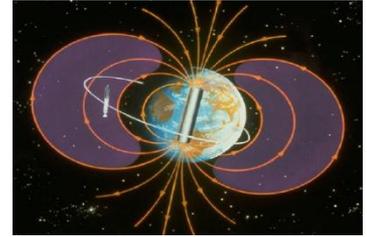


Propriedades magnéticas das rochas

- Os mais importantes fatores que influenciam o magnetismo da rocha são:
- 1- Tipo de mineral magnético,
- 2- Suas anisotropias magnéticas,
- 3- O volume do grão e
- 4- A maneira pela qual a rocha adquiriu uma magnetização remanente.



1. Volume do grão - Estabilidade magnética
2. Domínios magnéticos
3. Magnetizações remanentes nas rochas

Dependência do volume dos grãos

- As propriedades magnéticas são sensíveis ao tamanho de grãos.
- Considere um conjunto de grãos magnéticos de volume V , caracterizado por uma magnetização espontânea M_s .
- Suponha que K_u seja a energia de anisotropia (de forma ou cristalográfica) por unidade de volume de uma magnetização orientada paralela a direção de fácil magnetização.

Dependência do volume dos grãos

- Então, a energia que mantém esta magnetização é dada por:
 - $E_a = V.K_u$
- Por outro lado, a energia térmica (E_T) tem o efeito de perturbar o alinhamento e é proporcional a temperatura T.
 - $E_T = KT$
- Onde, K é a constante de Boltzman
- $K = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}^{-1}$

Dependência do volume dos grãos

- À qualquer instante, existe uma probabilidade de a energia térmica defletir o momento magnético de um grão, da direção de fácil magnetização para outra direção fácil.
- Progressivamente no tempo, a energia térmica terá o efeito de tornar aleatório os momentos magnéticos e, assim, fazer com que a magnetização do material decaia.

Dependência do volume dos grãos

- Magnetização é a soma dos momentos magnéticos dividido pelo volume.
- Se a magnetização inicial for $M_r(0)$, depois de um tempo t , a magnetização decai exponencialmente para $M_r(t)$, de acordo com a equação:
 - $$M_r(t) = M_r(0) \exp(-t/\tau)$$
- Onde τ é chamado de tempo de relaxação do grão.

Dependência do volume dos grãos

- $M_r(t) = M_r(o) \exp (-t/\tau)$
- Para $t = \tau$, $M_r(\tau) = 1/e M_r(o)$
- τ é o tempo para que a magnetização decaia para $1/e$ de $M_r(o)$.
- Se τ é grande, a magnetização decresce devagar e a magnetização é estável.
- τ representa a probabilidade que um grão tem de que a sua energia térmica seja suficiente para superar a energia anisotrópica.

Dependência do volume dos grãos

- O tempo de relaxação τ depende das propriedades do grão magnético e é dado por:
 - $\tau = (1 / \nu_0) \exp (V K_u / K T)$
- ν_0 – está relacionado com a frequência de vibração da rede cristalina e apresenta um valor alto: $\sim 10^8$ - 10^{10} s^{-1} .
- K_u – depende da anisotropia associada ao grão magnético:
- Caso da hematita – está associado a uma anisotropia magnetocristalina;
- Caso da magnetita – pode estar associado à anisotropia magnetocristalina ou de forma se o grão for alongado.

Dependência do volume dos grãos

- Esta teoria se aplica para grãos pequenos e que são uniformemente magnetizados.
 - $\tau = (1 / \nu_0) \exp (V K_u / K T)$
- **Devido à variação exponencial, o tempo de relaxação τ varia rapidamente com a mudança do volume V e da temperatura T .**

Dependência do volume dos grãos

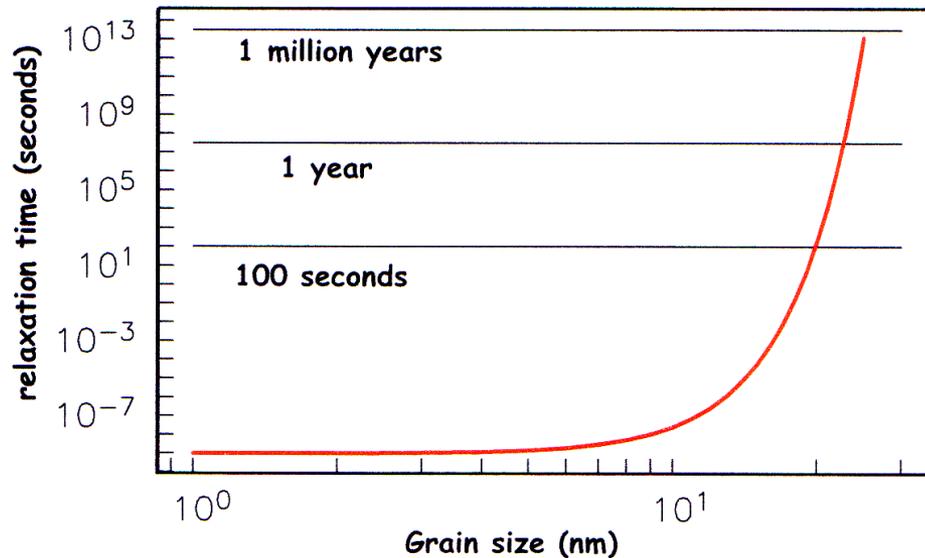


Figure 4.5: Relaxation time as a function of grain size in nanometers.

- Grãos muito pequenos, abaixo de um valor crítico, exibem um comportamento instável, o qual é chamado de **superparamagnetismo**.
- Neste caso, o tempo de relaxação, o qual depende exponencialmente do volume V , é baixo, < 100 s.

Dependência do volume dos grãos

- Acima do valor crítico, a magnetização se torna estável, pois o tempo de relaxação aumenta exponencialmente com o volume e se torna rapidamente grande.
- Estes grãos estáveis formam os chamados grãos de **Domínios Simples (SD)**

Dependência do volume dos grãos

- $\tau = (1 / \nu_0) \exp (V K_u / K T)$
- A estabilidade da magnetização, isto é, se o grão apresenta um comportamento estável (grãos SD) ou não (superparamagnetismo), depende do volume do grão, das anisotropias associadas ao grão magnético (anisotropia de forma ou magnetocristalina) e da temperatura T

Dependência do volume dos grãos

- A temperatura é um fator importante, pois está relacionada com a energia térmica do grão.
- Para temperaturas altas, esta energia térmica (KT) pode superar a energia de anisotropia (VK_u) sem, no entanto, quebrar o alinhamento dos momentos magnéticos.
- Os grãos magnéticos apresentam um comportamento similar ao do paramagnetismo.
- Se aplicarmos um campo magnético a um conjunto de grãos nesta situação, os momentos magnéticos se orientam na direção do campo produzindo uma magnetização. Entretanto, se o campo externo for nulo, a magnetização do conjunto de grãos será também nula.

Dependência do volume dos grãos

- Dizemos que, nestas condições, os grãos magnéticos apresentam um comportamento **superparamagnético**.
- Este comportamento é importante no processo de **desmagnetização térmica**.

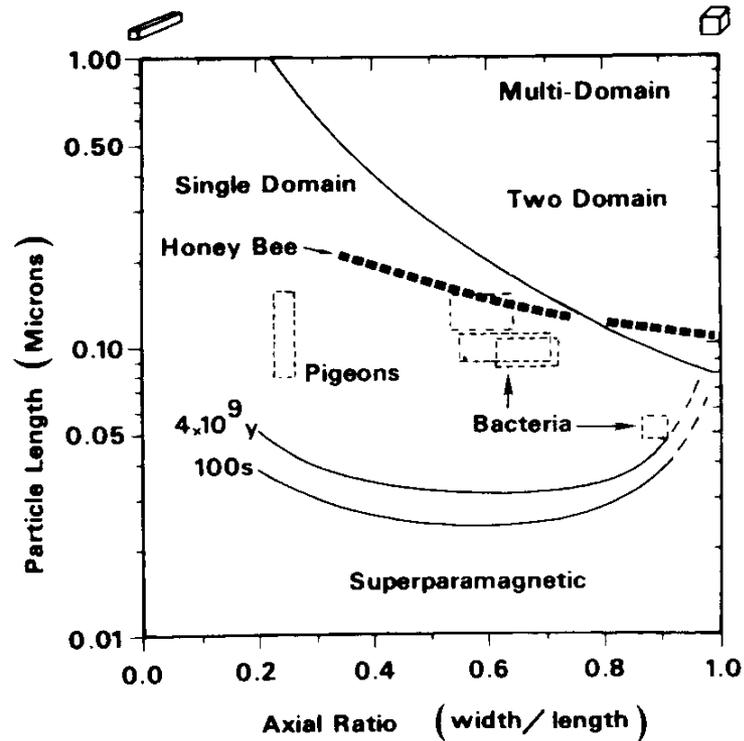
Dependência do volume dos grãos

- O volume do grão representa também um fator crítico para o efeito superparamagnético.
- Grãos de magnetita e hematita com volumes inferiores a $0,03 \mu\text{m}$ de diâmetro são superparamagnéticos a temperatura ambiente.

Partículas de Domínio Simples - SD

- Quando a energia magnética (VK_u) de um grão é mais forte que a energia térmica (KT), o grão se torna uniformemente magnetizado como um grão de Domínio Simples (SD).

Partículas de Domínio Simples - SD



(a)

- Os grãos SD para a magnetita estão no intervalo entre 0,03 e 0,1 μm em grãos esféricos e chegam a 1 μm em grãos alongados.
- Para a hematita, K_u está relacionada com a energia de anisotropia magnetocristalina e o intervalo de domínio simples é maior, de 0,03 a 15 μm

Partículas de Domínio Simples - SD

- A magnetização de um grão de domínio simples é muito estável, pois para mudá-la, é necessário girar a magnetização espontânea como um todo e, para isto, necessitamos um campo magnético forte.
- O campo magnético necessário para reverter a direção de um grão de domínio simples é chamado de coercividade do grão (H_c).

Partículas de Domínio Simples - SD

- $H_c = 2.K_u / \mu_0 M_s$
- A coercividade varia com a forma do grão no caso da magnetita e pode atingir um máximo de 0,3T em grãos alongados (forma de agulha).
- A magnetização espontânea mais baixa associada a hematita e a sua anisotropia magnetocristalina/magnetoelástica faz com que ela tenha coercividades maiores do que 0,5 T, chegando em alguns casos a exceder 2 T.
- **Este fato faz com que a hematita de domínio simples tenha uma magnetização muito estável.**

Domínios magnéticos

- Várias energias estão associadas aos grãos magnéticos:
- Energia de anisotropia magnetocristalina – tendência dos momentos magnéticos de se alinharem segundo determinados eixos cristalográficos:
- Magnetita – eixo $[111]$ – diagonal do cubo;
- Hematita – plano basal da estrutura.

Domínios magnéticos

- Energia de troca – age a curta distância.
- Um forte campo molecular tende a alinhar os momentos magnéticos ao longo de direções de fácil magnetização.

Domínios magnéticos

- Energia magnetostática ou Energia de anisotropia de forma – A anisotropia de forma faz com que surja um campo desmagnetizante (H_d), o qual age no sentido contrário à magnetização (M_s), tendendo a alinhar os momentos magnéticos vizinhos, em sentido contrário.

- $H_d = -N.M$

Domínios magnéticos

4.2. THE MAGNETIC ENERGY OF PARTICLES

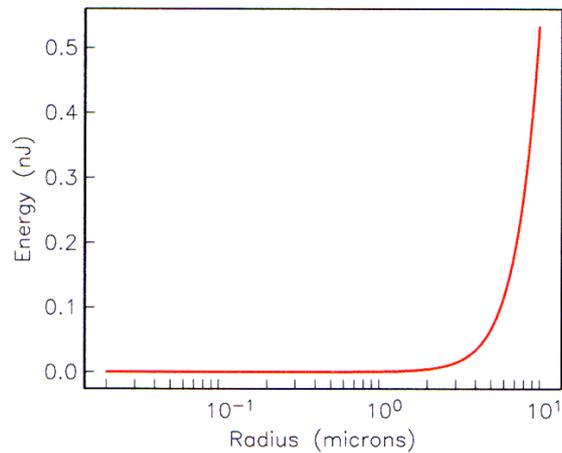


Figure 4.6: The self energy of a spherical particle of magnetite as a function of particle radius.

- A energia de anisotropia de forma (E_d) é dada por:
 - $E_d = \frac{1}{2} \mu_0 N V M^2$
- Quanto maior a magnetização, maior a energia desmagnetizante.
- Quanto maior o volume do grão, maior a energia desmagnetizante.

Domínios magnéticos

4.2. THE MAGNETIC ENERGY OF PARTICLES

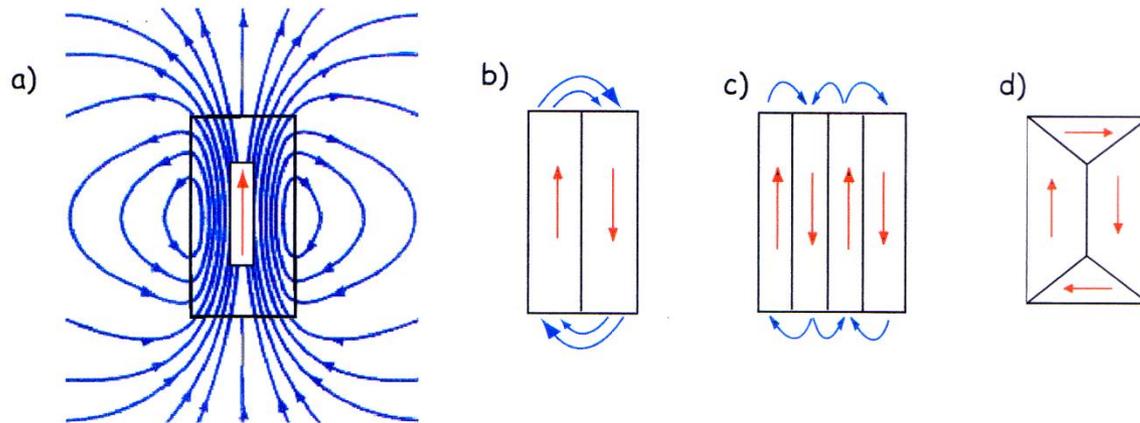


Figure 4.8: A variety of domain structures of a given particle. a) Uniformly magnetized (single domain). b) Two domains. c) Four domains in a lamellar pattern. d) Essentially two domains with two closure domains.

- Chega-se a um determinado volume de grão em que a energia magnetostática se torna muito elevada e supera a energia de troca e as energias magnetocristalina e magnetoelástica.
- Assim a magnetização do grão se subdivide em regiões uniformemente magnetizadas em direções opostas para diminuir a energia magnetostática.

Domínios magnéticos

4.2. THE MAGNETIC ENERGY OF PARTICLES

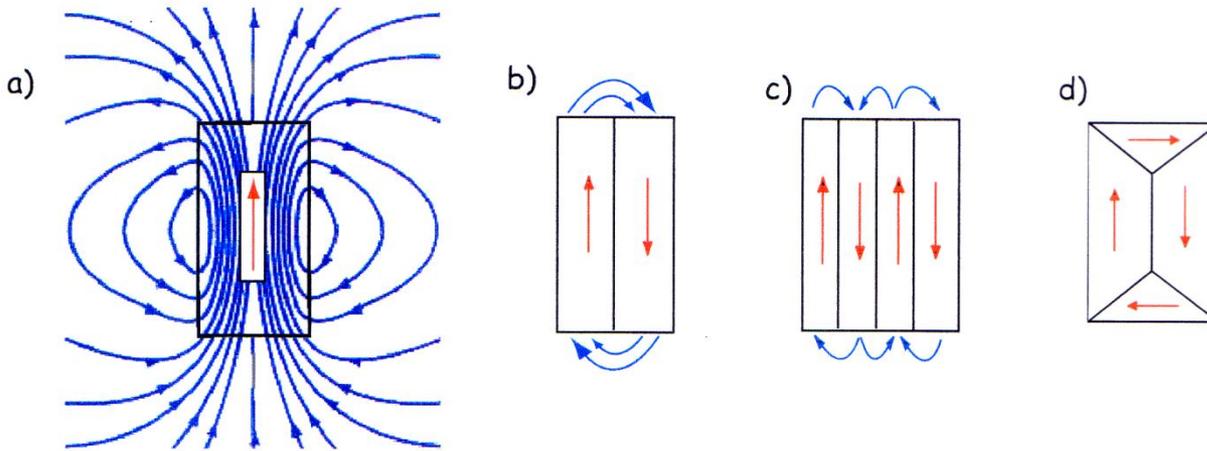


Figure 4.8: A variety of domain structures of a given particle. a) Uniformly magnetized (single domain). b) Two domains. c) Four domains in a lamellar pattern. d) Essentially two domains with two closure domains.

Cada região apresenta uma magnetização espontânea uniforme. Uma região é separada de outra por uma parede de domínio, a qual é chamada de parede de domínio de Bloch (quem formulou a teoria de estrutura das paredes em 1932).

Domínios magnéticos

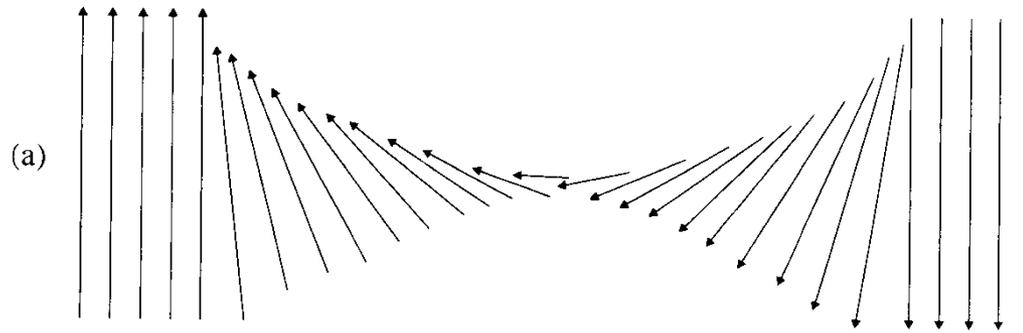


Figure 5.6 (a) Sketch of the rotation of neighbouring spins or atomic magnetic moments across a 180° Bloch wall.

- O tamanho da parede (δw) depende de duas energias:
- Energia de troca – é menor quanto maior for δw ;
- Energia magnetocristalina – é maior quanto maior for δw ;
- O tamanho da parede depende, portanto, de um balanço entre estas energias:
 - $\delta w = 0,28 \mu\text{m}$, $E_w = 2,3 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$

Domínios magnéticos

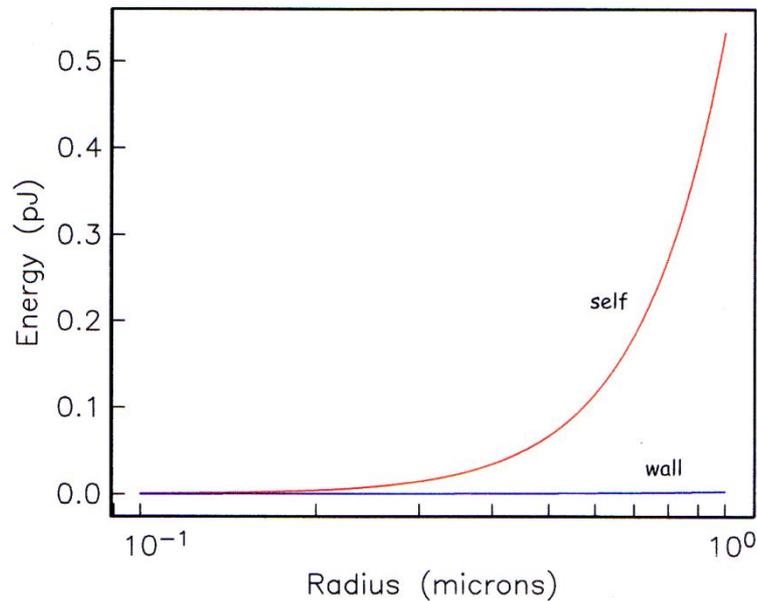


Figure 4.10: Comparison of “self” energy versus the energy of the domain wall in magnetite spheres as a function of particle size.

A energia da parede (E_w) para grãos de alguns décimos de micrometros, é muito menor que a energia magnetostática, embora a parede do domínio já seja de alguns décimos de micrometros. Portanto, somente para partículas próximas a $1 \mu\text{m}$ é que paredes de domínios são formadas para separar domínios.

Grãos de Multidomínio (MD)

- A magnetização de um grão magnético está relacionada com uma competição de energias.
- Enquanto a energia de troca faz com que os momentos magnéticos se alinhem paralelamente ao longo de certos eixos preferenciais de magnetização, o campo desmagnetizante interage com a magnetização espontânea e gera uma energia magnetostática que tende a inverter a magnetização espontânea do grão.

Grãos de Multidomínio (MD)

- A energia de troca age a curta distância, de modo que para grãos maiores, a energia magnetostática torna-se mais importante.
- Para diminuir a energia total, a magnetização se subdivide em unidades uniformemente magnetizadas e menores, chamadas de domínios magnéticos – domínios de Weiss (que previu a estrutura de domínios em 1907).
- Para grãos maiores, novas subdivisões podem ocorrer para reduzir a energia total do grão.
- Estes grãos são chamados de **Multidomínios**.

Grãos de Multidomínio (MD)

- A magnetização de grãos de multidomínios pode ser mudada através do movimento das paredes do domínio, o que faz com que alguns domínios aumentem de tamanho e outros diminuam.
- Grãos grandes de multidomínio podem conter muitas paredes de domínio, que podem se mover facilmente. Por este motivo, os grãos MD são portadores menos estáveis de magnetização, quando comparados aos grãos de domínio simples.

Grãos de Multidomínio (MD)

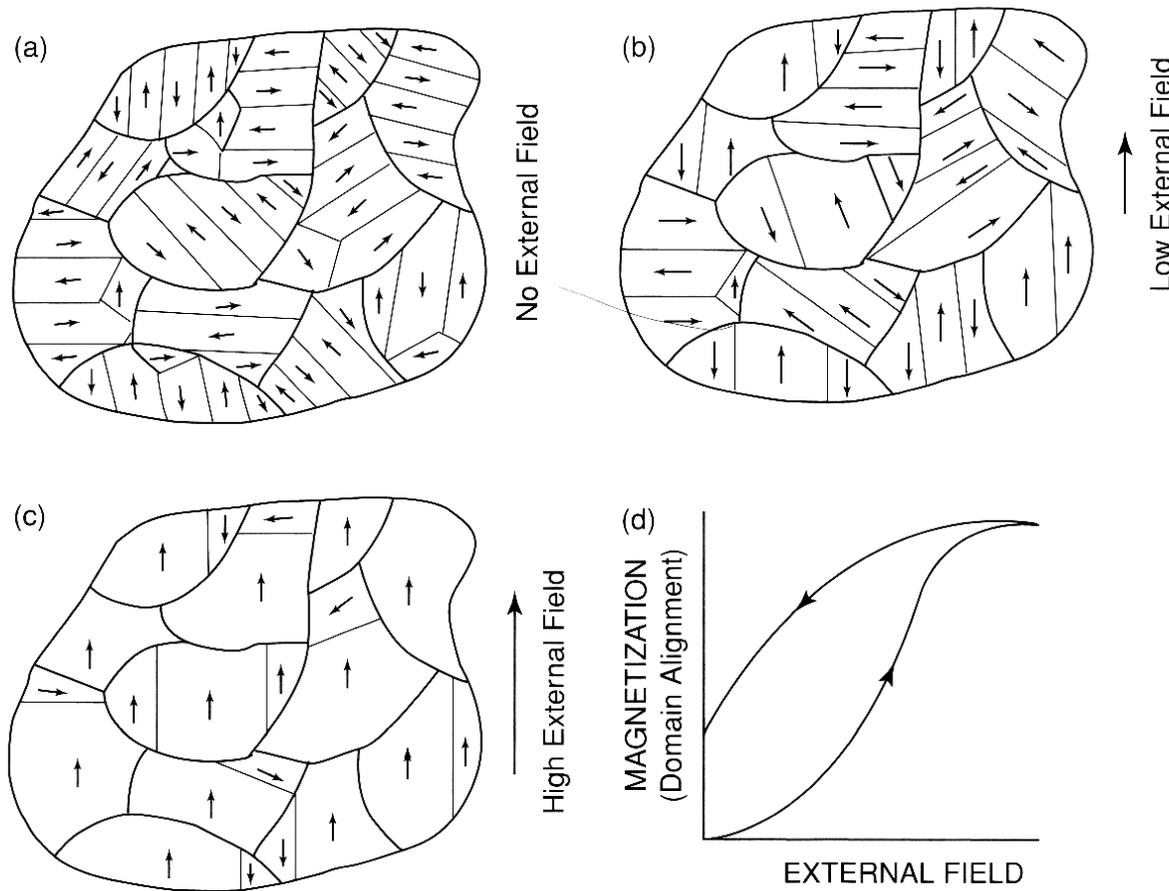


Figure 4.2. Illustration for visualizing (a) an unmagnetized rock fragment containing crystals (represented within heavy curved lines) with regions dividing domains of similar field alignment (within light straight lines), (b) realignment of domains when a small external field (arrow to right of fragment) is applied, and (c) high external field (arrow to right of fragment) saturation of rock fragment magnetization. Graph (d) shows the hysteresis curve for the fragment magnetization in a changing (arrow direction) external field.

Grãos de Pseudo-Domínio Simples PSD

- Grãos de tamanhos suficientes para conter poucas paredes de domínio, são chamados de pseudo-domínio simples (PSD). Estes grãos, apesar de possuírem paredes de domínio, apresentam magnetização estável como a de domínio simples.
- As paredes de domínio nos grãos PSD, sendo poucas, não têm muita liberdade de movimento.

Magnetização Remanente das Rochas

- Toda rocha contém uma pequena porcentagem de minerais magnéticos que apresentam a capacidade de adquirir magnetização remanente.
- A magnetização de uma rocha é chamada de Magnetização Remanente Natural (MRN).
- A MRN pode ser composta por uma ou mais componentes que foram adquiridas de diferentes maneiras e em diferentes épocas.

Magnetização Remanente das Rochas

- A MRN pode ser composta pela magnetização adquirida durante a sua formação (Magnetização Remanente Primária – MRP) e por magnetizações posteriores (Magnetização Remanente Secundária – MRS) em decorrência de processos físicos e químicos.
- Exemplos de magnetização primária:
- MTR (TRM) – Magnetização termoremanente – resfriamento da lava.
- MRD (DRM) – magnetização remanente deposicional.
- Exemplos de magnetização secundária:
- MRQ (CRM) – magnetização remanente química – alterações químicas durante a diagênese ou intemperismo.

Magnetização Termoremanente - TRM

- A MTR é a mais importante magnetização que ocorre nas rochas ígneas e nas rochas metamórficas de alto grau.
- As rochas ígneas se solidificam a temperaturas acima de 1000°C . Nestas temperaturas, os grãos magnéticos já estão desenvolvidos, mas a temperatura dos grãos está bem acima da temperatura de Curie, que para a magnetita é de 580°C e para a hematita é de 675°C .
- Os momentos magnéticos atômicos flutuam de forma caótica e temos o comportamento paramagnético.
- Quando a rocha se esfria e passa pela temperatura de Curie dos minerais 'ferromagnéticos', aparece uma magnetização espontânea.

Magnetização Termoremanente - TRM

- Entretanto, nesta temperatura, a energia térmica é mais alta que a energia magnética (tempo de relaxação baixo) e a magnetização é instável – superparamagnetismo.

- $\tau = (1 / \nu_0) \exp (V K_u / K T)$

- Vai chegar uma temperatura em que o tempo de relaxação (τ) aumenta muito fazendo com que a magnetização espontânea fique bloqueada. Esta temperatura é chamada de **Temperatura de Bloqueio – T_B** .

Magnetização Termoremanente - TRM

- $\tau = (1 / \nu_0) \exp (V K_u / K T)$

- A Temperatura de bloqueio depende do tipo de mineral magnético, das anisotropias magnéticas associadas e do volume do grão.
- Como a rocha contém grãos de tamanhos e formas diferentes, ela terá um espectro de temperaturas de bloqueio.

Magnetização Termoremanente - TRM

- Como a rocha se resfria na presença do campo magnético terrestre, ela adquire uma magnetização que registra a direção deste campo.
- Ao passar pelas temperaturas de bloqueio dos grãos magnéticos, os momentos magnéticos são bloqueados ao longo do eixo de fácil magnetização que está mais próximo da direção do campo na época.

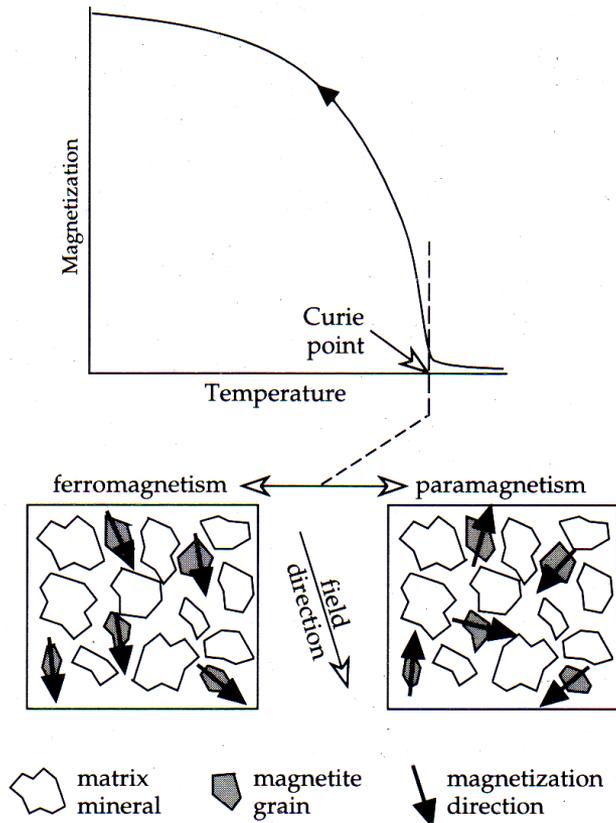
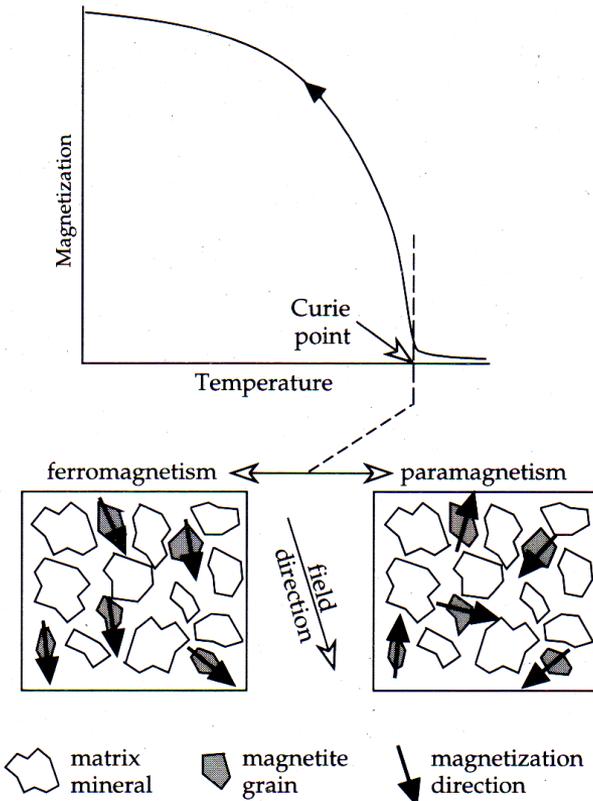


Fig. 5.19 On cooling through the Curie temperature the magnetic state of magnetite grains changes from paramagnetism to ferromagnetism. On cooling further the magnetizations in the magnetite grains become blocked along easy directions of magnetization close to the field direction. The resultant thermoremanent magnetization is parallel to the field direction.

Magnetização Termoremanente - TRM



- Este processo representa uma preferência estatística – o alinhamento não é perfeito nem completo.
- Um conjunto de grãos contém uma porcentagem maior de grãos que tem seus momentos magnéticos alinhados próximo à direção do campo.

Fig. 5.19 On cooling through the Curie temperature the magnetic state of magnetite grains changes from paramagnetism to ferromagnetism. On cooling further the magnetizations in the magnetite grains become blocked along easy directions of magnetization close to the field direction. The resultant thermoremanent magnetization is parallel to the field direction.

Magnetização Termoremanente - TRM

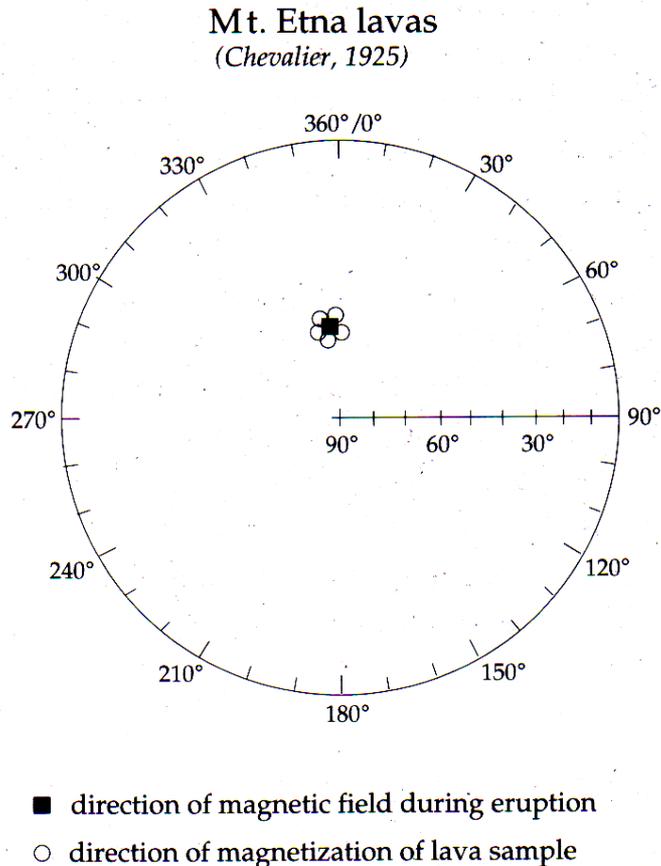


Fig. 5.20 Agreement of directions of thermoremanent magnetization in a basaltic lava flow on Mt. Etna (Sicily) with the direction of the geomagnetic field during eruption of the lava (based upon data from Chevallier, 1925).

A figura mostra a concordância da TRM adquirida por um fluxo de lavas do Monte Etna com a direção do campo geomagnético.

Isto demonstra a eficiência da TRM em registrar a direção do campo geomagnético.

Magnetização Remanente Deposicional - DRM

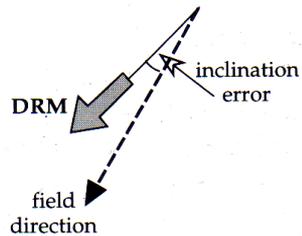
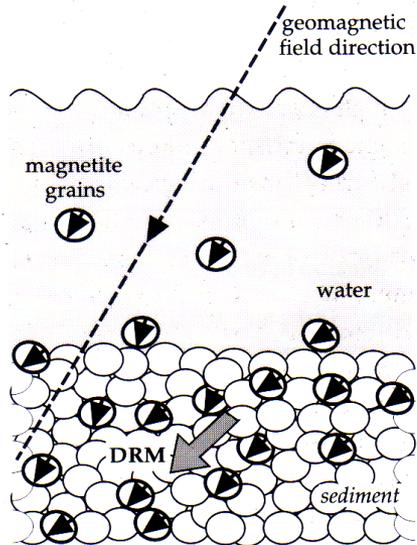


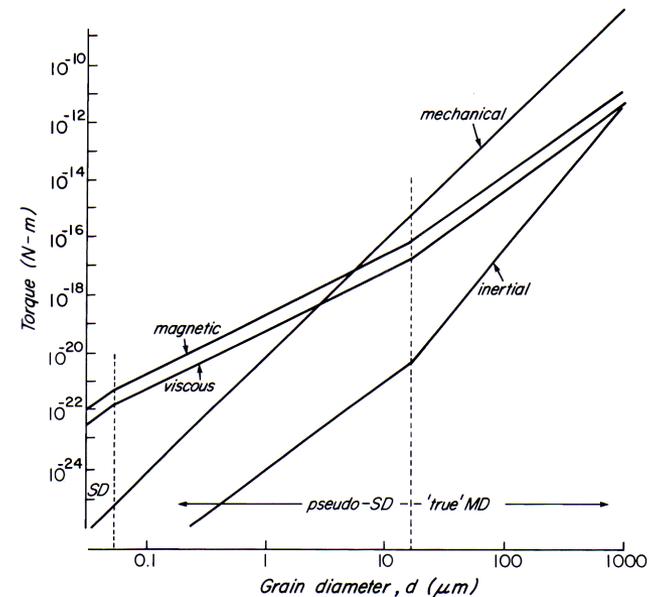
Fig. 5.21 Acquisition of depositional remanent magnetization (DRM) in a sediment; gravity causes an inclination error between the magnetization and field directions.

$$\Omega \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \beta \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + mH \sin \theta = 0$$

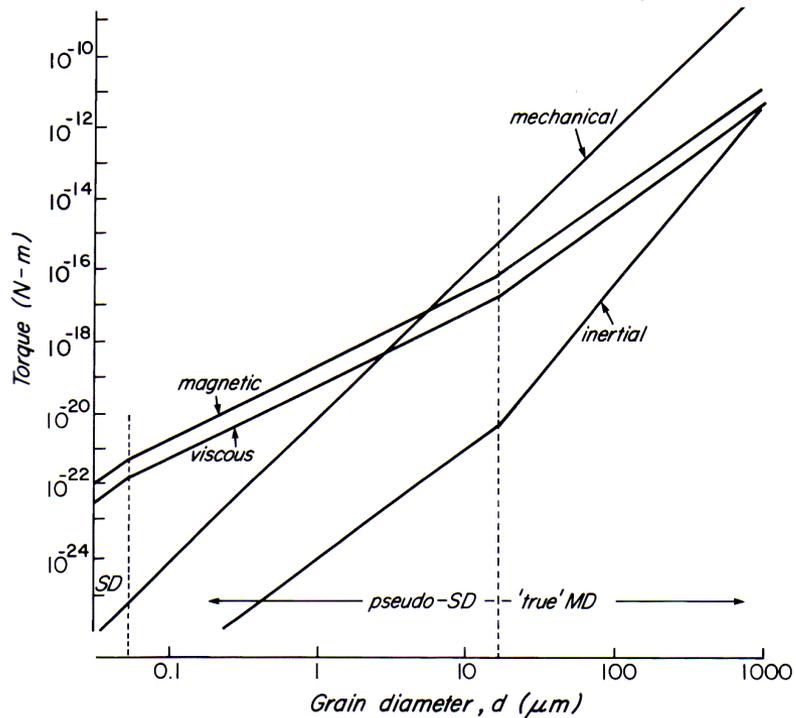
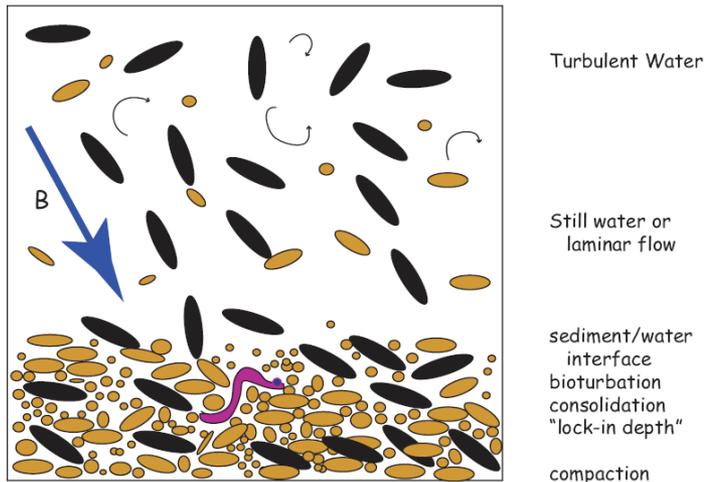
Ω é o momento de inércia;

β é a viscosidade

- A DRM é adquirida durante a deposição dos sedimentos em fundos de lagos, rios e oceanos.
- Durante a deposição, outras forças competem com a força magnética que tenta produzir um alinhamento das partículas magnéticas na direção do campo atuante.
- O alinhamento é estatístico.



Magnetização Remanente Deposicional - DRM



Forças mecânicas podem prejudicar o alinhamento:

Correntes de água causam forças hidrodinâmicas que perturbam o alinhamento, resultando em um erro de declinação;

No contato com o leito da bacia sedimentar, a força mecânica de gravidade pode rolar a partícula para uma posição de estabilidade e causa um erro de inclinação;

A pressão do sedimento que se sobrepõe durante o processo de soterramento profundo pode produzir mais erros de inclinação;

A MRD é finalmente estabilizada na rocha sedimentar durante a diagênese – alterações químicas dos minerais que ocorrem após o processo de sedimentação

Magnetização Remanente pós-Deposicional pDRM

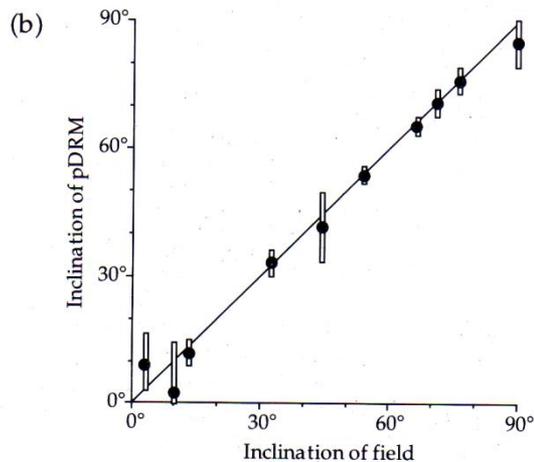
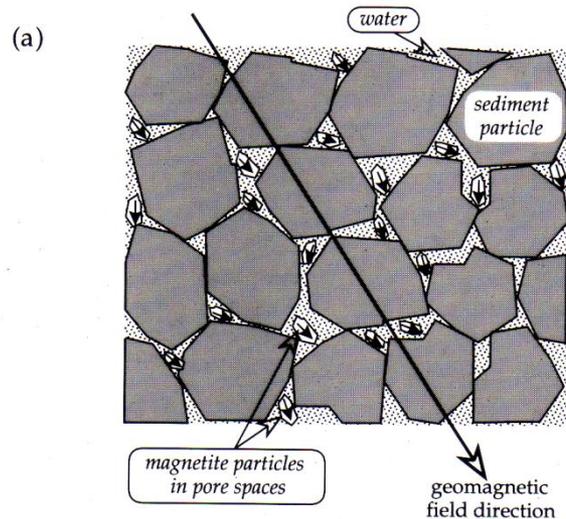


Fig. 5.22 (a) Post-depositional remanent magnetization (pDRM) is acquired by reorientation of ferromagnetic grains in the pore spaces of a deposited sediment. (b) Comparison of the pDRM inclination with the field inclination in a redeposited deep-sea sediment (after Irving and Major, 1964).

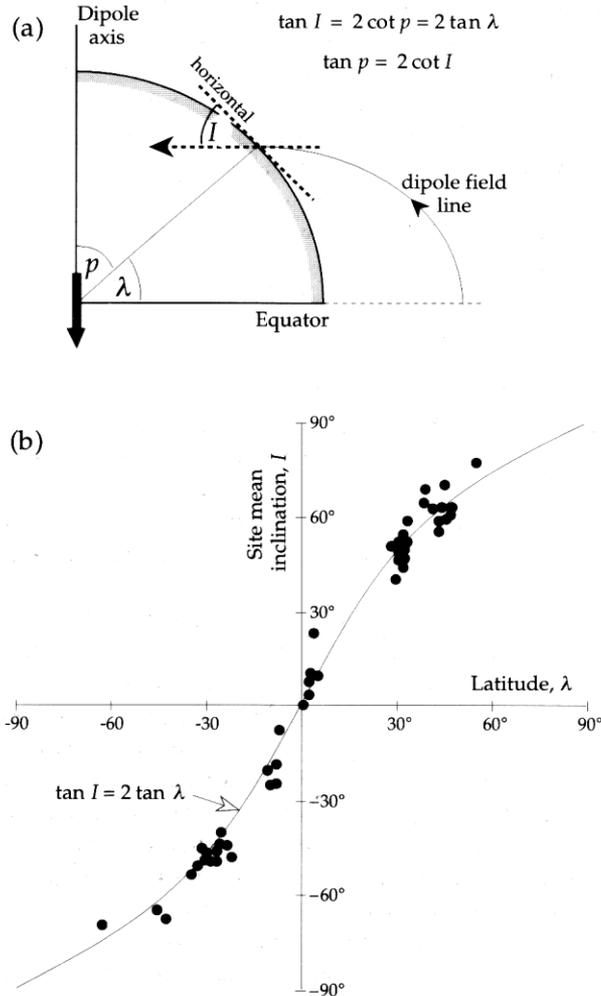
- A pDRM é formada por minerais magnéticos de granulação fina aprisionados nos espaços de poros de sedimento aquoso.
- Estas partículas vão se orientar na direção do campo pela agitação destas partículas em suspensão – movimento Browniano das moléculas de água, as quais continuamente colidem ao acaso com as partículas nos espaços dos poros, o que produz um alinhamento estatístico das partículas na direção do campo atuante.
- Experimentos mostram que a pDRM pode representar um registro correto do campo, sem apresentar erros de inclinação.

Magnetização Remanente pós-Deposicional

pDRM

- A pDRM é adquirida depois da deposição e é estabilizada no sedimento durante a compactação e a eliminação da água a profundidade de ~10 cm;
- O processo é particularmente efetivo em sedimentos de grãos finos que contenham grãos de magnetita (intensidade forte);
- Exemplos – carbonatos.

Magnetização Remanente pós-Deposicional pDRM



A figura ao lado mostra que sedimentos pelágicos recentes adquirem uma pDRM que concorda bem com o modelo de dipolo previsto para o campo magnético da Terra. A inclinação (I) da direção obtida varia de acordo com a equação:

$$\text{tg}(I) = 2 \text{tg}(\lambda)$$

Onde λ é a latitude do lugar em que as amostras foram coletadas.

Fig. 5.54 (a) The geocentric axial dipole hypothesis predicts the relationship $\tan I = 2 \tan \lambda$ between the inclination I of a dipole field and the magnetic latitude λ . (b) The inclinations measured in modern deep-sea sediment cores agree well with the theoretical curve (based on data from Opdyke and Henry, 1969).

Magnetização Remanente Química

MRQ - CRM

- A MRQ ocorre quando um mineral sofre uma alteração química ou quando um novo mineral magnético é formado autigenicamente.
- Exemplo: formação de hematita através de goetita.
- Representa uma magnetização secundária, a menos que a alteração tenha ocorrido logo após a formação da rocha.
- O crescimento de um mineral magnético envolve mudanças no volume do grão (V), na magnetização espontânea e nas anisotropias associadas.

Magnetização Remanente Química

MRQ - CRM

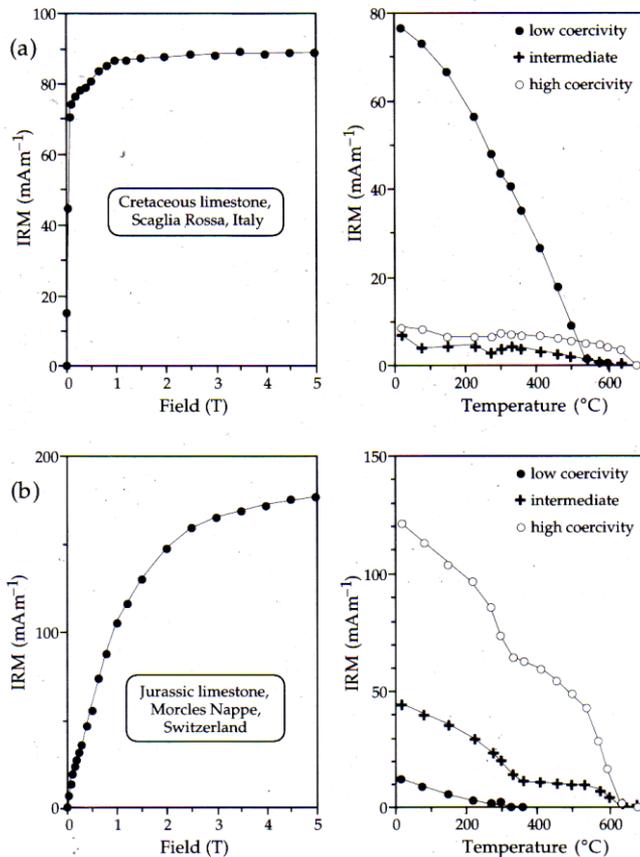
- A mudança química afeta, portanto, o tempo de relaxação (τ) dos grãos:
 - $\tau = (1 / \nu_0) \exp (V K_u / K T)$
- Durante a alteração química, os grãos passam por um volume crítico (V_c), no qual a magnetização torna-se bloqueada e uma nova magnetização (MRQ) é adquirida na direção do campo ambiente, sendo, de modo geral, secundária.
- A MRQ apresenta magnetização estável, similar a TRM.

Magnetização Remanente Isotérmica

MRI - IRM

- A MRI corresponde a uma magnetização induzida na rocha pela aplicação de um campo magnético a temperatura constante.
- Exemplo na natureza – incidência de raios.

Magnetização Remanente Isotérmica MRI - IRM



A MRI pode ser também induzida no laboratório para identificar os minerais magnéticos na rocha.

A figura mostra dois exemplos de indução indicando em (a) a presença de magnetita e hematita e em (b) a presença de pirrotita e hematita.

Fig. 5.24 Examples of the identification of magnetic minerals by acquisition and subsequent thermal demagnetization of IRM. Hematite is present in both (a) and (b), because saturation IRM requires fields > 1 T and thermal demagnetization of the hard fraction persists to $T \approx 675$ °C. In (a) the soft fraction that demagnetizes at $T \approx 575$ °C is magnetite, while in (b) no magnetite is indicated but pyrrhotite is present in all three fractions, shown by thermal unblocking at $T \approx 300$ – 330 °C (after Lowrie, 1990).

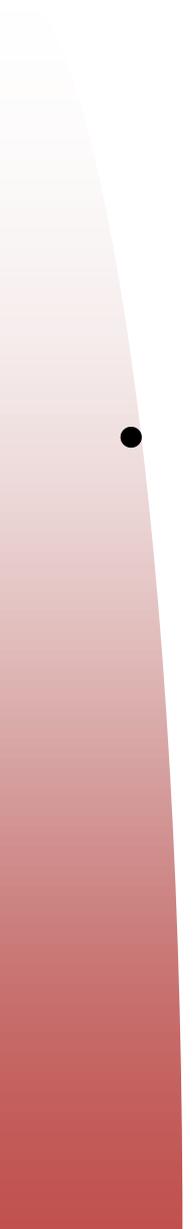
Magnetização Remanente Viscosa MRV - VRM

- Como em um processo estatístico, há uma probabilidade de que os momentos magnéticos percam a magnetização anterior e se alinhem na direção de um campo aplicado, durante o tempo.
 - $M_r(t) = M_r(0) \exp(-t/\tau)$
- Os grãos com magnetização mais instável serão os mais afetados neste processo. A magnetização que se origina é chamada de magnetização remanente viscosa e aumenta de forma logarítmica com o tempo.

Magnetização Remanente Viscosa

MRV - VRM

- Normalmente, a MRV tem a direção do campo atual;
- É sempre uma magnetização secundária;
- Pode mascarar a magnetização original;
- Técnicas de desmagnetização conseguem eliminar facilmente este tipo de magnetização.



FIM