

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
IAG/USP

INTRODUÇÃO À GEOFÍSICA

APOSTILA DA DISCIPLINA AGG0115

2002

Autores

Marcia Ernesto

Naomi Ussami

Colaboradores:

Eder C. Molina, Leila S. Marques,

Gabriela Slavec, Emerson A. da Silva

Sumário

I.	COMO NASCEU A GEOFÍSICA	
	No começo tudo era Geologia	I-1
II.	INVESTIGANDO O INACESSECÍVEL	
	Alvos de Estudo da Geofísica.....	II-1
	Camadas internas.....	II-1
	Atmosfera	II-4
	Hidrosfera	II-6
III.	RECURSOS NATURAIS DA TERRA	
	Água	III-1
	Petróleo	III-2
	Carvão e Turfa	III-6
	Minérios	III-7
IV.	FONTES DE ENERGIA	
	Energia Hidrelétrica.....	IV-1
	Energia Nuclear.....	IV-1
	Energia Geotérmica	IV-3
	Energia de Marés	IV-4
V.	PROPRIEDADES FÍSICAS DA TERRA	
	Ondas Elásticas.....	V-1
	Gravidade	V-4
	Magnetismo.....	V-6
	Radioatividade	V-8
	Calor	V-9
	Eletricidade	V-12
VI.	MÉTODOS GEOFÍSICOS	
	Métodos Sísmicos.....	VI-1
	Método Gravimétrico	VI-3
	Método Magnético	VI-6
	Paleomagnetismo e Magnetoestratigrafia	VI-10
	Métodos Radiométricos.....	VI-12
	Método Termométrico	VI-13
	LEITURAS E CONSULTAS INDICADAS	
	APÊNDICE I	
	APÊNDICE II	
	APÊNDICE III	

I. COMO NASCEU A GEOFÍSICA

NO COMEÇO TUDO ERA GEOLOGIA

No século XVIII as investigações da Terra eram feitas sem muito método, numa forma quase que puramente observacional e baseadas numa filosofia natural, num misto de especulações e explicações divinas. A única parte das Ciências da Terra já organizada era a Mineralogia, ensinada em escolas da França e Alemanha, voltadas à mineração. Foi somente no início do século XIX que o termo Geologia ganhou força, com a fundação da “Sociedade Geológica de Londres”, em 1807. A partir de então, esta nova ciência tinha a missão de representar o estudo do acessível, isto é, as teorias sobre a formação e evolução da Terra tinham que estar fortemente ancoradas no que as rochas podiam mostrar. O que não podia ser cabalmente demonstrado era considerado meramente especulação e ficava no campo da Cosmogonia.

Se essa postura rígida ajudou a desenvolver uma ciência com bases sólidas, também provocou atrasos no conhecimento do interior da Terra e o estabelecimento de teorias sobre sua evolução, devido ao preconceito sobre qualquer idéia que não encontrasse respaldo nas observações de superfície. As primeiras medidas físicas usadas para modelar a estrutura externa da Terra (a crosta) foram aquelas sobre o calor, isto porque já se admitia que era necessário um fornecimento de calor constante para formar e manter as cadeias de montanhas.

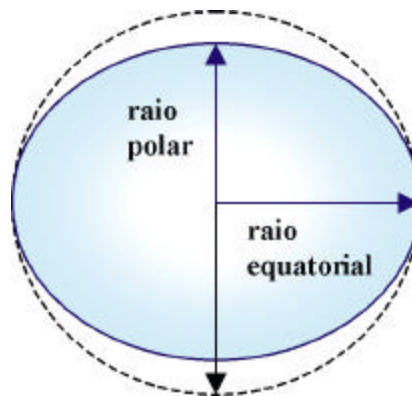
Por volta de 1830 já se tinha uma grande quantidade de observações sobre o aumento de temperatura com o aumento de profundidade nas minas. Mantendo-se essa razão constante, extrapolava-se que a 80 km de profundidade as rochas estariam todas fundidas, criando um mar de magma que seria a fonte de lavas dos vulcões. Essas falsas conclusões deveram-se à falta de conhecimento sobre as reais propriedades físicas da Terra, o que só veio a ser conhecido muito mais tarde. Entretanto, com isso iniciou-se o estudo do interior do planeta, campo de estudo que por vezes era designado por Geologia Física. Entretanto, esse termo não era apropriado porque a base de conhecimento e os métodos a serem utilizados nessa investigação eram muito diferentes daqueles aplicados pelos geólogos da época. Mais apropriadamente, referia-se então à Física da Terra a essa linha de investigação, e que acabou sendo o núcleo de uma nova ciência, a Geofísica.

Embora a Geofísica seja tratada ainda por alguns como uma subárea da Geologia, e aí resumindo a Geofísica a alguns métodos de exploração de recursos naturais, devemos entenderr a Geofísica como uma ciência sofisticada, multidisciplinar, como aliás é atualmente qualquer setor da ciência, que está em constante evolução. De fato, em seus objetivos a Geofísica aproxima-se da Geologia mas, de acordo com seus métodos, ela está alinhada com a Física. Mas ainda aqui temos que considerar que as particularidades do sistema Terra fazem com que a observação dos fenômenos físicos esteja sujeita a uma variável – a escala de tempo geológica – que não encontra paralelo na maioria das observações de laboratório.

A Geofísica é, portanto, por si só como uma ciência e que se caracteriza pela multidisciplinaridade.

II. INVESTIGANDO O INACESSÍVEL

A Terra é um dos nove planetas do Sistema Solar e é o maior dos planetas interiores. A Terra é quase esférica, sendo que o diâmetro maior é o equatorial, com 12.756 km. O diâmetro polar (12.714 km) é apenas 42 km menor que o equatorial, portanto é ligeiramente achatada nos pólos.



Hoje em dia podemos dizer que temos um nível de conhecimento bastante razoável deste nosso planeta, graças aos métodos geofísicos de investigação, que permitem desvendar os mistérios do interior da Terra, sem que se possa penetrar em seu interior, a não ser por uns poucos quilômetros mais superficiais. Por exemplo, as minas mais profundas não excedem 2 ou 3 km. Os poços de petróleo mais profundos atingem cerca de 8 km. Alguns projetos específicos para perfurar a superfície da Terra e coletar material, não passaram de 11 km (na península de Kola, na Rússia). Essas profundidades, comparadas às dimensões da Terra, pouco representam em termos de conhecimento da estrutura interna do planeta.

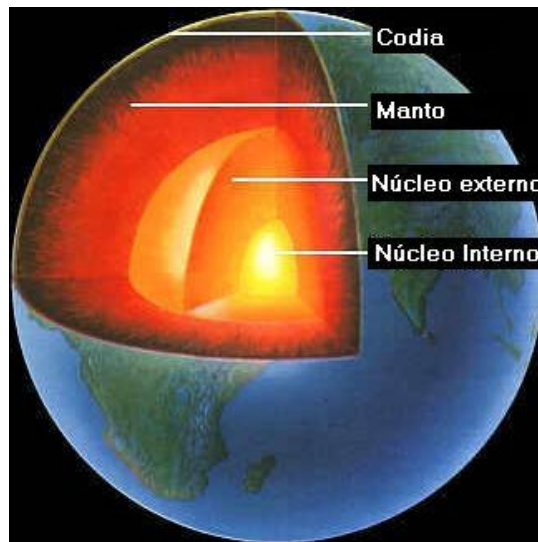
ALVOS DE ESTUDO DA GEOFÍSICA

Camadas internas

A crosta é a camada mais acessível da Terra. Podemos conhecer sua composição através de perfurações onde se coleta o material (testemunhos de sondagem) tanto das

áreas continentais como das áreas oceânicas. Mas a maioria das perfurações não é muito profunda, considerando que a espessura da crosta varia de cerca de 5 a 70 km.

Sabemos que a crosta é formada predominantemente por rochas denominadas **granitos**, que são do tipo **plutônicas**, ou seja formam grandes corpos intrudidos na crosta e contêm alta porcentagem de minerais que contêm silício na sua composição (SiO_2). São, por essa razão, classificadas como **rochas ácidas**. Nas áreas oceânicas, a crosta é formada por rochas extrusivas básicas, que contêm apenas 40 a 50% de SiO_2 e mais ferro e magnésio do que os granitos, sendo por isso rochas escuras e mais densas.



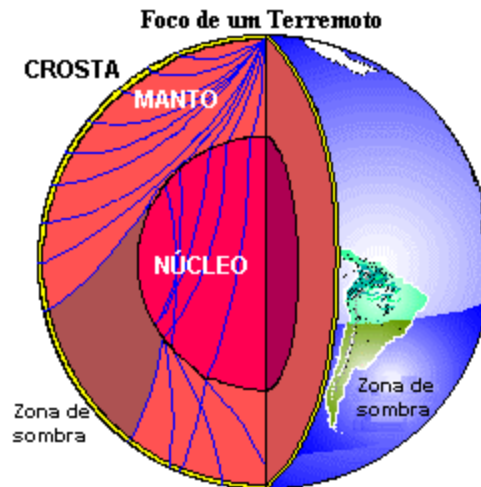
Independente da composição média da crosta, ainda encontram-se outros tipos de rochas e extensas **bacias sedimentares** que se formam em áreas apropriadas; nestas bacias, espessas colunas de sedimentos de vários tipos se acumularam durante milhões de anos.

O **manto** é a camada que vem logo abaixo da crosta e se estende por cerca de 2900 km, até o **núcleo**. Corresponde a mais de 80% do volume do planeta. Os materiais que formam o manto estão submetidos a grandes pressões e temperaturas que aumentam com a profundidade. Por isso os minerais que aí existem são diferentes daqueles encontrados na crosta e também variam dependendo da profundidade do manto. Mas de modo geral esses minerais são compostos por **silicatos** contendo ferro e magnésio.

O manto é subdividido em **manto superior** (primeiros 400km) e **manto inferior** (entre 700 e 2400 km). A região intermediária (400 a 700 km) é conhecida como **zona de transição**. Essas regiões são definidas a partir das diferentes propriedades físicas e químicas que apresentam, em função das variações de pressão e temperatura.

Os primeiros 100 km da superfície da Terra, que compreendem a crosta e parte do manto superior, formam a **litosfera**. Essa camada é dividida em blocos ou placas que se encaixam umas nas outras e que são as **placas litosféricas**. As placas litosféricas se movem umas em relação às outras, impulsionadas pelos movimentos da camada do manto que vem logo abaixo e que é chamada de **astenosfera**. A astenosfera tem propriedades físicas de um sólido, mas se comporta como um líquido viscoso quando observada em longos intervalos de tempo (tempo geológico).

O núcleo da Terra é um pouco maior que o planeta Marte e tem 3486 km de raio. É constituído por metais (ferro e níquel, principalmente) submetidos a altas pressões (mais de três milhões de vezes a pressão atmosférica) e, portanto, muito densos. As temperaturas no núcleo provavelmente excedem os 4000 °C. A parte externa do núcleo (2270 km de raio) encontra-se em estado líquido e a parte interna (1216 km), em estado sólido. Na primeira a temperatura predomina sobre a pressão; na segunda é a pressão dominando a temperatura, daí as diferenças de estados térmicos.

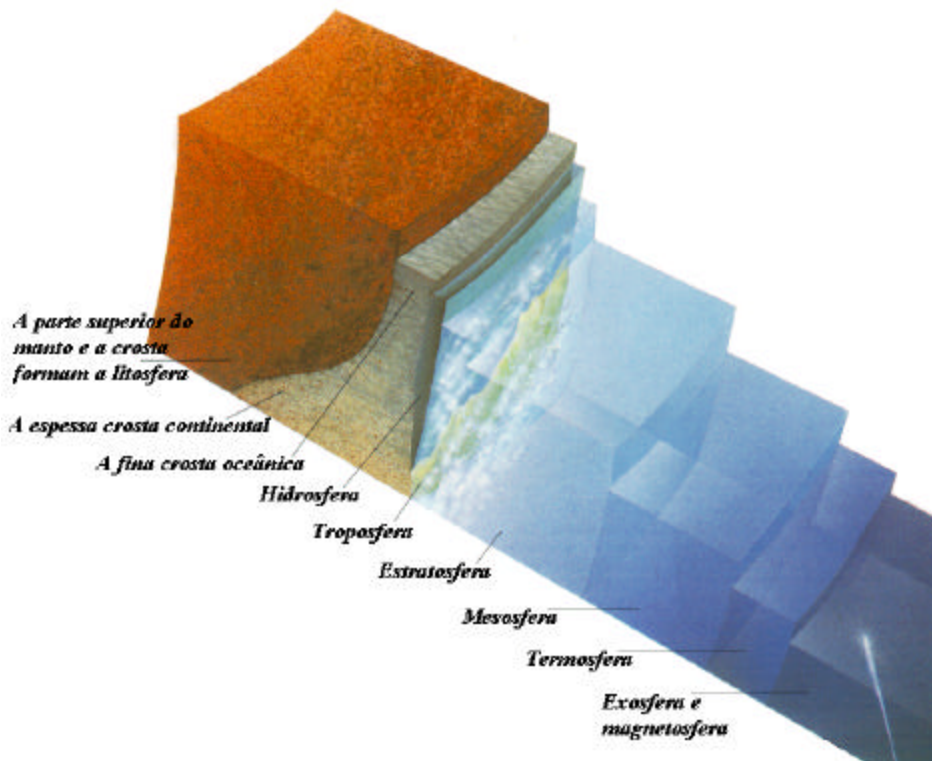


O conhecimento que se tem sobre as diferentes camadas que formam o interior da Terra deve-se inteiramente aos estudos geofísicos – passagem de ondas sísmicas, magnetismo, gravidade e outras propriedades que se manifestam na superfície. Mas ainda há muito por descobrir e entender sobre os processos físicos que ocorrem no interior do planeta, bem como sobre os processos que movem as placas litosféricas. Estes são os assuntos de pesquisa dos quais se ocupa a Geofísica, principalmente nas universidades. Do ponto de vista econômico, os estudos concentram-se na parte superior da crosta porque é aí que se acumulam os bens minerais de valor econômico. Mas é o

comportamento e o histórico da litosfera que determinam as condições para a formação de petróleo e minérios e, por essa razão a litosfera como um todo, é sempre investigada.

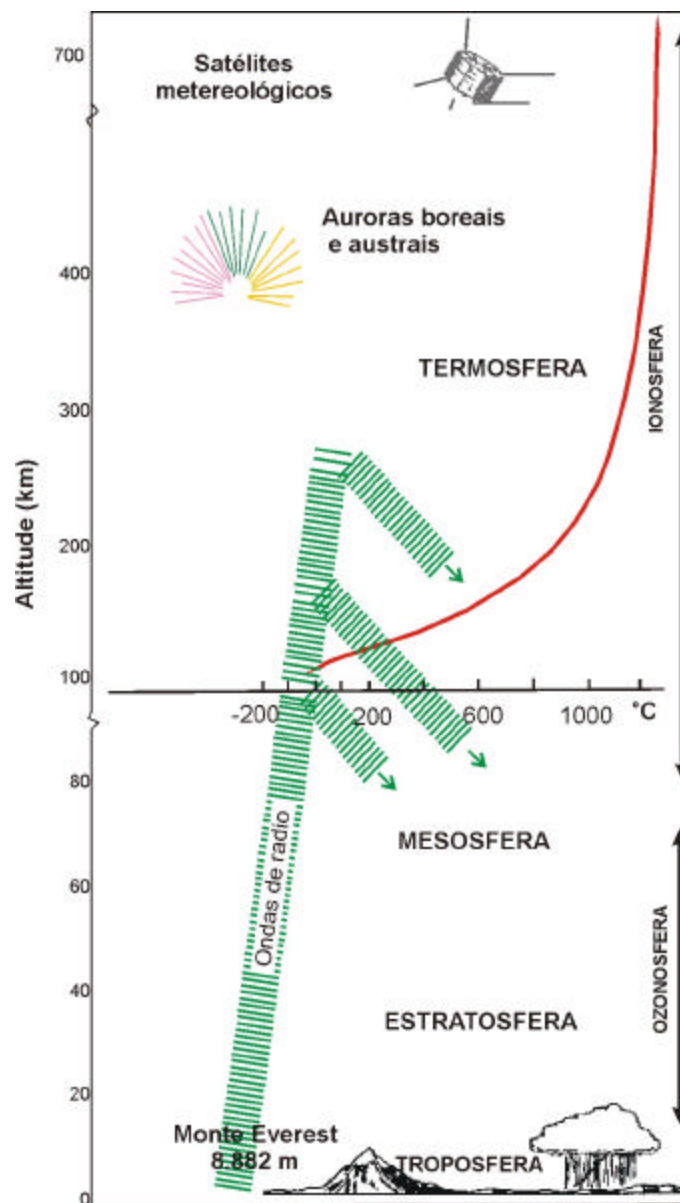
Atmosfera

A atmosfera da Terra, assim como de outros planetas, é uma camada de fluido compressível unida ao planeta através da força de gravidade. A atmosfera da Terra é uma mistura de vários gases, na qual se encontram em suspensão quantidades variáveis de partículas de matéria sólida e líquida. Corpos celestes pequenos e com temperaturas elevadas, tal como o planeta Mercúrio, somente podem reter moléculas gasosas mais pesadas.



A atmosfera terrestre embora relativamente delgada (algumas centenas de quilômetros) apresenta uma estrutura complexa e que desempenha um papel importante na preservação dos elementos biológicos da Terra. Até uma altura de cerca de 80 km seus gases estão bem misturados e constituem a **homosfera**. Nesta camada a proporção de cada gás, em geral, é mantida constante. Contrariamente na **heterosfera**, camada que vem a seguir, os gases aparecem estratificados de acordo com o peso, como

aconteceria com líquidos de diferentes densidades. Numa amostra de ar puro e seco da homosfera, a composição em volume aproximada seria a seguinte: 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, pouco menos de 1% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e o restante corresponde ao neônio, hélio, metano, criptônio, xenônio, hidrogênio e ozônio. Destes últimos, o dióxido de carbono e o ozônio são importantes para o equilíbrio energético da Terra e, portanto, merecem atenção especial dos meteorologistas. O ar nunca é completamente seco e puro, podendo conter até 4% de água em estado gasoso e grande variedade de partículas em suspensão.



Um aspecto importante na composição da heterosfera é que uma grande parte do ar está formada por **partículas ionizadas** ou seja, partículas com cargas elétricas. Esta ionização é produzida pela intensa radiação de onda curta (ultravioleta e raios-X) procedente do Sol e que é absorvida pelas partículas, provocando a separação de elétrons dos átomos ou moléculas. Este processo de formação de íons será tanto mais intenso quanto maior for a intensidade de radiação solar e quanto maior for a quantidade de partículas disponíveis para serem ionizadas. Entretanto, quando a densidade de partículas é alta, também aumenta a probabilidade de choque entre elas, o que vai ocasionar a recombinação dos íons positivos e negativos. Como consequência o máximo de elétrons livres ocorre a cerca de 350 km de altura.

Esta camada da atmosfera composta por partículas ionizadas é chamada de **ionosfera**. Por permitir a passagem de correntes elétricas, esta camada influencia outros fenômenos de natureza elétrica ou eletromagnética da Terra, tal como seu próprio magnetismo. Por essa razão ela é um alvo importante de estudos geofísicos e devido à sua complexidade muitas pesquisas são necessárias para o entendimento dos processos físicos e químicos que aí ocorrem. O ramo da Geofísica que se ocupa desses estudos é a chamada Geofísica Espacial, ou ainda a Aeronomia, quando o objetivo é o estudo das camadas que fazem a interface entre os interesses da Meteorologia e da Geofísica.

Hidrosfera

A hidrosfera estende-se desde o topo da atmosfera a aproximadamente 10 km abaixo da superfície e compreende o vapor d'água atmosférico, oceanos, rios, lagos, geleiras e águas subterrâneas. Nosso planeta é o único do sistema solar que possui água superficial em quantidade suficiente para formar oceanos, e estes recobrem 71% da superfície da Terra. A disciplina que trata especificamente dos processos físicos, químicos e biológicos dos oceanos é a Oceanografia, mas a Geofísica tem interesses paralelos sobretudo na investigação do fundo oceânico que é chamado de assoalho oceânico. Particularmente o relevo, as estruturas geológicas do fundo do mar, e as camadas de sedimentos que formam as bacias sedimentares, são investigadas por métodos geofísicos e são aspectos importantes para se compreender parte da dinâmica terrestre. Foi no assoalho oceânico que foram encontradas as chaves para se entender o enigma do movimento das placas que formam a superfície terrestre.

Mas são as águas subterrâneas que mais interessam à Geofísica. O estudo dos **aqüíferos** (camadas geológicas favoráveis à retenção de água) depende muito dos métodos geofísicos porque são estes que podem informar com certeza sobre a presença de água em profundidade, mapear plumas de poluição que podem penetrar até o aqüífero, ou ainda fornecer dados sobre o comportamento do aqüífero quanto ao seu regime de vazão e recarga. Assim, todo estudo hidrológico depende fortemente de estudos geofísicos.

III. RECURSOS NATURAIS DA TERRA

ÁGUA

Hoje em dia, as questões relacionadas ao meio ambiente, seu uso e preservação, o que constitui no jargão moderno o “Desenvolvimento Sustentável”, coloca-se na ordem do dia. Isto porque depois de milênios de uso dos mananciais de água da superfície da Terra, sem a devida consciência de preservação, a civilização moderna, baseada no desenvolvimento industrial e em grandes centros urbanos, vê-se às voltas com a escassez desse bem mineral, sem o qual o ser humano não pode sobreviver. Mesmo os grandes rios que abasteciam populações com água pura, foram sendo poluídos, até o ponto de, em alguns casos (e o Brasil tem muitos exemplos desse tipo), transformarem-se em meros condutos de esgotos das cidades e dos dejetos industriais.

Apesar da abundância de água superficial em algumas regiões da Terra, muitas vezes é necessário recorrer-se à exploração de água de subsuperfície, a qual não é uma fonte inesgotável e tampouco livre de poluição, devido à infiltração através do solo ou de camadas geológicas porosas. Além disso, a água subterrânea se acumula nos aquíferos através de um ciclo hidrológico característico da região e que depende, dentre outros fatores, das características geológicas (tipos de solo e rochas que a água terá que atravessar) e das condições climáticas locais (quantidade de chuvas). O abastecimento do aquífero pode ser muito lento, levando milhares de anos para acumular a água. Se a extração da água for feita em grandes quantidades e muito rapidamente, sem respeitar esse ciclo hidrológico, haverá um esgotamento do aquífero e o conseqüente desabastecimento da população ou indústria local.

O geofísico, com seus métodos de investigação de subsuperfície, é capaz de localizar e dimensionar um aquífero que será utilizado para a exploração da água. É este o trabalho do geofísico de uma empresa que executa o trabalho de prospecção. Na área da pesquisa, cabe um trabalho muito mais abrangente, que vem a ser o estudo do comportamento de um aquífero, para dimensionar seu uso, respeitando seu ciclo hidrológico. A investigação geofísica, no caso, significa o reconhecimento das estruturas geológicas que acomodam o aquífero, seu processo ou velocidade de carga e descarga, e mapeamento e monitoramento de focos de poluição para a preservação daquela água.

PETRÓLEO

O petróleo é um bem mineral não renovável, largamente usado como fonte de energia no mundo moderno. Seu uso data de mais de 4000 anos atrás, pois o óleo cru que aflorava à superfície em regiões do Oriente Médio, servia para fazer cola para pontas de lanças ou como argamassa para assentar tijolos, ou ainda para impermeabilizar embarcações. Mas somente a partir do início do século XIX é que teve início seu uso como combustível, quando incidentalmente produziu-se chama do gás liberado através de um poço de água em Fredonia, NY em 1821. Desde então, o uso do petróleo na forma de gás ou derivados foi encontrando mais e mais aplicações. O querosene, por exemplo, foi refinado em 1852 no Canadá e o óleo empregado borbulhava na superfície. A exploração do óleo de subsuperfície teve início em 1859, quando foi perfurado o primeiro poço de petróleo na Pensilvânia, Estados Unidos.

Hoje em dia a busca por novos reservatórios de petróleo é incessante, porque além de ser uma das principais fontes de energia, ainda é largamente usado na indústria química, produzindo plásticos, fibras sintéticas, fertilizantes, explosivos e outros produtos. Muitas das reservas de petróleo no mundo todo não estão aflorando na superfície, ao contrário, estão em profundidades que para serem descobertas necessitam de métodos de investigação que só a Geofísica dispõe.

O petróleo se origina da matéria orgânica que fica soterrada em camadas sedimentares. À medida que essas camadas vão crescendo, elas vão afundando por causa do peso; a pressão e o calor geotérmico então aumentam, transformando as moléculas orgânicas (moléculas de carbono) em uma substância chamada **querogeno**, uma espécie de cera dura. Dependendo da temperatura, o querogênio se transforma em vários componentes líquidos ou gasosos de **hidrocarbonetos**, a temperaturas entre 50 e 100 °C e profundidades de 2 a 4 quilômetros. No início do processo as moléculas de querogênio são grandes e complexas, formando hidrocarbonetos muito viscosos como parafina, alcatrão ou “óleo pesado”. Com o aumento da temperatura, essas moléculas se quebram, formando produtos mais leves, menos viscosos, como a gasolina, o querosene e óleo diesel. Acima dos 100 °C o petróleo líquido se transforma em gás; primeiramente naqueles com moléculas mais complexas, como o octano e butano e depois, nos mais leves, como o propano, etano e metano. Acima de aproximadamente 200 °C e a

profundidades de 7 km ou mais, os gases mais leves escapam por fraturas das rochas, para níveis de pressão mais baixa, e as rochas não têm mais condições de armazenar hidrocarbonetos.

As rochas que contêm a matéria orgânica necessária para gerar os hidrocarbonetos são chamadas **rochas-fonte**. São, em geral, sedimentos de grãos finos e ricos em lodo ou argila contendo matéria orgânica. Essas rochas se formaram em bacias marinhas, em condições de clima tropical, favoráveis para o desenvolvimento de uma rica variedade de microorganismos animais e vegetais. À medida que as rochas-fonte vão sendo compactadas com o peso das novas camadas de lama, os hidrocarbonetos vão sendo expulsos e migram para zonas de menor pressão. Rochas mais porosas como os arenitos, serão permeáveis à passagem dos hidrocarbonetos e poderão armazenar o óleo ou gás, se forem recobertas por camadas de rochas impermeáveis. Neste caso, forma-se um reservatório e a rocha que hospeda o hidrocarboneto será chamada de **rocha-reservatório**.

A menos que o óleo consiga migrar até a superfície, a prospecção, ou seja, o reconhecimento de camadas e estruturas geológicas capazes de armazenar petróleo, tem que ser feita através de métodos indiretos. A primeira etapa de prospecção é feita buscando-se áreas que por sua história e constituição geológicas devam ser favoráveis à existência de rochas fonte e reservatório – e essa é a atividade dos geólogos. Na etapa seguinte utiliza-se os métodos geofísicos de investigação profunda para constatar se as indicações geológicas são precisas, se realmente existem as camadas com a porosidade esperada para formar o reservatório e se há indicações da existência de hidrocarbonetos. As falhas geológicas também precisam ser mapeadas, porque elas podem causar grandes deslocamentos verticais das camadas investigadas, fazendo com que o reservatório não seja uniforme lateralmente. Elas também podem ocasionar perda do hidrocarboneto ou deslocamento para reservatórios em diferentes profundidades.

A perfuração de um poço de petróleo é muito cara, principalmente em condições de águas profundas como estão localizados a maioria dos poços brasileiros. Portanto a investigação geofísica de precisão é essencial, para a perfeita locação de um poço. É aí que se concentra a atividade do geofísico na indústria do petróleo. No planejamento do trabalho geofísico a ser executado, na decisão de quais métodos se deve empregar, nos trabalhos de campo fazendo a coleta de dados e finalmente, no processamento e interpretação de dados. Esta última é uma etapa da mais alta importância e com grau de complexidade que exige profissionais muito bem treinados. Muitos geofísicos dedicam-se

exclusivamente a este trabalho e por vezes recebem treinamento das próprias empresas encarregadas de fazer esse processamento, porque elas dispõem de programas de computador específicos para seu tipo de trabalho e necessidades.

Além dessa atividade do geofísico na indústria de petróleo, muito trabalho geofísico é necessário para auxiliar nas pesquisas básicas para caracterizar áreas favoráveis à formação e acumulação de petróleo. Esse trabalho corresponde à determinação das estruturas geológicas da crosta que não podem ser observadas diretamente; a história geológica das bacias sedimentares, onde e como se formaram e em que condições climáticas. Por exemplo, toda a região sul do Brasil é uma imensa bacia sedimentar (Bacia do Paraná) que se desenvolveu durante mais de 300 milhões de anos e, durante grande parte de sua história, foi formada como bacia marinha em condições de clima favoráveis à existência de matéria orgânica. Entretanto, ao final do ciclo de sedimentação essa bacia esteve sob condições de alto gradiente de temperaturas, como demonstra o imenso **vulcanismo** que recobriu toda a sua extensão, formando pilhas de **lavas** de mais de 1000 m de altura. Esse aquecimento pode ter sido o responsável pela não existência de óleo na Bacia. Todas as pesquisas geológicas e geofísicas já feitas nessa bacia, somente revelaram a existência de gás em áreas localizadas.

Desta forma, todo o trabalho geofísico feito nos centros de pesquisa (as empresas de petróleo mantêm também centros de pesquisa básica), concorrem também, embora às vezes de forma indireta, à atividade geofísica para a prospecção de petróleo.

CARVÃO E TURFA

O carvão é o combustível fóssil mais abundante do planeta. Ele se origina a partir do soterramento da vegetação que impede a decomposição por oxidação da massa vegetal.

O peso das camadas sedimentares que vão se acumulando sobre essa massa, espreme a água dos poros da parte vegetal ainda não completamente decomposta. Com o soterramento mais e mais profundo, a pressão, mais o calor geotérmico, e a ação de bactérias, retiram a água e os gases orgânicos (gás carbônico - CO₂ e gás metano – CH₄) produzidos pelas bactérias e oxidação.

O processo cria uma variedade de combustíveis fósseis. Pressões moderadas produzem a **turfa**, o primeiro combustível a ser produzido. A turfa é uma massa escura de plantas comprimidas mas não totalmente decompostas onde ainda se pode reconhecer as estruturas das plantas. A turfa contém quantidades consideráveis de água, ácidos

orgânicos e gases (hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) e somente cerca de 50% de carbono. Depois de seca pode ser utilizada para aquecimento das casas, como acontece em zonas rurais da Europa.

Num estágio mais evoluído de maturação da matéria orgânica, tem-se a formação do **lignito**, rico em querogênio. Este carvão marrom contém cerca de 70% de carbono e é mais eficiente que a turfa como fonte de calor. O soterramento profundo do lignito e o conseqüente aumento do calor e pressão, produz um carvão preto e lustroso que é o carvão betuminoso, com conteúdo de carbono entre 80% e 93%. Este carvão produz muito mais calor e menos fumaça que a turfa e o lignito.

Se as camadas sedimentares que deram origem ao carvão forem submetidas a calor e pressão que alterem sua estrutura geológica, então elas serão **metamorfizadas**. Os processos metamórficos transformam o lignito e o carvão betuminoso em um carvão de alto teor de carbono (93 a 98%) e muito pouco gás, e que produz chama muito quente. Mas este tipo de carvão é mais raro, ocorrendo somente onde as rochas sofreram metamorfismo.

No Brasil os principais depósitos de carvão estão situados nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, nos sedimentos da chamada Bacia do Paraná. Este carvão teve origem a partir da vegetação que se desenvolveu há cerca de 260 milhões de anos.

Os depósitos de carvão são indicadores das condições climáticas do passado, porque o carvão se forma a partir de vegetação abundante, provavelmente de clima tropical a subtropical, que cresceram em pântanos, tendo sido soterrados pelos sedimentos que iam se depositando ou mesmo pela própria vegetação mais nova que ia crescendo.

MINERAIS

Os minerais são compostos químicos, em geral inorgânicos, com composição química definida. Os átomos dos elementos químicos que compõem um mineral, distribuem-se de forma organizada, em proporções bem definidas, podendo formar cristais. Conjuntos de minerais formam as rochas, tanto as da crosta terrestre como as do manto. Alguns minerais são formados por átomos de elementos químicos com valor econômico, como é o caso do cobre, ferro, alumínio, ouro, prata e platina, por exemplo. Quando a concentração desses elementos é alta, tornando-se possível sua extração para

fins econômicos, então temos uma **jazida mineral**. Existem cerca de 3000 minerais conhecidos, dos quais apenas algumas dezenas têm valor econômico.

A maioria dos elementos metálicos combina-se com oxigênio para formar **óxidos**. Por exemplo, o ferro (Fe) forma mais de um óxido: a **magnetita (Fe_3O_4)** e a **hematita (Fe_2O_3)**. Estes dois óxidos de ferro são minerais muito comuns nas rochas. Embora sejam compostos pelos mesmos elementos químicos, a proporção com que esses elementos aparecem na composição química do mineral, obriga os átomos a se arranjam espacialmente de forma diferente: a magnetita tem **estrutura cúbica** e a hematita tem estrutura de um **romboedro** (prisma cujas bases são paralelogramos). As diferenças nas estruturas cristalinas dão ao mineral propriedades físicas (densidade, cor, dureza, etc.) diferentes.

Além dos óxidos, muitos metais combinam-se também com o enxôfre (S) e formam sulfetos. Exemplos comuns são: pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), galena (PbS_2). Poucos metais são encontrados na forma nativa, isto é, sem se combinar com outros elementos: cobre (Cu), ouro (Au), prata (Ag) e platina (Pt).

Vários minerais e rochas não-metálicos são também de importância econômica: a halita, cloreto de sódio (NaCl), que é o sal de cozinha; o calcário (rocha de origem orgânica) usado para fazer cimento; a sílica (SiO_2) muito abundante e com inúmeras aplicações que vão desde a construção civil (areias) até a indústria do vidro. Outros minerais são procurados pela beleza; são as **pedras-gema** como o diamante (C), rubis, esmeraldas e outras.

Alguns processos físico-químicos que ocorrem na superfície da Terra fazem com que os metais de interesse na indústria se concentrem em certas regiões específicas, permitindo que esses minerais sejam explorados economicamente. Esses processos incluem precipitação sob a ação de água quente que circula por fraturas das rochas, interações químicas com fluidos quentes que circulam durante eventos metamórficos, separação das partículas metálicas densas. Como esses processos ocorrem em certas circunstâncias específicas, é possível ter-se indicadores de onde há possibilidade de ocorrerem jazidas de certos minerais metálicos, mesmo que estas não estejam visíveis. A confirmação desses depósitos poderá vir através do uso de métodos geofísicos baseados em propriedades físicas associadas ao metal ou mineral em questão.

IV. FONTES DE ENERGIA

A civilização moderna está baseada fortemente em um desenvolvimento tecnológico que necessita, cada vez mais, de suprimentos de energia. Essa energia é encontrada na natureza sob várias formas, embora nem todas elas sejam renováveis, ou ao menos, não são renováveis em curtos intervalos de tempo. A energia produzida a partir de combustíveis fósseis (vide seção anterior) é exemplo de energia não renovável, porque o processo de formação dessa matéria-prima é extremamente longo, comparado ao tempo calculado para se utilizar todas as reservas existentes.

Algumas formas de energia renovável são comumente exploradas (energia hidrelétrica, por exemplo); outras, são menos populares porque exigem grandes investimentos para a produção de uma quantidade relativamente pequena de energia. A busca de fontes de energia convencionais ou renováveis diz respeito também é papel também da Geofísica, atuando direta ou indiretamente nesse campo.

Energia Hidrelétrica

A energia hidrelétrica é produzida a partir da energia potencial fornecida pelas quedas d'água que fazem com que as turbinas se movimentem.

A energia produzida em usinas hidrelétricas representa a quase totalidade da energia elétrica produzida no Brasil. Graças ao grande potencial hídrico, existem inúmeras usinas em todo o território.

Energia Nuclear

A enorme quantidade de energia produzida quando um núcleo de urânio-235 (^{235}U) se subdivide espontaneamente (**fissão nuclear**) é usada na produção de energia alternativa aos combustíveis fósseis. Em muitos países onde o consumo de energia elétrica é muito elevado, a energia nuclear tem sido uma das alternativas mais exploradas. Nos

Estados Unidos, por exemplo, existem cerca de 110 reatores nucleares que produzem uns 20% da energia total consumida. A França depende das usinas nucleares para produzir 75% da energia elétrica necessária. O Brasil possui duas usinas nucleares situadas em Angra dos Reis, litoral sudeste, e a terceira está por ser construída.

A produção de energia nuclear está baseada no princípio de que o calor liberado durante a fissão do urânio é empregado para produzir vapor que irá alimentar turbinas elétricas. Para se ter uma idéia, uma certa massa de ^{235}U produz 3 milhões de vezes mais energia do que uma massa equivalente de carvão. O urânio é um elemento que existe em pequenas quantidades na superfície da Terra. Avalia-se que apenas 0,00016% (16 partes em 100 mil!) da crosta terrestre corresponde ao urânio. Pior ainda se considerarmos que o ^{235}U usado na usina nuclear corresponde a um em cada 139 isótopos de urânio encontrados na natureza.

Como os demais elementos naturais ou seus isótopos, o urânio não é encontrado livre na natureza. Ele aparece na estrutura de alguns minerais combinado com oxigênio formando um óxido, a **uraninita** (ou pitchblenda). Esse mineral é encontrado em pequenas quantidades, formando veios em rochas graníticas ou depositado em rochas sedimentares. Em certas condições, o urânio pode ser oxidado e dissolvido por águas superficiais e transportado, indo se acumular em **depósitos aluvionares**, formando outros minerais (minerais secundários). Os grandes produtores de urânio são, na ordem, Estados Unidos, Canadá, Austrália, África do Sul e Brasil, embora não se conheça ao certo o tamanho das reservas dos países da antiga União Soviética e da China.

Embora considere-se a energia nuclear como energia limpa, porque seu processo de produção não é poluente, existem dois grandes problemas associados com o funcionamento das usinas nucleares. O primeiro e mais grave problema é que essa indústria produz uma grande quantidade de rejeito radioativo que não pode ser jogado no meio ambiente. O "lixo atômico" é constituído de isótopos radioativos que são formados durante o processo de fissão nuclear. Alguns desses isótopos deixam de ser ativos em minutos ou até alguns dias; outros demoram meses ou anos para esgotar sua atividade. Mas o problema mais sério são os isótopos como o céσιο-137 e o estrôncio-90 que levam 600 anos para decair! Há também subprodutos dos reatores como o plutônio-239, usado nas bombas atômicas, que leva 24 mil anos para decair. A questão que surge então é, onde armazenar esse lixo radioativo?

Enquanto as quantidades são relativamente pequenas, as usinas guardam o lixo em seus depósitos especiais, mas depois de algum tempo é necessário buscar outras alternativas. Nos países que produzem grandes quantidades de lixo atômico, procura-se construir depósitos subterrâneos para os *containers* do lixo. Entretanto, como o lixo sempre pode vazar por pequenas fissuras da blindagem do *container*, ou este pode ser danificado com o passar do tempo, é necessário uma investigação muito detalhada das condições geológicas do local escolhido: o terreno tem que ser muito estável, ou seja não correr risco sísmico; não podem existir falhas geológicas, e as rochas têm que ser suficientemente compactas para não permitir a infiltração do material radioativo. Se estas condições de segurança não forem observadas, um eventual vazamento poderá contaminar um reservatório de água, por exemplo, prejudicando a população e o meio ambiente.

É nesse cenário que a Geofísica atua, investigando áreas que possam ser apropriadas, não só para depositar o lixo radioativo, como também para a própria construção da usina nuclear. Para ser segura, uma usina tem que ser construída em terrenos livres de risco sísmico e que também não ofereçam condições de contaminação da subsuperfície, em caso de acidente.

Energia Geotérmica

As ocorrências naturais de águas quentes e vapores estão associadas a zonas quentes do interior da Terra e que se constituem em **reservatórios geotérmicos**. A água é aquecida quando passa por essas rochas quentes que estão a profundidades muito variáveis. Essa energia térmica é aproveitada captando a água ou vapor através de furos de sondagens e canalizando-os até o local de consumo. Normalmente ela pode ser utilizada para uso doméstico ou industrial.

Um dos exemplos brasileiros mais conhecidos da existência de águas termais é a região de Caldas Novas, GO, onde água aquecida a cerca de 40 °C aflora na superfície. Na região existe um parque com piscinas de água quente natural. Essa mesma água é utilizada nas casas, evitando o uso de outro tipo de energia para o aquecimento da água. Entretanto, um dos problemas locais é que não existe água fria. Outro problema é que o

uso indiscriminado da água quente, tanto doméstico como industrial (indústria do turismo), está provocando o esgotamento dos aquíferos e prevê-se a exaustão dos mesmos dentro em breve.

Em regiões vulcânicas ou que tiveram atividade vulcânica recente, os reservatórios geotérmicos podem chegar a temperaturas muito mais altas, acima de 180°C, permitindo seu uso em turbinas geradoras de eletricidade. As análises de custo revelam que a energia geotérmica é competitiva com os meios convencionais de geração de energia elétrica.

As ocorrências mais espetaculares de fontes de energia geotérmica são os chamados **gêiseres** que são fontes de vapor liberado através de fraturas das rochas. Estas manifestações são comuns na Islândia, Califórnia, Havaí, Japão, e outras regiões vulcânicas. Na Califórnia, por exemplo, o campo de gêiseres gera cerca de metade da energia elétrica necessária para abastecer São Francisco.

A primeira utilização em grande escala de energia calorífica natural começou na Itália em 1904 onde poços com 700 m de profundidade produziam vapores superaquecidos a pressão elevada. Além de movimentarem uma turbina, contêm também impurezas químicas aproveitáveis como subprodutos. Na Groelândia cerca de 50.000 casas são aquecidas por fontes naturais, retirando-se água quente de poços geotermiais.

O conhecimento do regime térmico do interior da Terra é de grande importância na prospecção e exploração de campos de gás e petróleo. O conhecimento da temperatura interna é importante na definição de técnicas e equipamentos de perfuração. Os dados geotermiais têm sido usados recentemente para uma previsão objetiva sobre a natureza de um depósito, isto é, se contém óleo ou gás, uma vez que a temperatura e a pressão determinam o estado físico dos hidrocarbonetos - acima de 180°C dificilmente estarão em estado líquido.

Estudos foram feitos para extrair energia diretamente da Terra com chaminés enterradas a grandes profundidades, mas a quantidade de energia seria pequena porque a Terra é um mau condutor de calor.

Energia de Marés

Nas áreas costeiras onde as marés são grandes, isto é, existem grandes diferenças entre o nível da superfície da água na maré baixa e alta, pode-se captar energia usando

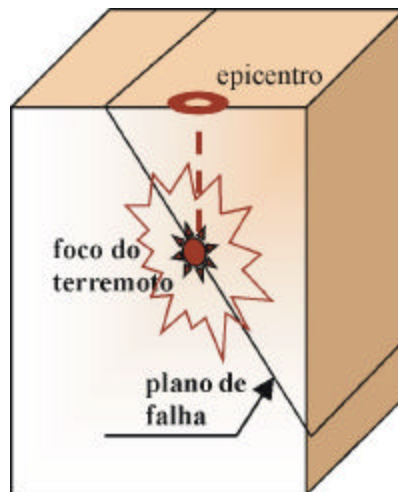
esse fluxo e refluxo da água. Construindo-se uma barragem em canais estreitos, a água da maré alta que avança penetra num reservatório. Quando a maré começa a baixar, fecham-se comportas na barragem impedindo que a água escape. A água represada então volta para o canal sendo forçada a passar por turbinas que irão gerar energia elétrica.

Para que o processo seja eficiente, as marés têm que estar acima de 8m, o que inviabiliza seu uso em muitas regiões. A maior geradora de energia de maré encontra-se na França, suprimindo praticamente toda a energia elétrica da província da Bretanha.

V. PROPRIEDADES FÍSICAS DA TERRA

ONDAS ELÁSTICAS

Quando as rochas quebram ou se movimentam ao longo de uma falha, produzem vibrações ao seu redor, que se propagam em todas as direções, podendo atravessar o interior da Terra. Essas vibrações correspondem aos terremotos e resultam da liberação da energia no ato da ruptura.

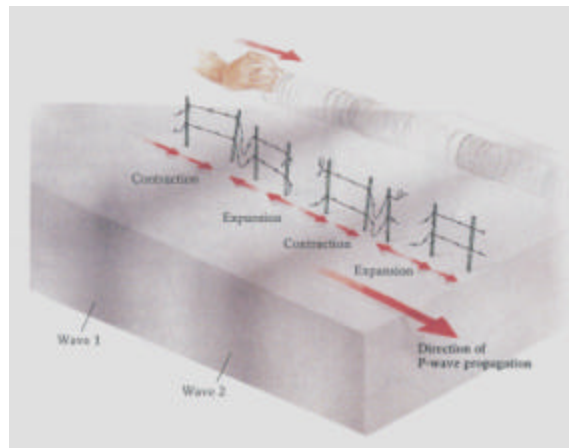
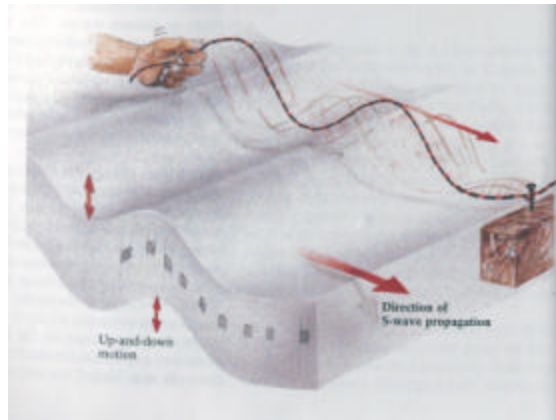


Como acontece com outras formas de energia, a energia dos terremotos ou energia sísmica, é transmitida de um ponto a outro na forma de ondas. Exemplo clássico de propagação de ondas e que pode ser visualizado, é o da energia de uma pedra quando atinge a superfície de um lago. A energia da pedra é transmitida à água na forma de ondas que partem em todas as direções desenhando círculos concêntricos em sua superfície que vão acabar morrendo ou se desfazendo a uma certa distância ou poderão atingir as margens. Ondas sonoras produzidas pelas cordas vocais de uma pessoa que está falando também chegam aos ouvidos de outra pessoa através de ondas que atravessam o ar.

Muito do que se conhece a respeito do interior da Terra deve-se à interpretação das informações trazidas pelas ondas elásticas depois de atravessarem toda a Terra. A

área da Geofísica que se ocupa de analisar e interpretar as ondas sísmicas é a **Sismologia**.

As ondas elásticas formadas por ocasião de um sismo ou terremoto (ondas sísmicas) podem ser de dois tipos: as **longitudinais** e as **transversais**.

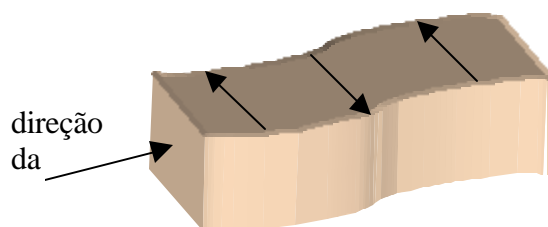


Nas ondas longitudinais, as vibrações são paralelas à direção de propagação e correspondem a sucessivas compressões e dilatações do meio. À passagem de uma onda longitudinal, as rochas são comprimidas, diminuindo de volume e depois são expandidas aumentando de volume e comprimindo as rochas vizinhas, num movimento como de uma mola. São as ondas mais rápidas, passando pela crosta da Terra à velocidade de 6 a 7 km por segundo e portanto sendo as primeiras a serem registradas em estações sismográficas. São denominadas de ondas **primárias** ou, simplesmente **ondas P**. As ondas P são idênticas à propagação do som no ar.

Nas ondas transversais as vibrações são perpendiculares à direção de propagação. As velocidades de propagação correspondem a cerca da metade das velocidades das ondas P, cerca de 3,5 km/s na crosta e, portanto são chamadas de ondas **secundárias (ondas S)**, pois chegam depois às estações sismográficas. O movimento produzido por essas ondas é similar ao de uma corda fixa em uma de suas extremidades e sendo chacoalhada para cima e para baixo na sua outra extremidade. Este movimento não produz alteração de volume, mas produz deformação das rochas, podendo provocar rupturas. Desta forma verificamos que as ondas S não podem se propagar no meio líquido, ao contrário das ondas P que se propagam em qualquer meio, sólido, líquido ou gasoso.

As ondas P e S atravessam o interior da Terra e são denominadas de **ondas de volume**. As velocidades de propagação das ondas P e S dependem do tipo de rocha e da pressão a que estão submetidas. Geralmente quanto mais densa a rocha, maiores as velocidades de propagação das ondas sísmicas. Por exemplo rochas sedimentares na superfície da Terra têm velocidade P da ordem de 2 a 3 km/s, rochas vulcânicas na parte inferior da crosta têm velocidade por volta de 7 km/s. Na parte inferior do manto terrestre a velocidade P chega a 13 km/s. O tempo que uma onda P leva para atravessar diametralmente a Terra é de aproximadamente 20 minutos.

Quando as ondas de corpo caminham em direção à superfície da Terra, produzem vibrações na parte superior da crosta (poucos quilômetros de espessura) e que correspondem a um outro tipo de ondas sísmicas: são as chamadas ondas **superficiais** que correspondem a uma combinação das ondas P e S que se propagam horizontalmente ao longo da superfície da Terra. Estas ondas produzem dois tipos de movimentos: um deles é semelhante ao movimento das ondas do mar e o outro é um movimento lateral de vai-e-vem, como o deslocamento de uma cobra. Os deslocamentos produzidos pelas ondas superficiais é que são responsáveis pela maior parte dos danos em estruturas rígidas durante os terremotos.



GRAVIDADE

A gravidade é uma força universal que governa o Universo. É ela que mantém unidos cem bilhões de estrelas de nossa Via Láctea. É ela que faz com que a Terra se movimente ao redor do Sol e a Lua ao redor da Terra. É esta força também que faz com que qualquer corpo, de qualquer massa, seja atraído para a superfície da Terra.

Devemos a Galileu Galilei (1564-1642) a constatação de que corpos de diferentes massas em queda livre, sofrem a mesma aceleração e chegam à superfície ao mesmo tempo. Posteriormente Isaac Newton em 1687, publicou a Lei da Gravitação Universal, onde demonstrou matematicamente que dois corpos quaisquer atraem-se mutuamente com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

Simbolicamente escreve-se $F = G.M_1.M_2/r^2$

onde M_1 e M_2 são as massas de dois corpos pontuais, r é a distância entre eles, e G é a constante da gravitação universal. A constante da gravitação universal vale $6,67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$ (sistema CGS) e $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ (sistema SI).

Na equação acima, a força F age sobre cada um dos dois corpos M_1 e M_2 . Suponha-se que M_1 esteja preso e M_2 esteja liberado para mover-se. Sob a ação da força F , M_2 irá se deslocar em direção a M_1 , com uma aceleração g que é igual a F/M_2 .

Então podemos escrever que $g = F/M_2 = G.M_1/r^2$

Como se vê, a aceleração g experimentada por M_2 depende apenas de sua posição em relação a M_1 e do valor de M_1 .

No sistema de unidades SI, a força gravitacional é expressa em **Newton**, e a aceleração é expressa em m/s^2 ; no sistema CGS, as unidades são **dina** e cm/s^2 . Em Geofísica adota-se tradicionalmente o sistema CGS, e a unidade de aceleração (1 cm/s^2) é chamada de **Gal** em homenagem a Galileu. É muito freqüente o emprego dos submúltiplos mGal (10^{-3} Gal) e μGal (10^{-6} Gal).

Como visto acima, a força gravitacional depende da distância entre os corpos, mas não da direção, ou seja, a atração é isotrópica. Esta é a razão porque o Sol, os planetas, e em geral qualquer corpo que se forma por aglomeração gravitacional tende a assumir a forma esférica. Outra característica da equação da aceleração vista acima, é que o campo

gravitacional depende tanto da massa como da distância. Por essa razão é possível que um corpo de pequena massa produza um campo mais intenso que outro de massa maior, porém situado mais longe. É o caso da Lua e do Sol. O Sol, apesar de possuir cerca de 27 milhões de vezes a massa da Lua, encontra-se tão mais longe da Terra que o efeito gravitacional do mesmo sobre a Terra é cerca de metade do efeito da Lua.

A gravitação é uma propriedade fundamental da matéria, que se manifesta em qualquer escala, desde a escala atômica, onde ela é sobrepujada por outras forças (forças elétricas, magnéticas, etc) até a escala cósmica, onde conjuntos de corpos como o sistema Terra-Lua, o Sistema Solar, a Galáxia com seus milhões de estrelas, para citar alguns, são mantidos em coesão por efeito gravitacional.

No que diz respeito à Geofísica, a gravidade terrestre fornece informações em várias escalas. Com o estudo global do campo da gravidade, obtém-se informação acerca das dimensões, forma e massa da Terra. Esta é a base da chamada Geodésia Física. Em um enfoque mais amplo ainda, o estudo da ação gravitacional da Lua e do Sol sobre nosso planeta permite determinar não só o modo como a massa se distribui no interior terrestre, como também permite tirar conclusões acerca do estado de agregação de vastas regiões do interior do planeta. Ou seja, o bom conhecimento do campo gravitacional terrestre permite tirar conclusões sobre a estrutura interna da Terra.

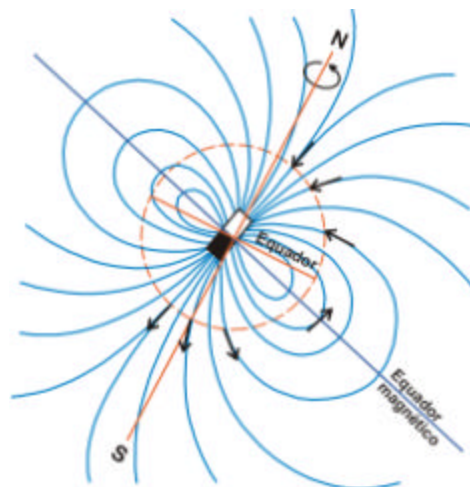
Mas a utilização prática do campo da gravidade terrestre só é possível através da medição de uma grandeza física associada. Neste caso a grandeza é a aceleração da gravidade. A aceleração da gravidade é um vetor caracterizado por sua intensidade **g**, denominada simplesmente gravidade, e por sua direção, chamada de vertical local. A gravidade é medida por meio de gravímetros, ao passo que a direção da vertical local só é observável por métodos astronômicos, através dos quais ela é referida ao referencial celeste.

Se os materiais que formam o interior da Terra apresentam diferentes densidades, estes irão provocar diferentes valores de **g** medidos na superfície. A estas variações dá-se o nome de **anomalias gravimétricas**. Desta forma, a tarefa da interpretação de uma informação gravimétrica resume-se na determinação de uma distribuição de densidade interna que possa explicar as diferenças da gravidade medida, ou seja da anomalia observada. A massa de material geológico, ou seja o corpo geológico, que produz essa anomalia gravimétrica, será então modelado determinando-se suas características geométricas (tamanho, forma e profundidade). A área da Geofísica que se ocupa das observações e interpretações gravimétricas é chamada de **Gravimetria** e é através desse

estudo que se obtém informações a respeito da constituição das camadas mais superficiais da Terra, crosta e manto superior, já que a gravidade varia de ponto para ponto, de acordo com a variação de densidade dos materiais geológicos.

MAGNETISMO

A Terra produz um campo magnético da mesma forma como uma corrente elétrica passando por um anel de fio condutor produz campo magnético. Este campo produzido é do tipo **dipolar** porque terá dois pólos magnéticos associados. O mesmo tipo de campo magnético é produzido por uma barra de material permanentemente magnético (um ímã de barra), então, por analogia dizemos que a Terra possui um grande ímã de barra em seu interior, o que faz com que na sua superfície apareçam regiões próximas dos pólos geográficos capazes de atrair a ponta imantada da agulha de uma bússola: são os **pólos magnéticos** da Terra.



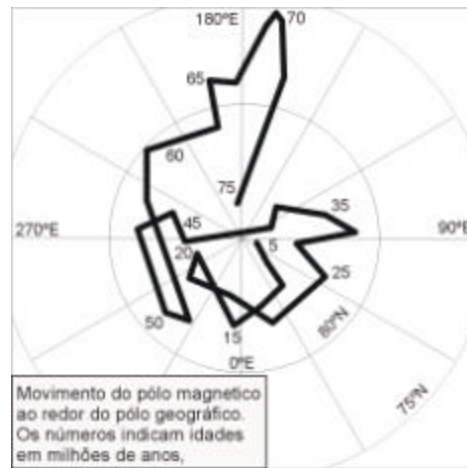
Mas essa idéia de um ímã dentro da Terra é apenas uma simplificação do problema. Embora a Terra tenha em sua composição materiais permanentemente magnetizados, por exemplo um tipo de mineral chamado **magnetita** (que é um óxido de ferro – Fe_3O_4), esses materiais não existem em quantidades suficientes para produzir o magnetismo da Terra na intensidade em que ele é observado. O que acontece é que no interior da Terra, no chamado núcleo externo, o material condutor que forma essa região (ferro e níquel, principalmente), está a altas temperaturas, acima do ponto de fusão desses elementos para a pressão que lá existe. Devido aos movimentos da Terra esse material estabelece um movimento de convecção que faz com que o material condutor simule espiras circulares de corrente elétrica, gerando por sua vez, um campo magnético dipolar que é observado na superfície da Terra.

Da mesma forma como a Física nos ensina, se a corrente elétrica variar de intensidade, o campo magnético associado também vai variar; se o movimento circular variar de direção no espaço, a direção do campo magnético também vai variar e os pólos associados mudam de posição. Se existir mais de uma espira de corrente elétrica, o campo magnético resultante será a soma vetorial dos campos individuais; e se todos os campos individuais variarem diferentemente, o campo observado irá variar de intensidade, orientação e até mesmo de sentido.

Como consequência o campo da Terra é muito variável, e os pólos da Terra variam continuamente de posição. Eles tendem a circular em volta do pólo geográfico, através de uma trajetória irregular e muito lenta. Uma volta completa ao redor do eixo da Terra leva da ordem de 2 a 4 mil anos e ela acontece sempre com o pólo indo na direção oeste.

Raramente os pólos magnéticos da Terra vão estar sobre os pólos geográficos da Terra, por isso quando usamos a bússola magnética para nos orientar, temos que lembrar que a agulha magnetizada da bússola está sendo atraída por um pólo magnético que não corresponde ao norte geográfico verdadeiro. Existe um desvio que vai depender da nossa posição na superfície da Terra. Por exemplo, na cidade de São Paulo o desvio é de aproximadamente 18 graus para oeste, para o ano de 2002. Em outras regiões da Terra o desvio poderá ser maior ou menor, como também para leste.

Normalmente os pólos da Terra não se afastam mais do que aproximadamente 20° dos pólos geográficos, mas de tempos em tempos, aqueles se afastam muito mais, podendo os pólos norte e sul trocar de posição um com o outro. Este processo é chamado de **inversão de polaridade** ou **reversão geomagnética**.



Não existe um intervalo de tempo pré-determinado para ocorrer uma inversão. Elas são aleatórias, mas muitas inversões ocorreram durante a história da Terra. A última aconteceu a cerca de 700 mil anos atrás. A configuração dos pólos que se observa atualmente é chamada de **polaridade normal**, e a situação oposta é chamada de **polaridade inversa**.

Alguns óxidos de ferro (magnetita, hematita, por exemplo) que compõem as rochas da crosta terrestre podem se comportar como ímãs permanentes. Quando eles se formam, são magnetizados pelo campo magnético da Terra e podem guardar essa magnetização por muitos milhões de anos. Mesmo que o campo mude de orientação ou de polaridade, a direção de magnetização daqueles minerais permanece a mesma. Assim podemos estudar o campo geomagnético do passado através desse magnetismo “fóssil” das rochas. Como veremos mais adiante, esse tipo de estudo é chamado de Paleomagnetismo (*paleo* = antigo). Por outro lado, a intensidade de magnetização que a rocha adquiriu é proporcional ao campo magnetizante, através de uma propriedade física que depende apenas do material (no caso, a rocha ou mineral) e que é chamada **suscetibilidade magnética**.

RADIOATIVIDADE

Alguns núcleos de elementos químicos apresentam a propriedade de emitir espontaneamente parte das partículas que o constituem, ou parte de sua energia na forma de radiação eletromagnética. Núcleos que possuem essa propriedade são chamados núcleos radioativos. É importante frisar que a emissão de radiação é uma propriedade do núcleo e não do elemento químico. O elemento químico potássio, por

exemplo, possui três isótopos diferentes: o potássio com número de massa 39 (^{39}K), o isótopo com número de massa 40 (^{40}K) e o isótopo com número de massa 41 (^{41}K). Desses três isótopos, apenas o ^{40}K é radioativo.

Quando um núcleo radioativo emite uma partícula diz-se que o núcleo sofreu um decaimento radioativo; isto quer dizer que houve uma modificação nesse núcleo. Existem vários processos pelos quais um núcleo pode decair e, um mesmo tipo de núcleo pode decair por mais de um processo radioativo. Entre os vários tipos de decaimento radioativo os mais importantes são: o decaimento por emissão de **partícula a** (dois prótons + dois nêutrons, ou um núcleo de hélio), o decaimento por emissão de **partícula b** (um elétron do núcleo), e a **captura eletrônica** (um elétron da camada eletrônica mais interna é absorvido pelo núcleo). Quando um desses processos acontece, o número de partículas existente dentro de um dado núcleo se modifica, gerando um isótopo de um outro elemento. Por exemplo, um núcleo de sódio-22 (^{22}Na) decai por emissão β produzindo um núcleo de neônio-22 (^{22}Ne).

Um outro processo que modifica um núcleo é a emissão de energia na forma de radiação eletromagnética, ou **radiação γ** (gama). O processo de emissão γ apenas diminui a energia total do núcleo e acompanha alguns processos de decaimento com a finalidade de equilibrar a energia do núcleo.

Muitos minerais que constituem as rochas terrestres têm em sua estrutura elementos radioativos que, portanto, conferem ao mineral as características de um mineral radioativo.

CALOR

As demonstrações que a Terra nos dá de que seu interior é quente, vêm através das erupções vulcânicas, que trazem à superfície grandes quantidades de rocha fundida, ou fontes de águas aquecidas. Quando as primeiras minas profundas foram cavadas, tornou-se evidente que a temperatura da Terra aumentava com a profundidade. Nas minas modernas, mais profundas, a temperatura é tão elevada que é necessário utilizar equipamento de ar condicionado para que os mineiros possam permanecer em seu interior. Em qualquer região da Terra a temperatura aumenta com a profundidade, a uma taxa de 20 a 40 $^{\circ}\text{C}$ a cada quilômetro ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$).

Sabe-se da experiência diária que o calor tende a fluir de uma região mais quente para a região mais fria. Entre as duas regiões existe uma variação gradativa de

temperatura ou, em outras palavras, um **gradiente térmico** ($\Delta T/\Delta Z$). Quanto maior for a diferença de temperatura, maior será a quantidade de calor (Q) fluindo da região mais quente para a mais fria. Mas essa quantidade de calor dependerá também da capacidade da substância de conduzir o calor, ou seja, da sua **condutividade térmica** (**l**).

Tipo de rocha	Condutividade térmica (cal/cm.s. °C)
Argila	0.002-0.003
Areia seca	0.002-0.003
Areia com água	0.005-0.007
Arenito seco	0.002-0.003
Arenito com água	0.004-0.006
Calcário	0.005-0.008
Basalto	0.003-0.005
Granito	0.005-0.008

O calor emitido no interior da Terra move-se através das camadas superiores da crosta por condução. A perda desse calor através da superfície global é o fluxo térmico terrestre. Para determinar-se o fluxo térmico é necessário efetuar medidas do gradiente e da condutividade térmica.

As unidades nas quais o fluxo térmico é medido são pequenas com relação à experiência diária:

$$1 \text{ unidade de fluxo térmico (UFT)} = 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$$

O valor médio para a crosta da Terra é cerca de 1,5 UFT e é aproximadamente o mesmo para as áreas continentais ou oceânicas. Calor fluindo a essa taxa levaria cerca de um ano para fundir uma camada de gelo de apenas seis milímetros de espessura. O calor recebido da radiação solar é 2000 a 3000 vezes maior. Contudo, o fluxo de calor da Terra é o processo geofísico mais impressionante em termos de energia ($2,4 \times 10^{20}$ cal/ano); grandes terremotos e atividades vulcânicas envolvem menores perdas de energia. O fluxo térmico causado pelo vulcanismo corresponde a apenas 1% do fluxo térmico total.

Não existe maneira direta de determinar a distribuição de temperatura dentro da Terra. Admitindo-se um gradiente médio de $14 \text{ }^\circ\text{C/km}$ para uma certa região, a temperatura a 300 km de profundidade seria de $4200 \text{ }^\circ\text{C}$, muito maior que o ponto de fusão das rochas comuns que existem no interior da Terra, mesmo considerando as pressões que prevalecem nessas profundidades. Então a temperatura deve diminuir, isto é, o gradiente tem que diminuir mesmo a profundidades moderadas.

Nas camadas mais profundas da Terra é necessário recorrer a conjecturas porém submetidas a certas condições. A temperatura precisa permanecer abaixo do ponto de fusão dos silicatos no manto, abaixo do ponto de fusão do ferro no núcleo interno, elevar-se até o ponto de fusão do ferro no limite do núcleo externo e excedê-lo aí dentro. A melhor maneira de obter a temperatura dentro da Terra é calcular o aumento do ponto de fusão com o aumento da pressão. Chega-se dessa forma a temperaturas talvez de 3000 °C no limite do núcleo e perto de 4000 °C no centro da Terra. Estes valores entretanto estão afetados de erro de muitas centenas de graus.

Mas qual seria a origem dessa energia térmica no interior do nosso planeta? A primeira idéia que ocorre é que o calor interno é o resíduo do calor original gerado no processo de formação dos planetas do Sistema Solar. Contudo verifica-se que o fluxo de calor que se mede atualmente na superfície do planeta é maior do que admite aquela hipótese. Portanto, deve haver fontes de calor adicionais que se sobrepõem ao gradual resfriamento da Terra, devido às perdas de calor.

O calor solar, muito embora seja responsável por cerca de $5,64 \times 10^{23}$ cal/ano, é quase que totalmente dissipado nas primeiras centenas de metros da superfície e re-irradiado. Na realidade, dada a enorme inércia da crosta, as variações periódicas de temperatura (diurnas e sazonais) são rapidamente amortecidas e de tal modo que uma variação superficial de 1 °C leva cerca de 12 a 24 horas para fazer-se sentir a 1 m de profundidade. O calor liberado pelas reações químicas que se processam nas rochas devido principalmente à oxidação dos sulfetos, é praticamente desprezível comparado com a quantidade de calor perdido pela Terra, e só tem significado apreciável localmente onde produz anomalias geotérmicas.

O calor gerado pelo decaimento radioativo dos radioelementos parece ser a maior contribuição ao calor atual. Essa fonte de energia libera cerca de $2,0 \times 10^{20}$ cal/ano e se concentra principalmente nas primeiras centenas de quilômetros de profundidade. A tabela abaixo fornece comparativamente a energia liberada por grama e por ano, para os principais elementos radioativos do planeta.

Além desses, existiram outros radioelementos, hoje extintos devido à curta **meia-vida** (tempo que uma certa quantidade de um elemento radioativo leva para decair até chegar à metade da quantidade inicial), que contribuíram substancialmente ao calor terrestre no passado.

Radioisótopo	Meia-vida (anos)	Energia (cal/g/ano)
²³² U	4,5 x 10 ⁹	0,71
²³⁵ U	7,1 x 10 ⁸	4,3
²³² Th	1,4 x 10 ¹⁰	0,2
⁴⁰ K	1,3 x 10 ⁹	0,22
⁸⁷ Rb	4,7 x 10 ¹⁰	1,3 x 10 ⁻³

Os principais elementos radioativos são encontrados em quantidades mensuráveis em todas as rochas, embora em concentrações diferentes. Como já mencionado, a maior contribuição ao calor radiogênico deve-se às camadas superficiais, como demonstra a tabela abaixo.

Entretanto, outras fontes de calor podem contribuir para o aquecimento da Terra. São fontes que podem ainda estar atuando ou que já atuaram no passado e que podem ser entendidas quando se analisa a história térmica da Terra.

Profundidade (km)	Contribuição relativa ao calor radiogênico
0 - 100	50%
100 - 200	25%
200 - 300	15%
300 - 400	8%
> 400	2%

ELETRICIDADE

Correntes elétricas circulam por todas as regiões da Terra, desde o seu interior mais profundo, até as camadas mais altas da atmosfera (na ionosfera, por exemplo). A condição necessária para que haja circulação de eletricidade é que o meio seja condutor elétrico. Existem dois tipos mais comuns de condução elétrica: **condução ôhmica**, feita por elétrons livres e também chamada de **condução metálica**, porque é o tipo de condução nos metais tais como o cobre; **condução iônica** ou **eletrolítica**, quando os íons se deslocam transportando as cargas elétrica. Isto é o que acontece quando se quebram as moléculas da água no processo de eletrólise, ou quando outros íons estão dissolvidos num líquido.

A maioria dos materiais geológicos (rochas e solos) da superfície da Terra é mau condutora de eletricidade, mas quando esses materiais apresentam água circulando através de seus poros ou fraturas, tornam-se condutores. Como a água normalmente apresenta sais dissolvidos, é ela que favorecerá a condução elétrica e, portanto, esta será do tipo iônico. No manto, os materiais contêm silício em sua composição e, portanto, são do tipo **semicondutores**. Devido às altas temperaturas que lá existem, esses materiais tornam-se condutores elétricos.

A parte da atmosfera mais propícia para o transporte de cargas elétricas é, obviamente a ionosfera, porque é formada por íons. Quando a atividade solar aumenta, a produção de íons nessa camada e a sua condução elétrica aumentam. Devido a certos movimentos circulares da atmosfera, as correntes elétricas que aí circulam podem se fechar em espiras que, por sua vez, terão um campo magnético dipolar associado. Este campo magnético irá se somar ao campo gerado no interior da Terra, aumentando ou diminuindo o campo local, dependendo da soma vetorial desses dois campos.

Por ser um padrão de correntes altamente variável, as correntes ionosféricas produzem campos muito variáveis que vão afetar o campo médio terrestre de forma diferente durante o dia. Nas horas em que o Sol, através de seu fluxo de partículas ionizadas (vento solar), está intensificando a circulação de correntes elétricas, a influência no campo magnético será maior, atingindo cerca de 1/10 do campo total observado próximo do meio dia. Durante a noite, as variações são muito pequenas e mais constantes, a não ser quando o Sol está excessivamente ativo e a quantidade de partículas ionizadas torna-se tão grande que envolve toda a Terra, até mesmo do lado noite. Nesses casos ocorrem as chamadas **tempestades magnéticas** com variações do campo magnético muito acima do normal.

VI. MÉTODOS GEOFÍSICOS

A maioria dos estudos geofísicos envolve medidas de propriedades físicas na região de interesse, isto é, **no campo**. Os dados são coletados, muitas vezes automaticamente na forma digital, ou na forma analógica para depois serem convertidos para a forma digital. Uma vez na forma digital, os dados podem ser analisados e interpretados. Nestes processos utilizam-se várias ferramentas matemáticas que vêm a ser, basicamente, filtros para se eliminar ruídos (sinais indesejáveis que se somam ao sinal procurado), avaliação do desvio ou erros nas medidas (teoria da propagação de erro), elaboração de mapas de iso-valores ou de anomalias, ou outro tipo de cálculo que permita transformar a leitura de uma grandeza física em outra grandeza de interesse que não pode ser medida diretamente.

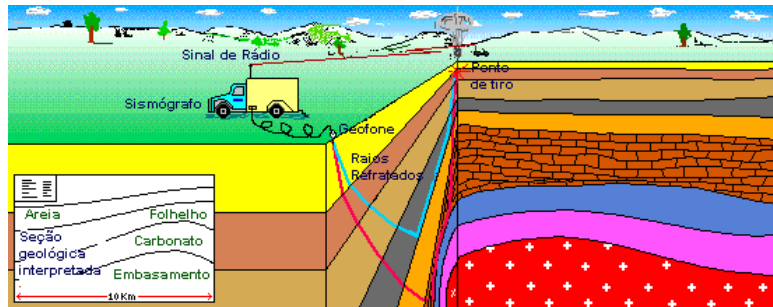
Cada uma das propriedades físicas abordadas acima, dá origem a um ou mais métodos de investigação geofísica e que serão abordados a seguir. Todos eles envolvem etapas de trabalho de campo e outras etapas de laboratório.

MÉTODOS SÍSMICOS

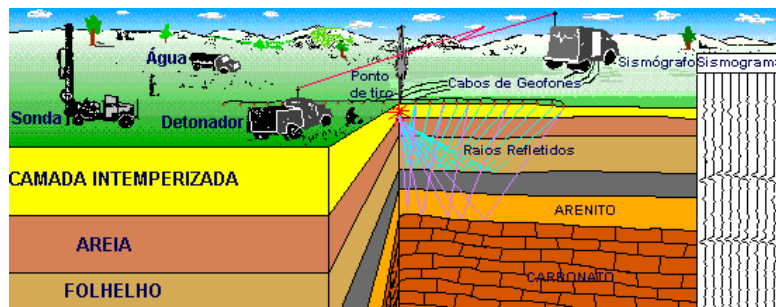
Estes métodos baseiam-se na emissão de ondas sísmicas geradas artificialmente através do impacto de explosões, tiros de ar comprimido, impactos mecânicos ou vibradores. Essas ondas penetram a certas profundidades no interior da Terra, que serão maiores à medida que a energia liberada no impacto for maior. Durante esse trajeto, as ondas irão atravessar diferentes camadas geológicas que apresentam características físicas diferentes e, por essa razão, vão sofrer **reflexão** e **refração**. Parte da energia contida numa onda será refletida na interface entre duas camadas geológicas. O restante seguirá seu caminho, mas segundo um ângulo diferente, pois sofreu refração.

As leis que governam a reflexão e a refração são as mesmas da ótica. Na reflexão, o ângulo de incidência da onda é igual ao ângulo de reflexão. A refração é governada pela lei de Snell: a relação dos senos dos ângulos de incidência e de refração é igual à relação da velocidade da onda incidente e da onda refratada, ou ainda:

$$\text{sen}(i)/\text{sen}(r) = V_1/V_2$$



As velocidades das ondas sísmicas dependem da densidade das rochas pelas quais as ondas circulam e de suas propriedades elásticas. Para baixos níveis de energia, as rochas se deformam ao passar da onda, mas voltam ao seu estado normal depois da passagem da mesma. Isto quer dizer que a rocha não se deforma permanentemente, portanto, apresenta características elásticas. Próximo às fontes sísmicas, sejam elas naturais ou artificiais, onde a energia é mais intensa, a rocha pode sofrer deformação permanente.



A capacidade de uma rocha sofrer deformação longitudinal (compressão e alongamento) em função da passagem de uma onda P (longitudinal), é medida pelo **parâmetro elástico k** e a deformação cisalhante produzida pela onda S (transversal) é proporcional ao parâmetro μ ou **módulo de cisalhamento**. As velocidades das ondas P e S vão depender das características elásticas e da densidade da rocha que atravessam. Escreve-se então:

$$V_P = \sqrt{(k/\rho)} \quad \text{e} \quad V_S = \sqrt{(\mu/\rho)}$$

As ondas sísmicas são detectadas por instrumentos capazes de perceber os movimentos do solo por ocasião de sua passagem. Esses instrumentos são chamados **geofones**, ou **hidrofonos** quando são usados nos oceanos ou lagos. O registro das ondas é feito pelos **sismógrafos**. Os sismógrafos, como indicado pelo próprio nome, "escrevem" o registro em papel (sismograma). Entretanto, as versões modernas fornecem

registros digitais, cujos dados estão prontos para serem analisados ou produzir os sismogramas.

Dependendo dos objetivos da pesquisa, pode-se optar por analisar as ondas refletidas (método sísmico de reflexão) ou as ondas refratadas (método sísmico de refração). No primeiro caso as sucessivas reflexões irão fornecer mais detalhes das camadas geológicas, sendo, portanto, o método mais empregado na prospecção de hidrocarbonetos (petróleo e gás). No método de refração, as ondas viajam grandes distâncias antes de serem detectadas pelo geofones, por isso contêm informações de grandes áreas, mas com menos detalhes.

MÉTODO GRAVIMÉTRICO

O método gravimétrico para a investigação do interior da Terra baseia-se nas medições e interpretação das variações do campo gravitacional terrestre resultantes das diferenças de **densidade** entre as diversas rochas localizadas na superfície e subsuperfície terrestres. Às variações do campo ou aceleração da gravidade dá-se o nome de **anomalia gravimétrica** (Δg). Utiliza-se o termo **corpo causador da anomalia** à estrutura ou à formação geológica que produz a anomalia gravimétrica. A tabela abaixo contém os intervalos de variação da densidade de alguns tipos materiais geológicos:

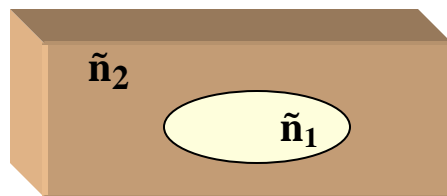
Material Geológico	Intervalo de densidade (kgm^{-3})
Aluvião (úmido)	1960-2000
Argila	1630-2600
Folhelho	2060-2660
Arenito	2050-2550
Calcário	2600-2800
Halita	2100-2400
Granito	2520-2750
Basalto	2700-3200
Gabro	2850-3120
Quartzito	2600-2700
Gnaisse	2610-2990

Na expressão para a força gravitacional, se m_1 é a massa constante do gravímetro, dividindo-se F por m_1 temos a força por unidade de massa, ou seja, a aceleração g em $m\ s^{-2}$.

As medições da aceleração da gravidade são efetuadas utilizando-se **gravímetros**. Estas medidas requerem muita precisão porque as variações nos valores da aceleração da gravidade devido às variações de densidade das rochas são muito pequenas, da ordem de $10^{-4}\ ms^{-2}$. Medidas de g são efetuadas sobre a superfície terrestre, em terra, lagos e oceanos. Mais recentemente, com o advento do **sistema de posicionamento global por satélite** (*GPS= Global Positioning System*) de alta precisão, começa a ser utilizada a gravimetria aérea ou aerogravimetria em locais de difícil acesso.

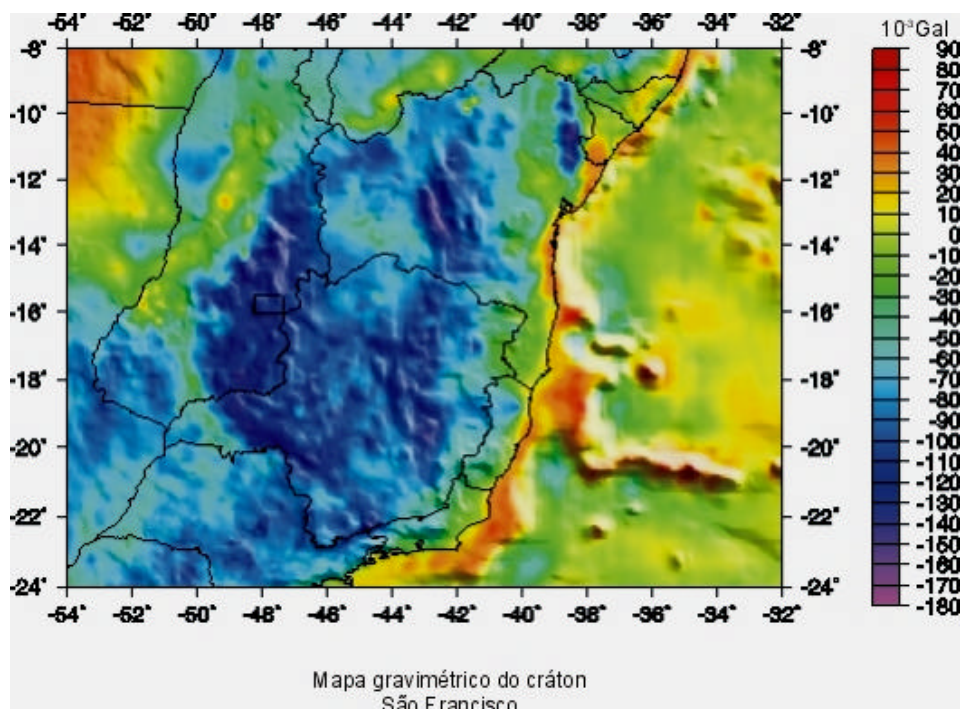
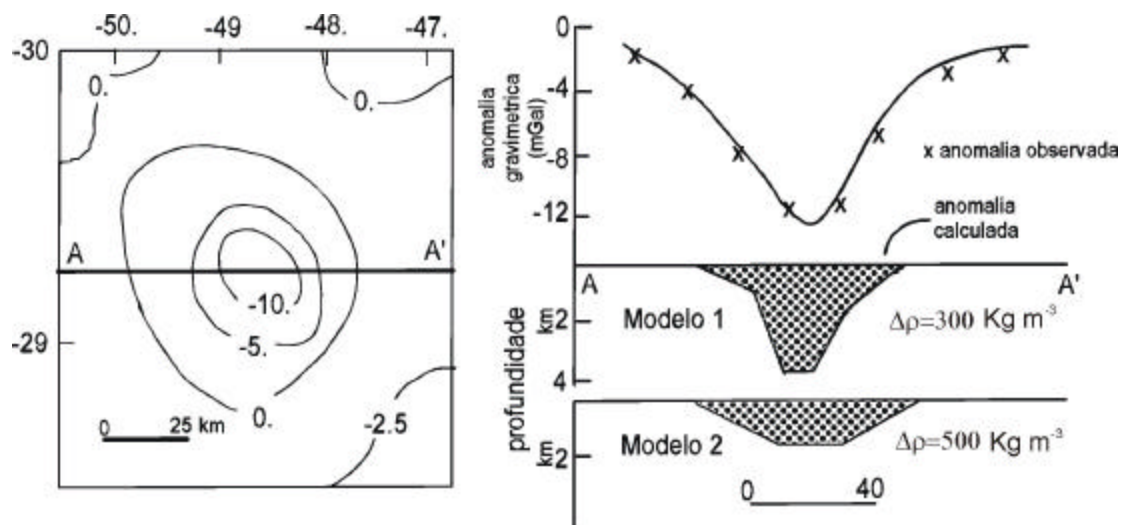
Como a anomalia é resultante da existência de um contraste de densidade entre dois corpos ou meios geológicos, um corpo geológico de densidade ρ_1 , inserido em outro de densidade ρ_2 , tem o contraste de densidade $\Delta\rho$ dado por

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$$



O sinal do contraste de densidade determina o sinal da anomalia gravimétrica, ou seja, se positivo ($\tilde{\rho}_1 > \tilde{\rho}_2$), a anomalia é positiva e se negativo ($\tilde{\rho}_1 < \tilde{\rho}_2$), a anomalia será negativa.

O campo gravitacional terrestre varia no espaço e no tempo. Desta forma, para isolar a anomalia da gravidade devida a corpos geológicos em subsuperfície é necessário remover da medida da aceleração obtida pelo gravímetro em um ponto sobre a superfície da Terra, as componentes da aceleração devido à latitude, às marés terrestres e lunares, à deriva do gravímetro e à topografia.

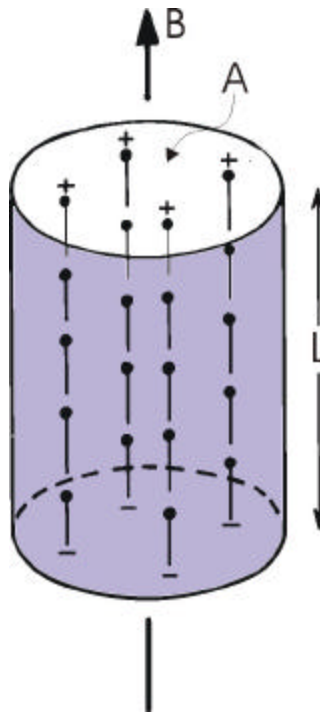


A interpretação quantitativa da anomalia gravimétrica consiste em, partindo-se da curva de anomalia, determinar a fonte da anomalia ou seja, as características físicas do corpo ou estrutura geológica causadora da anomalia. As características físicas são a sua profundidade, extensão lateral e contraste de densidade. A esta tarefa denominamos de modelagem da anomalia gravimétrica. Esta modelagem é feita partindo-se do conhecimento da geologia local, em seguida constroem-se modelos teóricos fixando-se os

parâmetros físicos como profundidade, extensão e contraste de densidade, calcula-se a anomalia teórica e compara-se com a anomalia observada até que ocorra um ajuste entre as duas curvas. Este modelamento é usualmente feito com computadores e constitui-se hoje em uma especialidade da Geofísica denominada **Inversão Geofísica**.

MÉTODO MAGNÉTICO

Quando se coloca um material na presença de um campo magnético, este corpo adquire uma magnetização na direção do campo que se anula quando ele é afastado da influência do campo. A esta magnetização dá-se o nome de **magnetização induzida**. Este fenômeno pode ser entendido quando se imagina que o material é constituído por pequenos dipolos (no caso das rochas os dipólos são os minerais com características magnéticas) que se orientam na direção das linhas de força do campo aplicado ou indutor. Diz-se, então que ocorreu uma **polarização magnética**. Como resultado do alinhamento, o material passa a se comportar êle próprio como um dipolo.



A maioria dos minerais que compõem as rochas não apresenta propriedade magnética, entretanto, algumas rochas contêm minerais magnéticos suficientes para produzir anomalias magnéticas. Da mesma forma, alguns objetos produzidos pelo homem

podem gerar anomalias magnéticas como os materiais arqueológicos que contêm ferro (ferramentas e cerâmicas). É na medida dessas *anomalias* do campo magnético da Terra que se baseia o método magnético e que tem como objetivo fornecer informações da geologia de superfície e subsuperfície, com ampla variedade de aplicações, desde levantamentos de pequena escala, como em engenharia e arqueologia, a estudos geológicos regionais com finalidade de prospecção de recursos naturais.

Nas proximidades de um ímã magnético, as linhas de campo magnético surgem como fluxo de linhas de um extremo a outro do ímã. A força F entre dois pólos magnéticos de intensidades m_1 e m_2 , separados por uma distância r é dada por

$$F = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi\mu_R r^2}$$

onde μ_0 e μ_R são constantes que representam a permeabilidade magnética no vácuo e a permeabilidade magnética relativa do meio que separa os pólos. A força é atrativa se os pólos são de sinais diferentes e repulsiva se eles têm o mesmo sinal.

O **campo magnético** B devido a um pólo de intensidade m a uma distância r do pólo, é definido como a força exercida por um pólo positivo unitário naquele ponto

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_R r^2}$$

A unidade de medida do campo B é expresso em Gauss (G) no sistema cgs ou 10^{-4} Tesla (T) no Sistema Internacional (S.I.). A última unidade é muito grande para quantificar as amplitudes das anomalias magnéticas produzidas pelas rochas, portanto, usualmente utiliza-se a sub-unidade o *nanotesla* (nT) onde $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$. No sistema cgs, utiliza-se o gama (γ), que equivale a 10^{-5} G .

A intensidade da magnetização induzida J_i de um material é definido como momento de dipolo por unidade de volume do material:

$$J_i = \frac{M}{LA}$$

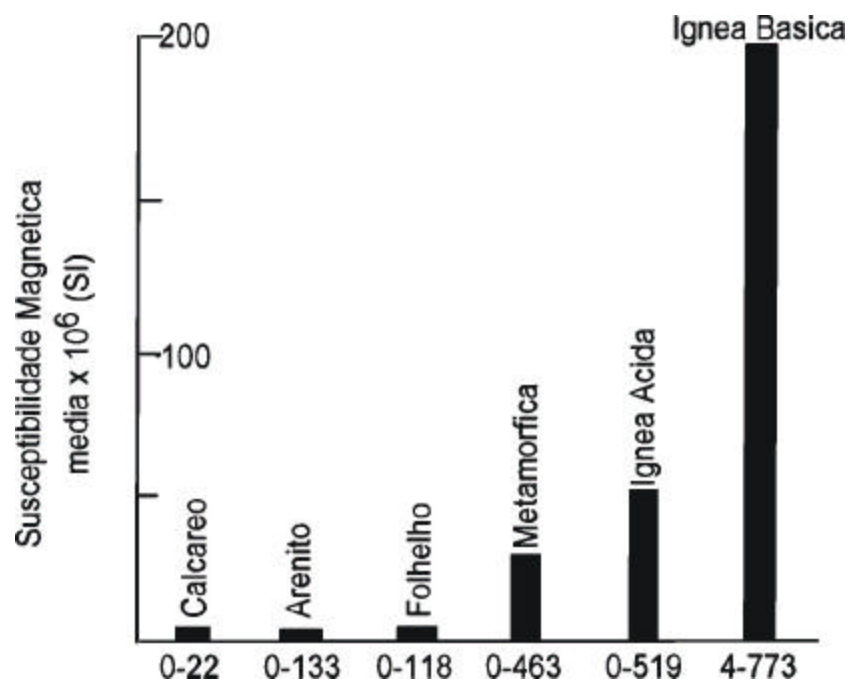
onde M é o momento magnético de uma amostra de comprimento L e seção plana com área A . Portanto a unidade de J é expressa em Am^{-1} . No sistema cgs a intensidade de magnetização é expressa em cm^{-3} (e.m.u. = unidade eletromagnética em inglês), onde $1 \text{ e.m.u. cm}^{-3} = 1000 \text{ Am}^{-1}$.

A intensidade da magnetização induzida é proporcional à intensidade da força B do campo indutor:

$$J_i = \chi B$$

onde χ é susceptibilidade magnética do material. J_i e B são medidos em Am^{-1} , a susceptibilidade não tem dimensão no sistema S.I. No sistema cgs a susceptibilidade é igualmente sem dimensão, mas devido à racionalização do sistema S.I. os valores de susceptibilidade neste sistema têm valores que são um fator 4π maior que os valores no sistema cgs.

A maioria dos minerais que compõem a rocha tem uma susceptibilidade magnética baixa. O tamanho, a forma e a dispersão dos grãos magnéticos dentro da rocha afetam sua característica magnética, mesmo assim, pode-se classificar o comportamento magnético da rocha de acordo com seu conteúdo total de magnetita. A figura abaixo mostra os valores da susceptibilidades magnéticas dos tipos mais comuns de rochas.



As rochas básicas são usualmente as mais magnéticas devido a um conteúdo maior de magnetita. A proporção de magnetita em rocha ígnea tende a decrescer com o aumento da acidez das rochas ígneas, fazendo com que em geral, as rochas ígneas ácidas sejam menos magnéticas do que as rochas básicas. Rochas metamórficas apresentam propriedades magnéticas muito diferentes, mas em média estas tendem a ser menores do que as das rochas ígneas. As rochas sedimentares são praticamente não magnéticas, no sentido de que não produzem anomalias, porque em geral seu conteúdo de magnetita é pequeno.

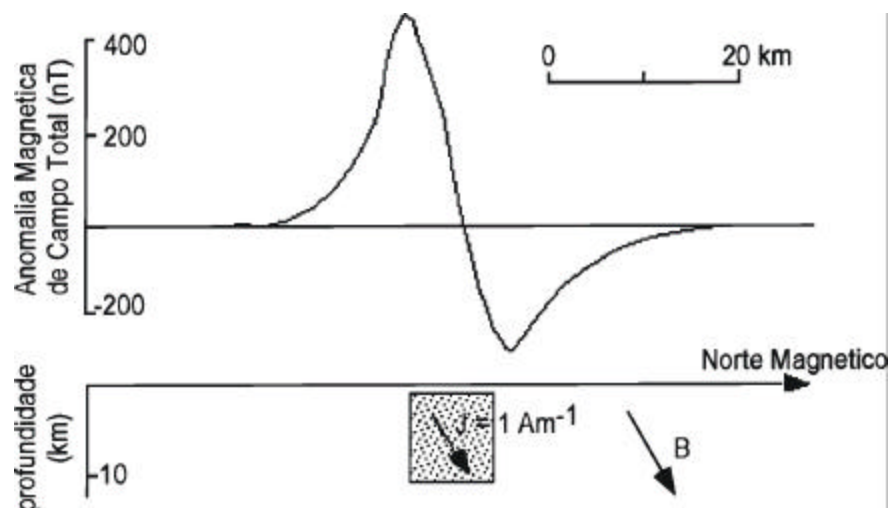
O outro tipo de magnetização que a rocha apresenta, é aquela adquirida durante a sua formação, e é chamada de magnetização **remanente**, porque é aquela que permanece na rocha mesmo na ausência do campo magnético indutor. Durante a formação da rocha, ao se resfriar abaixo da temperatura de Curie de seus minerais magnéticos, a rocha adquire uma magnetização permanente denominada termo-remanente. Esta magnetização é mais comum em rochas ígneas. A magnetização registrada na rocha reflete a direção e intensidade do campo geomagnético existente na Terra no momento da formação da rocha, e é a base do método Paleomagnético que será descrito mais adiante.

As causas mais comuns de anomalias magnéticas incluem diques, silos falhados, deformados e truncados, fluxo de lavas, intrusões básicas, rochas do embasamento metamórfico e corpos mineralizados de magnetita. As anomalias magnéticas variam em amplitude de algumas dezenas de nT sobre embasamento metamórfico a algumas centenas de nT sobre intrusões básicas, e podem alcançar alguns milhares de nT sobre mineralizações de magnetita.

As medidas do campo magnético são feitas através de magnetômetros e podem ser efetuadas em terra, por aviões, satélite e em navios e por dependerem menos do conhecimento preciso de altitude, eles são mais fáceis e baratos de serem conduzidos do que os levantamentos gravimétricos. Para se isolar a componente do campo geomagnético devido a corpos magnetizados em subsuperfície, é necessário que sejam eliminados das medidas os efeitos das variações temporais do campo (variações seculares e diurnas).

O objetivo final do método magnético é de fornecer informações quantitativas sobre a fonte causadora da anomalia, ou seja, um modelo geológico. Ao contrário do método gravimétrico onde uma anomalia isolada tem apenas um sinal, ou

seja, é positiva ou negativa, a anomalia magnética tem duplo sinal por ser de natureza dipolar. A figura abaixo mostra a anomalia magnética associada a um único corpo magnético, para o caso de magnetização induzida por um campo geomagnético com inclinação de 45° .



PALEOMAGNETISMO E MAGNETOESTRATIGRAFIA

Como visto anteriormente, as propriedades magnéticas das rochas (através de seus minerais magnéticos), permite que as rochas gravem informações sobre o campo geomagnético da época em que a rocha se formou. Essa **magnetização permanente** (ou **remanente**) adquirida pelas rochas pode ser investigada com o auxílio de equipamentos muito sensíveis, os **magnetômetros**, e assim, a própria história do magnetismo terrestre pode ser desvendada. Este método de estudo é chamado de **Paleomagnetismo**.

O Paleomagnetismo é uma das principais ferramentas para o estudo dos movimentos das placas litosféricas que formam a superfície da Terra. Com este método é possível quantificar os deslocamentos das placas ocorridos através do tempo geológico. Isto quer dizer, podemos reconstruir toda a trajetória da placa da América do Sul, por exemplo, saber quando ela se uniu à placa da África, e quando se separou. Podemos também verificar como a placa Sul-Americana se formou a partir da junção

(amalgamento) de pequenas placas pré-existentes há cerca de 500 milhões de anos atrás.

O estudo desses movimentos é possível porque existe uma relação entre inclinação (I) das linhas de força ou linhas de campo geradas por um dipolo magnético (modelo do campo magnético da Terra) e a latitude geográfica (ϕ):

$$\tan I = 2 \tan \phi$$

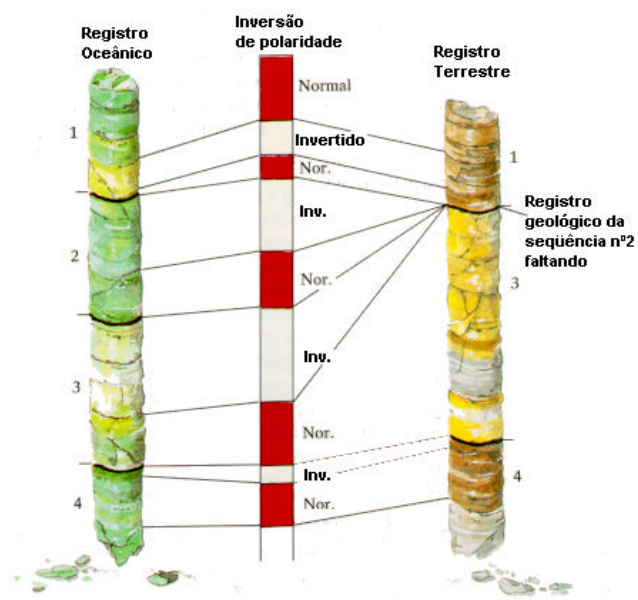


Relação entre a declinação e a inclinação magnética e a posição do pólo magnético.

Com este dado é possível calcular a latitude (neste caso a paleolatitude) em que se encontra uma determinada placa litosférica. Por exemplo, estudos realizados em rochas sedimentares com idade de aproximadamente 250 milhões de anos e localizadas na parte leste do Estado de Alagoas, revelaram que a inclinação média do campo magnético que atuou durante a sedimentação dessas rochas, era de aproximadamente 23°. Calculando-se a paleolatitude pela equação acima, chega-se à conclusão que essas rochas foram magnetizadas quando estavam a latitudes bem maiores do que a atual (10°S). De fato, as observações geológicas indicam que esses sedimentos formaram-se em ambientes de clima frio e, portanto, não poderiam estar tão próximas do equador geográfico.

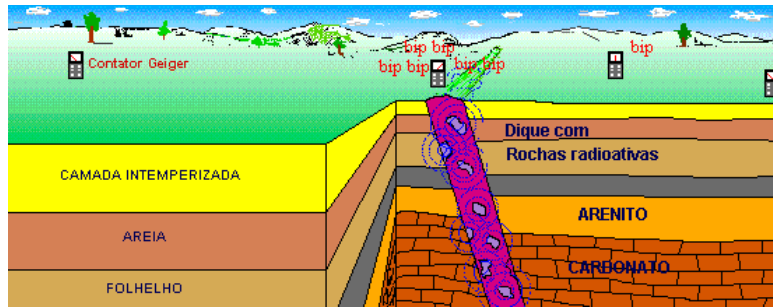
A **Magnetoestratigrafia** ou **Estratigrafia Magnética** é uma parte do Paleomagnetismo que fornece dados adicionais para o estabelecimento da estratigrafia de seqüências de rochas sedimentares. Baseia-se, principalmente, na seqüência de inversões

de polaridade registradas enquanto os sedimentos se depositavam. Estas informações ajudam a determinar a idade dos sedimentos, as velocidades de deposição e permitem comparar duas seqüências sedimentares localizadas a distância. Os testemunhos recuperados de poços de sondagem, nem sempre mostram exatamente as mesmas características sedimentares, mesmo pertencendo à mesma formação geológica e tendo se depositado simultaneamente. A comparação magnética neste caso define a relação entre eles, usando as variações das propriedades magnéticas: inversões de polaridade e de outras características do campo geomagnético.



MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

O método radiométrico ou **radiometria**, consiste em detectar as emissões nucleares das rochas que contêm minerais radioativos. Normalmente detecta-se a radiação gama através de um **cintilômetro** ou **contador Geiger**. Os instrumentos radiométricos foram desenvolvidos primordialmente para a detecção de urânio, mas logo apareceram outras aplicações importantes.



Atualmente o método é muito usado para mapeamento geológico, identificando as litologias pelo conteúdo radioativo. Outra aplicação comum, consiste em injetar uma solução radioativa artificial (**traçador**) no subsolo ou em um aquífero, para acompanhar a trajetória dessa solução. O objetivo nesse caso pode ser, por exemplo, verificar a possibilidade de infiltrações que possam vir a contaminar o aquífero.

Em laboratório, entretanto, existe um maior número de aplicações. O emprego de métodos e técnicas que envolvem a radioatividade caracteriza a área da Geofísica chamada de **Geofísica Nuclear**.

Uma das aplicações mais importantes é a possibilidade de se determinar a idade das rochas através do estudo das razões entre certos elementos radioativos e seus produtos. Os métodos mais comuns são K-Ar (Potássio-Argônio), Rb-Sr (Rubídio-Estrôncio), U-Pb (Urânio-Chumbo), Ar-Ar entre outros. Os diversos métodos são aplicáveis dependendo do tipo de rocha e da idade esperada através de observações geológicas.

Em laboratório pode-se também determinar com precisão a quantidade com que os elementos radioativos ou seus isótopos comparecem numa rocha. Este estudo poderá revelar vários aspectos da história geológica dessa rocha, ou estabelecer comparações entre vários tipos semelhantes de um mesmo tipo de rocha. Por exemplo, se elas podem ter se formado a partir da mesma fonte de magma, no caso de rochas ígneas, ou se derivam da mesma rocha-fonte, através da erosão, no caso de rochas sedimentares.

MÉTODO TERMOMÉTRICO

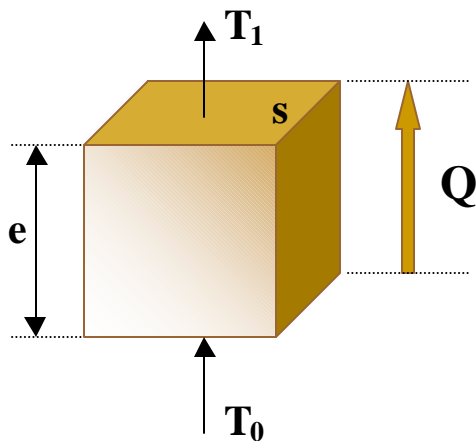
Medidas de temperatura na superfície da Terra revelam a existência de zonas em seu interior onde a temperatura é maior, ou seja, onde existem **anomalias térmicas**. Estas anomalias podem ser devidas à existência de falhas por onde circulam águas

quentes, à concentração de elementos radioativos produzindo calor, ou ainda à existência de zonas anormalmente quentes em regiões mais profundas.

A temperatura determinada na superfície depende da **condutividade térmica** das rochas (ver seção V) e do **calor específico** das mesmas. O calor específico é definido como a quantidade de calor que se tem que fornecer a uma substância para que sua temperatura aumente de 1 °C. A maioria dos materiais geológicos quando secos têm calor específico entre 0,2 e 0,3 e a água tem calor específico igual a 1. Por esta razão, os aquíferos porosos e rasos se aquecem e esfriam mais lentamente em função das estações climáticas do que as formações geológicas impermeáveis (não-porosas). A condutividade térmica das rochas muito porosas aumenta consideravelmente quando estão saturadas de água, porque a condutividade térmica da água é 0,0014 cal/cm.s. °C e a do ar seco é 0,00006.

De acordo com a lei de Fourier, a **quantidade de calor** (Q), ou **fluxo de calor**, que atravessa uma superfície **s** durante um tempo **t** é igual a:

$$Q = \dot{\epsilon}ts(T_0-T_1)/e$$



onde,

$\dot{\epsilon}$ = condutividade térmica da camada considerada;

t = intervalo de tempo;

s = área da superfície;

T₀ = temperatura da superfície inferior;

T₁ = temperatura da superfície superior;

e = espessura da camada;

$(T_0-T_1)/e$ = gradiente térmico

VII. LEITURAS E CONSULTAS INDICADAS

- ❑ **Decifrando a Terra**
W. Teixeira, M.C.M. de Toledo, T.R. Fairchild, F. Taioli (organizadores)
Oficina de Textos/USP, São paulo, 2000, 568 pp.
- ❑ **A Terra - um planeta em debate: Introdução à Geofísica pela análise da deriva continental**
H. Takeuch, S. Uyeda, H. Kanamori
EDART – Editora da Universidade de São Paulo, 1970, 186 pp.
- ❑ **Introdução à Geofísica** – Curso de Extensão Universitária
M. Ernesto (coordenadora)
IAG/USP, 1983, 212pp.
- ❑ **Radioatividade** – Apostila Educativa da Comissão Nacional de Energia Nuclear, 19pp.
<http://www.cnen.gov.br>
(também disponível na Biblioteca do IAG/USP)
- ❑ **Geovisão** – Programa educacional sobre Geofísica
www.iag.usp.br/didático/matdidat.html
- ❑ **USGS – The Dynamic Earth: the Story of Plate Tectonics**
<http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>

GLOSSÁRIO

CAMPO – Região do espaço onde se faz sentir um efeito físico.

COSMOLOGIA – Estudo da evolução e das propriedades físicas do Universo.

GRADIENTE – Variação de uma característica física do meio (por exemplo, pressão, temperatura, etc.) de um ponto para outro desse meio.

Referência: Leinz, V. & Leonardos, O. H., 1970. *Glossário Geológico*. São Paulo, Ed. Nacional e Ed. Da USP.

Abalo sísmico: vide *Terremoto*

Abissal (rocha) – *abyssal rock*: vide *Plutônica (rocha)*

Ácida (rocha) – *acid rock*: rocha ígnea rica em sílica. Ácidas ($\text{SiO}_2 > 65\%$), neutras (SiO_2 entre 65% e 52%), básicas (SiO_2 entre 52% e 45%) e ultrabásicas ($\text{SiO}_2 < 45\%$).

Aeronomia

Afloramento – *outcrop*: exposição diretamente observável de uma rocha. Podem ser naturais (escarpas, cachoeiras, etc.) ou artificiais (túneis, cortes de estradas, etc.).

Água meteórica – *meteoric water*: água derivada da atmosfera.

Água subterrânea – *ground water*: toda água infiltrada no solo e que o embebe até um nível variável, designado nível hidrostático, o qual acompanha aproximadamente a topografia.

Água subterrânea fóssil – *fossil ground water*: água subterrânea proveniente de tempos geológicos passados, podendo ocorrer em regiões de pouca pluviosidade e alto grau de evaporação; atualmente não há mais acumulação.

Água termal – *thermal water*: vide fonte termal.

Alcalina (rocha) – *alkalic rock*: rocha magmática caracterizada pela alta porcentagem de álcalis em relação à sílica e à alumina.

Alóctone – *allochthonous*: depósito constituído de material proveniente de outros lugares.

Alteração – *alteration*: modificação de uma rocha pela ação do intemperismo ou meteorização. Dá-se essencialmente na superfície da terra (processos esógenos).

Amostra – *sample*: retirada de pequenas partes (amostras), para representar as propriedades de um conjunto.

Aqüífero – *water source*: termo usado para uma rocha e, eventualmente, uma estrutura contendo suficiente capacidade de armazenamento e de liberação de água subterrânea para ser retirada em poços.

Arenito – *sandstone*: rocha sedimentar proveniente da consolidação de areia por um cimento qualquer. Os grãos que o constituem são, em geral, de quartzo.

Argila – *clay*: material sedimentário de grãos muito finos.

Arqueano (Período)– *archean*: vide Quadro Cronológico no Apêndice

Assoalho oceânico

Astenosfera

Atmosfera

Bacia sedimentar – *sedimentary basin*: área de sedimentos mais ou menos extensa, em que os estratos mergulham em geral da periferia para o centro, freqüentemente em forma de “bacia”, e preenchida por sedimentos “concordantes” ou “quase-concordantes”. Exemplo: Bacia do Paraná.

Bacia tectônica – *tectonic basin*: flexura regional côncava na qual as camadas mergulham da periferia para o centro, em todas as direções, exibindo estrutura periclinal (mergulho radial).

Basalto – *basalt*: rocha vulcânica, geralmente porfirítica ou vítrea, constituída essencialmente de plagioclásio básico e augita com ou sem olivina.

Básica (rocha) – *basic rock*: rocha pobre em sílica.

Batólito – *batholith*: designação aplicada a grandes corpos de rochas plutônicas contínuas em profundidades, não possuindo, assim, um embasamento. Em geral, o termo é conferido às massas eruptivas subjacentes, cujos afloramentos se estendem por mais de 100 quilômetros.

Bouguer (correção) – *bouguer correction*: correção necessária aos trabalhos de gravimetria tendo em vista a altitude e a litologia da estação de observação. Nome dado em homenagem a Pierre Bouguer, geofísico e geógrafo francês do século XVIII.

Calcário – *limestone*: rocha sedimentar de origem química, orgânica ou clástica, constituída predominantemente de carbonato de cálcio, em especial de calcita.

Caldeira – *caldeira*: cratera, em geral de grandes dimensões, formada pelo colapso ou pela subsidência da parte central de um edifício vulcânico.

Camada – *bed, layer, stratum*: termo que designa um membro unitário de uma rocha sedimentar estratificada. Cada camada ou estrato origina-se de uma modificação por vezes muito acentuada na qualidade do material depositado ou nas condições de sedimentação. A camada, ou *stratum*, corresponde à menor unidade reconhecida na classificação estratigráfica.

Câmara magmática – *magam chamber*: acumulação fechada e restrita de magam, formada na litosfera. Constitui a origem de todo o vulcanismo externo e pode permanecer ativa durante milhões de anos.

Cambriano (Período) – *cambrian*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Campo magnético - *magnetic field*:

Carbonífero (Período) – *carboniferous*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Carbono 14 (Método) – *carbon 14, radio carbon dating*: determina o tempo absoluto em função da meia-vida relativamente curta do Carbono 14. Este se forma a partir do nitrogênio do ar pela reação nuclear provocada pelos raios cósmicos, na estratosfera. Com esse método pode-se determinar a idade de objetos orgânicos até cerca de 50.000 anos.

Carvão – *coal*: substância natural compacta combustível, de cor entre castanha e negra, formada pela decomposição parcial de matéria vegetal, livre do contato do ar e, em muitos casos, sob a influência de aumento de pressão e de temperatura.

Cenozóica (Era) – *cenozoic*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Chaminé vulcânica – *chimney, vulcanic pipe*: ducto mais ou menos cilíndrico que liga a câmara magmática à superfície do solo. A extremidade superior, alargada, da chaminé constitui a cratera.

Ciclo hidrológico – *hydrologic cycle*

Cisalhamento – *shear*: fraturação, ou tendência à fraturação, de uma rocha sob a ação de esforços cisalhantes (*shearing stress*), isto é, de dois esforços paralelos, mas não em linha um com o outro.

Condutividade térmica

Cosmogonia

Cretáceo (Período) – *cretaceous*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Crosta continental – *continental crust*

Crosta oceânica – *oceanic crust*

Decaimento radioativo

Declinação magnética – *declination (magnetic)*: ângulo horizontal que forma a agulha magnética com o meridiano geográfico ou verdadeiro. A declinação varia com o tempo e o lugar.

Derrame – *lava flow*: (1) extravasamento de lava, isto é, de material fluido magmático. (2) lava solidificada.

Descontinuidade de Conrad – *discontinuitie (Conrad)*: descontinuidade sísmológica, onde a velocidade das ondas sísmicas passa de cerca de 6 km/s para 7,5 km/s.

Descontinuidade de Mohorovicic – *discontinuitie (Mohorovicic)*: transição entre a crosta e o manto da Terra, caracterizada pela variação brusca da densidade e, conseqüentemente, da velocidade de propagação das ondas sísmicas de 6,5 km/s para 8,2 km/s.

Devoniano (Período) – *devonian*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Dique – *dike*: massa rochosa de forma tabular discordante, preenchendo uma fenda aberta em outra rocha. Quando o dique é concordante com as camadas, é chamado de *sill*.

Elemento radioativo

Energia

Eon – *eon*: maior divisão do tempo geológico.

Epicentro – *epicenter*: ponto da superfície terrestre atingido pelas ondas sísmicas, primeiro e com maior intensidade. O epicentro liga-se por uma vertical ao *hipocentro*.

Era – *era*: divisão primária do Tempo Geológico, compreendendo vários períodos.

Extrusiva, eruptiva, vulcânica (rocha) – *effusive rock, eruptive rock, volcanic rock*: rocha eruptiva, originada da consolidação de material magmático extravasado à superfície terrestre. As rochas vulcânicas são caracterizadas por textura porfírica e podem conter vidro em quantidade variável.

Falha – *fault*: fratura ao longo da qual se deu um deslocamento relativo dos blocos contíguos. O plano sobre o qual se deu esse deslocamento recebe o nome de *plano de falha*.

Fluxo térmico

Fonte termal – *thermal spring*: fonte cujas águas apresentam temperatura distintamente superior à temperatura média anual local. Os *gêiseres* são fontes termais intermitentes.

Geofísica – *geophysics* – *Geophysik* (alemão) – *géophysique* (francês).

Geofone

Granito – *granite*: rochas leucocráticas, constituídas essencialmente de quartzo, feldspatos e micas.

Gravidade (anomalia de) – *gravity anomaly*: diferença entre a gravidade calculada e a medida para um determinado lugar. Tal anomalia reflete as variações na densidade das rochas do substrato.

Gravimetria – *gravimetry*: estudo da gravidade.

Gravímetro – *gravimeter*: equipamento utilizado para se medir a aceleração da gravidade.

Heterosfera

Hidrocarbonetos

Hidrofone

Hidrosfera

Hipocentro – *hypocenter*: ponto ou região do interior da crosta terrestre de onde parte o terremoto.

Homosfera

Horizonte – *soil horizon*: as várias camadas que caracterizam o perfil do solo, designadas como A, B, C, etc., partindo da superfície.

Ígnea, magmática (rocha) – *igneous rock*: rocha proveniente da consolidação do magma.

Intrusão – *intrusion*: (1) introdução de material magmático no interior da crosta. (2) massa eruptiva intromissa em outras rochas, como batólitos, diques, sills, etc.

Intrusiva (rocha) – *intrusive rock*: rochas magmáticas ou ígneas, que se solidificam no interior da crosta.

Inversão de polaridade

Ionização

Ionosfera

Isócrona – *isochrone*: (1) linha que liga os pontos da chegada sincrônica das ondas sísmicas. (2) linha imaginária que num mapa geológico delimita as áreas petrográficas com a mesma idade absoluta.

Isogama – *isogam*: linha que liga os pontos onde os valores de gravidade terrestre são iguais. Alguns autores definem com a linha que liga as mesmas anomalias gravimétricas.

Isogeoterma – *isogeotherm*: linha que liga lugares de mesma temperatura.
Isógona – *isogonic line*: linha que liga os pontos de mesma declinação magnética.
Isotópico – *isotopic*: relativo a depósitos síncronos da mesma província geológica.

Isotrópico

Jurássico (Período) – *jurassic*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.
Lava – *lava*: magma afluente à superfície terrestre sob forma líquida. Sua solidificação origina rochas efusivas ou vulcânicas, de estrutura porosa, vítrea e textura porfírica.
Lençol freático – *free ground water*: é a faixa próxima à superfície embebida de água subterrânea e que pode ser aproveitada por meio de poços ditos freáticos.
Litosfera – *lithosphere*: camada da Terra que envolve a crosta e parte do manto superior.
Magma – *magma*: material em estado de fusão que, por consolidação, dá origem a rochas ígneas.
Magmática (rocha): vide *Ígnea*.
Magnetismo terrestre – *earth magnetism*: campo magnético da Terra, funcionando como um grande e homogêneo ímã.

Magnetômetro

Manto (terrestre) – *mantle*:

Meia-vida

Mesozóica (Era) – *mesozoic era*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.
Metamórfica (rocha) – *metamorphic rock*: um dos três grandes grupos de rochas, origina-se de rochas magmáticas ou sedimentares por processos especiais de transformação.
Metamorfismo – *metamorphism*: transformação sofrida por uma rocha sob a ação de temperatura, pressão, gases e vapor d'água, marcada por uma recristalização total ou parcial, novas texturas ou novas estruturas, ou pelo seu conjunto.
Meteorito – *meteorite*: nome genérico dado às massas que caem esporadicamente sobre a terra.
Migração dos pólos – *polar drift*: variação da posição dos pólos terrestres no tempo geológico.
Mineral – *mineral*: elemento ou composto químico, via de regra, resultante de processos inorgânicos, de composição química geralmente definida e encontrado naturalmente na crosta terrestre. Os minerais, em geral, são sólidos; só a água e o mercúrio se apresentam no estado líquido, à temperatura ambiente.
Minério – *ore*: mineral ou associação de minerais que podem, sob condições favoráveis, ser trabalhados comercialmente para a extração de um ou mais metais. Na falta de designação adequada, extensivo também aos não-metálicos.
Moho: vide *descontinuidade de Mohorovicic*.

Núcleo

Ondas elásticas

Ondas longitudinais

Ondas sísmicas

Ondas superficiais

Ondas transversais

Ordoviciano (Período) – *ordovician*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Paleomagnetismo – *paleomagnetism*: é o resultado do magnetismo remanescente de um corpo que continua mesmo depois de ter cessado ou mudado o campo magnético. O magnetismo de certos minerais e rochas é adquirido por indução do campo magnético durante a cristalização. Pela mudança da posição do campo magnético terrestre nos tempos geológicos, a direção do magnetismo remanescente de uma rocha poderá indicar a orientação do campo magnético na época da sua cristalização. Assim foram levantados mapas da posição dos pólos magnéticos durante o tempo geológico diferente das posições atuais.

Paleozóica (Era) – *paleozoic era*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Permiano (Período) – *permian*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Petróleo – *petroleum, oil*: mistura inflamável de hidrocarbeto oleosos que exuda da terra ou é bombeada para fora.

Placas litosféricas – *litospheric plates*

Plano de falha – *fault plane*: vide *falha*.

Plutônica (rocha) – *plutonic rock*: rocha magmática consolidada em regiões profundas da crosta.

Poço artesiano – *artesian well*: poço natural ou artificial no qual a água emerge naturalmente até a superfície do solo, dispensando bombeamento. Um poço no qual o nível piezométrico permanece próximo à superfície é dito, por extensão, semi-artesiano.

Pólo geográfico

Pólo magnético

Porosidade – *porosity*: relação (expressa em porcentagem) entre o volume dos interstícios de uma rocha ou solo e o volume total deste.

Prospecção – *prospecting*: trabalhos geológicos e mineiros para o conhecimento do valor econômico de uma jazida mineral.

Quaternário (Período) – *quaternary*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Radiatividade – *radioactivity*: desintegração natural de certos elementos com emissão de radiações e formação de elementos novos, de pesos atômicos menores. O processo é independente da formação dos minerais e das variações de pressão ou temperatura.

Radioelemento

Raio ultravioleta

Raio-X

Reservatório (rocha) – *reservoir*: rocha que, apresentando grande quantidade de poros, fendas, vesículas, etc., permite a acumulação de grandes quantidades de petróleo, gás e água.

Reversão geomagnética

Sedimentar (rocha) – *sedimentary rock*: rocha proveniente da deposição de sedimentos em camadas.

Sedimento – *sediment*: material originado da destruição de qualquer tipo de rocha, transportado e depositado em um dos muitos ambientes da superfície terrestre, ou material de origem biológica.

Siluriano (Período) – *silurian*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Sismicidade – *seismicity*: frequência e intensidade de terremoto de uma região.

Sismo: vide *terremoto*.

Sismógrafo – *seismograph*: aparelho registrador de movimentos vibratórios de terremotos.

Sismograma – *seismogram*: registro de um tremor de terra, feito por um sismógrafo ou sismômetro.

Sismologia – *seismology*: ciência que estuda os *terremotos*.

Sismômetro – *seismometer*: sismógrafo aperfeiçoado que registra os movimentos sísmicos, na seqüência cronológica e intensiva, em forma de *sismograma*.

Solo – *soil*: parte superficial do manto de intemperismo, inconsolidada, contendo material rochoso desintegrado e decomposto que, sob ação de agentes inorgânicos e orgânicos e misturada com quantidade variável de matéria orgânica, que pode fornecer condições necessárias ao crescimento das plantas.

Sondagem – *boring*: perfuração de poço tubular para pesquisa geológica, para prospecção de jazidas minerais, para extração de água, salmoura, petróleo ou gás, para verificar a profundidade da rocha firme e as características do solo sobrejacente, para colocar as cargas explosivas na prospecção geofísica pelos métodos sísmicos, etc.

Tectônica de placas – *plate tectonics*: teoria que trata do movimento das placas litosféricas.

Terciário (Período) – *tertiary*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Terremoto – *earthquake*: vibração ou tremor da crosta terrestre.

Triássico (Período) – *triassic*: vide Quadro Cronológico no Apêndice.

Turfa – *peat*: combustível natural rico em restos vegetais, cujas estruturas são ainda bem reconhecíveis. Consistência fofa, cor parda, até preta. Representa o primeiro estágio na formação dos carvões, mas não é um carvão.

Vulcânica (rocha) – *vulcanic rock*: vide *extrusiva (rocha)*.

Vulcanismo – *volcanism*: conjunto de processos que levam à saída de material magmático em estado sólido, líquido ou gasoso à superfície terrestre.

Zona de transição

APÊNDICE I

PROPRIEDADES FÍSICAS DA TERRA

Massa	$5,99 \times 10^{27}$ g
Volume	$1,08 \times 10^{12}$ km ³
Densidade média	5,517 g/cm ³
Raio médio	6.371 km
Área	$5,096 \times 10^3$ km ²
Circunferência equatorial	40075,51 km
Achatamento	0,003341
Gravidade medida na superfície	980,7 cm/s ²
Velocidade de escape	11,2 km/s
Excentricidade	0,081813
Distância média do Sol	$1,496 \times 10^8$ km
Velocidade da Terra na sua órbita	29,8 km/s
Revolução em torno do Sol	365,26 dias
Rotação	23h 56min 4,09s
Ponto mais alto	9.521 m (Monte Everest)
Ponto mais baixo	-10.912 m (trincheiras Marianas)
Ponto mais baixo sobre continentes	-397 m (Mar Morto)
Razões de massa - Sol:Terra:Lua	333.400:1:0,01228

APÊNDICE II

ESCALA DO TEMPO GEOLÓGICO

ERA	PERÍODO	CARACTERÍSTICAS	IDADE milhões de anos
CENOZÓICO	Quaternário	Aparecimento do Homem	
	Terciário	Desenvolvimento dos mamíferos Colisão Europa-Ásia: formação dos Alpes Colisão Índia-Ásia: formação do Himalaia	50
MESOZÓICO	Cretáceo	Separção América do Norte-Europa Primeiras plantas com flores Separção Índia-Austrália-Antártida Separção África-América do Sul: quebra do Gondwana	100
	Jurássico	Formação dos Andes Idade dos Dinossauros Quebra do Pangea	150 200
PALEOZÓICO	Triássico	Primeiros mamíferos	
	Permiano	Colisão Ásia-Europa: formação dos Montes Urais	250
	Carbonífero	Grandes florestas e depósitos de carvão Répteis primitivos	300
	Devoniano	Anfíbios aventuram-se para a terra Idade dos peixes Primeiros Vertebrados	350
	Siluriano	Montanhas Caledonianas	400
	Ordoviciano	Vulcanismo terrestre e submarino Algas, geralmente calcárias e formando recifes	450 500
		Cambriano	Mares poucos profundos
PROTEROZÓICO	Pré-cambriano	Algas e organismos unicelulares Grandes colisões de continentes	570
	Arqueano	Rochas mais antigas que se conhece	2600 4600

Apêndice III

DEMANDA DE RECURSOS HUMANOS NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS

[\(Extraído de www.onip.org.br\)](http://www.onip.org.br)

Identificação, Caracterização e Quantificação dos Perfis Profissionais Demandados Pela Indústria de Petróleo e Gás, entre 2000 e 2005

SUMÁRIO EXECUTIVO

Revisão 1 - 21/02/2001

1. A pesquisa, financiada com recursos do Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor Petróleo e Gás Natural - CTPETRO, sob a coordenação da Organização Nacional da Indústria do Petróleo – ONIP, foi conduzida com o objetivo de caracterizar a demanda futura de recursos humanos para o setor petróleo e gás no Brasil.
2. A demanda de recursos humanos foi avaliada numa abordagem qualitativa e quantitativa, através de investigação exploratória a respeito dos perfis demandados, utilizando pesquisa de campo junto às organizações demandantes, incluindo entrevistas, aplicação de questionários e observações do pesquisador. A execução da pesquisa coube à empresa de consultoria T.Consulting.
3. Foram contactadas 187 empresas, das quais 32 responderam à pesquisa, sendo sete oil companies e 25 organizações fornecedoras de bens e serviços para o setor.
4. A demanda futura foi determinada considerando a média ponderada dos índices de crescimento das empresas, estabelecidos através do planejamento estratégico e dos cenários futuros definidos por elas.
5. A grande maioria das oil companies, em especial as empresas estrangeiras que iniciam as atividades no Brasil, ainda não possuem planejamento estratégico para recursos humanos. A política a ser adotada por tais empresas depende da futura taxa de sucesso da exploração dos novos campos de petróleo.
6. A pesquisa identificou 52 perfis profissionais específicos do setor até o ano de 2005.

7. Dos 52 perfis identificados, 44% são de nível superior, 48% são de nível médio e 8% são de nível fundamental.
8. Até 2005, prevê-se a criação, no mínimo, de cerca de 18.000 postos de trabalho diretos, específicos do setor de petróleo e gás, sendo 56% na região sudeste, 25% na região nordeste, 13% na região sul, 5% na região norte e 1% na região centro-oeste do país.
9. Para a maior parte dos perfis profissionais identificados não há oferta de cursos regulares no sistema de ensino nacional.
10. Grande parte das organizações pesquisadas, fornecedoras de bens e serviços do setor, utilizam treinamento especial em instituições de ensino no Brasil e no exterior, bem como praticam o treinamento internamente.
11. Os programas de estágio são praticados por um número relevante de organizações. A contratação dos profissionais após o período probatório chega a atingir 80% dos treinandos.

22 – GEOFÍSICO DE PETRÓLEO

PRINCIPAIS ATIVIDADES DO PROFISSIONAL:

- Desenvolver estudos referentes aos fenômenos físicos que se processam na crosta terrestre e na superfície, a fim de determinar o comportamento, movimento, espessura, estrutura dos estratos, possibilitando indiretamente a indicação de possíveis áreas com acumulação de óleo e/ou gás.

SÍSMICA

- Executar programas e levantamentos sísmicos, gravimétrico e de eletroresistividade, assim como a supervisão das atividades técnicas decorrentes, objetivando localizar estruturas favoráveis à acumulação de petróleo.

INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA

- Analisar os dados obtidos no campo, tais como: mapas estruturais em tempo e/ou profundidade, análise das seções processadas (aspectos de amplitude, autocorrelogramas, correlogramas cruzados, análise da velocidade etc.), pelo desenvolvimento e recomendação de programas de prospecção em bases regionais, integrando resultados variados dos métodos exploratórios, indicando estruturas geológicas qualificadas para testes de perfuração ou de áreas de interesse;

INSTRUMENTAÇÃO GEOFÍSICA

- Operar e manter os instrumentos de registro das equipes da região (amplificadores, gravadores, câmaras, cabos, geofones e hidrofones), bem como, a instrumentação analógica e digital.

MAGNETOMETRIA

- Realizar levantamentos magnéticos terrestres, marítimos ou aéreos;
- Interpretar os mapas magnéticos em termos geológicos e analisar as interpretações feitas sob contrato.
- Operar e manter os instrumentos e acessórios, compreendendo: unidades de entrada e saída, unidades de amplificadores e filtros geofísicos, unidade de composição magnética de traços, "plotter" fotográfico em registro; câmara oscilográfica, osciloscópio de canais múltiplos e de feixe duplo para monitoração das diversas fases de processamento, conversores, unidades de transcrição e registros fotográficos em registro magnético, fontes de alimentação, aparelhos para testes etc.

GRAVIMETRIA

- Realizar interpretações correntes dos levantamentos gravimétricos (estudos de mapas da área, sua subdivisão em subáreas de apoio topográfico e meios de acesso aos locais de análises, sob o ponto de vista gravimétrico), projetos exploratórios proposto para áreas, incluindo locações pioneiras e estratigráficas, programas geológicos e geofísicos;
- Executar cálculos de valores topográficos e gravimétricos visando transformá-los em dados para elaboração de "Mapa Bouguer" (cálculos de coordenadas, elevação, gravidade observada e redução à gravidade Bouguer).

ELETORRESISTIVIDADE

- Interpretar os resultados de campo obtidos, recomendando quanto à execução de levantamentos geoeletricos (operações de sondagem elétrica e de manutenção dos instrumentos).

CONHECIMENTOS/HABILIDADES:

- Ensino Superior completo em Geociências e Engenharia de Minas;
- Especialização em Geofísica (abordagens sobre Métodos Sísmicos, Geofísica de Poço, Métodos Elétricos e Eletromagnéticos);
- Idioma estrangeiro - Inglês fluente ou sólidos conhecimentos de inglês técnico;
- Informática (usuário).

EXPECTATIVA DE POSTOS DE TRABALHO

NÚMERO DE POSTOS DE TRABALHO													
REGIÃO	2000	2001		2002		2003		2004		2005		Total	
	Atuais	Novos	Totais	Novos	Totais	Novos	Totais	Novos	Totais	Novos	Totais	Novos	Totais
Norte	45	6	51	5	56	4	60	6	66	4	70	25	70
Nordeste	89	11	100	10	110	9	119	11	130	9	139	50	139
Sudeste	258	32	290	29	319	26	345	33	378	26	404	146	404
Sul	51	6	57	6	63	5	68	7	75	5	80	29	80
C.-Oeste	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	2	1	2
TOTAL	444	55	499	50	549	44	593	57	650	45	695	251	695