

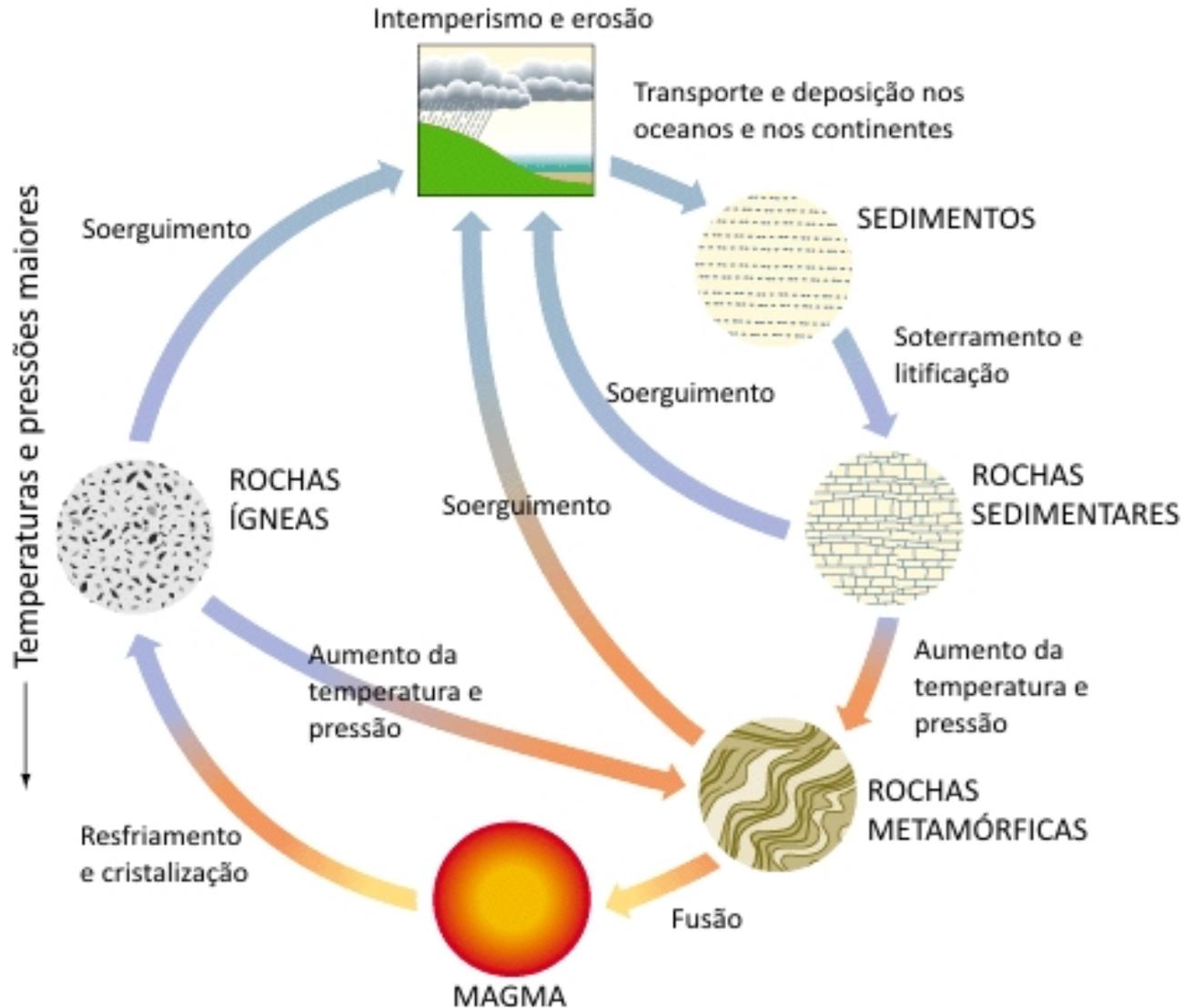
Aula – Rochas metamórficas



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 unimineralicos 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



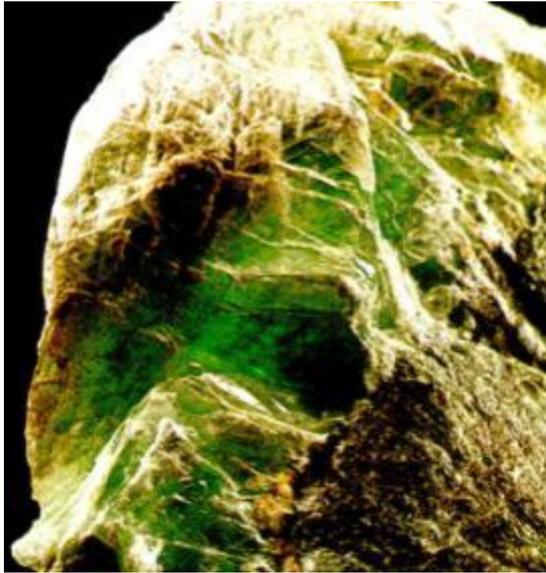
CLORITA



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?

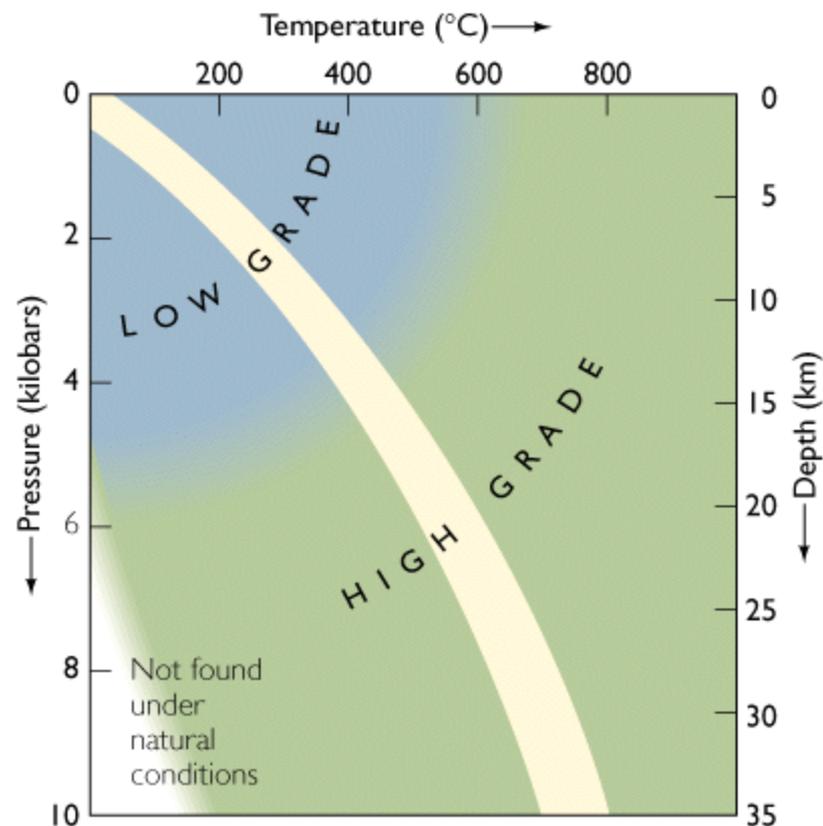
- A rocha não funde e não sofre desagregação!
- As transformações ocorrem no estado sólido através das reações metamórficas
- As reações metamórficas ocorrem através da **difusão dos átomos**

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:

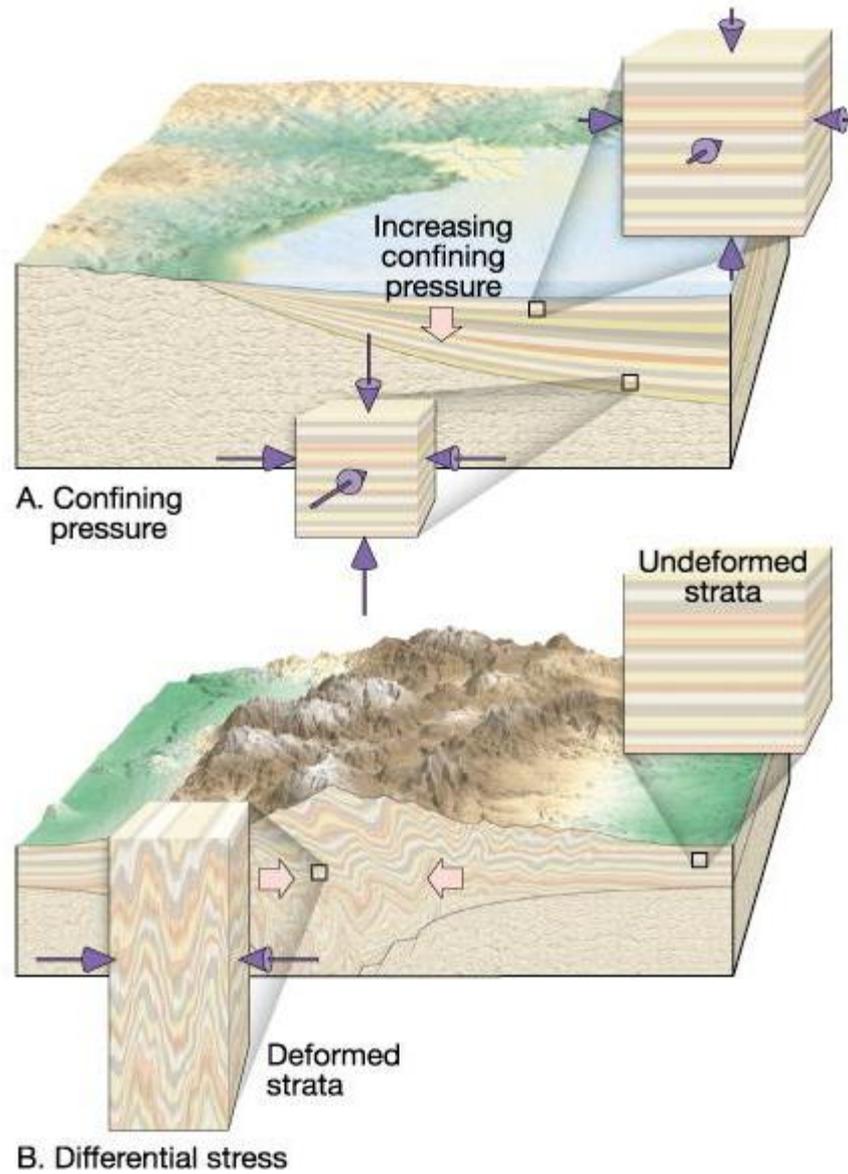
TEMPERATURA

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

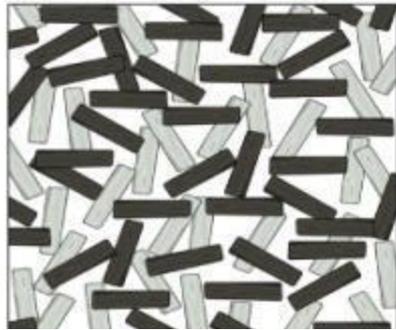
Fatores condicionantes do metamorfismo:

PRESSÃO

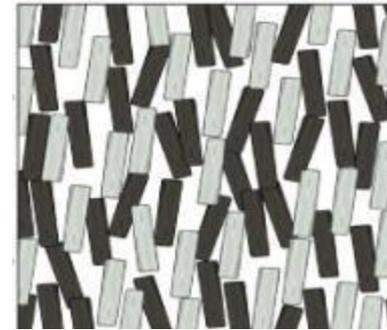
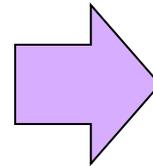
- aumenta com a profundidade
 - ~ 1 kbar para cada 3 km
 - os minerais metamórficos gerados em altas pressões tendem a ser mais densos.
- tipos:
 - pressão litostática
 - pressão dirigida



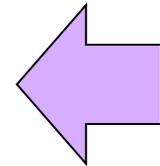
Desenvolvimento de estrutura devido à pressão dirigida



Antes do metamorfismo



Depois do metamorfismo



Fatores condicionantes do metamorfismo: **FLUIDOS**

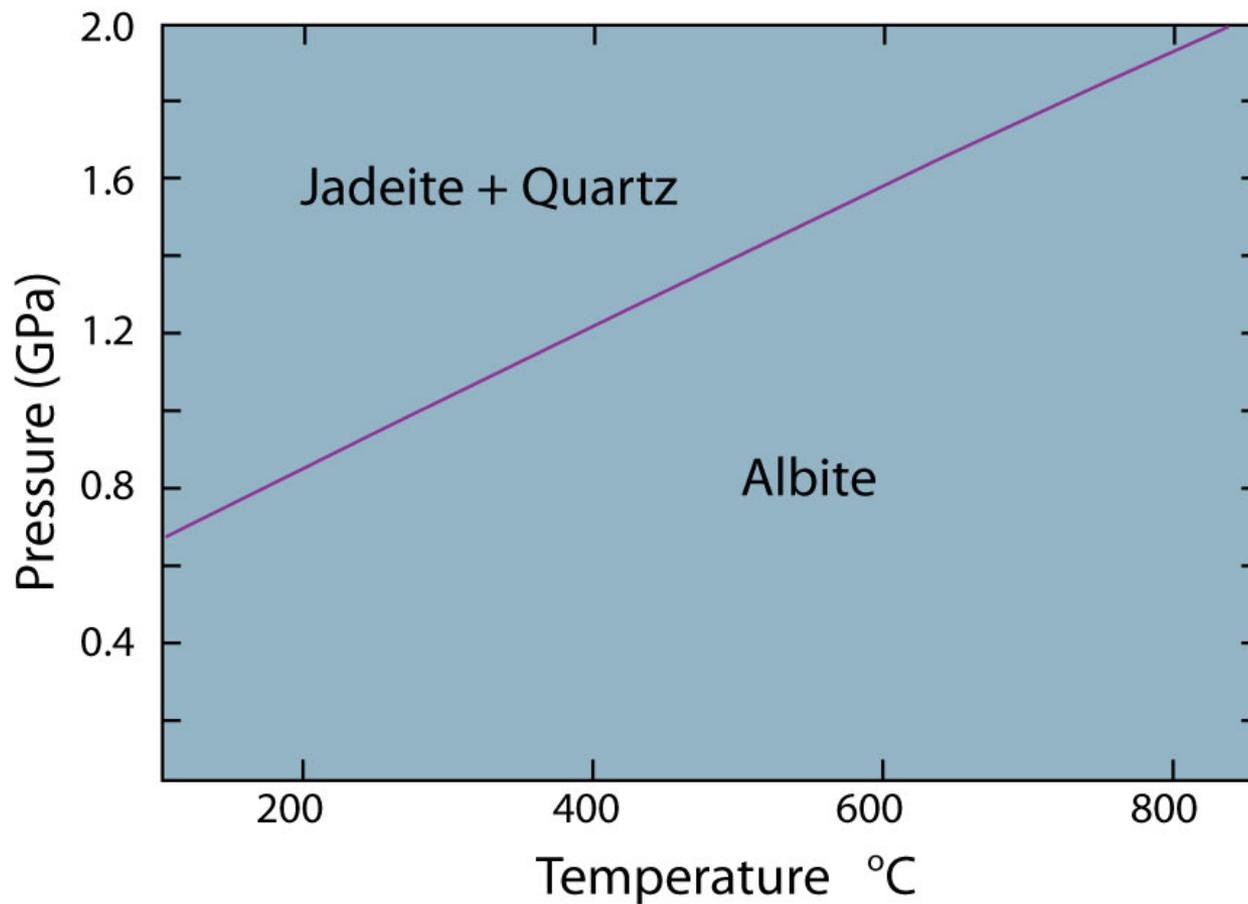
- principalmente **água**, e outros componentes voláteis
- funcionam como catalisadores de reações metamórficas, facilitando as trocas iônicas.
- ajuda na recristalização de min. existentes
- fonte dos fluidos:
 - poros em rochas sedimentares
 - fraturas em rochas ígneas
 - minerais hidratados (argilominerais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

Tempo

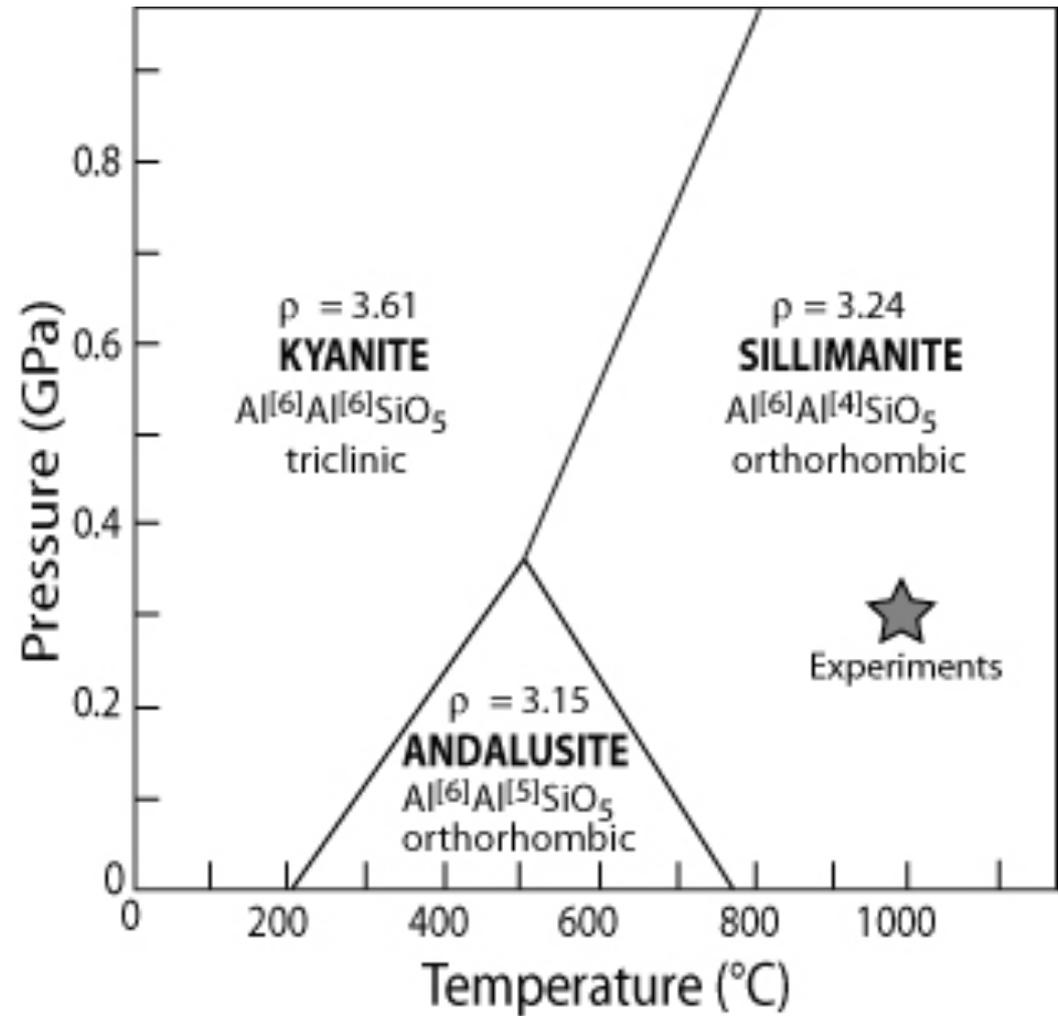
- A recristalização dos minerais é realizada ao durante **longos períodos** de tempo (milhões de anos)

Reações metamórficas

- Idealmente, a nova associação mineral é quimicamente equivalente à associação antiga (mesmos componentes nas mesmas proporções – sistema fechado)
 - $\text{quartzo} + \text{muscovita} = \text{feldspato} + \text{sillimanita} + \text{H}_2\text{O}$
 - $\text{SiO}_2 + \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 = \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{H}_2\text{O}$
- 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

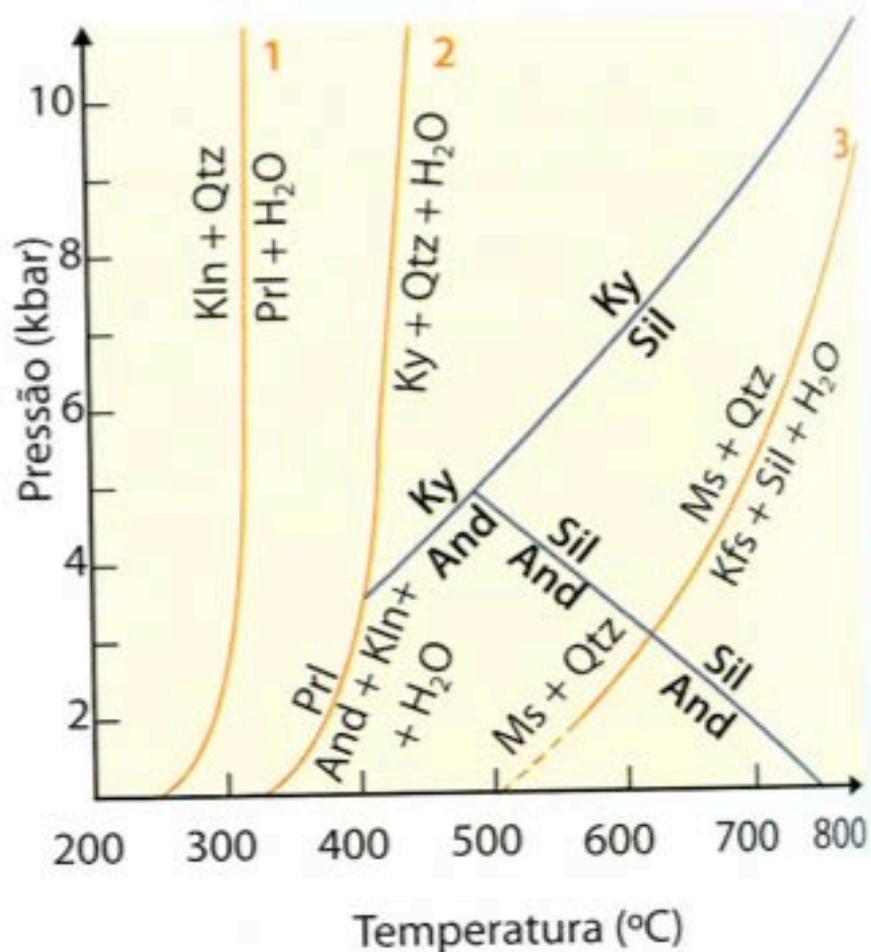


Figura 15.10 - Curvas de equilíbrio P x T para as reações: 1) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Kln-caolinita) + 2 SiO_2 (Qtz-quartzo) = $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Prl-pirofilita) + H_2O (fase fluida), 2) $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Prl-pirofilita) = 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

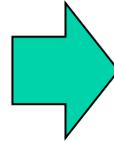
Limites do metamorfismo

- 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

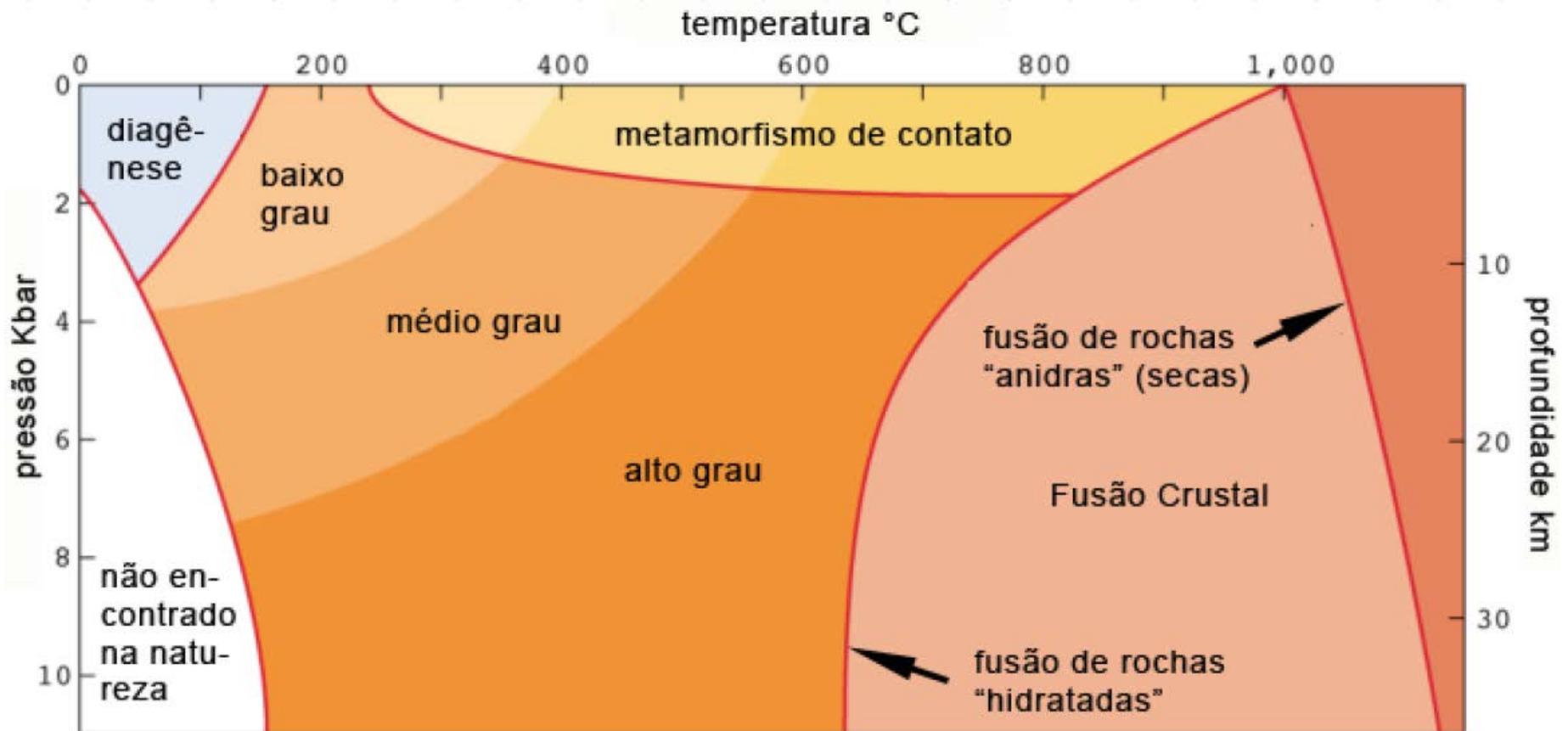


Migmatito

porção cinza – r. metamórfica

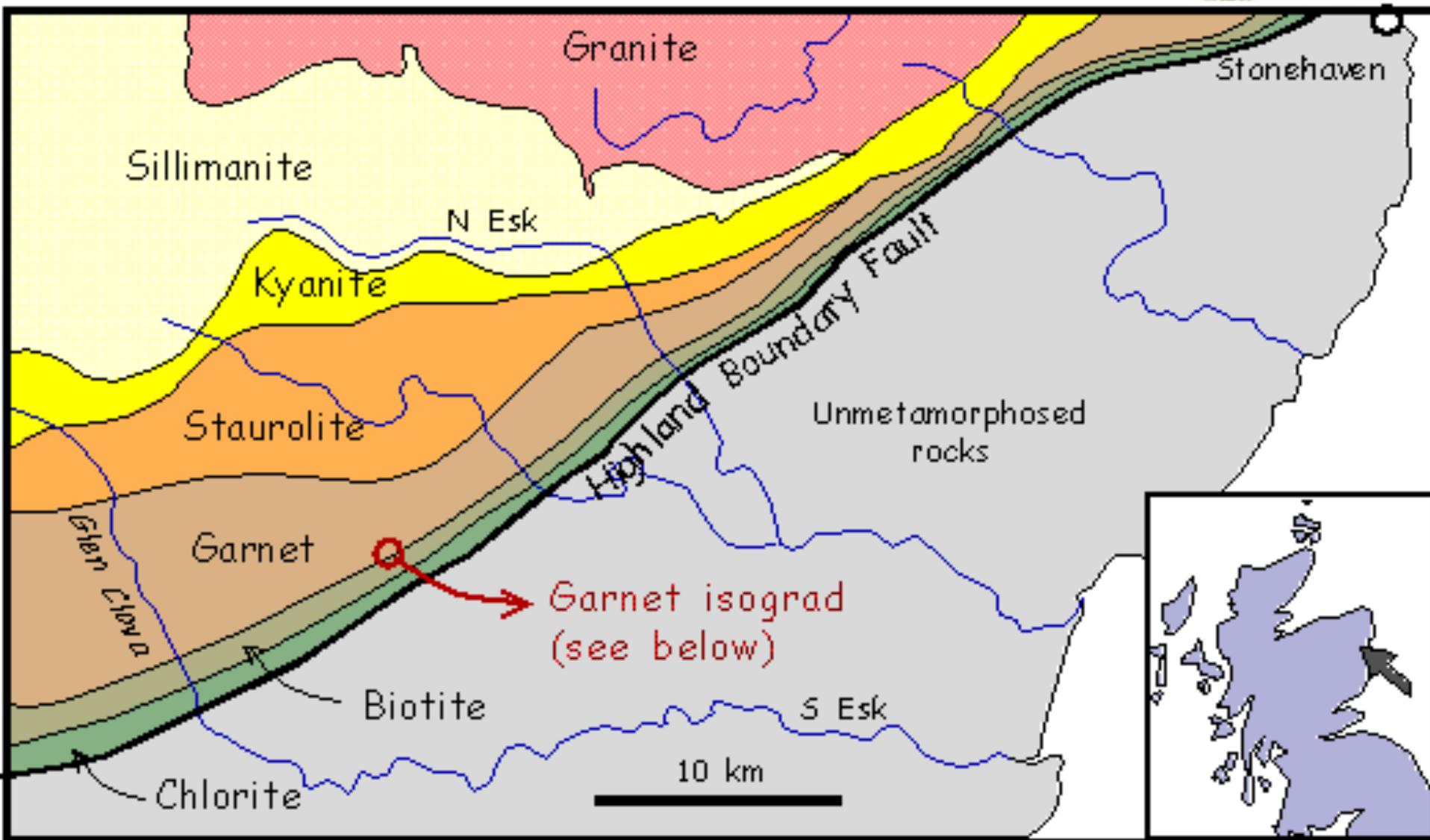
porção rosa – r. ígnea

Limites do Metamorfismo

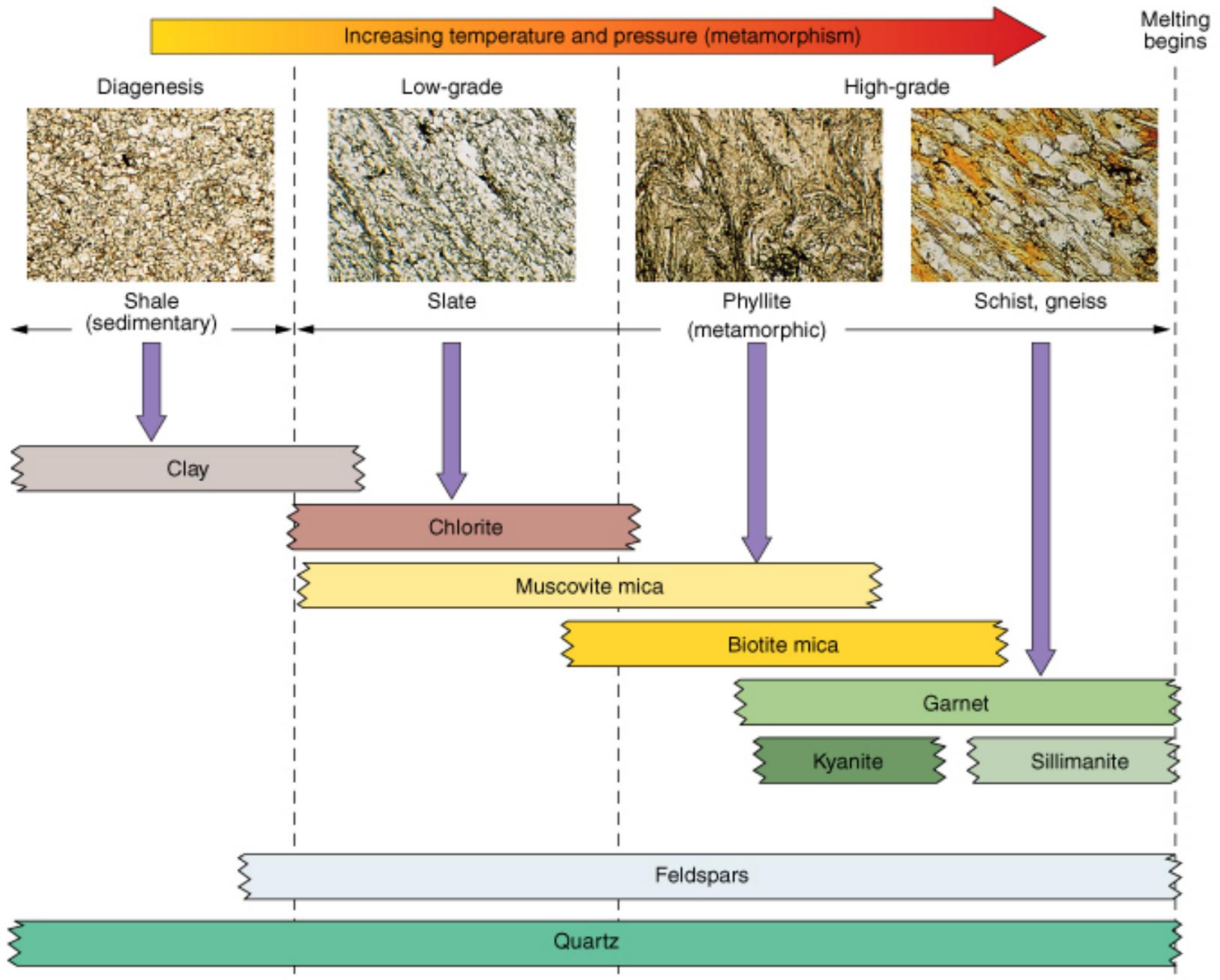


Minerais índices

- 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**

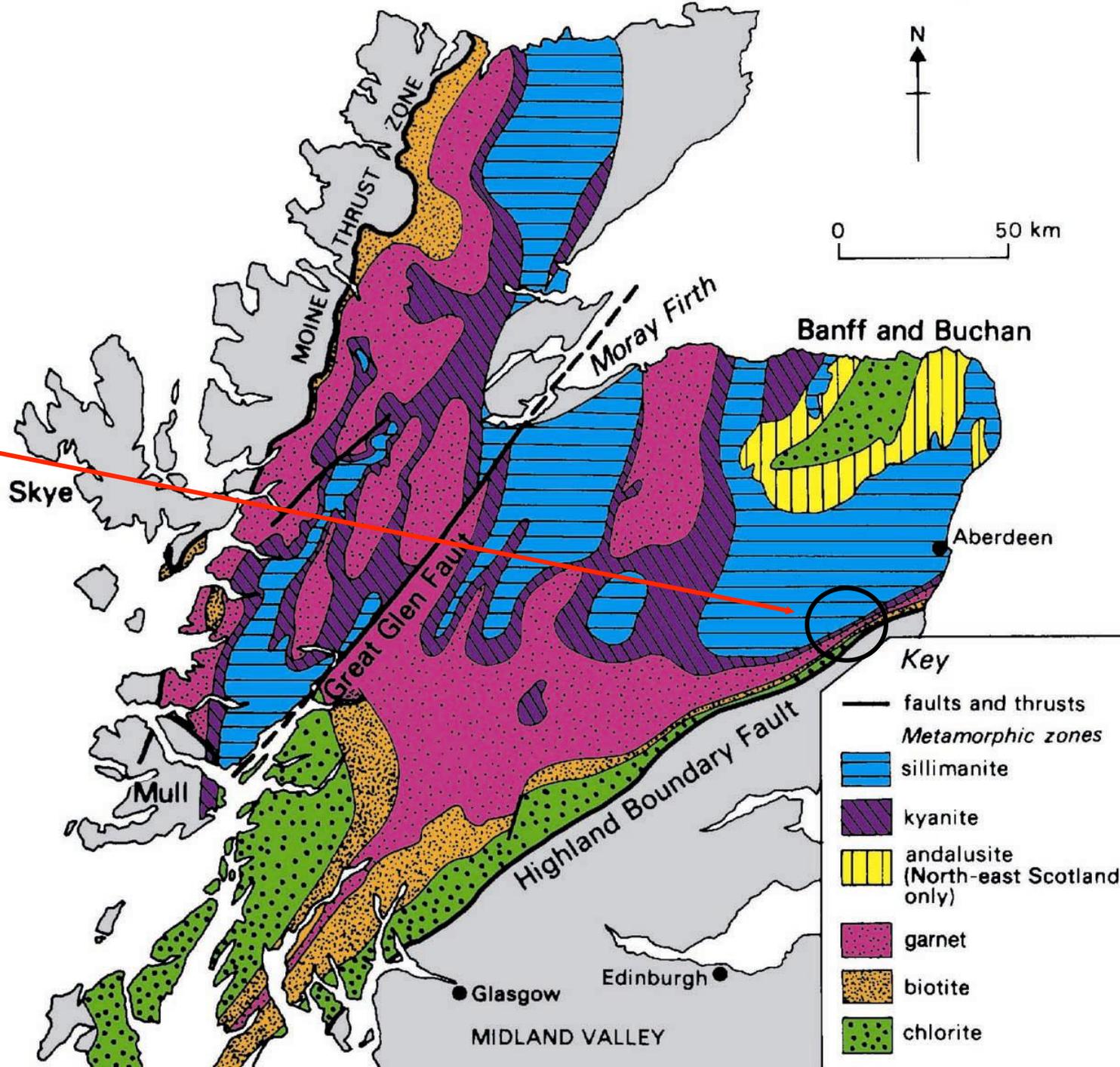


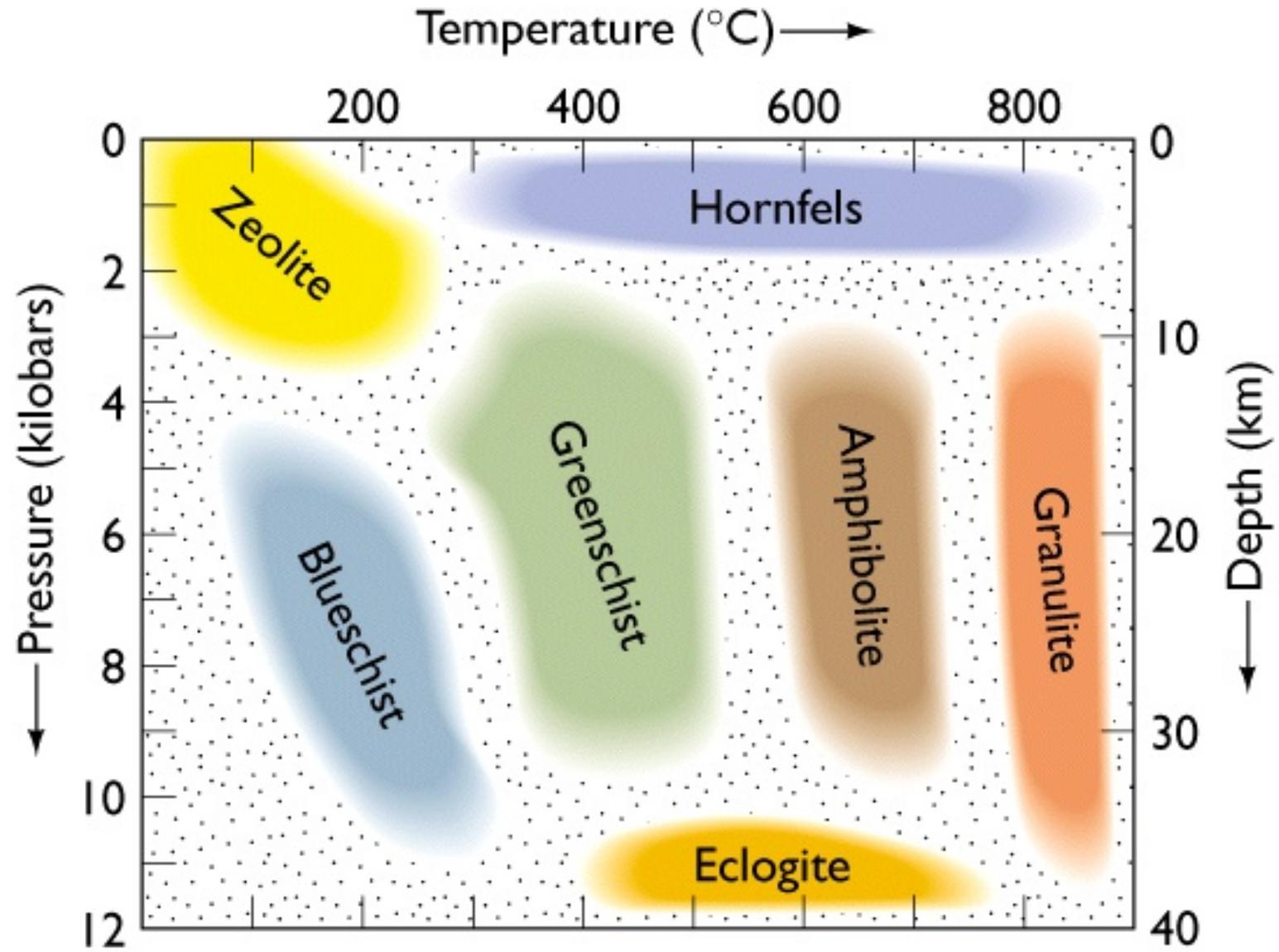
Figure 21.8. Regional metamorphic map of the Scottish Highlands, showing the zones of minerals that develop with increasing metamorphic grade. From Gillen (1982) *Metamorphic Geology. An Introduction to Tectonic and Metamorphic Processes*. George Allen & Unwin. London.

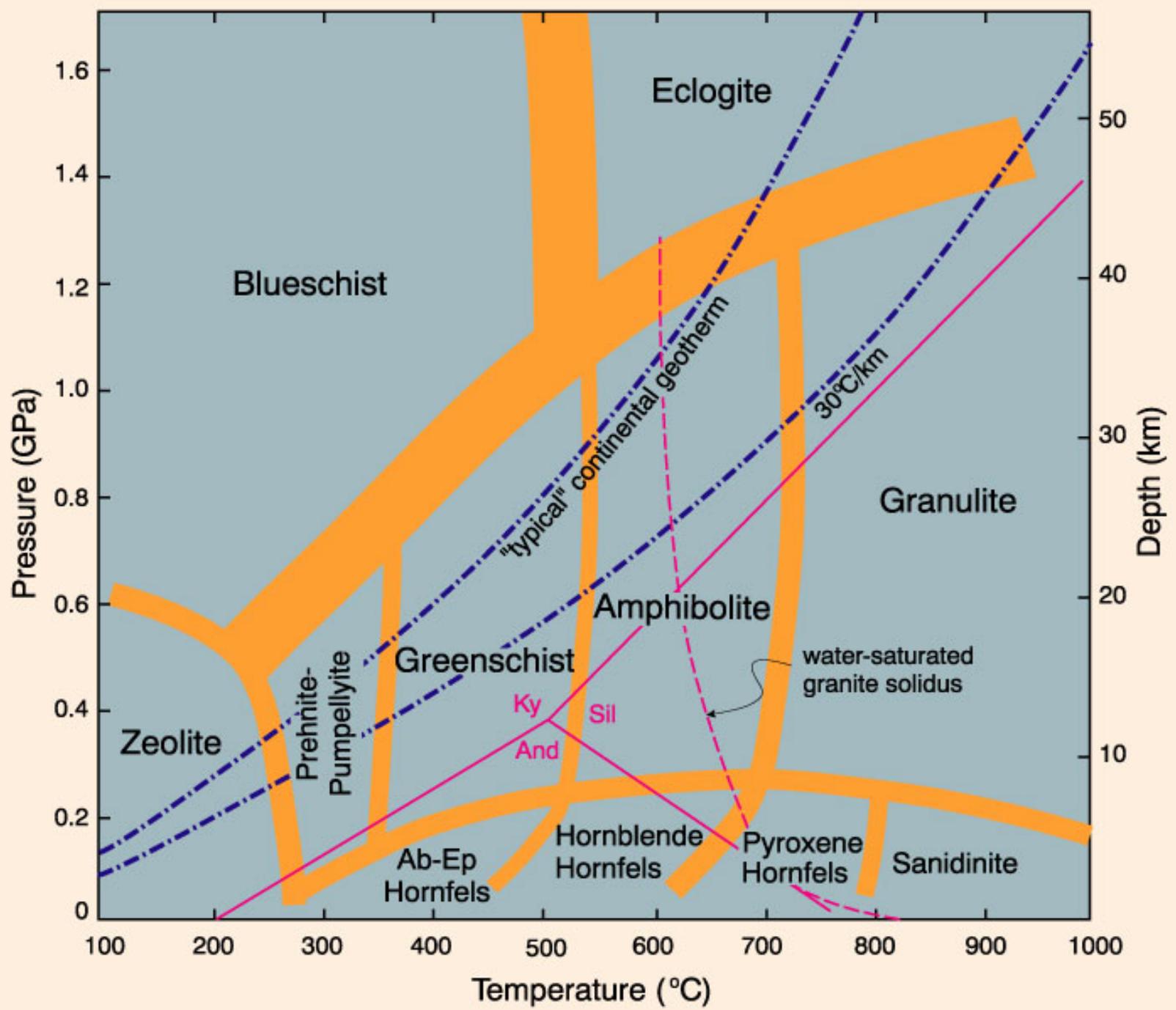
Divisões do metamorfismo

- 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

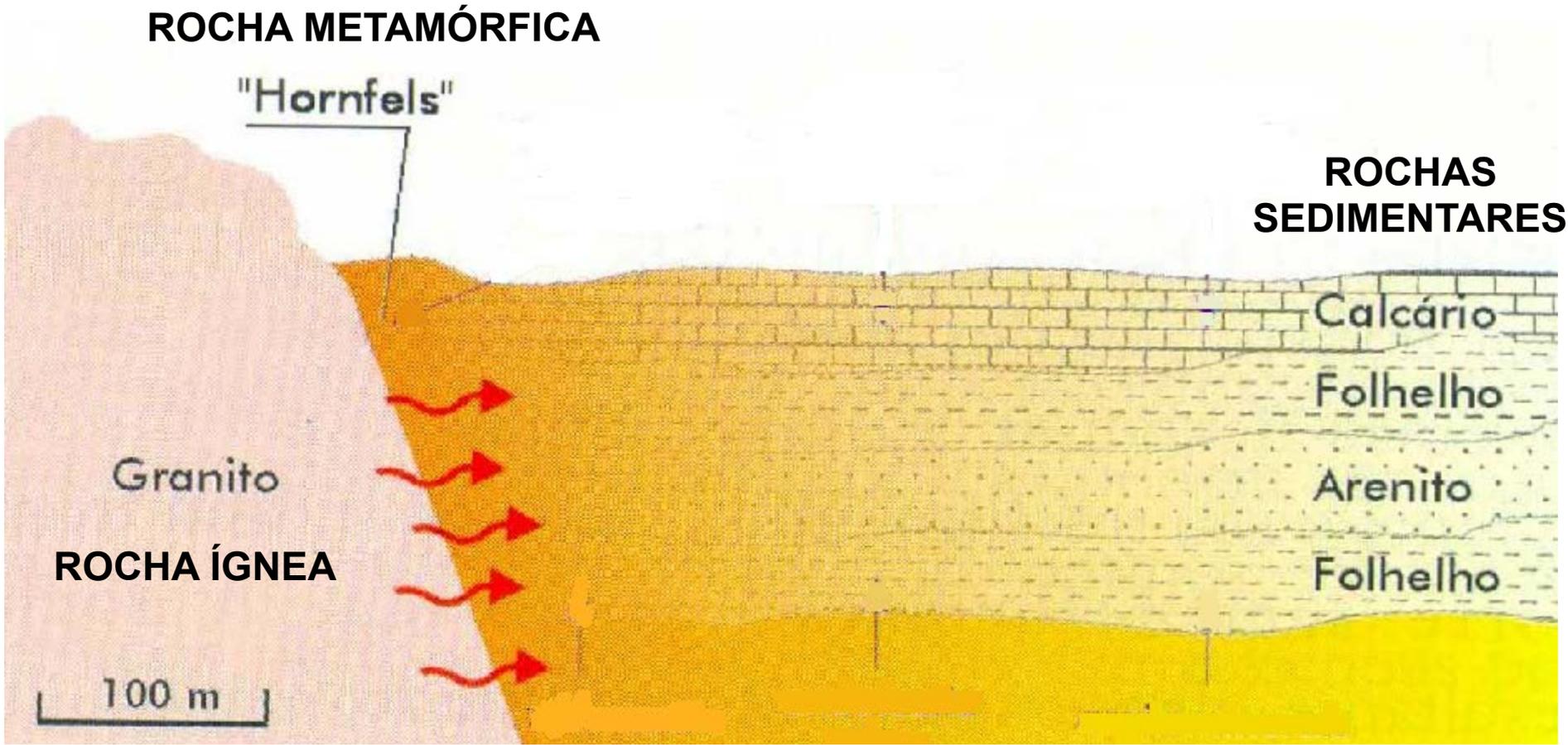
Calcário

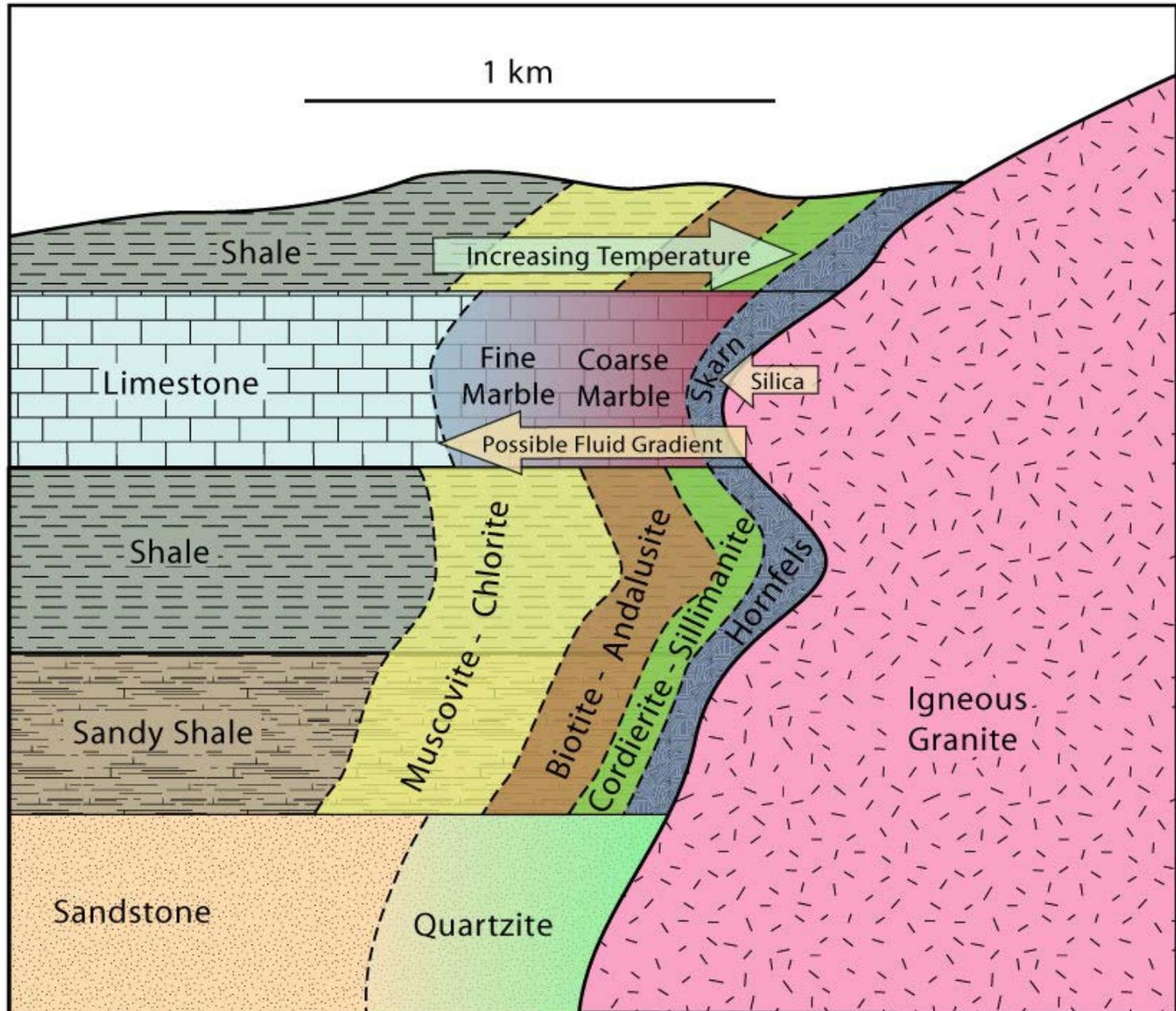
Folhelho

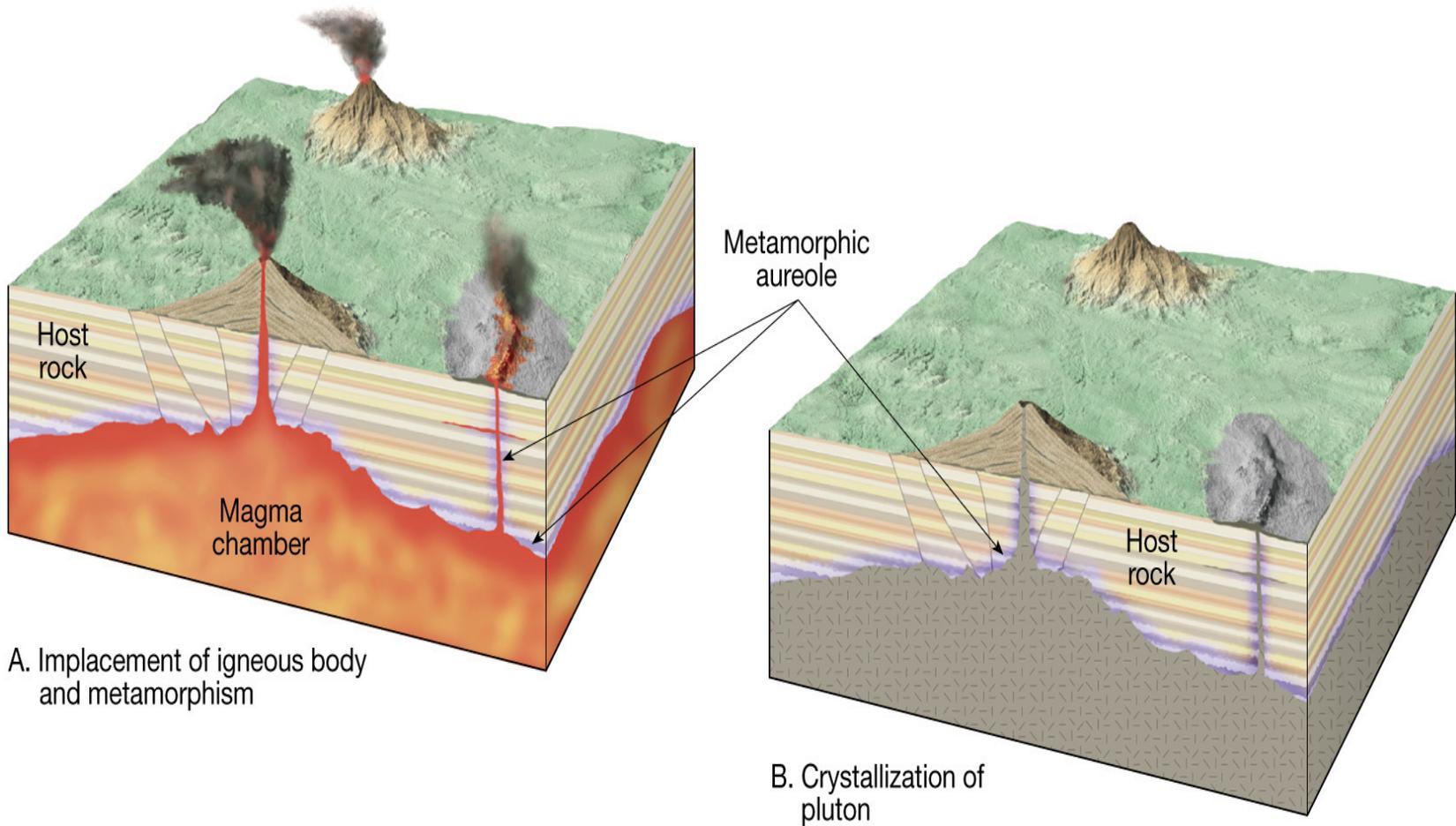
Arenito

Folhelho

100 m





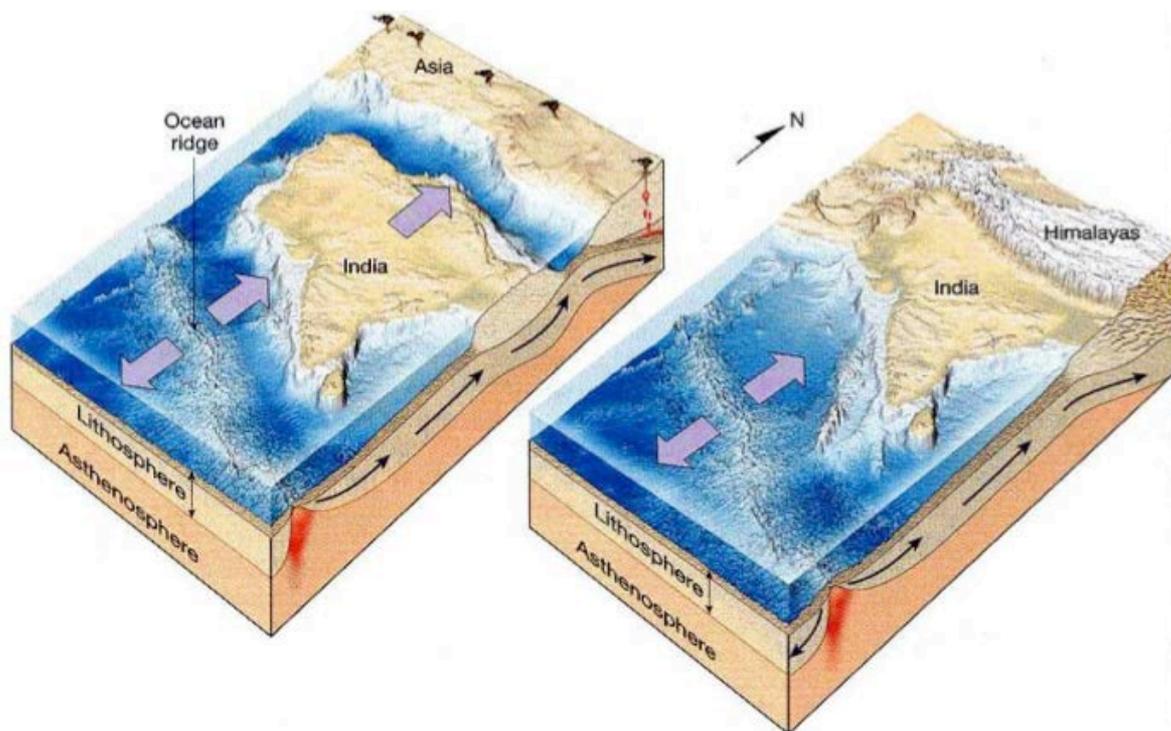


A. Implantation of igneous body and metamorphism

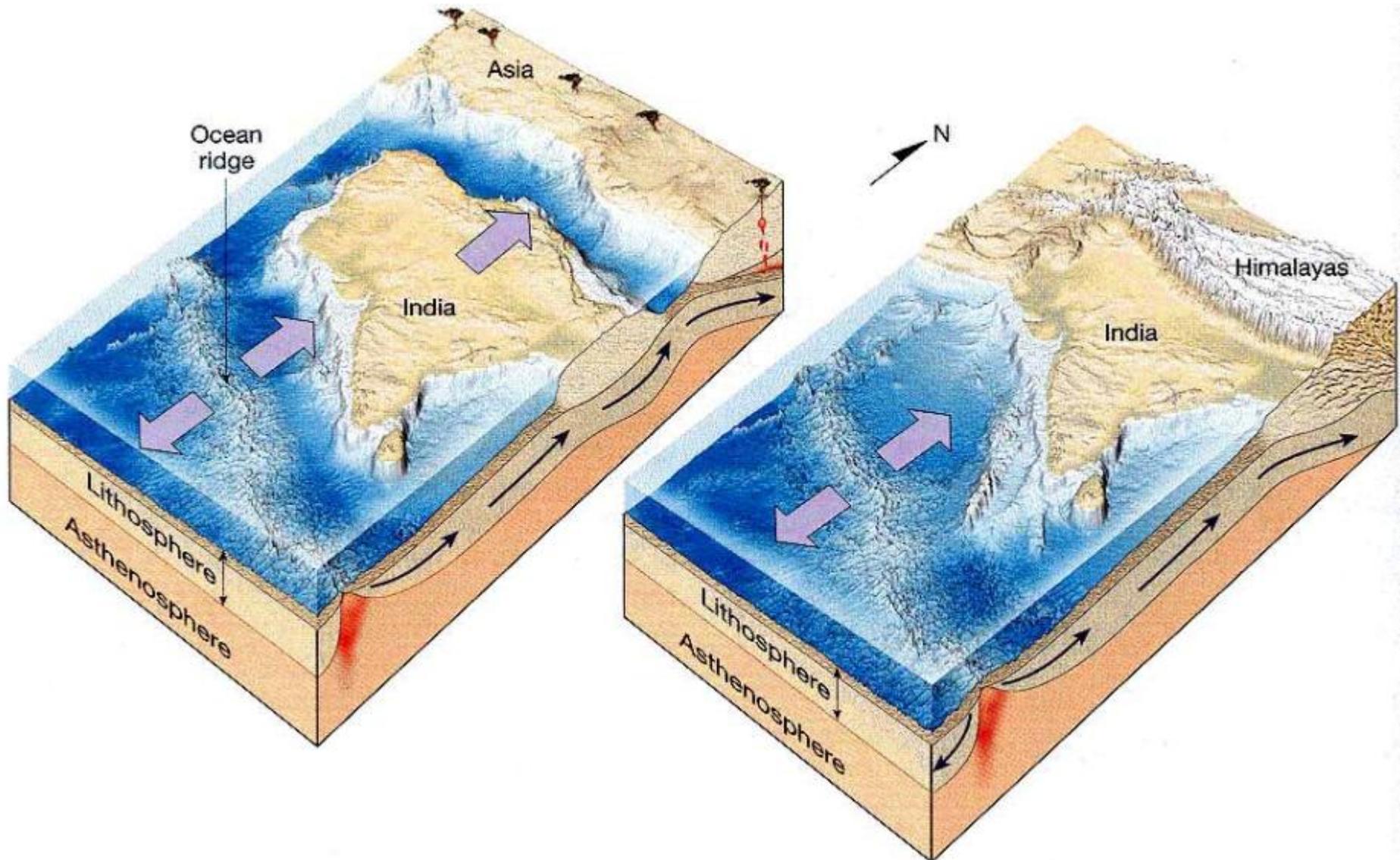
B. Crystallization of pluton

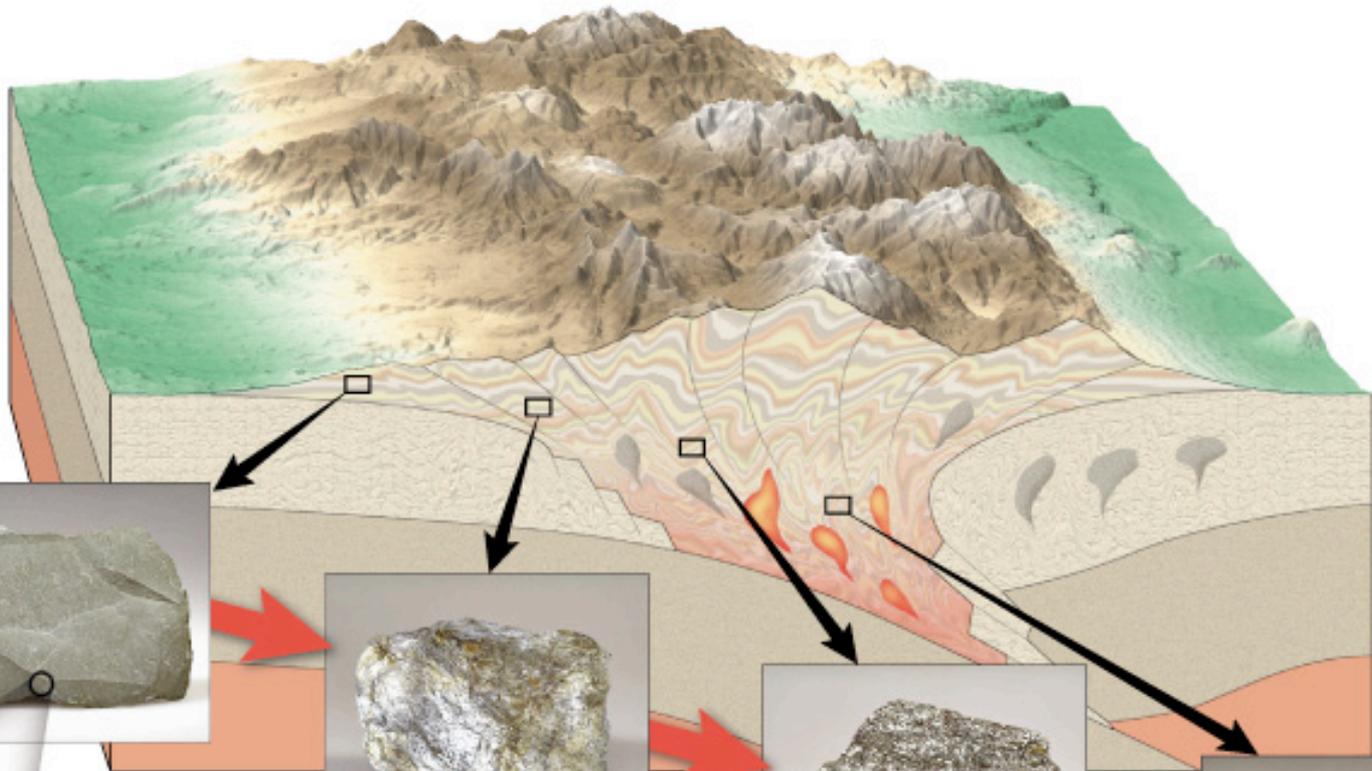
Metamorfismo Regional

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



Metamorfismo Regional





Ardósia



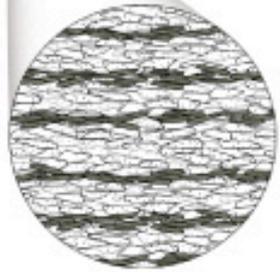
Filito



Xisto



Gnaiss



**Área
em que
Barrow
trabalhou**

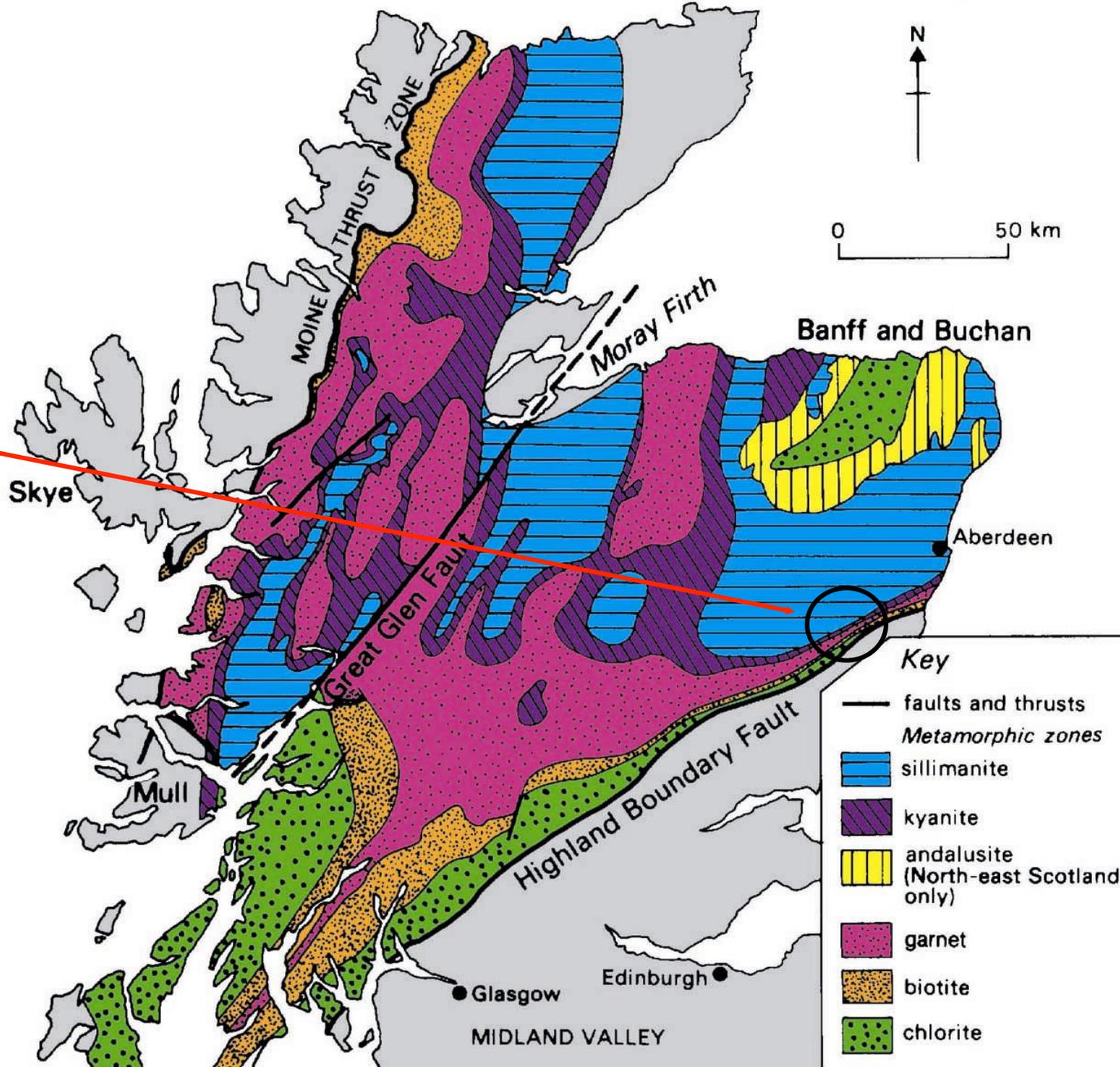
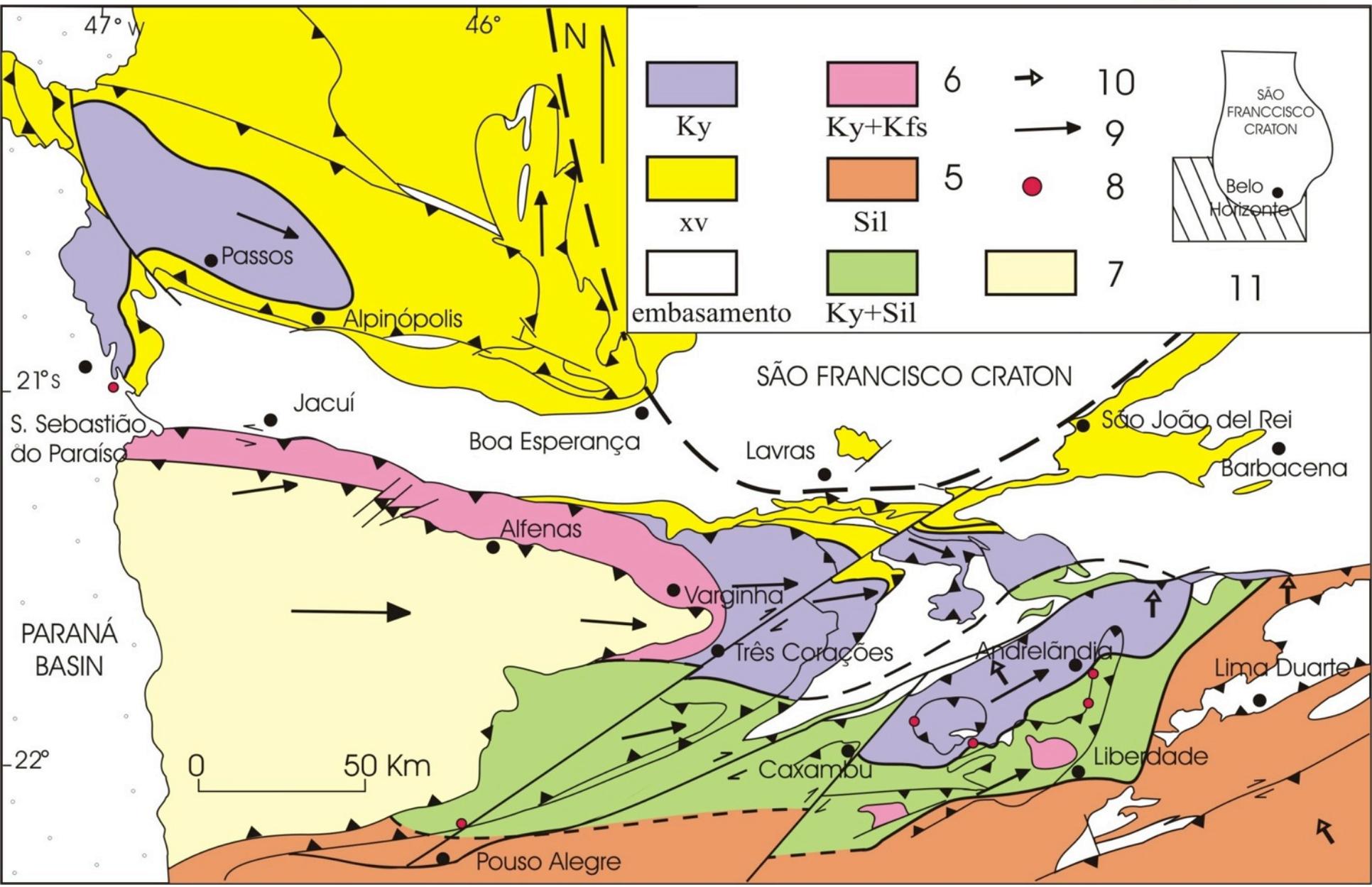
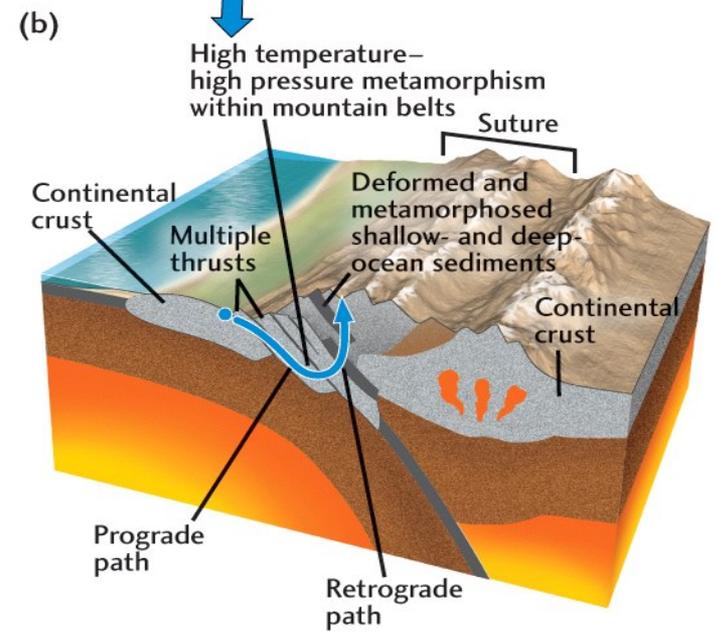
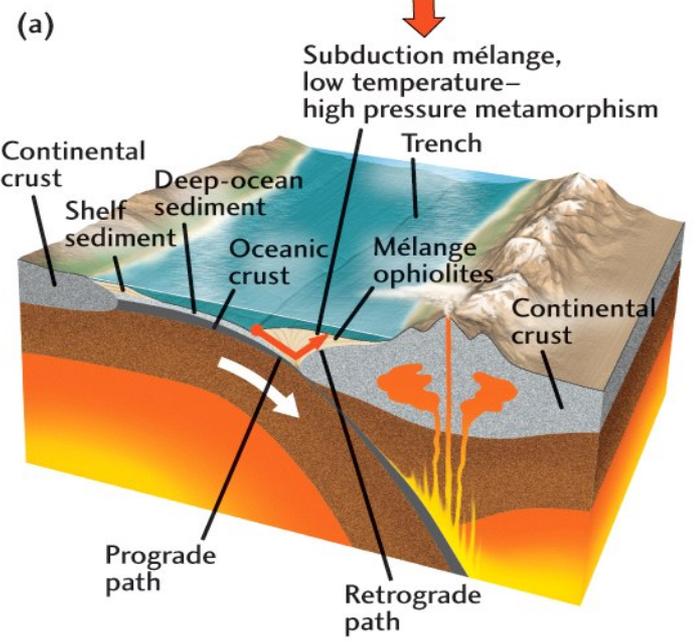
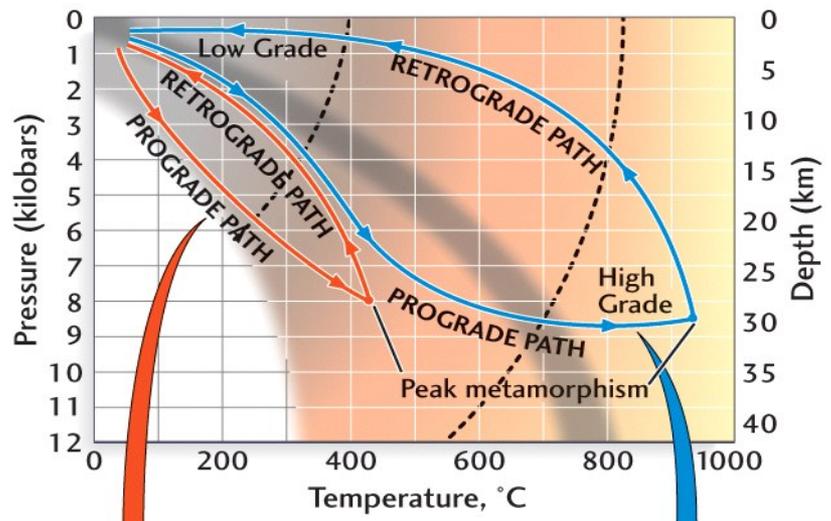
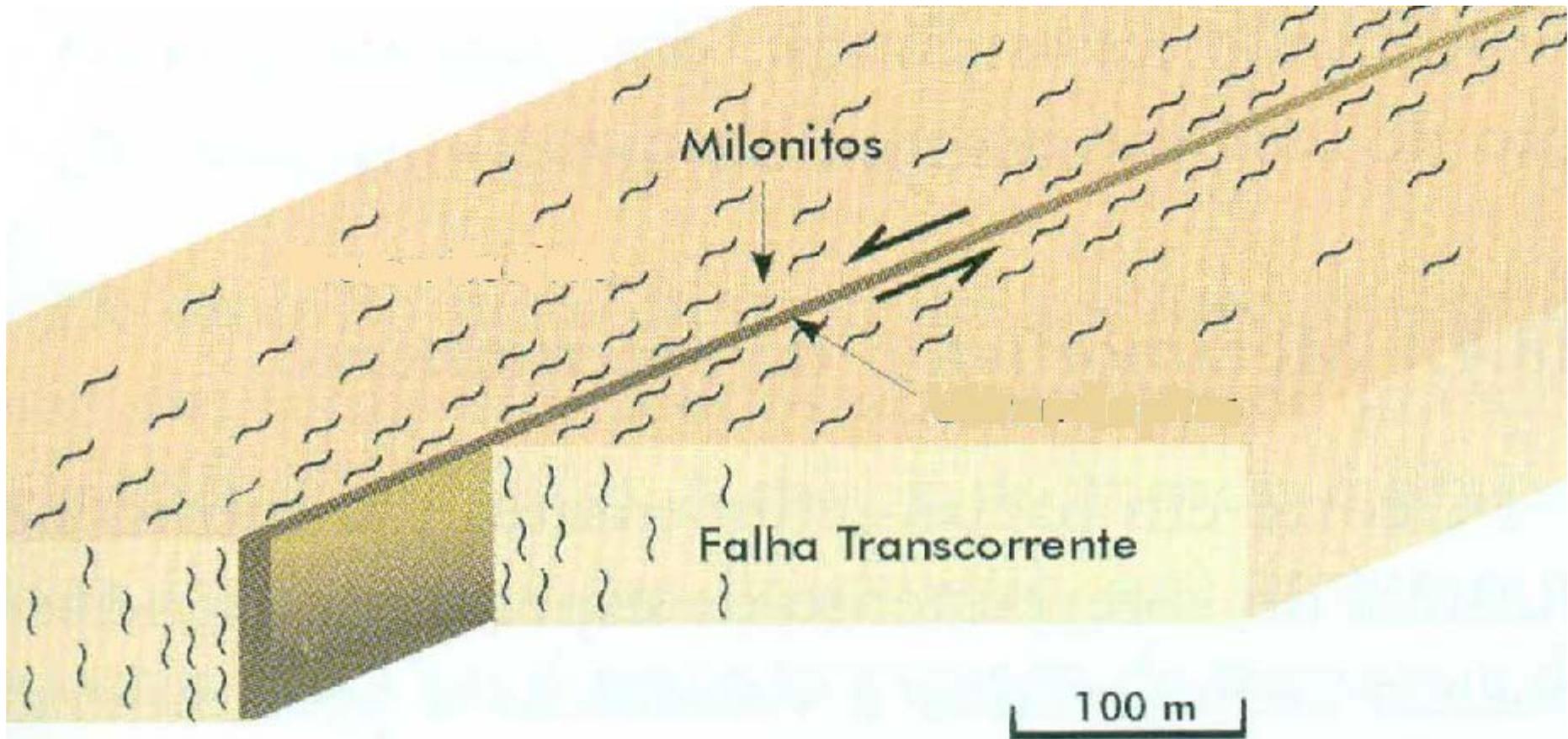


Figure 21.8. Regional metamorphic map of the Scottish Highlands, showing the zones of minerals that develop with increasing metamorphic grade. From Gillen (1982) *Metamorphic Geology. An Introduction to Tectonic and Metamorphic Processes*. George Allen & Unwin. London.



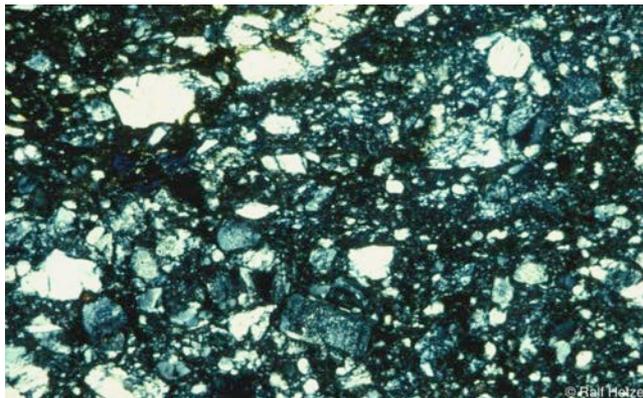
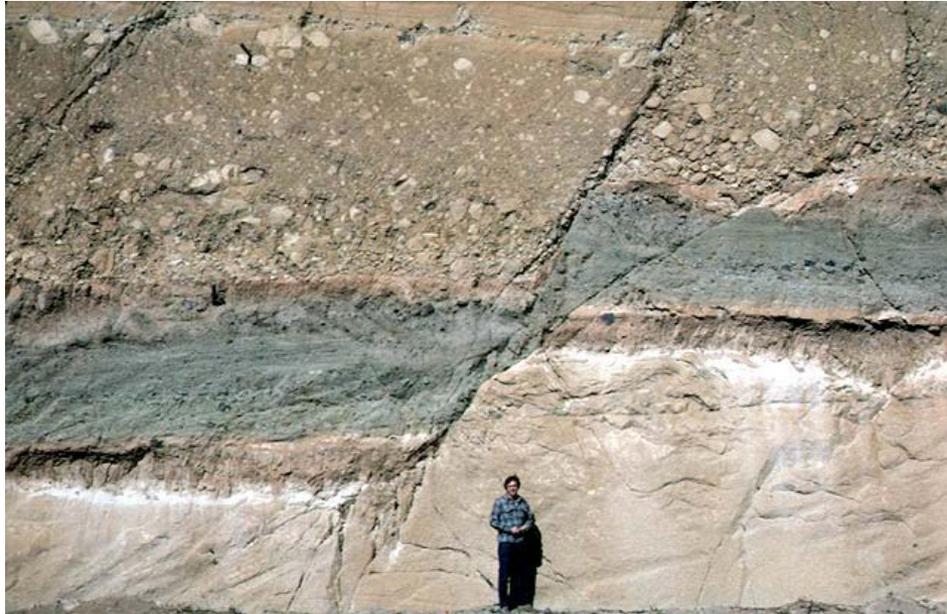


Metamorfismo Dinâmico ou Cataclástico



Metamorfismo dinâmico

- Ocorre em zonas de falha e de cisalhamento



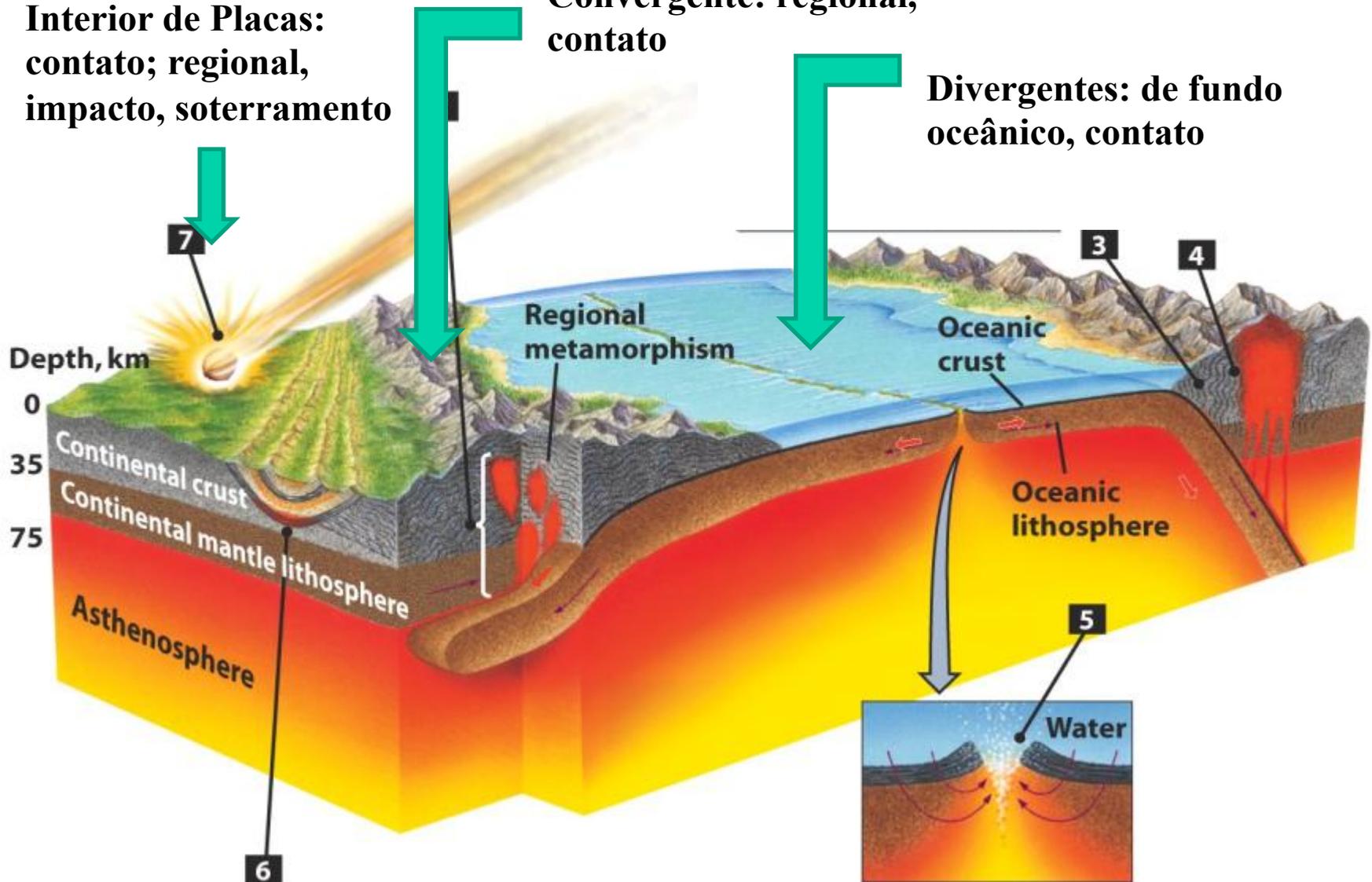
Outros tipos de metamorfismo

- 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

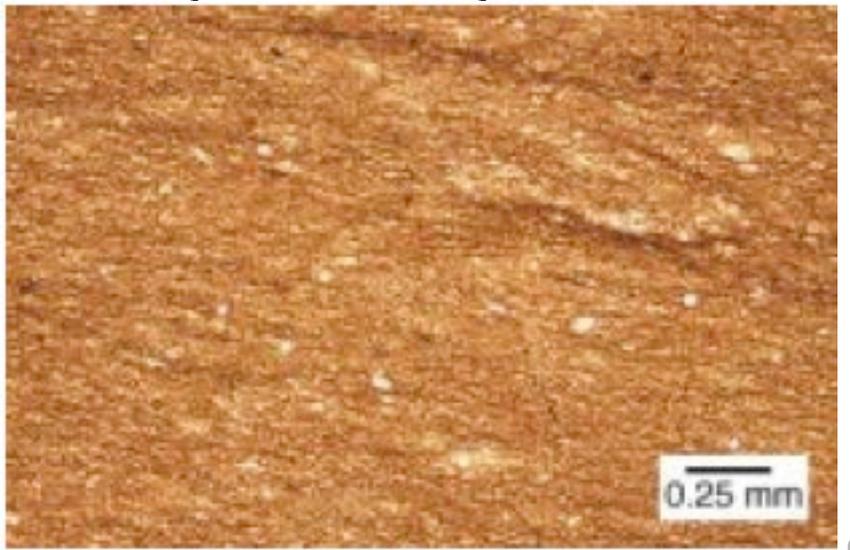
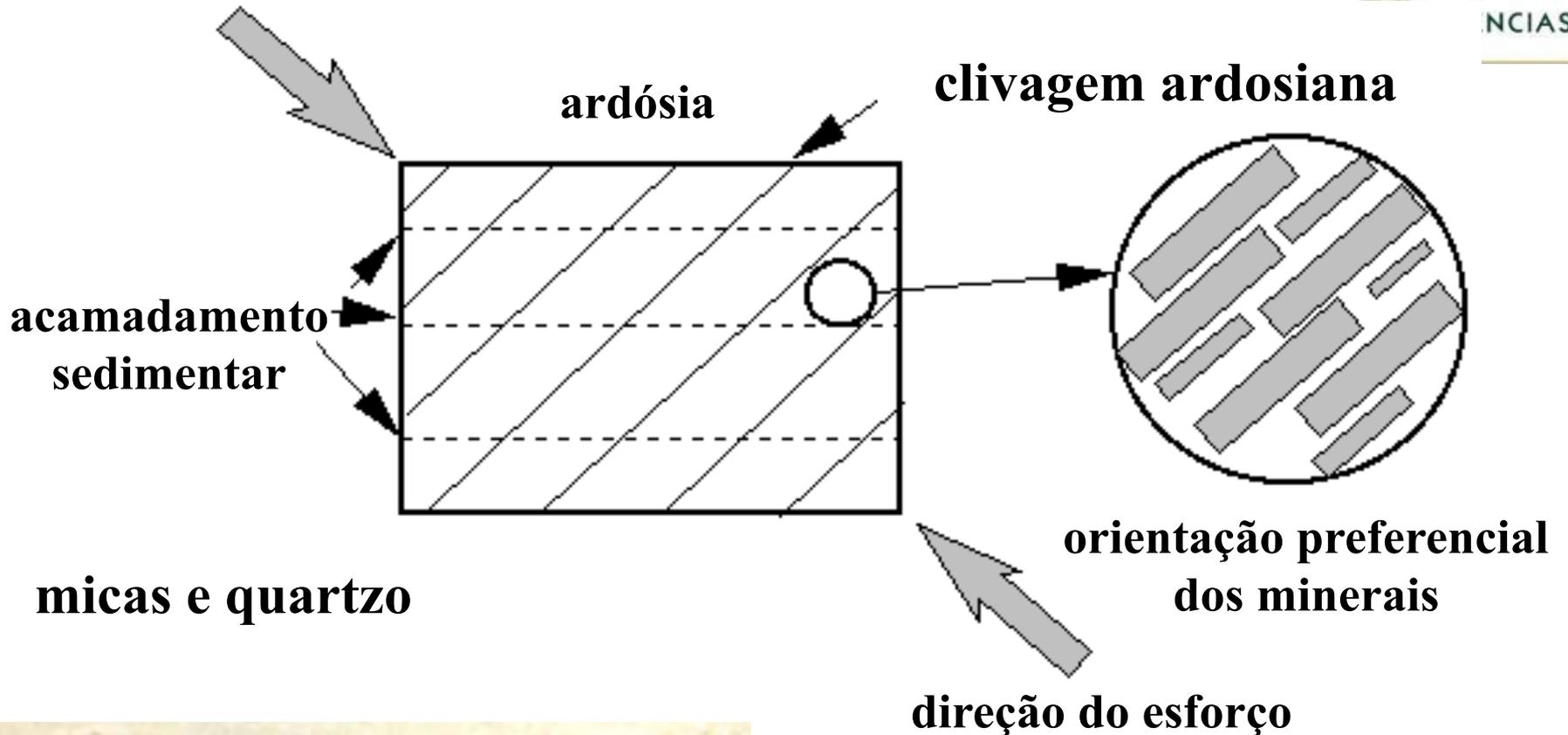
- **Protolito é a rocha original**, pré metamorfismo
 - protolitos comuns: argilito, arenito, granito, calcário, basalto
- um único protolito pode formar várias rochas diferentes quando as condições P-T (pressão e temperatura) do metamorfismo mudam

Metamorfismo progressivo de argilito

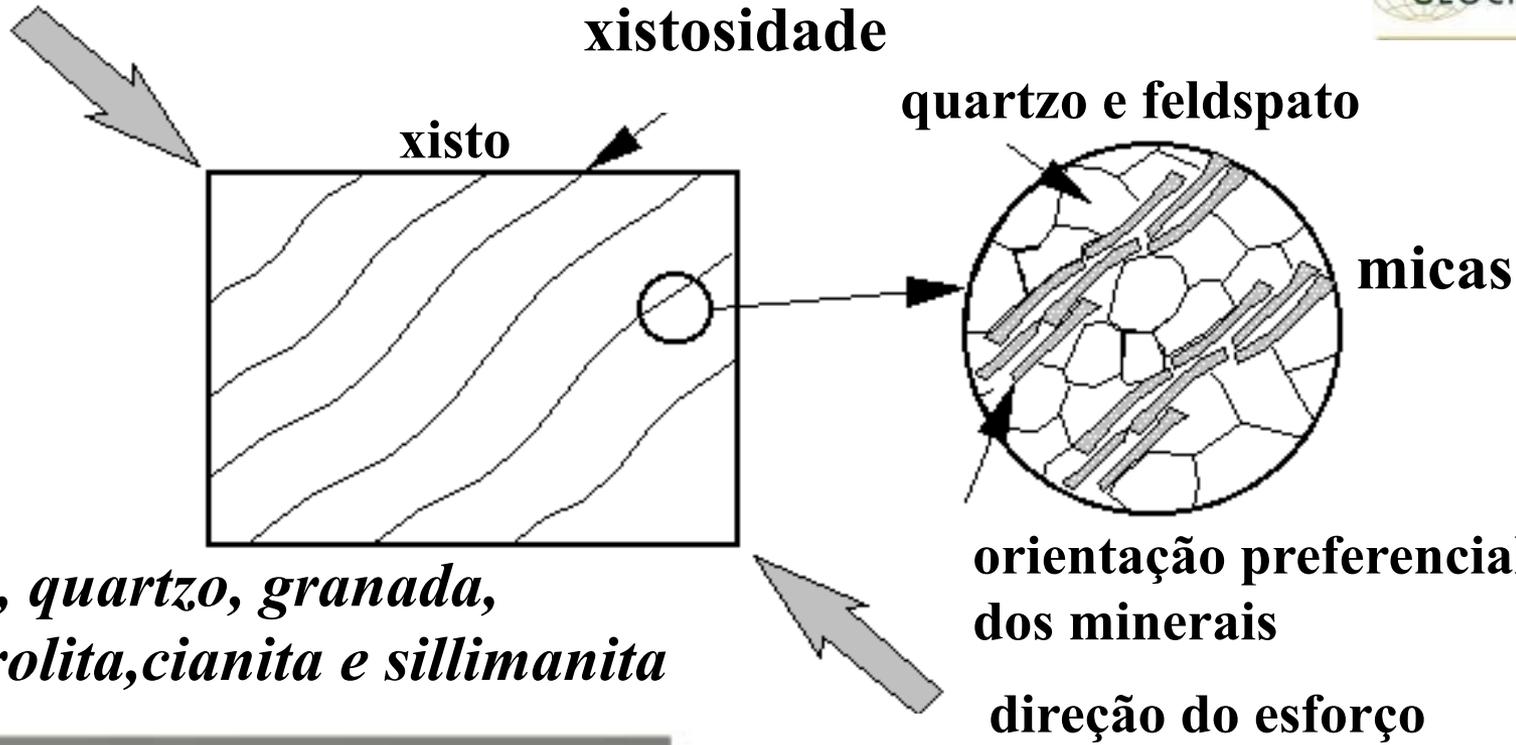
- **argilito** é formado por quartzo e argilas (minerais ricos em Al_2O_3), assim as rochas metamórficas resultantes têm: quartzo, micas (muscovita e biotita) e silicatos ricos em Al_2O_3 (clorita, granada, estaurolita, cianita, sillimanita)
- **ardósia**
 - minerais não são identificáveis a olho nu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

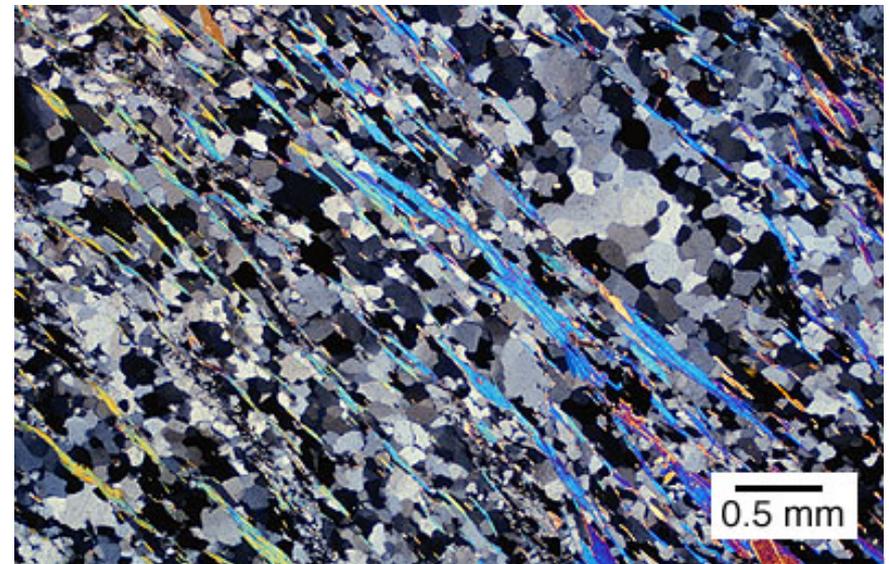
- **migmatito**
 - rocha mista com porção ígnea (camadas que fundiram) e metamórficas (camadas que resistiram a fusão)
- **granulito**
 - rocha formada pelo resíduo da fusão
 - dominada por minerais anidros: feldspatos, ortopiroxênio, granada

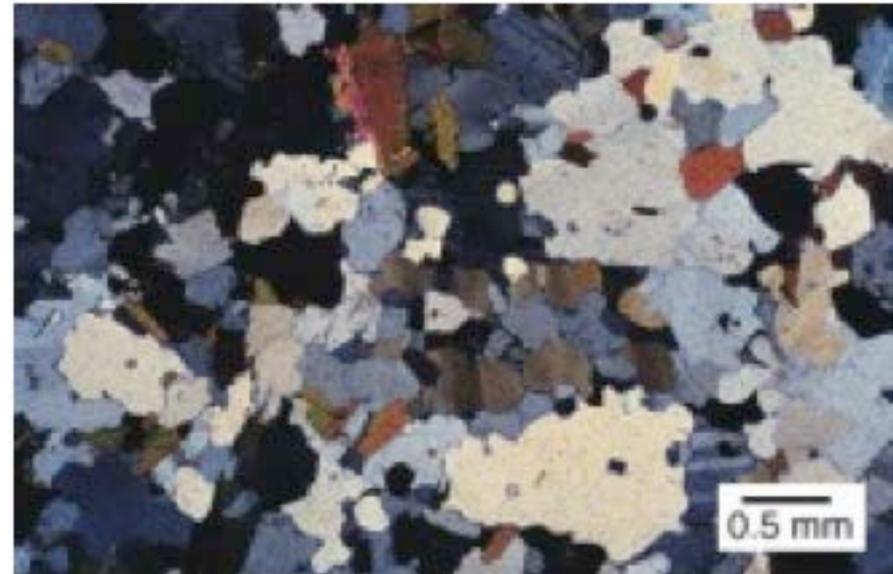
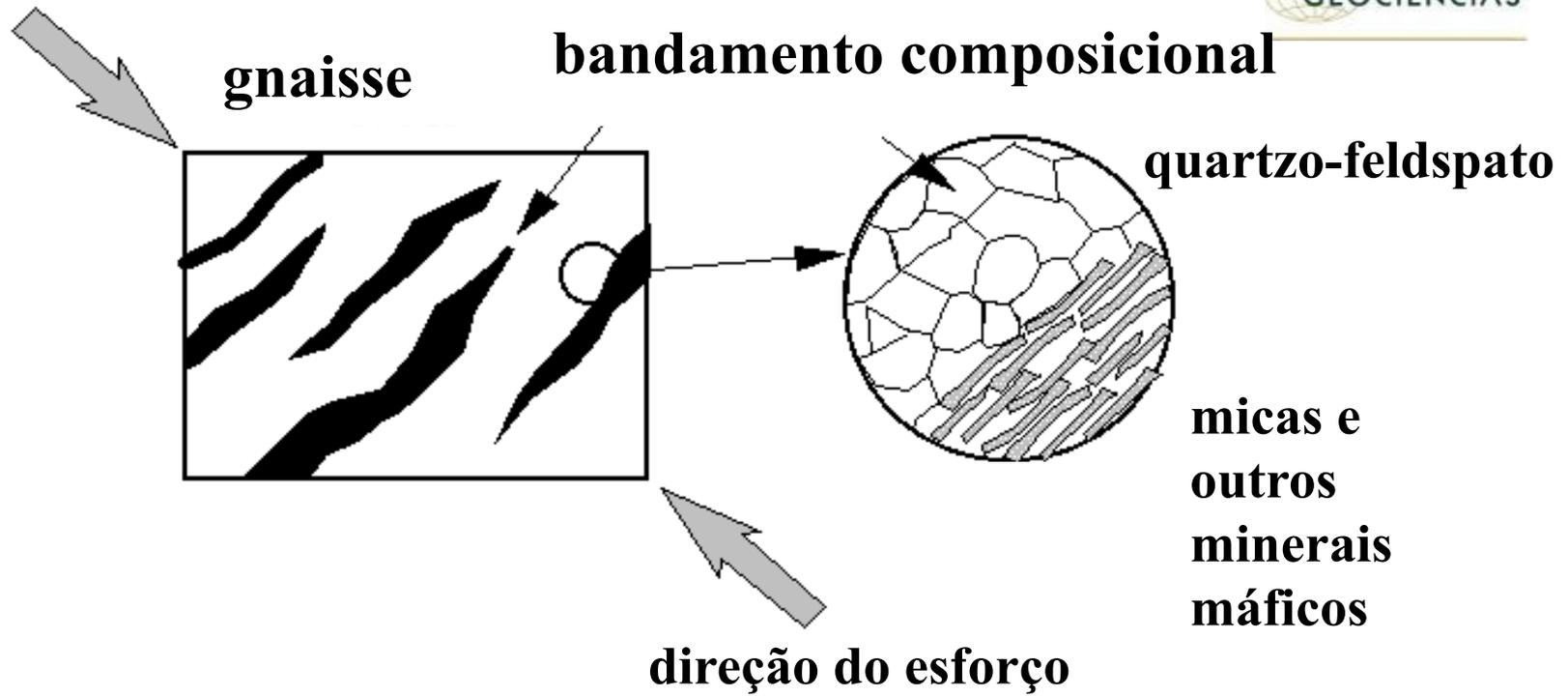


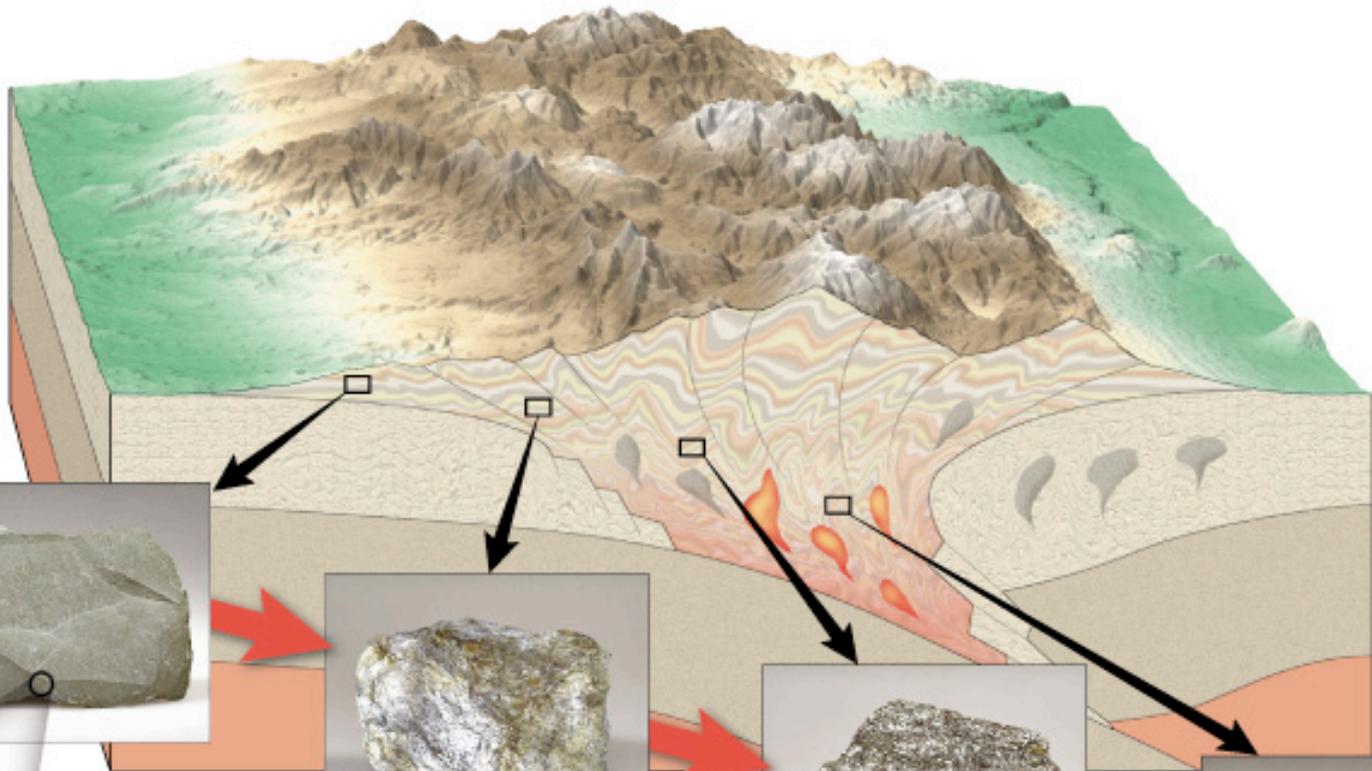
xistosidade



micas, quartzo, granada, estauroлита, cianita e sillimanita







Ardósia



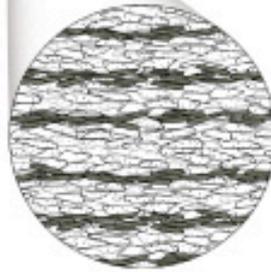
Filito



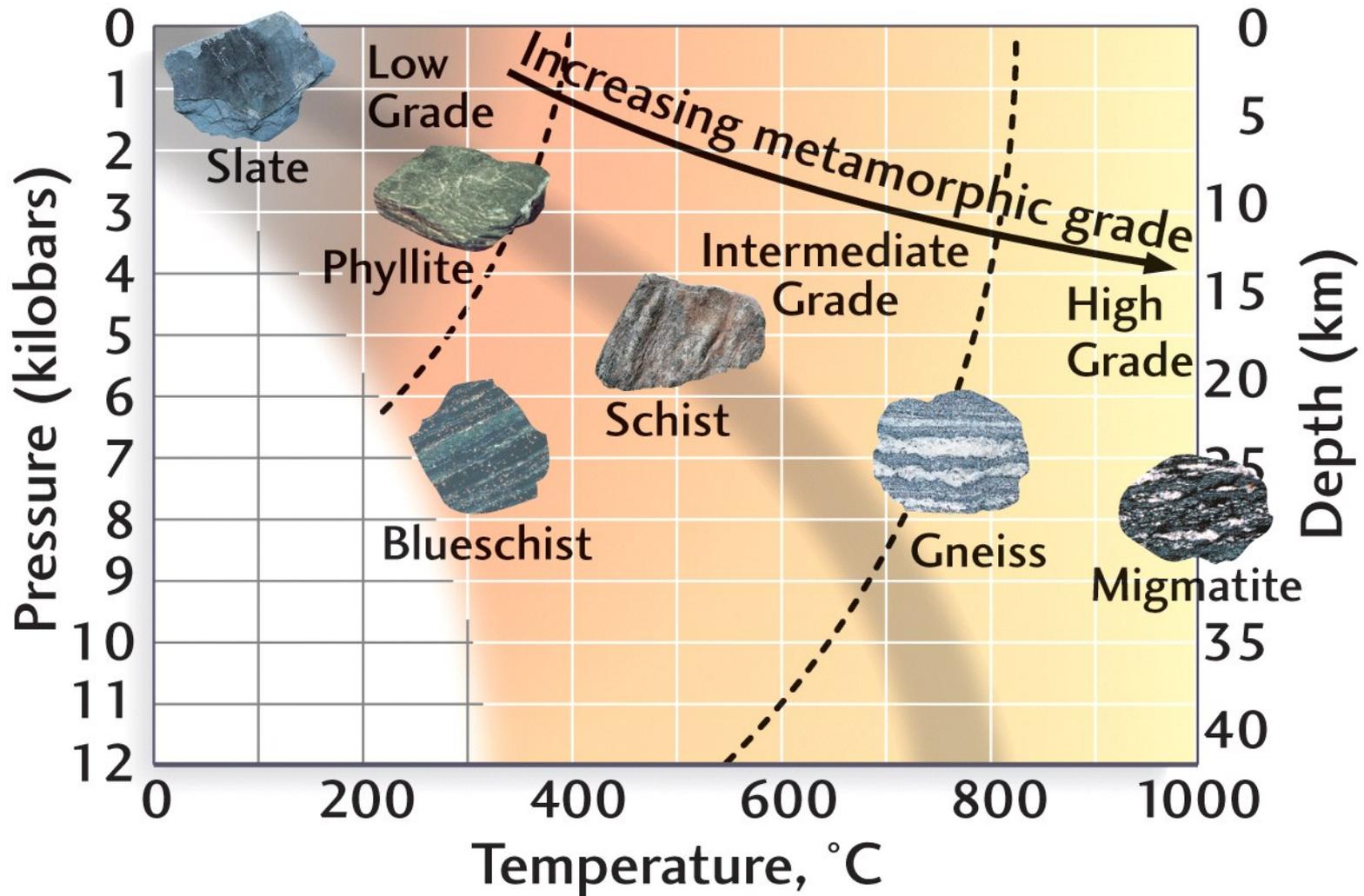
Xisto



Gnaiss



INDEX MINERALS, GRADE, AND FACIES DESCRIBE METAMORPHISM



Granito

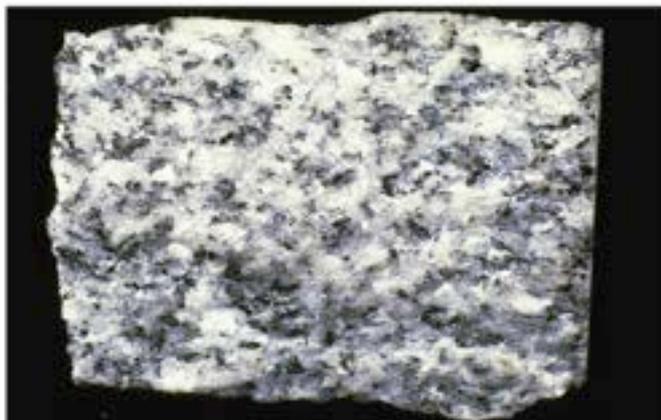
- Granito metamorfizado também é transformado em gnaiss



Before metamorphism



After metamorphism



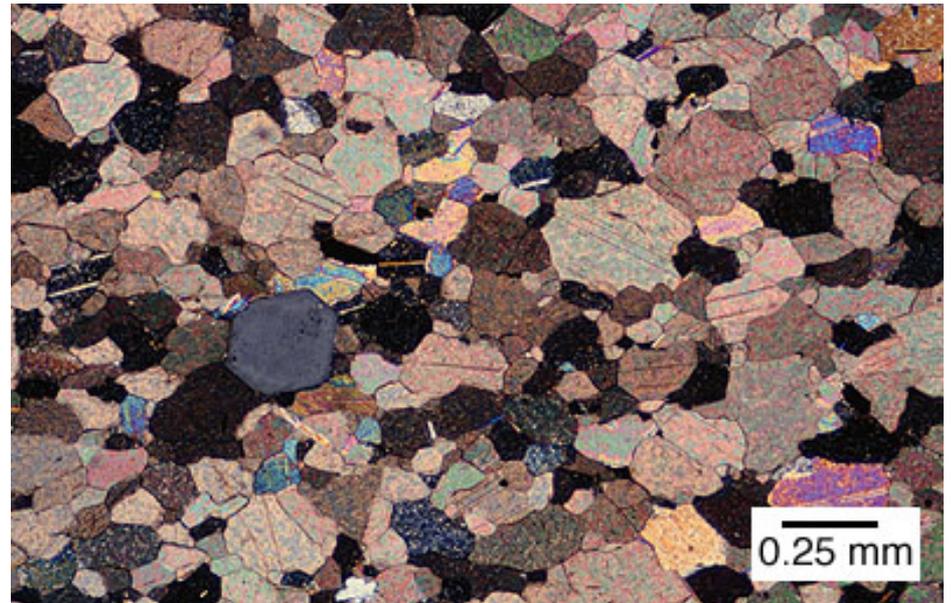
Metamorfismo de calcário

- 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

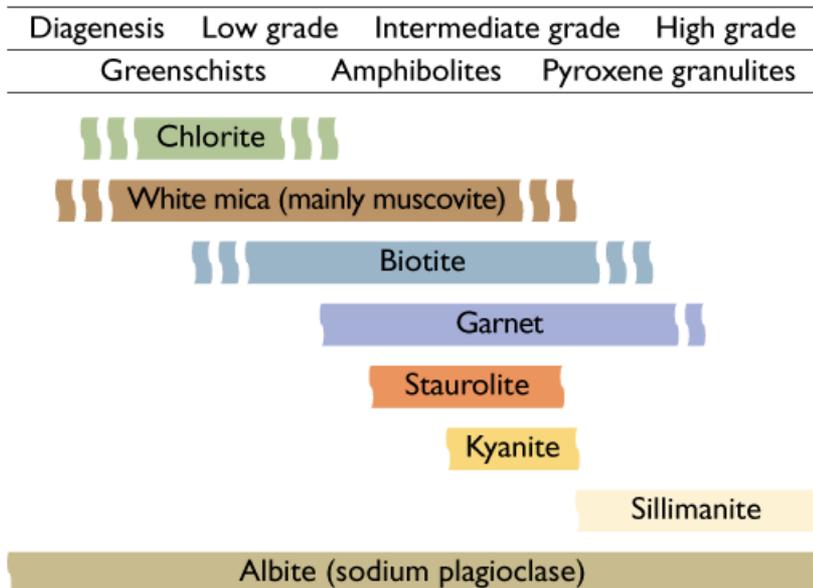
granulito

eclogito



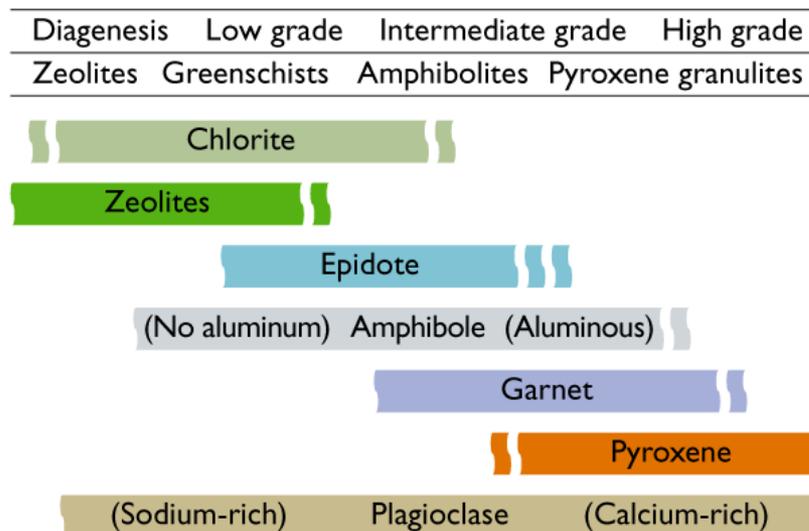
Metamorfismo de basalto

argilito



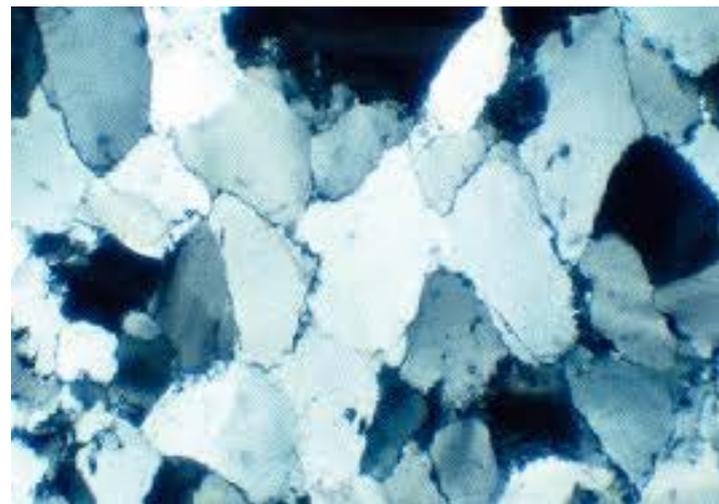
(a)

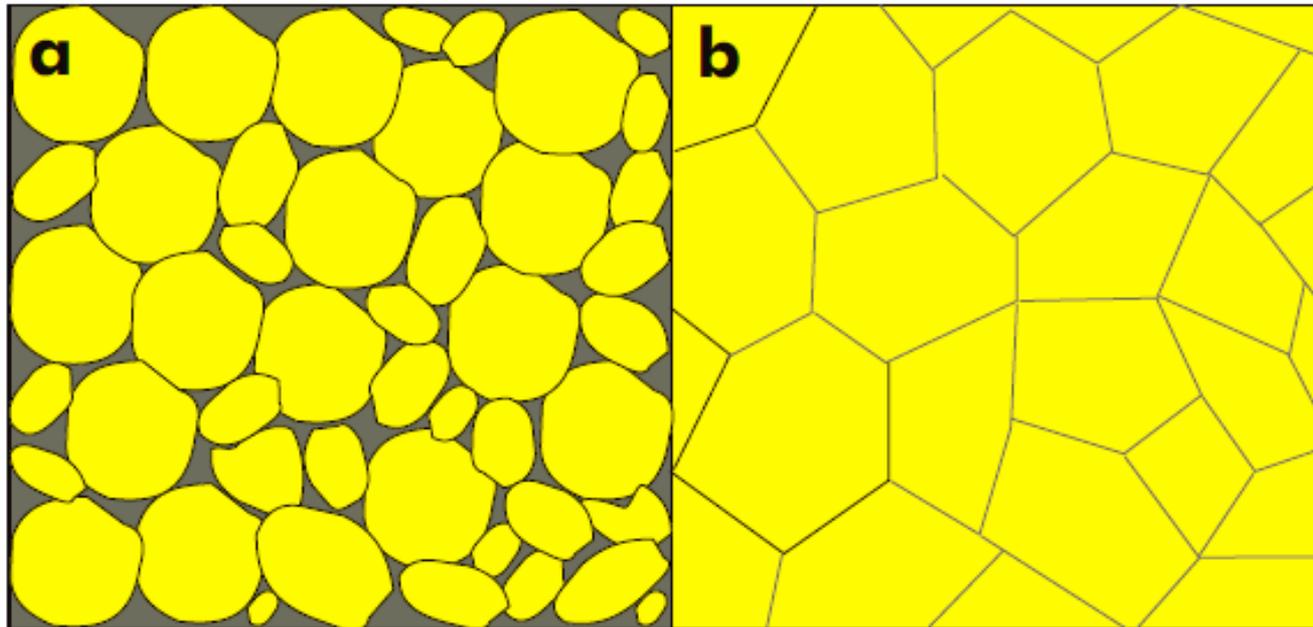
basalto



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.