

Gravimetria

Densidade

Densidade

4.1 Overview

Hinze et al., 2013

The gravity method measures horizontal spatial changes in the gravitational field that result from mass differentials which in turn are controlled by the volume and contrasting densities of anomalous masses. As a result, an understanding of the density of Earth materials is essential in planning surveys as well as in interpreting gravity anomalies.

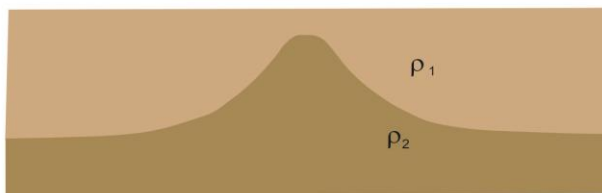
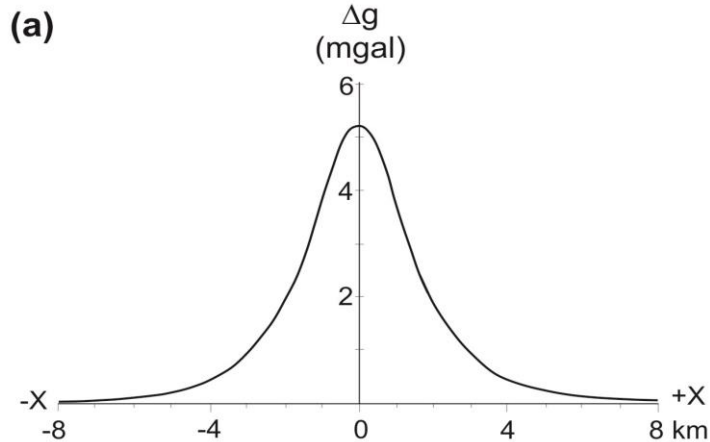
Density is a function of the mineral composition of Earth materials as well as their void volume and the material filling the voids. As a result, densities of rocks can be estimated by considering their origin and the processes that subsequently have acted upon them. However, it is advisable to measure densities either directly or indirectly wherever possible, preferably *in situ*, because of the difficulties in obtaining samples that are representative of the actual geological setting. *In situ* measurements may be obtained from the relationship of gravity anomalies to topography or determined indirectly from correlative measurements such as seismic wave velocity or attenuation of gamma rays.

O método gravimétrico mede variações espaciais horizontais no campo gravimétrico que resultam de diferenças de massa que por sua vez são controladas pelo volume e contrastes de densidade das massas anômalas. Como resultado, entender a densidade dos materiais da Terra é essencial no planejamento de campanhas assim como na interpretação de anomalias gravimétricas.

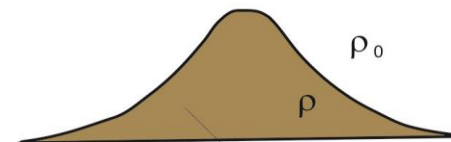
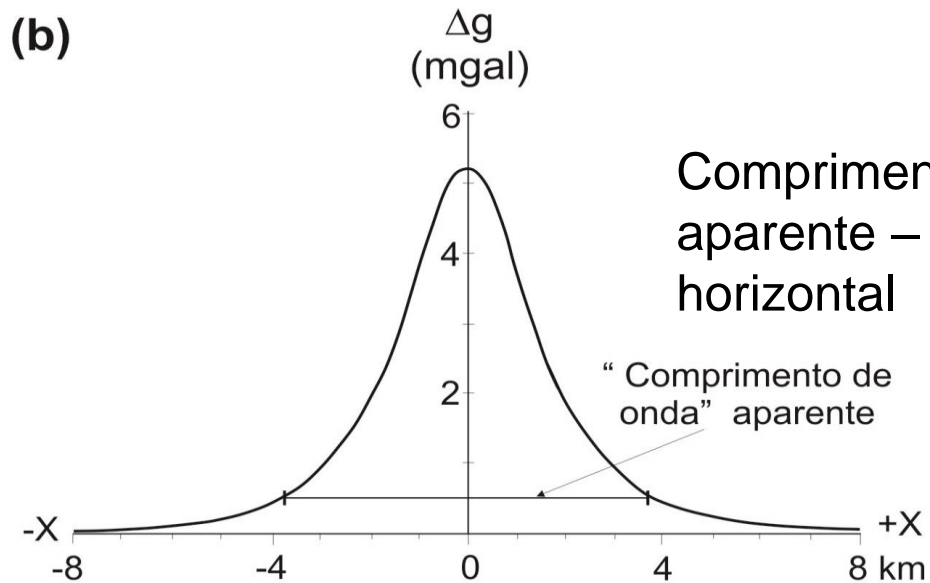
Distribuição anômala de massa (falta ou excesso)

Contraste de densidade

$$\Delta\rho = \rho_{\text{corpo}} - \rho_{\text{entorno}}$$



(b)



“Corpo anômalo”

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0$$

$$\Delta\rho > 0$$

Densidade

Densidade é um escalar

TABLE 4.1 Types of densities used in gravity methods.

Type	Symbol	Definition
True density	σ_t	Mass of unit volume of solid material without voids
Grain density	σ_g	Mass of unit volume of mineral grains, equivalent to σ_t
Specific gravity		Ratio of the mass of a unit volume of material to the mass of the same volume of chilled gas-free distilled water; excludes voids
Bulk density	σ_B	Mass per unit volume of a dry rock; includes both solid material and void space
Natural density	σ_n	Mass per unit volume of a water-saturated Earth material; includes both solid material and void space filled with water
Saturated bulk density		Equivalent to σ_n

$$\sigma_t = \sigma_g = \sum \sigma_i v_i,$$

σ_i densidade de cada mineral, v_i volume de cada mineral; v_p volume de poros vazios; v_f volume de poros preenchidos; σ_f densidade do fluido dentro do poro

$$\sigma_B = \sigma_t - \frac{v_p \sigma_t}{100},$$

$$\sigma_n = \sigma_B + \frac{v_f \sigma_f}{100} = \sigma_t - \frac{v_p \sigma_t}{100} + \frac{v_f \sigma_f}{100},$$

Hinze et al., 2013

Densidade da Terra

Valor médio: 5520 kg/m³

Inversão dos seguintes dados: Dados astronômicos e geodésicos; Oscilação livre e ondas de superfície de longo período; curvas de tempo-percurso de onda P e S; anisotropia

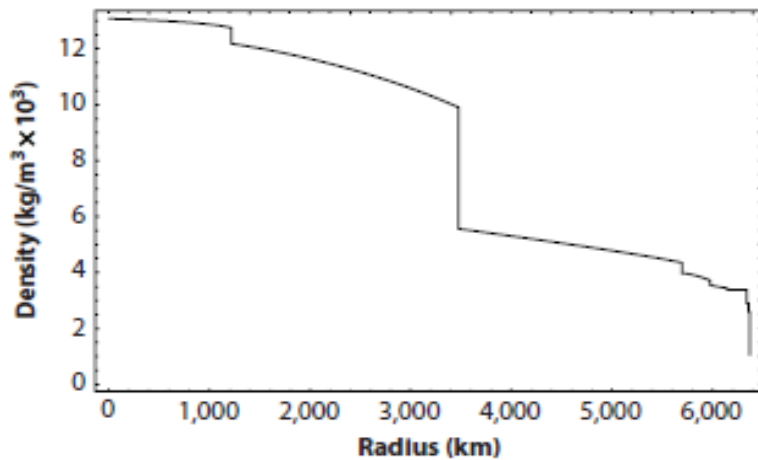


FIGURE 4.1 Preliminary Reference Earth Model (PREM) of the density of the Earth. Adapted from DZIEWONSKI and ANDERSON (1981).

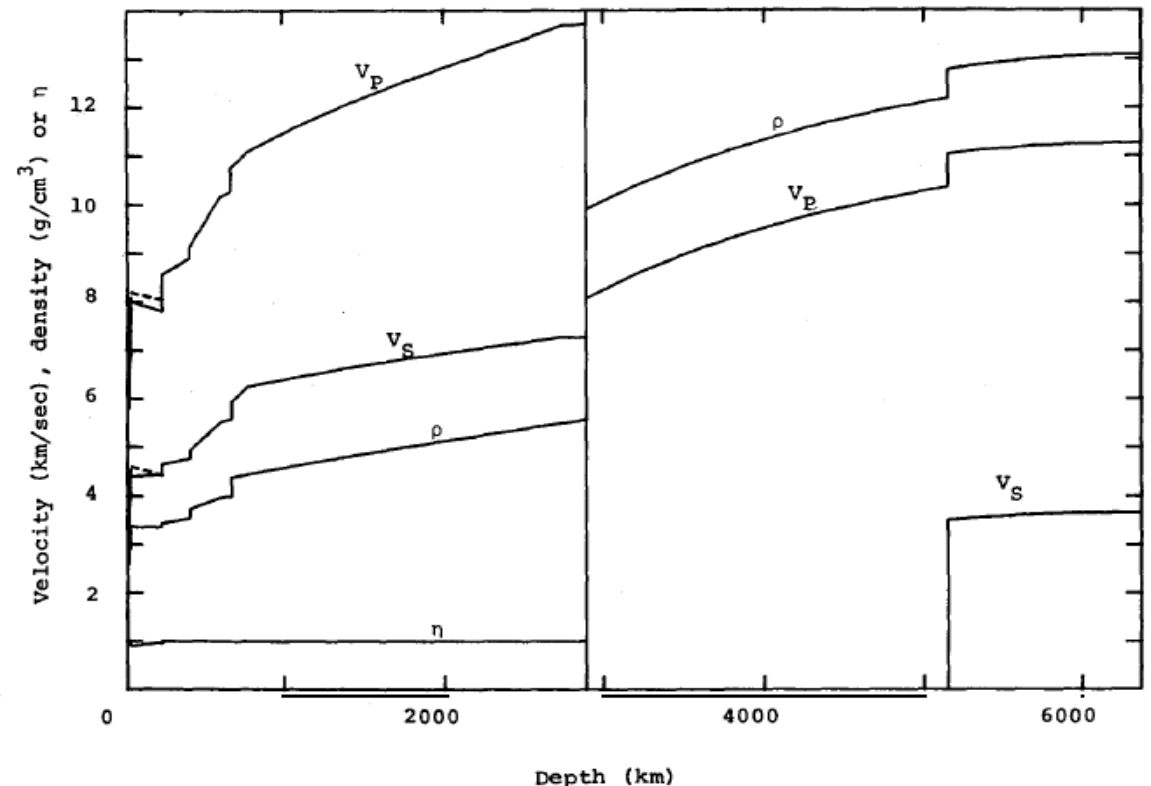


Fig. 8. The PREM model. Dashed lines are the horizontal components of velocity. Where η is 1 the model is isotropic. The core is isotropic.

Densidade

Density is a function of the mineral composition of Earth materials as well as their void volume and the material filling the voids. As a result, densities of rocks can be estimated by considering their origin and the processes that subsequently have acted upon them. However, it is advisable to measure densities either directly or indirectly wherever possible, preferably *in situ*, because of the difficulties in obtaining samples that are representative of the actual geological setting. *In situ* measurements may be obtained from the relationship of gravity anomalies to topography or determined indirectly from correlative measurements such as seismic wave velocity or attenuation of gamma rays.

Hinze et al., 2013

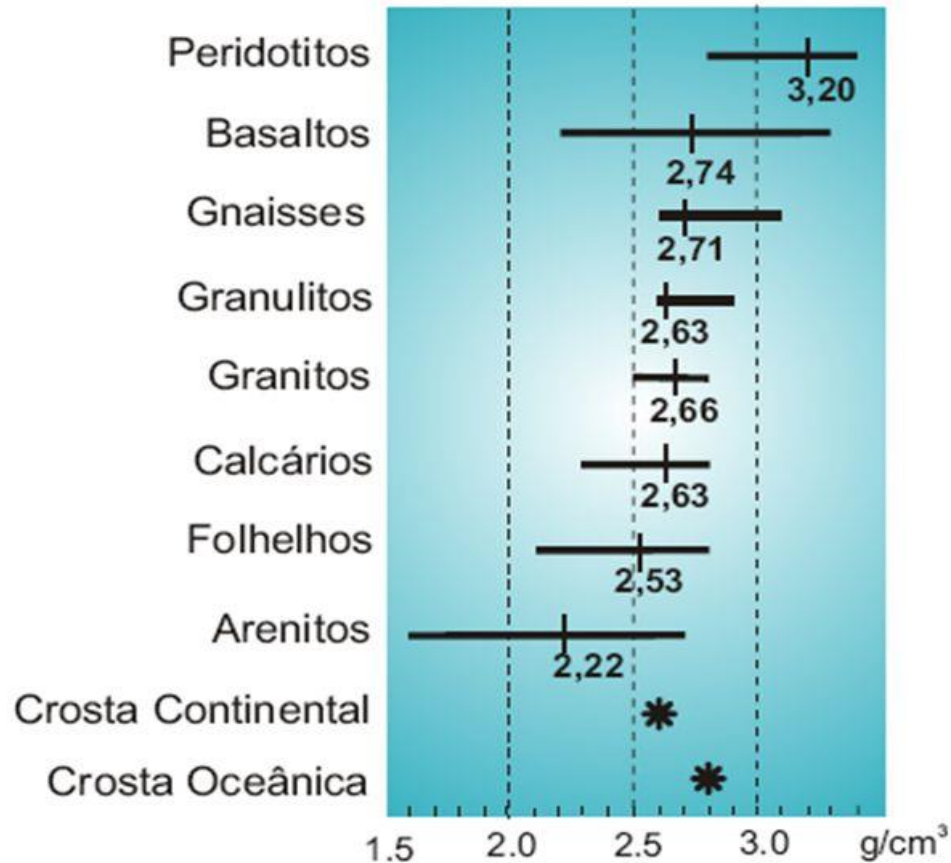
Densidade é uma função da composição mineral dos materiais terrestres, assim como do volume dos espaços vazios e do material que eventualmente preenche esses poros vazios.

A densidade das rochas pode ser estimada considerando sua origem e os processos que eventualmente atuaram sobre essa rocha.

Densidade

- Densidade é um escalar
- A maioria das rochas tem densidades entre 1600 e 3200 kg/m³.
- A densidade depende da composição e da porosidade.
- A porosidade é a principal causa da variação na densidade das rochas sedimentares.

Densidade de rochas



Variação da densidade de algumas rochas e suas médias.

Densidade de rochas

TABLE 4.2 Examples of densities in kg/m^3 of primary sedimentary rock minerals.

Name	Density
Anhydrite	2,960
Barite	4,480
Calcite	2,710
Clay minerals	
Bentonite	3,600
Dichite	2,620
Kaolinite	2,610–2,680
Glauconite	2,300
Montmorillonite	2,610
Vermiculite	2,300
Coal	
Anthracite	1,300–1,500
Bituminous	1,100–1,300
Dolomite	2,870
Halite	2,160
Gypsum	2,310
Sylvite	1,990

Adapted primarily from JOHNSON and OLHOEFT (1984).

TABLE 4.3 Examples of densities in kg/m^3 of igneous and metamorphic rock minerals.

Name	Density
Augite	3,300
Biotite	3,360
Ca Al pyroxene	3,360
Chlorite	2,800
Diamond	3,520
Feldspars	
Albite to anorthosite	2,620–2,760
Microcline	2,560
Orthoclase	2,570
Sanadine	2,560
High-grade metamorphic minerals	
Sillimanite	3,250
Kyanite	to
Garnet, etc.	4,300
Hornblende	3,080
Muscovite	2,560
Olivine	
Fosterite to fayalite	3,210–4,390
Quartz	2,650
Serpentine	2,600
Talc	2,780

Adapted primarily from JOHNSON and OLHOEFT (1984).

Densidade de rochas

TABLE 4.4 Examples of densities in kg/m^3 of ore minerals and metals, and terrestrial waters.

Name	Density
<i>Ore minerals and metals</i>	
Barite	4,480
Cinnabar	8,187
Chalcopyrite	4,200
Chalcocite	5,793
Copper	8,934
Corundum	3,987
Galena	7,600
Gold	19,282
Halite	2,163
Hematite	5,275
Iron	7,875
Kaolinite	2,594
Lead	11,343
Limonite	4,880
Magnetite	5,200
Malachite	4,031
Pyrite	5,010 (4,950–5,030)
Pyrrhotite	4,610
Sphalerite	4,089
Uraninite	10,970
<i>Water</i>	
Fresh (at 4 °C)	1,000
Ice	890–910
Brine	1,125
Sea water	1,030

Adapted primarily from JOHNSON and OLHOEFT (1984).

Efeito da pressão

- A pressão litostática comprime os espaços vazios das rochas.
- Rochas com maior porosidade são mais suscetíveis às mudanças de pressão.
- A densidade tende a aumentar até um valor próximo da densidade de seus minerais constituintes

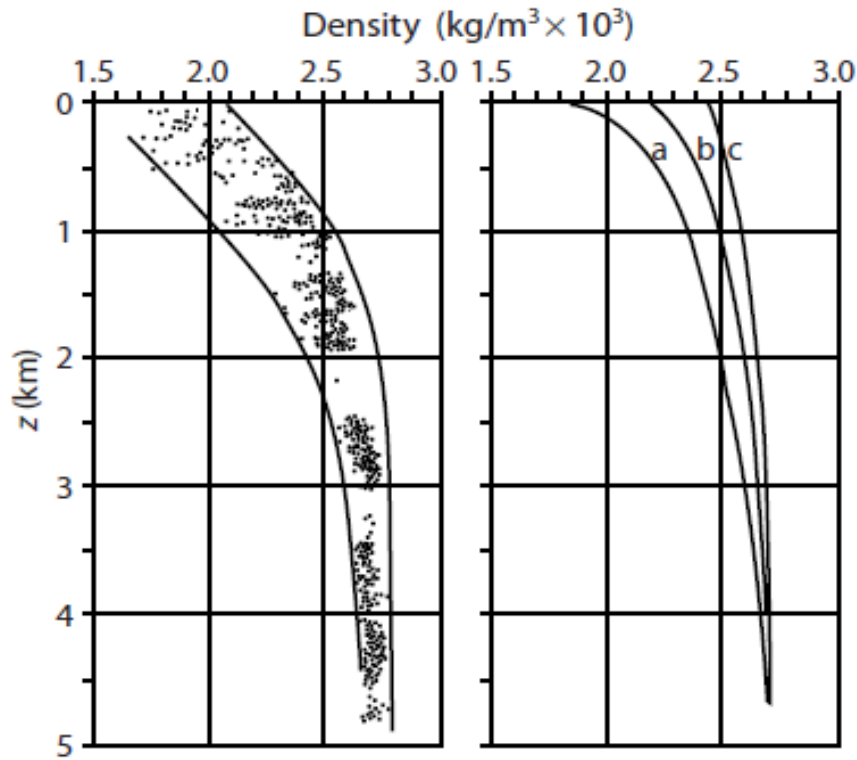


FIGURE 4.6 Density of sedimentary rocks vs. depth (z) for the North German–Polish basin. The left panel includes sandstones and siltstones; the right panel gives the mean values for the (a) Quaternary, Cretaceous, Jurassic, (b) Bunter sandstone (Lower Triassic), and (c) Permian stratigraphic units. Adapted from SCHÖN (1996).

Crosta continental e crosta oceânica

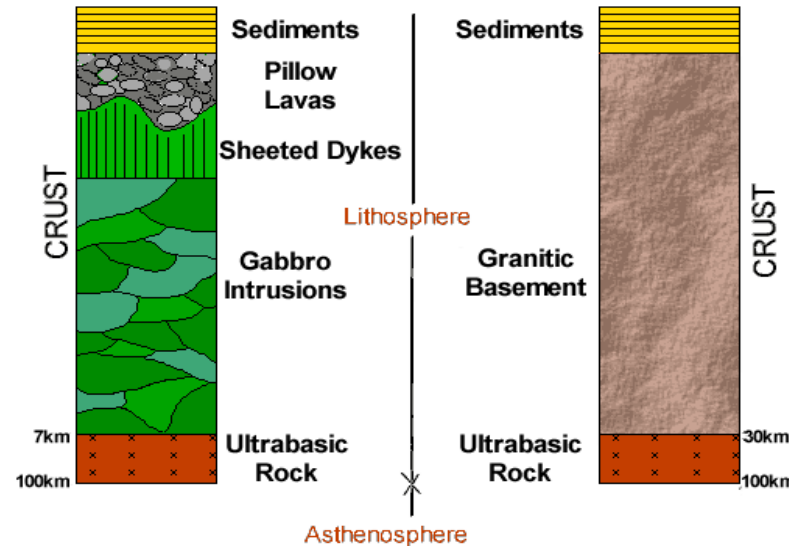
Crosta oceânica:

Espessura entre 6 e 8 km

Mais homogênea e uniforme, tipicamente basaltos e gabros e com estrutura sísmica aplicável à várias bacias oceânicas

Densidade de 2800 a 3000 kg/m³

Moho na média: menor ou igual a 10 km de profundidade



Crosta continental:

Espessura média 38 km, variação 15 a 75 km

Complexa e variável em várias escalas de comprimento e espessura.

Porção superior com rochas de composição granodiorítica e porção inferior com granulitos. Algumas vezes ocorre separação brusca de velocidade sísmica entre as duas camadas, definindo a Descontinuidade de Conrad

Densidade de 2600 a 2800 kg/m³

Moho na média: há 35 km de profundidade

Densidade

Density is a function of the mineral composition of Earth materials as well as their void volume and the material filling the voids. As a result, densities of rocks can be estimated by considering their origin and the processes that subsequently have acted upon them. However, it is advisable to measure densities either directly or indirectly wherever possible, preferably *in situ*, because of the difficulties in obtaining samples that are representative of the actual geological setting. *In situ* measurements may be obtained from the relationship of gravity anomalies to topography or determined indirectly from correlative measurements such as seismic wave velocity or attenuation of gamma rays.

Hinze et al., 2013

É melhor medir a densidade de forma direta ou indireta sempre que possível, preferencialmente no local, devido às dificuldades em obter amostras que sejam representativas da condição geológica real.

Medidas *in situ* devem ser obtidas das relações entre anomalias gravimétricas e topografia ou determinadas indiretamente através de medidas que tenham correlação com a densidade, como velocidades das ondas sísmicas ou atenuação dos raios gama.

Medidas de densidade

- É possível medir a densidade das rochas em laboratório? Como?
- É possível determinar a densidade das rochas através de medidas geofísicas? Como?

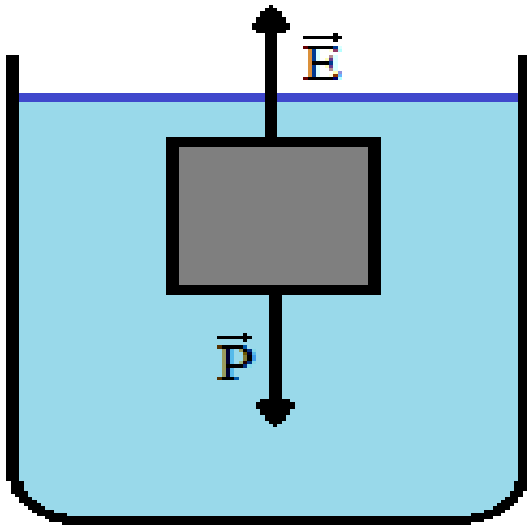
Medidas de densidade

- 1) em laboratório: mais simples e mais barato, desvantagem: pequeno volume da amostra, dificuldades com rochas muito intemperizadas, mínimo 30 amostras se a região for muito heterogênea.
- 2) medidas de propriedades correlatas: velocidade de ondas sísmicas e atenuação de raios gama: cara, equipamento apropriado, pode ser feito junto com outras perfilagens de poço, volume restrito, mas é *in situ*.
- 3) medidas de gravidade: medidas *in situ*, abarcam grandes volumes de rochas, necessitam equipamento apropriado e furo em rochas. Medidas em furos ou fazendo a inversão de dados gravimétricos.

- Porque é importante medir a densidade *in situ*?

Medidas de Densidade – direta em laboratório

- Principio de Arquimedes:



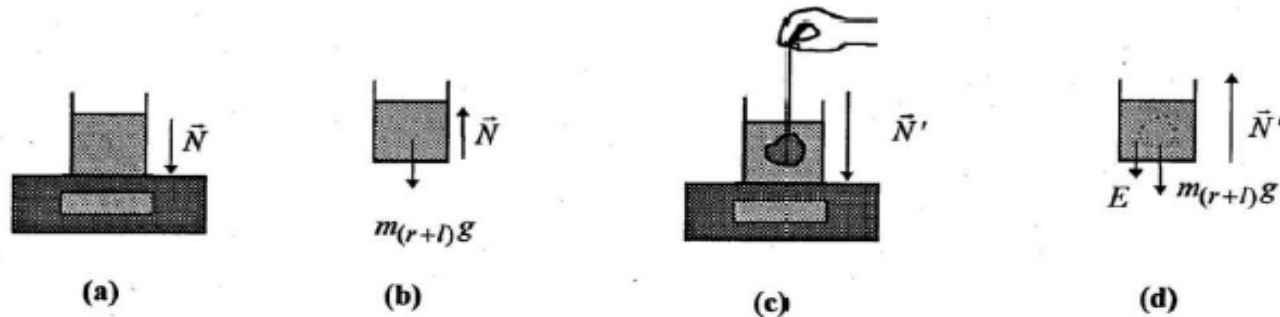
“Um corpo mergulhado em um líquido, sofre a ação de uma força de sentido ascensional, cujo módulo é igual ao peso do volume de líquido deslocado pelo próprio corpo (Arquimedes)”.

<https://www.youtube.com/watch?v=qCoqFwZtwUI&list=PLDre2jYH3njjMv8cYIDXmIZCO1qB5h9CU&index=11>

https://drive.google.com/file/d/1nw8KwGpRENxesFi48yZeaGB86_0X4Jf0/view

Medidas de Densidade – direta em laboratório

Figura 0.3 – Esquema de forças atuando em uma balança de força normal.

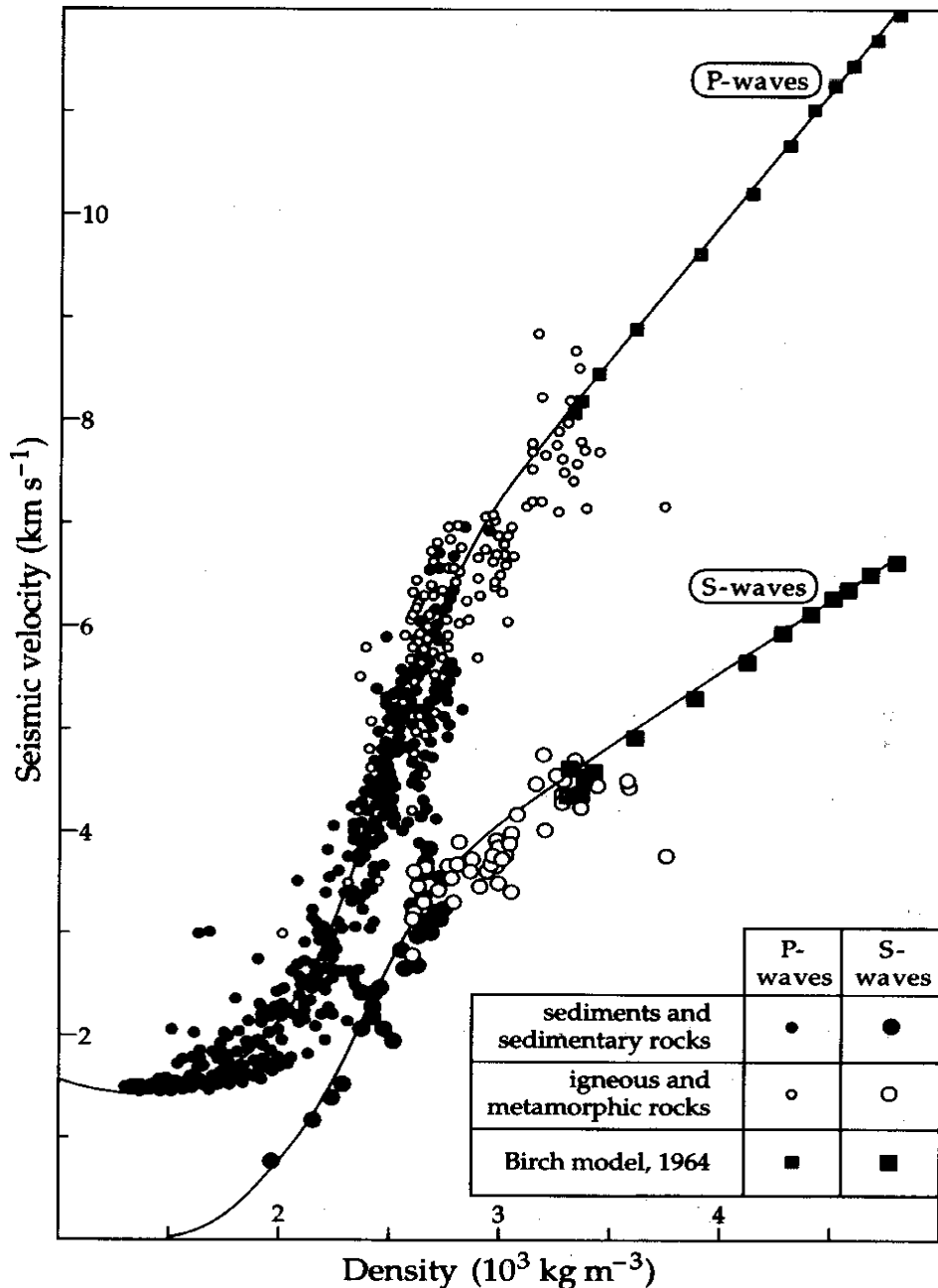


Fonte elaborada pelos compiladores.

$$E = N' - m_{r+l}g$$

$$\rho_l v_s g = (m'_{r+l} - m_{r+l})g$$

$$v_s = \frac{m'_{r+l} - m_{r+l}}{\rho_l}$$



Medidas de Densidade - indireta

- Velocidade das ondas sísmicas medidas em laboratório
- Validade: grandes corpos alojados na crosta.

Medidas de Densidade – indireta

Velocidade das ondas sísmicas medidas em laboratório

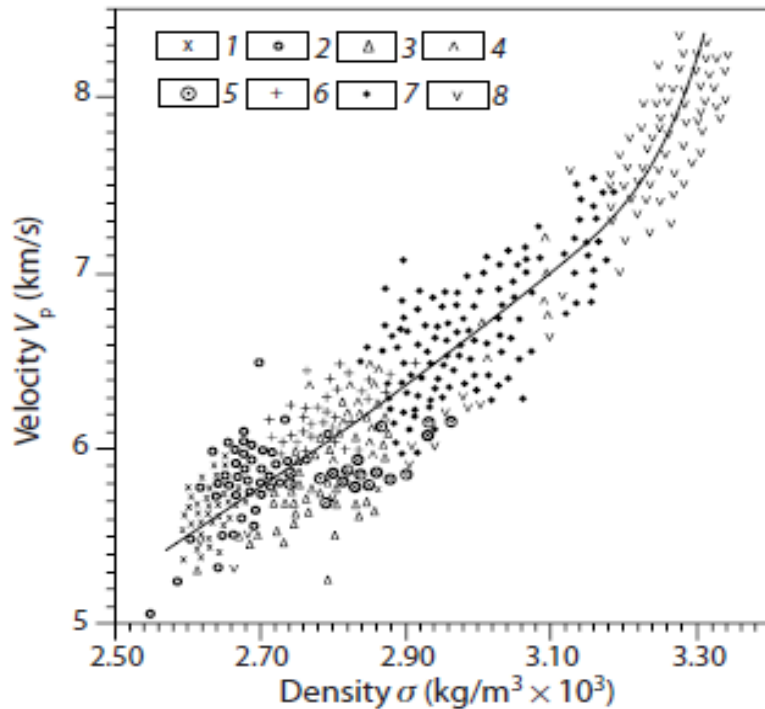


FIGURE 4.15 Comparison of compressional wave velocities and densities for suites of igneous and metamorphic rocks. (1) – granite, (2) – biotitic/amphibolitic gneiss, (3) – garnet/biotitic gneiss, (4) – amphibole gneiss, (5) – granulite, (6) – diorite, (7) – gabbro/norite, (8) – ultrabasite. Adapted from SCHÖN (1996).

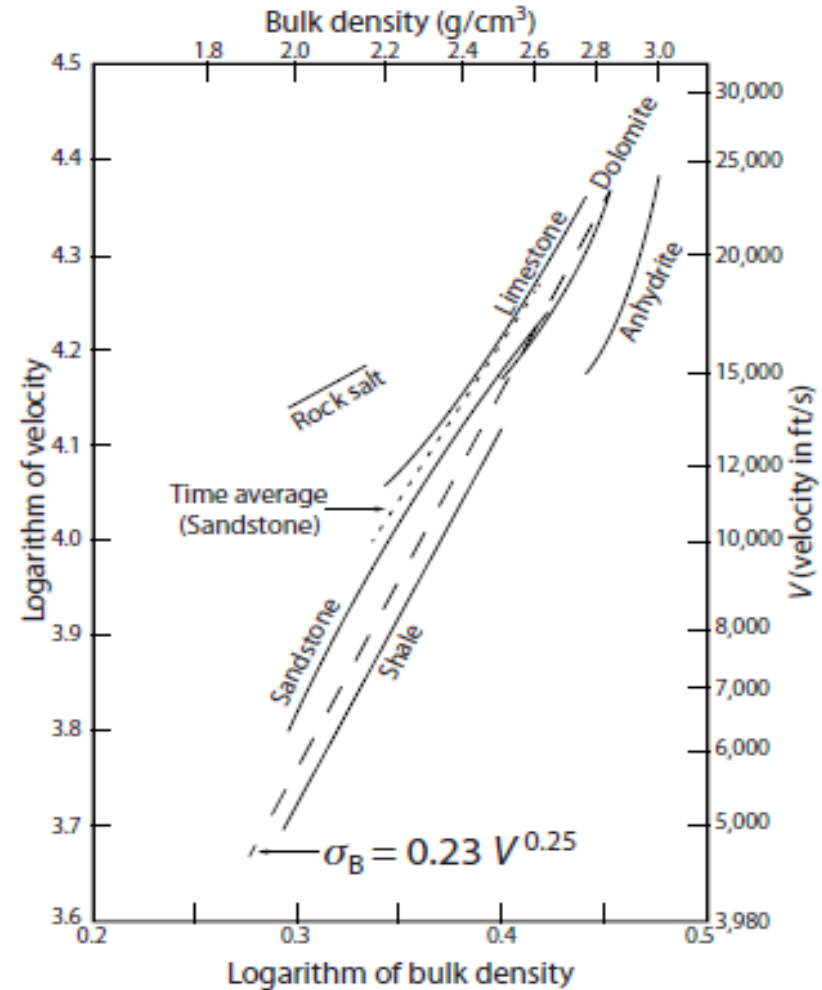


FIGURE 4.17 Compressional wave velocity and density relationships for various sedimentary rocks. Adapted from GARDNER et al. (1974).

Medidas de Densidade - indireta

- Perfil gama-gama
- Fonte: cézio 137 (S), raios gama colidem com os elétrons da formação, são espalhados e detectados por cintiladores (D)
- Estimativa de densidade: até 15 cm da parede do poço.

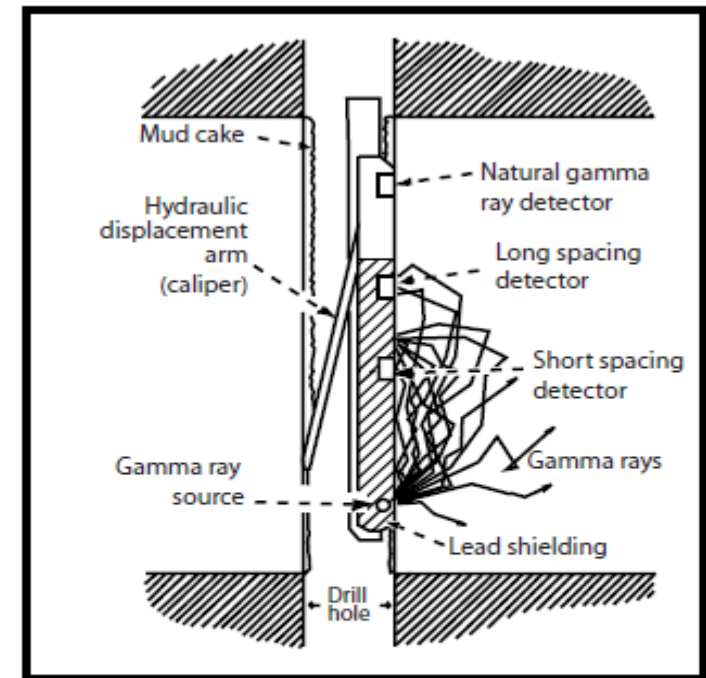
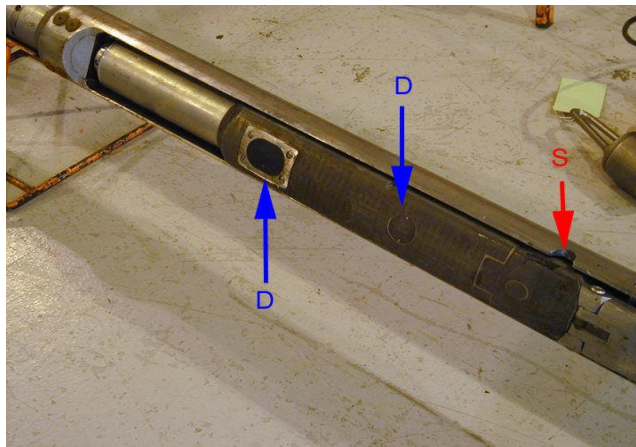
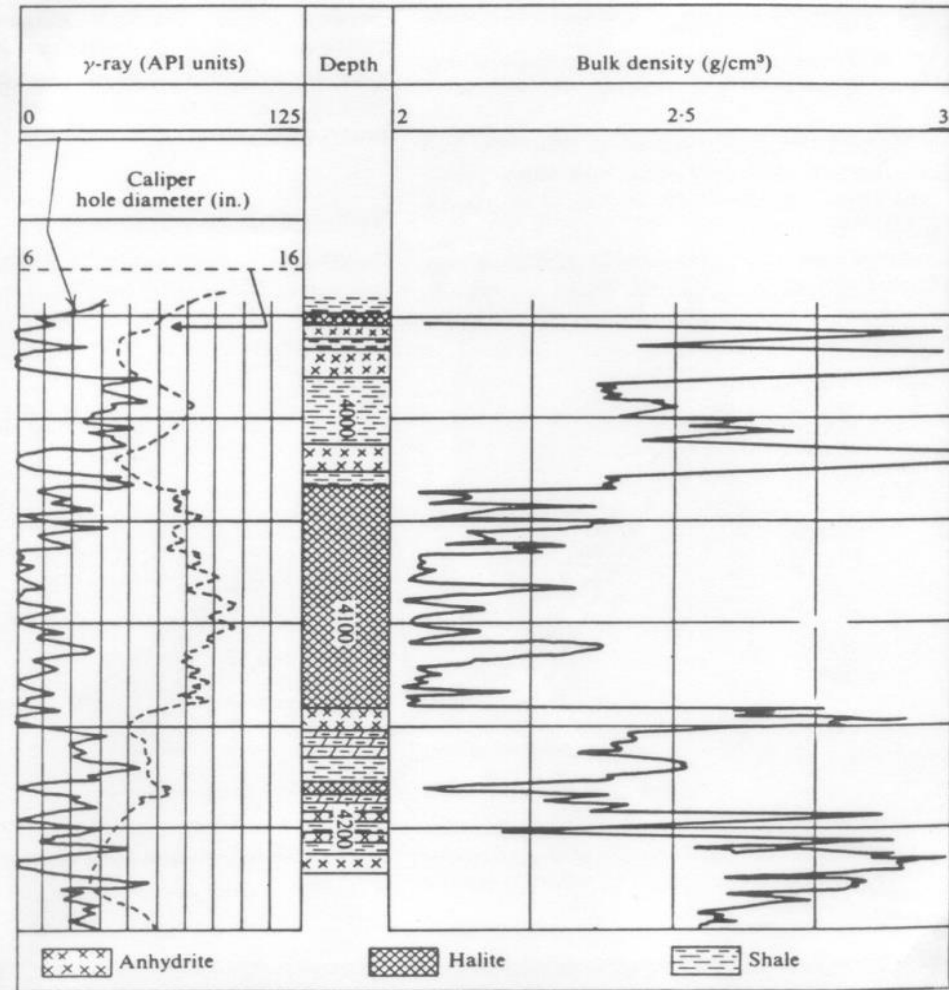
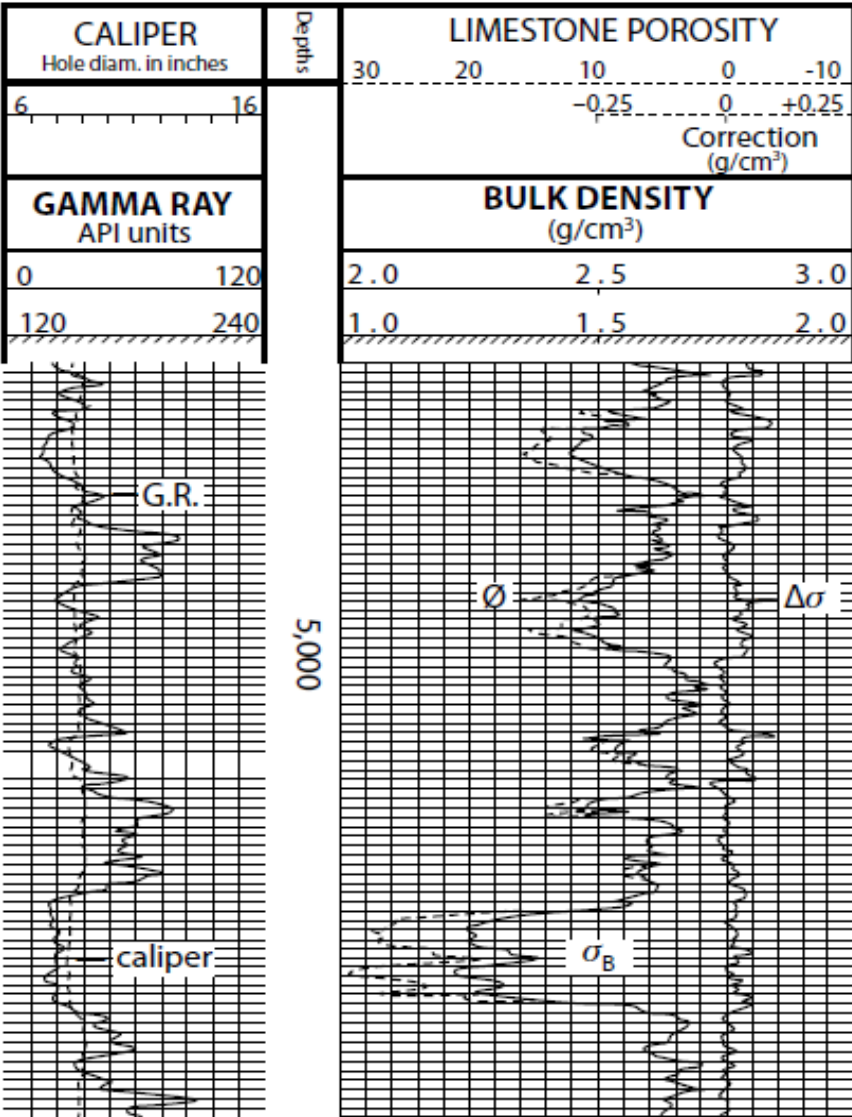


FIGURE 4.13 Schematic cross-section of a gamma-gamma density (compensated) logging sonde using a double detector to eliminate the effect of the drillhole mudcake on the measurements and a separated natural gamma ray detector to permit stripping of natural gamma rays.

Medidas de Densidade – indireta Perfil gama-gama

FIGURE 4.14 Example of a compensated gamma-gamma density log. The left panel shows the natural gamma ray (G.R.) activity and the hole diameter. The right panel shows the compensation for the drillhole mudcake ($\Delta\sigma$), the bulk density (σ_B), and the density-derived porosity (\emptyset). Units and scale are shown in the headers. Adapted from LABO (1986).



Medidas de Densidade - direta

- Gravímetro de poço

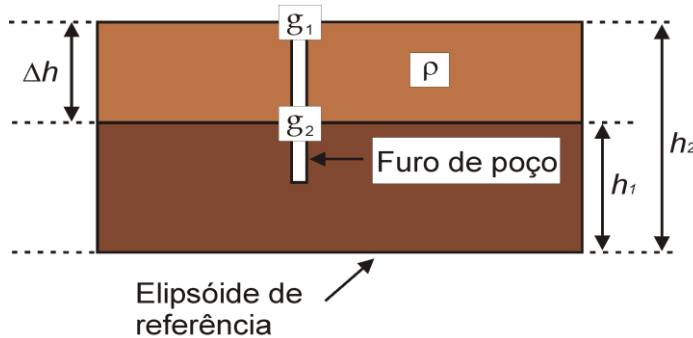
- As medidas de poço são feitas com equipamentos específicos, como por exemplo o gravímetro do tipo LaCoste & Romberg.
- Em geral os instrumentos padrão possuem diâmetro de 10 cm e operam em poços com desvio vertical de até 14°, operando em temperaturas até 260°.
- Gravímetros ultra finos, com espessura de aproximadamente 5,75 cm, capazes de operar em poços com desvio vertical de 60° e profundidades de até 3km.
- O espaçamento vertical entre os pontos observados e a precisão da determinação das profundidades influencia a precisão na determinação da densidade.
- A maior parte da variação da gravidade no poço é devido ao material dentro de um raio de cerca de 5 vezes o espaçamento entre observações (Δh) e por conta disso os efeitos do poço são desprezíveis.
- É um método, em geral, mais acurado mas com leituras demoradas e instrumentação mais cara que outros métodos.



Medidas de Densidade - direta

g_1 e g_2 os valores de gravidade medidos em h_2 e h_1 acima do elipsóide de referência

• Gravímetro de poço



ponto h_1 está mais próximo do centro da Terra, o valor de g_2 será maior pela quantidade $(0,3086 - 0,0419\rho)\Delta h$, onde ρ é em g/cm^3 e $\Delta h = h_1 - h_2$.

Na profundidade h_1 o gravímetro sente a atração da massa acima dessa profundidade, diminuindo o valor de g_2 , que requer uma compensação na correção de Bouguer pelo acréscimo de $(0,0419\rho)\Delta h$.

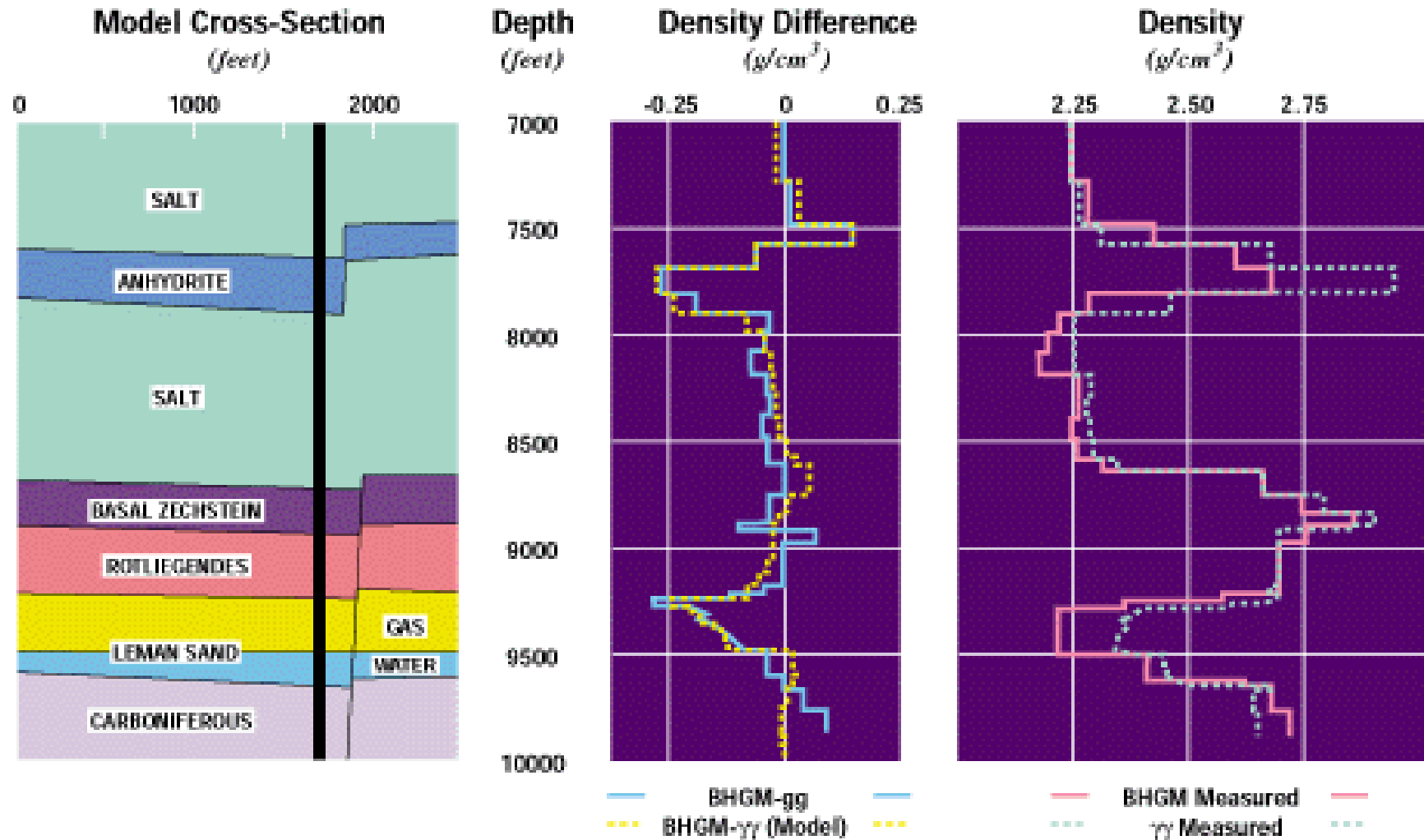
A diferença Δg entre os valores corrigidos de g_1 e g_2 após a redução no nível h_1 é:

$$\begin{aligned}\Delta g &= (0,3086 - 0,0419\rho)\Delta h - 0,0419\rho\Delta h = \\ &= (0,3086 - 0,0838\rho)\Delta h\end{aligned}$$

$$\rho = 3,683 - 11,93 \frac{\Delta g}{\Delta h}$$

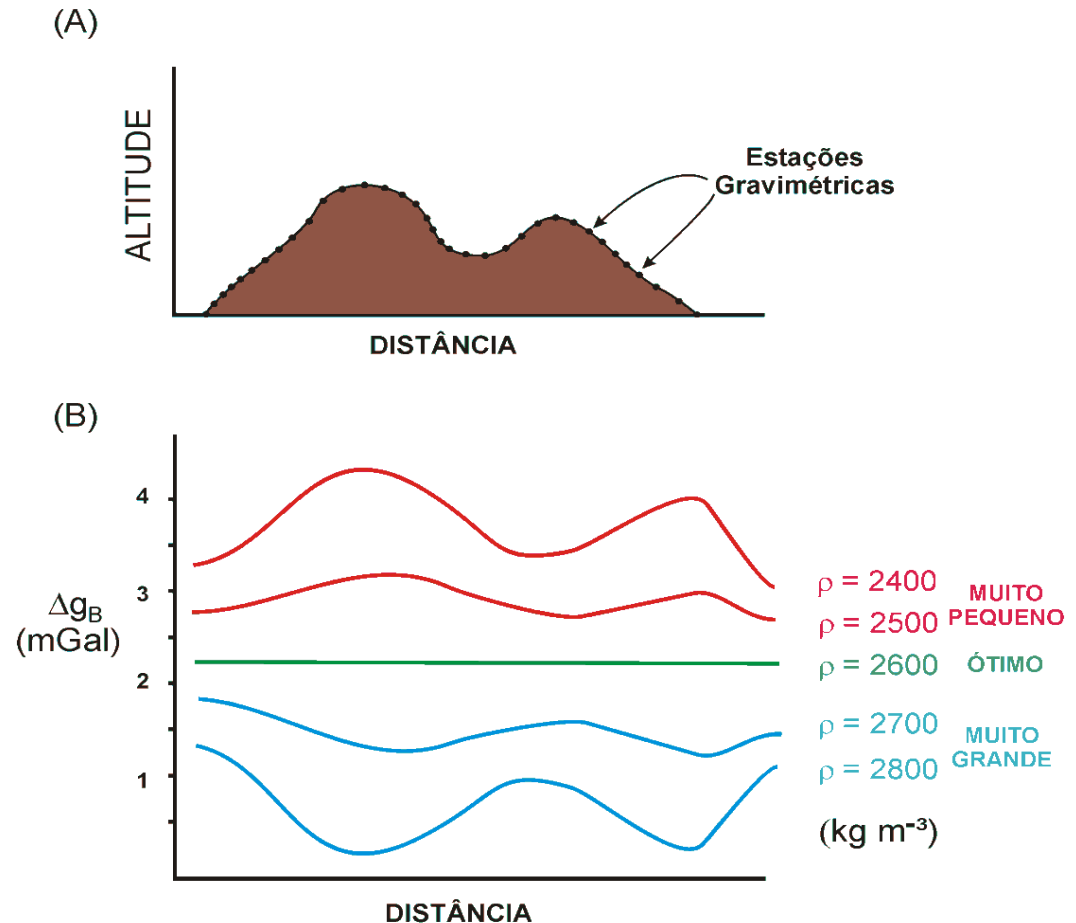
Medidas de Densidade

gravímetro de poço (BHGM) comparado com perfilagem gama-gama ($\gamma\gamma$)



Medidas de Densidade - direta

- Método de Nettleton
- compara curvas obtidas com diferentes valores de densidade na correção de Bouguer com a topografia, ao longo de um perfil.
- O melhor valor de densidade é aquele cujo perfil apresenta a correlação mínima com a topografia



Medidas de Densidade - direta

4.20) Consider the gravity observations (open circles) collected along a profile across the topography depicted in *Figure 1.1*. The Bouguer gravity anomaly effects of the topography were computed using different values of density σ . From these results shown in the upper portion of *Figure 1.1*, (a) what is the density of the topographic feature and why? What do the reduced profiles indicate about the related topographic corrections that are (b) positively and (c) negatively correlated with the topography?

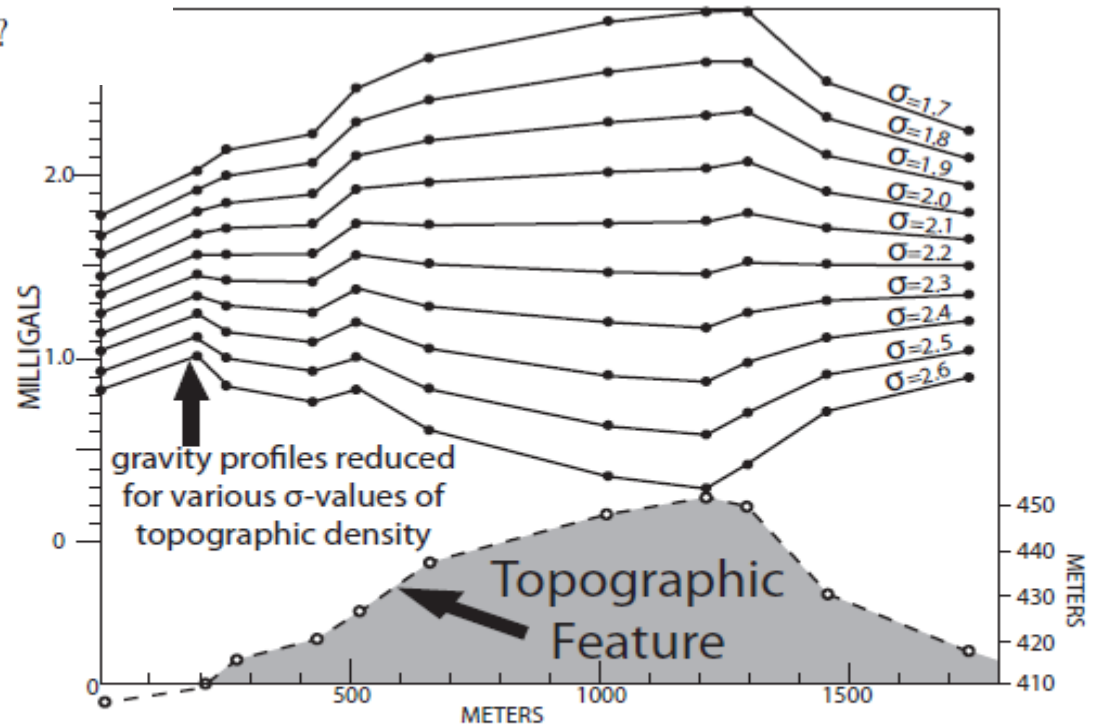


Figure 1.1 Bouguer gravity anomaly profiles (solid lines) over a local topographic feature (dashed line) reduced for the feature's gravity effects using 10 values of topographic density (σ in g/cm^3). See Study Question 4.20.

Medidas de Densidade - direta

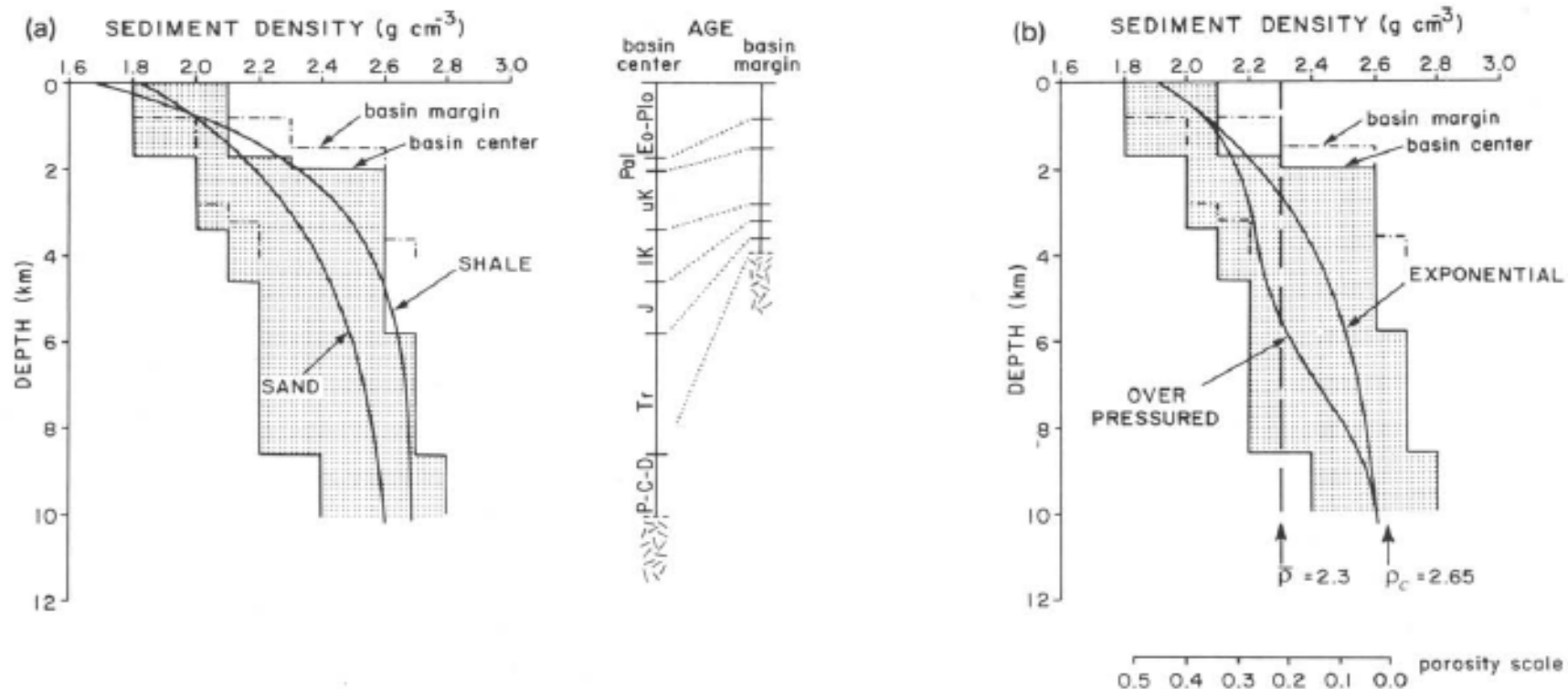
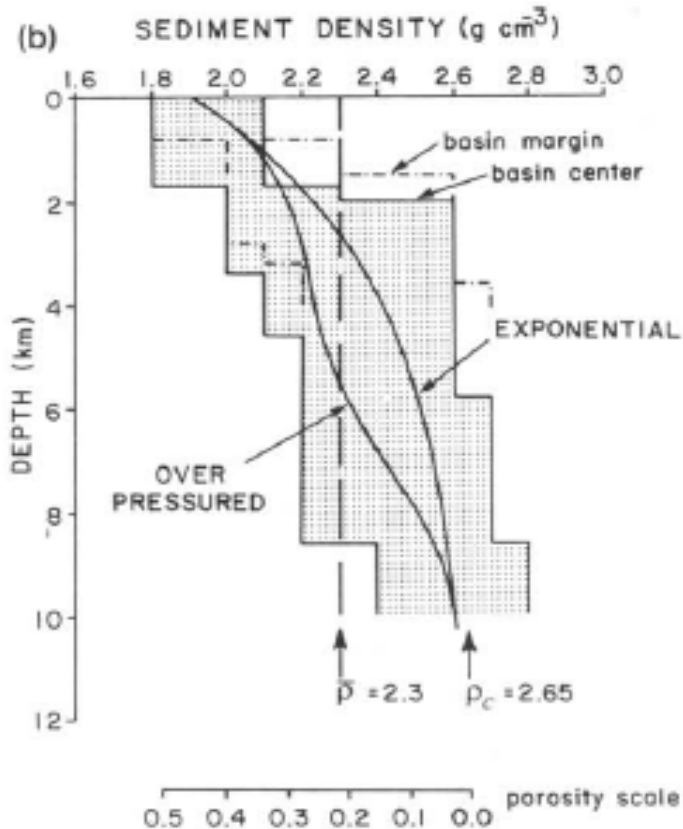


Fig. 2. Sediment density variation in the Viking Graben. The approximate thicknesses of each stratigraphic unit in the basin center (shaded area) and along the basin margin (dashed lines) are obtained from Ziegler [18]. The range of values of density for each stratigraphic unit is taken from well data [5,7]. Typical value for the basement density in the Viking Graben is $\rho_c = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$. (a) Exponential density–depth curves (4) for compacting shales ($\Phi_0 = 0.6$, $k_p^{-1} = 2.0 \text{ km}$, $\rho_{rg} = 2.7 \text{ g cm}^{-3}$) and sandstones ($\Phi_0 = 0.5$, $k_p^{-1} = 3.5 \text{ km}$, $\rho_{rg} = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$) [15]. (b) Exponential density–depth curve with parameters obtained by averaging values for different lithologies ($\Phi_0 = 0.45$, $k_p^{-1} = 3.5 \text{ km}$, $\rho_{rg} = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$), and exponential modified by a density inversion (5), where $A_0 = 0.1$, $D = 10 \text{ km}$.

Medidas de Densidade



So that the variation in density with depth is:

$$\rho_s(z) = (1 - \Phi_0 e^{-k_p z}) \rho_{rg} + \Phi_0 e^{-k_p z} \rho_w \quad (4)$$

where ρ_s is the sediment density, ρ_{rg} the density of the sediment grains, ρ_w the density of the interstitial fluid (assumed to be water), and Φ_0 is the porosity of the sediment at the surface. The “characteristic depth”, k_p^{-1} , determines the rate of increase in sediment density as a function of depth.

Conhecendo uma função de densidade com a profundidade é possível estimar melhor a variação de aceleração da gravidade.

density distribution $\Delta\rho(x', z)$ is given by:

$\Delta g(x, 0)$

$$= 2\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{h(x)} \frac{(z+d) \Delta\rho(x', z) dx' dz}{(x-x')^2 + (z+d)^2} \quad (1)$$

where x and x' are the horizontal coordinates, z is depth, γ is the gravitational constant, and $h(x)$ is the thickness of the layer containing the density variation. The z -axis is defined to be positive downwards and $h(x)$ is measured relative to a reference plane which is at a depth d below the Earth's surface: $h(x)$ is negative if it lies above the reference plane and positive if it lies below the reference plane. Taking the Fourier transform of