e não tanto do aumento de pressão com a profundidade, como se verificava acima e abaixo desta zona onde o fator pressão é predominante.

- O limite superior da ***LVZ*** ocorria cerca dos 100 km, mas o inferior estava mal constrangido, propondo, que poderia corresponder aos cerca de 200 km.

- A ***LVZ*** / astenosfera seria equivalente à zona B da sistemática de Bullen (figura 35), correspondendo a região subjacente até ao núcleo à mesosfera.

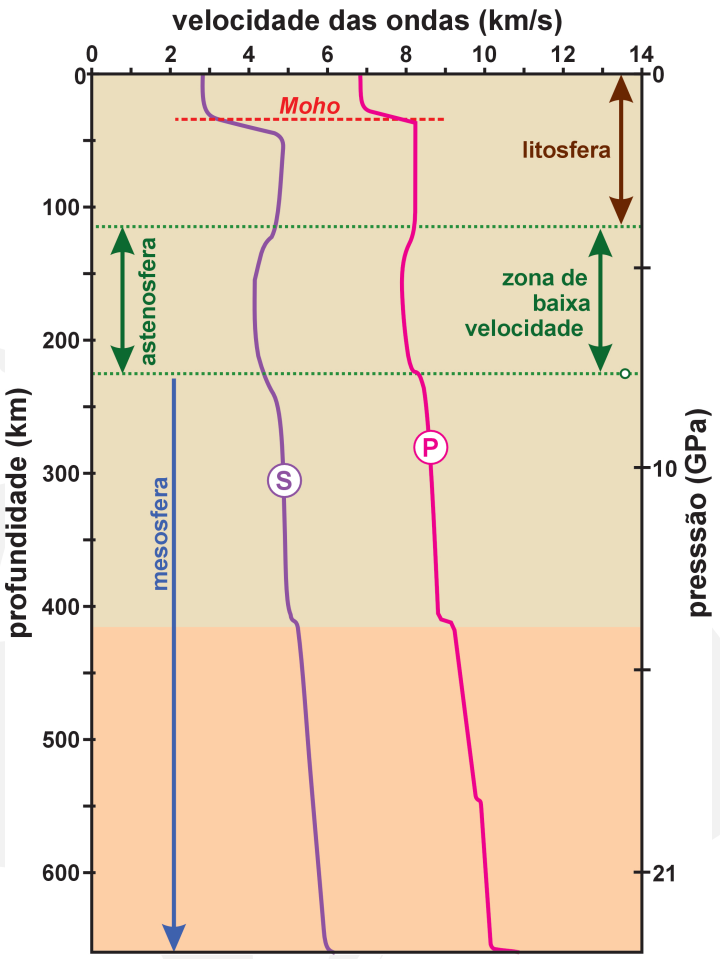


Figura 38 - Representação esquemática da variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas ***P*** e ***S*** nas zonas mais superficiais da Terra (adaptação do *CCVEstremoz* baseada em *Wikicommons Deep in Earth*).

CCVESTREMOZ 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 13.3
Zonamento Físico do Interior da Terra

Isto permitiu considerar que, tendo em consideração o comportamento físico dos materiais constituintes e as suas propriedades mecânicas (*i.e.*, a reologia), a crosta e o manto da Terra podiam ser divididos em três zonas: litosfera, astenosfera e mesosfera.

A **LITOSFERA** é a zona mais externa do interior rochoso da Terra e, por isso, a mais fria, cobrindo toda a sua superfície. É formada pela totalidade da crosta, bem como pela parte mais superficial do manto, apresentando uma espessura bastante variável: nas regiões continentais chega aos 200 a 250 km debaixo dos cratões precâmbricos, enquanto nas oceânicas, a sua espessura é sempre menor do que 100 km, podendo mesmo ser inferior a 10 km nos riftes oceânicos (Cawood *et al.*, 2025). A litosfera encontra-se no estado sólido, tal como todas as zonas do interior da Terra, com exceção do núcleo externo (abordado mais à frente), sendo individualizada por ser mecanicamente mais resistente (Barrel, 1914; Daly, 1940), o que significa que se mantém rígida e coerente ao longo do tempo geológico profundo (*i.e.*, milhões de anos). Isto colocava a questão de perceber, por que sendo os sectores mais profundas da litosfera formados por peridotitos idênticos aos do topo da astenosfera subjacente, o que levava a que o comportamento em termos de deformação fosse substancialmente diferente, permitindo a individualização entre as duas zonas. A resposta não é direta, principalmente porque a distinção entre estas zonas pode ser abordada de perspetivas distintas (*e.g.*, térmica, petrológica, geoquímica, propagação da velocidade das ondas sísmicas ou condutividade elétrica), originando diferentes definições, o que faz variar a profundidade da fronteira entre ambas (Cawood *et al.*, 2025) gerando, por vezes, alguma confusão entre estes conceitos.

Contudo, em termos gerais, normalmente considera-se a litosfera como sendo a zona térmica superior (Cathles, *et al.*, 2023), coincidindo a sua base com a isotérmica dos ≈1350ºC. Este não é um valor escolhido aleatoriamente, nem corresponde a uma mudança acentuada de temperatura ou de composição (Cawood *et al.*, 2025), mas marca uma diferença fundamental no comportamento dos peridotitos mantélico, pois a temperaturas inferiores a transferência de calor faz-se essencialmente por condução, enquanto que a temperaturas mais elevadas dominam os processos convectivos (Cawood *et al.*, 2025). Contudo, importa realçar que a capacidade de os peridotitos fluírem nestas zonas mais profundas tem de ser encarada na perspetiva do tempo geológico, pois tratam-se de materiais sólidos (a este propósito ver neste livro *À Margem… de certa maneira! M1_Convenções em sólidos e outras confusões…*). Deste modo, a fronteira litosfera-astenosfera é uma fronteira mecânica que marca a transição entre uma litosfera condutora e relativamente forte e um manto convectivo mais fraco. Embora a litosfera seja considerada uma zona coerente dos pontos de vista físico e do comportamento mecânico, isto não significa que ela seja homogénea (Duarte, 2025). Para além da acentuada variação lateral entre litosfera continental e oceânica, existe uma importante variação vertical pois, mais superficialmente, ela apresenta um comportamento elástico, o que significa que as rochas tendem a apresentar um comportamento frágil (levando essencialmente à formação de falhas), enquanto que, a maiores profundidades, o aumento da pressão e da temperatura leva a que ela apresente um comportamento mais dúctil e plástico (facilitando o desenvolvimento de dobras e zonas de cisalhamento).

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 13.4
Zonamento Físico do Interior da Terra

A litosfera da Terra atual encontra-se dividida em placas (as **PLACAS TECTÓNICAS** ou **LITOSFÉRICAS**), limitadas por zonas estreitas e alongadas nas quais a deformação se concentra, que correspondem às fronteiras de placas. Estas fronteiras formam um sistema interligado complexo que se estende por toda a superfície da Terra, permitindo que as placas se movam coerentemente umas em relação às outras.

Existem vários tipos de **FRONTEIRAS DE PLACAS** que basicamente são de três tipos (uma análise mais detalhada deste assunto pode ser encontrada em Dias, 2019):

- As fronteiras divergentes, que correspondem às zonas de rifte, ao longo das quais as placas vão aumentando a sua área pela formação de nova litosfera e que, por isso, se designam por vezes de construtivas.

- As fonteiras convergentes, que correspondem às zonas de subducção, nas quais a litosfera afunda no interior da Terra, diminuindo a sua área superficial, o que leva a que sejam também designados de limites destrutivos.

- As fronteiras transformantes nas quais as placas deslizam horizontalmente umas em relação às outras, sem que haja formação ou destruição das placas, levando a que também sejam conhecidos por limites conservativos.

A complexa dinâmica que resulta da existência destes limites, leva a que as placas que existem atualmente sejam diferentes das que existiram no passado e diferentes das que existirão no futuro, assunto que será abordado nos próximos capítulos. Por isto, o mapa das placas tectónicas atuais tem uma utilidade bastante limitada quando pretendemos perceber a história geológica do passado da Terra, principalmente quando recuamos para tempos mais remotos.

A transição da litosfera para a **ASTENOSFERA** subjacente é marcada, tanto nos regimes continentais como oceânicos, por um decréscimo acentuado na velocidade de propagação das ondas sísmicas, uma forte atenuação sísmica e uma elevada condutividade elétrica (Lay, 2002: Kearey, *et al.*, 2009; Cawood, *et al.*, 2025: figura 38), alterações que começam a evidenciar-se a partir dos 100-150 km de profundidade (Gutenberg e Richter, 1939). No que diz respeito ao limite inferior desta *Zona de Baixas Velocidades Sísmicas* (***LVZ***) ele está mal constrangido, embora seja por vezes associado a uma descontinuidade na propagação das ondas que parece ocorrer a cerca de 220 km de profundidade (figura 38). Apesar ela seja por vezes designada de **DESCONTINUIDADE DE LEHAMANN**, em homenagem à geofísica dinamarquesa Inge Lehmann (1888-1993) que a identificou em 1959, esta designação deve ser evitada pois gera alguma confusão, visto a fronteira manto núcleo ser conhecida por esse nome (figura 35). Embora esta descontinuidade apareça frequentemente subjacente à litosfera continental, ela é menos evidente debaixo das zonas oceânicas, o que tem levado a que a sua existência global seja contestada (Lay, 2002). Porém, independentemente de a ***LVZ*** corresponder a um região bem limitada, ou apresentar uma transição gradual para as regiões subjacentes, a sua existência não é questionada, sendo considerada a uma zona em que ocorre a fusão parcial das rochas (Lay, 2002).

Esta fusão, provavelmente inferior a 1%, resulta das condições de pressão e temperatura aí existentes estarem próximas das do ponto de fusão das rochas, principalmente se houver uma pequena

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

quantidade de água (Kearey *et al.*, 2009; figura 39)[3].
Esta proximidade é crítica em termos da atividade magmática na Terra, tornando a astenosfera a fonte dominante das rochas ígneas na Terra atual (Cathles *et al.*, 2023).

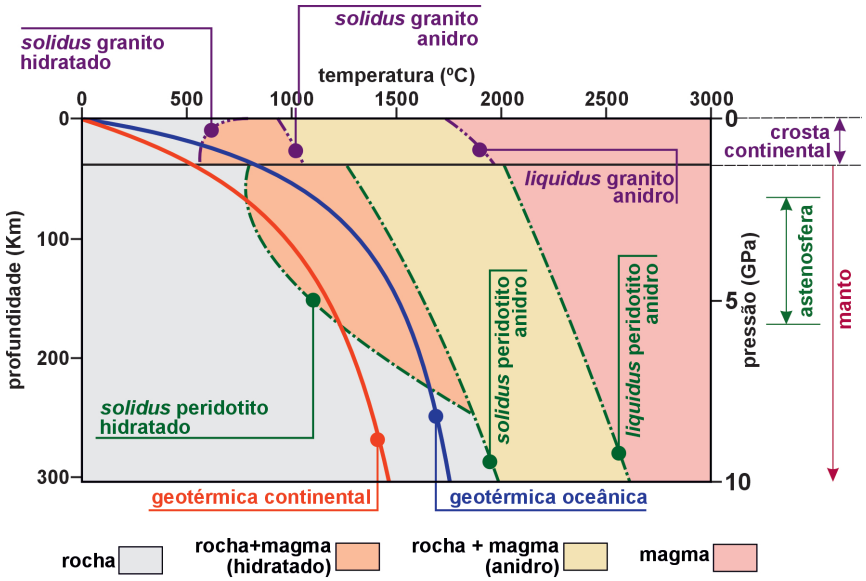


Figura 39 - Representação esquemática da relação entre os gradientes geotérmicos e as condições de fusão total ou parcial dos materiais rochosos existentes na crosta e no topo do manto subjacente (adaptação do CCVEstremoz baseada em Dias, 2019).

Esta ***LVZ*** foi associada à astenosfera no conceito de Barrel (1914) e, tradicionalmente, continua a ser assim considerada (Kearey *et al.*, 2009; Cathles *et al.*, 2023; Hua *et al.*, 2023). Contudo, como tantas vezes acontece em ciência, este assunto não tem uma abordagem única, pois a generalidade do manto terrestre apresenta um comportamento **VISCOELÁSTICO**, o que significa que o modo como as rochas que a constituem deformam depende do tempo durante o qual a tensão que provoca essa deformação é aplicada. No caso da geologia este aspeto é crucial, pois tanto são estudadas deformações "instantâneas" geradas pelos eventos sísmicos, como as que resultam de processos que ocorrem à escala das centenas de milhões de anos, como é o caso das induzidas pela generalidade dos processos tectónicos. Inevitavelmente isto reflete-se nos zonamentos baseados no comportamento reológico dos materiais pois, se por um lado temos as escalas temporais associadas à propagação das ondas de volume, nas quais os comportamentos elásticos são dominantes, por outro, temos a imensidão do tempo geológico inerente à convecção mantélica, que permite que o manto apresente um comportamento viscoso (Peltier, 1974; Yuen e Peltier, 1982).

[3] *Para uma descrição mais detalhada dos processos de fusão parcial, consultar Dias, 2019, páginas 315-321.*

CCVESTREMOZ 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 13.6
Zonamento Físico do Interior da Terra

A introdução de novas metodologias de investigação do interior da Terra (*e.g.* tomografia sísmica, modelação analógica ou modelação numérica), tem permitido que nas últimas décadas tenham ocorrido progressos extremamente significativos na compreensão dos processos convectivos, que serão abordados nos próximos capítulos. Nestas abordagens, a dicotomia entre uma astenosfera parcialmente fundida e um manto subjacente sólido que sobressai dos perfis de variação da velocidade das ondas sísmicas em profundidade, tem sido menorizada, visto o objetivo ser estudar a fluência do manto ao longo do tempo geológico, situação em que o conceito de sólidos surge como limitativo (a este propósito ver neste livro *À Margem… de certa maneira! M1_Conveções em sólidos e outras confusões…*). Isto levou a que tenha vindo a predominar uma abordagem privilegiando as diferenças de comportamento reológico entre o manto superior e inferior, que ressaltam dos perfis de sismicidade em profundidade (figura 36). Nesta perspetiva alternativa a astenosfera surge como equivalente, não só da totalidade do manto superior, mas também da zona de transição, estendendo-se até aos 660 km de profundidade (*e.g.*, Palin *et al.*, 2020; Duarte, 2025), interpretação que é facilitada, pelo facto de o limite inferior da ***LVZ*** estar mal constrangido.

Esta perspetiva mais abrangente da astenosfera, tende a enfatizar uma abordagem global média dos dois domínios mantélicos, enfatizando a diferença entre um manto superior menos viscoso e um inferior mais viscoso (Cathles *et al*., 2023). Esta abordagem leva a minimizar a importância da estreita zona de fusão parcial existente globalmente nas regiões mais superficiais do manto, a qual tem uma importância fundamental para a dinâmica mantélica e para a existência da tectónica de placas (Lay, 2002; Richards e Lenardic, 2018). Isto tem levado à persistência de uma linha de investigação que continua a enfatizar a importância da existência de uma astenosfera pouco espessa (inferior a 300 km) associada à fusão parcial do manto, que é pouco explorada em muitos dos estudos globais de tomografia sísmica mas que, não só é fundamental para os processos tectónicos, mas também para a compreensão da complexa interligação entre a fusão mantélica, a hidratação do manto e o arrefecimento da Terra, permitindo uma visão integrada entre os modelos de evolução térmica e de circulação profunda da água no nosso planeta (Cathles *et al.*, 2023). Tal como enfatizam estes autores, esta perspetiva não é incompatível com a aproximação que privilegia a distinção entre os comportamentos globais entre o manto superior e inferior em termos de viscosidade média, antes complementando-a e permitindo uma visão mais alargada dos processos de convecção mantélica.

A **MESOSFERA** corresponde à zona do manto que se desenvolve abaixo da astenosfera até à profundidade de cerca de 2900 km, o que a torna menos acessível, fazendo com que a compreensão das suas propriedades reológicas seja menor. Contudo, como as ondas sísmicas não sofrem grande atenuação quando a atravessam, considera-se que é uma zona de maior resistência (Kearey, *et al.*, 2009). Sendo a sua localização dependente do limite inferior da astenosfera, os constrangimentos referidos anteriormente a propósito da interpretação desta fronteira levam a que atualmente coexistam duas perspetivas sobre a mesosfera:

- uma que privilegia a importância da zona de fusão parcial, segundo a qual a mesosfera inclui

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 13.7
Zonamento Físico do Interior da Terra

parte do manto superior abaixo da ***LVZ***, a zona de transição e todo o manto inferior.

- uma que enfatiza o comportamento viscoso do manto e os processos convectivos aí existentes, para a qual a mesosfera é associada apenas ao **MANTO INFERIOR**, o que tem levado a que o termo mesosfera tenha vindo a cair em desuso.

A coexistência entre estas duas definições para um mesmo conceito tem alimentado alguma confusão, não só porque normalmente não se explicam as razões que estão associadas a cada uma das abordagens, mas também porque a associação do conceito de mesosfera ao manto inferior, mistura termos que foram definidos com base no comportamento reológico dos materiais (*i.e.*, a mesosfera) com outros baseados nas características mineralógicas (*i.e.*, o manto inferior; figura 36).

Pela mesma altura iam sendo feitos esforços tentando compreender o comportamento físico do **NÚCLEO** terrestre que, como já foi referido, é essencialmente composto por uma liga metálica de ferro com algum níquel (figura 33C). Esta constituição e a existência de um **CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE** levou a que, mesmo antes da informação fornecida pelas observações sismológicas, existissem indícios que sugeriam que não era possível que o núcleo estivesse no estado sólido (Livermore, 2019). Uma das primeiras propostas nesse sentido foi avançada pelo astrónomo e matemático inglês Edmund Halley (1656-1742) que, em 1693, utilizou o facto da posição do polo Norte magnético variar ao longo do tempo (figura 40) para concluir que isso só era possível se o núcleo fosse fluido.

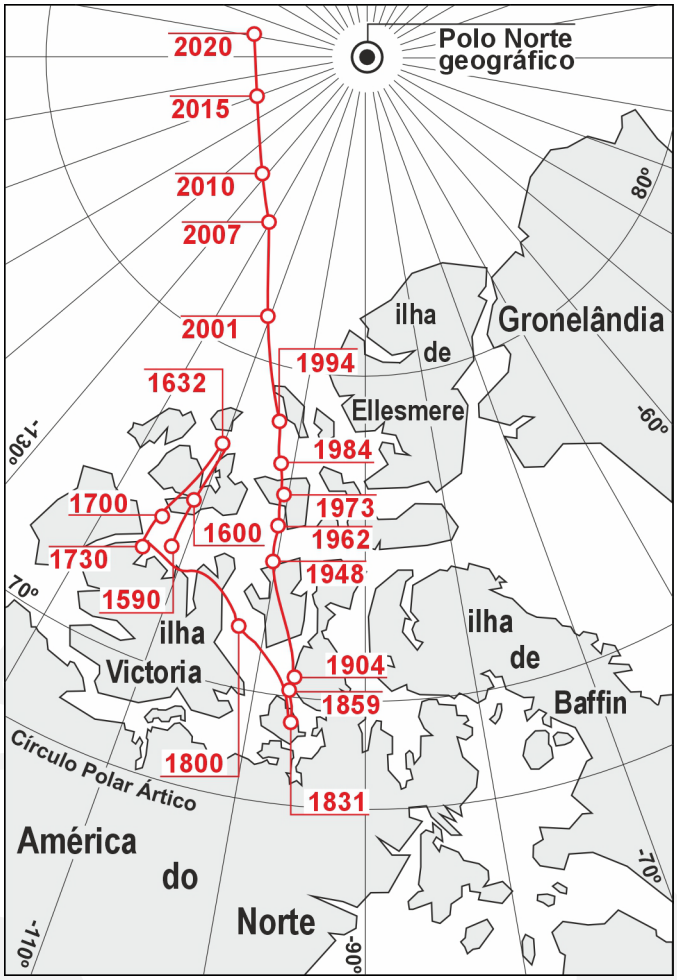


Figura 40 - Variação temporal da posição do polo Norte magnético (adaptado de *Dias, 2019*).

Por outro lado, em 1895 o físico francês Pierre Curie (1859-1906) mostrou que as substâncias magnéticas perdem as características magnéticas permanentes acima de uma determinada temperatura, denominada temperatura de Curie. No caso do ferro esta temperatura é de 770°C e, no caso de ligas com pouco níquel esta temperatura diminui de uma forma rápida com o aumento da pressão. Este era um valor bastante inferior ao que era aceite para o núcleo da Terra, pelo que o campo magnético terrestre não poderia ser originado pela existência de um núcleo magnético sólido. Mas, desde 1820 que os trabalhos do químico e físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), tinham mostrado que uma corrente elétrica

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

Zonamento Físico do Interior da Terra

induz um campo magnético e, sendo o núcleo feito de um material condutor elétrico, a sua convecção poderia ser o processo responsável pelo campo magnético terrestre. Isto também explicaria porque os polos do campo magnético tendiam a ser muito próximos dos polos geográficos, pois as convecções existentes no núcleo seriam condicionadas pelo movimento de rotação da Terra.

Estes modelos conceptuais que previam que o núcleo terrestre não poderia estar sólido estavam longe de ser aceites pela generalidade da comunidade científica da altura, até porque as evidências que os suportavam eram ténues e bastante indiretas. Esta situação começa a alterar-se quando em 1913 Gutenberg comprovou a existência das zonas de sombra sísmica (figura 31), associadas a uma brusca diminuição da velocidade de propagação das ondas de compressão ***P*** e ao desaparecimento das ondas de cisalhamento ***S***, (figura 35), o que indicava que o núcleo estaria no estado líquido. Mesmo assim, a aceitação deste modelo não foi pacífica, pelo menos até à publicação em 1924 do livro de Harold Jeffreys referido anteriormente.

Mas a ideia de que todo o núcleo da Terra estava no estado líquido não vai durar muito, pois em 1936 a geofísica dinamarquesa Inge Lehmann (1888-1993), partindo de uma análise mais detalhada das ondas sísmicas ***P***, evidencia que este é um modelo simplista, pois o núcleo não é homogéneo. Com efeito, a existência de ondas sísmicas de compressão na zona de sombra das ondas primárias ***P***, mostra que elas tiveram que se refratar numa superfície de descontinuidade separando dois núcleos com propriedades elásticas e dimensões diferentes (figura 41; Fischer e Mcdonough, 2025):

- um **NÚCLEO INTERNO** sólido abaixo dos 5155 km de profundidade (com um raio de ≈1220 km, representando cerca de 0,7% do volume da Terra e 1,6% da sua massa).

- um **NÚCLEO EXTERNO** líquido envolvendo o anterior (com um raio de ≈ 2250 km, representando cerca de 16% do volume da Terra e 30,7% da sua massa).

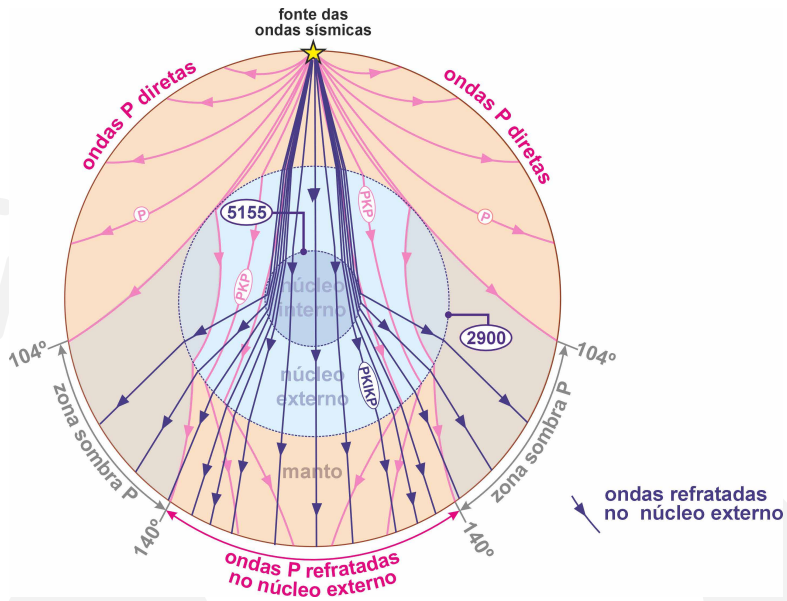


Figura 41 - Representação esquemática da refração das ondas sísmicas primários ***P*** no núcleo interno.

É a existência destes dois núcleos, que levou a que a designação de endosfera proposta por alguns geógrafos e autores do sistema educacional de modo a enquadrar-se na sistemática litosfera-astenosfera-mesosfera, nunca tenha sido muito utilizada, pois incluía a totalidade do núcleo da Terra, o que não faz sentido quando o objetivo é descrever o zonamento baseado nas características físicas do interior do planeta.

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 13.9
Zonamento Físico do Interior da Terra

Com a individualização do núcleo interno ficou definido o zonamento que dividiu o interior da Terra em 5 zonas, utilizando a forma como os materiais que as constituíam eram deformados quando atuados por um campo de forças (figura 42).

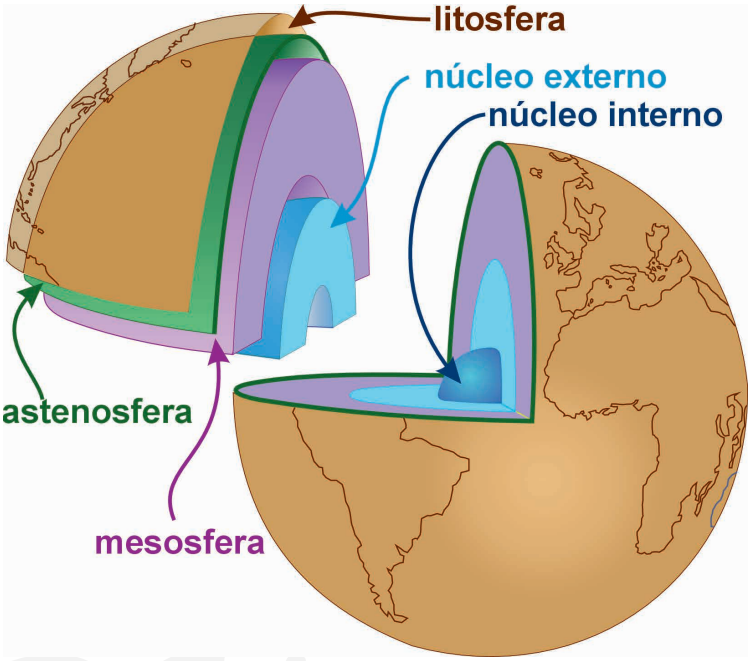


Figura 42 - Representação esquemática do zonamento físico do interior da Terra (adaptado de *Dias, 2019*).

No entanto, como foi referido a propósito da astenosfera, tendo o manto um comportamento predominantemente viscoelástico, há duas abordagens completamente distintas (e complementares) no estabelecimento do zonamento composicional, consoante se privilegie:

- o comportamento elástico dos materiais associado às deformações induzidas pela aplicação das tensões durante processos de curta duração.

- o comportamento de fluência relacionado com as deformações de longa duração, isto é, ao longo de milhões de anos.

No primeiro caso, o zonamento baseia-se essencialmente na variação da propagação das ondas sísmicas no interior da Terra, que se deslocam a velocidade quase sempre superiores a 10 000 km/hora (figura 43A). Não é por isto, o zonamento mais adequado quando o objetivo é compreender os processos convectivos no interior da Terra, onde as velocidades são da ordem dos centímetros por ano. Incapaz de observar processos tão lentos e de tão longa duração, a investigação da dinâmica mantélica tem vindo a privilegiar estudos de modelação analógica e/ou numérica explorando variações da viscosidade em profundidade (figura 43B; tabela 1).

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 13.10
Zonamento Físico do Interior da Terra

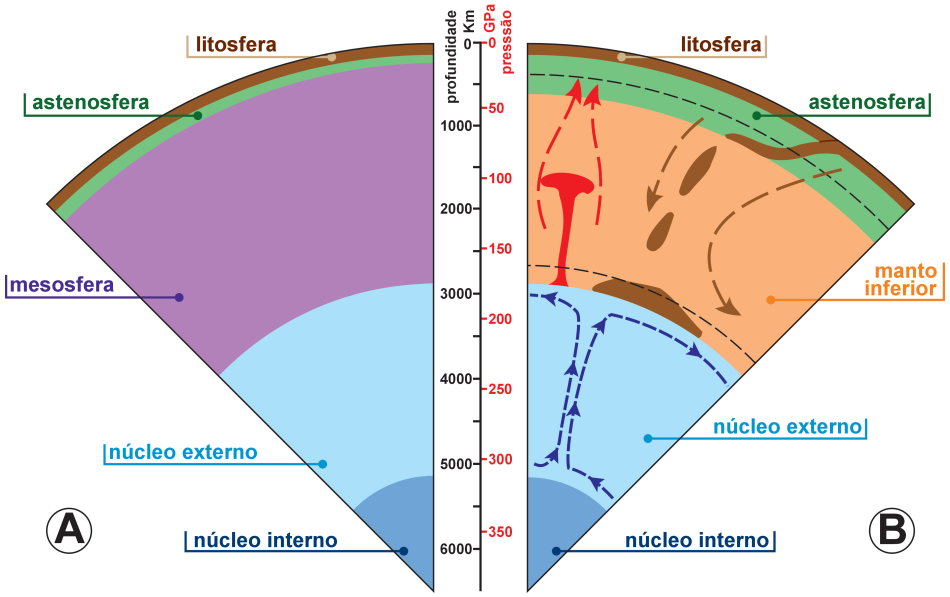


Figura 43 - Representação esquemática do zonamento físico do interior da Terra segundo diferentes perspetivas:
A - Zonamento baseado no comportamento elástico dos materiais resultantes de deformações de curta duração;
B - Zonamento enfatizando o comportamento dos materiais aos longo do tempo geológico.

TABELA 1
VARIAÇÃO DAS VISCOSIDADES NO INTERIOR DA TERRA

ZONA	VISCOSIDADE (Pascal - segundo)	REFERÊNCIA
Litosfera	$>10^{23}$ a 10^{24}	Walcott, 1970
Astenosfera/manto superior	10^{19}	Duarte, 2025
Astenosfera/LVZ	10^{18} a 10^{19}	O'Donnell *et al.*, 2017
	10^{17}-10^{19}	Cathles *et al.*, 2023
Mesosfera/manto inferior	10^{21} a 10^{24}	Duarte, 2025
Ultra Low Velocity Zone	10^{19}	Hier-Majumder e Revenaugh, 2010
Núcleo externo	10^{2} no topo 10^{11} na base	Duarte, 2025

(a propósito do significado da viscosidade na perspetiva do tempo geológico ver neste livro *À Margem… de certa maneira! M1_Conveções em sólidos e outras confusões…*)

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 13.11
Zonamento Físico do Interior da Terra

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