

Método Gravimétrico

Teoria

Francisco José Fonseca Ferreira

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

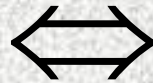
Leis de Newton

Primeira

Segunda



$$F = G \frac{M \times m}{R^2}$$



$$F = m \times g$$



$$F = \frac{G \times M \times m}{R^2} = m \times g \quad \Rightarrow \quad g = \frac{G \times M}{R^2}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2 \times \text{kg}^{-2} \quad (\mathbf{G} = \text{constante de gravitação universal})$$

Unidades Gravitacionais

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$$

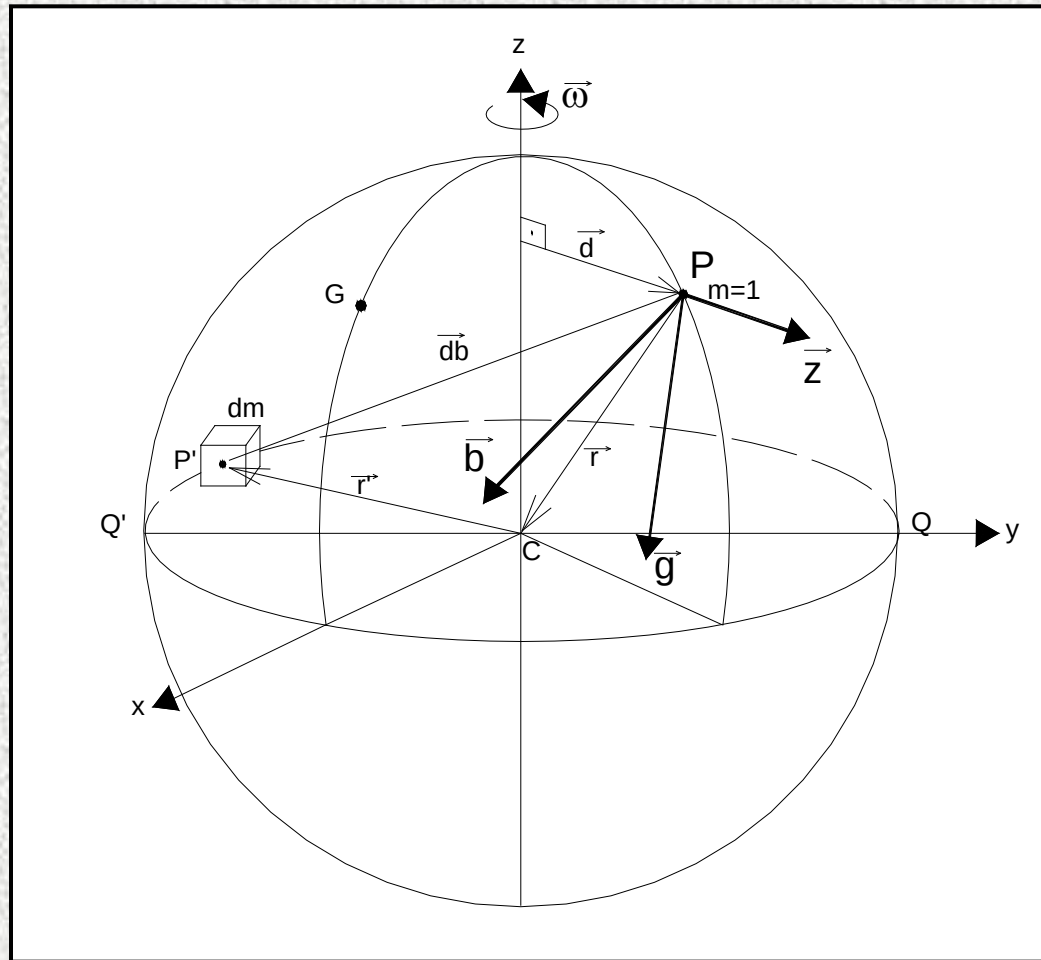
$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Gal} = 10^{-6} \text{ Gal}$$

Sistema Internacional (SI) = unidade gravimétrica (*g.u.*)

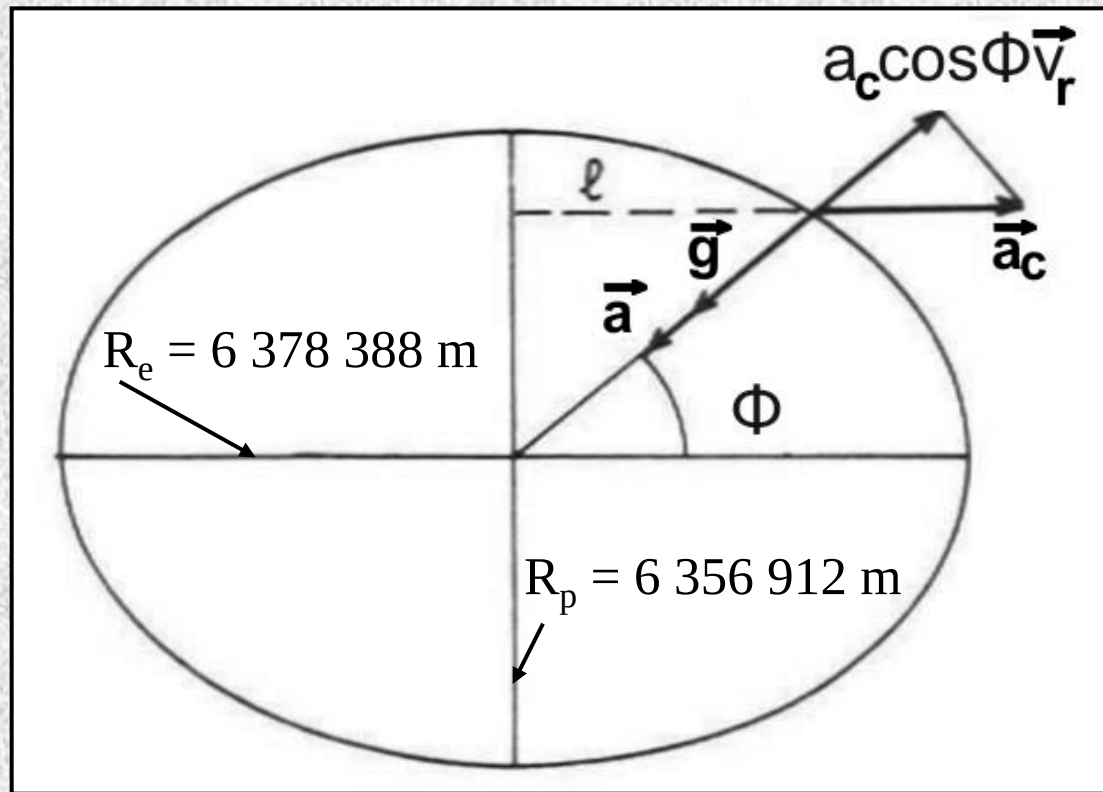
$$10 \text{ } g.u. = 1 \text{ mGal}$$

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



Composição vetorial da força de gravidade

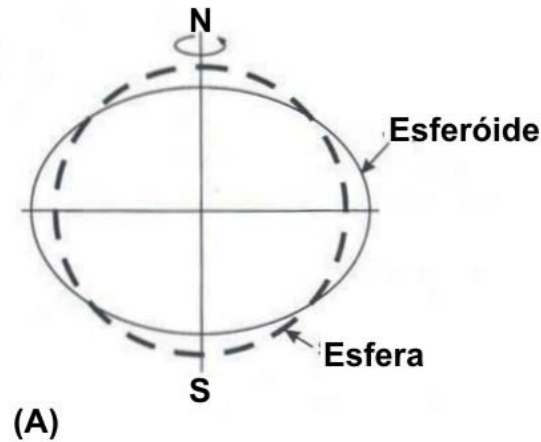
Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



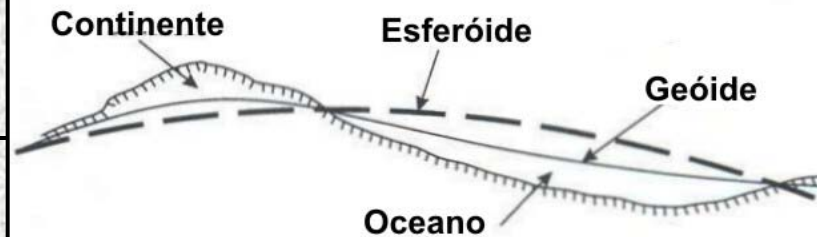
$$g = \frac{G \times M}{R^2} \longrightarrow g = G \int_V \frac{dM}{R^2} \quad \mathbf{e} \quad a_c = \omega^2 l$$

$$g = G \int_V \frac{dM}{R^2} - \omega^2 l \cos \phi$$

Comparação da esfera
e do esferóide

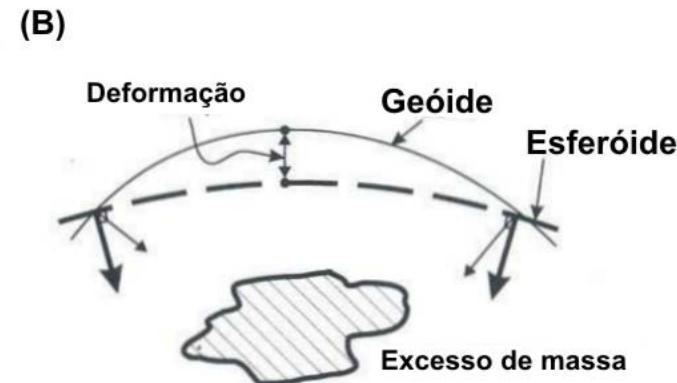


Comparação do geóide
e do esferóide

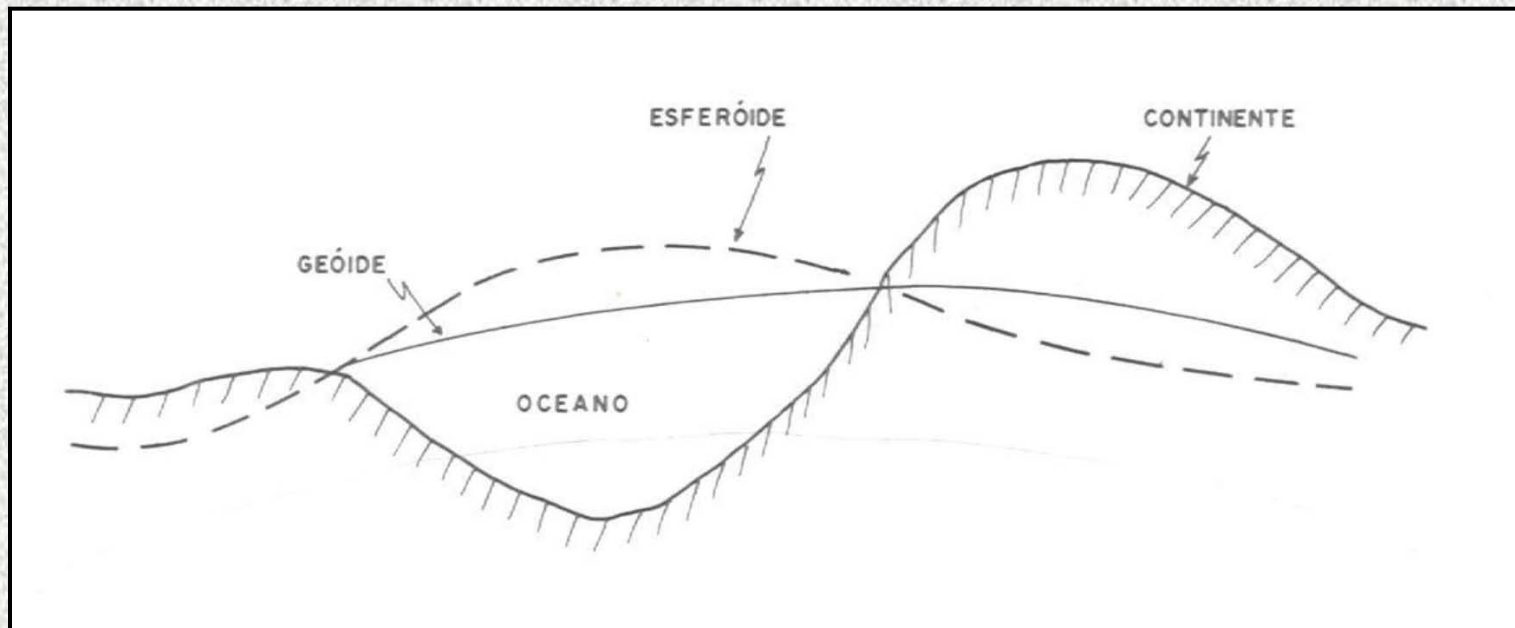


Escala continental

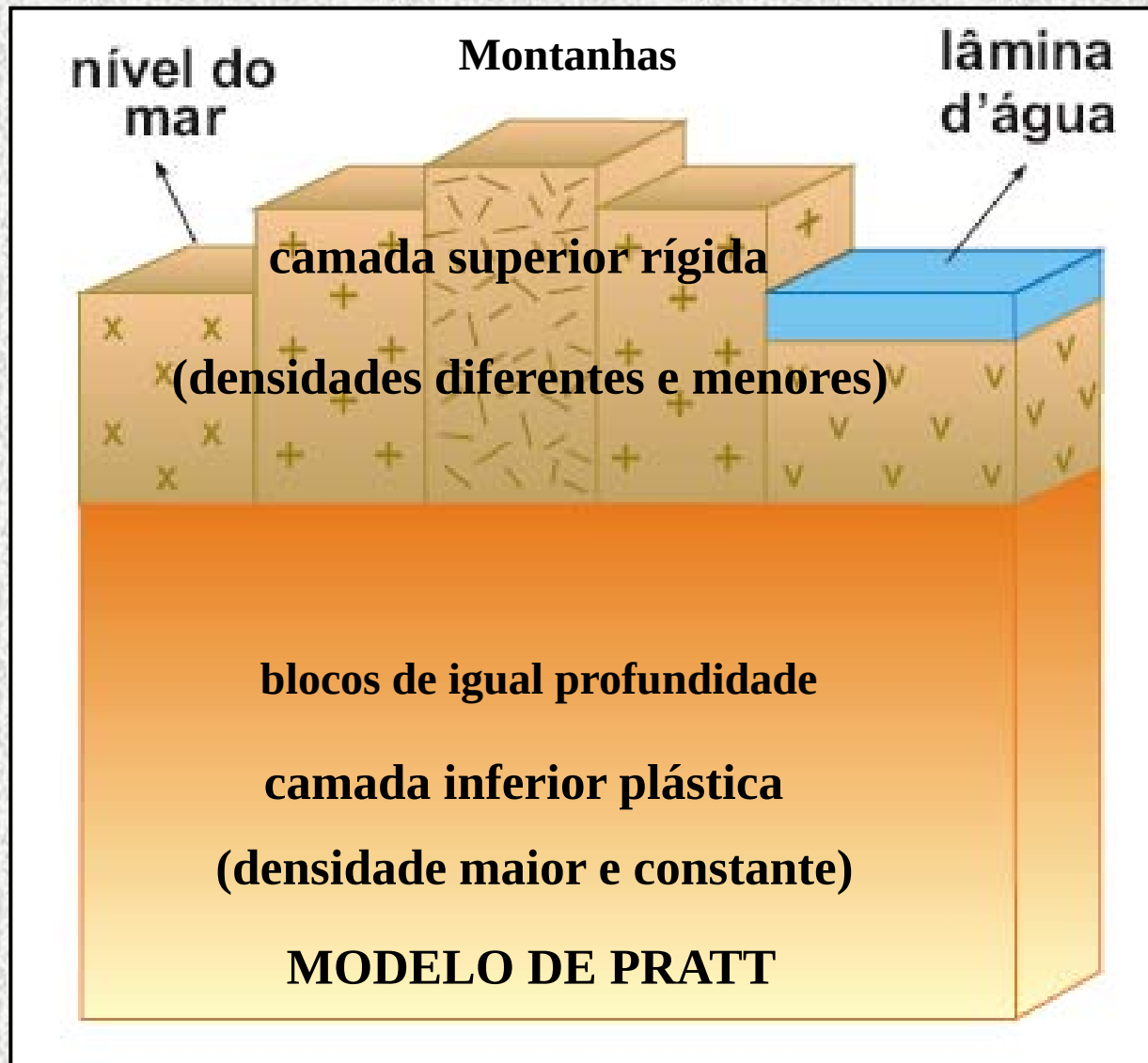
Comparação do geóide
e do esferóide



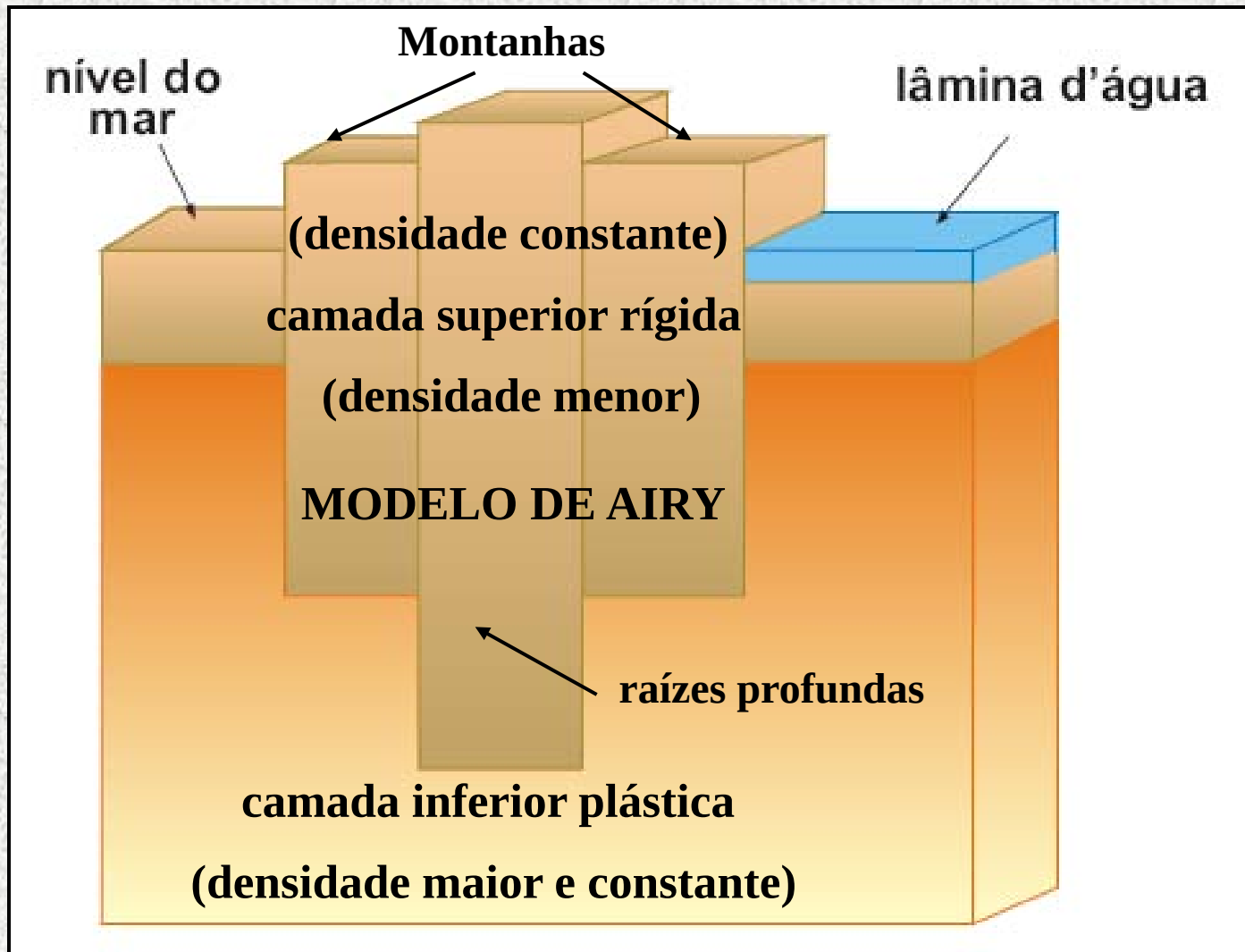
Escala local
(excesso de massa)



Representação esquemática da posição do geóide e do esferóide em relação à superfície terrestre



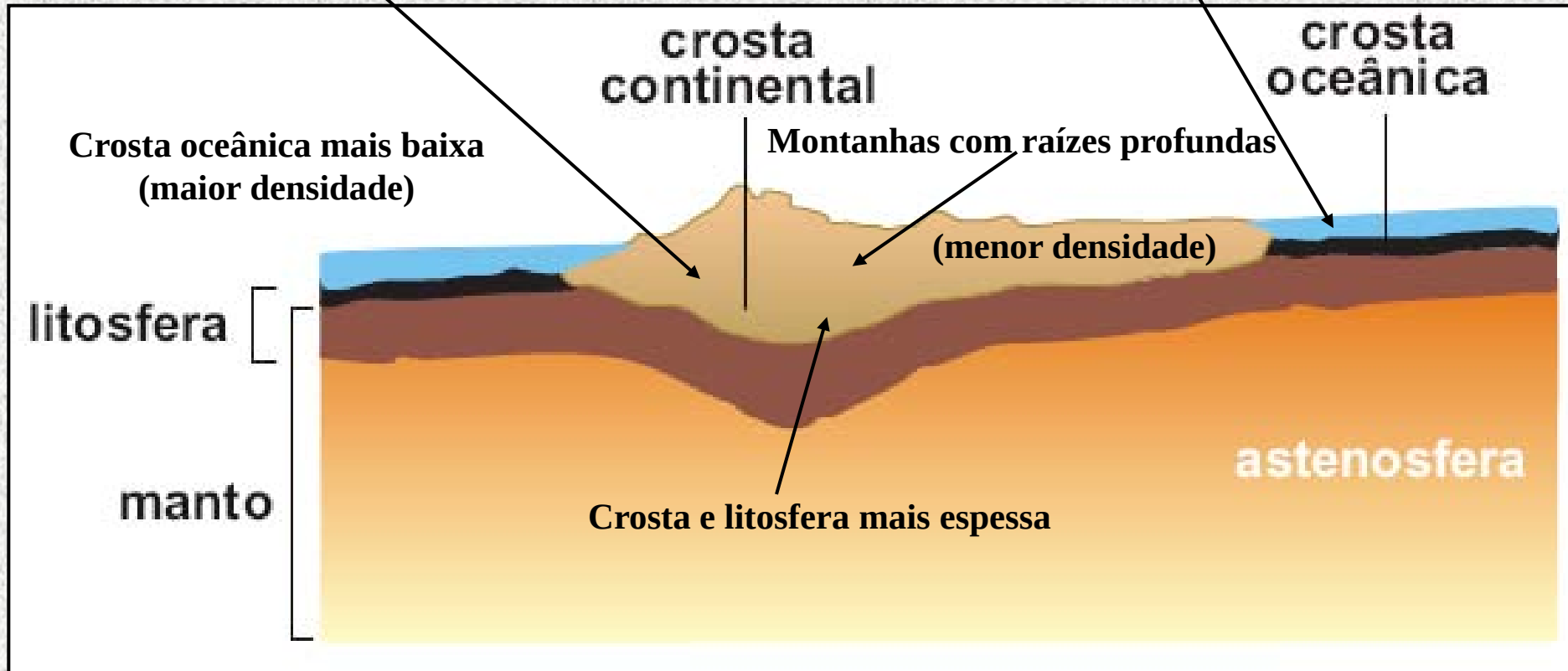
Equilíbrio isostático pela variação de densidade da camada superior



Equilíbrio isostático pela variação de profundidade da camada superior

Modelo de Airy

Modelo de Pratt



Compensação isostática simultânea dos modelos de Airy e de Pratt

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

Fórmula Internacional da Gravidade

Geodetic Reference System 1967 – GRS67

$$g_{\phi} = 978.031846 \left(1 + 0.005278895 \sin^2 \phi + 0.000023462 \sin^4 \phi \right) \text{cm.s}^{-2}$$

Achatamento Polar Terrestre

$$R_e = 6\,378\,388 \text{ m}; \quad R_p = 6\,356\,912 \text{ m} \quad R_e - R_p = 21\,476 \text{ m}$$

$$f = \frac{R_e - R_p}{R_e} = \left(\frac{1}{298,25} \right) \sim 0.0033$$

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

Potencial Gravitacional

$$g(\vec{r}_1) = -\nabla U(\vec{r}_1)$$

$$U = -G \int_V \frac{dM}{r} + \frac{\omega^2 l^2}{2} = -G \int_V \frac{dM}{r} + \frac{\omega^2}{2} r_1^2 \cos^2 \Phi$$

$$U = -G \frac{M}{R} + \frac{\omega^2}{2} r^2 \cos^2 \phi$$

Correções Gravimétricas

Deriva (*drift*) instrumental (estática e dinâmica)

Maré

Latitude: $C_L = 0.81 \sin 2\delta$ (mGal/km)

Ar-Livre: $C_{AL} = 0.3086 h$ (mGal)

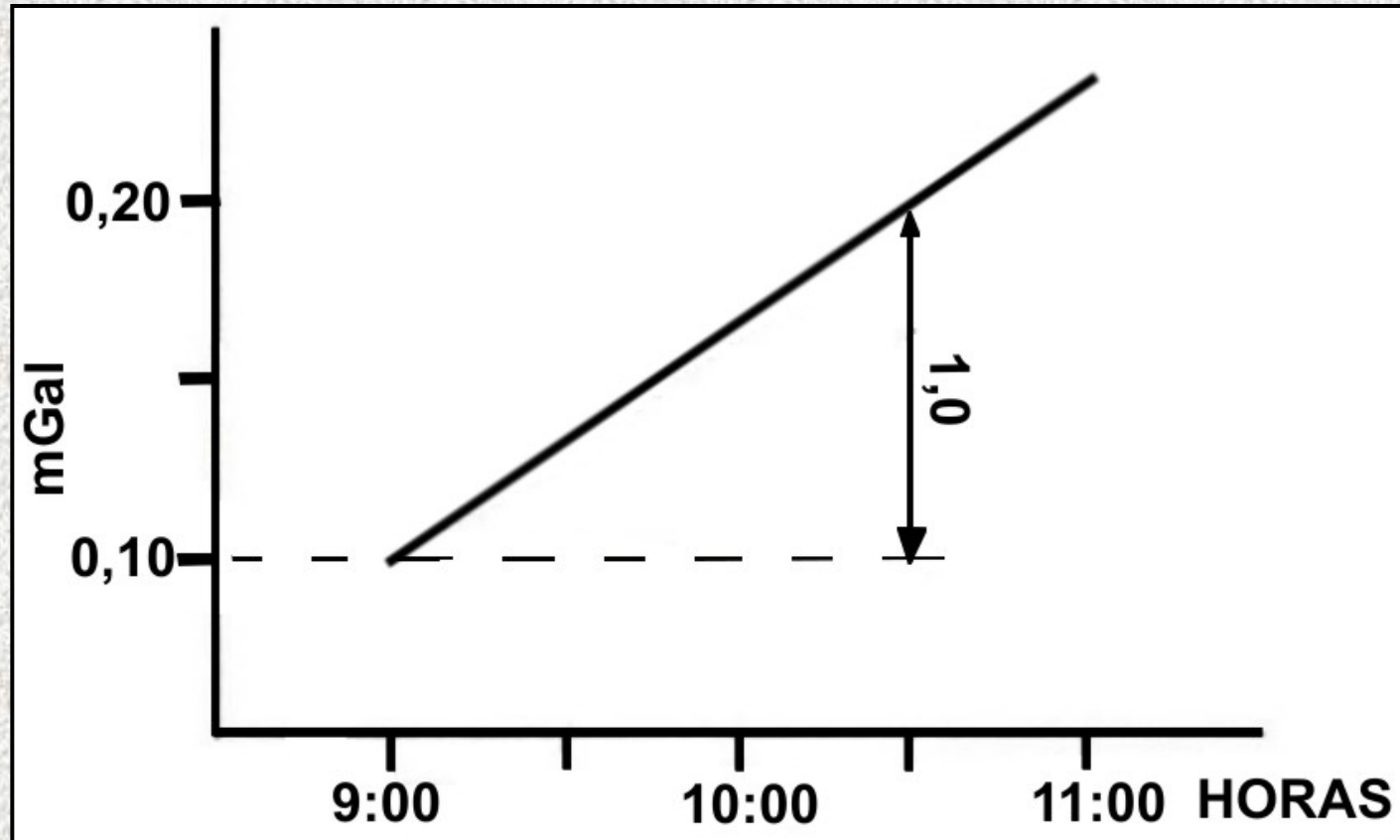
Bouguer: $C_B = 0.4192 \rho h$ (mGal)

Topográfica: $C_T = \rho T$

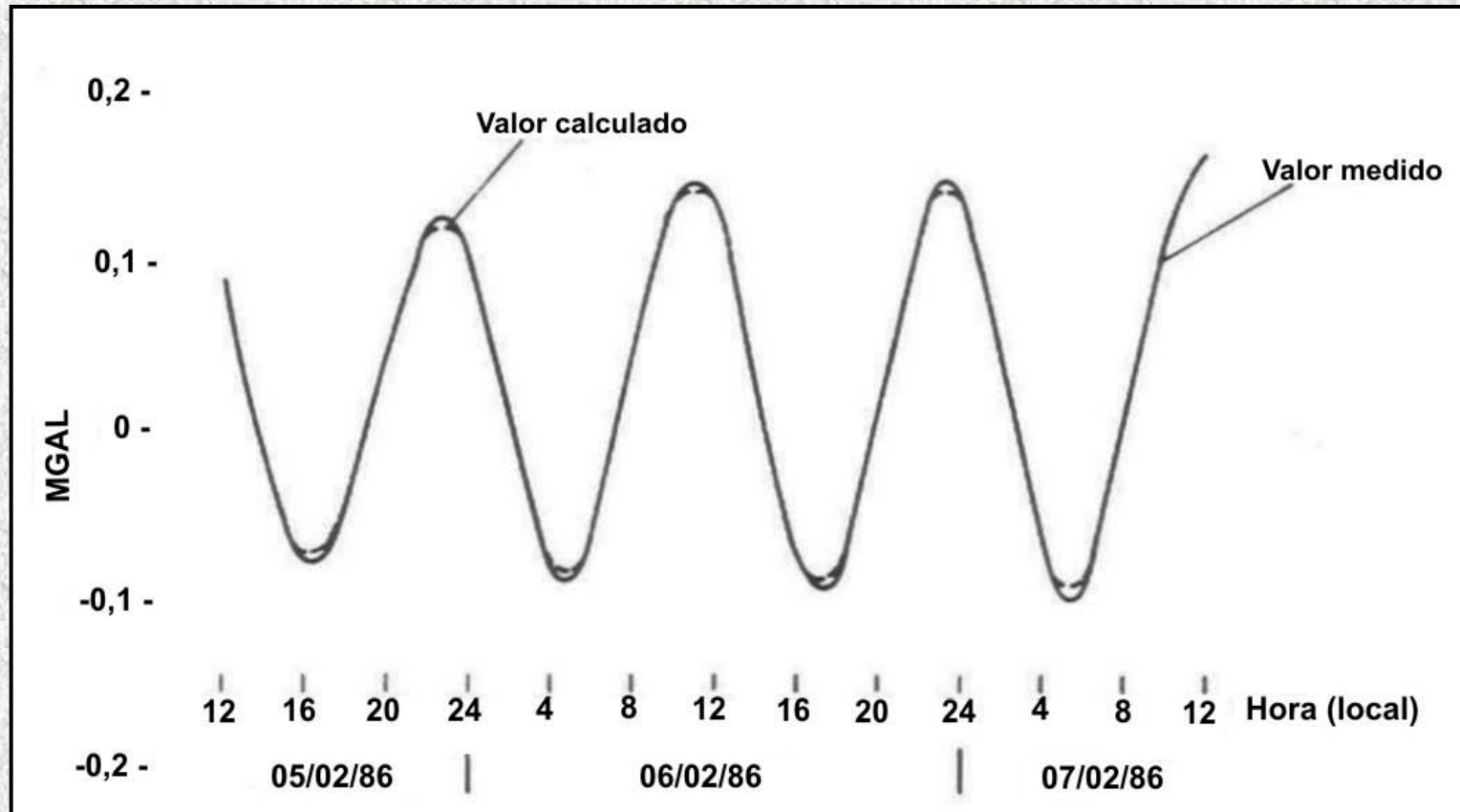
Eotvos (para gravímetros em plataforma móvel – avião, navio, etc.)

Isostática

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

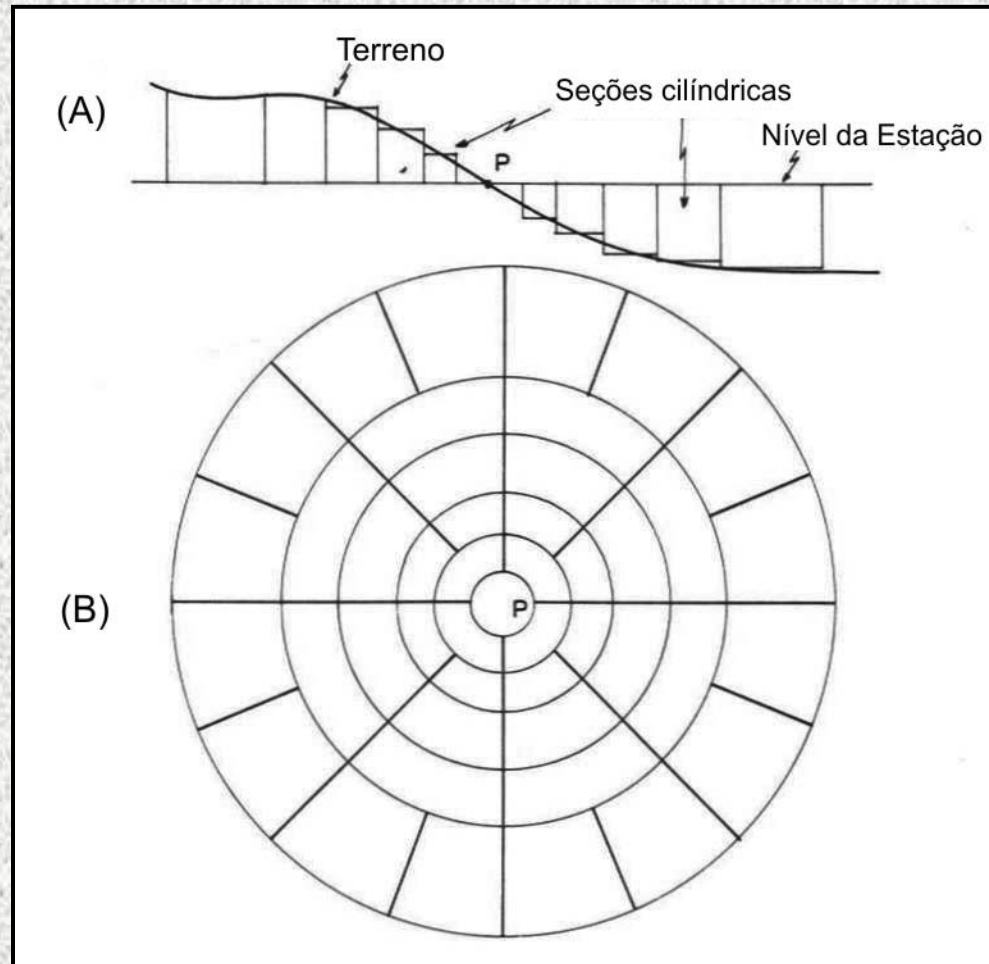


Representação esquemática da correção da variação instrumental



Representação da variação da gravidade devido às atrações do Sol e da Lua (maré)

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



**Representação dos cilindros usados na correção topográfica
(a) perfil; (b) projeção horizontal**

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

Correção de Eotvos

As medidas da aceleração gravitacional são afetadas pela componente vertical da aceleração de Coriolis¹, a qual é função da velocidade e da direção do trajeto da plataforma

Há duas componentes nesta direção:

1) Ação da aceleração centrífuga associada à direção do movimento da plataformarelativamente à superfície da Terra;

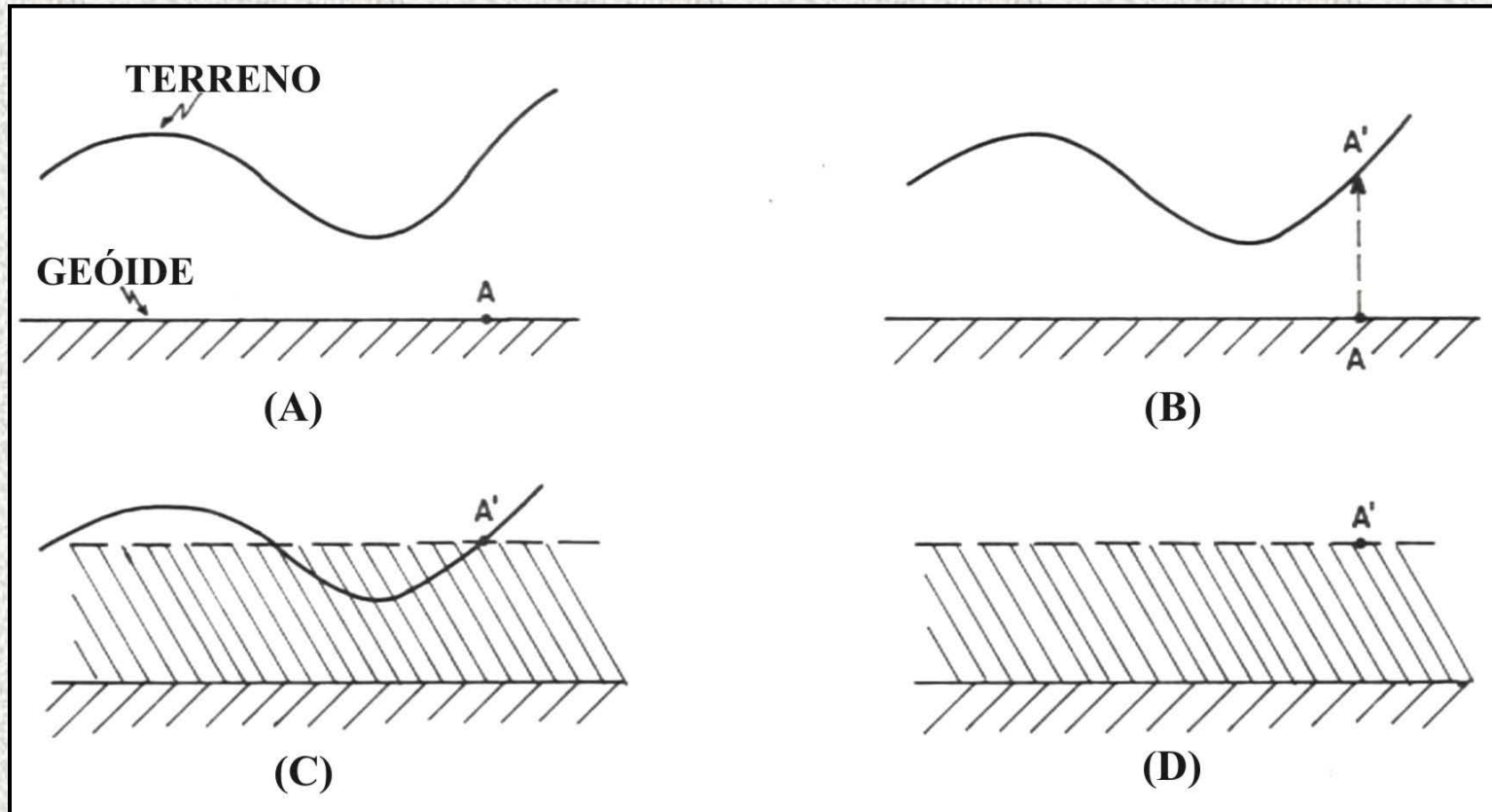
2) Mudança da aceleração centrífuga resultante do movimento da plataformarelativamente ao eixo de rotação da Terra

¹Aceleração de um corpo em movimento devido à rotação da Terra:

$$A_c = 2 * \omega * v * \text{sen} L$$

ω = velocidade angular da Terra; v = velocidade do corpo; L = latitude

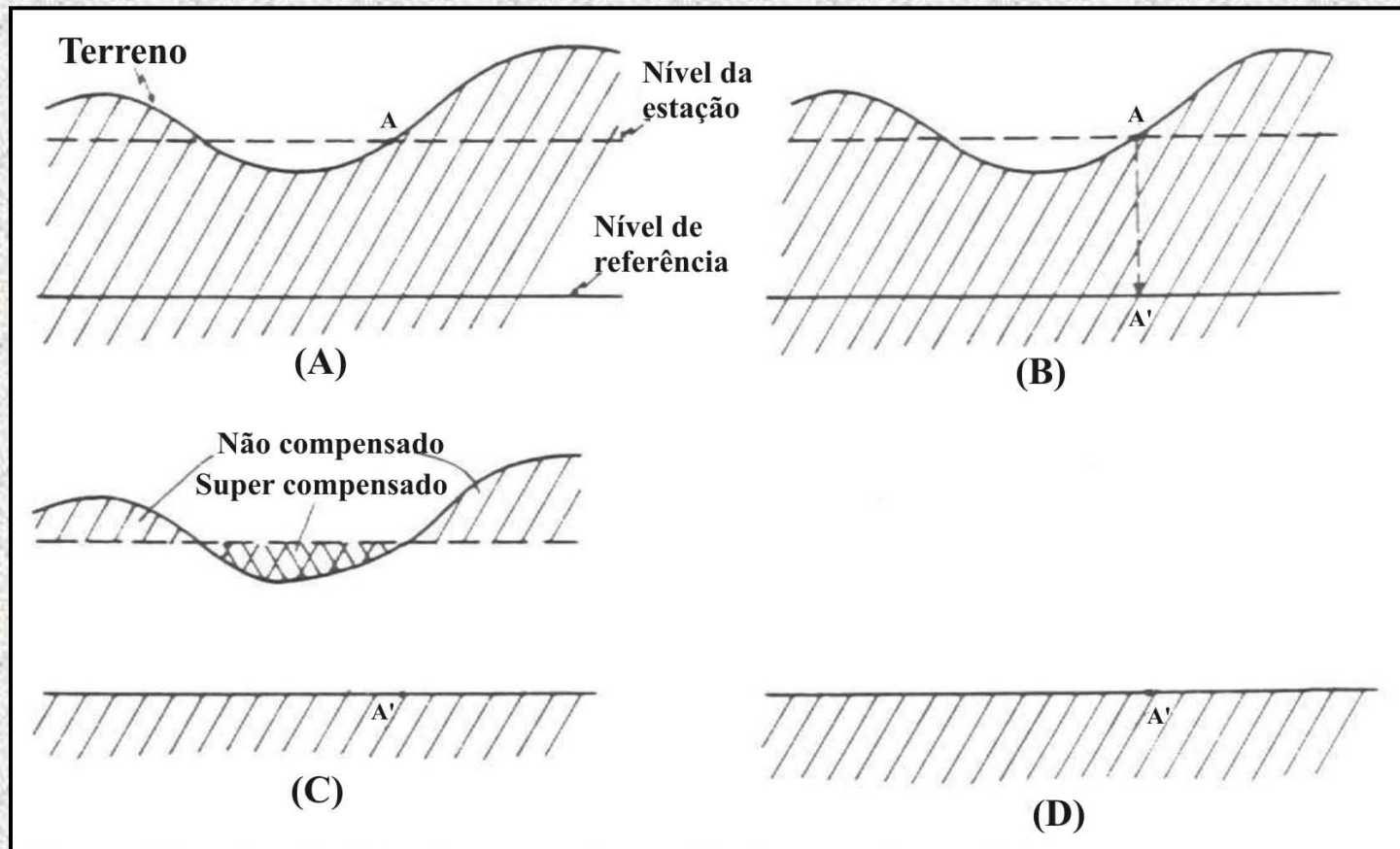
Redução ao Geóide



Visualização física das correções gravimétricas (redução de g_n para g_{nr})

(a) situação original; (b) correção Ar-Livre; (c) correção Bouguer; (d) correção topográfica

Redução à um nível qualquer



Visualização física das correções gravimétricas

(a) situação original; (b) correção Ar-Livre; (c) correção Bouguer; (d) correção topográfica

ANOMALIA BOUGUER

(após correções de maré, deriva e latitude)



$$\Delta g_B = g_{\text{obs}} - g_{\text{nr}}$$

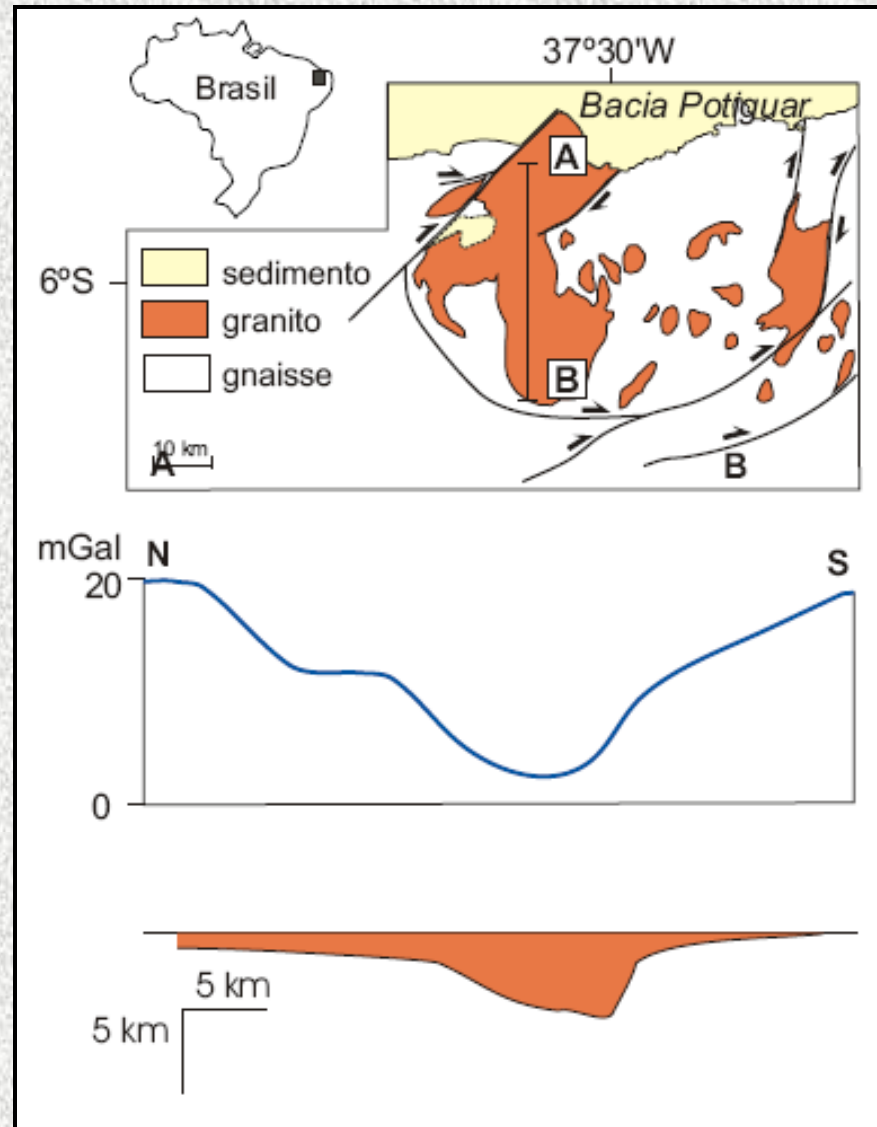
$$\Delta g_B = g_{\text{obs}} - (g_n - C_{\text{AL}} + C_B - C_T)$$

$$\Delta g_B = g_{\text{obs}} - (g_n - 0.3086h + 0.04192\rho h - T\rho)$$

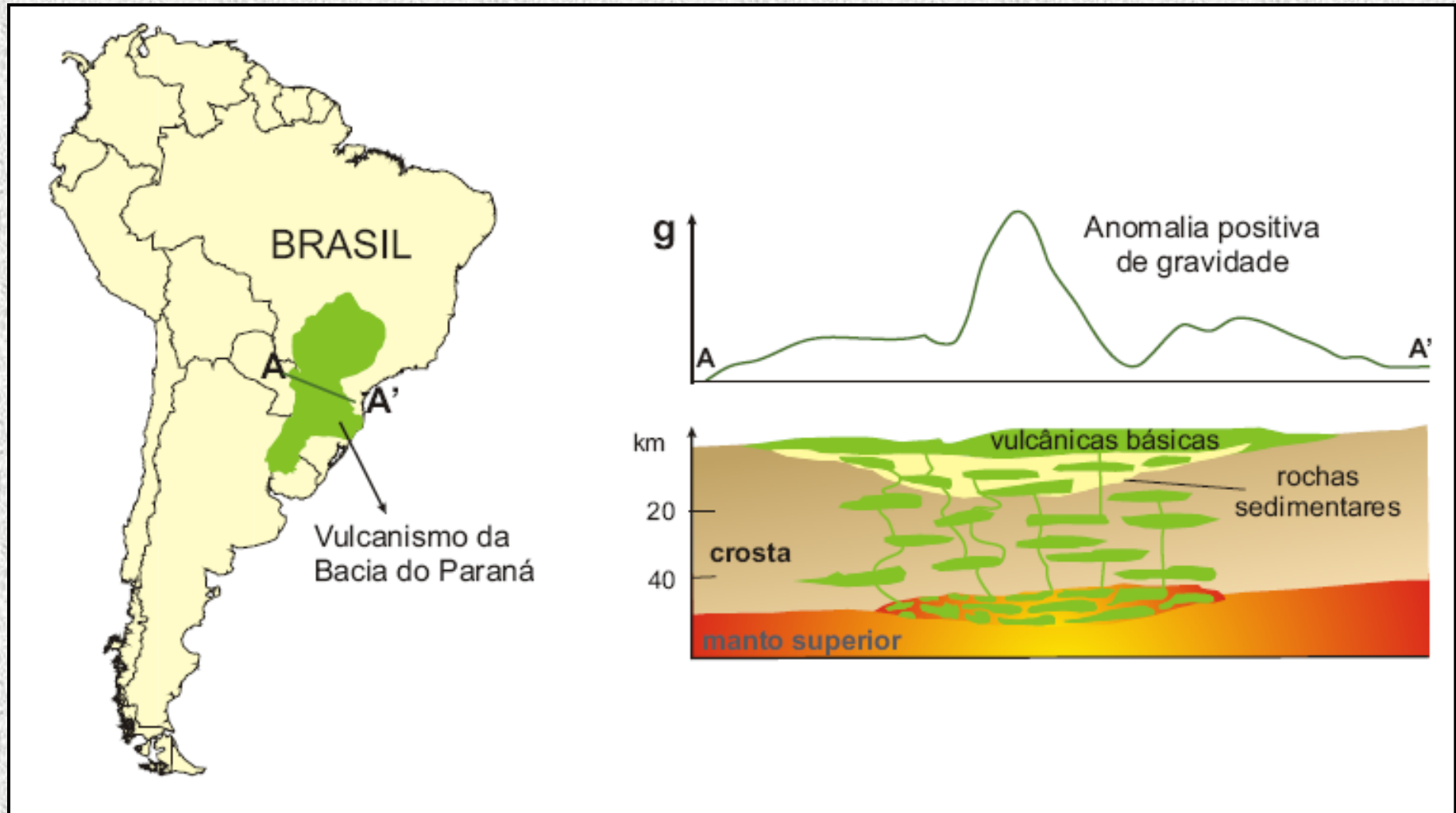
$$\Delta g_B = g_{\text{obs}} + 0.3086h - 0.4192\rho h + T\rho - g_n$$

g_n = gravidade normal

g_{nr} = gravidade normal reduzida



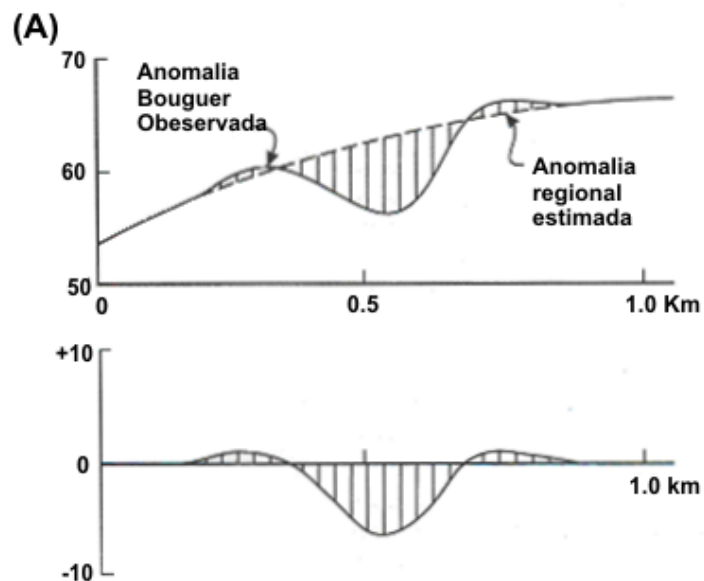
Esquema de anomalia de gravidade de corpo granítico



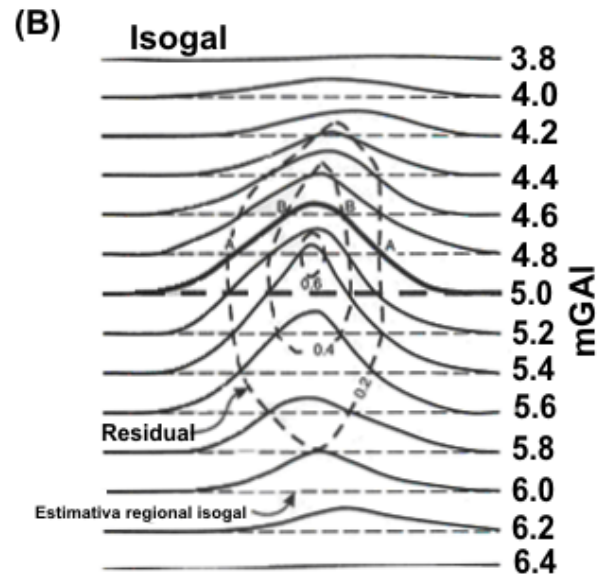
Esquema de anomalia de gravidade na Bacia do Paraná

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

A - perfil



B - planta



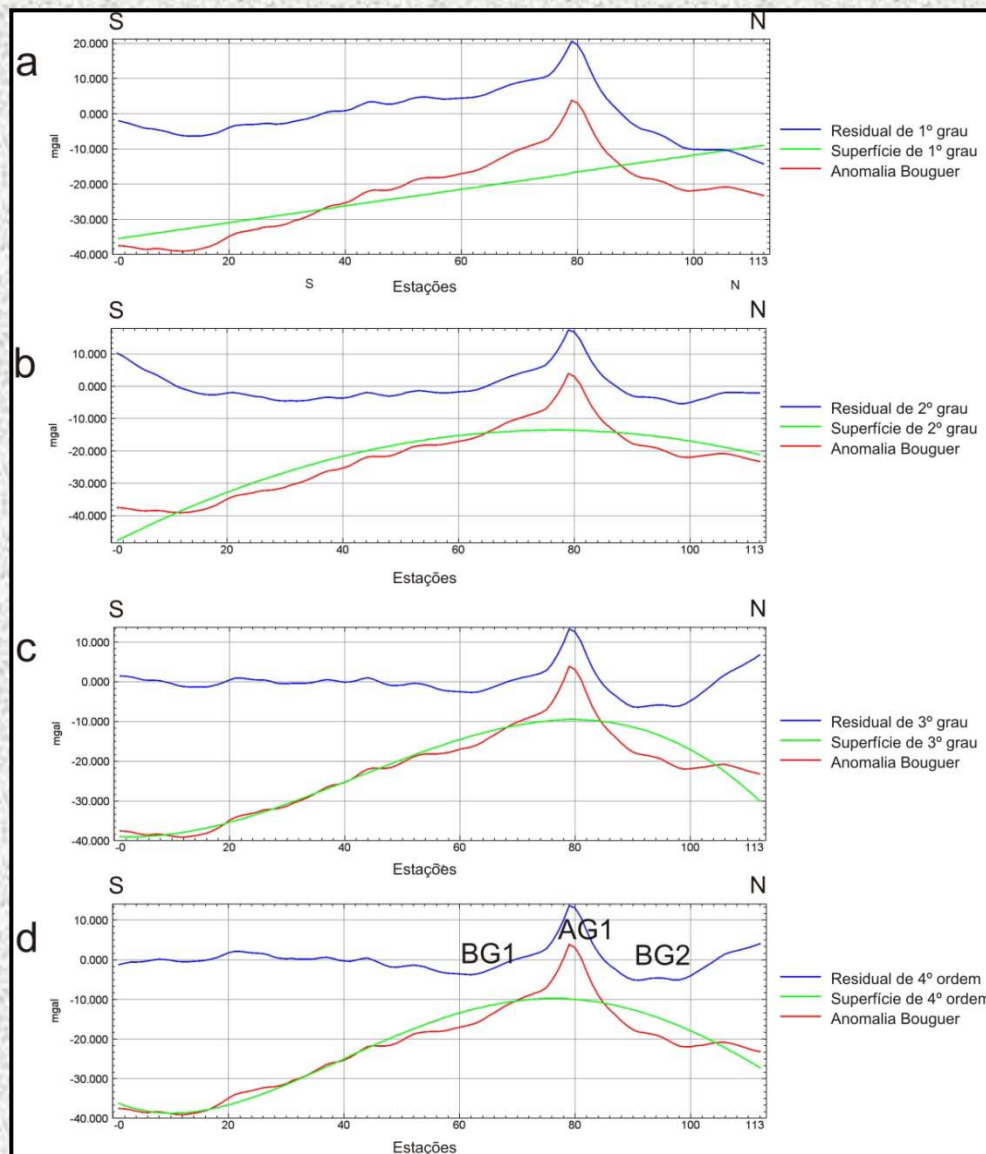
Esquema indicativo da separação regional-residual em gravimetria

1º grau

2º grau

3º grau

4º grau



Separação regional-residual em gravimetria pelo método polinomial

INSTRUMENTAL GRAVIMÉTRICO

Oscilação de pêndulos → $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$
(medidas absolutas e relativas)

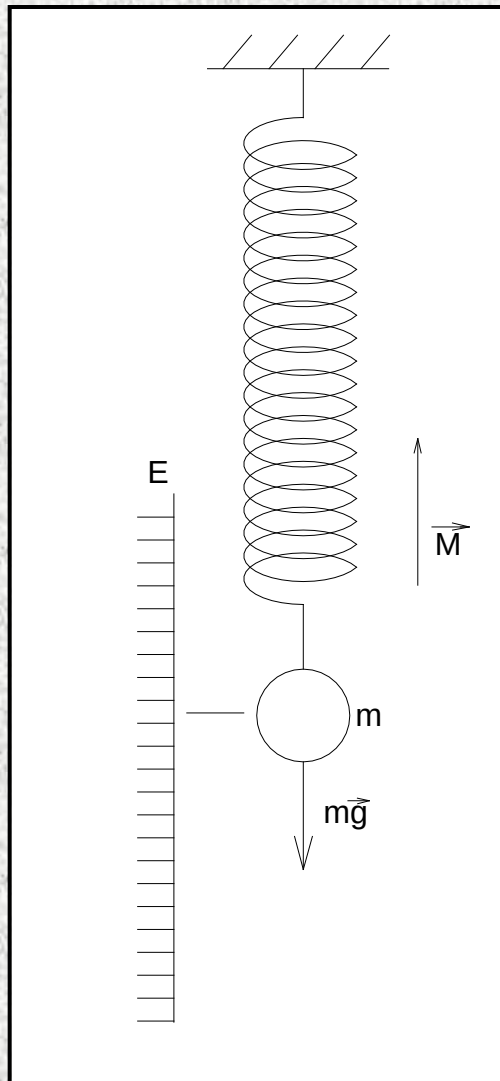
(para se obter g com a precisão mínima de 0.1 mGal requerida em levantamentos de prospecção é necessário conhecer o comprimento de um pêndulo de 1 metro com erro máximo de $0.1\mu\text{m}$ e a oscilação com 5×10^{-8} segundos)

Queda livre dos corpos → $s = \frac{1}{2}gt^2$
(medidas absolutas e relativas)

(para se obter g com a precisão mínima de 0.1 mGal requerida em levantamentos de prospecção espaço de 1 metro deve ser determinado com acurácia de $0.1\mu\text{m}$ e o tempo de queda com 2×10^{-8} segundos)

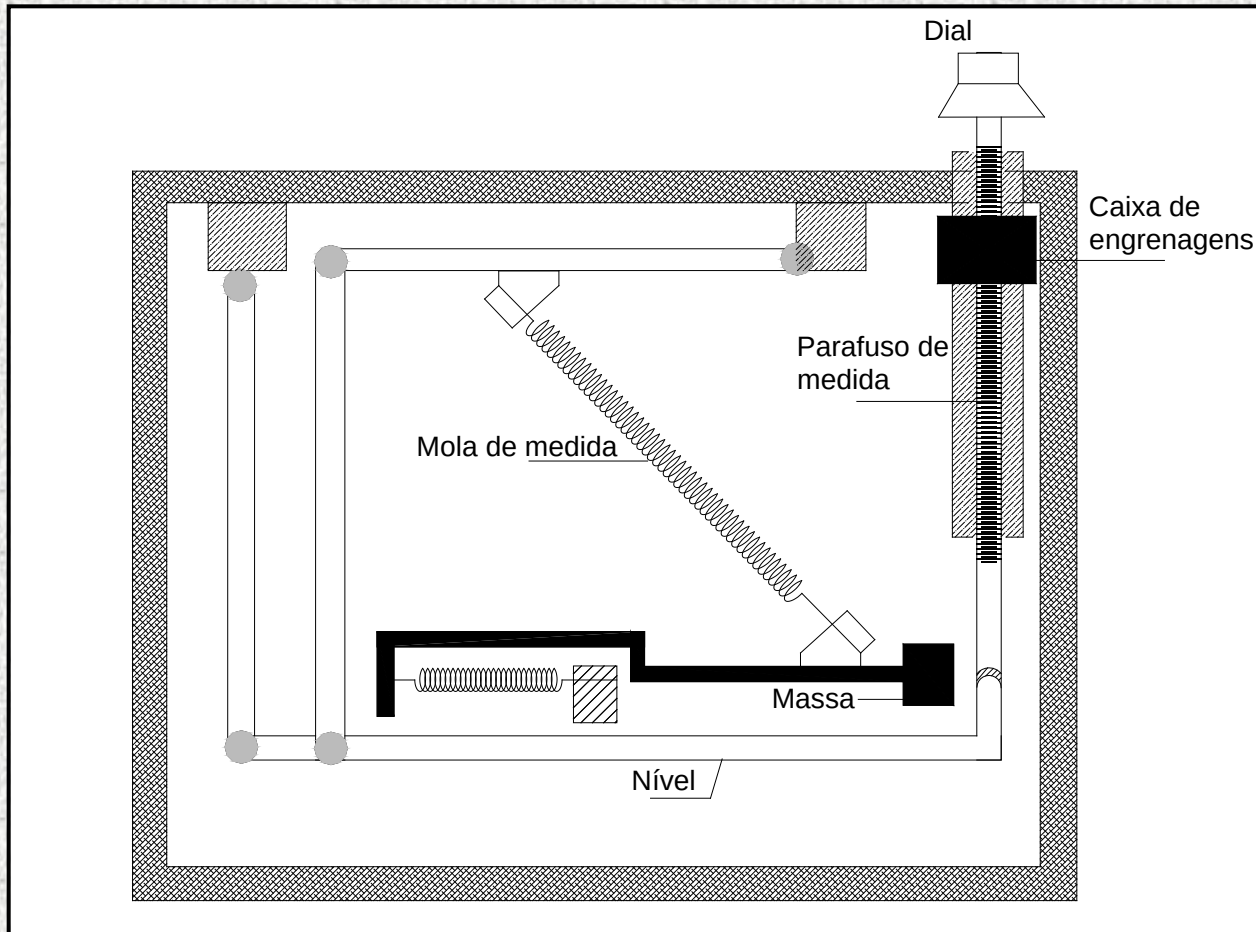
Gravímetros (balança de mola) → $F = \delta(l - l_0) = mg$
(só medidas relativas)

Gravímetros analógicos: Worden e Lacoste & Romberg; Gravímetros digitais: Scintrex (precisão: 0.001-0.005 mGal)



$$\delta g = C \cdot \delta l = C \cdot (E_2 - E_1)$$

Esquema de um sistema massa-mola



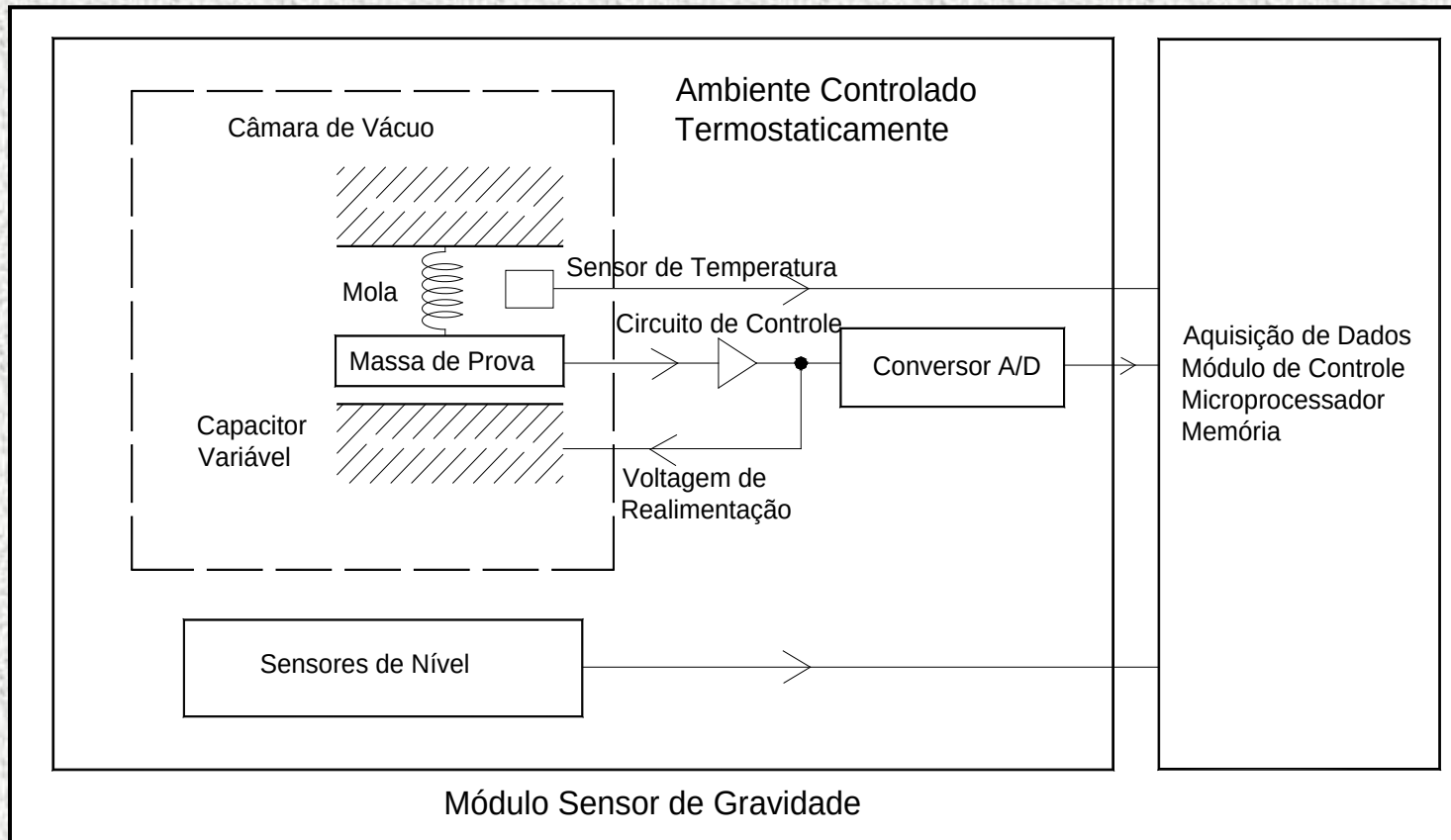
**Esquema de construção do gravímetro LaCoste & Romberg
(Fonte: adaptado de Lacoste & Romberg)**

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



Gravímetro Lacoste & Romberg (Foto de Jair Silveira 2006)

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



**Esquema de construção do gravímetro digital Scintrex
(Fonte: adaptado de Scintrex)**

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



Gravímetro Scintrex CG-3 (Foto de Jair Silveira, 2006)

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

Densidade de rochas ígneas

Rochas média (g/cm ³)	Variação da densidade (g/cm ³)	Densidade
ÍGNEAS:		
Obsidiana	2,20-2,40	2,30
Riolito	2,35-2,70	2,52
Dacito	2,35-2,80	2,58
Andesito	2,40-2,80	2,61
Granito	2,50-2,81	2,64
Granodiorito	2,67-2,79	2,73
Sienito	2,60-2,95	2,77
Diorito	2,72-2,99	2,85
Lavas	2,80-3,00	2,90
Diabásio	2,50-3,20	2,91
Norito	2,70-3,24	2,92
Basalto	2,70-3,30	2,99
Gabro	2,70-3,50	3,03
Peridotito	2,78-3,37	3,15
Piroxenito	2,93-3,34	3,17
Ácidas	2,30-3,11	2,61
Básicas	2,09-3,17	2,79

Densidade de rochas metamórficas

Rochas	Variação da densidade (g/cm ³)	Densidade média (g/cm ³)
METAMÓRFICAS:		
Quartzito	2,50-2,70	2,60
Xisto	2,39-2,90	2,64
Granulito	2,52-2,73	2,65
Filito	2,68-2,80	2,74
Mármore	2,60-2,90	2,75
Ardósia	2,70-2,90	2,79
Gnaisse	2,59-3,00	2,80
Anfibolito	2,90-3,04	2,96

Densidade de sedimentos e rochas sedimentares

	Variação da densidade (g/cm ³)		Densidade média (g/cm ³)	
	poros com fluido	poros sem fluido	poros com fluido	poros sem fluido
Solo	1,20-2,40	1,00-2,00	1,92	1,46
Aluvião	1,96-2,00	1,50-1,60	1,98	1,54
Areia	1,70-2,30	1,40-1,80	2,00	1,60
Cascalho	1,70-2,40	1,40-2,20	2,00	1,95
Argila	1,63-2,60	1,30-2,40	2,21	1,70
Arenito	1,61-2,76	1,60-2,68	2,35	2,24
Folhelho	1,77-3,20	1,56-3,20	2,40	2,10
Calcário	1,93-2,90	1,74-2,76	2,55	2,11
Dolomita	2,28-2,90	2,04-2,54	2,70	2,30

Densidade de minerais

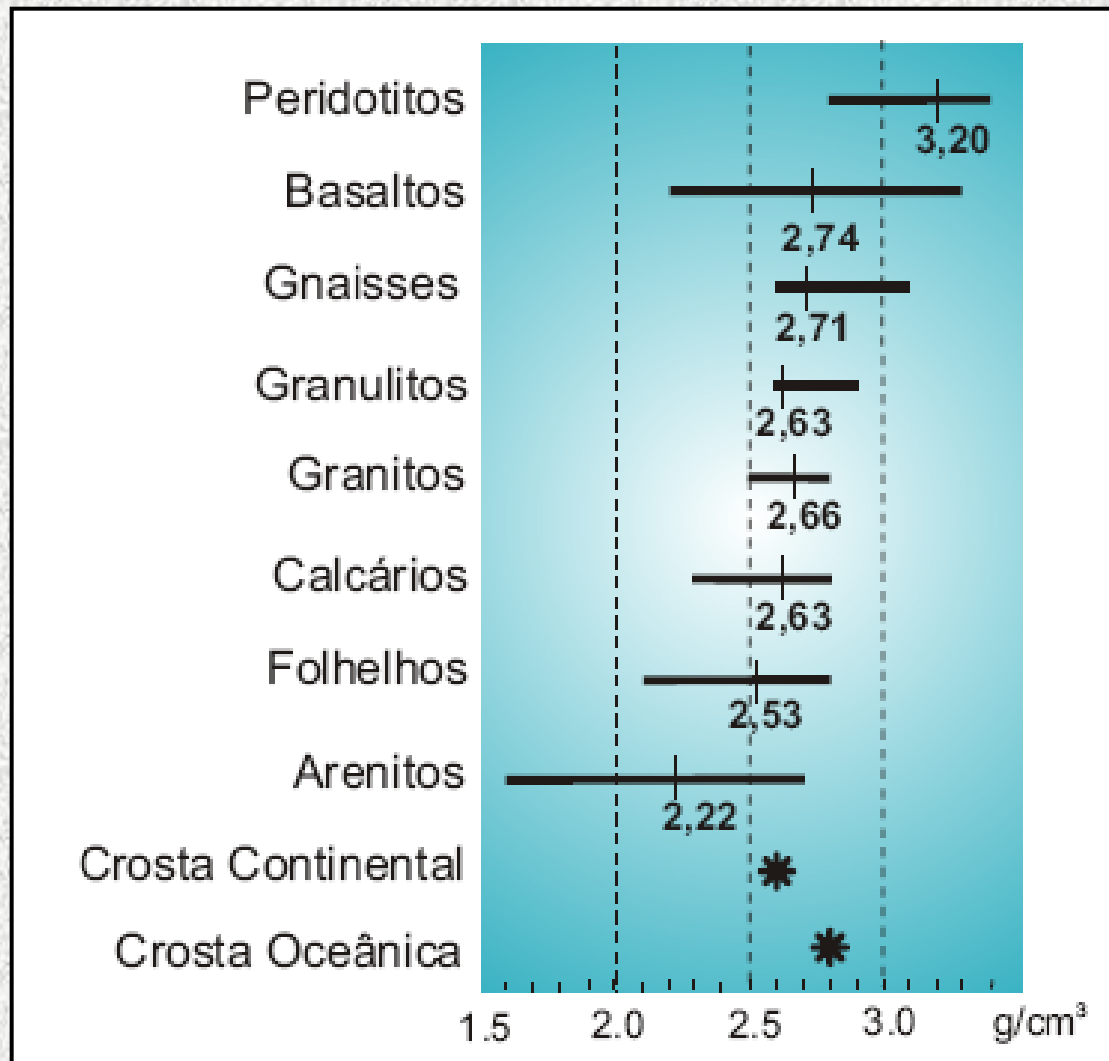
Mineral (g/cm ³)	Variação da densidade (g/cm ³)	Densidade média
Linhito [C]	1,10-1,25	1,19
Antracito [C]	1,34-1,60	1,50
Grafita [C]	1,90-2,30	2,15
Gipsita [CaSO ₄ .2H ₂ O]	2,20-2,60	2,35
Bauxita [hidróx. De Al]	2,30-2,55	2,45
Quartzo [SiO ₂]	2,50-2,70	2,65
Talco [Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂]	2,70-2,80	2,71
Fluorita [CaF ₂]	3,01-3,25	3,14
Diamante [C]	—	3,52
Barita [BaSO ₄]	4,30-4,70	4,47
Ouro [Au]	15,60-19,40	—
Cromita [FeCr ₂ O ₄]	4,30-4,60	4,36
Ilmenita [FeTiO ₃]	4,30-5,00	4,67
Magnetita [Fe ₃ O ₄]	4,90-5,20	5,12

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

Densidade de minerais

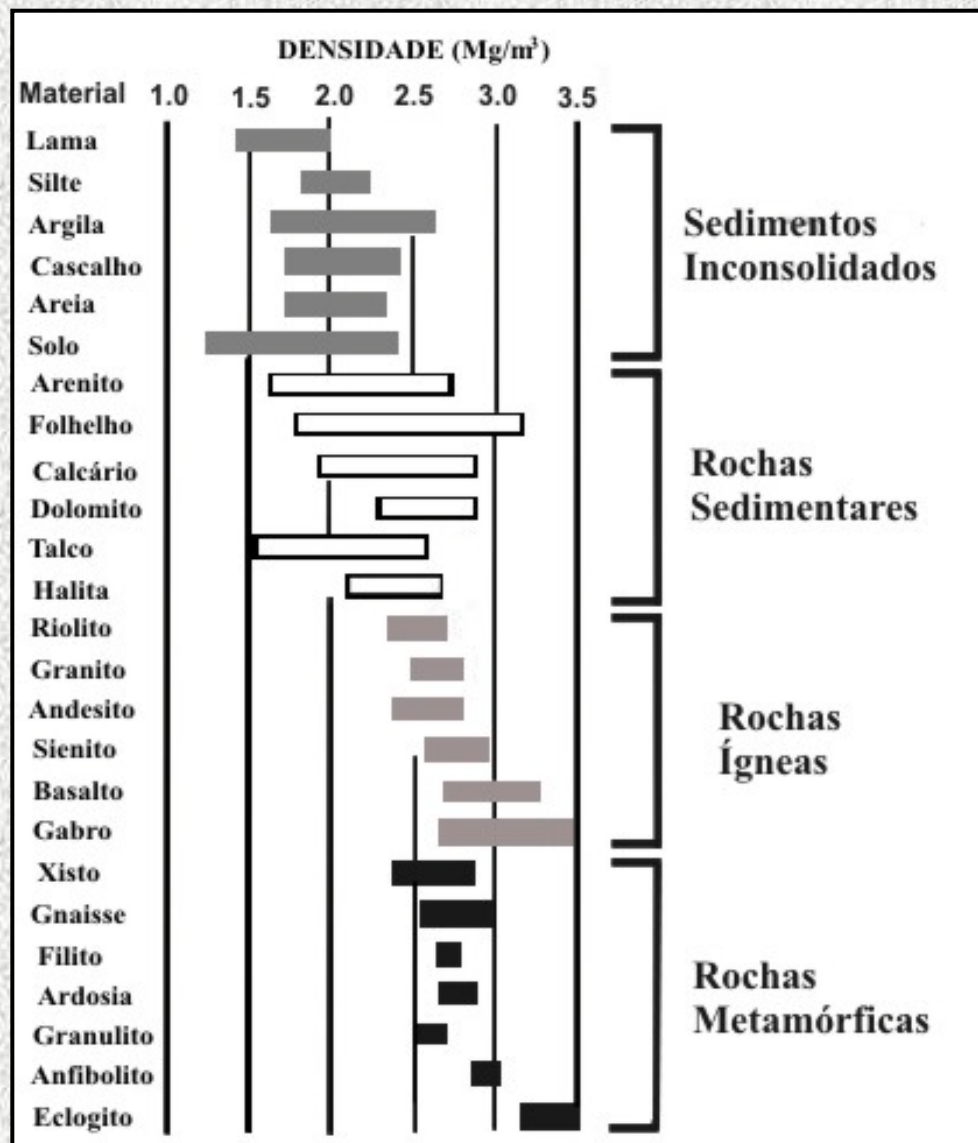
Mineral	Variação da densidade (g/cm ³)	Densidade média (g/cm ³)
Hematita [Fe ₂ O ₃]	4,90-5,30	5,18
Cuprita [Cu ₂ O]	5,70-6,15	5,92
Cassiterita [SnO ₂]	6,80-7,10	6,92
Uraninita [UO ₂]	8,00-9,97	9,17
Blenda [ZnS]	3,50-4,00	3,75
Malaquita [Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂]	3,90-4,03	4,00
Calcopirita [CuFeS ₂]	4,10-4,30	4,20
Pirrotita [FeS]	4,50-4,80	4,65
Molibdenita [MoS ₂]	4,40-4,80	4,70
Pirita [FeS ₂]	4,90-5,20	5,00
Bornita [Cu ₅ FeC ₄]	4,90-5,40	5,10
Calcocita [Cu ₂ S]	5,50-5,80	5,65
Galena [PbS]	7,40-7,60	7,50

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

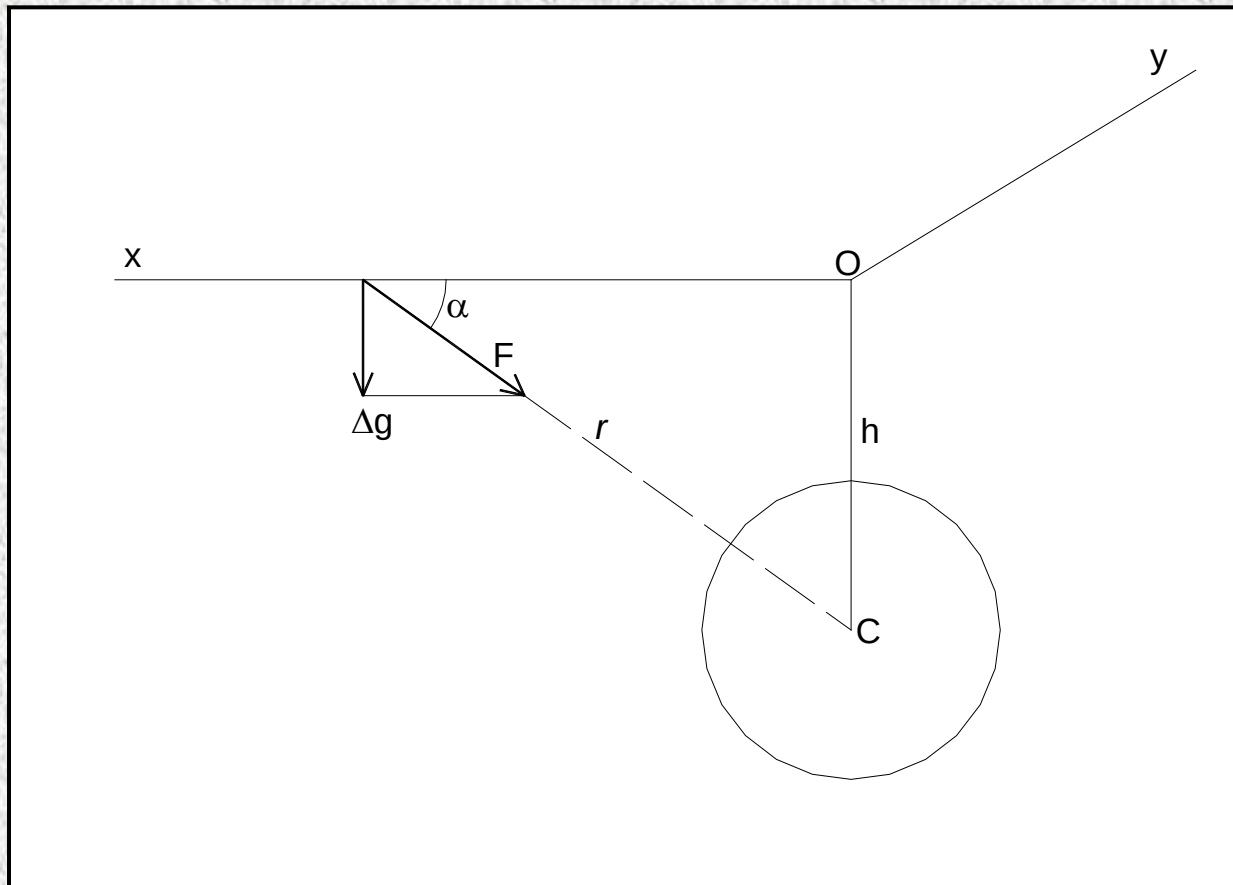


Variações de densidade de algumas rochas e suas médias

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

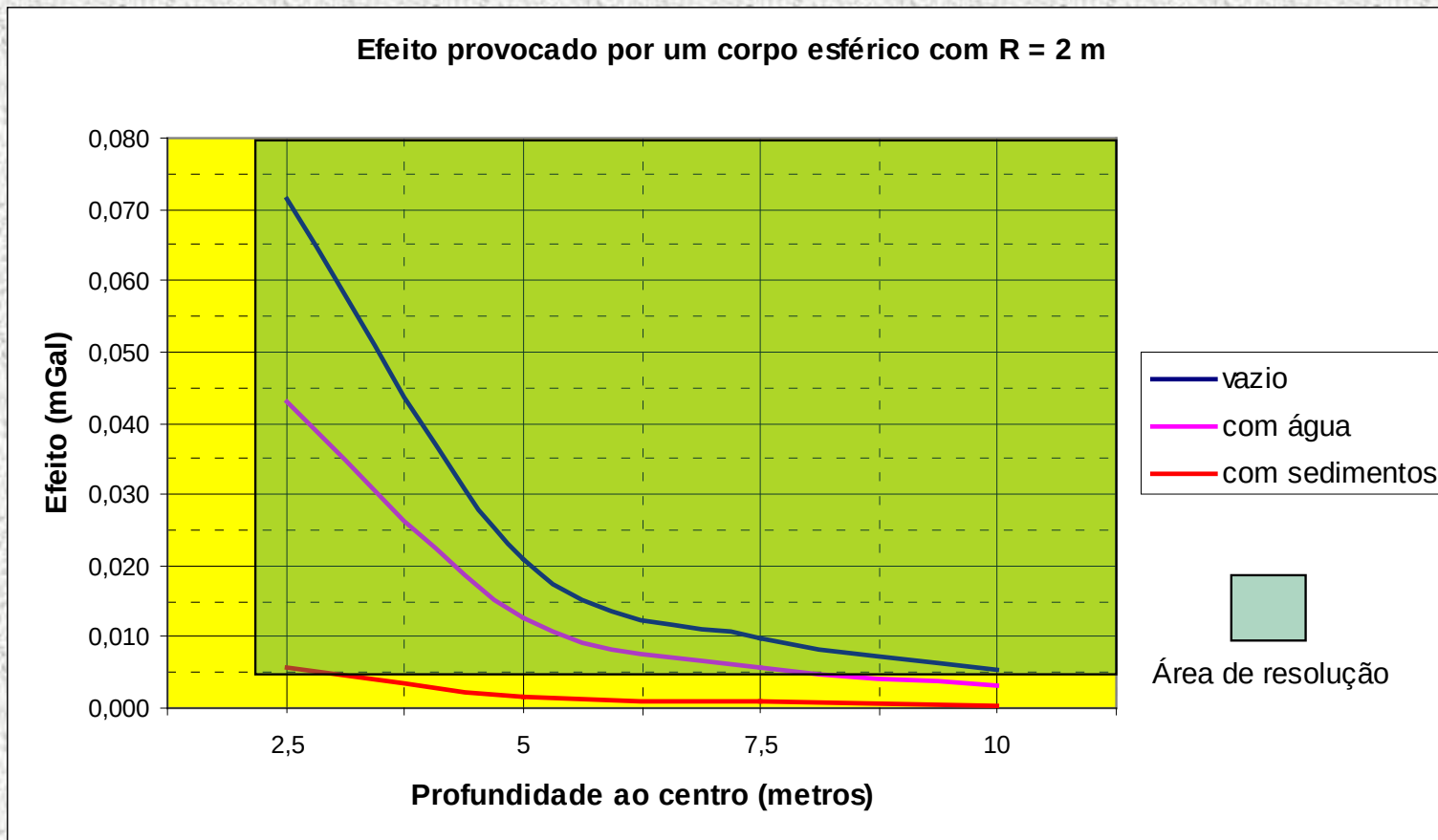


Densidades de sedimentos, rochas sedimentares, ígneas e metamórficas



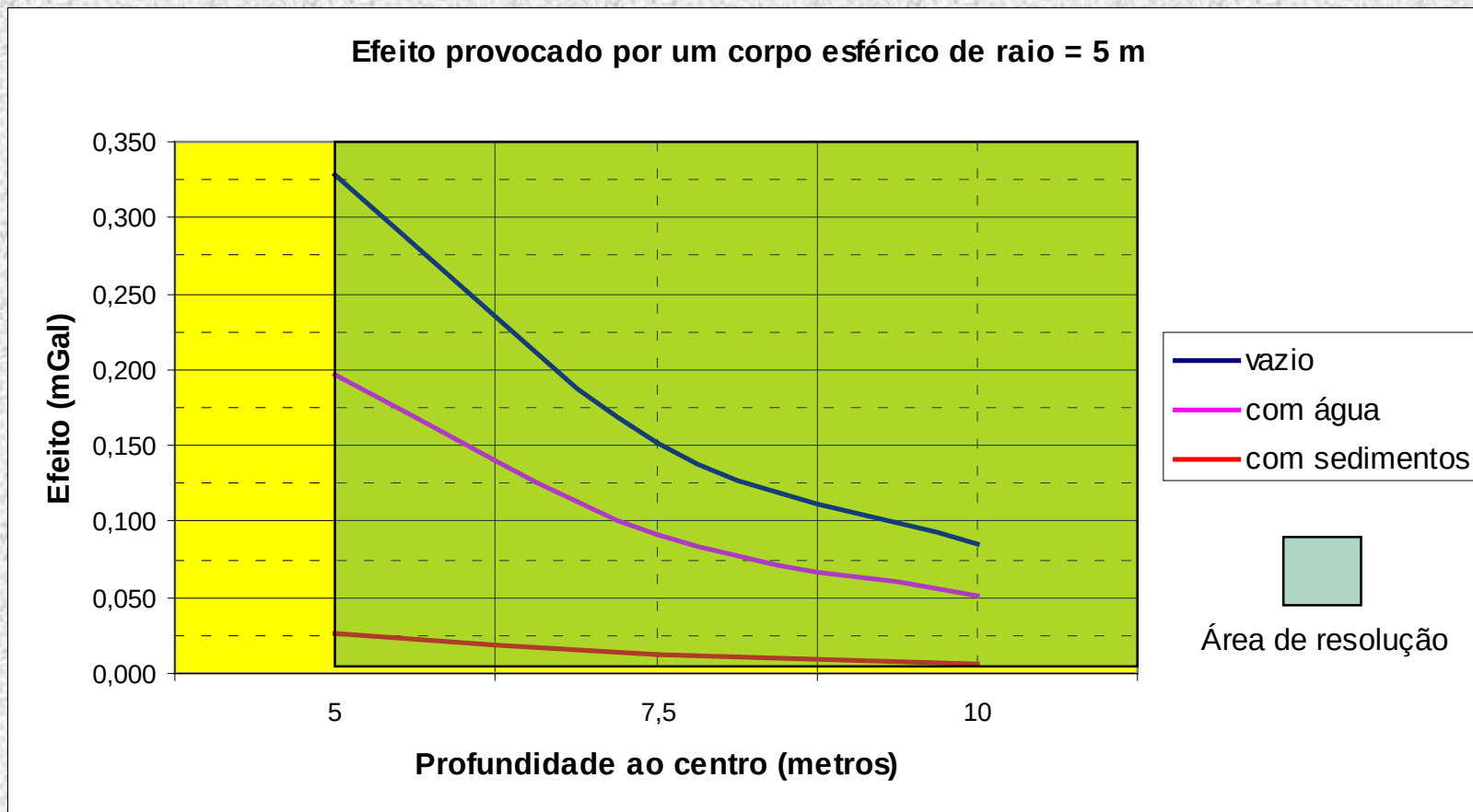
**k é uma constante igual a 0,0279; ρ = contraste de densidade
 a = raio da esfera; z = profundidade ao centro do corpo
 x = distância do centro do corpo ao ponto considerado.**

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



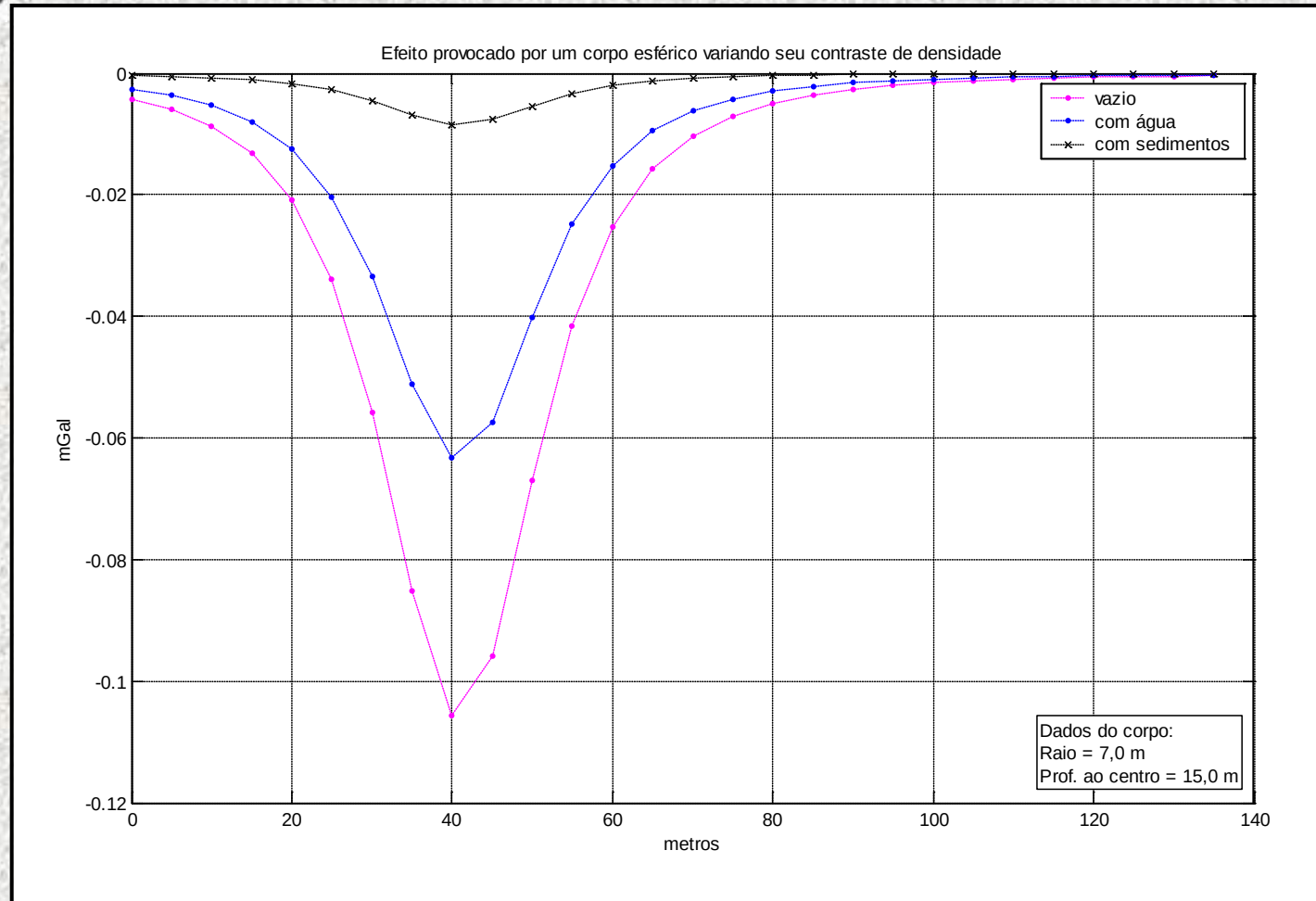
Anomalia gravimétrica de uma cavidade preenchida por ar, água e sedimentos

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



Anomalia gravimétrica de uma cavidade preenchida por ar, água e sedimentos

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011



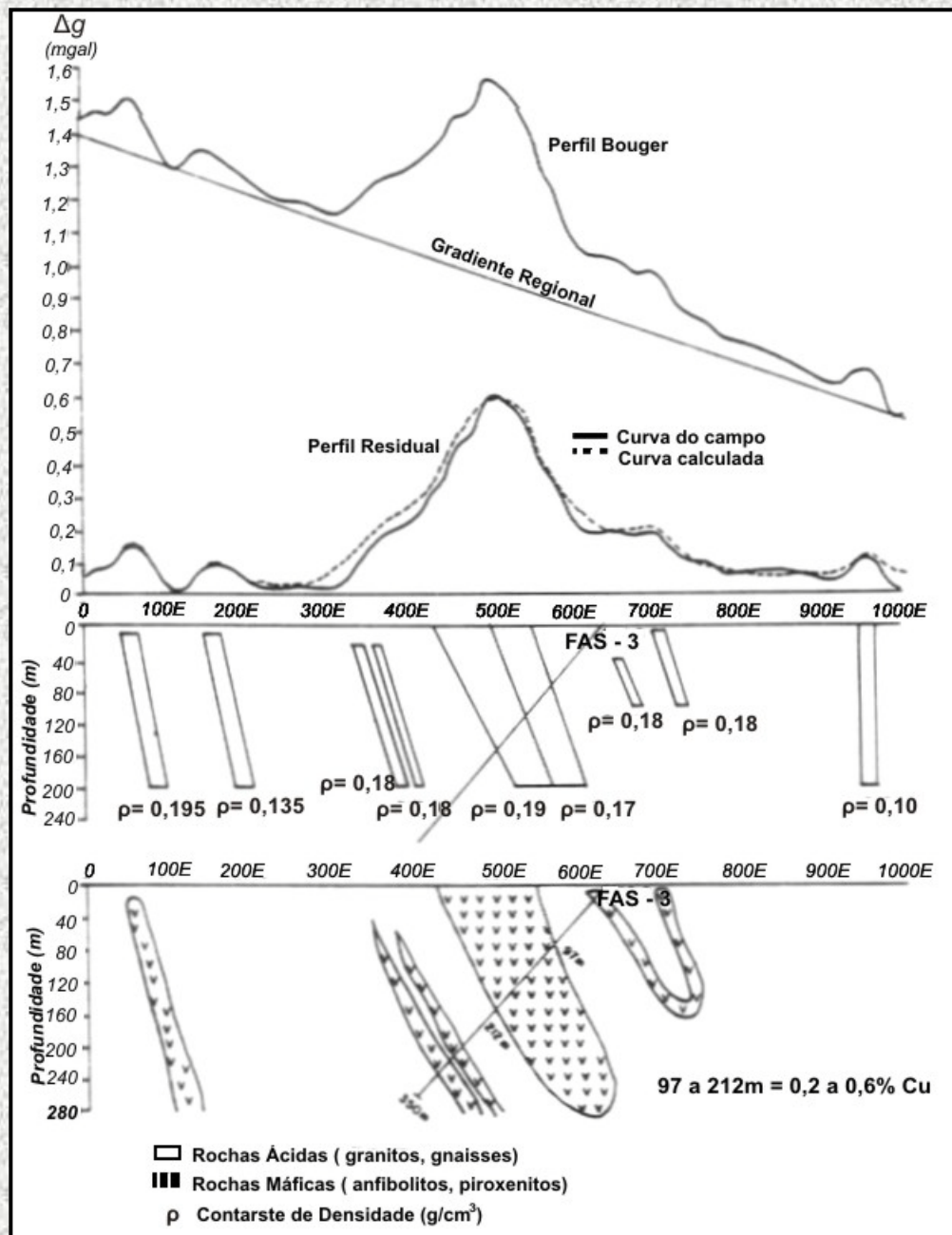
Efeito provocado por um corpo esférico vazio ($\rho = -2,5 \text{ g/cm}^3$),
preenchido por água ($\rho = -1,5 \text{ g/cm}^3$) ou por sedimentos ($\rho = -0,2 \text{ g/cm}^3$)

Campinas, 13 a 17 de junho de 2011

A →

B →

C →



Anomalia Bouguer (A), modelo gravimétrico 2-D (B) e modelo geológico (C)