

# **Curso de Especialização em Beneficiamento Mineral**

Departamento de Engenharia de Minas – Escola de Minas de Ouro Preto  
Universidade Federal de Ouro Preto

## Fundamentação mineralógica para a produção mineral

- Módulo 1 - Introdução à estrutura da Terra e origem dos elementos
- Módulo 2 – Mineralogia fundamental
- **Módulo 3 – Formação de rochas e mineralizações**
- Módulo 4 – Reconhecimento prático de minerais e rochas
- Módulo 5 – Mineralogia e geologia de gemas
- Módulo 6 – Minerais não-metálicos na indústria cerâmica
- Avaliação – prova escrita

# Módulo 03 – Formação de Rochas e Mineralizações

Antonio Liccardo

## Bibliografia módulo 3

- **Para Entender a Terra** - Press, Siever, Grotzinger e Jordan – Ed. Bookman
- **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros** – Biondi – Oficina de Textos
- **Geodiversidade do Brasil** – Cassio R. Silva – CPRM
- **Petrologia macroscópica das Rochas ígneas, sedimentares e metamórficas** – Sgarbi, G.N.C. Ed. UFMG

# Rochas e mineralizações

- **Rocha** - Agregado sólido de minerais de origem natural
- Produtos consolidados, resultantes da união natural de minerais
- Diferente de sedimentos, por exemplo: areia da praia é um conjunto de minerais soltos.
- Composição mineralógica definida
- Textura ou relação entre os minerais
- **Mineralizações** - concentrações anômalas de minerais com interesse econômico

## Tipos de Rocha conforme o ambiente de formação

- Ígneas ou magmáticas
- Sedimentares
- Metamórficas

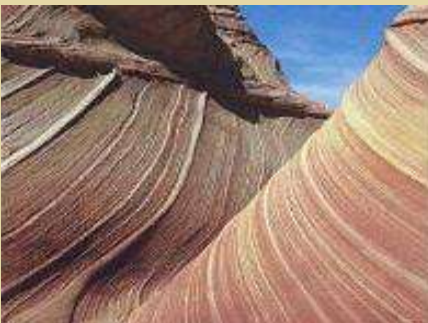
# Proporção na crosta em volume



ÍGNEAS



METAMÓRFICAS



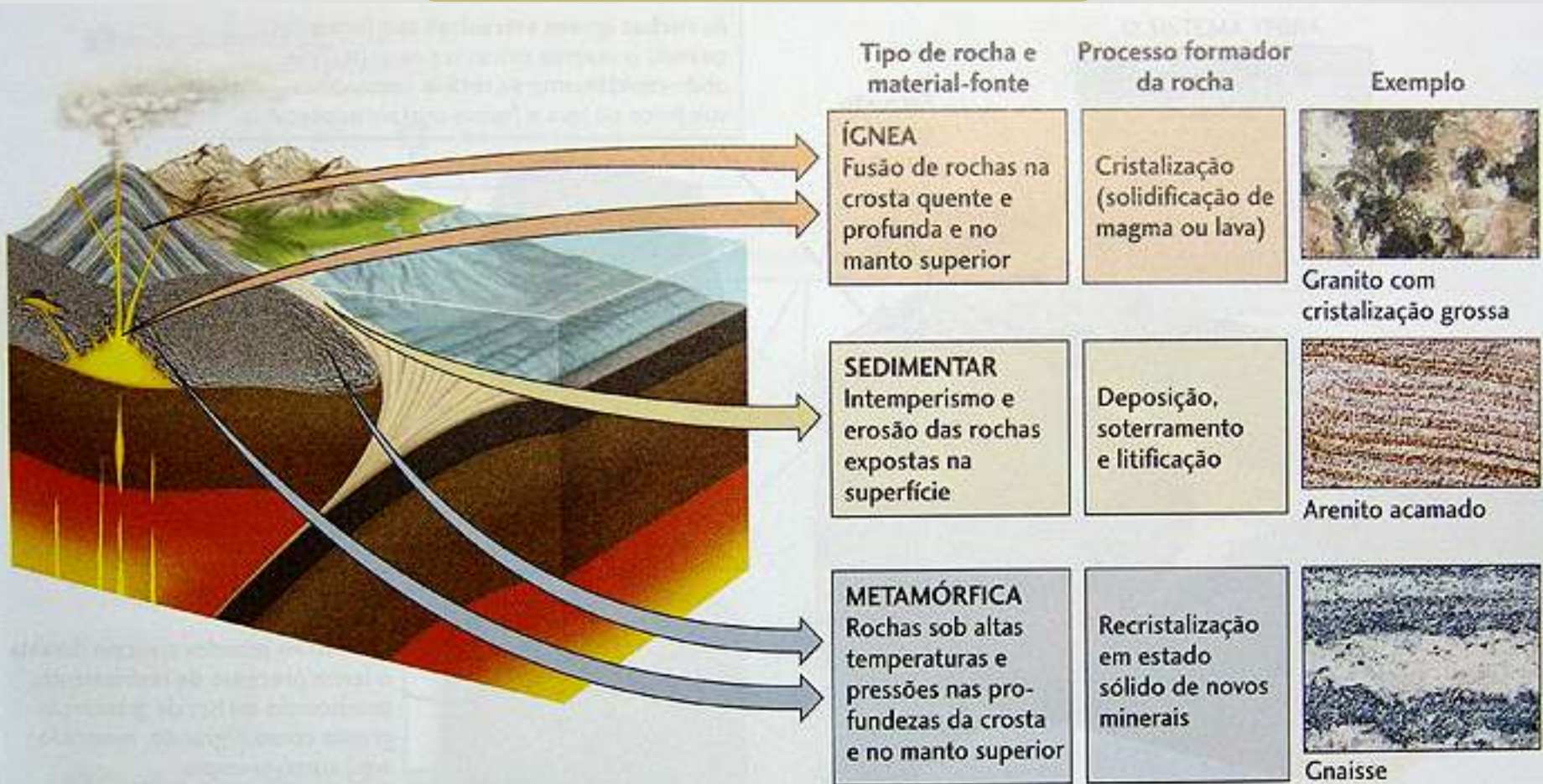
SEDIMENTARES

**95%**

**5%**



# Rochas e sua origem

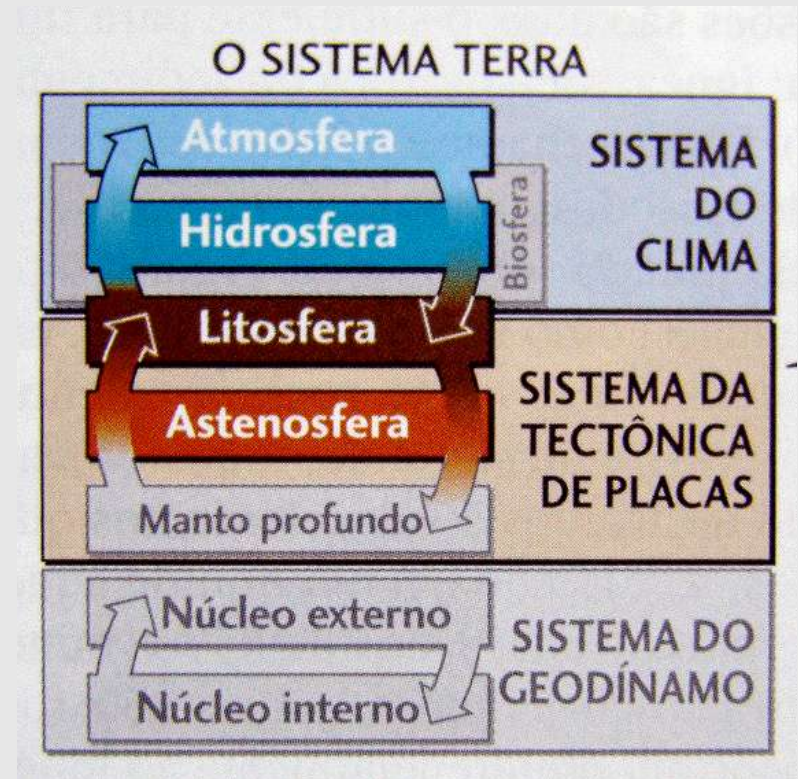


**Figura 4.2** Os minerais e as texturas dos três grandes grupos de rochas são formados em diferentes lugares da Terra e por diferentes processos. Como consequência, os geólogos usam as análises mineralógicas e químicas para determinar as origens das rochas e os processos que as formaram. Granito, composto de quartzo, feldspato e cristais de mica. [J. Ramezani] Rocha sedimentar acamada, composta de arenitos. [Breck P. Kent] Esta rocha metamórfica dobrada e deformada é um gnaisse. [Breck P. Kent]

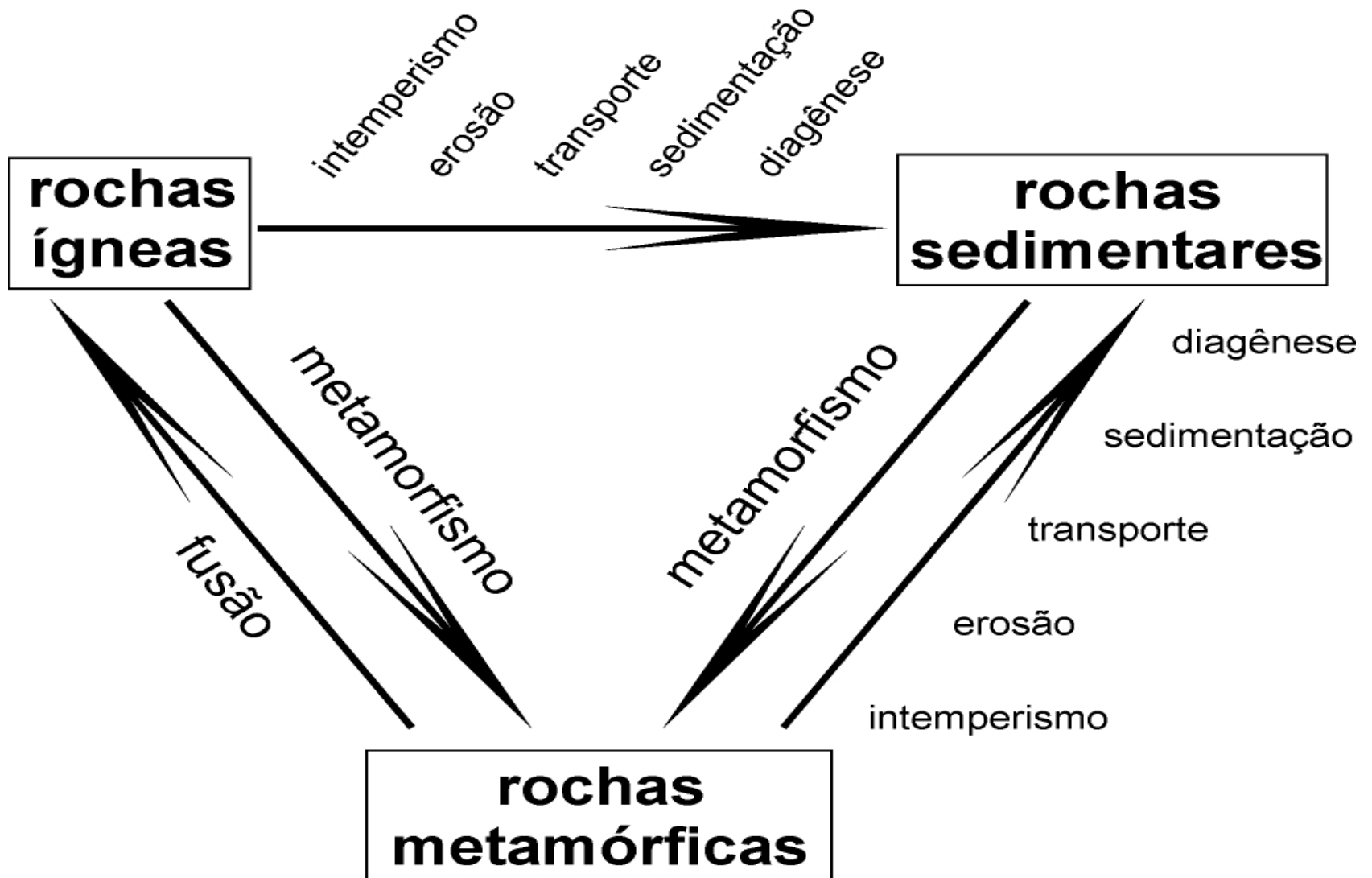


# Interação dos processos

- Forças endógenas – tectônica de placas
- Forças exógenas – intemperismo
- Rochas e mineralizações são o resultado deste equilíbrio entre os sistemas atuantes

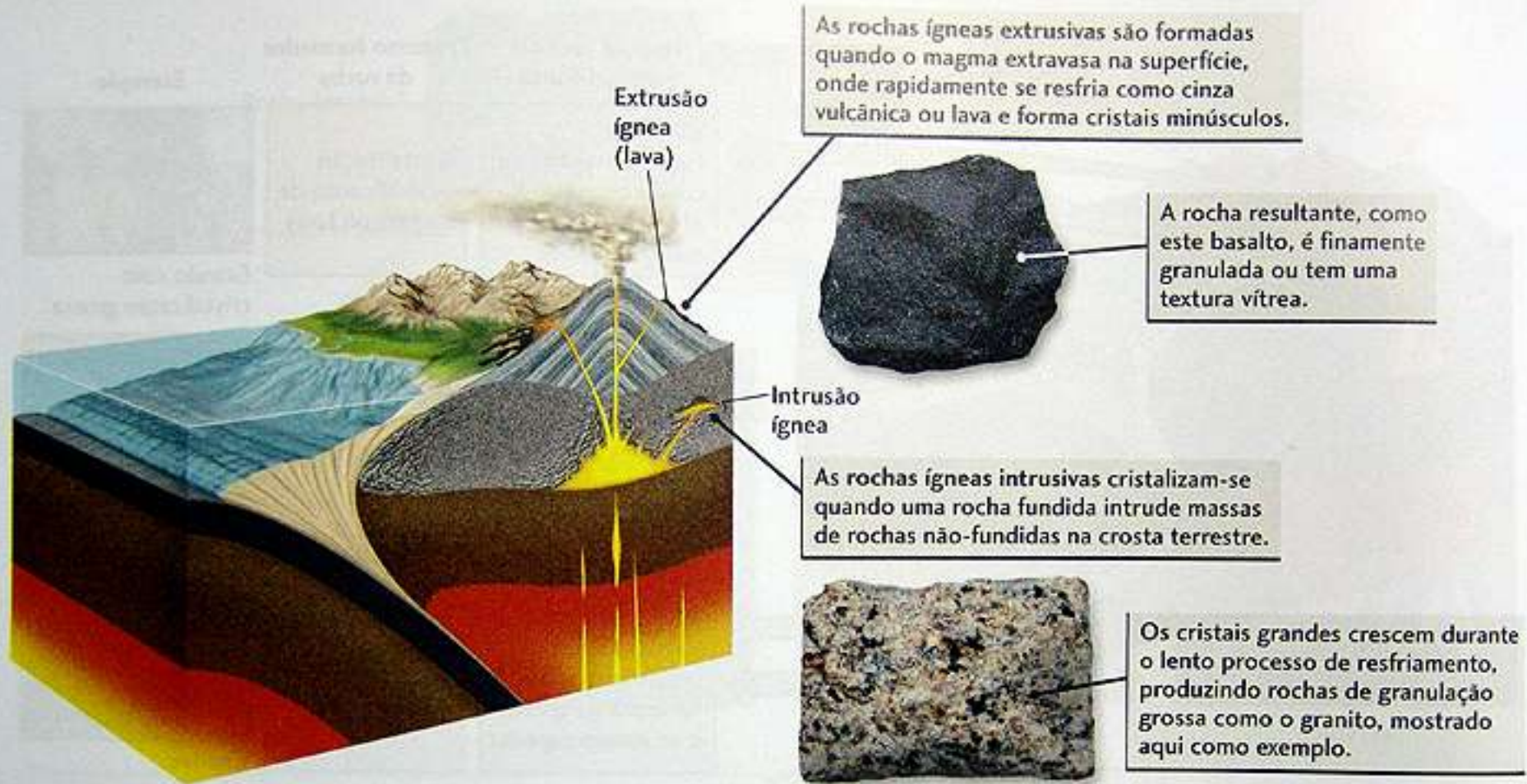


# o ciclo das rochas



# Rochas ígneas

# Rochas ígneas



**Figura 4.3** A formação de rochas ígneas extrusivas (aqui exemplificadas com o *basalto*) [Chip Clark] e rochas ígneas intrusivas (aqui exemplificadas com o *granito*) [J. Ramezani].



# Magma

É uma rocha fundida (altas T: 700 até 1.200°C).

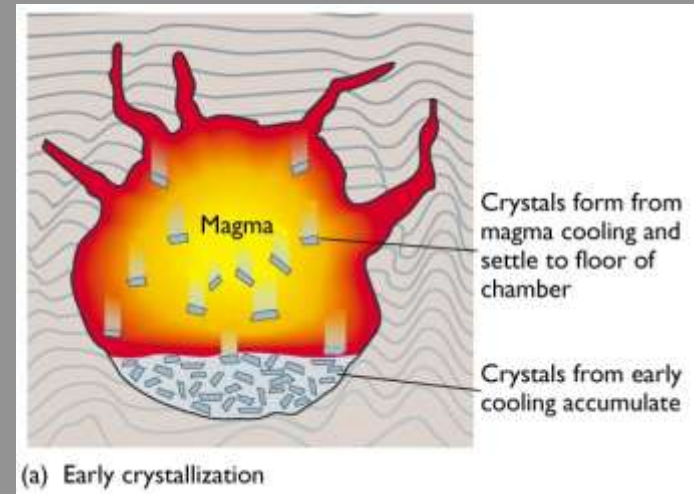
Tem consistência pastosa e mobilidade

(anda devagar, média 5-16 km/h).



## Constituintes do Magma

1. **Líquido:** íons móveis: principalmente silício e oxigênio mais Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Mn, Ti e P)
2. **Sólido:** minerais já cristalizados ou em cristalização + eventuais fragmentos de rochas IMS (Xenólitos).
3. **Voláteis** (gases dissolvidos): vapor de H<sub>2</sub>O (75-95 %), CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (metano), N + F, Cl, B)













## Paricutín - México

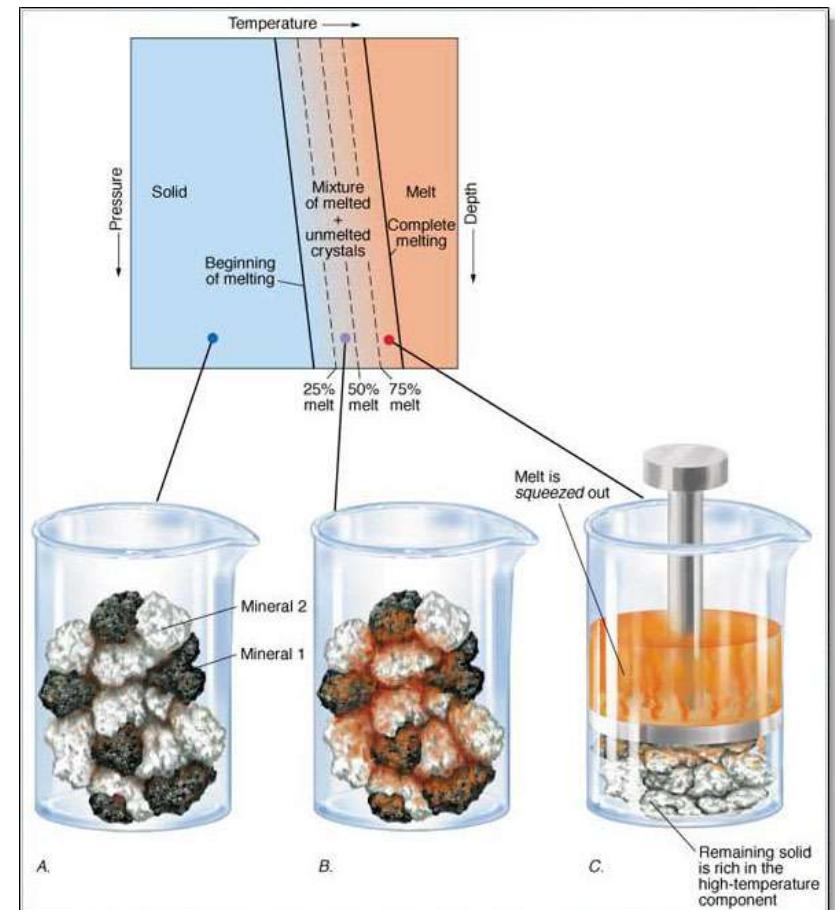
Erupção de 1943 a 1952

Espessura da lava - 424m



O magma resulta da fusão de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas (altas temperaturas  $> 650^{\circ}\text{C}$ ).

Esta fusão ocorre no interior da Terra (Crosta e Manto)

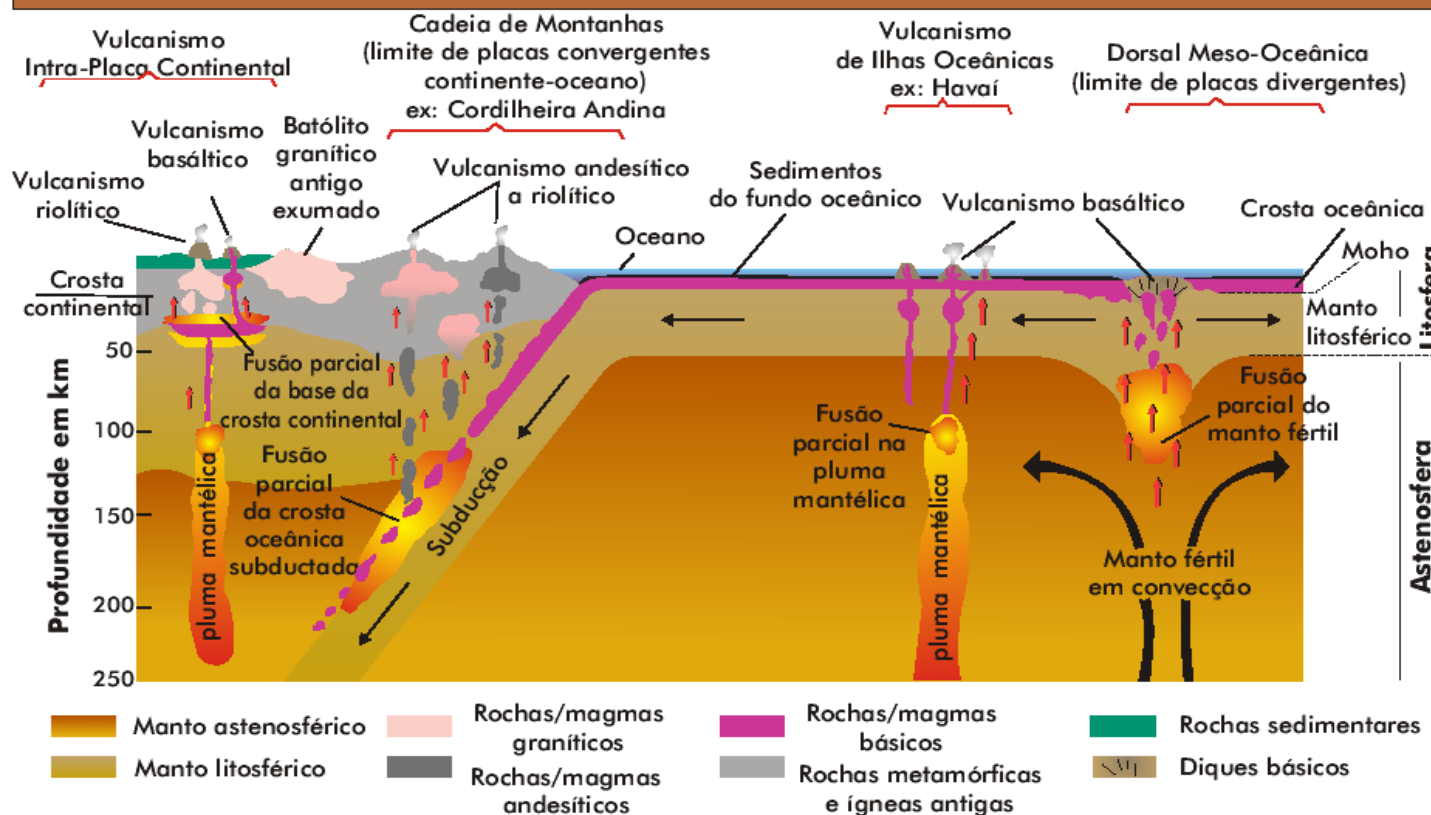




## Condições de formação das rochas Ígneas

- **Fonte** magmática que produz o magma: locais de altas temperaturas no interior da Terra: (Manto e Crosta)
- **Conduto** que levam o magma da sua fonte (manto ou crosta) para um outro lugar (dentro da crosta ou superfície da terra)
- **Resfriamento** (baixar a temperatura do magma)
- **Solidificação** (cristalizar o magma).

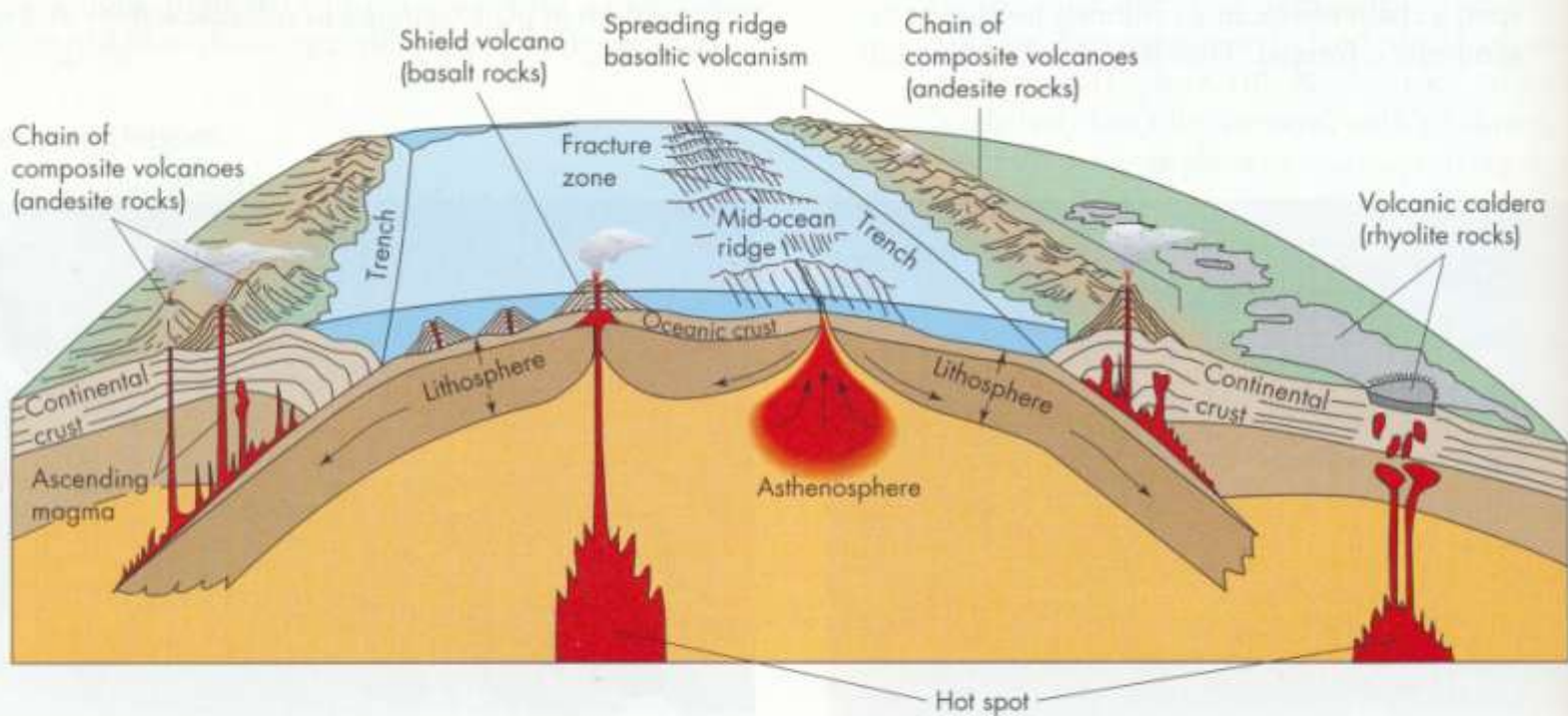
# Fontes do magma na crosta e no manto



**Fig. 16.4** Seção esquemática da crosta / manto (astenosfera / litosfera), indicando a localização dos sítios formadores de magmas no modelo de Tectônica de Placas.

**Fonte:** Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

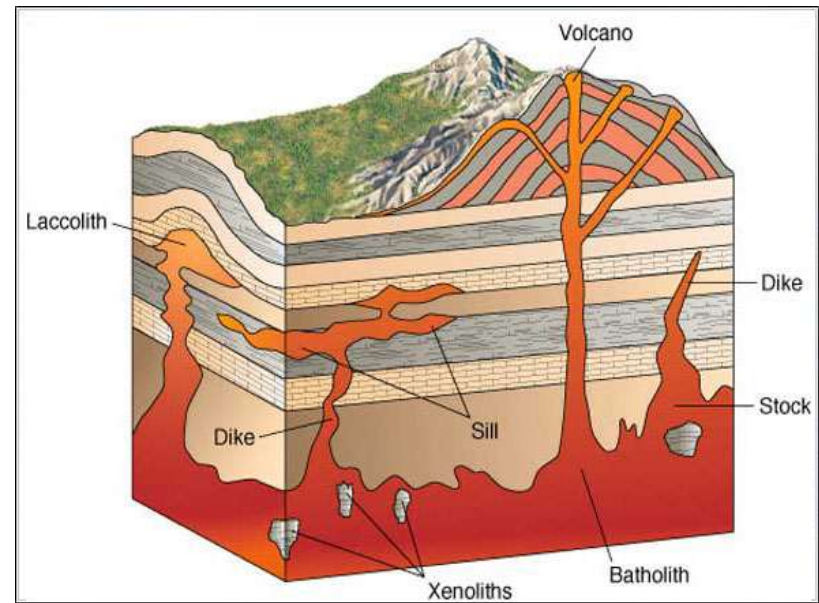
O Magma ascende do interior da terra e é alojado na crosta ou na superfície através de falhas e fraturas. São os **condutos** magmáticos.



**FIGURE 8.9** Idealized diagram showing plate tectonics processes and their relation to volcanic activity. (Source: Modified from Skinner and Porter, 1992. *The Dynamic Earth* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, p. 96, Figure 3.32.)

## Resfriamento e Solidificação

Quando o magma chega à superfície da terra, chama-se LAVA e forma vulcões.



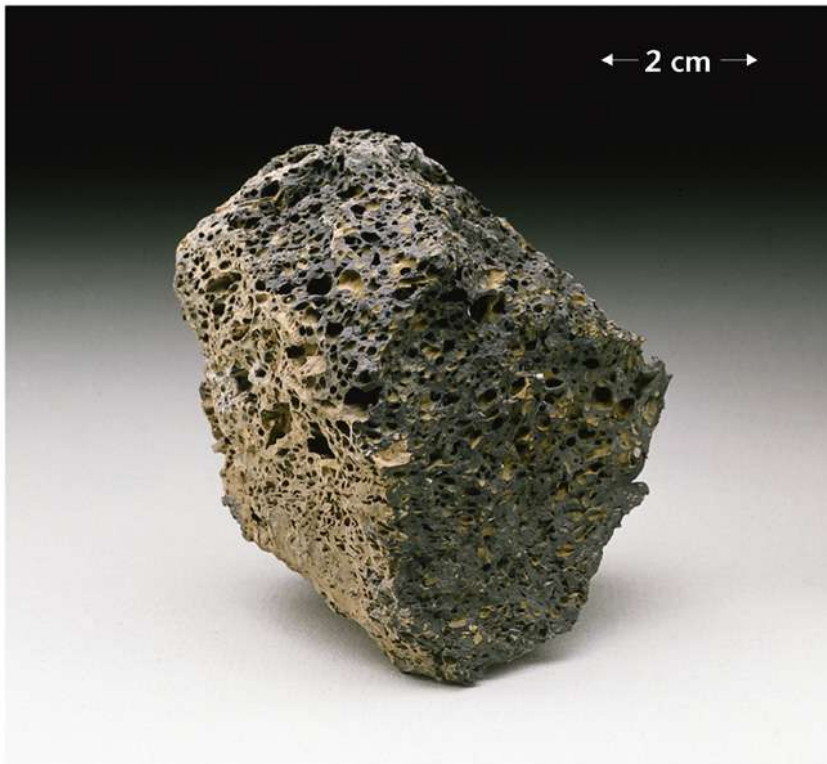
Plutonismo e vulcanismo



## Solidificação (Cristalização)

A Lava resfria, cristaliza-se e forma rochas **vulcânicas** ou extrusivas

EX: Basaltos e Riolitos



B. Rhyolite

Close up





# Solidificação (Cristalização)

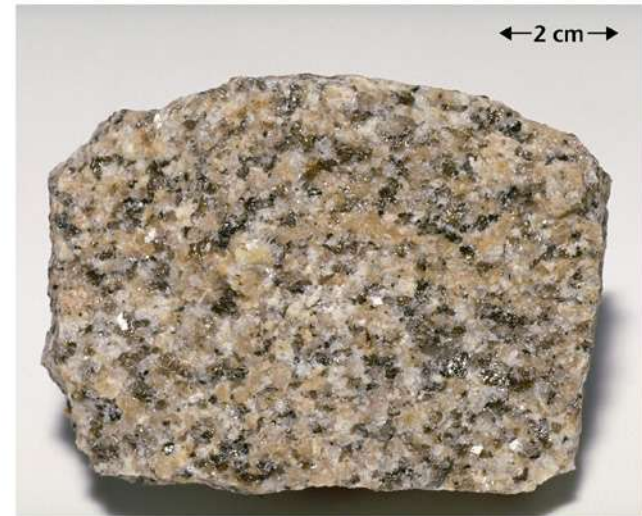
Quando o magma permanece e cristaliza-se no interior da terra forma-se a rocha **plutônica** ou intrusiva.

Ex: Gabros e Granitos



B. Gabbro

Close up



A. Granite

Close up



- A solidificação resulta na **cristalização** que é a formação de minerais por resfriamento e conseqüentemente resulta na rocha ígnea
- Para explicar a cristalização usamos a **Série de Bowen** que é uma seqüência de cristalização dos minerais em magmas



**Fig. 16.7** As séries de reação de Bowen.

**Fonte:** Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

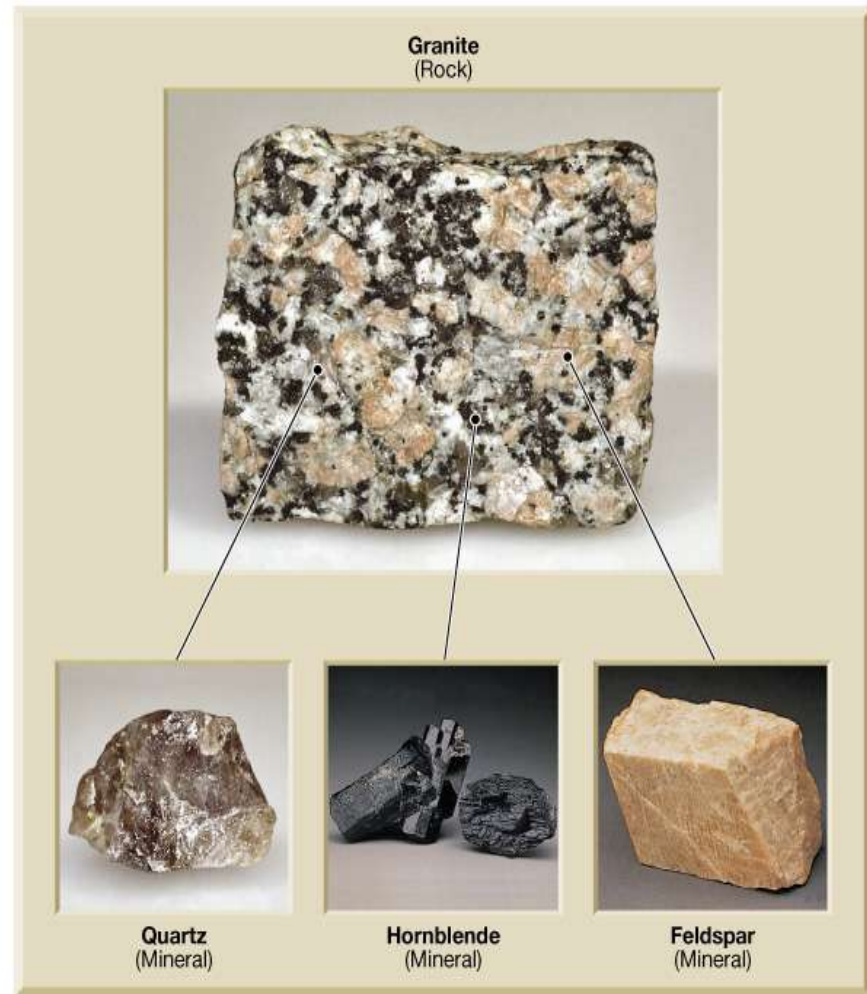
## Quais são os principais Minerais Formadores de Rochas Ígneas Plutônicas e Vulcânicas ?

### Minerais claros (félsicos)

- ricos em Si e Al, Ca, Na e K
- Feldspato Alcalino e Plagioclásio
- Quartzo

### Minerais escuros (máficos)

- Ricos em Fe, Mg e Ca
- Biotita e Muscovita
- Piroxênio e Anfibólios
- Olivina



# Classificação das rochas ígneas

## Por Profundidade

- Vulcânicas
- Plutônicas

## Pela estrutura

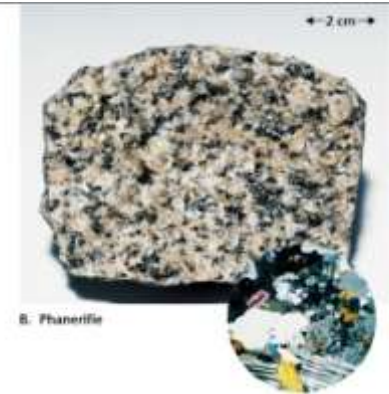
- Maciça
- Orientada
- Vesicular
- Amigdaloidal

## Pela textura

- A - Fanerítica
- B - Afanítica
- C - Porfirítica
- D - Vítreo

## Pelo teor de sílica

- Ácidas – com quartzo
- Intermediárias
- Básicas e ultrabásicas



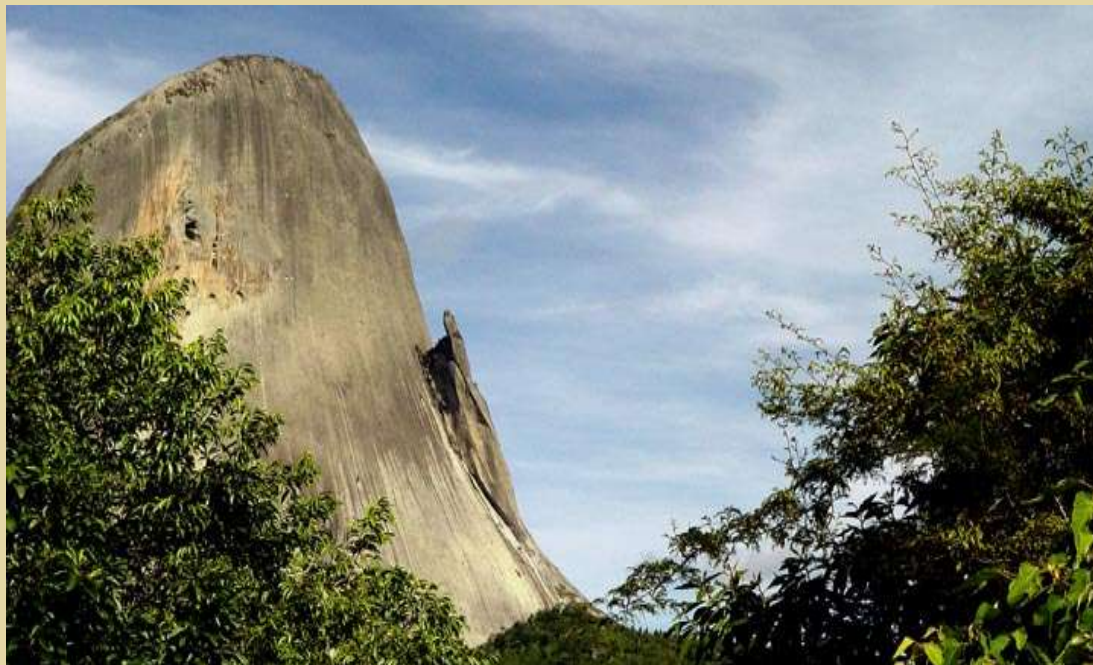
# Resumo

	Ácidas (com quartzo) SiO <sub>2</sub> > 65%	Intermediárias (sem quartzo) SiO <sub>2</sub> 52 a 65%	Básicas SiO <sub>2</sub> 45 a 52%
Mineralogia	Ortoclásio, quartzo, plagioclásio Na, biotita (anfíbólio)	Ortoclásio, plagioclásio Na, biotita (anfíbólio ou piroxênio)	Plagioclásio Ca, piroxênio (magnetita, ilmenita)
Vulcânica (txt afanítica ou vítrea)	<b>RIOLITO</b>	<b>ANDESITO</b>	<b>BASALTO</b>

Plutônica (txt. fanerítica)	<b>GRANITO</b>	<b>SIENITO</b>	<b>GABRO</b>
--------------------------------	----------------	----------------	--------------



## Ambientes ígneos





# Ambiente ígneo e mineralizações

## Rochas félsicas

- Metálicos
- Pedras preciosas – pegmatitos
- Minerais raros
- Feldspatos e quartzo
- Brita e rochas ornamentais

## Rochas máficas

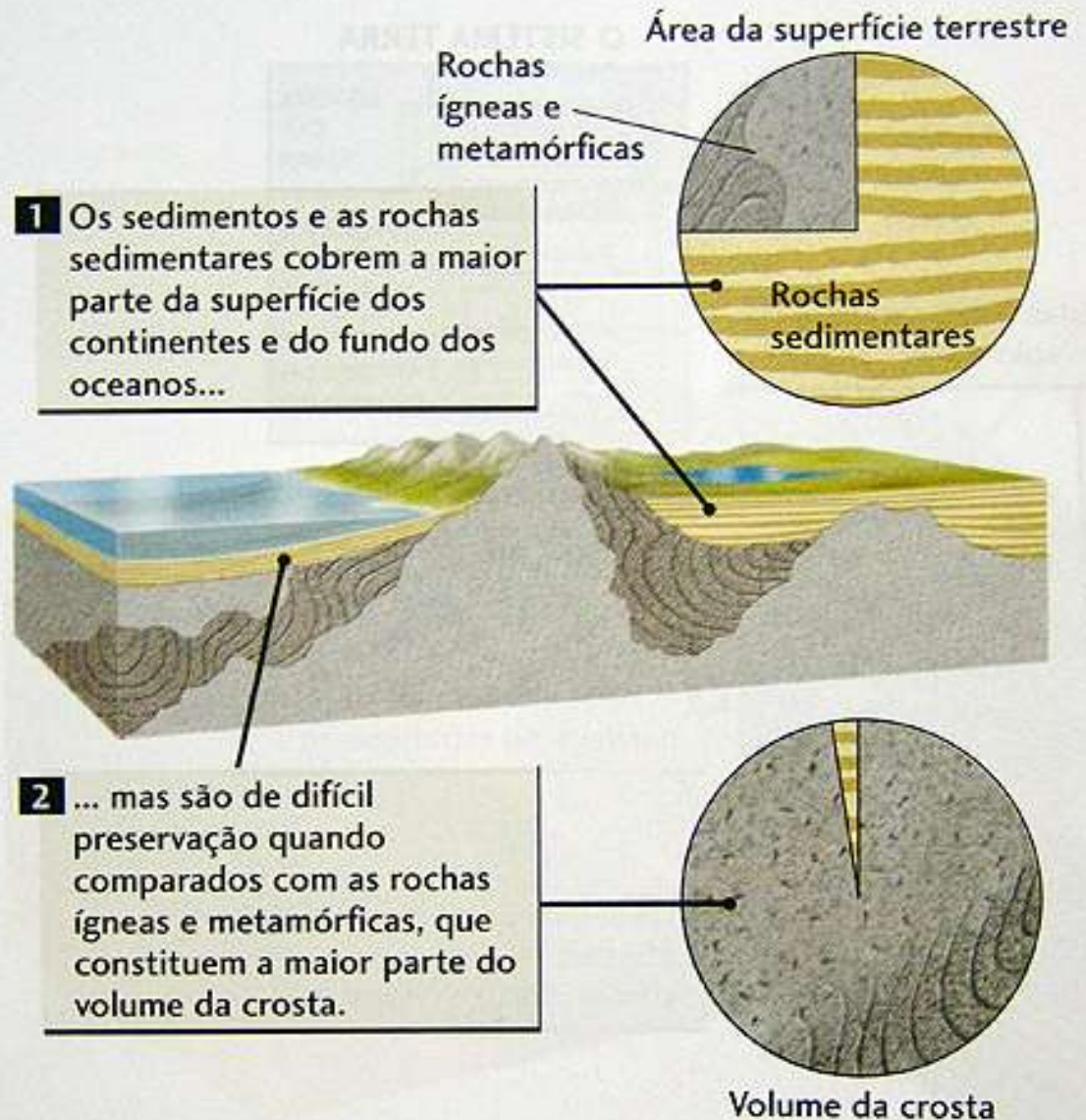
- Metálicos
- Pedras preciosas – geodos
- Brita
- Agrominerais
- Ambientais

# Rochas sedimentares

- **Sedimentos** - Material derivado de desagregação de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares.
- **Intemperismo** - desagregação mecânica e química das rochas
- Os **processos sedimentares** atuam sobre rochas ígneas, metamórficas e sedimentares preexistentes com o intemperismo, erosão e transporte, deposição e litificação de fragmentos (blocos, seixos) e partículas (areias, silte e argila) destas rochas em ambientes sedimentares continentais, transicionais e marinhos.

- **Ambientes sedimentares** - são ambientes onde os sedimentos se acumulam em depressões (bacias sedimentares continentais e oceânicas).
- Cada ambiente sedimentar (fluvial, glacial, eólico e marinho raso e profundo) tem características físicas, químicas e biológicas e produtos sedimentares típicos.

# Área e volume dos sedimentos na crosta



**Figura 4.5** Os sedimentos e as rochas sedimentares cobrem a maior parte da superfície dos continentes e do fundo dos oceanos.

# Processos Sedimentares Continentais e Marinhos

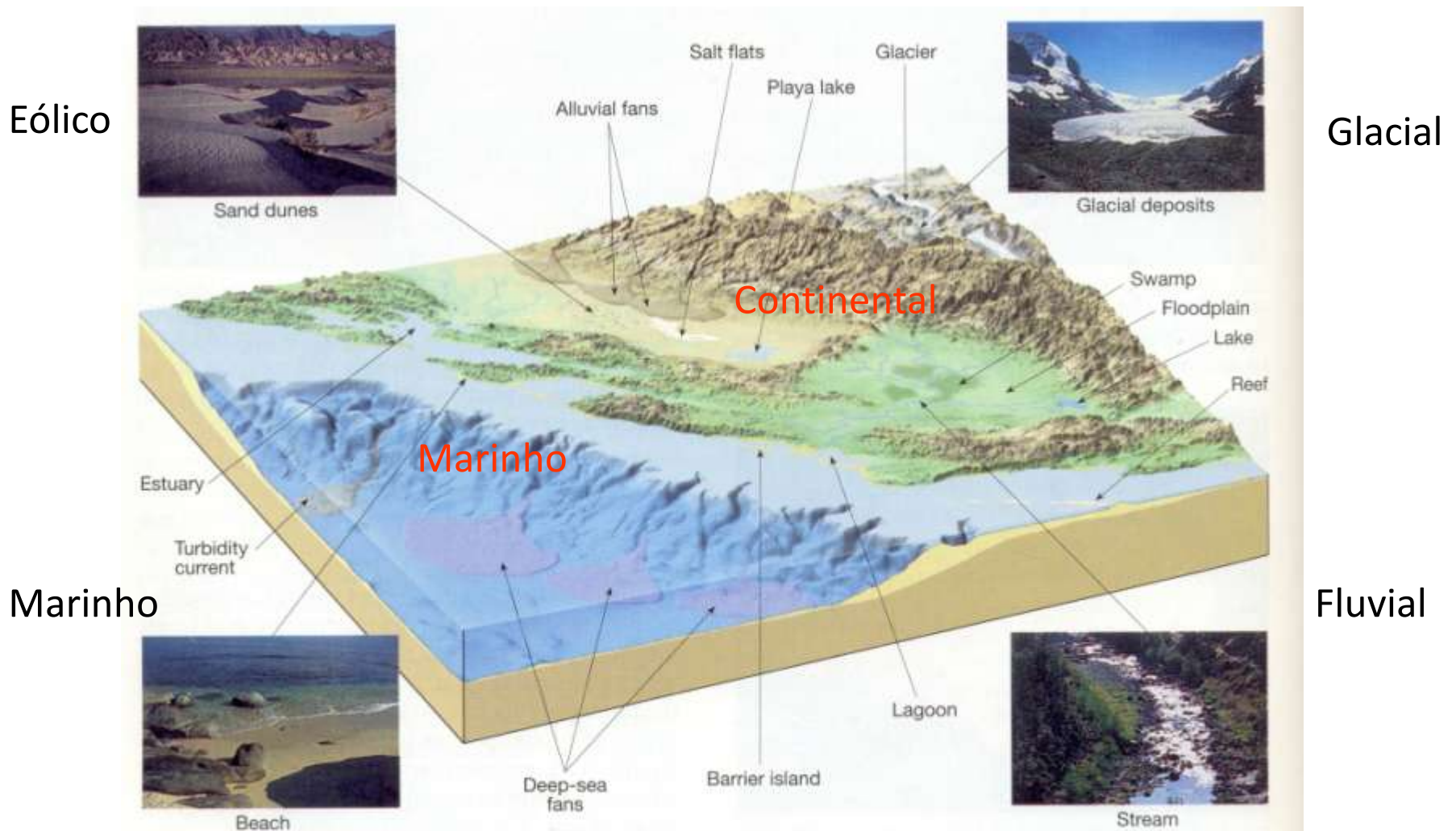
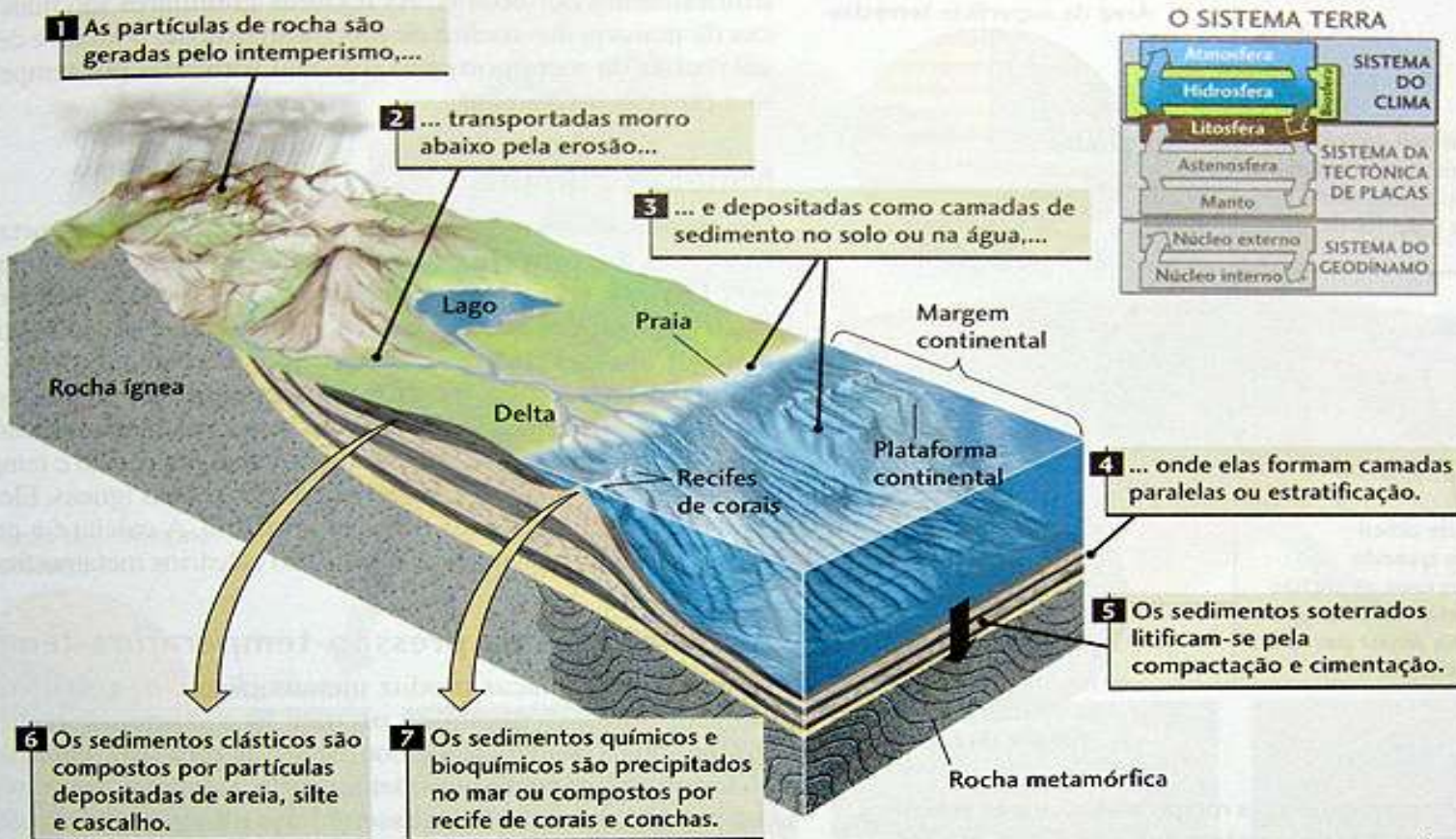


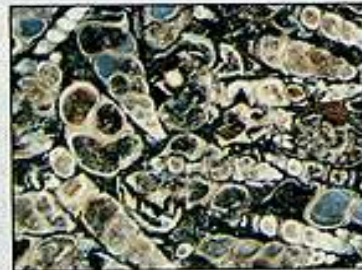
Figure 6.14 Sedimentary environments are those places where sediment accumulates. Each is characterized by certain physical, chemical, and biological conditions. Because each sediment contains clues about the environment in which it was deposited, sedimentary rocks are important in the interpretation of Earth history. A number of important terrestrial, shoreline (transitional), and marine sedimentary environments are represented in this idealized diagram.



# Intemperismo



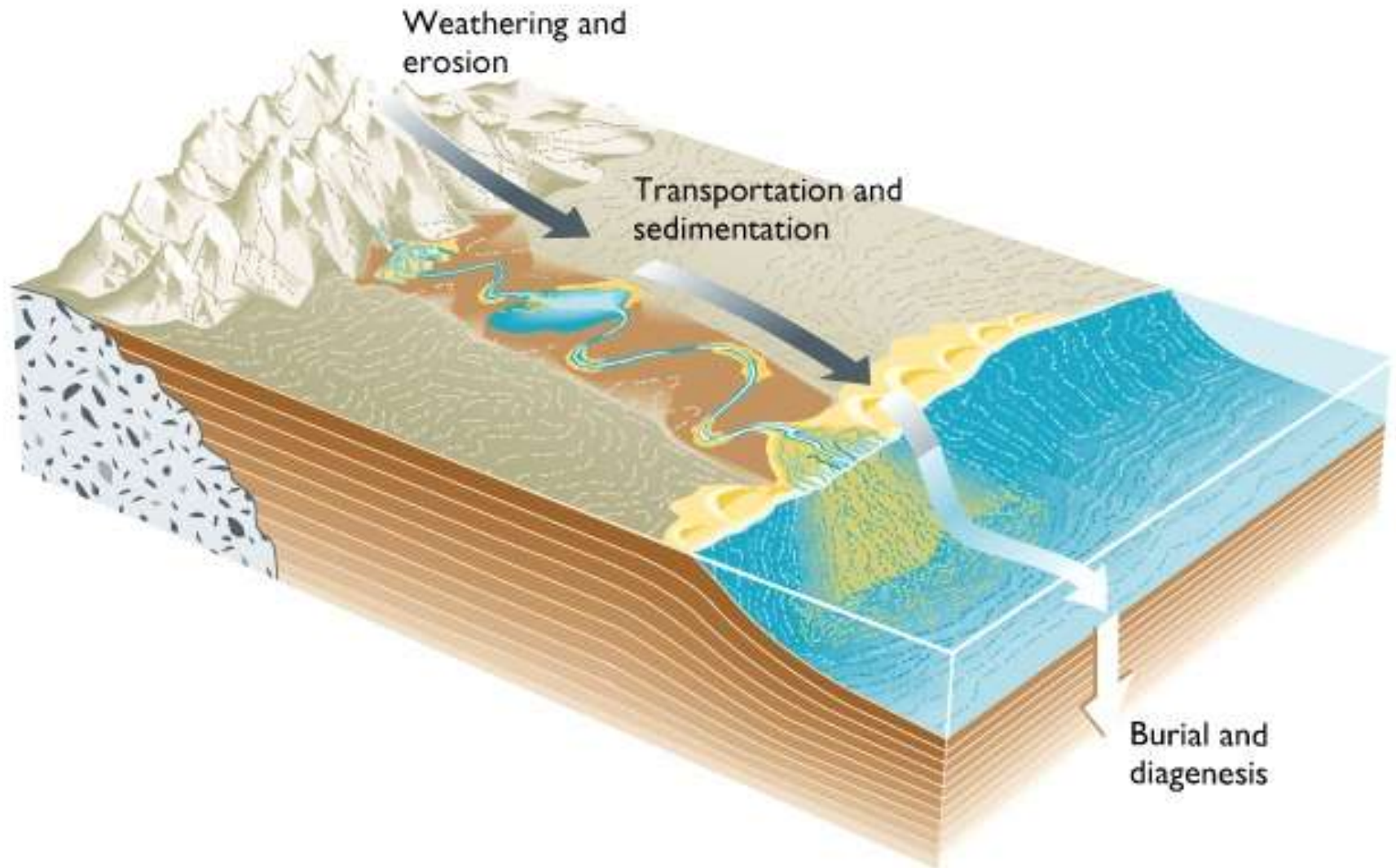
## O SISTEMA TERRA



**Figura 4.4** O intemperismo desintegra a rocha em partículas menores, que são carregadas morro e rio abaixo pela erosão, sendo depositadas como camadas de sedimentos ao longo das margens continentais. Outro tipo de sedimento é produzido por precipitação bioquímica, como a formação dos recifes de corais. Enquanto as camadas acumulam-se e vão sendo gradualmente soterradas, elas litificam, endurecendo até virar uma rocha sedimentar. (Esquerda) Arenito laminado [Breck P. Kent]; (direita) calcário fossilífero [Peter Kresan].

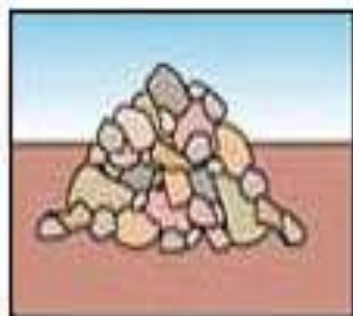


Intemperismo físico e químico → Erosão → Transporte → Deposição → Diagênese e litificação (compactação) = **Rochas Sedimentares**

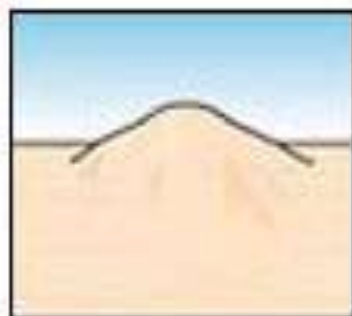


- **Diagênese:** Conjunto de mudanças físicas, químicas e biológicas, que afetam o sedimento desde a deposição até a litificação
- **Litificação:** sedimentos inconsolidados são lentamente convertidos em rochas sedimentares ( ↓ P ↓ T)
- Processos associados com diagênese e litificação:  
compactação, cimentação, recristalização e alteração química

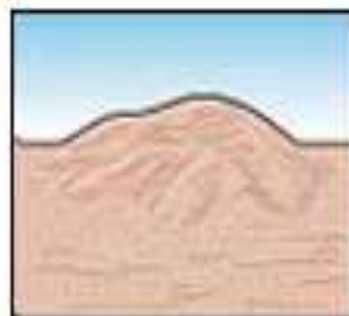
Sediment



Gravel



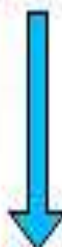
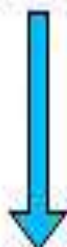
Sand



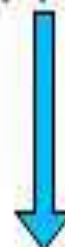
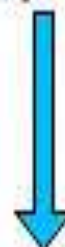
Silty mud



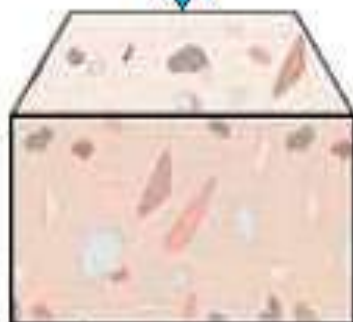
Clayey mud



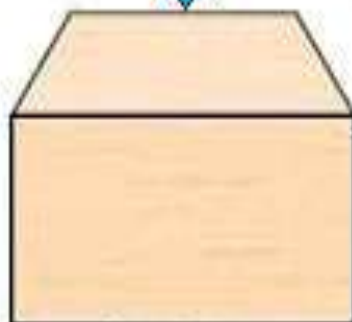
...with compression  
and time,  
can become...



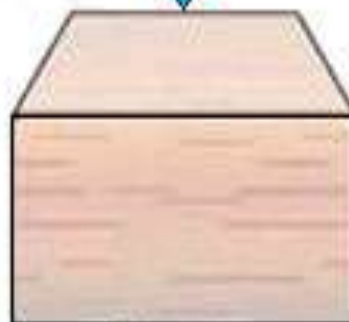
Rock



Conglomerate



Sandstone



Siltstone



Shale

# Bacia sedimentar e sedimentação

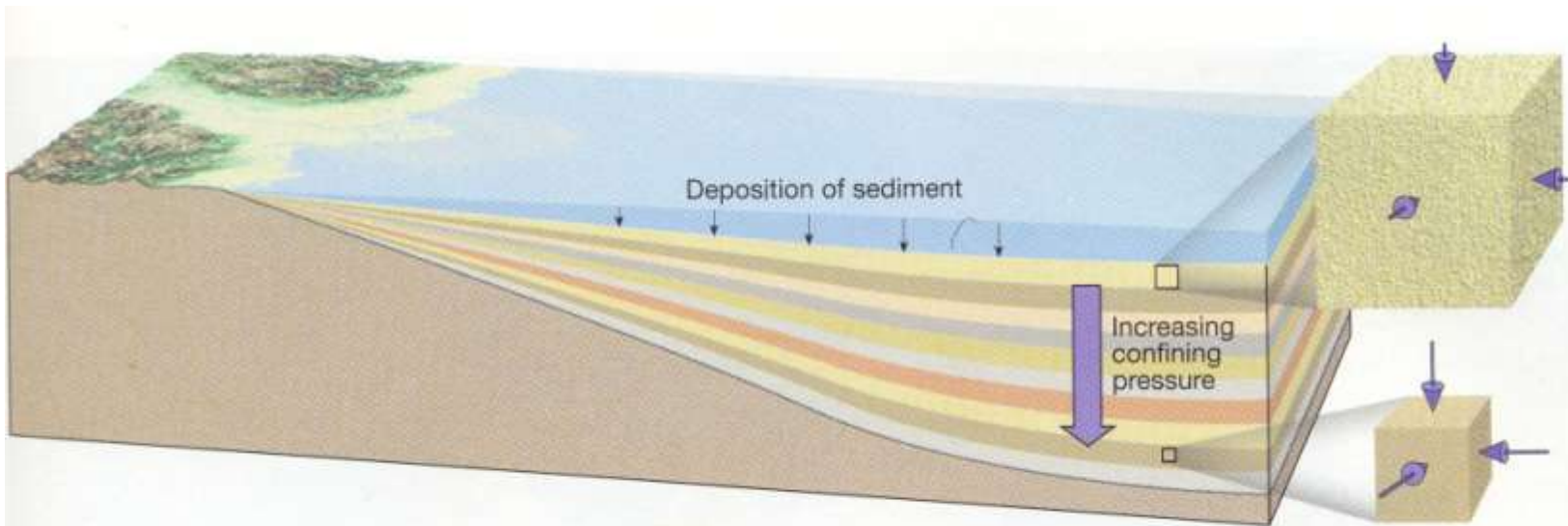


Figure 15.2 In a sedimentary basin, older layers at depth are subjected to increased confining pressures as additional layers are deposited. The higher pressures result in fluid expulsion and pore closure, causing a reduction in volume.

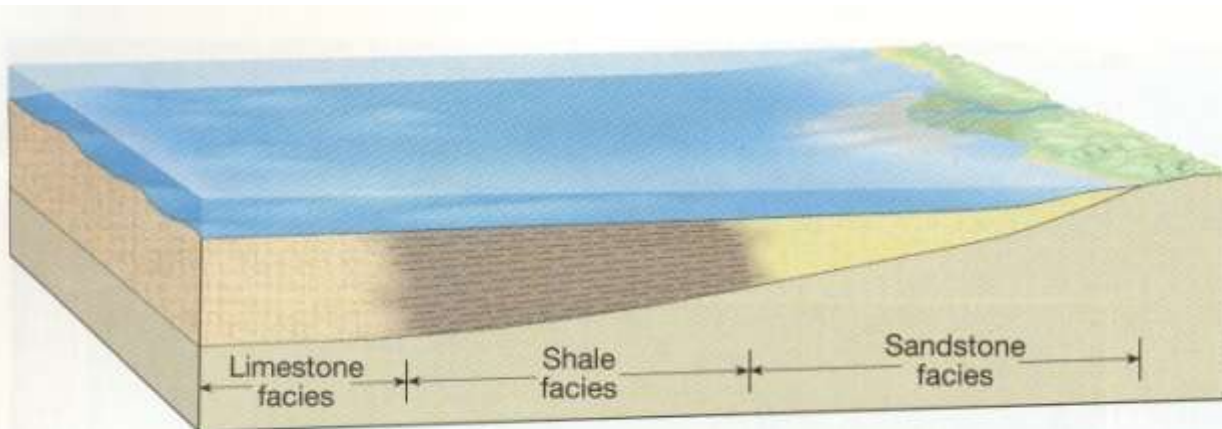


Figure 6.15 When a single sedimentary layer is traced laterally, we may find that it is made up of several different rock types. This can occur because many sedimentary environments can exist at the same time over a broad area. The term *facies* is used to describe such sets of sedimentary rocks. Each facies grades laterally into another that formed at the same time but in a different environment.



# Ambientes Sedimentares Clásticos

AMBIENTE	AGENTE DE TRANSPORTE, DEPOSIÇÃO	SEDIMENTOS
<b>CONTINENTAL</b>		
Fluvial/Aluvional	Rios	Cascalho, areia, argila
Eólico ou desértico	Vento	Areia, silte,
Lacustre (lago)	Correntes lacustres, ondas	Areia, argila
Glacial	Gelo	Areia, cascalho, argila
<b>COSTEIRO</b>		
Delta	Rio + ondas + marés	Areia, argila
Praia	Ondas, maré	Areia, cascalho
Planície de maré	Correntes	Areia, argila
<b>MARINHO</b>		
Plataforma continental	Ondas, maré	Areia, argila
Margem continental	Correntes oceânicas	Argila, areia
Mar profundo	Correntes oceânicas	Argila

## Agentes de Intemperismo, Erosão, Transporte e Deposição

- **Água:** processos sedimentares fluviais (rios e lagos), costeiro e marinho (marinho raso e profundo).
- **Gelo:** processos sedimentares glaciais causados por transporte de sedimentos por geleiras.
- **Vento:** processos sedimentares eólicos causados por transporte de sedimentos por vento em regiões continentais e marinhas costeiras.
- **Gravidade (água e vento):** fluxos de massas rochosas.



Ação da água,  
vento e gelo







Simulação do que seria a paisagem na época de deposição do Arenito Vila Velha. Imagem da Groelândia



Fase 1 - avanço das geleiras



Fase 2 - recuo das geleiras fornecendo sedimentos para a formação de lobos arenosos - Arenito Vila Velha

Derretimento de geleiras – ação de água e gelo



## Velocidade da sedimentação nos ambientes sedimentares

- **Gradual:** taxa natural (dia-dia) de sedimentação produzida por rios, ventos, mares e geleiras
- **Episódica:** taxas elevadas de sedimentação que ocorre associada com enchentes em rios, avalanches de geleiras, tempestades de areias...

- **Sedimentos clásticos** : R.S. Clásticas.

Conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos.

- **Sedimentos químicos** : R.S. Químicas.

Gipsitos, Carbonatos (Calc. Cal. e Dol.), chert (sílex), BIF

- **Sedimentos biogênicos** : rochas de origem biológica.

Carvão, coquina



Conglomerado

Argilito



Arenito

Argilito com icnofósseis







Arenito Vila velha



Folhelho  
pirobetuminoso







arenito

siltito



argilito



# Classificação dos sedimentos clásticos com base na granulometria

**Tabela 9.1** Classificação dos sedimentos segundo a granulometria

Intervalo granulométrico (mm)	Classificação nominal			
	Proposição original (inglês)		Tradução usual (português)	
> 256	GRAVEL	Boulder	CASCALHO (ou balastro em Portugal)	Matacão
256-64		Cobble		Bloco ou calhau
64-4,0		Pebble		Seixo
4,0-2,0		Granule		Grânulo
2,0-1,0	SAND	Very coarse sand	AREIA	Areia muito grossa
1,0-0,50		Coarse sand		Areia grossa
0,50-0,250		Medium sand		Areia média
0,250-0,125		Fine sand		Areia fina
0,125-0,062		Very fine sand		Areia muito fina
0,062-0,031	SILT	Coarse silt	SILTE	Silte grosso
0,031-0,016		Medium silt		Silte médio
0,016-0,008		Fine silt		Silte fino
0,008-0,004		Very fine silt		Silte muito fino
<0,004	CLAY	Clay	ARGILA	Argila

# ROCHAS SEDIMENTARES QUÍMICAS

- Litificação de precipitados químicos inorgânicos ou orgânicos
- Maioria contém um mineral importante, que é a base para sua classificação
- Carbonatos, Evaporitos, Formações ferríferas bandadas, depósitos fosfáticos, chert

Calcário





Carbonato na Turquia





Photo © Ladislav Kamarád

Salar na Bolívia







# ROCHAS SEDIMENTARES BIOGÊNICAS

- litificação de sedimentos com alto teor de matéria orgânica.
- turfas (restos de vegetais), coquina (conchas de animais), carvão....





Extração de carvão - Figueira



# Resumo rochas sedimentares

Origem	Diminui a granulometria <span style="float: right;">—————→</span>			
Clástica	Conglomerado	Arenito	Siltito	Folhelho/argilito
Química	Calcários	Dolomítico (contém Ca e Mg)		
		Calcítico (contém Ca)		
	Evaporitos			
	Sílex ou chert			
Biológica	Carvão, turfa e coquinas			

# Ambiente sedimentar e mineralizações

## Rochas clásticas

- Diamante
- Areia
- Argila e caulim
- Sal-gema
- Rochas ornamentais

## Rochas químicas e biogênicas

- carvão
- urânio
- Petróleo e gás
- Calcário
- Gesso
- Rochas ornamentais
- Corretivos de solo e fertilizantes

# Rochas metamórficas

# Rochas metamórficas

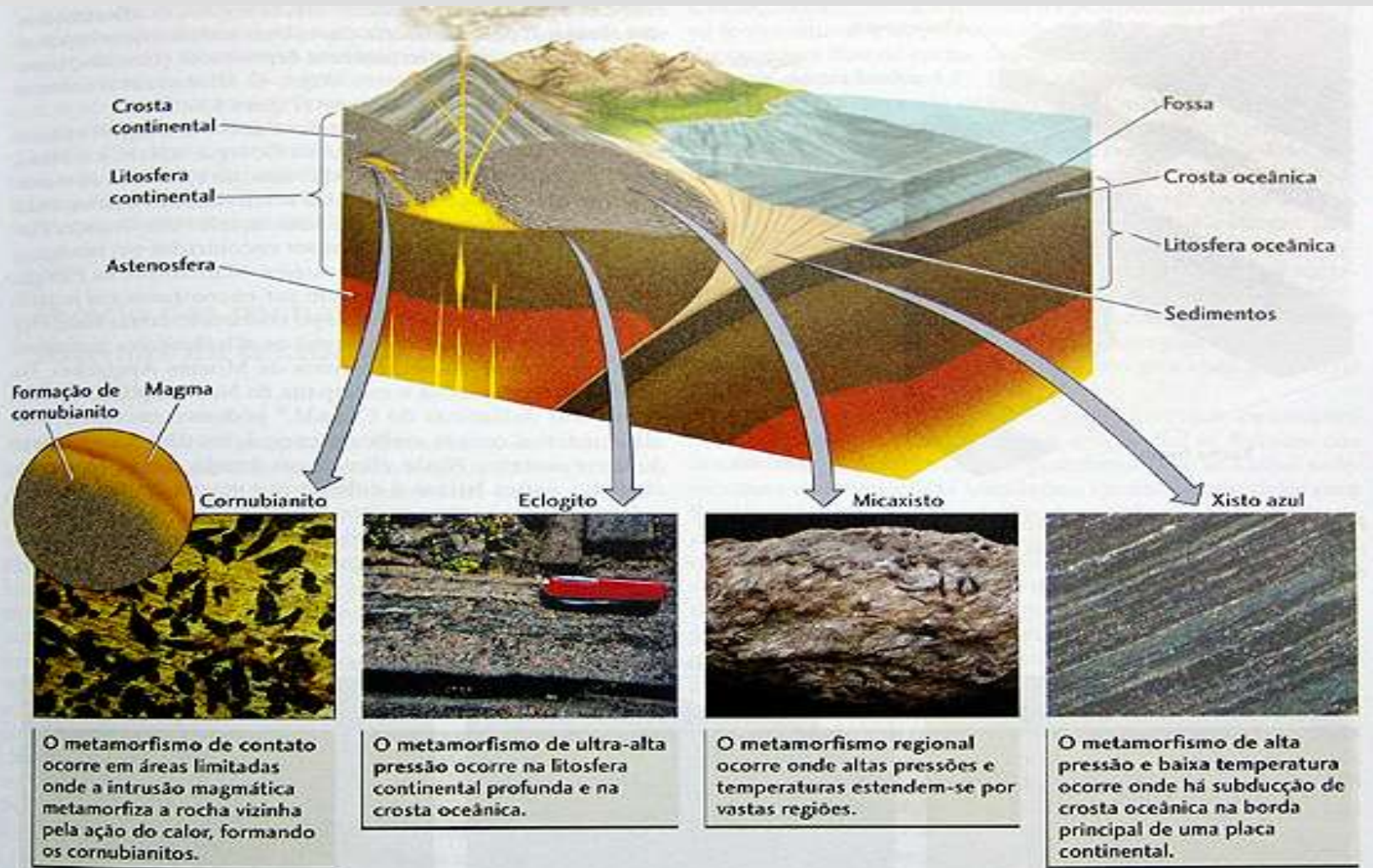


Figura 4.6 As rochas metamórficas formam-se sob quatro condições principais. Os exemplos de rochas mostrados aqui são (da esquerda para a direita): *cornubianitos* [Biophoto Associates/Photo Researchers], *eclogito* [Julie Baldwin], *micaxisto* [John Grotzinger] e *xistos azuis* [Mark Cloos].



## Transformações

- Metamorfismo
- Pressão e temperatura
- Rocha original (protólito)

Minerais das rochas pré-existentes (sedimentares, ígneas e outras metamórficas) modificam-se em minerais típicos de rochas metamórficas.

Estrutura e textura : Rochas metamórficas passam a apresentar orientação de minerais

(exceto em metamorfismo de contato e em algumas rochas metamórficas. Ex. mármore e quartzitos )

- Mudanças que ocorrem – composição e estrutura
- Estado sólido – reações sólido-sólido
- Fase fluida (H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>)
- Intemperismo e diagênese não são processos metamórficos

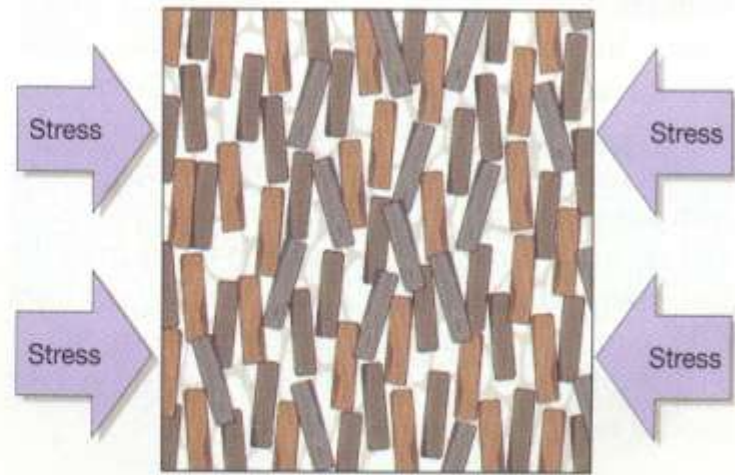
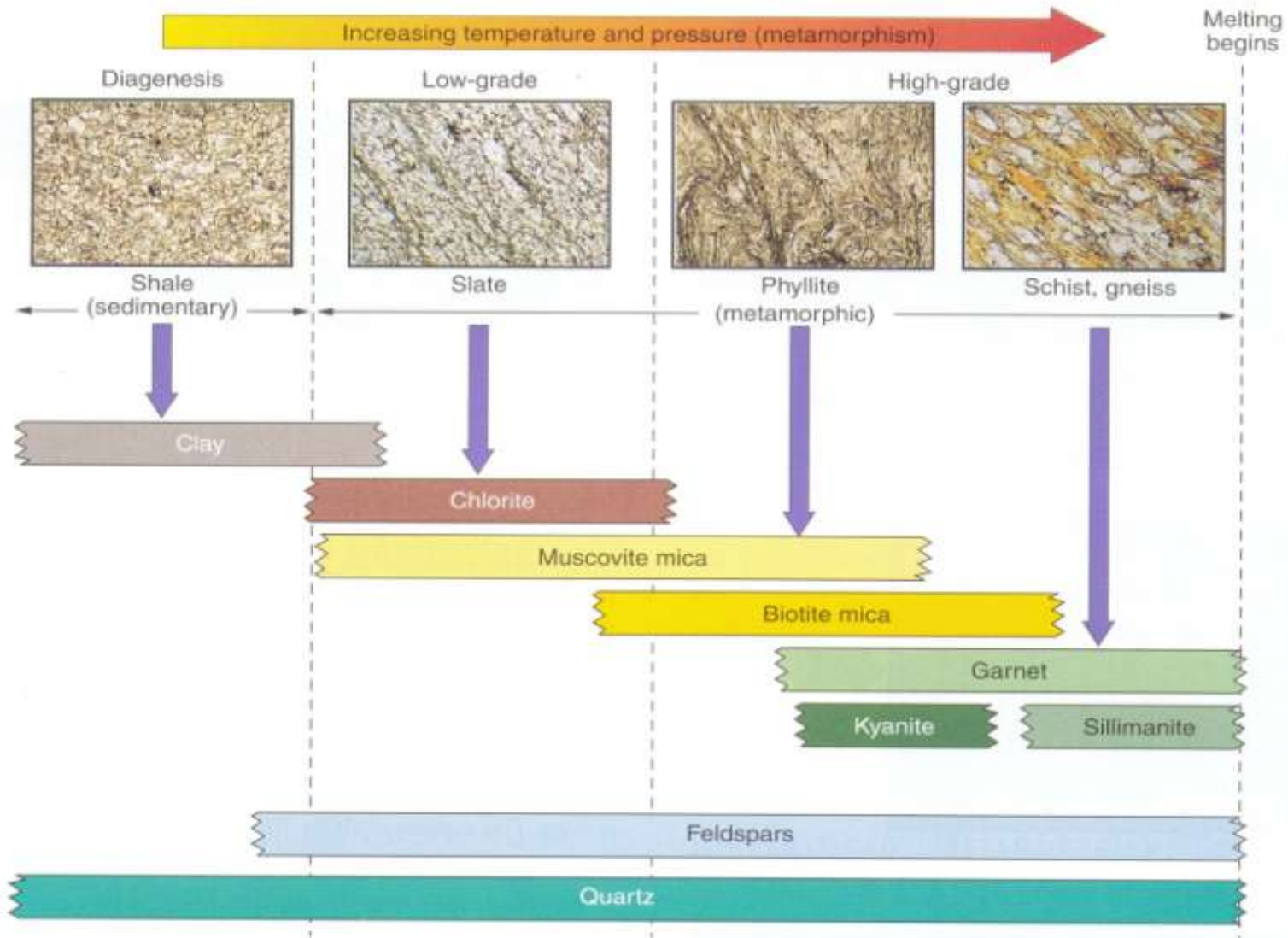


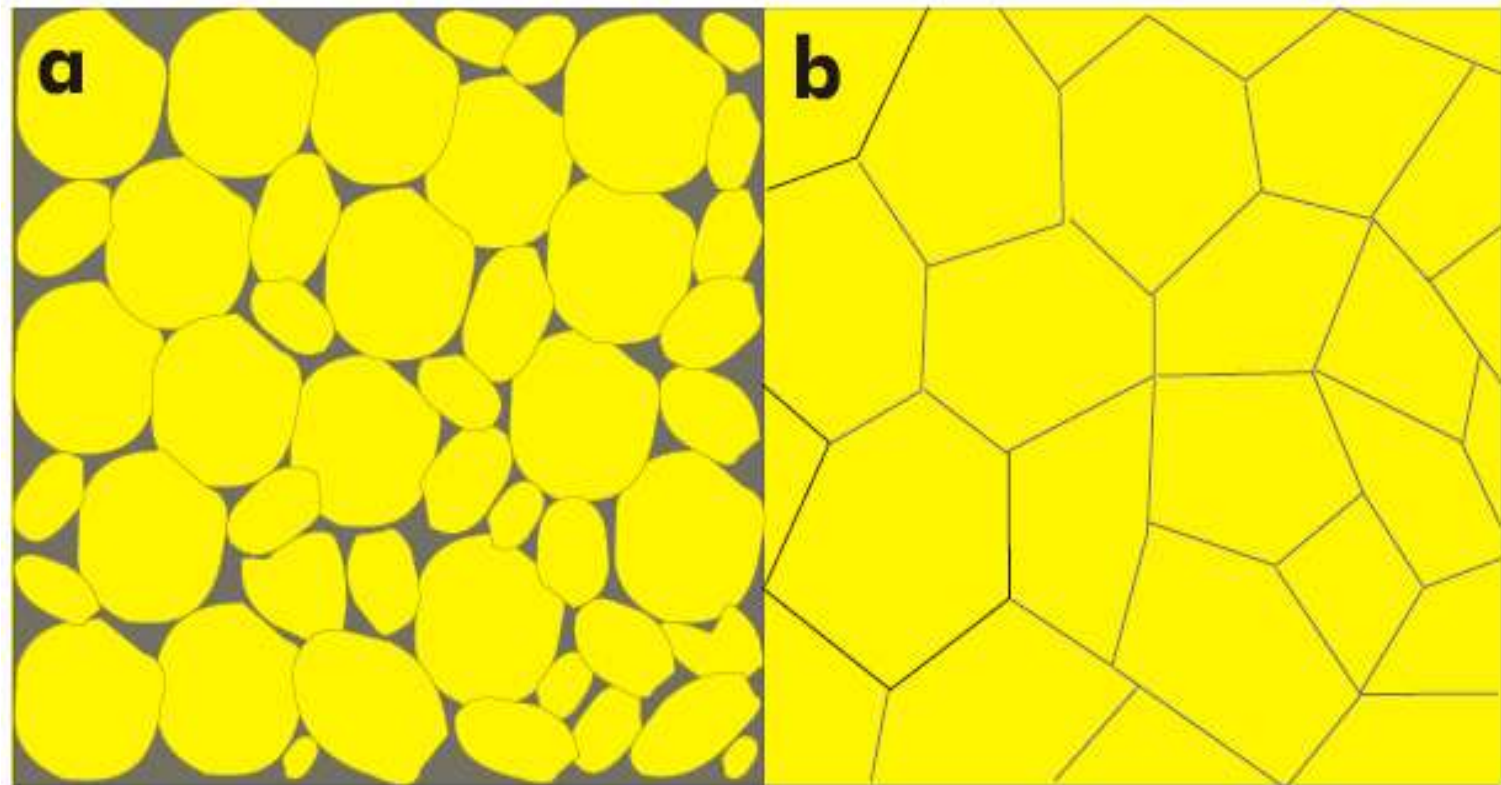
Figure 7.5 Under directed pressure, planar minerals, such as the micas, become reoriented or recrystallized so that their surfaces are aligned at right angles to the stress. The resulting planar orientation of mineral grains gives the rock a foliated texture. If the coarse-grained igneous rock (granite) on the left underwent intense metamorphism, it could end up closely resembling the metamorphic rock on the right (gneiss). (Photos by E. J. Tarbuck)



**Figure 8.8 From Shale to Schist** The bars show mineral assemblage changes as shale progressively metamorphoses from low to high grade. Before metamorphism, the shale is a sedimentary rock made of clay particles and quartz grains. The first metamorphic rock to develop is a low-grade slate, then a phyl-

lite, and finally a high-grade schist or gneiss. Each photomicrograph shows about 3 mm of rock. The minerals kyanite and sillimanite have the same composition ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) but different crystal structures—they occur only in metamorphic rocks.

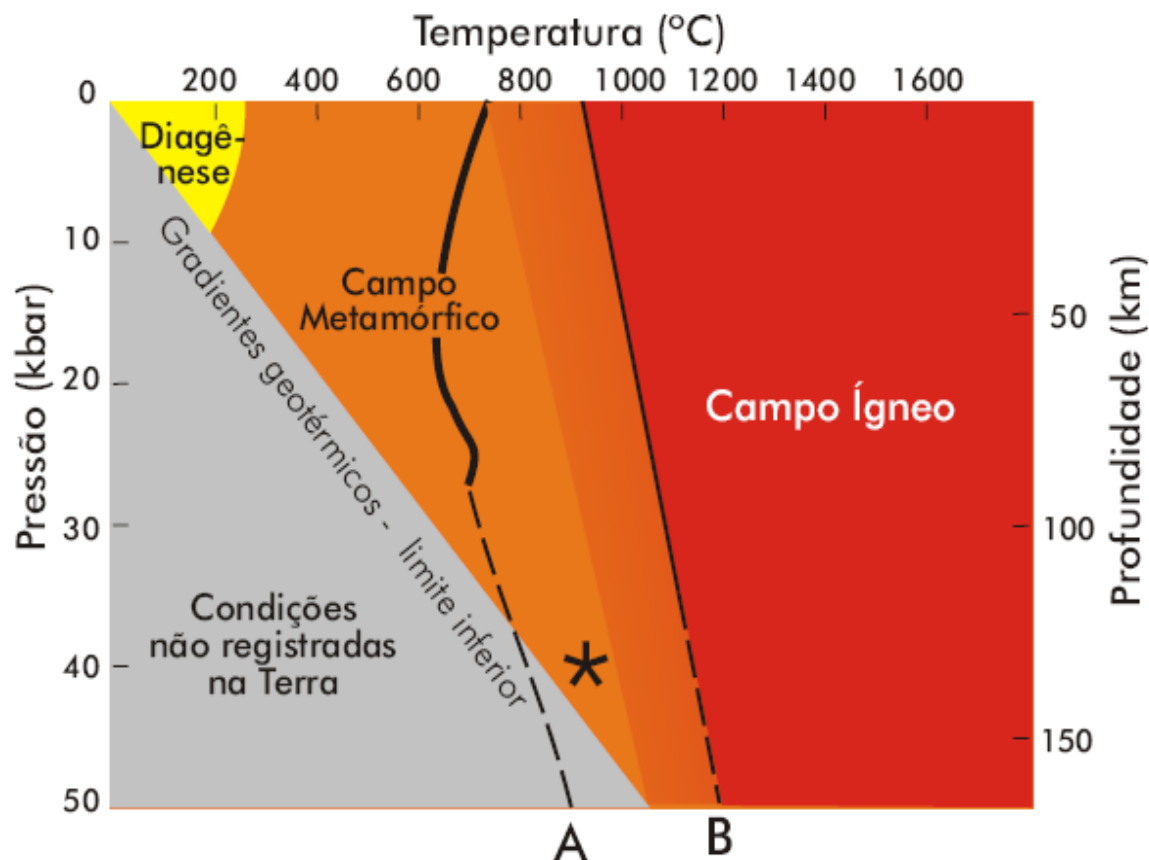




| 1 mm |

**Fig. 18.2** Arenito com textura sedimentar clástica bem selecionada, poroso e com grãos de quartzo arredondados (a) e o seu equivalente metamórfico, um quartzito (b), com textura granoblástica em mosaico (poligonizada), onde os grãos de quartzo preenchem todo o espaço, tocando-se através de contatos retos que fazem junções de  $120^\circ$  entre si.

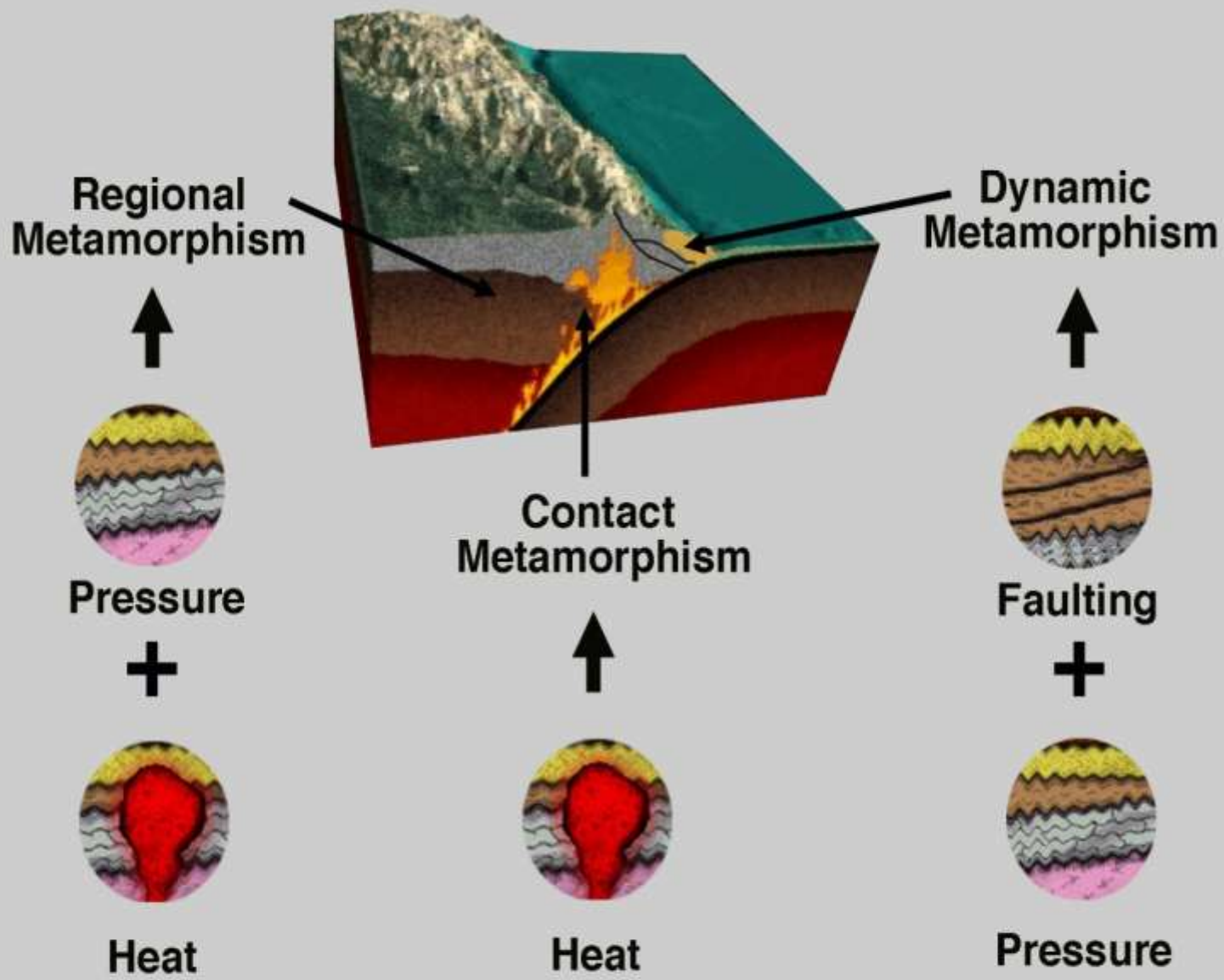
# Campo de atuação do metamorfismo



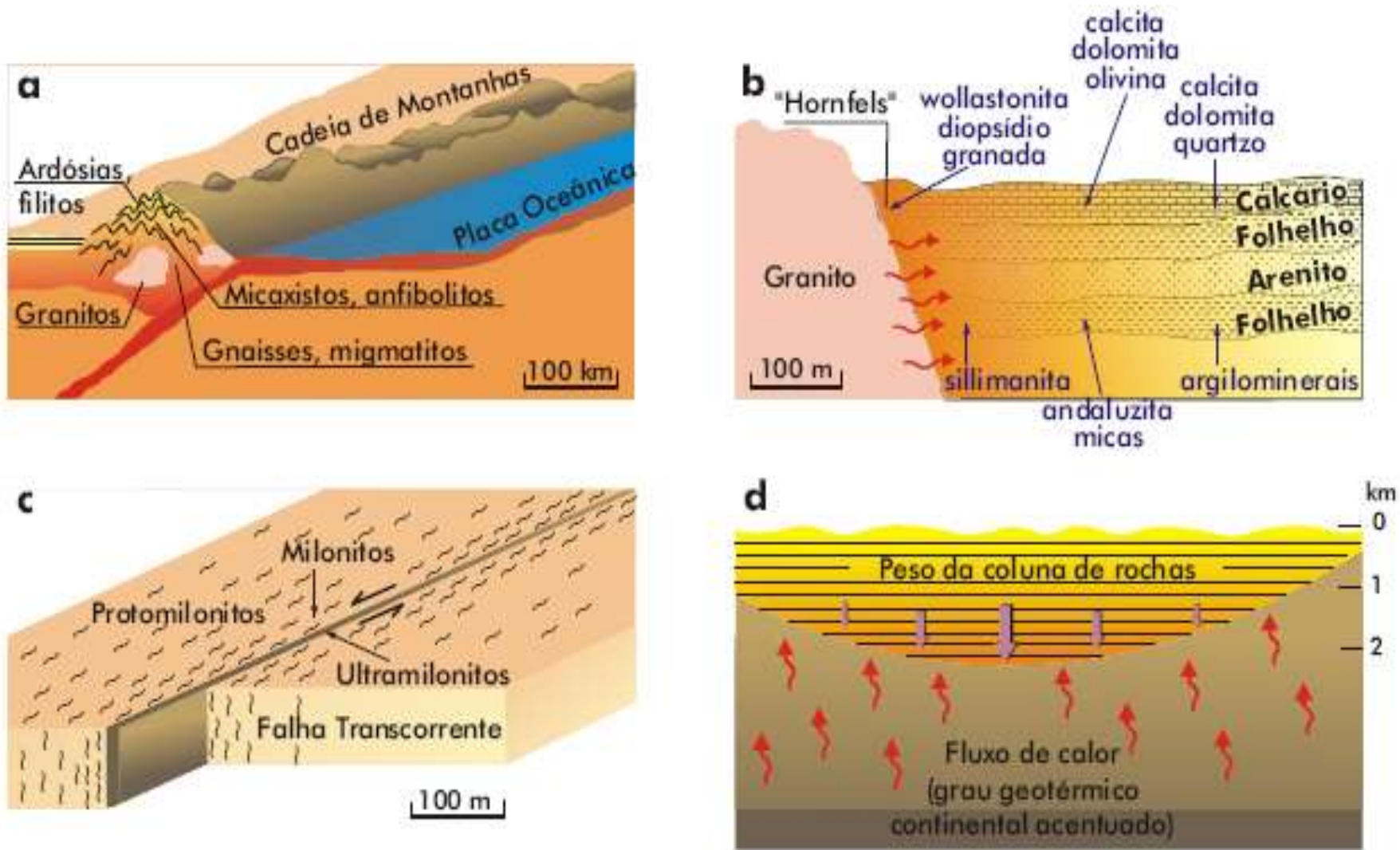
**Fig. 18.1** O campo do metamorfismo em diagrama P x T. O asterisco indica as condições de pressão mais elevada registradas em rochas atualmente expostas à superfície da crosta terrestre. A – curva de fusão para granitos sob condições hidratadas ( $P_{tot} = PH_2O$ ); B – curva de fusão para granitos sob condições anidras ( $PH_2O = 0$ ).

# Tipos de metamorfismo

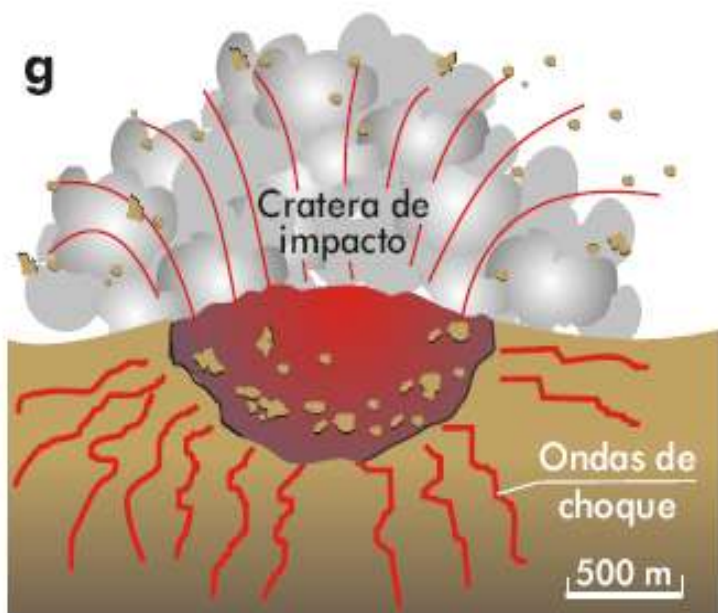
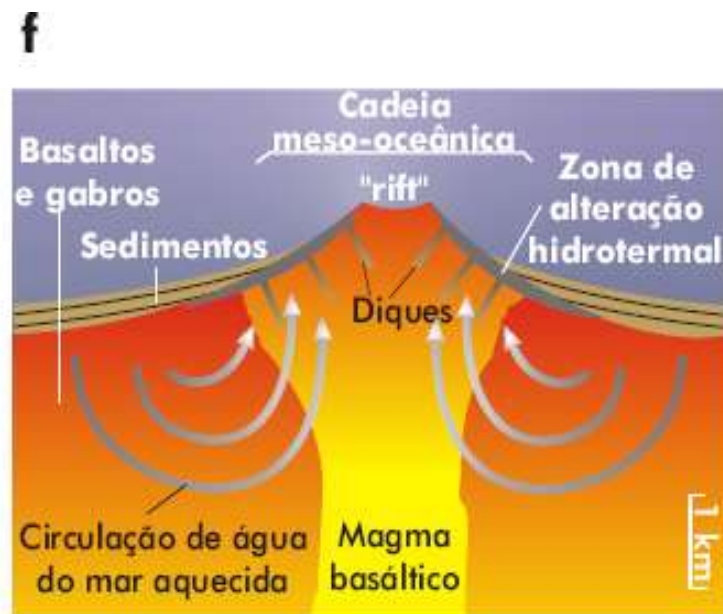
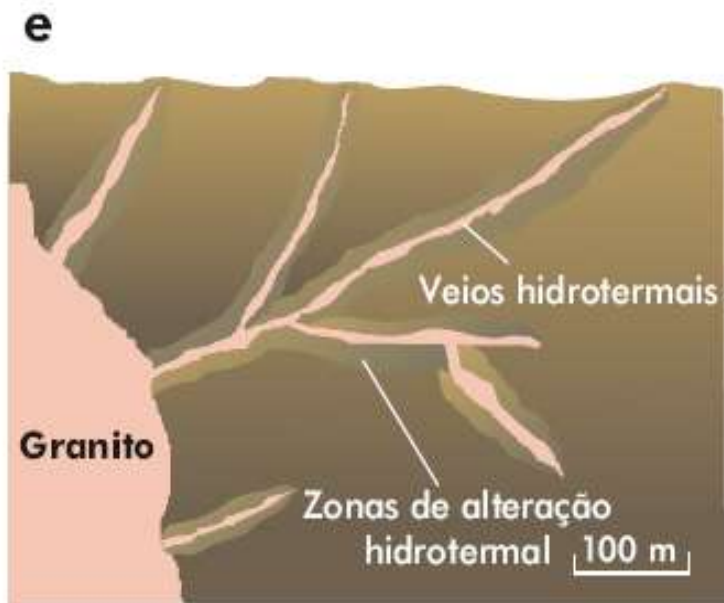
- Regional (ou dinamotermal)
- Contato (ou termal)
- Cataclástico (ou dinâmico)
- Hidrotermal
- Soterramento
- Impacto
- Fundo Oceânico



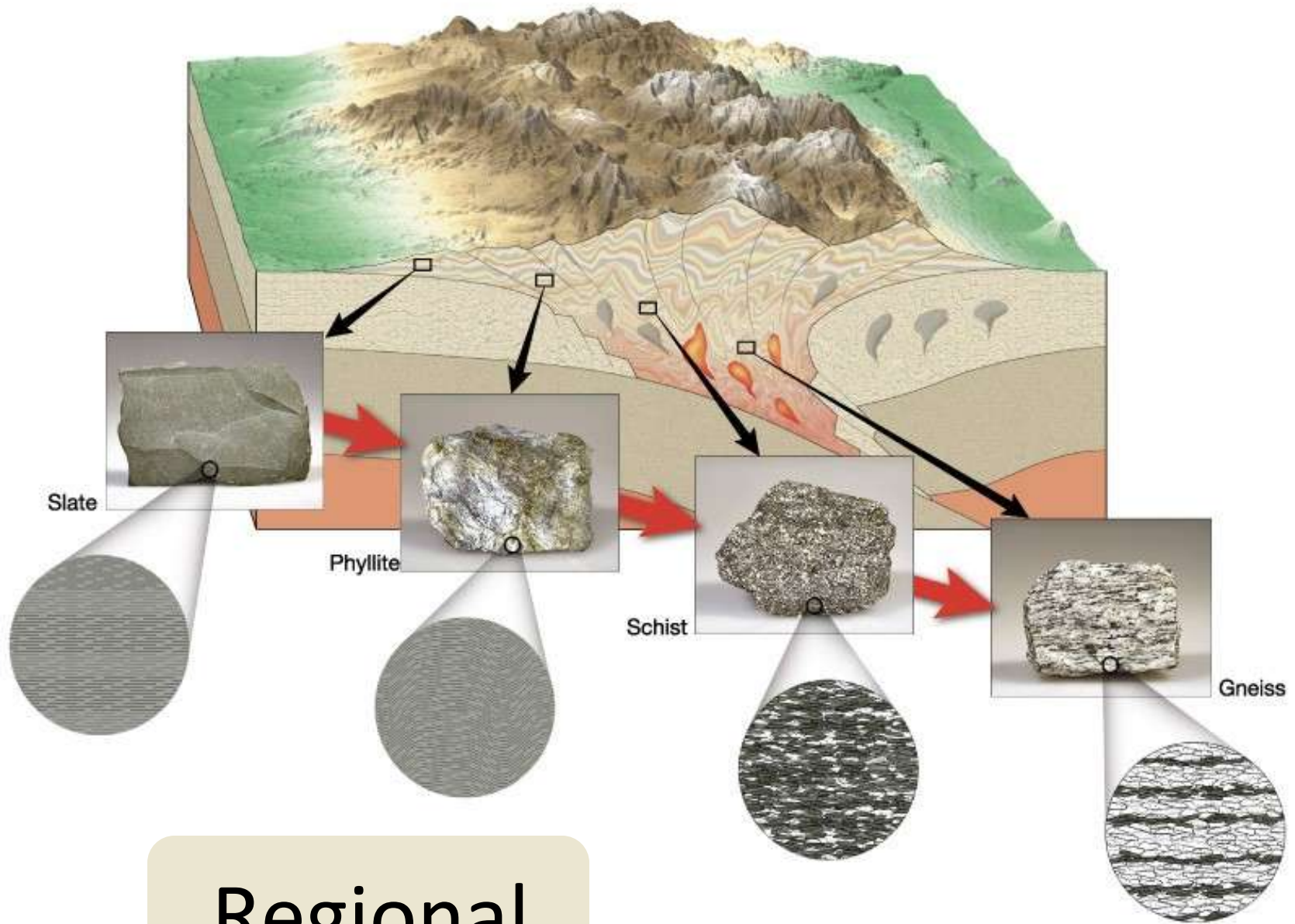




**Fig. 18.10** Representação esquemática dos diferentes tipos de metamorfismo: a) Metamorfismo regional ou dinamotermal; b) Metamorfismo de contato ou temal; c) Metamorfismo dinâmico ou cataclástico; d) Metamorfismo de soterramento.



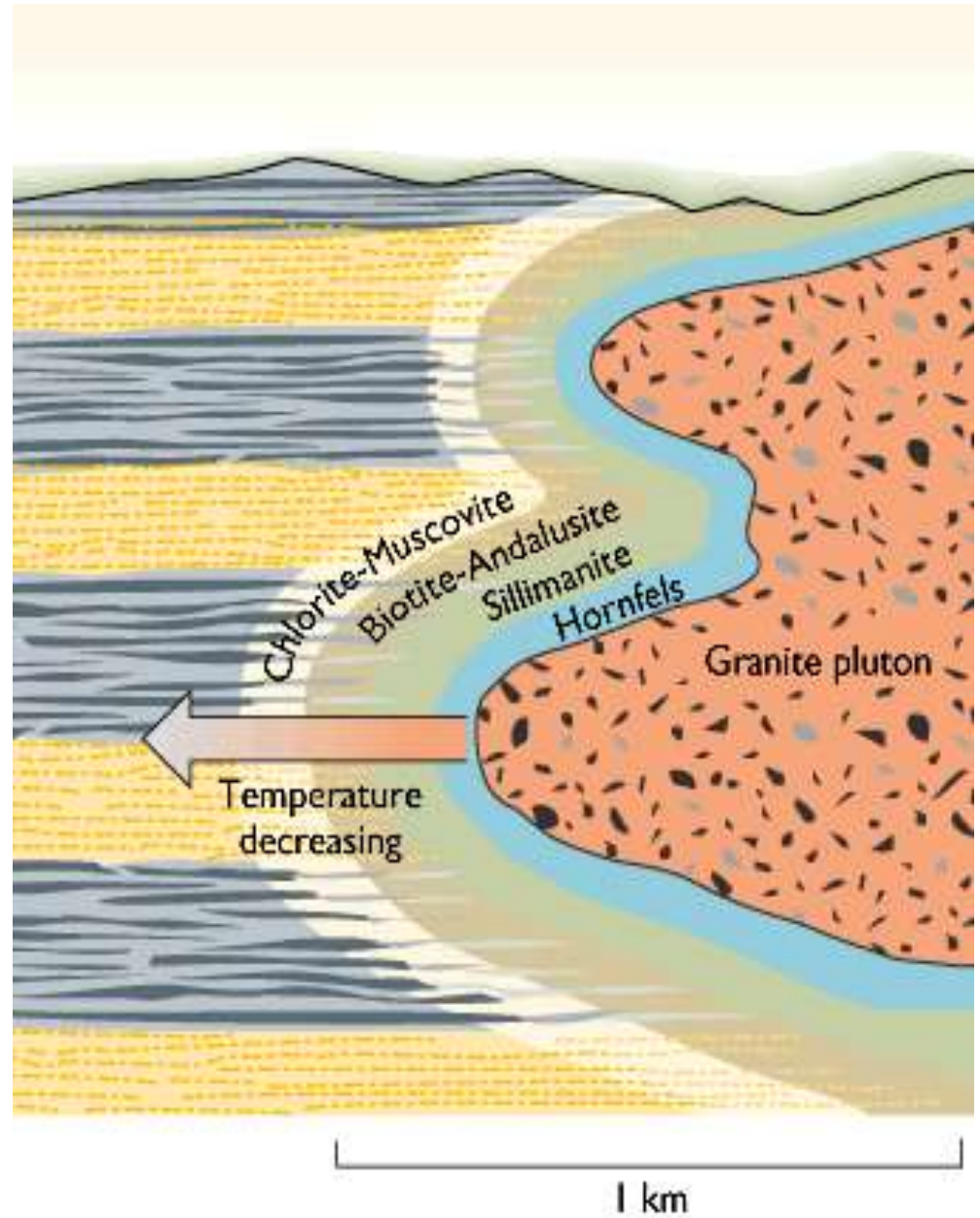
**Fig. 18.10 (continuação)**  
 e) Metamorfismo hidrotermal;  
 f) Metamorfismo de fundo oceânico;  
 g) Metamorfismo de impacto.



Regional



Termal





Hidrotermalismo

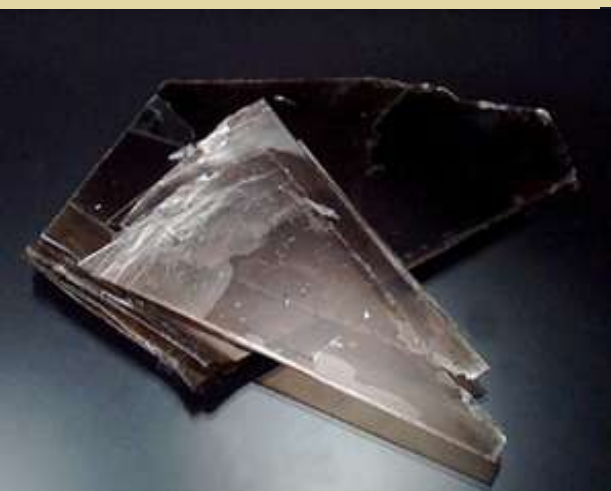




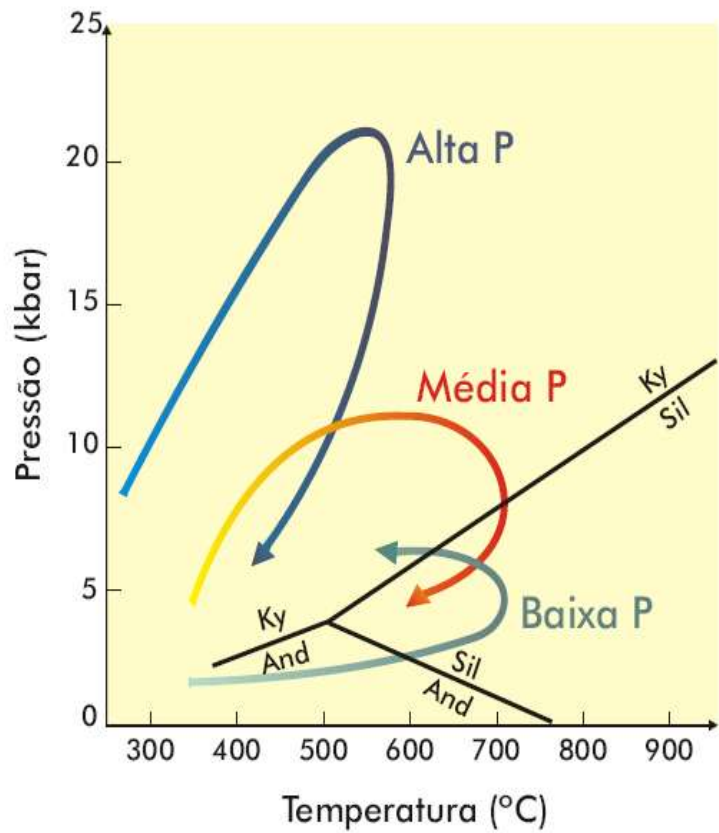
## Minerais índices

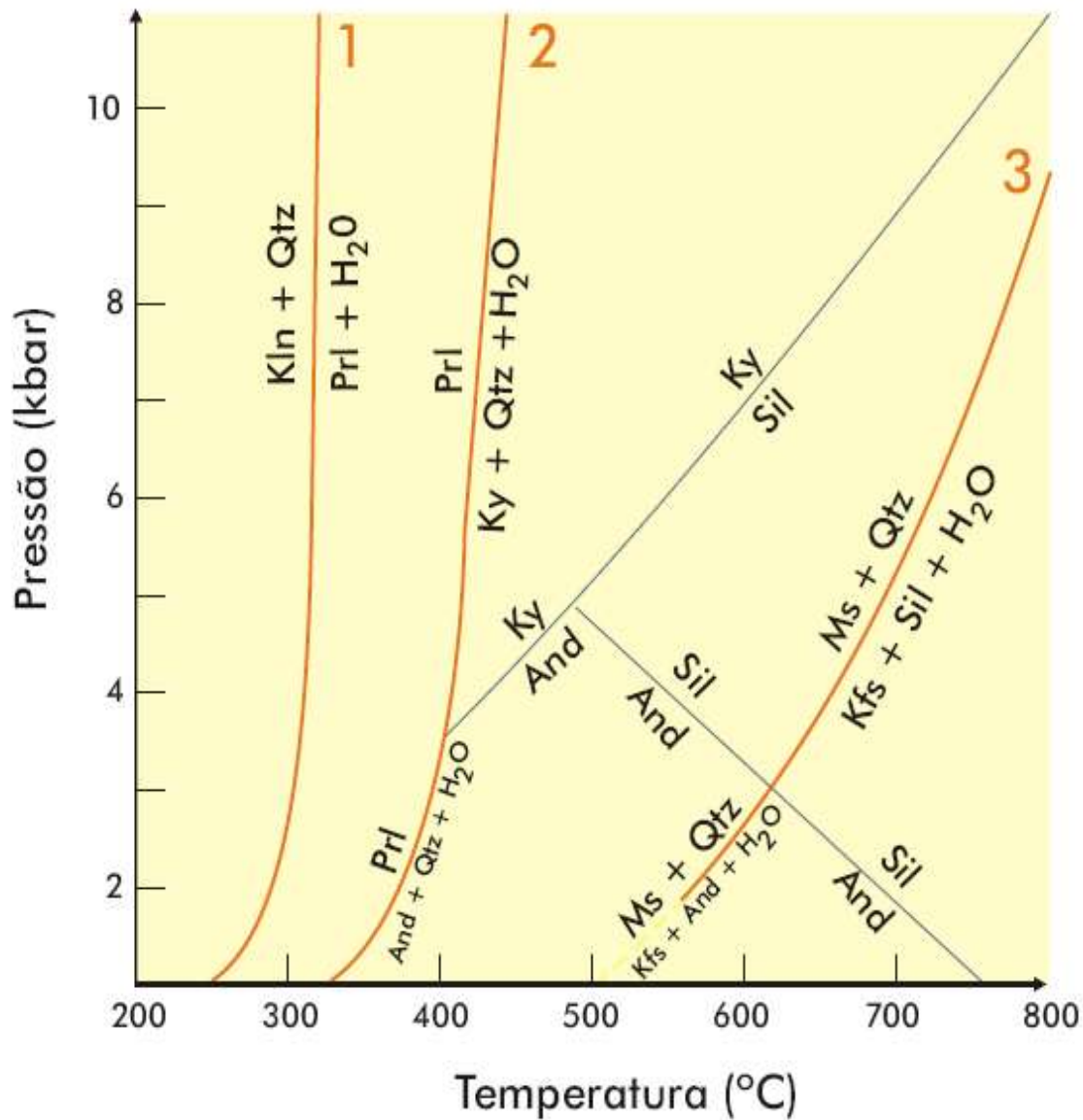


Clorita, Biotita, Granada, Estauroлита, Tremolita, Actinolita, Cloritóide, Serpentina, Epidoto, Talco, Cianita, Sillimanita, Andaluzita e Piroxênio.



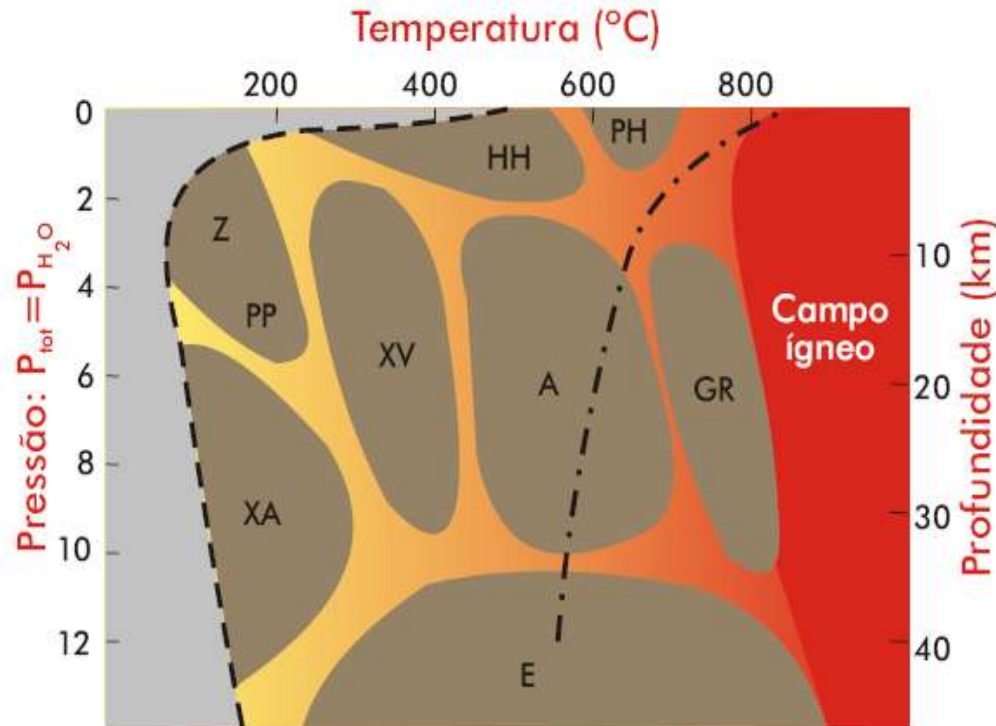






**Fig. 18.8** Curvas de equilíbrio no espaço P x T para 3 reações.

# Graus de metamorfismo



- Linha inferior do campo metamórfico
- · - Curva de fusão mínima para granitos ( $P_{tot} = P_{H_2O}$ )
- Z-zeólita, PP-prehnita-pumpellyita, XV-xisto verde, A-anfíbolito, GR- granulito, HH-hornblenda hornfels, PH-piroxênio hornfels, E-eclogito e XA-xisto azul

**Fig. 18.12** A distribuição das principais fácies metamórficas no espaço P x T.

Baixo grau= (XV)

Médio grau= (A)

Alto= (GR)

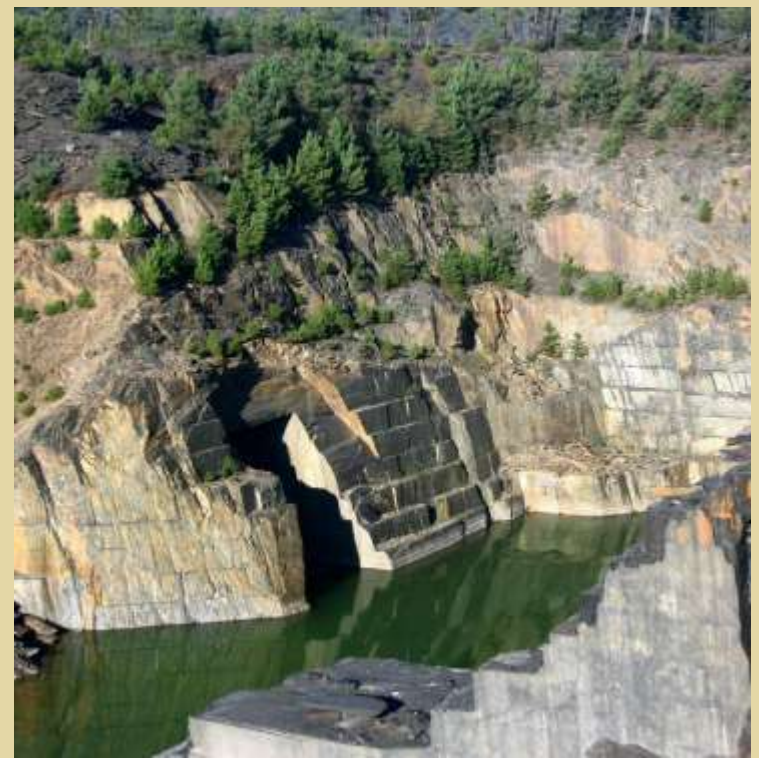


## Sequências metamórficas

- Argilosa – ardósia → filito → xisto → gnaiss
- Básica – xistos verdes → anfibolitos
- Qtzo-felds. – gnaisses → migmatitos
- Carbonática – calcários → mármore

# Ardósia

- Rocha metassedimentar com granulação muito fina, constituída por muscovita, clorita e quartzo
- Protólito – folhelhos e argilitos
- Característica clivagem tabular (ardosiana) – boa divisibilidade e mais resistentes que folhelhos
- Estrutura xistosa



- Rocha com granulação fina, constituída por biotita, sericita, clorita e quartzo
- Protólito – folhelhos e argilitos
- Característica clivagem tabular e sedosidade ao tato – micas inteiras
- Estrutura xistosa

## Filito





# Xisto

- Rocha com granulação fina a média (macrocristalino) constituída por micas, clorita, quartzo e acessórios
- Protólito – rochas pelíticas
- Micas subdivididas
- Estrutura xistosa



# Gnaisse

- Rocha com granulação média a grossa constituída por quartzo, feldspato, micas e outros
- Protólitos
  - Rochas sedimentares – paragneisse
  - Rochas ígneas - ortogneisse
- Bandamento característico
- Estrutura gnáissica







Figure 7.2 Deformed metamorphic rocks exposed in a road cut in the Eastern Highland of Connecticut. (Photo by Phil Dombrowski)



# Rochas monominerálicas



Mármores



Quartzitos





Metamorfismo regional - quartzito



- Itabirito
- Anfibolito
- Esteatito
- Serpentinitos
- etc...

## Outras Rochas





# Ambiente metamórfico e mineralizações

Hidrotermalismo e  
Metassomatismo

- Pedras preciosas
- Metálicos
- Cargas e pigmentos
- Refratários
- Indústria química

Metamorfismo regional

- Rochas ornamentais
- Metálicos
- Cargas e pigmentos
- Pedras preciosas
- Abrasivos