

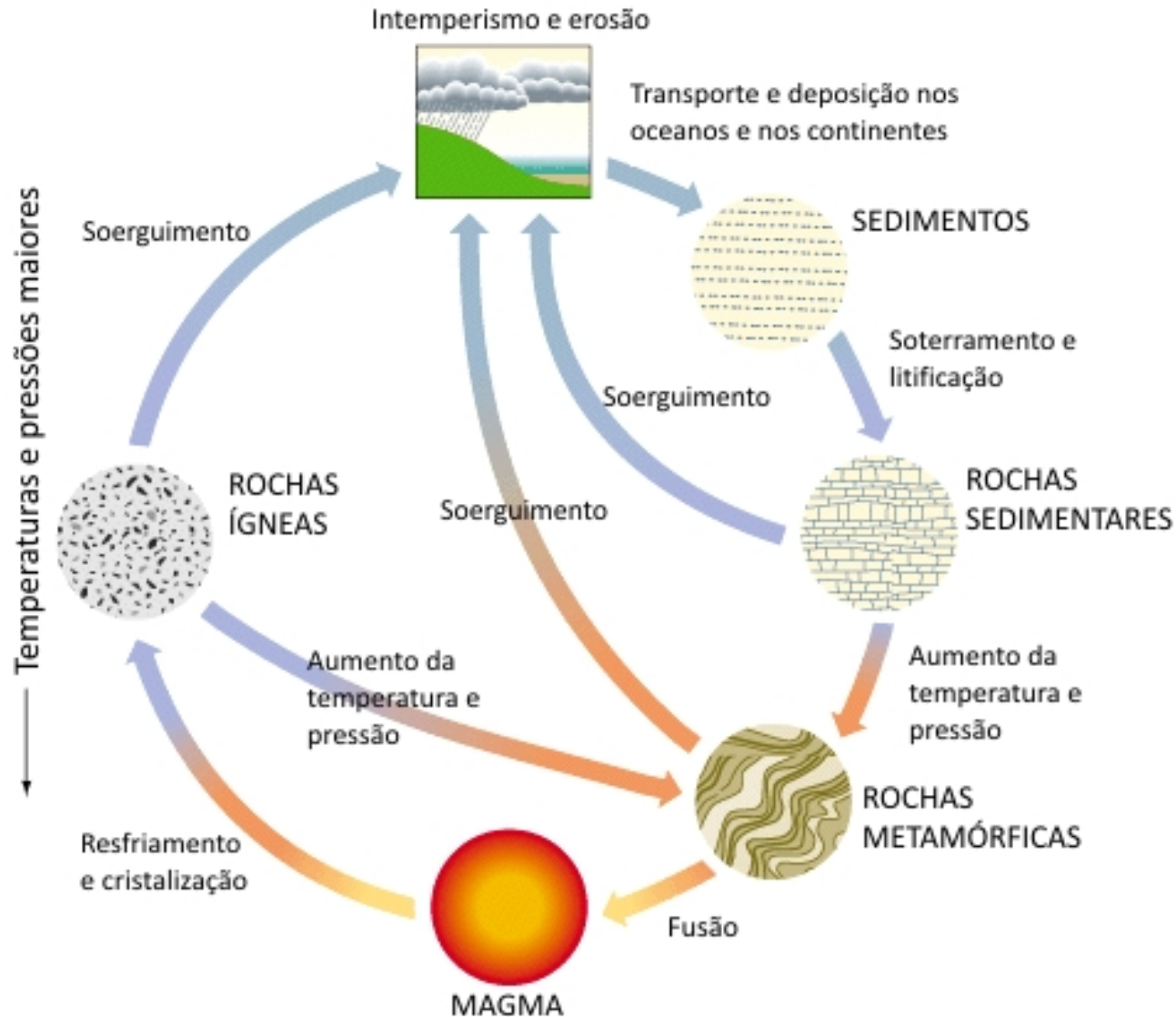
Aula – Rochas metamórficas



044--0108 – Sistema Terra II
Prof. Gaston Enrich, Instituto de Geociências, USP

Aula on-line
realizada com o Google Meet
em 11 de setembro de 2020
por conta da pandemia de covid-19

Ciclo das rochas



- **Metamorfose** – transformação de um ser vivo

Geologia

- **Metamorfismo** – mudanças mineralógicas, composicionais e texturais que ocorrem nas rochas no **estado sólido**

Definição

- O **metamorfismo** é o conjunto de transformações que as rochas sofrem em virtude de mudanças, principalmente, de **temperatura** e **pressão** a que são submetidas após sua formação
- Ocorre essencialmente no **estado sólido**, embora **fluidos (H₂O e CO₂)** e **fundido silicático** possam estar presentes
- Há mudanças mineralógicas, estruturais e/ou composicionais.

- Rochas metamórficas são produzidas pela transformação de rochas:
 - **Ígneas**
 - granitos
 - basaltos
 - **sedimentares**
 - rochas sedimentares clásticas
 - Argilito, Siltito
 - Arenito
 - rochas sedimentares químicas
 - calcáreo
 - outras rochas **metamórficas**

Amostras coleção didática

- Observação das amostras da coleção didática no site:
- <https://didatico.igc.usp.br/rochas/metamorficas/>

Rochas Metamórficas

- Características Gerais
 - Geralmente resistentes (duras). Algumas pouco resistentes
 - Constituintes firmemente imbricados
 - Grãos irregulares e geométricos
 - Distribuição heterogênea dos constituintes promovendo **bandamentos** e **xistosidades** (**estruturas orientadas**)
 - Mineralogia silicática predominante, sendo alguns tipicamente do ambiente metamórfico (granada, estaurolita, cianita, sillimanita)
 - Comuns os tipos unimineralícos e micáceos.

Minerais de Rochas Metamórficas

- Principalmente **silicatos**: quartzo, feldspatos, micas, anfibólios, piroxênios e vários minerais metamórficos, tais como granadas e cloritas
- Também **carbonatos**: calcita e dolomita



GRANADA



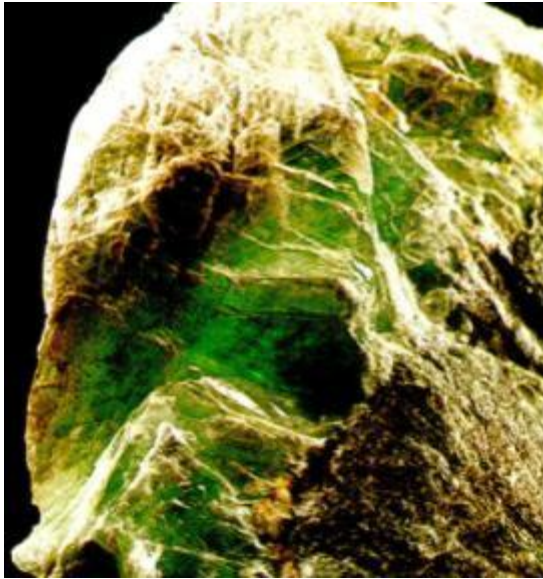
CLORITA



SERPENTINA



EPIDOTO



TALCO



ANDALUSITA



SILLIMANITA



CIANITA

Por que alguns dizem que metamorfismo é complicado?

- Não é possível ver os processos metamórficos, como vemos a sedimentação e o vulcanismo
- O metamorfismo ocorre através das reações metamórficas, muito lentas, que ocorrem no estado sólido!

O que significa transformações no estado sólido?

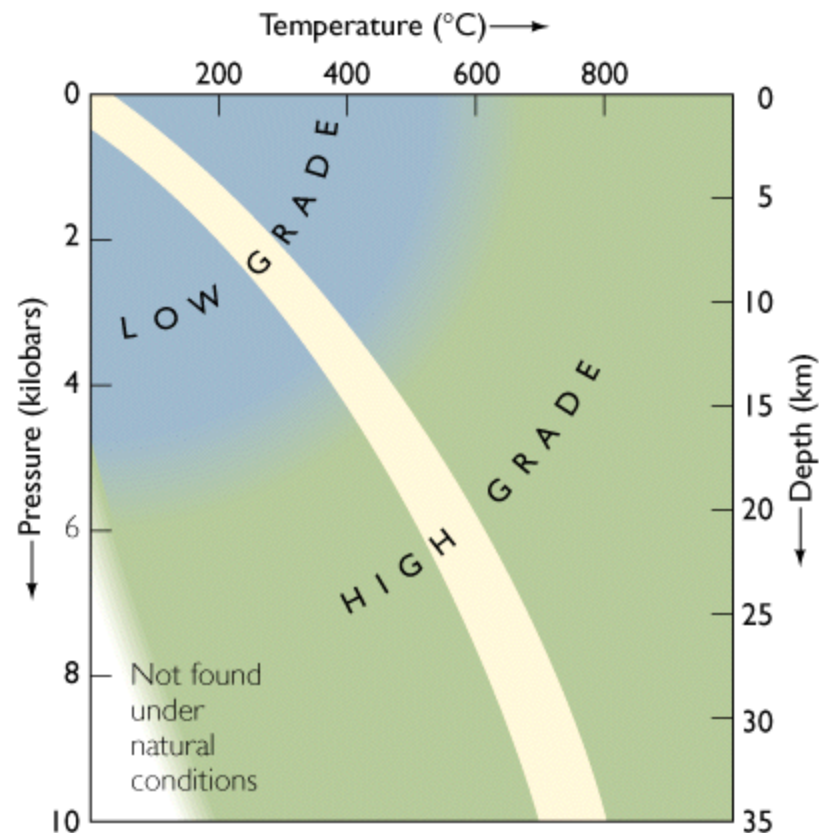
- A rocha não funde e não sofre desagregação!
- As transformações ocorrem no estado sólido através das reações metamórficas
- As reações metamórficas ocorrem através da **difusão dos átomos**

Fatores físicos e químicos que controlam o metamorfismo

- T – temperatura
- P – pressão
- composição da rocha
- t - tempo
- presença e composição do fluido

Fatores condicionantes do metamorfismo

- Gradiente geotérmico na crosta
 - Aumento da ordem de 20 – 30°C por km
- Aumento de pressões
 - Da ordem de ~ 1 kbar para cada 3 km



Fatores condicionantes do metamorfismo:

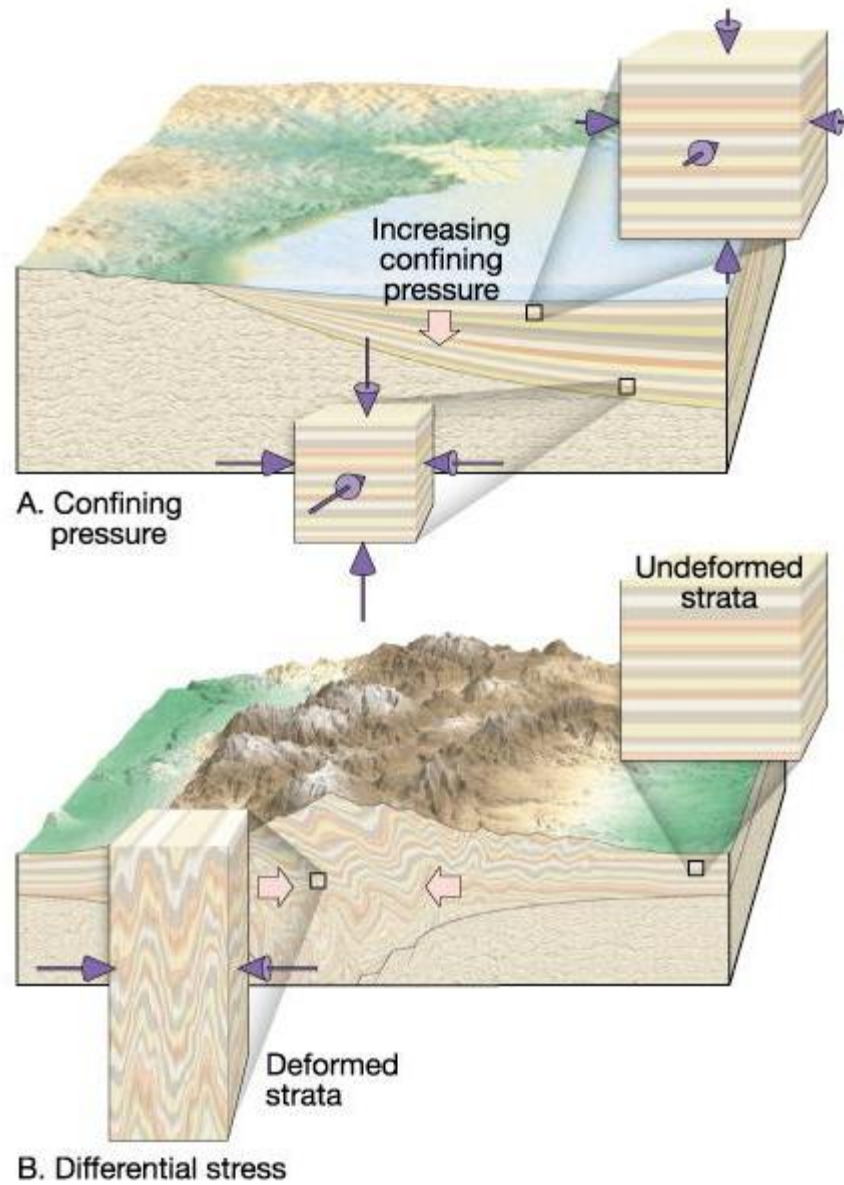
TEMPERATURA

- agente mais importante
- recristalização pode resultar em novos minerais mais estáveis
- fontes de calor:
 - calor de um magma próximo
 - gradiente geotérmico

Fatores condicionantes do metamorfismo:

PRESSÃO

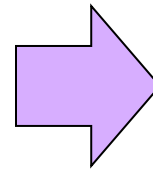
- aumenta com a profundidade
 - ~ 1 kbar para cada 3 km
 - os minerais metamórficos gerados em altas pressões tendem a ser mais densos.
- tipos:
 - pressão litostática
 - pressão dirigida



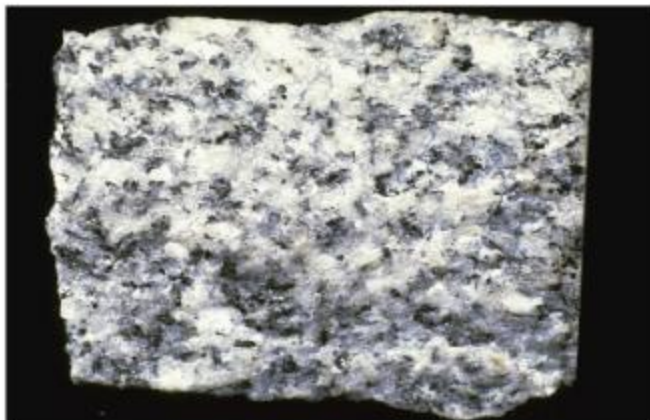
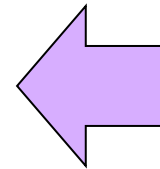
Desenvolvimento de estrutura devido à pressão dirigida



Antes do metamorfismo



Depois do metamorfismo



Fatores condicionantes do metamorfismo: **FLUIDOS**

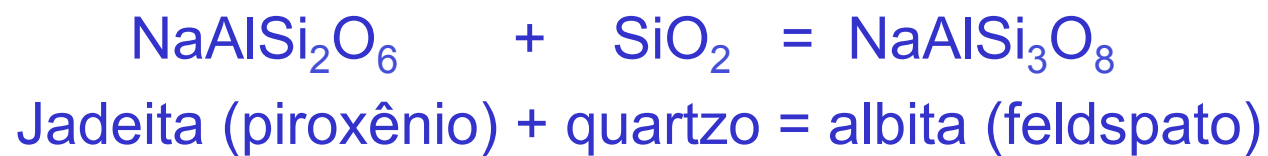
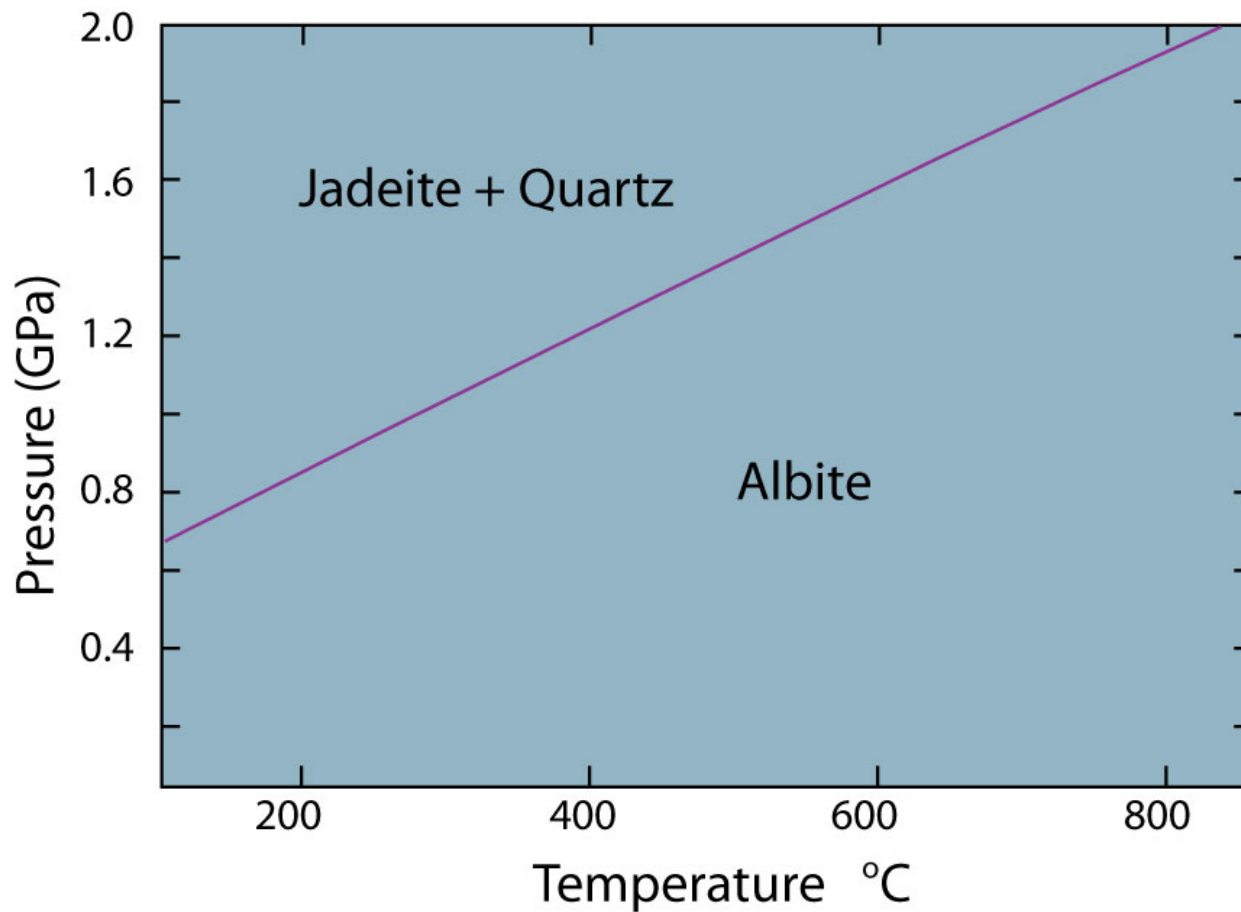
- principalmente **água**, e outros componentes voláteis
- funcionam como catalisadores de reações metamórficas, facilitando as trocas iônicas.
- ajuda na recristalização de min. existentes
- fonte dos fluidos:
 - poros em rochas sedimentares
 - fraturas em rochas ígneas
 - minerais hidratados (argilominerais e micas)

Tempo

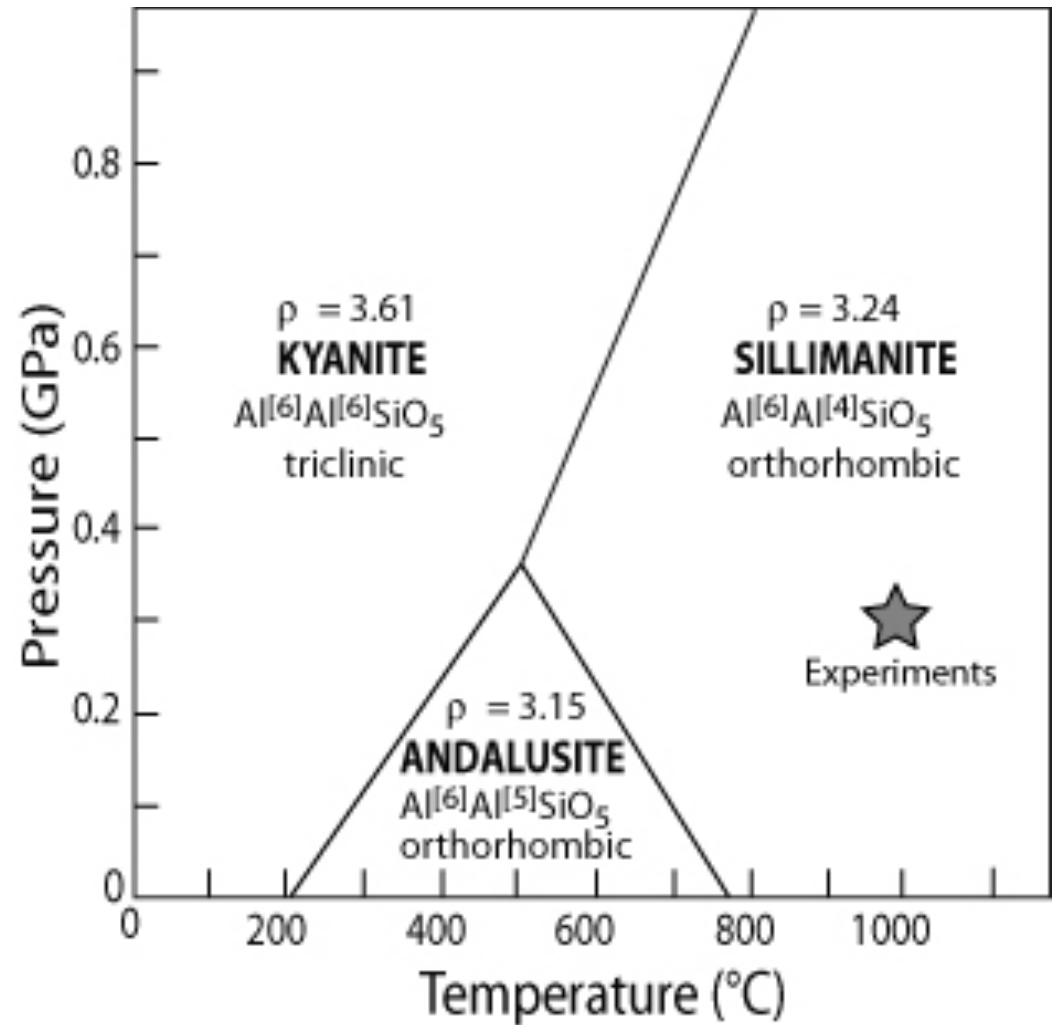
- A recristalização dos minerais é realizada ao durante **longos períodos** de tempo (milhões de anos)

Reações metamórficas

- Idealmente, a nova associação mineral é quimicamente equivalente à associação antiga (mesmos componentes nas mesmas proporções – sistema fechado)
 - quartzo + muscovita = feldspato + sillimanita + H₂O
 - $\text{SiO}_2 + \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 = \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{H}_2\text{O}$
- A mudança ocorre de forma sistemática e é controlada pela composição da rocha, pressão e temperatura
- As associações metamórficas podem ser previstas, desde que sejam conhecidas: a composição da rocha e as condições de P e T (ou vice-versa).



Polimorfos de Al_2SiO_5



Reações metamórficas

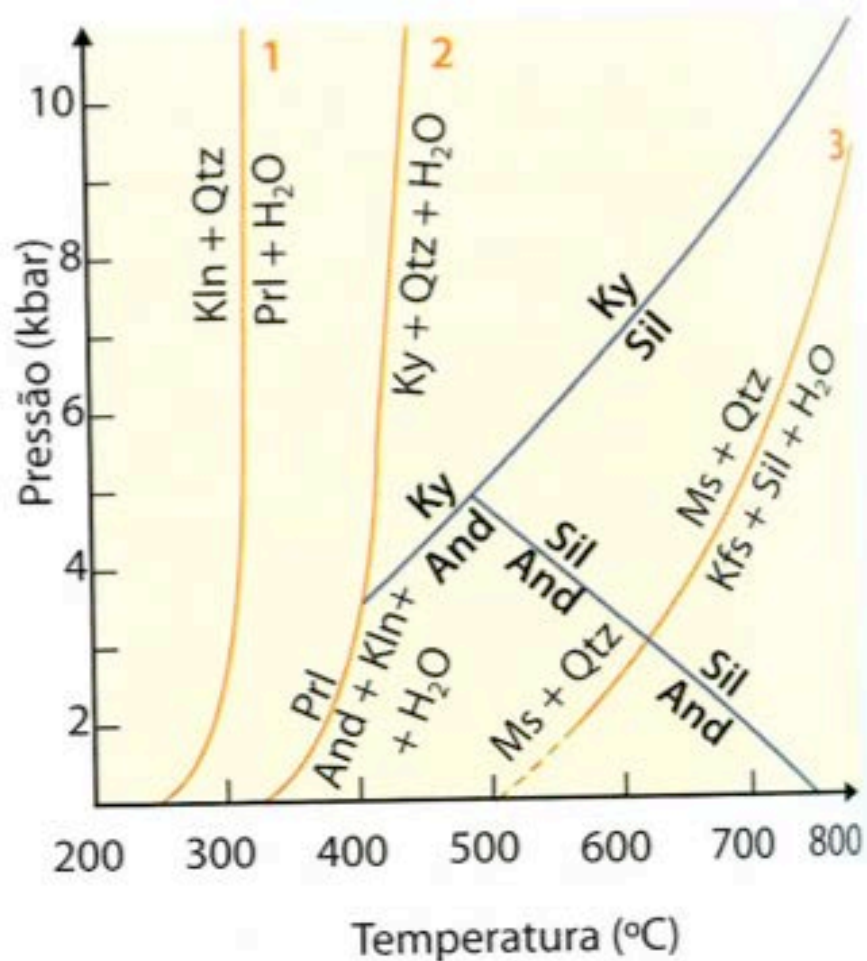


Figura 15.10 - Curvas de equilíbrio P x T para as reações: 1) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Kln-caolinita) + 2 SiO_2 (Qtz-quartzo) = $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Prl-pirofilita) + H_2O (fase fluida), 2) $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Prl-pirofilita) = Al_2SiO_5 (aluminossilicato: And-andaluzita ou Ky-cianita) + SiO_2 (Qtz-quartzo) + H_2O (fase fluida), e 3) $\text{KA}_3\text{Si}_3\text{O}_9(\text{OH})_2$ (Ms-muscovita) + SiO_2 (Qtz-quartzo) = KAlSi_3O_8 (Kfs-feldspato potássico) + Al_2SiO_5 (aluminossilicato: Ky-cianita ou Sil-sillimanita) + H_2O (fase fluida), com indicação dos campos de estabilidade e curvas de equilíbrio para os polimorfos Al_2SiO_5 : andaluzita, cianita e sillimanita. Fonte: Bucher & Frey. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag. 7. ed, 2002.

Estabilidade dos minerais

- A maioria dos minerais são estáveis sob condições de **pressão e temperatura relativamente restritas** (e.g., gelo é instável acima de 0°C).
- Os diferentes intervalos de estabilidade de cada mineral às vezes se sobrepõem, e quando analisados em conjunto fornecem evidências sobre a **história das rochas**.

Quanto uma Rocha Pode Mudar?

- A quantidade de mudança durante o metamorfismo depende:
 - do grau de metamorfismo (intensidade)
 - da duração do metamorfismo
 - da composição da rocha

Grau Metamórfico

- Refere-se à intensidade do metamorfismo e ao vigor das transformações metamórficas
 - Indicador qualitativo das condições físicas
- Alto grau: Alta temperatura e pressão
- Médio grau
- Baixo grau: Baixa temperatura e pressão

Limites do metamorfismo

- acima de 150 - 200°C
- não abrange mudanças do intemperismo e da diagênese (rochas sedimentares)
- Quanto maior o grau metamórfico, maior a transformação, menos se reconhece da rocha original
- limite superior: até que a rocha funda
 - ígneo

Limites do Metamorfismo



Argilitos
(r. sedimentares)



Ardósia
(r. metamórfica/
baixo grau)

Limites do Metamorfismo

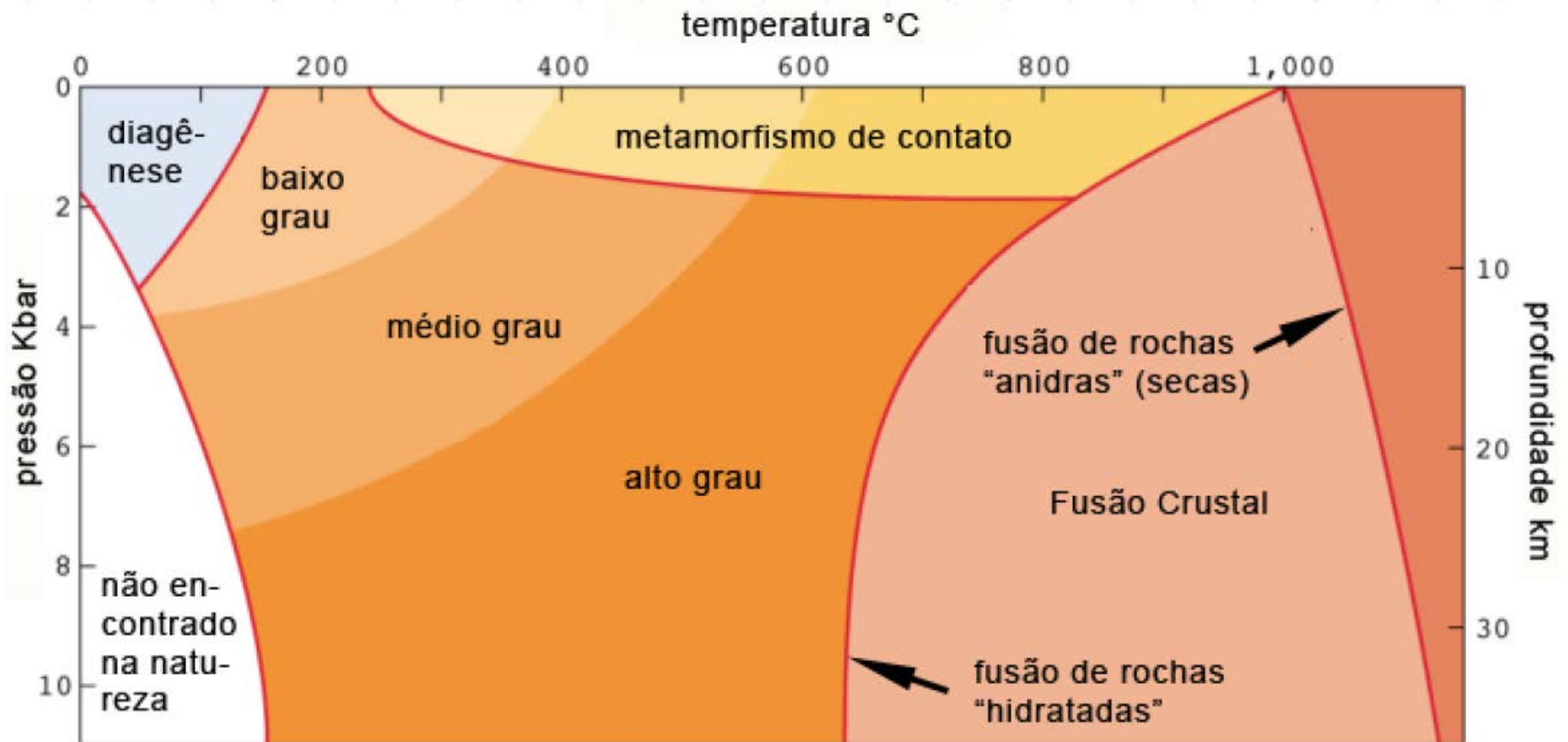


Migmatito

porção cinza – r. metamórfica

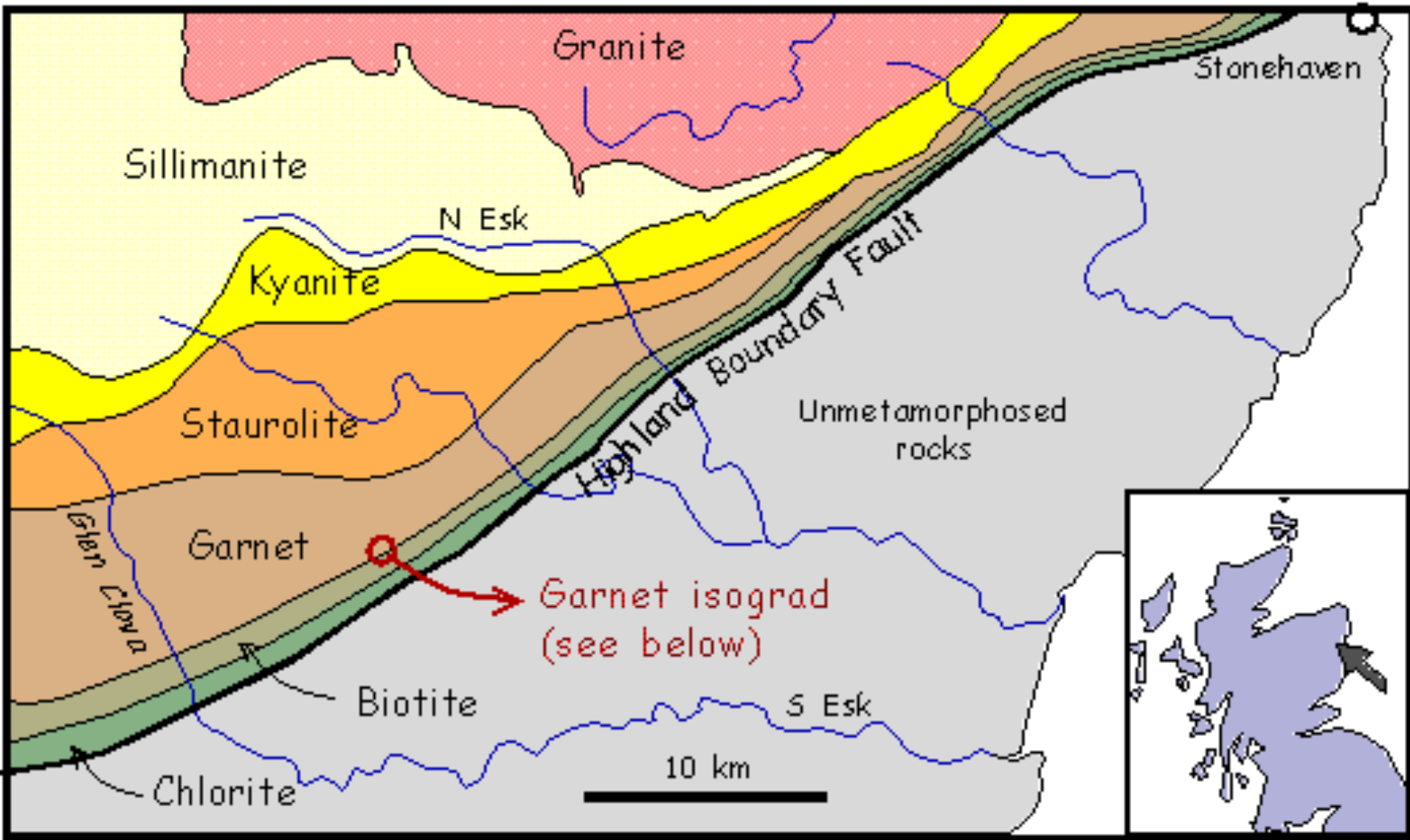
porção rosa – r. ígnea

Limites do Metamorfismo

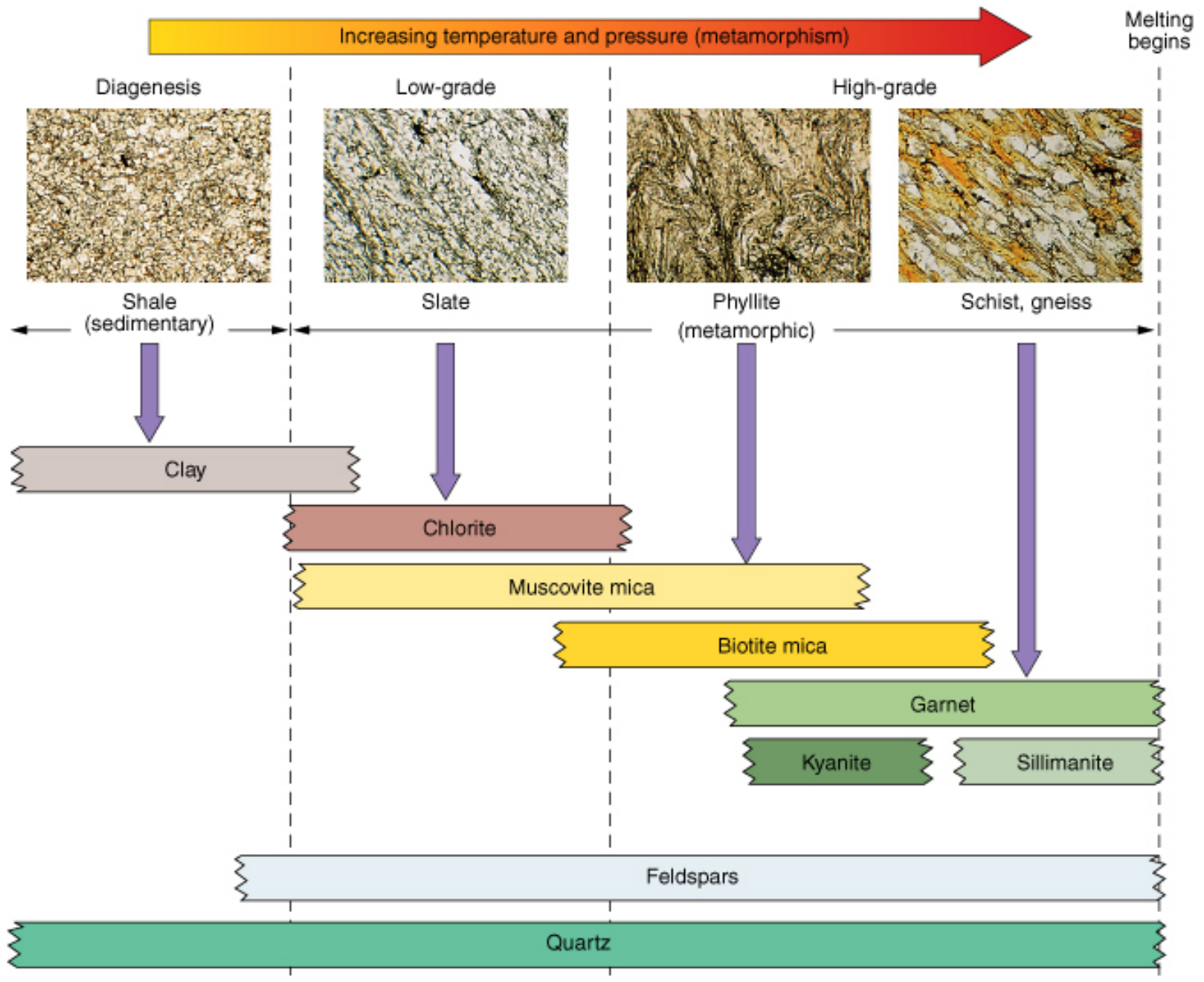


Minerais índices

- Estudos de metamorfismo progressivo nos highlands da Escócia mostraram várias zonas, caracterizadas por minerais índices
 - clorita
 - biotita
 - granada
 - estaurolita
 - cianita (+biotita)
 - sillimanita (+biotita)



Metamorphic mineral zones in NE Scotland, after Barrow and Tilley



**Área
em que
Barrow
trabalhou**

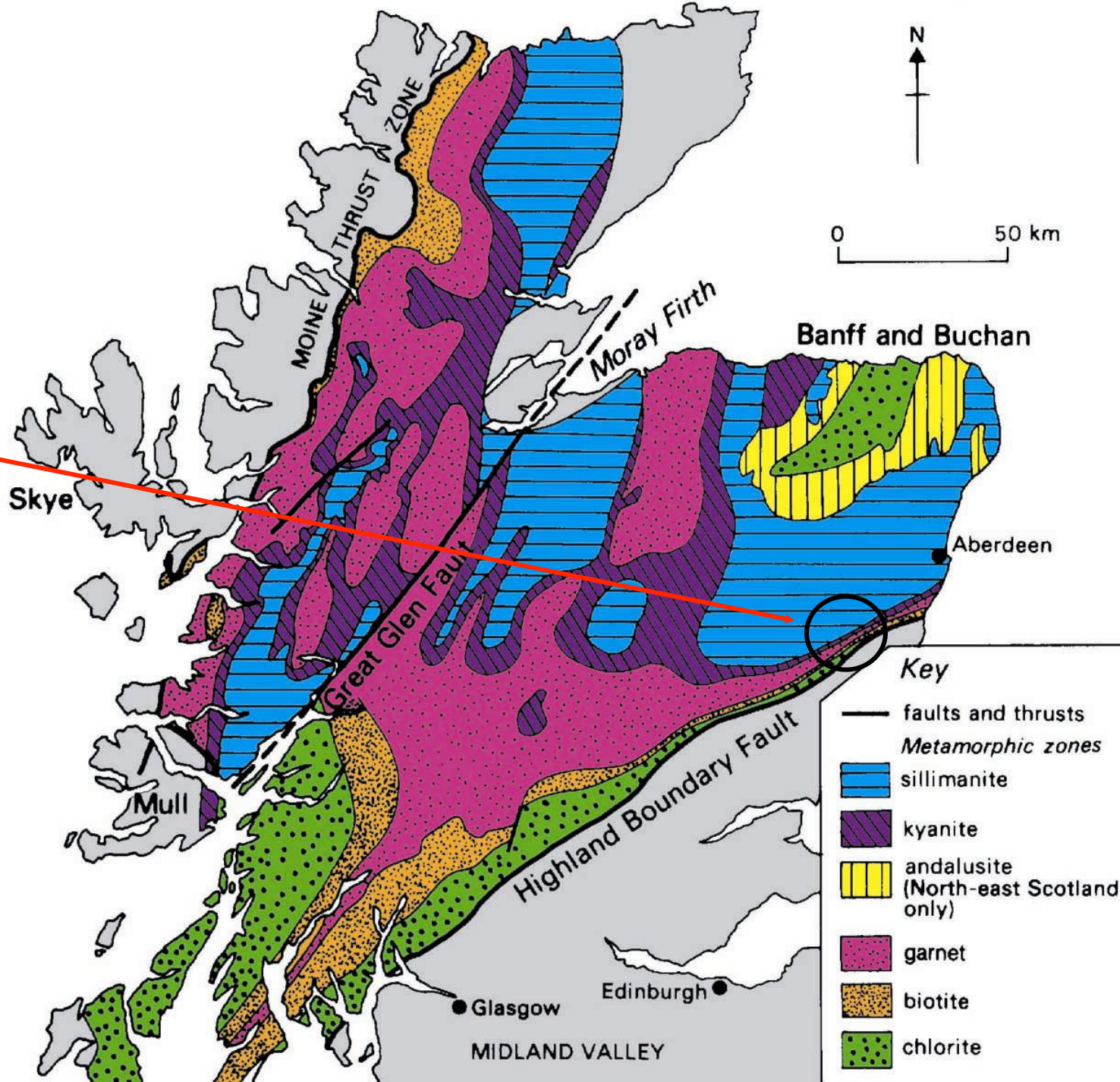


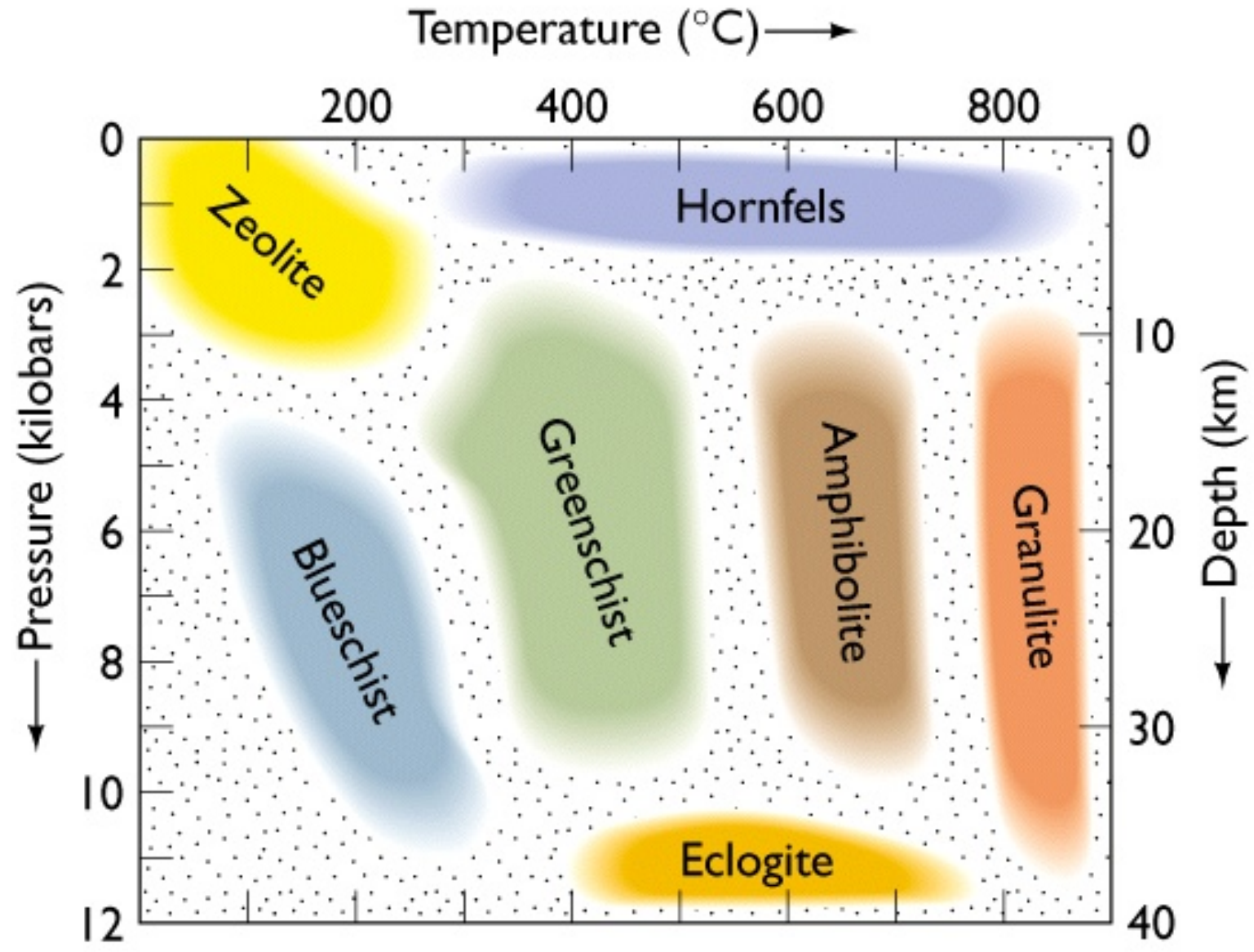
Figure 21.8. Regional metamorphic map of the Scottish Highlands, showing the zones of minerals that develop with increasing metamorphic grade. From Gillen (1982) *Metamorphic Geology. An Introduction to Tectonic and Metamorphic Processes*. George Allen & Unwin. London.

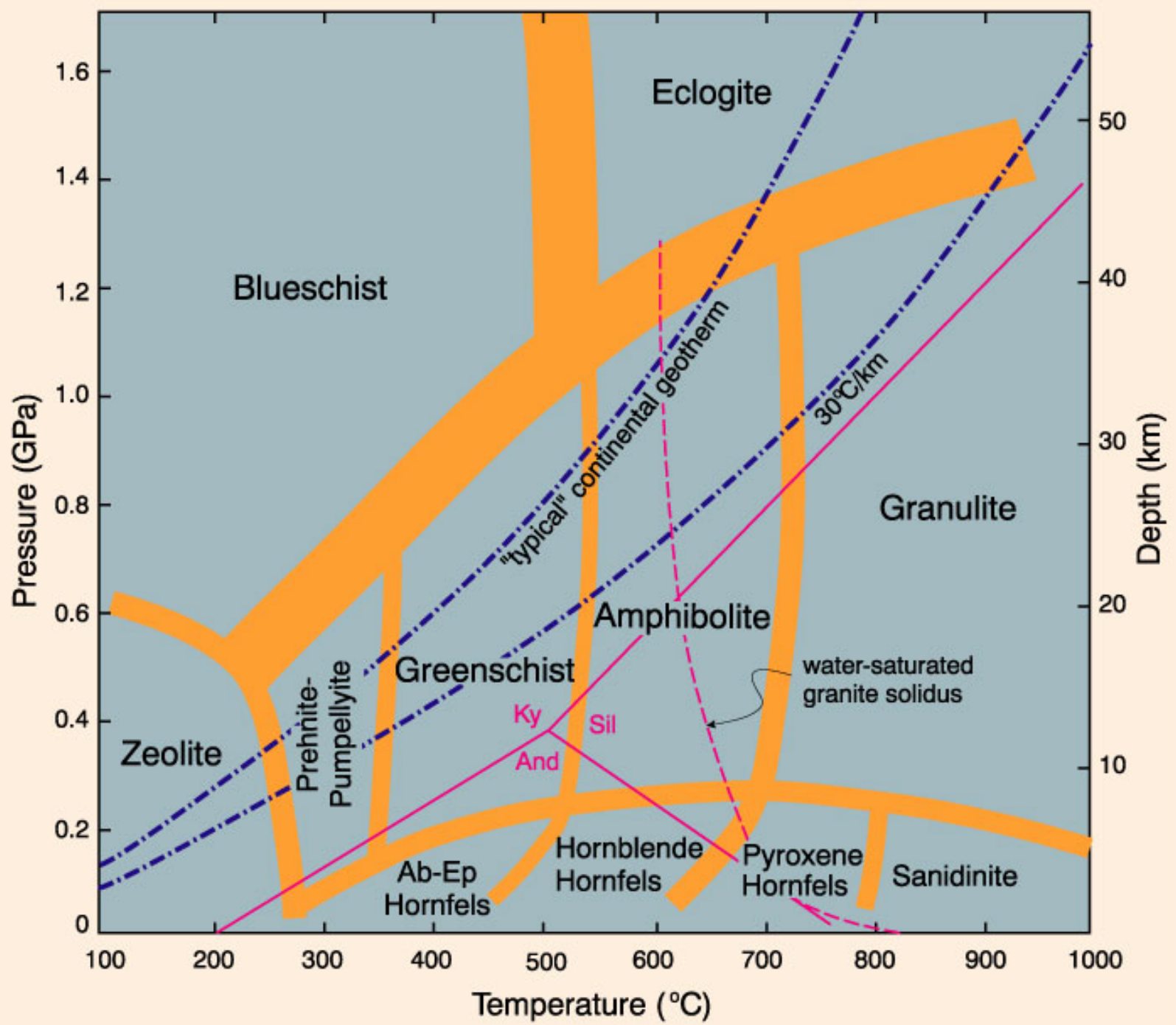
Divisões do metamorfismo

- Para dividir as regiões P-T do metamorfismo foi elaborado o conceito das fácies metamórficas
- A fácies metamórfica é representada por várias associações minerais estáveis em diferentes rochas nas mesmas condições P-T

Fácies metamórficas

- fácies albita-epidoto hornfels
- fácies hornblenda hornfels
- fácies piroxênio hornfels
- fácies zeólita
- fácies prehnita-pumpeliita
- **fácies xisto verde**
- **fácies anfibolito**
- **fácies granulito**
- fácies xisto azul
- fácies eclogito





Tipos de Metamorfismo

- Termal ou de contato
 - A temperatura é o principal fator
- Dinâmico (ou cataclástico)
 - A pressão dirigida é o principal fator (deformação, com ou sem recristalizações)
- Regional (ou dinamotermal)
 - Pressão dirigida e temperatura são importantes
- Outros (impacto, hidrotermal, soterramento, etc)

Metamorfismo de contato

- Metamorfismo de contato – ocorre pelo calor oriundo de intrusões.
 - Forma auréola de contato ao redor da intrusão.
 - Minerais de T mais alta mais próximos da intrusão.

Metamorfismo de Contato ou Termal

ROCHA METAMÓRFICA

"Hornfels"

ROCHAS
SEDIMENTARES

Granito

ROCHA ÍGNEA

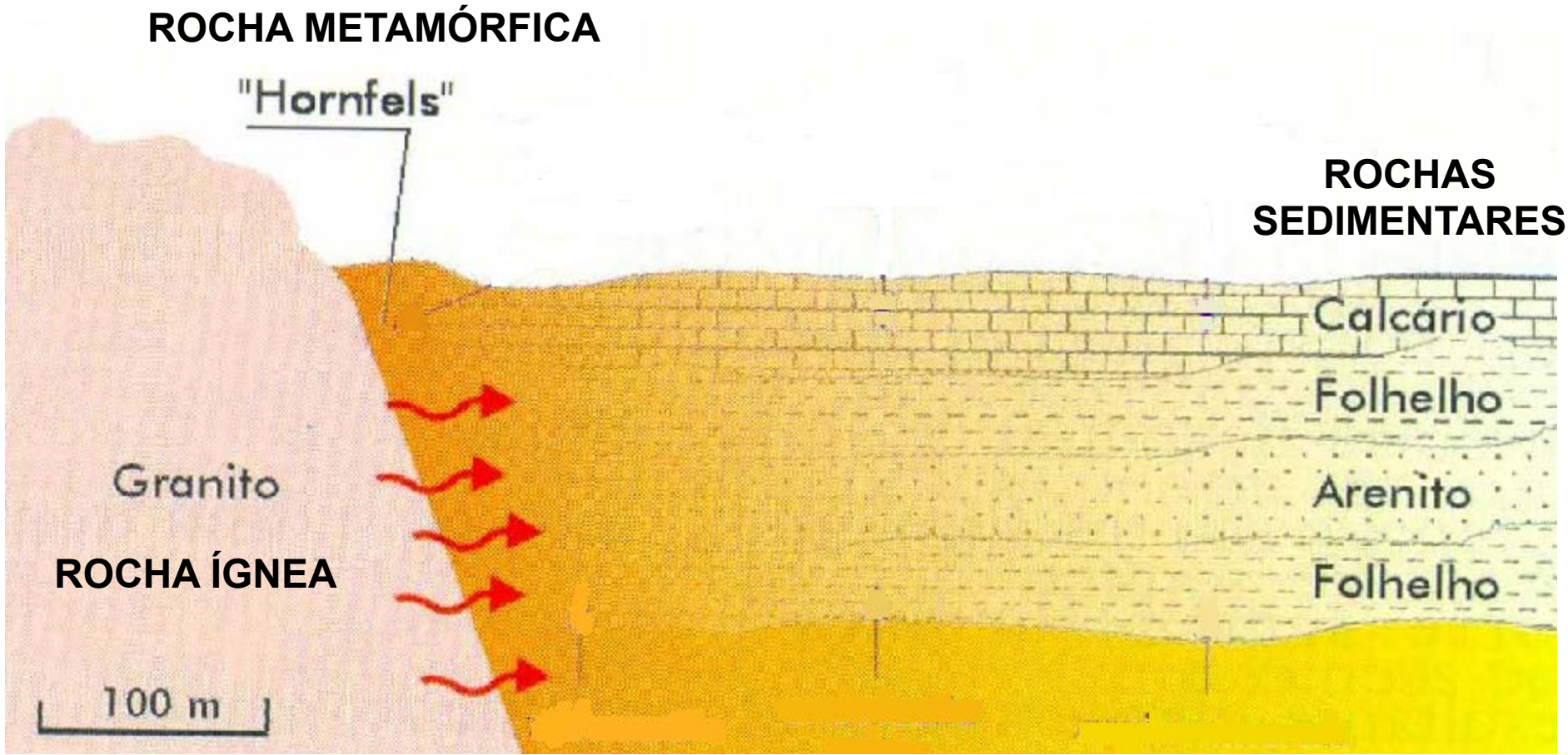
Calcário

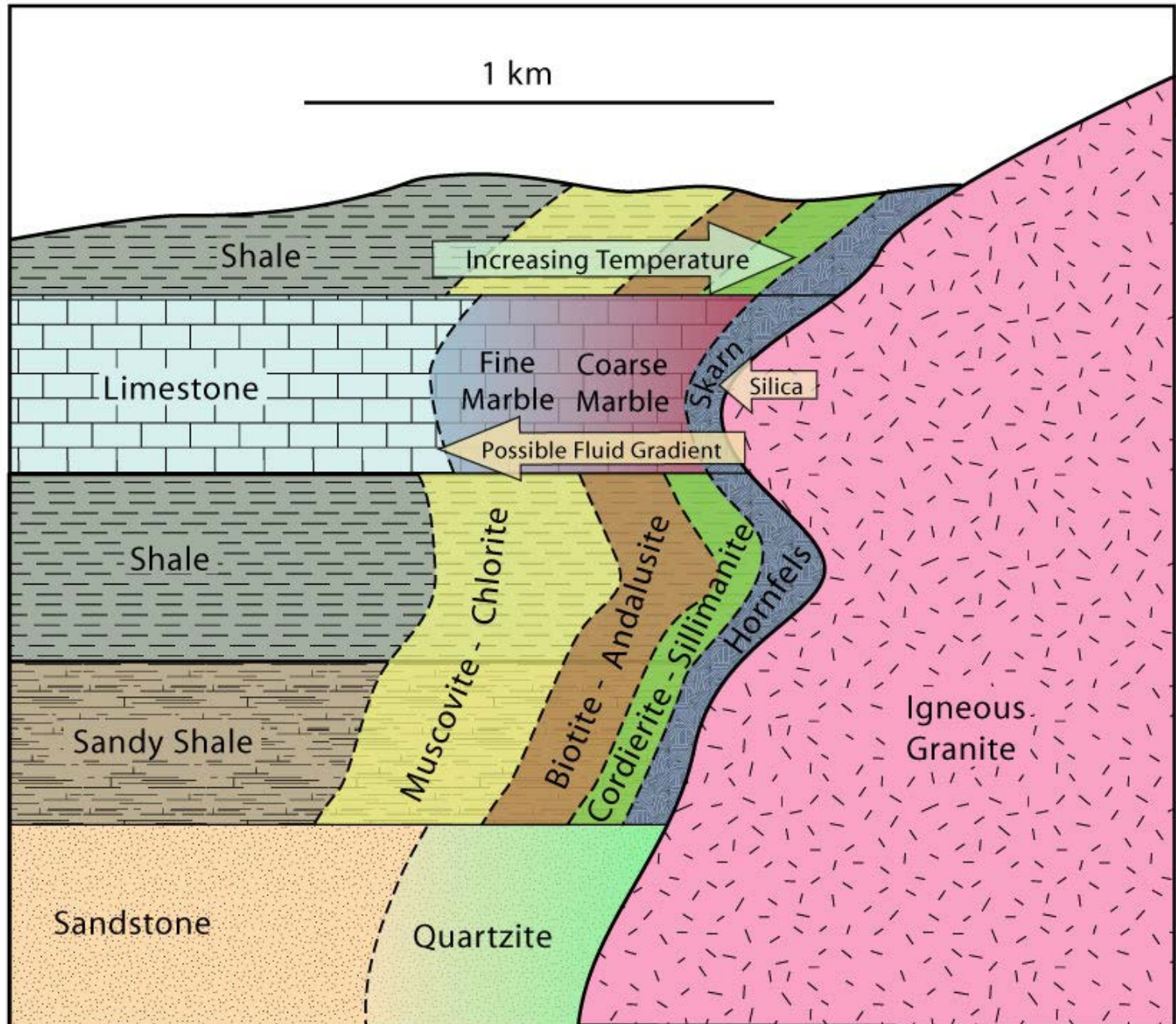
Folhelho

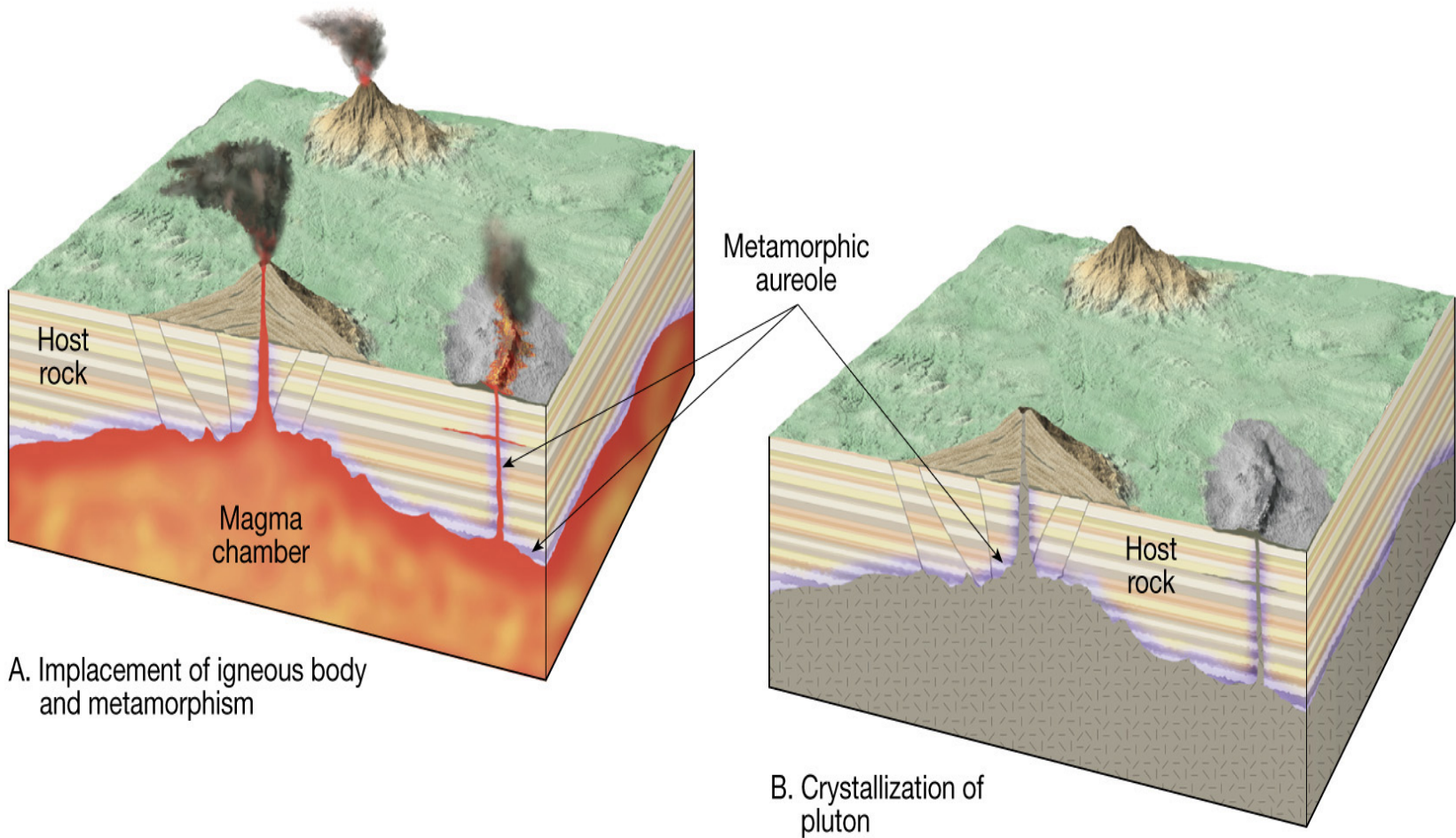
Arenito

Folhelho

100 m





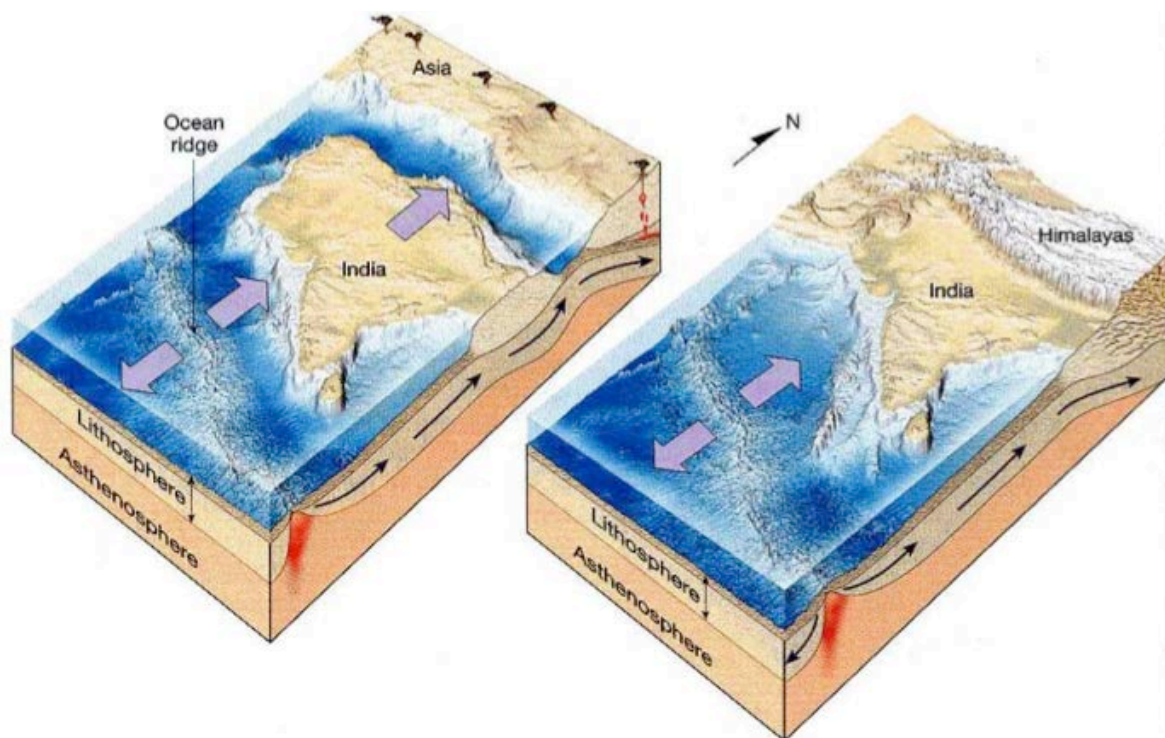


A. Implantation of igneous body and metamorphism

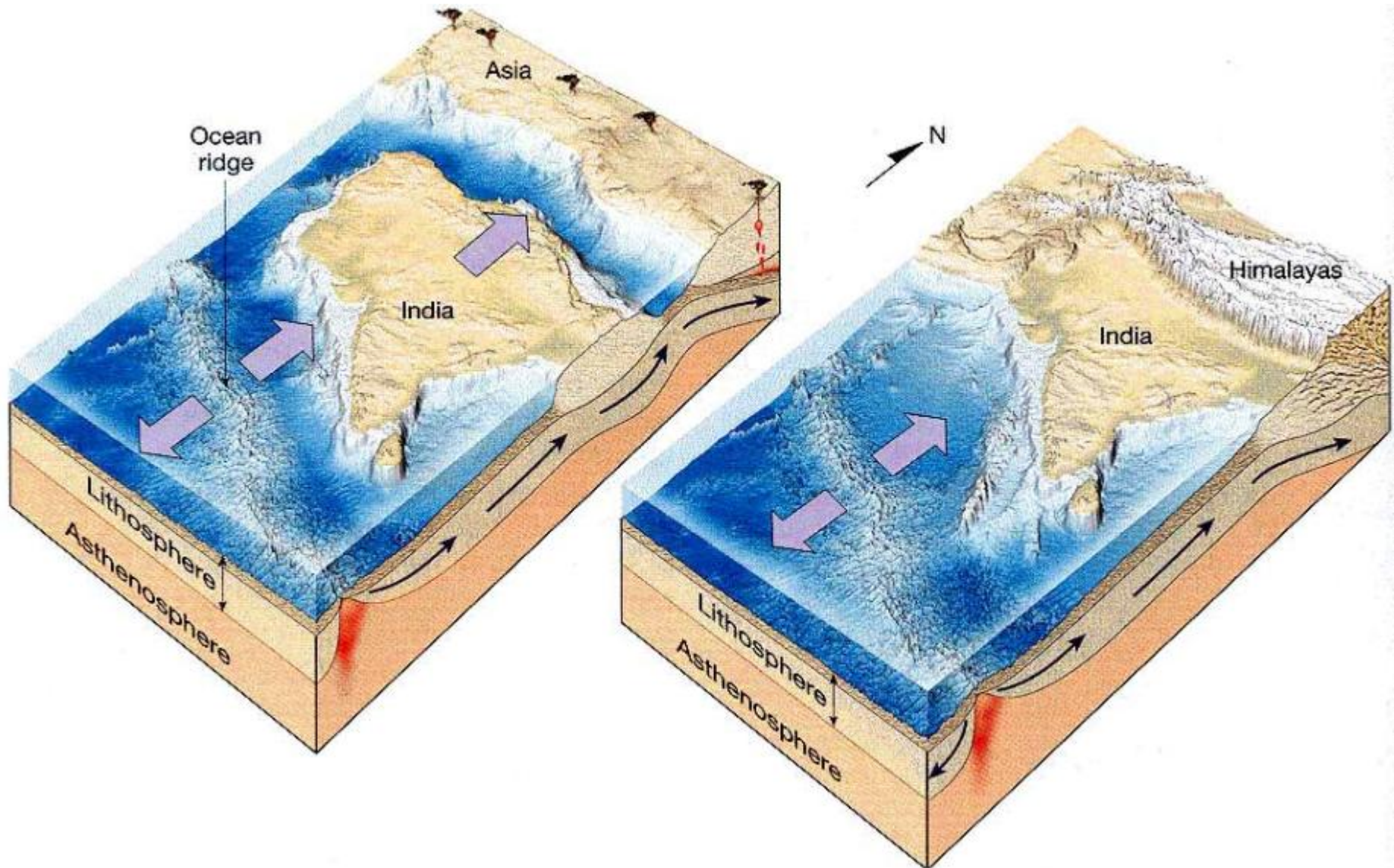
B. Crystallization of pluton

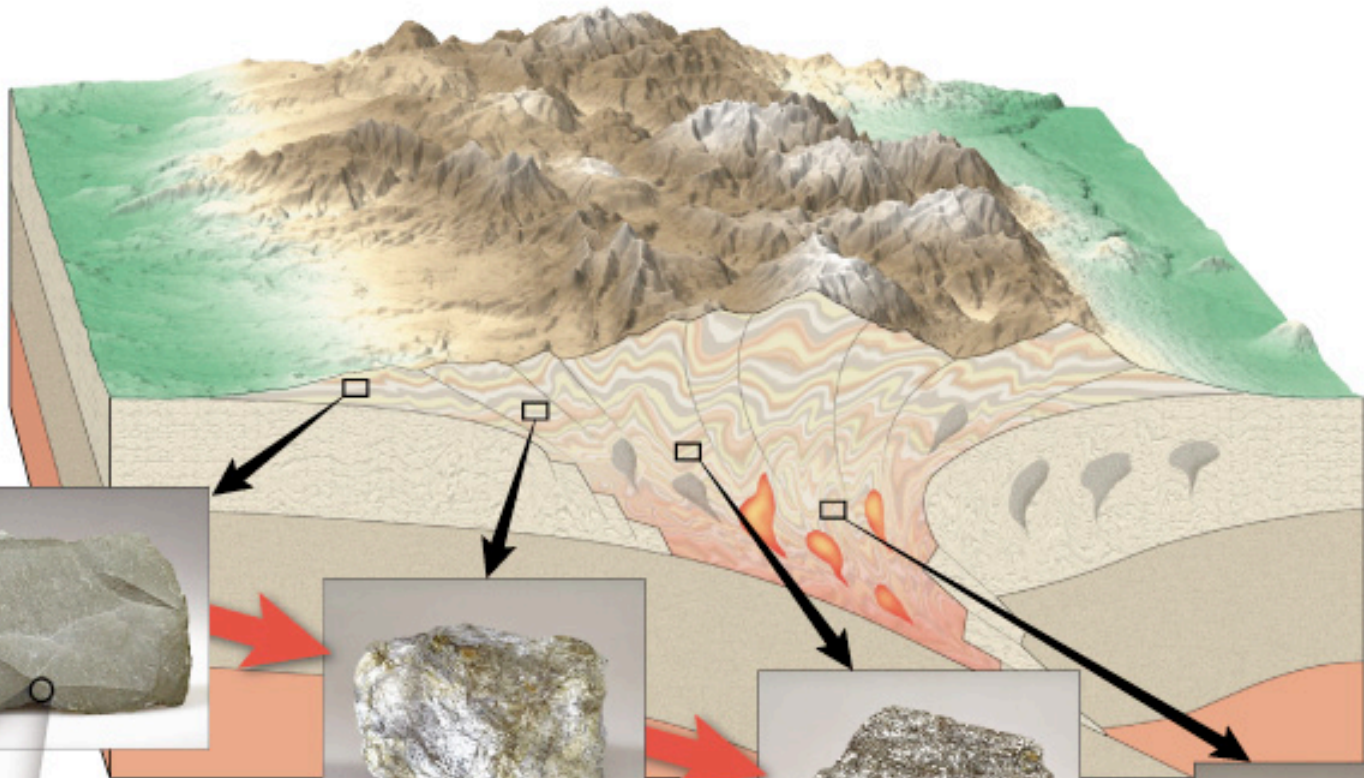
Metamorfismo Regional

- Metamorfismo Regional – ocorre em **ampla região geográfica** e normalmente associado com **formação de cadeias de montanha**



Metamorfismo Regional

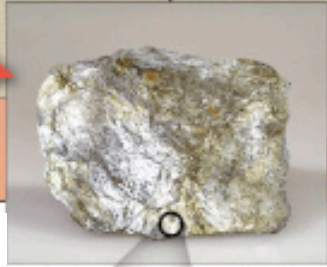




Ardósia



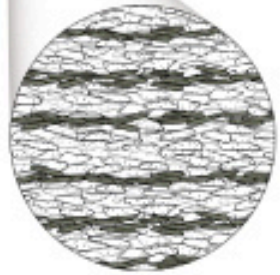
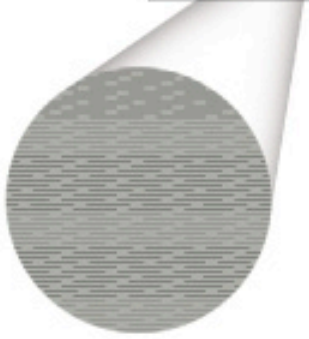
Filito



Xisto



Gnaiss



Área
em que
Barrow
trabalhou

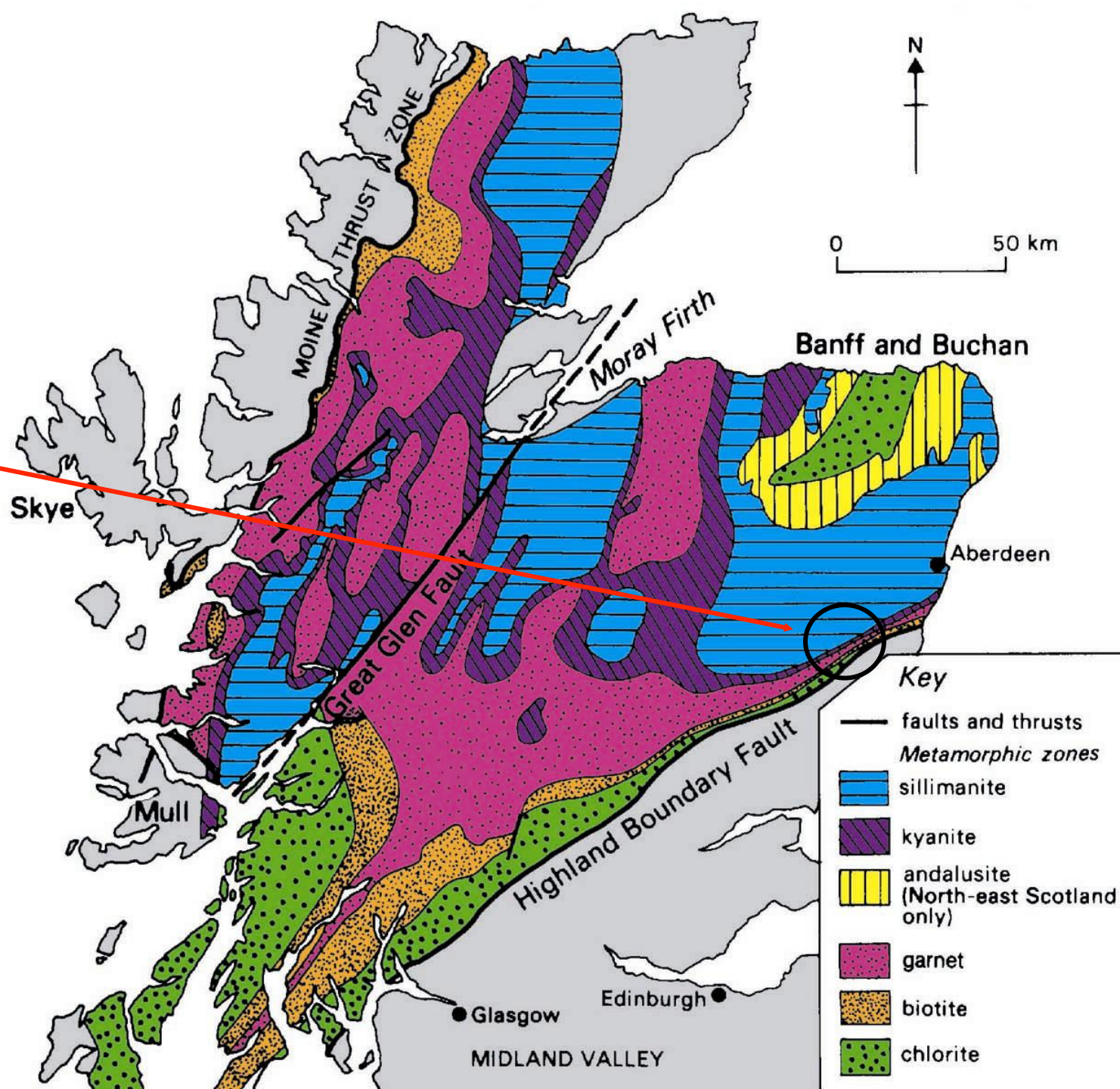
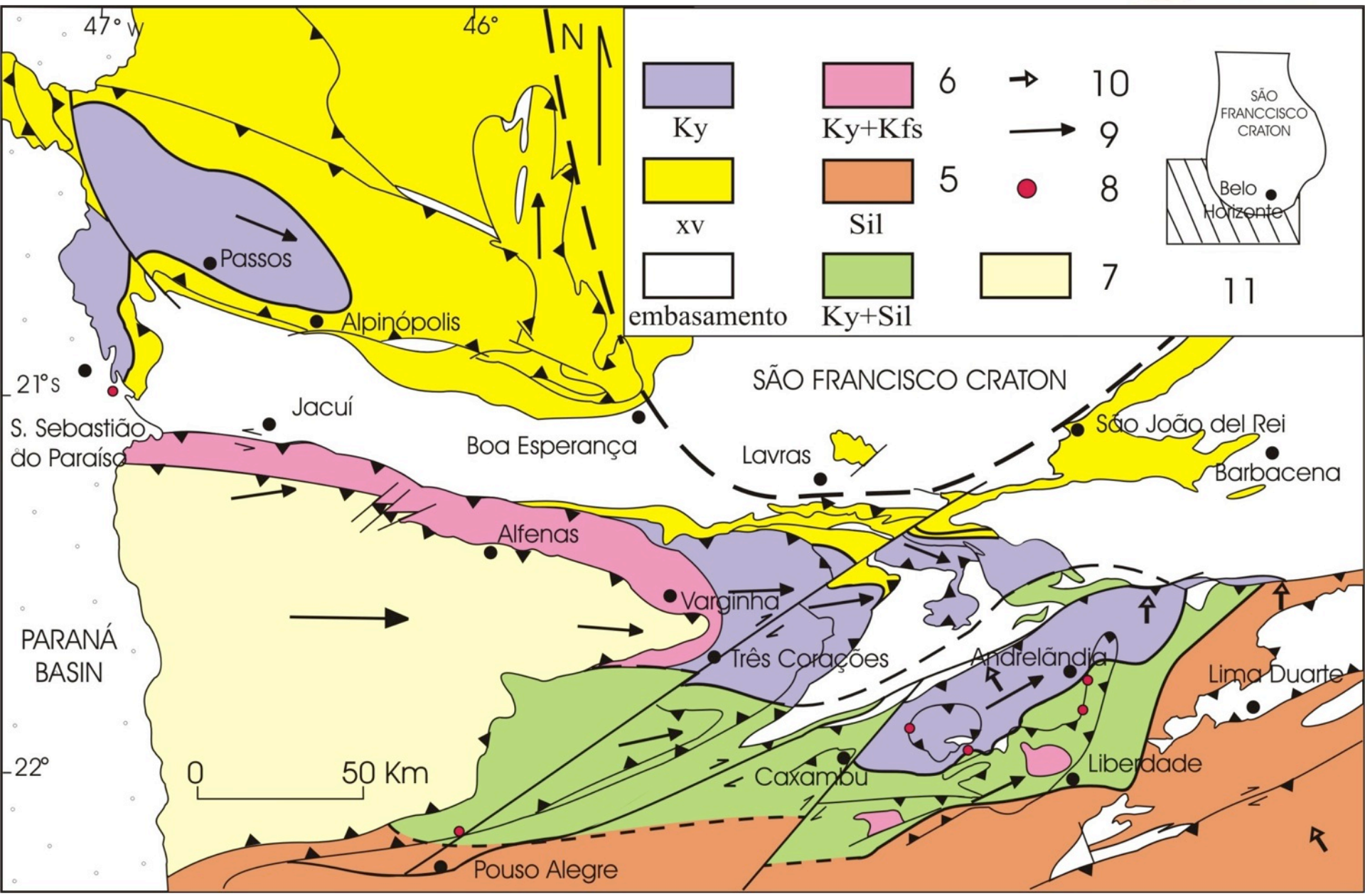
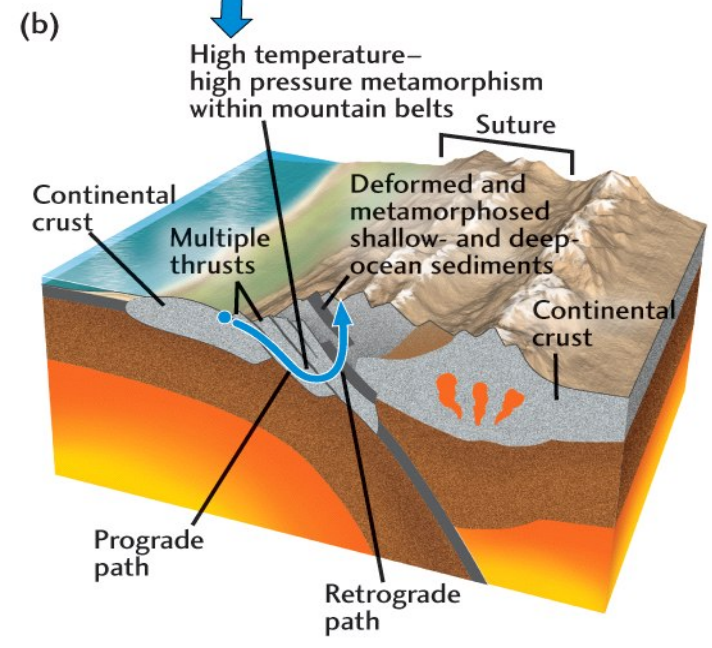
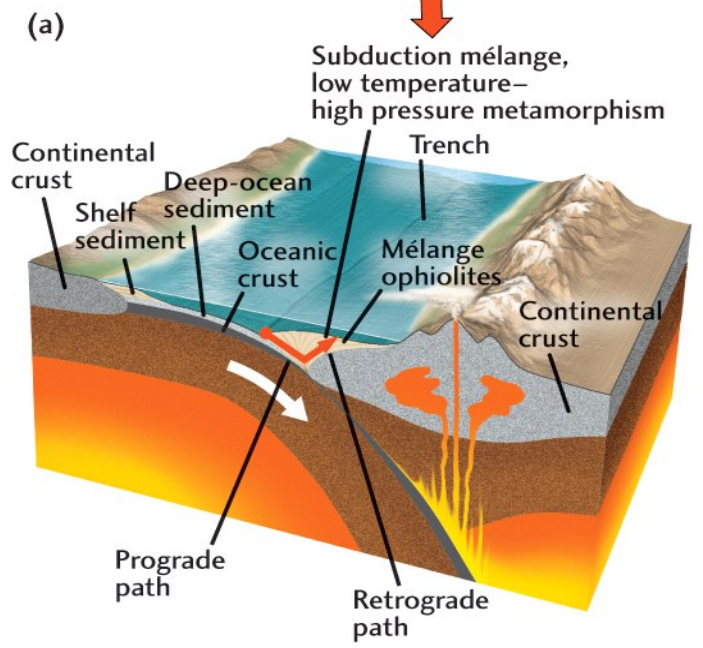
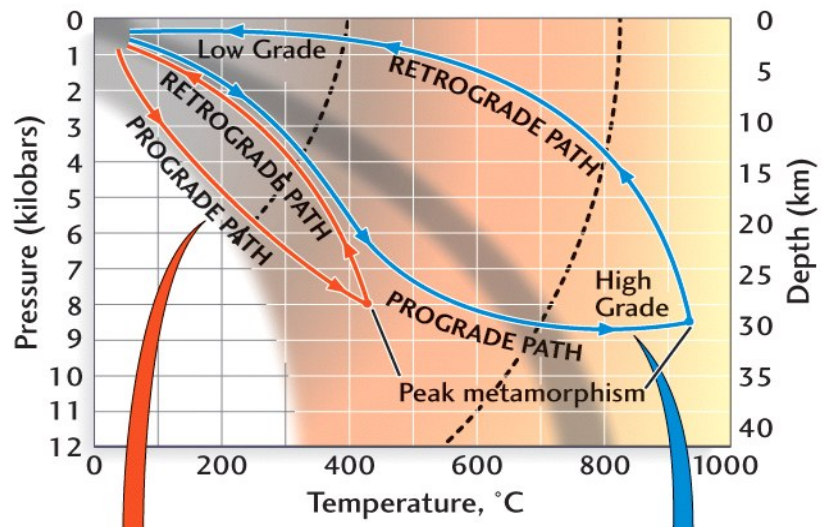
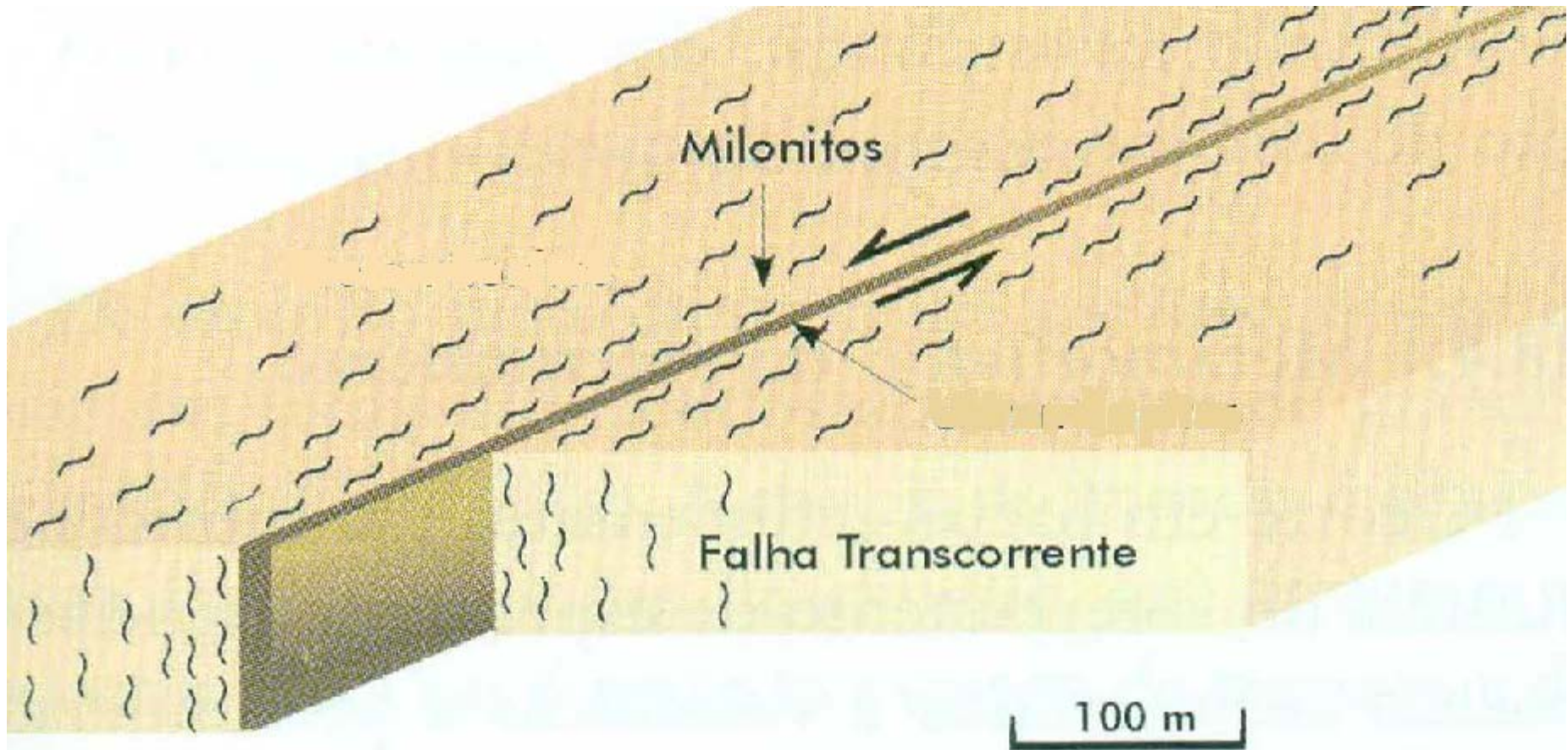


Figure 21.8. Regional metamorphic map of the Scottish Highlands, showing the zones of minerals that develop with increasing metamorphic grade. From Gillen (1982) *Metamorphic Geology. An Introduction to Tectonic and Metamorphic Processes*. George Allen & Unwin. London.



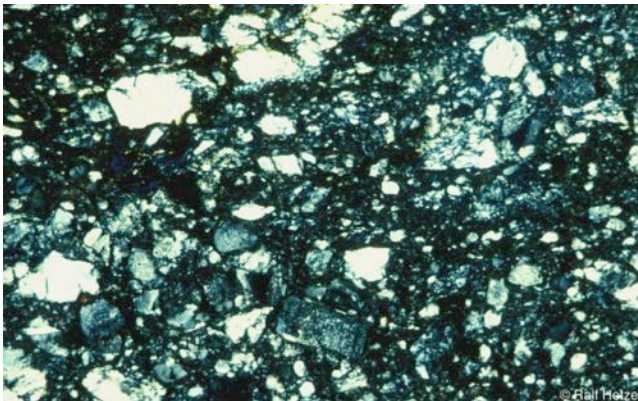


Metamorfismo Dinâmico ou Cataclástico



Metamorfismo dinâmico

- Ocorre em zonas de falha e de cisalhamento



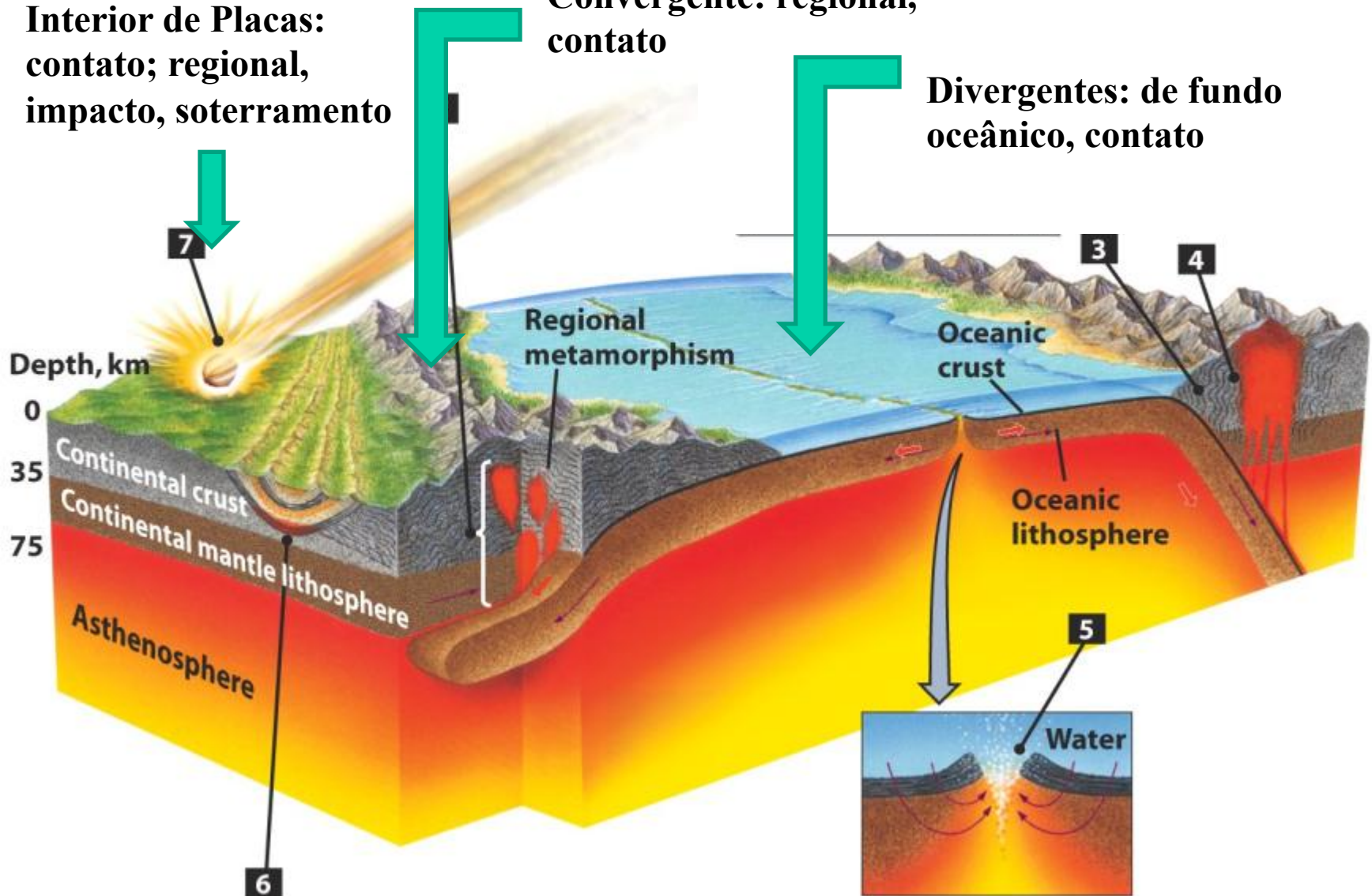
Outros tipos de metamorfismo

- impacto de meteoritos
- interação da água do mar com as rochas da crosta oceânica
- soterramento em bacias sedimentares profundas
- crosta subductada

**Interior de Placas:
contato; regional,
impacto, soterramento**

**Convergente: regional,
contato**

**Divergentes: de fundo
oceânico, contato**



Protolito

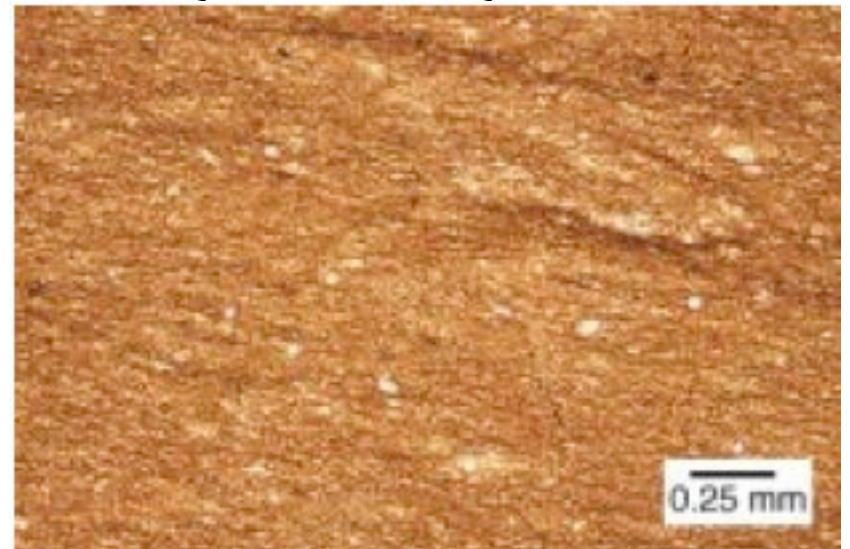
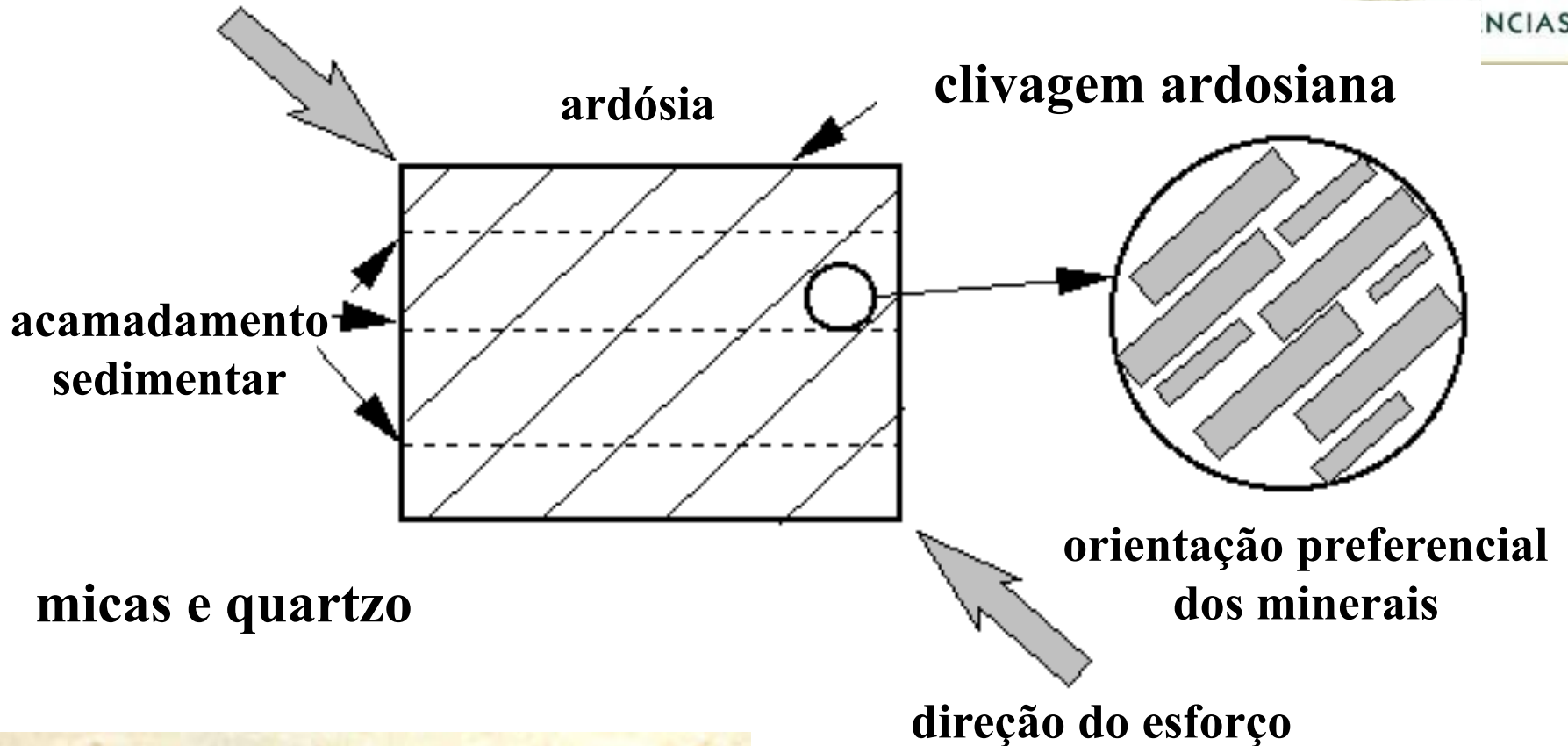
- **Protolito é a rocha original**, pré metamorfismo
 - protolitos comuns: argilito, arenito, granito, calcário, basalto
- um único protolito pode formar várias rochas diferentes quando as condições P-T (pressão e temperatura) do metamorfismo mudam

Metamorfismo progressivo de argilito

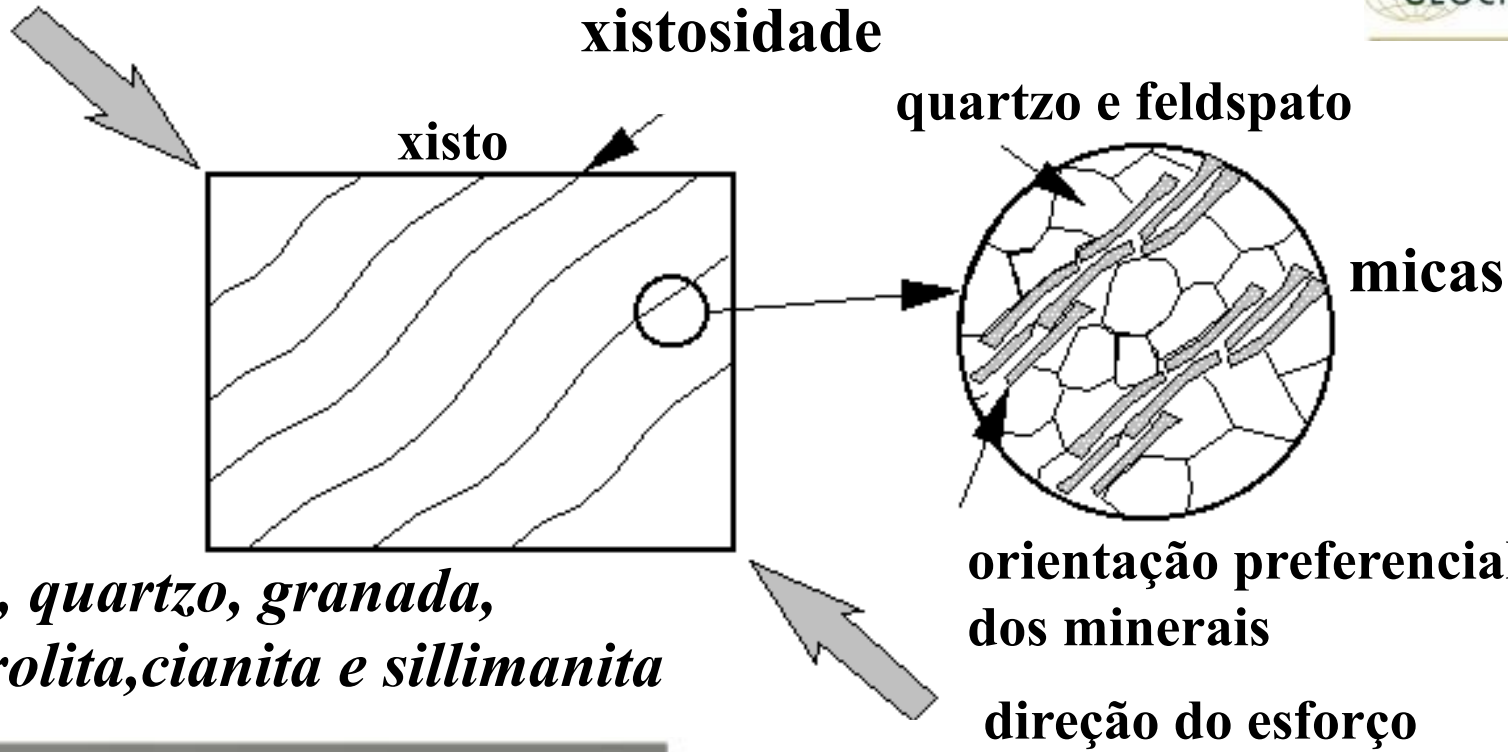
- **argilito** é formado por quartzo e argilas (minerais ricos em Al_2O_3), assim as rochas metamórficas resultantes têm: quartzo, micas (muscovita e biotita) e silicatos ricos em Al_2O_3 (clorita, granada, estaurolita, cianita, sillimanita)
- **ardósia**
 - minerais não são identificáveis a olho nu e muitas vezes nem com a lupa
 - plano da foliação é perfeito

- **filito**
 - minerais maiores, podem ser identificados a olho nu ou com a lupa
 - plano da foliação algo irregular
- **xisto**
 - minerais identificáveis a olho nu
 - plano da foliação irregular
 - comum presença de porfiroblastos
- **gnaisse**
 - rocha com maior proporção de feldspatos
 - pode apresentar bandamento composicional

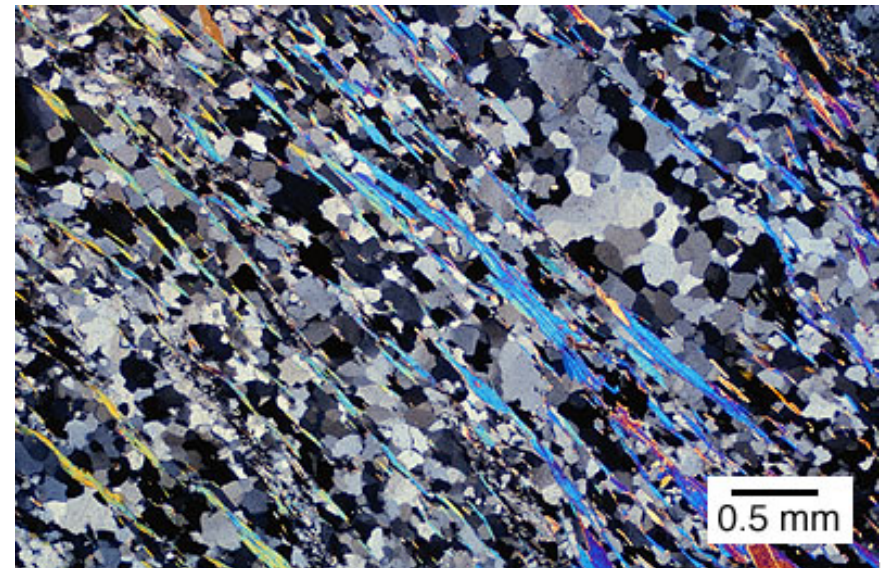
- **migmatito**
 - rocha mista com porção ígnea (camadas que fundiram) e metamórficas (camadas que resistiram a fusão)
- **granulito**
 - rocha formada pelo resíduo da fusão
 - dominada por minerais anidros: feldspatos, ortopiroxênio, granada

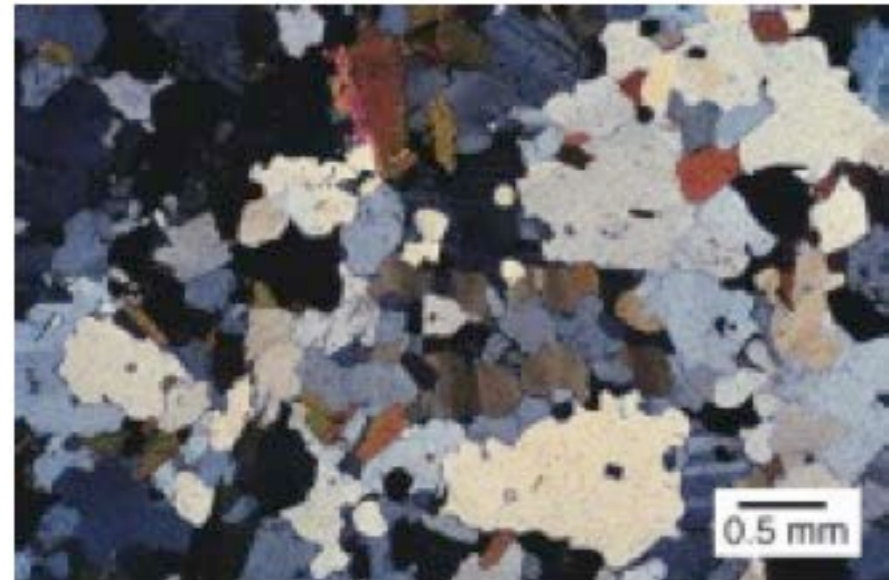
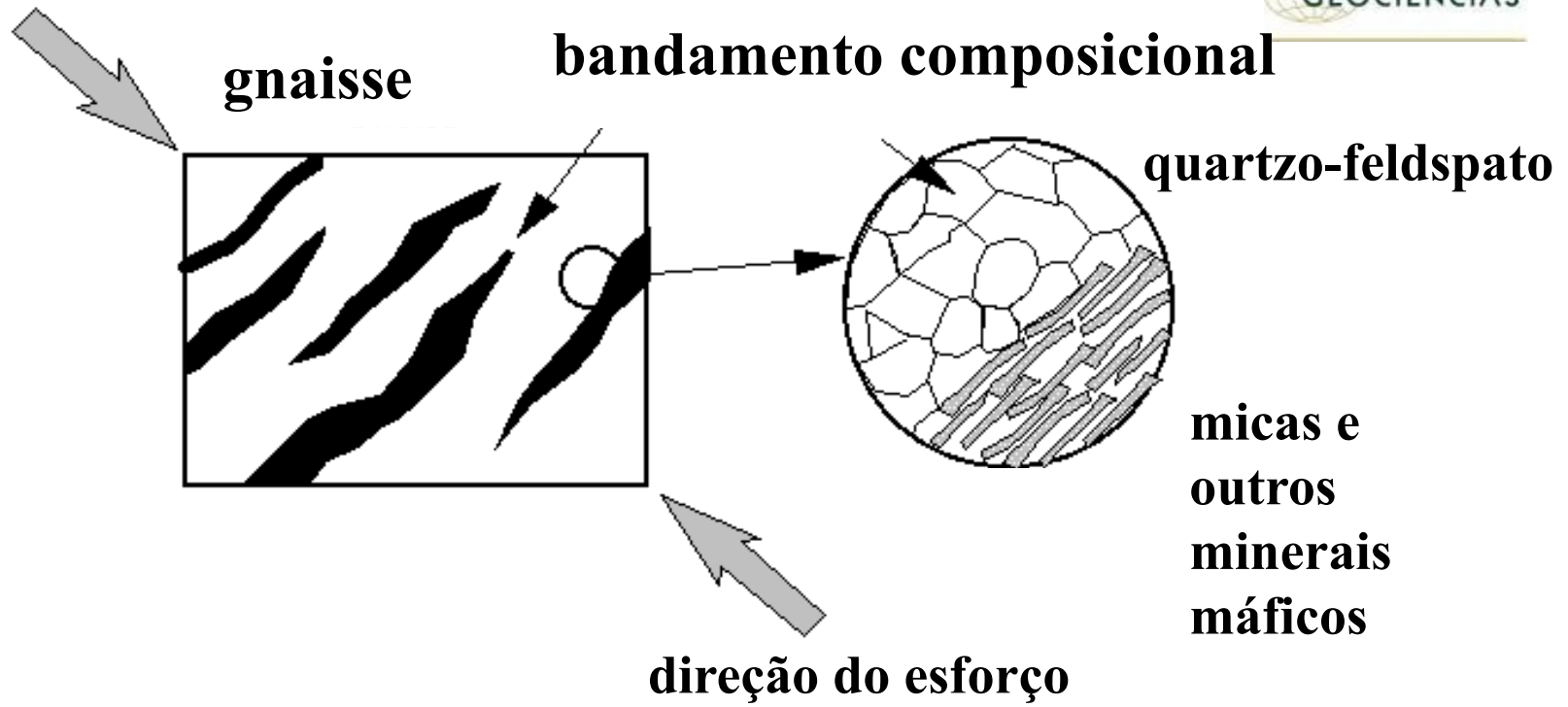


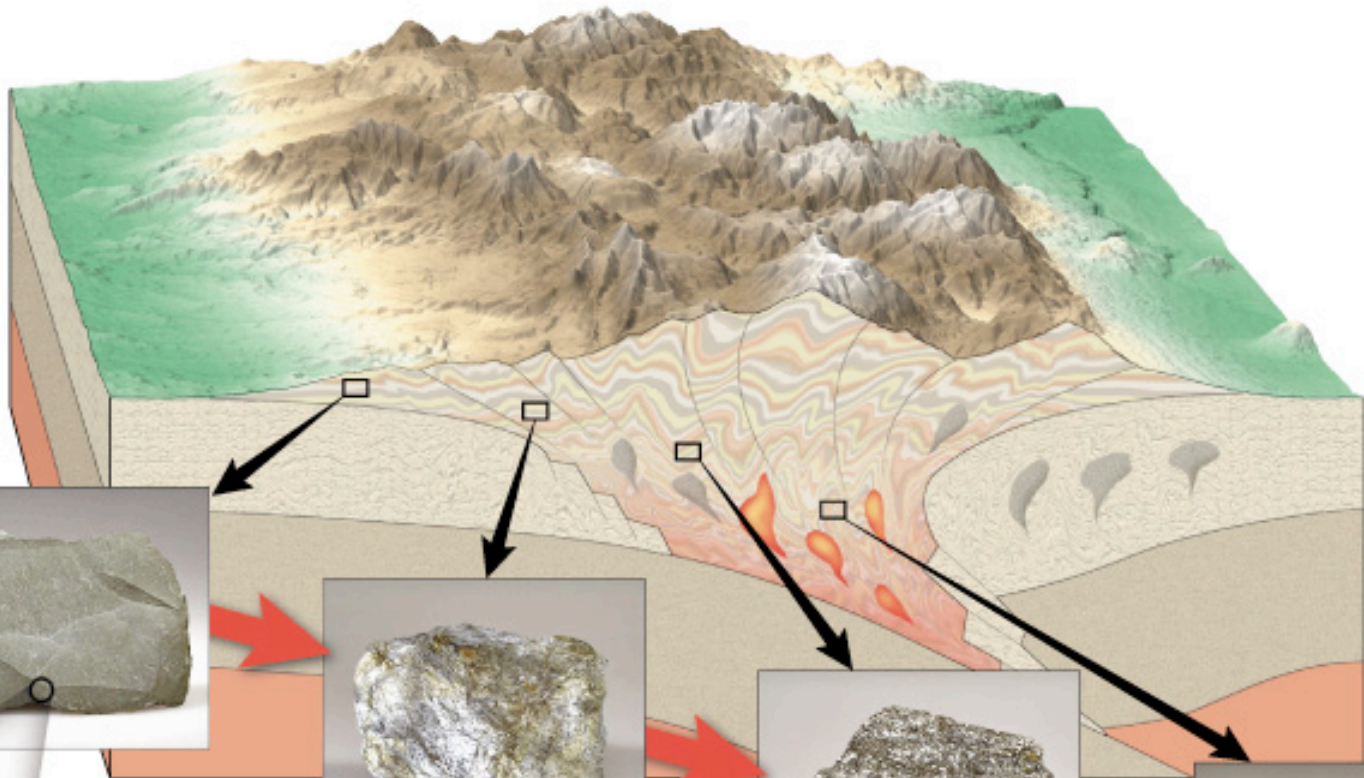
xistosidade



micas, quartzo, granada, estauroлита, cianita e sillimanita



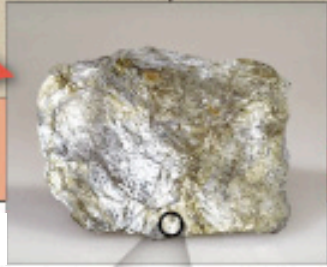




Ardósia



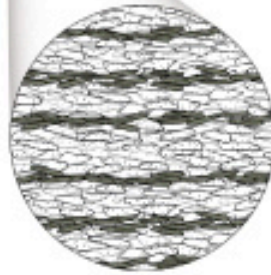
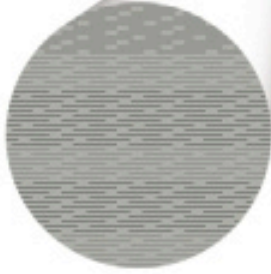
Filito



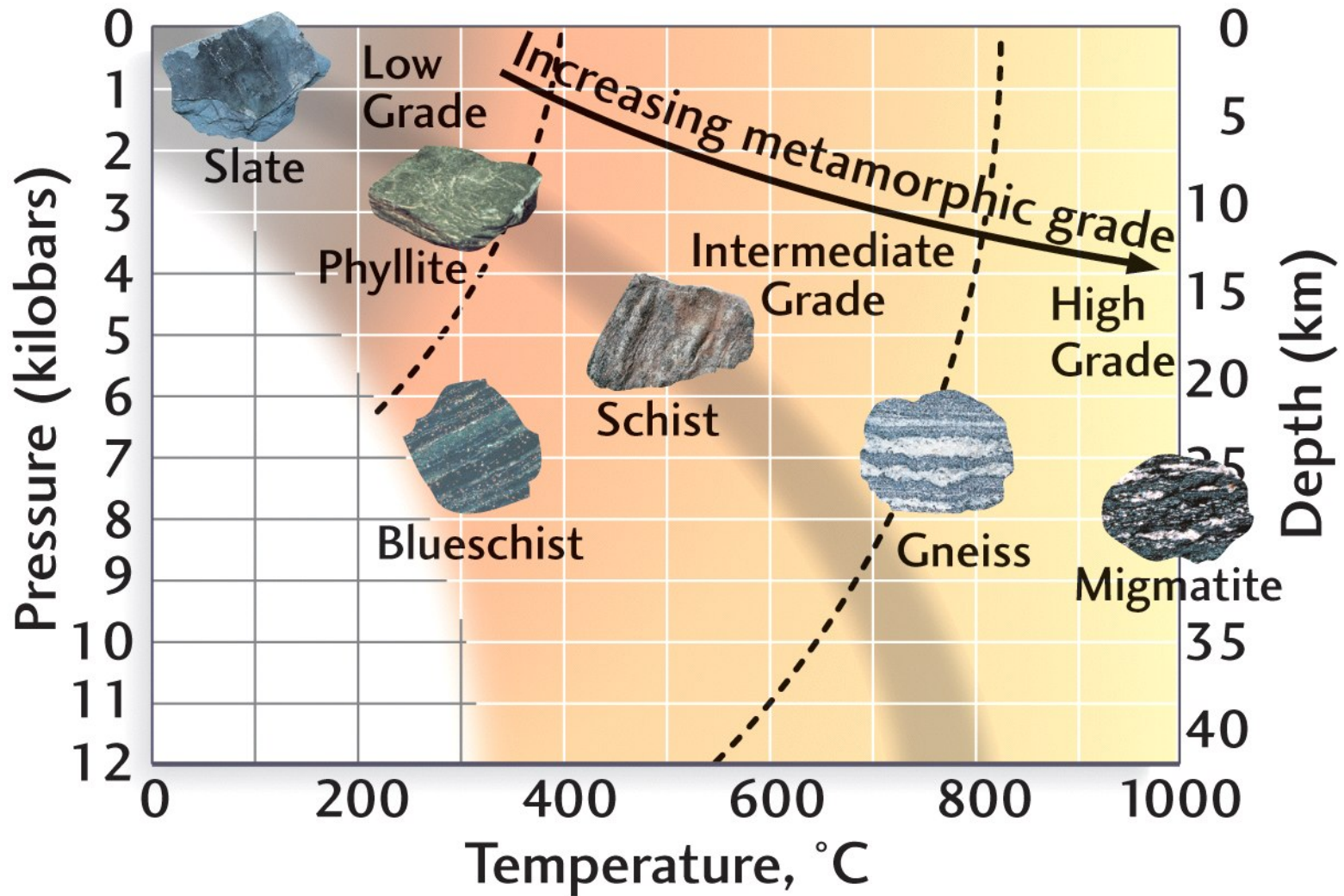
Xisto



Gnaiss



INDEX MINERALS, GRADE, AND FACIES DESCRIBE METAMORPHISM



Granito

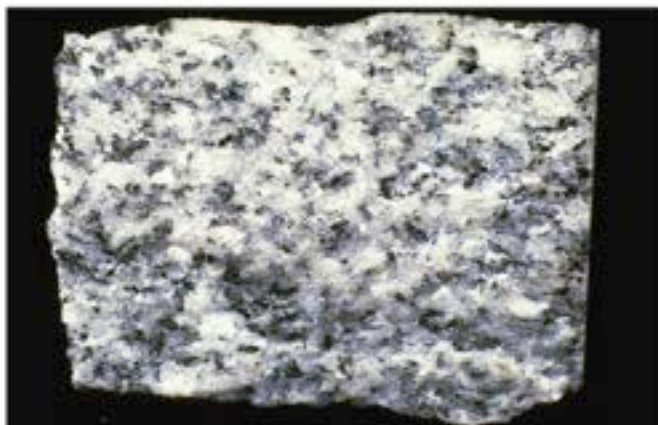
- Granito metamorfizado também é transformado em gnaiss



Before metamorphism



After metamorphism



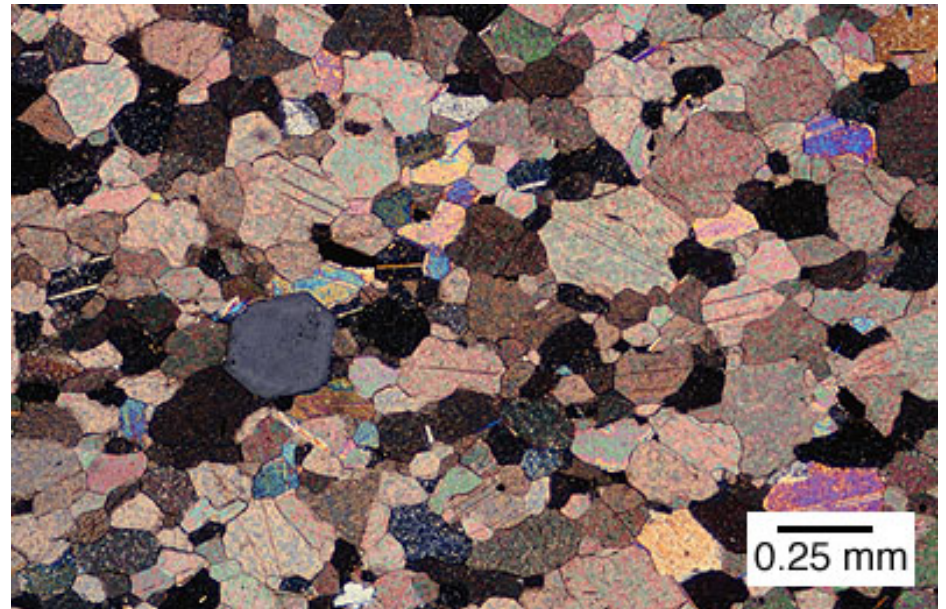
Metamorfismo de calcário

- Mármore é a rocha resultante
- Se o calcário for puro o mármore terá carbonatos
- Se tiver quartzo e dolomita, silicatos magnesianos ocorrem (serpentina, talco, tremolita, diopsídio e forsterita)

mármore



carbonatos



Metamorfismo de basalto

- **xisto verde**
- **anfíbolito**
- **granulito máfico**



xisto verde

anfibolito

basalto

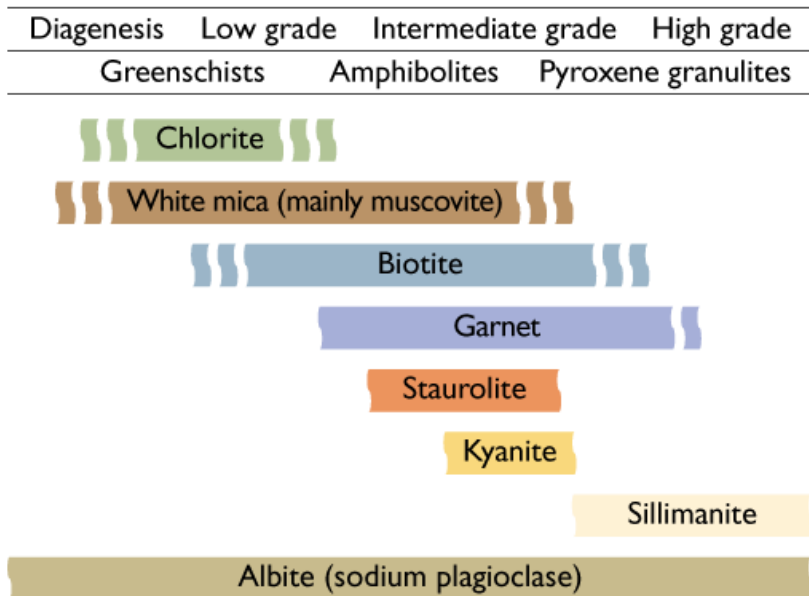
granulito

eclogito



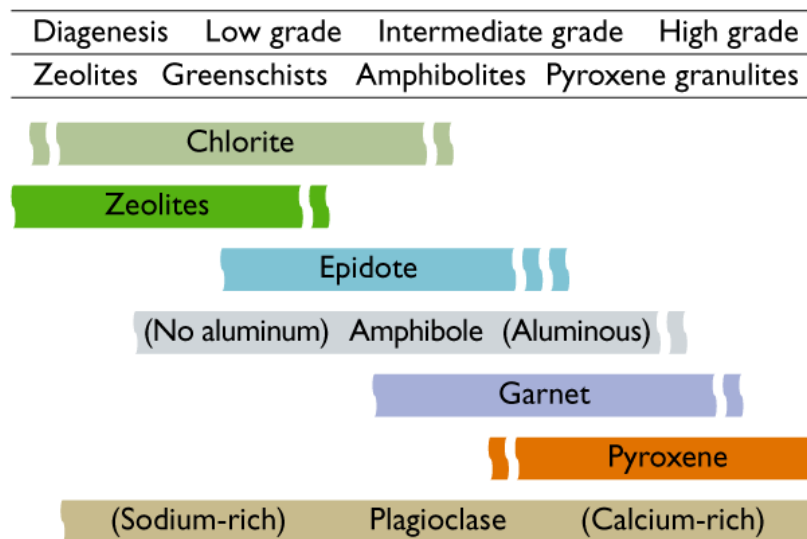
Metamorfismo de basalto

argilito



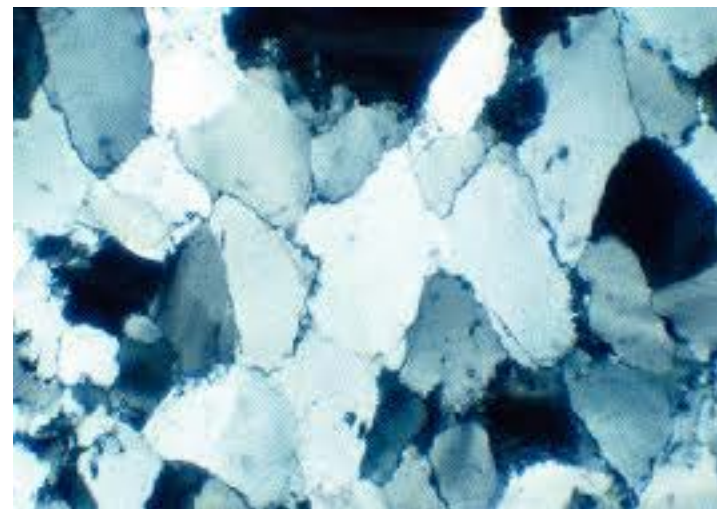
(a)

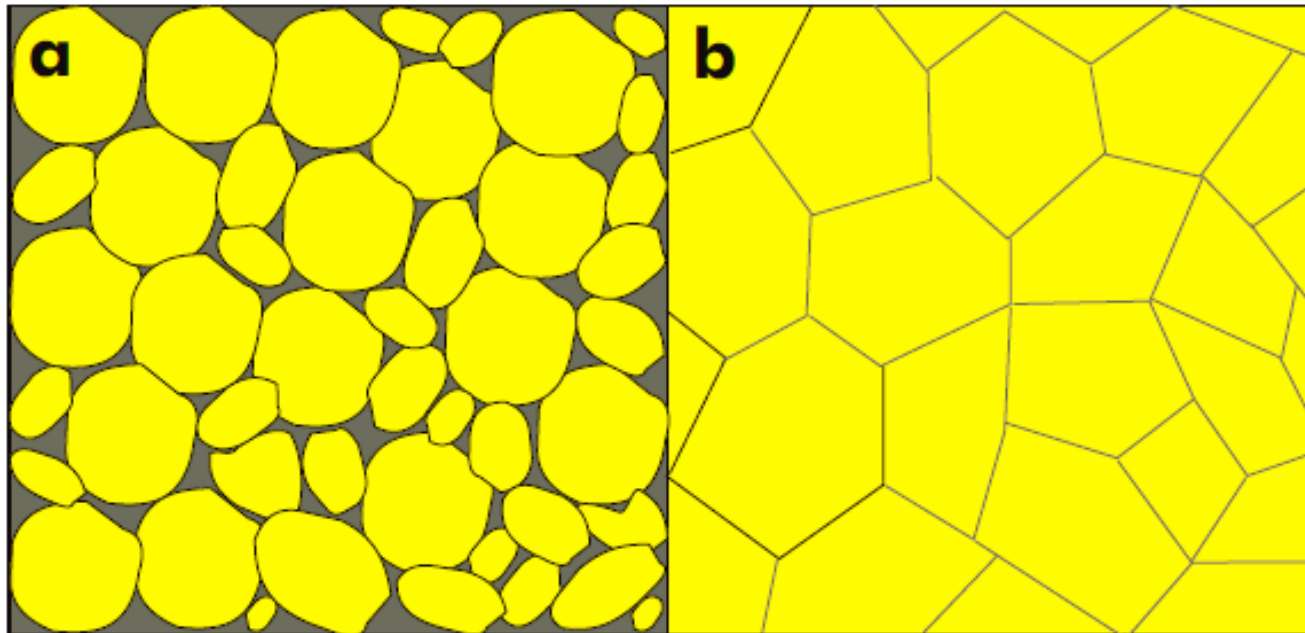
basalto



Metamorfismo de arenito

Metamorfismo de arenito produz **quartzito**, rochas ricas em quartzo e as vezes muscovita





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° entre si.

REFERÊNCIAS

- TEIXEIRA, W., FAIRCHILD, T., TOLEDO, M.C.M. & TAIOLI, F. (2009) ***Decifrando a Terra***. 2º Edição, São Paulo, SP: Companhia Editora Nacional. 623 p.
- PRESS, F., SIEVER, R. GROTZINGER, J. e JORDAN, T.H. (2006) ***Para entender a Terra***. Tradução R. Menegat (coord.), 4ª Edição, Porto Alegre, RS: Bookman. 656p.