

CONSTITUIÇÃO DO NÚCLEO DA TERRA

Frederico Machado

Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro
3800 Aveiro

RESUMO

Usando para o interior da Terra o modelo HB₁ de Haddon & Bullen, e admitindo que o material do núcleo tem a composição Fe_{0,9}Ni_{0,1}O_{0,6}, mostra-se que as condições são adequadas para a geração do campo geomagnético. Neste modelo do núcleo o material será certamente um semicondutor com banda proibida de cerca de 7,4 eV (e com eventuais níveis intermédios que facilitem aos electrões os saltos de energia).

ABSTRACT

Using for the Earth's interior the HB₁ model (of Haddon & Bullen), and assuming for the core a chemical composition Fe_{0,9}Ni_{0,1}O_{0,6}, it is shown that the actual conditions are adequate for generating the Earth's magnetic field. The assumed core material is certainly a semiconductor with a forbidden band of about 7.4 eV (and possibly some intermediate levels which facilitate the jumps of electrons between allowed bands).

1. INTRODUÇÃO

O campo geomagnético parece ser uma consequência de movimentos do núcleo terrestre; esta ideia fez aumentar o interesse pelo estudo do núcleo (veja-se Courtillot, 1986).

A constituição química tem sido muito discutida. Os investigadores estão geralmente de acordo sobre os elementos principais que serão ferro e níquel na proporção de 9 para 1, proporção que é análoga à da maioria dos meteoritos metálicos. A densidade desta liga (à pressão atmosférica) é, porém, um tanto alta para se obter a intensidade calculada nos vários modelos do interior da Terra.

Surgiu assim a ideia de que haverá também algum elemento de menor peso atómico, o qual, por considerações geoquímicas, poderá ser enxofre ou oxigénio. Em artigo anterior Machado 1985) considerou-se a vantagem de admitir a adição de oxigénio, visto os óxidos de ferro serem semicondutores (ao contrário do que sucede com os sulfuretos que são bons condutores).

É este aspecto do problema que vai ser aqui novamente discutido, juntamente com as suas implicações na geração do campo magnético terrestre.

2. PROPRIEDADES ELÁSTICAS E TEMPERATURAS DO NÚCLEO

Com base na propagação das ondas sísmicas, têm sido estabelecidos modelos do interior da Terra; um dos últimos é o modelo HB₁ (Haddon & Bullen, 1969) que atende também às chamadas oscilações livres do planeta.

Para este modelo, na parte respeitante ao núcleo (aos vários níveis definidos pelo raio r) vão indicadas no Quadro I as velocidades das ondas longitudinais α e transversais β , e também a densidade d , a pressão p e o módulo de compressão K .

QUADRO I - DADOS SOBRE O NÚCLEO TERRESTRE
(Seg. Hoadon & Bullen, 1969)

r (km)	α (km/s)	β (km/s)	d (g/cm)	p (10^{11} Pa)	k (10^{11} Pa)
3493	8,106	0,000	9,927	1,347	6,527
3371	8,247	0,000	10,121	1,476	6,883
3171	8,496	0,000	10,421	1,686	7,522
2971	8,791	0,000	10,697	1,892	8,266
2771	9,059	0,000	10,948	2,092	8,984
2571	9,307	0,000	11,176	2,284	9,680
2371	9,531	0,000	11,383	2,467	10,340
2171	9,731	0,000	11,570	2,640	10,956
1971	9,907	0,000	11,737	2,802	11,521
1771	10,096	0,000	11,887	2,951	12,115
1571	10,284	0,000	12,017	3,087	12,710
1389	10,468	0,000	12,121	3,198	13,282
1371	10,332	0,000	12,130	3,208	(?)
1250	9,428	0,000	12,197	3,275	(?)
1250	11,188	(3,517)	12,197	3,275	(13,256)
1171	11,205	(3,522)	12,229	3,315	(13,331)
971	11,243	(3,534)	12,301	3,405	(13,501)
771	11,275	(3,544)	12,360	3,480	(13,643)
571	11,300	(3,552)	12,405	3,537	(13,753)
371	11,320	(3,559)	12,437	3,579	(13,837)
171	11,332	(3,562)	12,455	3,602	(13,887)
0	11,338	(3,564)	12,460	3,608	(13,907)

O raio do núcleo interior é aqui $R_1 = 1250$ km e o do exterior $R_2 = 3493$ km.

No núcleo exterior o módulo de compressão é uma função linear da pressão (Fig.1), podendo exprimir-se pela equação.

$$k = k_0 (1 + \beta p) \quad (1)$$

onde $k_0 = 1,4328 \times 10^{11}$ Pa e $\beta = 2,5196 \times 10^{-11}$ Pa⁻¹.

Por seu lado, a densidade é também uma função da pressão

$$d = d_0 (1 + \beta p)^{1/3} \quad (2)$$

o que vai permitir calcular a densidade à pressão zero (ou aproximadamente à pressão atmosférica) $d_0 = 6,584$ g/cm³.

Os valores entre parênteses de β e k , indicados no quadro, foram calculados pelas fórmulas

$$\alpha/\beta = 3,1811 \quad (3)$$

e

$$k = d(\alpha^2 - 4\beta^2/3) \quad (4)$$

que correspondem a um coeficiente de Poisson (do núcleo interior) $V = 0,445$. Um valor tão alto de V faz suspeitar comportamento anelástico devido, por exemplo, a fusão parcial; isto concorda, de certo modo, com a sugestão de *Choy & Cormier* (1983).

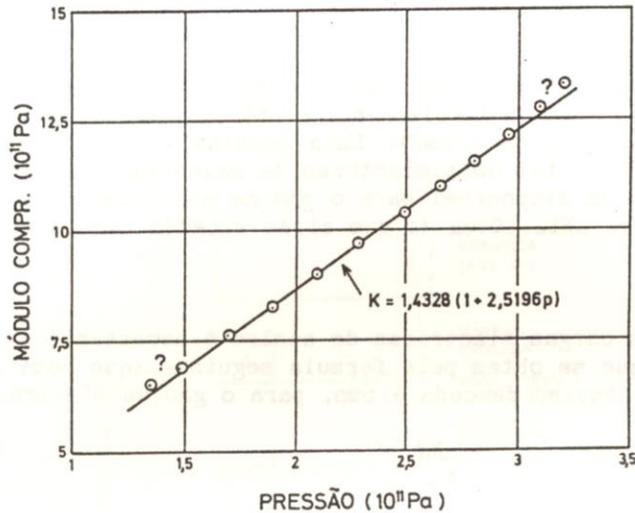


Fig. 1 - Ajustamento linear do módulo k em função da pressão

No núcleo exterior o material deve estar no estado líquido ($\beta = 0$), o que corresponde como se sabe, a $V = 0,5$. As densidades do modelo HB, não têm variação apreciável de densidade ao nível $r = 1250$ km, apesar da mudança de líquido para sólido. A relação (3) foi também escolhida para não haver mudança brusca nos valores de K . (veja-se sobre este assunto *Bolt*, 1987).

As temperaturas do núcleo exterior devem ajustar-se ao chamado gradiente adiabático, correspondendo à seguinte equação (*Machado*, 1964)

$$T = T_0 (1 + \beta p)^{0,5 - 1/6\beta k_0} \quad (5)$$

onde T e T_0 são temperaturas em graus Kelvin. Os valores de T vão indicados adiante no Quadro II; para o núcleo interior pode admitir-se, com razoável aproximação, uma temperatura constante.

3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES ELÉCTRICAS

Conforme indicado já na Introdução, o material do núcleo deve ser constituído não só por ferro e níquel, mas também por um elemento mais leve (enxofre ou oxigênio).

Os sulfuretos de ferro (e de níquel) são bons condutores da electricidade; por seu lado, os óxidos correspondentes são semicondutores. No artigo já citado (*Machado*, 1985) mostrou-se que, se o material do núcleo for um semicondutor, podem existir cargas eléctricas positivas ou negativas distribuídas por todo o núcleo, devidas ao efeito da temperatura muito alta. Quando a rotação do núcleo interior for um pouco diferente da do manto (por avanço ou atraso) esta rotação diferencial fará girar aquelas cargas eléctricas (em relação ao manto terrestre) e produzirá o campo magnético que é medido à superfícies (portanto em referencial ligado ao manto).

Naquele artigo admitiu-se que o núcleo era formado por uma combinação (?) de duas moléculas do sexquióxido $(Fe_{0,9}Ni_{0,1})_2O_3$ com uma de ferro níquel $Fe_{0,9}Ni_{0,1}$. A hematite (Fe_2O_3) é um semicondutor conhecido, não tendo parecido, então, conveniente uma hipótese que se afastasse muito desta última fórmula química.

A quantidade de oxigênio no composto $Fe_{0,9}Ni_{0,1}O_{1,2}$ parece, porém, ser excessiva

para se obter uma densidade (à pressão atmosférica) vizinha de 6,5 g/cm³:

Outros autores têm preferido um composto com menos oxigénio. Bullen (1973) sugeriu que o núcleo exterior (fundido) possa ser constituído por Fe₂O (ou FeO_{0,5}), sendo o núcleo interior (sólido) constituído por ferro não oxidado, com eventual adição de níquel. Ringwood (1979, p.22 e seg.) supõe que o material do núcleo resulte da dissolução de FeO em ferro no estado de fusão: segundo esse autor a dissolução pode ir até 44±16% (em peso) de Fe.

Seguindo estes autores, vamos agora considerar um material com a fórmula Fe_{0,9}Ni_{0,1}O_{0,5} que tem peso molecular M_{m=1} = 64,125 kg e ao qual se atribui a densidade do modelo HB₁ (d₀=6,584 g/cm³). Esta escolha tem ainda a seguinte vantagem: o ferro (tal como o níquel) tem dois electrões de valência; o oxigénio O_{0,5} vai fixar um deles ficando apenas um disponível para o gás de electrões. A situação não era tão clara para o composto Fe_{0,9}Ni_{0,1}O_{1,2} (o que aliás sucedia também com a hematite).

Para o cálculo das cargas eléctricas do núcleo é necessária a energia de Fermi à pressão zero (E_{F<0>}) que se obtém pela fórmula seguinte (que admite uma contribuição de um só electrão de valência, de cada átomo, para o gás de electrões).

$$E_{F<0>} = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3}{8\pi} \frac{Nd_0}{M_{m=1}} \right)^{2/3} \quad (6)$$

onde h é a constante de Planck, m a massa do electrão e N o número de Avogadro. Com $h^2/2m = 2,4099 \times 10^{-37} \text{ J}^2 \text{ s}^2/\text{kg}$ e $N = 6,023 \times 10^{26} (\text{mol} \cdot \text{kg})^{-1}$,

vem E_{F<0>} = 5,703 e V.

A qualquer pressão será

$$E_F = E_{F<0>} \left(\frac{d}{d_0} \right)^{2/3} \quad (7)$$

A diferença das energias nos limites da banda proibida (E_p) varia também com a pressão, o mesmo acontecendo com a espessura (ΔE) do nível intermédio (que se supõe situado a meio da banda proibida). Vamos admitir, como anteriormente, as relações

$$E_p = E_{p<0>} \left(\frac{d}{d_0} \right)^{1/3} \quad \text{e} \quad \Delta E = \Delta E_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{1/3} \quad (8)$$

No Modelo de material aqui considerado o número de electrões que podem atingir a banda superior é aproximadamente (cf. Machado, 1985).

$$n = C (E_F + E_p)^{1/2} KT. e^{-E_p/KT} \left(1 + \frac{0,48KT}{E_F + E_p} \right) \quad (9)$$

onde K é a constante de Boltzmann e C é uma constante dada por

$$C = \frac{3Nd_0}{2M_{m=1} E_F^{3/2}(0)} \quad (10)$$

Na aproximação da expressão (9) supõe-se que $e^{E_p/KT}$ é muito grande em relação à unidade; isto é verdadeiro para $K = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, $E_p = 7$ e $T = 5000 \text{ K}$ (que é o valor mais desfavorável).

Por seu lado, o número de electrões que pode ocupar o nível intermédio é

$$\Delta g = C (E_F + E_p/2)^{1/2} \Delta E \quad (11)$$

com C dado também por (10).

Admite-se que o estado de equilíbrio é atingido quando os poucos electrões que ocupavam a banda superior (veja-se a Fig.2) perderam energia, por colisões com a estrutura iónica, e desceram para o nível intermédio que ficará completamente preenchido.

A carga então existente na unidade de volume será

$$\rho = (n - \Delta g) e_0 \quad (12)$$

sendo e_0 a carga dum electrão.

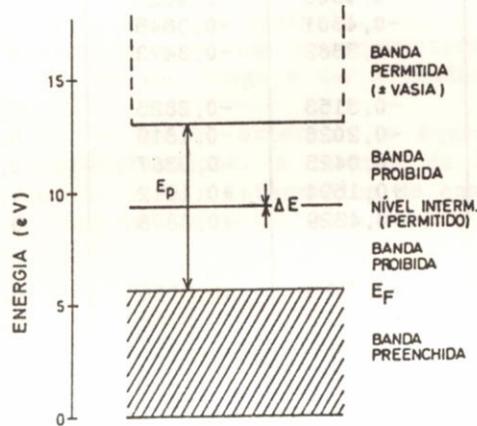


Fig. 2 - Bandas de energia do material do núcleo (os valores marcados correspondem à pressão zero).

Como o núcleo, no seu conjunto, é electricamente neutro, deverá ser

$$4\pi \int_0^{R_2} \rho r^2 dr = 0 \quad (13)$$

Quanto às temperaturas do núcleo, necessárias para o cálculo de (9), podem determinar-se pela equação (5), desde que se conheça T_0 ou a temperatura a qualquer nível conhecido. No limite entre o núcleo interior sólido e o núcleo exterior líquido, admite-se que a temperatura corresponda ao ponto de fusão do material. O assunto foi discutido por Poirier (1986) que propõe, para esse limite, a temperatura de fusão de 5000 K (atendendo já ao abaixamento devido à presença de oxigénio).

Usando $e_0 = 1,602 \times 10^{-19}$ Coul. pode-se calcular, por (12), a densidade de carga eléctrica a cada nível do núcleo (Quadro II.; veja-se também a Fig. 3).

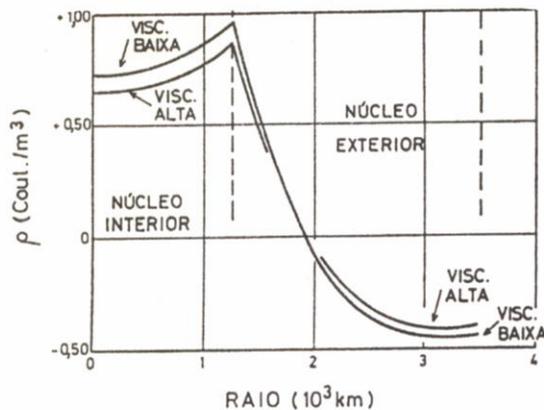


Fig.3 - Densidade de carga eléctrica no núcleo terrestre

QUADRO II - ELEMENTOS PARA O CALCULO DO MOMENTO MAGNÉTICO

r (km)	T (k)	ρ (Coul/m ³)		ω/ω ₀	
		Visc. baixa	Visc. alta	Visc. baixa	Visc. alta
3371	3684	-0,4540	-0,4053	0,0000	0,0054
3171	3866	-0,4563	-0,4074	0,0000	0,0162
2971	4035	-0,4503	-0,4023	0,0000	0,0300
2771	4191	-0,4301	-0,3845	0,0000	0,0482
2571	4335	-0,3882	-0,3473	0,0000	0,0724
2371	4467	-0,3153	-0,2825	0,0000	0,1055
2171	4587	-0,2026	-0,1819	0,0000	0,1520
1971	4696	-0,0425	-0,0387	0,0000	0,2193
1771	4794	+0,1694	+0,1512	0,0000	0,3205
1571	4882	+0,4329	+0,3878	0,0000	0,4799
1371	4960	+0,7429	+0,6666	0,0000	0,7463
1171	5000	+0,9126	+0,8188	1,0000	1,0000
971	5000	+0,8509	+0,7637	1,0000	1,0000
771	5000	+0,8037	+0,7212	1,0000	1,0000
571	5000	+0,7690	+0,6900	1,0000	1,0000
371	5000	+0,7461	+0,6694	1,0000	1,0000
171	5000	+0,7342	+0,6586	1,0000	1,0000

4. ROTAÇÃO DO NÚCLEO

Conforme discutido anteriormente, considera-se que o campo geomagnético é gerado pela rotação do núcleo interior relativamente ao manto. Actualmente a velocidade angular parece ser $\omega_0 = -1,0 \times 10^{-10}$ rad/s (o sinal menos significando que a rotação é para oeste).

Esta rotação vai arrastar o líquido do núcleo exterior, só se anulando, a velocidade angular ω no contacto com o manto. A cada nível r , ω será aproximadamente (Lamb, 1945, p. 589).

$$\omega = \omega_0 \frac{R_2^3 - r^3}{R_2^3 - R_1^3} \left(\frac{R_2^3 - 1}{r^3} \right) \quad (14)$$

Sendo R_1 e R_2 os raios do núcleo interior e exterior, respectivamente. Para $r < R_1$, é sempre $\omega = \omega_0$.

Esta equação é válida para

$$\frac{\omega_0 R_2^2}{n} \frac{d}{r} \left(1 - \frac{R_1^3}{R_2^3} \ll 1 \right) \quad (15)$$

onde n é a viscosidade. Esta condição implica ser $n > 10^{13}$ Pa.s.

A viscosidade do núcleo exterior parece ser, porém, da ordem de 10^4 Pa.s (Machado, no prelo), o que invalida a equação (14). Para viscosidades muito baixas, o líquido é pouco arrastado e a sua velocidade angular deve aproximar-se de zero.

A velocidade angular real do núcleo líquido deve estar, portanto, compreendida entre zero e o valor (14).

Conhecida a velocidade ω , o efeito da rotação do núcleo interior pode equipar-se (com aproximação aceitável) a um dipolo magnético de momento (Machado, 1985).

$$M = 4\pi \int_0^{R_z} \omega r^2 dr \quad (16)$$

O nosso problema consistirá então em procurar uma solução para ρ , dado por (12), que satisfaça a (13) e que dê para (16) o valor $M = 7,94 \times 10^{22} \text{ Am}^2$, correspondente aproximadamente ao momento magnético actual da Terra (Stacey, 1977, p. 211).

Supõe-se conhecida a energia de Fermi $E_{F(\infty)}$ e vai-se ajustar a espessura ΔE da banda intermédia e a largura E_p da banda proibida.

O cálculo foi programado para um microcomputador Radio Shack (veja-se o Apêndice). Supondo que o líquido não chega a ser arrastado, ΔE_∞ deverá ser $1,052 \times 10^{-10} \text{ eV}$ e $E_{F(\infty)}$ $7,384 \text{ eV}$.

Se usássemos para ω , no núcleo exterior, a equação (14) os valores seriam $0,940 \times 10^{-10}$ e $7,423 \text{ eV}$, respectivamente. A largura da banda proibida pouco varia, sendo sempre bastante larga; os níveis intermédios de energia podem, porém facilitar os saltos de energia dos electrões. É muito desejável uma investigação experimental que ajude a fixar estes valores.

Agradecimentos

O autor agradece a A. Soares de Andrade a leitura do manuscrito. Os desenhos foram preparados por M^a da Graça Marques.

BIBLIOGRAFIA

- BOLT, B.A. (1987). 50 years of studies on the inner core. Eos, Trans. Am. Geoph. Un., 68, 73-81.
- BULLEN, K. E. (1973). Cores of the terrestrial planets. Nature, Lond., 243, 68-70
- CHOY, G.L. & CORMIER, V.F. (1983). The Structure of the inner core inferred from short period and broad band GDSM data. Geophys. J.R. Astron. Soc., 72, 1-21.
- COURTILLOT, V. (1986). A French program to study the Earth's core. Eos, Trans. Am. Geoph. Un., 67, 809-812
- HADDON, R. A. W. & BULLEN, K.E. (1969). An Earth model incorporating free oscillation data. Phys. Earth Planet. Interiors, 2, 25-49.
- LAMB, H. (1945). Hydrodynamics. Dover, New York.
- MACHADO, F. (1964). Sobre a constituição do interior da Terra. Rev. Fac. Cien., Lisboa, 2^a. Série C, 12, 83 - 101.
- (1985). Propriedades eléctricas do núcleo terrestre e campo geomagnético. Mem. Not., Univ. Coimbra, 99, 127-142.
- (no prelo) Rotação do núcleo interior terrestre. (Rev. Univ. Aveiro).
- POIRIER, J P. (1986). Dislocation-mediated melting of iron and the temperature of the Earth's core. Geophys. J.R. Astron. Soc., 85, 315-328.
- STACEY, F.D. (1977). Physics of the Earth, 2nd ed., Wiley, New York.

APÊNDICE

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DO MOMENTO MAGNÉTICO

```
10 PRINT "E1. NUCL. ": SET N: V = 0 : W = 0 : U = 0 : S = 0
20 K = 8.617 E - 5 : R = 3571: INPUT "E_p", H, "T", P: Z = EXP 1
30 FOR I = 1 TO 17: R = R-200: IF I >= 12 THEN 60
40 0=0: D = 9.7946 + .33984 x I - .013613 x I x I + .000 1852 x I + 3
```

```

50 Q = 1.91463 + .111263 x I - .0038296 x I x I + .0000358 x I ↑ 3 : GOTO 70
60 0 = 1: D= 10.1317 + .26417 x I - .0075 x I x I : Q = 2.7448
70 T = P x Q/2.7448: E = 1.6235 x D ↑ (2/3): F = H x (D 6.584) ↑ (1/3)
80 X = SQR (E+F) x K x T x Z ↑ (-F/K/T) x (1+ .48 x K x T / (E + F))
90 Y = SQR (E+F/2) x F: V=V + R x R x X : W = W + R x R x Y
100 U = U + R ↑ 4 x 0 x X : S = S + R ↑ 4 x 0 ↑ Y: NEXT I: SET E4
110 M = -9.141 E 16 x (U-S x V/W) : PRINT "dE ="; H x V / W; "eV"
120 PRINT "M="; M; "Am²": END

```

- Notas:** (a) A variação de d e de T/T_0 foi ajustada a polinômios de 2º ou 3º grau.
(b) Para ω/ω_0 dado por (14) haveria que acrescentar a linha 45 $0 = .048029 x (4.2618 E10/R^3 - 1)$