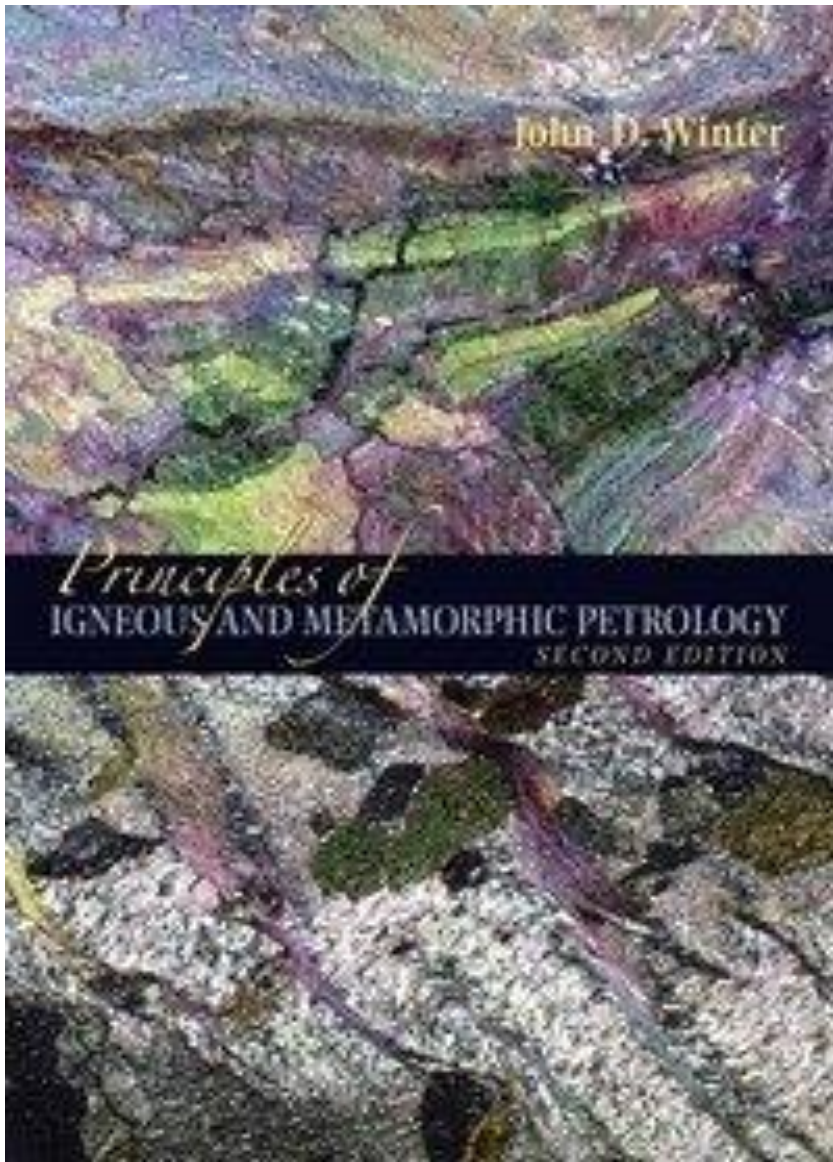


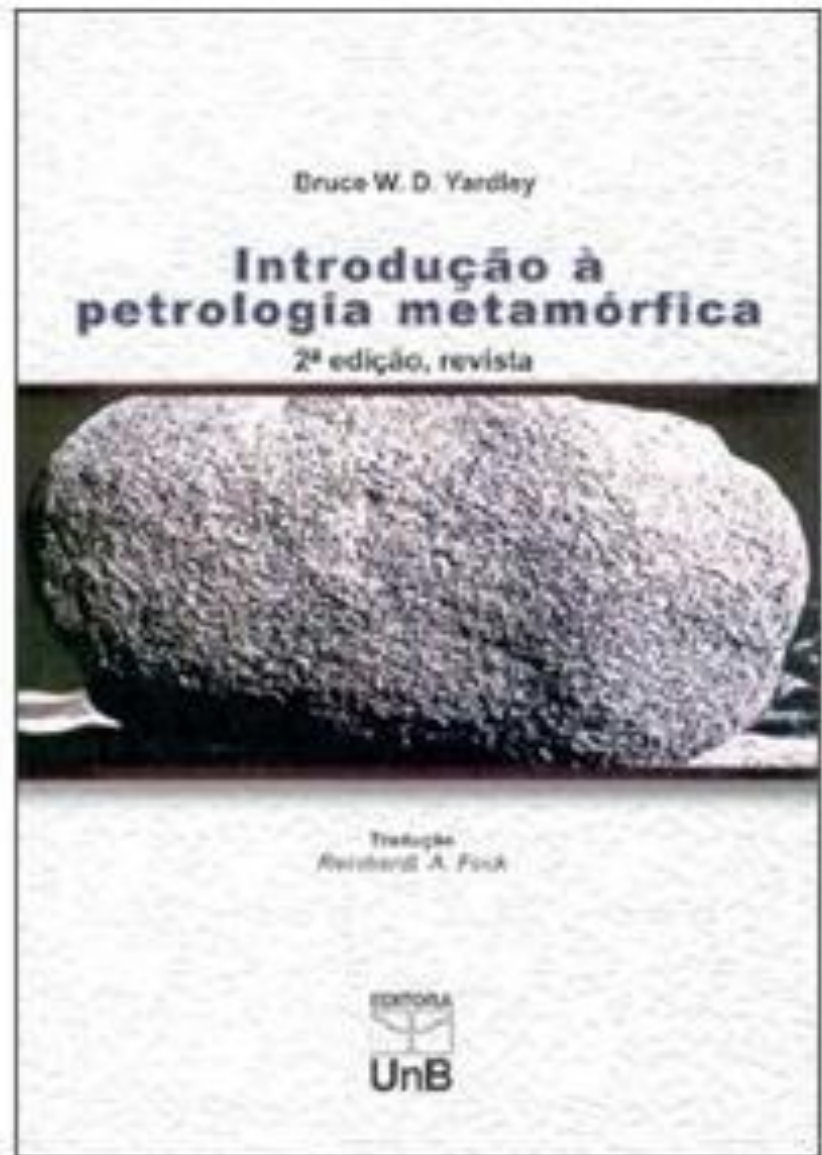
Metamorfismo

Definições, agentes físicos e tipos de metamorfismo

Petrologia Metamórfica
GMG332
Aula 1 - Introdução



Capítulo 21: *An introduction to metamorphism*
Páginas 446-469



Capítulo 1: *Conceito de metamorfismo*
Páginas 13-54

Para o que serve estudar o metamorfismo e as rochas metamórficas?

- **Formação das rochas metamórficas**
- Entender a formação e evolução das cadeias de montanhas
- Formação e evolução da crosta terrestre e do manto
 - crosta continental
 - crosta oceânica
- Depósitos minerais
 - Metálicos: Au, Zn, Cu
 - Não-metálicos: brita, cimento, pedra ornamental

Qual a porcentagem de rochas metamórficas na Terra?

- O metamorfismo afeta boa parte da crosta continental nas regiões tectonicamente ativas
 - 60% da crosta continental é formada por rochas metamórficas
- Parte da crosta oceânica pode sofrer alteração hidrotermal ou deformação e metamorfismo em zonas de falhas
- O manto da Terra sofre deformação e transformações no estado sólido, portanto é formado por rochas metamórficas

Pelito não metamorfizado
< 150°C

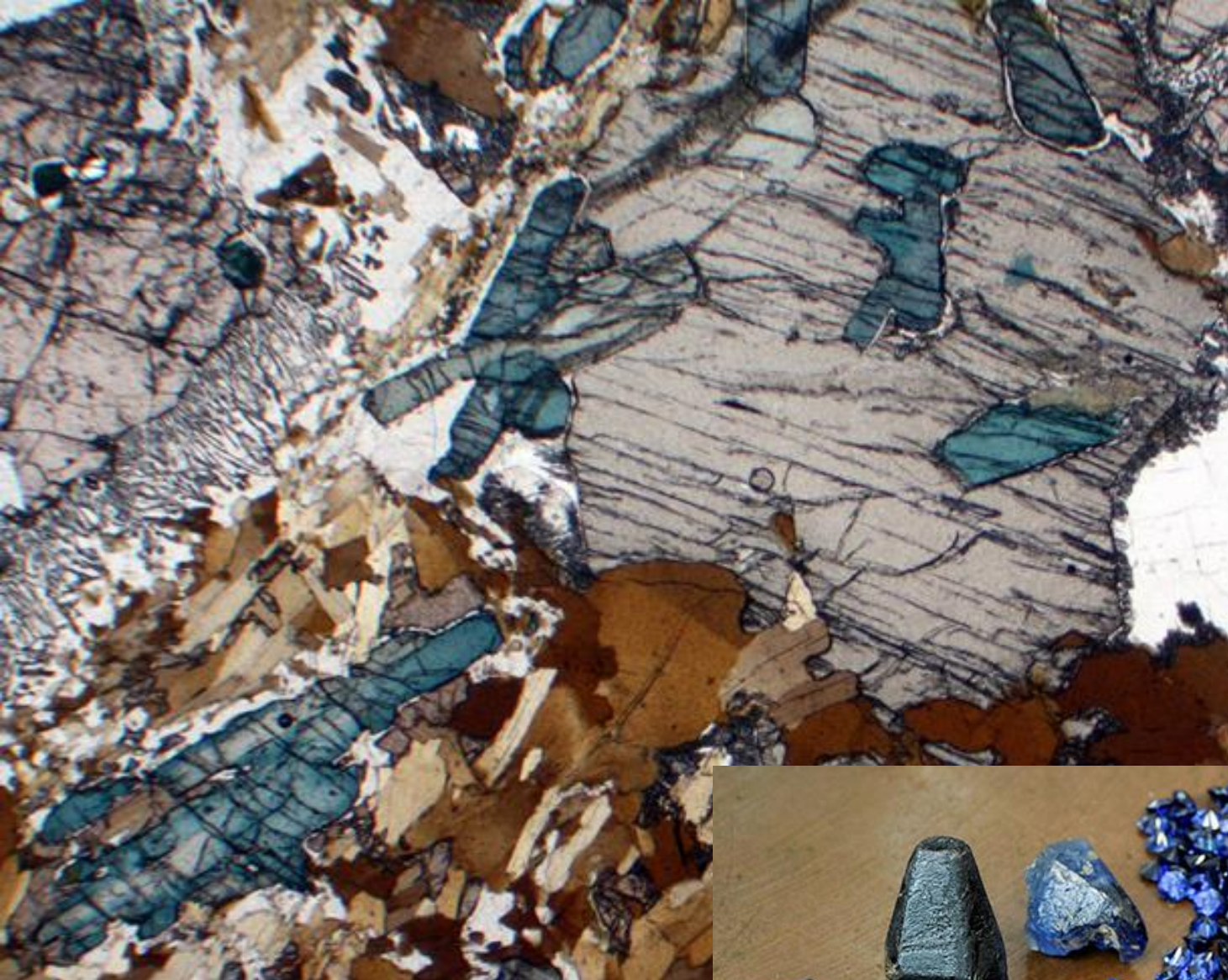


Metapelito em 500-550°C





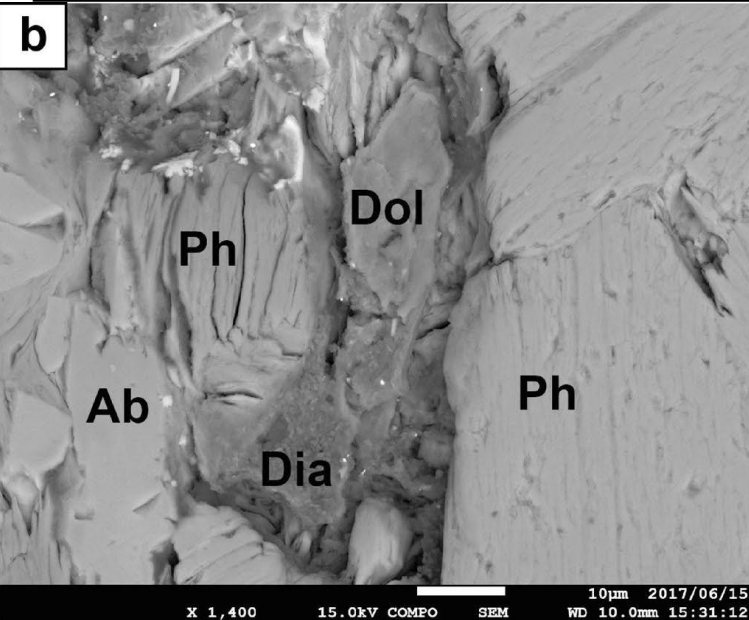
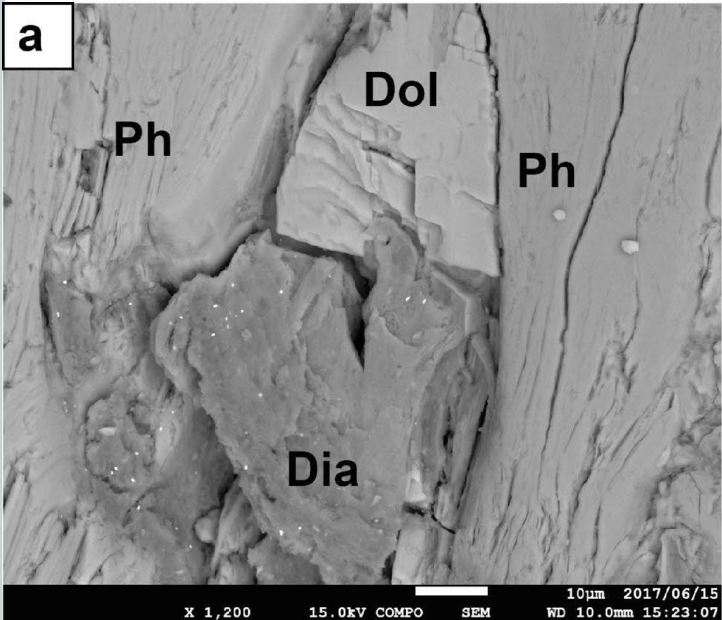
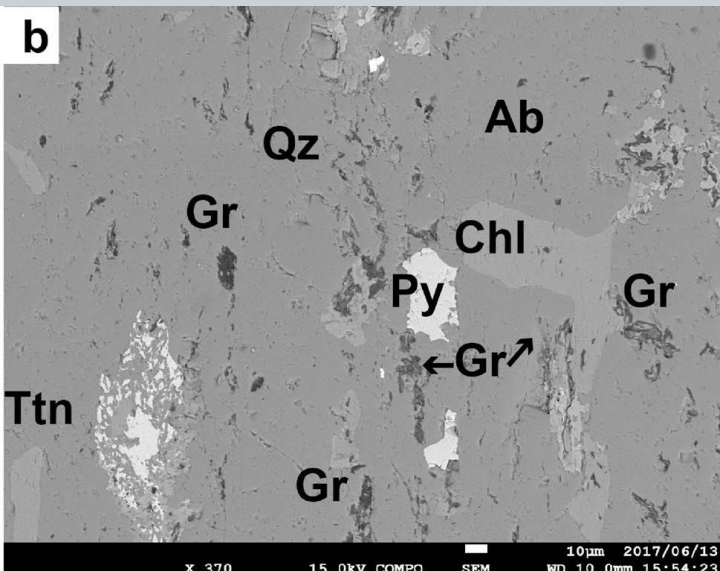
Metapelito acima de 700-750°C - fusão parcial



Metapelito acima de 1050°C
safirina + quartzo



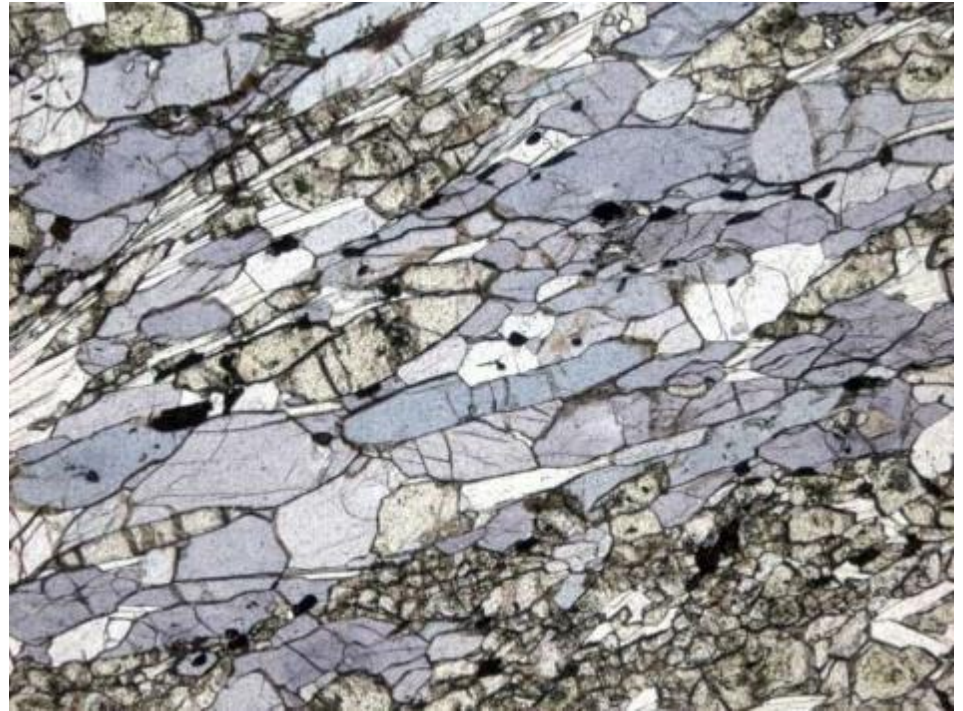
Metapelito em 450°C e 28 kbar (subducção abaixo de 120 km de profundidade)



Microdiamond in a low-grade metapelite from a Cretaceous subduction complex, western Kyushu, Japan
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-68599-7>

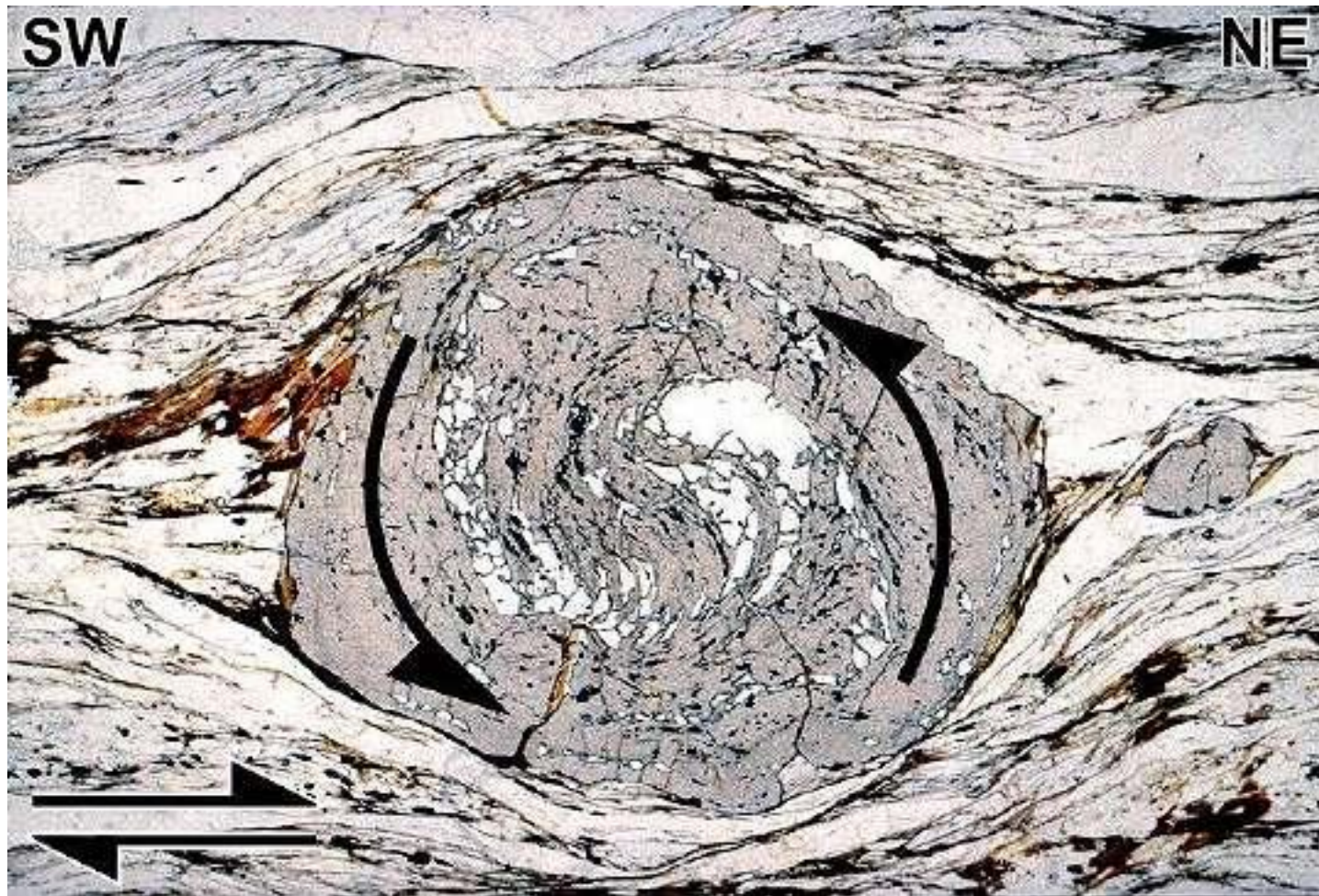


Rochas metamórficas podem ajudar a solucionar questões fundamentais sobre a evolução da Terra.



Xisto azul (subducção)

Relação direta com a Geologia Estrutural



O que é metamorfismo?

- **Metamorfismo** é o processo pelo qual a mineralogia, textura e estrutura das rochas são modificadas nas profundezas da Terra, em resposta às mudanças de **temperatura** (T) e **pressão** (P) a que são submetidas após sua formação.
- Outros fatores que podem influenciar o metamorfismo são: pressão ou composição dos **fluidos** e **tensão deviatória** (σ).
- As transformações do metamorfismo ocorrem no **estado sólido**, sem que haja fusão (completa) ou desagregação do **protolito**.

Protolito

- Qualquer rocha pode sofrer metamorfismo e **protolito** é o nome dado à rocha original.
- O **protolito** pode ser rocha ígnea, sedimentar ou mesmo metamórfica.
 - ígnea – rocha máfica (basalto), rocha ultramáfica, rocha félsica (granítica).
 - sedimentar – pelitos, calcários, psamitos.
- Cada conjunto de rochas pode ser representado por **sistema químico** simplificado ou complexo (completo).
- A **composição da rocha** é quem define os minerais que vão ou não surgir durante o metamorfismo.

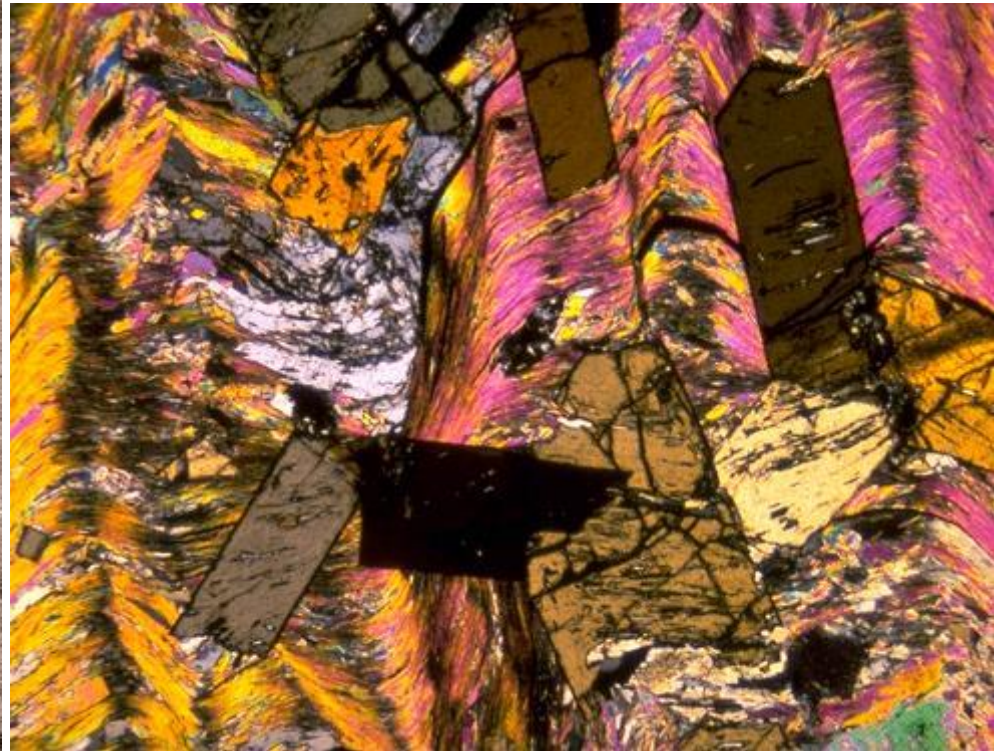
Tipos de mudança

- As transformações que ocorrem no metamorfismo são:
 - **de fase** (mineralógicas).
 - **estruturais** (textura (ou microestrutura), e estrutura).
 - **composicionais** (**des**-hidratação, **des**-carbonatação ou hidrotermalismo).

Mudança mineralógica



Protolito: Pelito

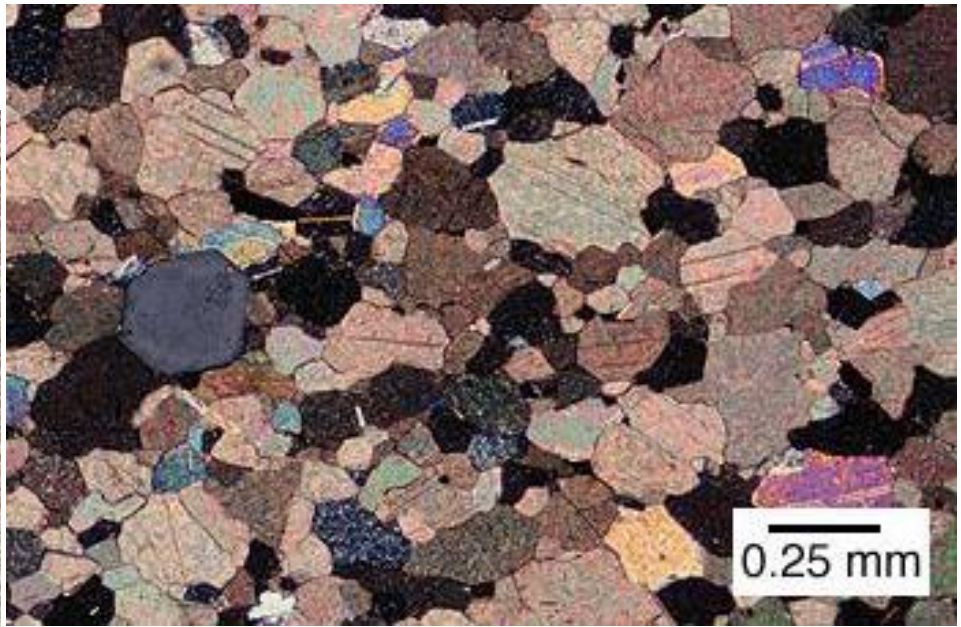


*Rocha metamórfica:
staurolita-biotita-muscovita xisto*

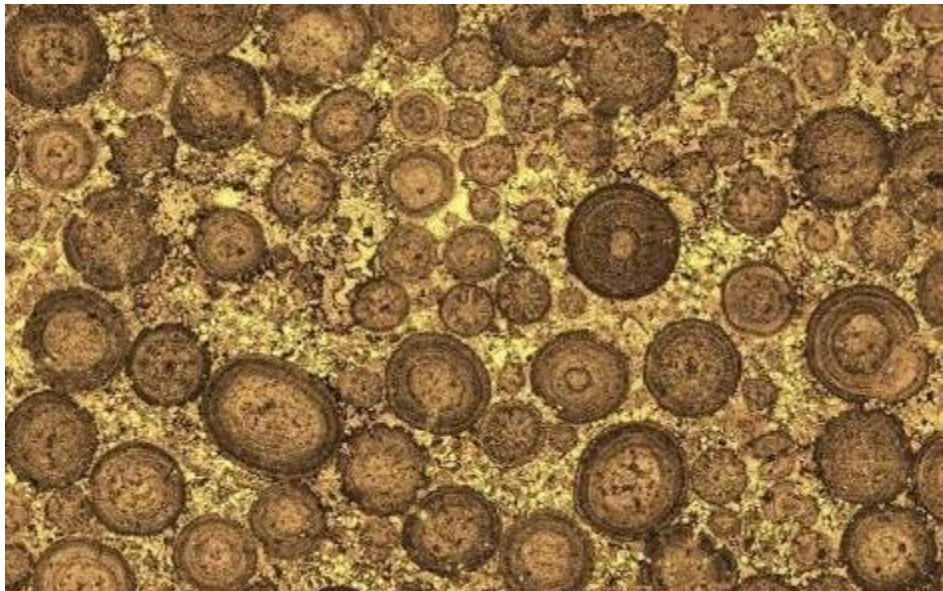
Mudança na textura



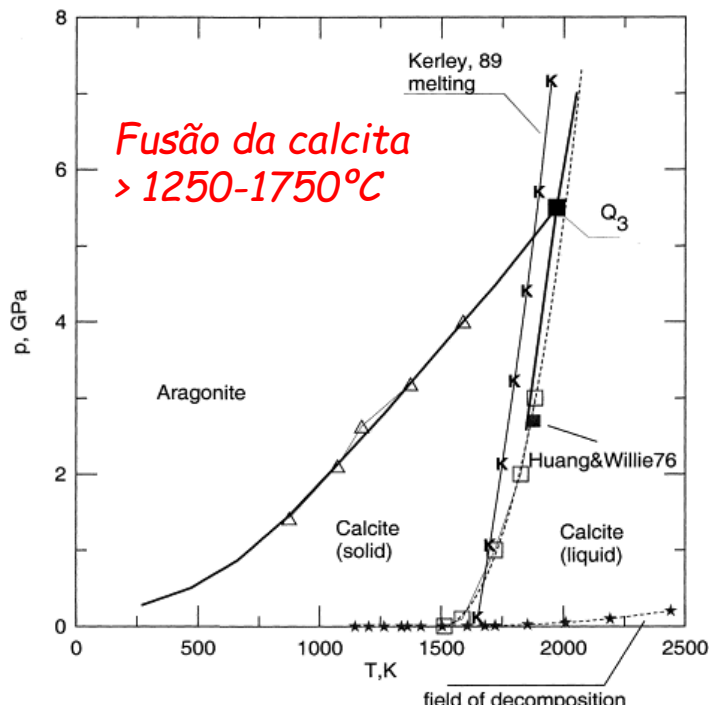
Protolito: calcário maciço



Rocha metamórfica: mármore



Protolito: calcário oolítico



Hidrotermalismo

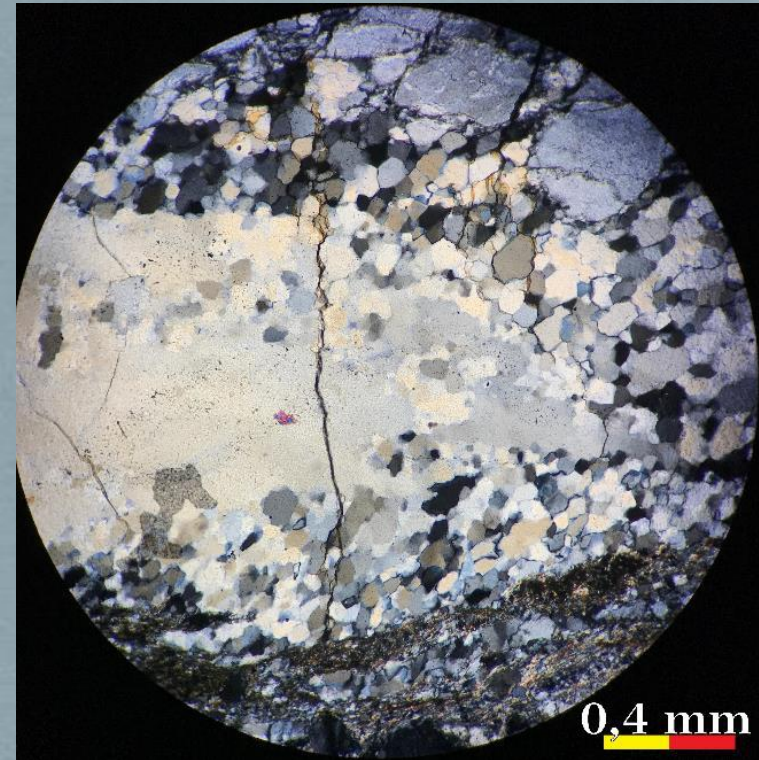


Recristalização

- Apesar de ocorrerem minerais neo-formados no metamorfismo, diz-se que a rocha sofreu recristalização. Recristalização pode ser dividida em dois tipos:
 - **recristalização dinâmica** – quando nenhum mineral novo é formado, o mineral que já estava na rocha tem a forma e/ou granulação modificada.
 - **cristalização no estado sólido** – quando a rocha cruza uma reação metamórfica e os minerais presentes reagem para produzir associação mineral mais estável (com novos cristais) nas novas condições *P-T*

Recristalização

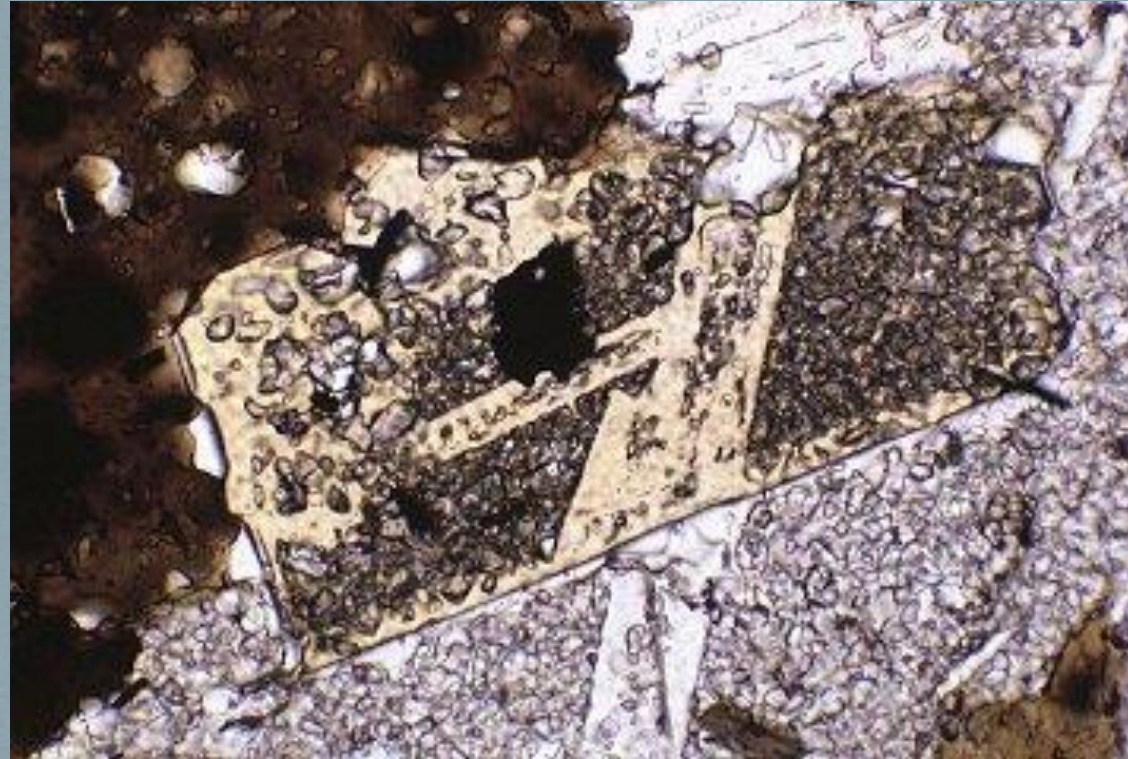
Recristalização dinâmica



Formação de novos grãos com a mesma composição do mineral que está sendo consumido

quartzo grosso → quartzo fino

Cristalização em estado sólido



Formação de uma nova associação mineral pelo consumo de uma associação preexistente em uma reação metamórfica.

granada + clorita → estauroлита + biotita

O que significa transformações no estado sólido?

- **A rocha não funde completamente, nem sofre desagregação!** As transformações ocorrem no **estado sólido** via reações metamórficas
- **Difusão** – movimento de átomos individuais através de grupo de átomos. Os átomos movem-se através dos defeitos na estrutura cristalina dos minerais.

Como as transformações ocorrem no estado sólido é possível que características da rocha original sejam preservadas (textura e estrutura ígnea ou sedimentar)



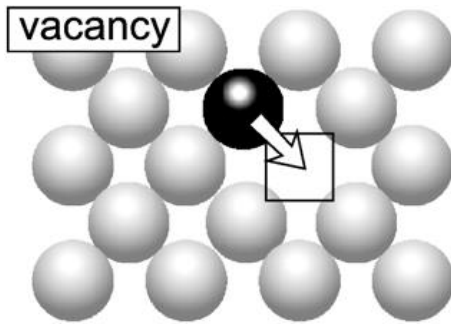
Acamamento sedimentar preservado em metapelito



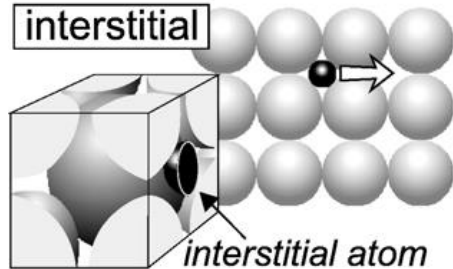
Lavas almofadas preservadas em metabasalto

Difusão

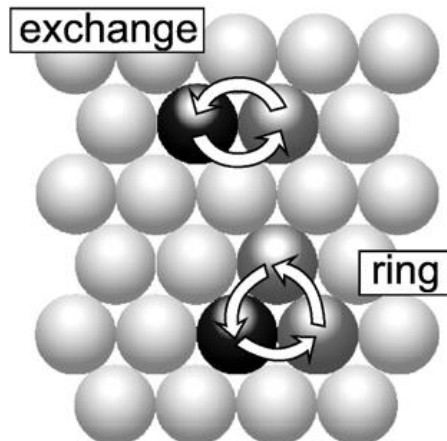
- O termo **difusão** se refere à transferência de átomos ou moléculas dissolvidos em uma fase. Em minerais a transferência ocorre através do seu retículo cristalino.
- A ideia essencial é que um átomo constituinte pode sair da sua posição fixa (sítio cristalográfico) e ser realocado em outra posição, outro sítio cristalográfico.



a difusão pode ocorrer com átomos “caminhando” através das vacâncias dos cristais

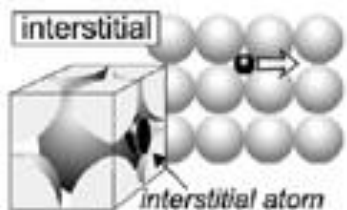
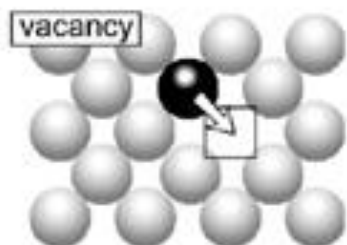


a difusão pode ocorrer com átomos “caminhando” através dos interstícios entre os átomos de um cristal

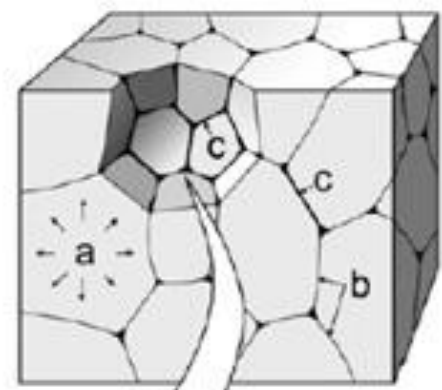


a difusão pode ocorrer pela troca entre dois ou mais átomos de um cristal

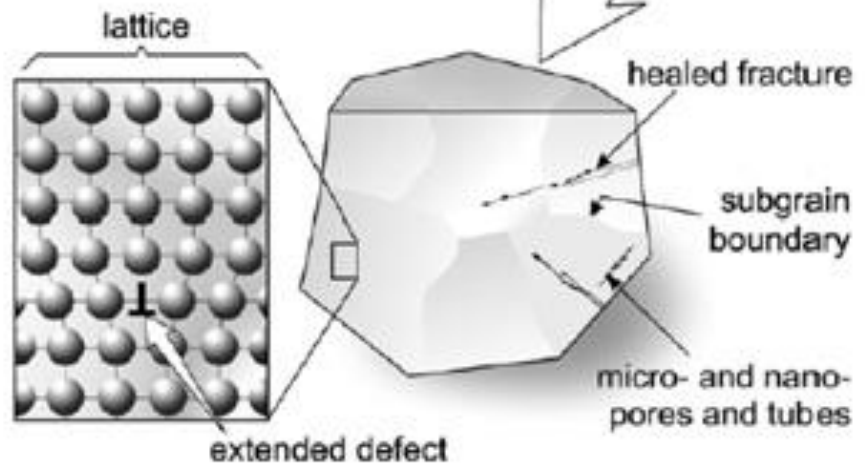
Bulk-Rock Diffusion Pathways



- a. intragrain
 - b. grain boundary
 - c. grain-edge fluid
- $b + c = \text{ITM}$



Intragrain Pathways



Difusão

- A difusão contribui com o transporte e troca de átomos em escala nanométrica a quilométrica
- A escala em que a difusão ocorre limita, para o metamorfismo, a taxa em que uma associação mineral é substituída por uma nova ou quanto uma fase muda de composição

Efeitos de T , P , X_f e t

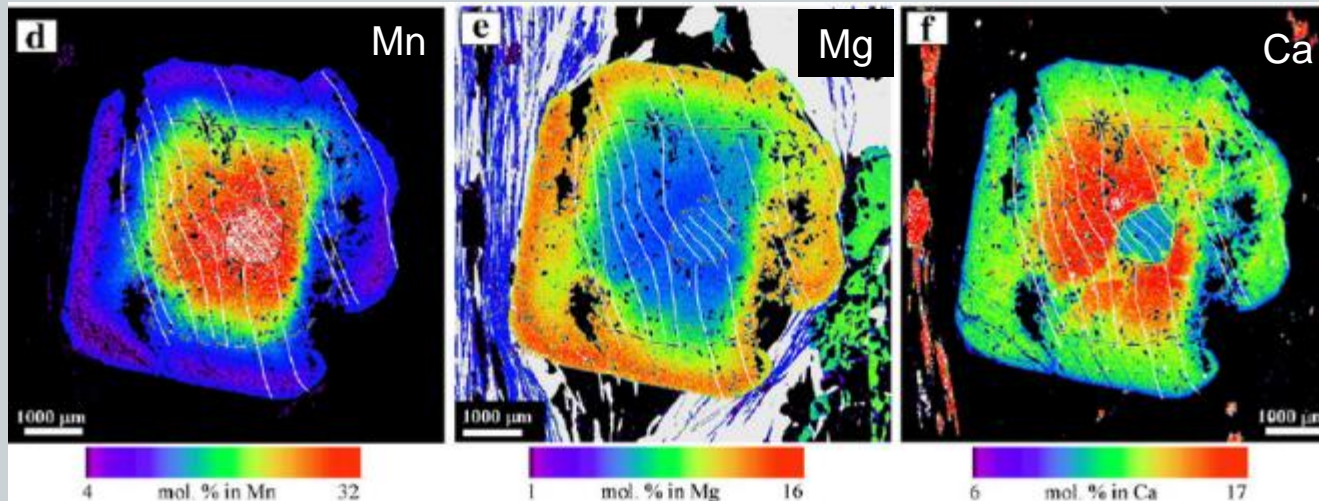
- Difusão é um fenômeno que depende da **temperatura**, pois com o aumento da energia cinética, proporcional ao aumento de temperatura, implica em maior mobilidade dos átomos.

O que a difusão controla no metamorfismo?

- A difusão controla:
 - reações metamórficas
 - composição química dos minerais
 - texturas das rochas metamórficas

- Quanto maior o tempo em que os minerais são submetidos a altas temperaturas maior a difusão e homogeneidade química
- A participação de fluidos ou fundido silicático ajuda na difusão

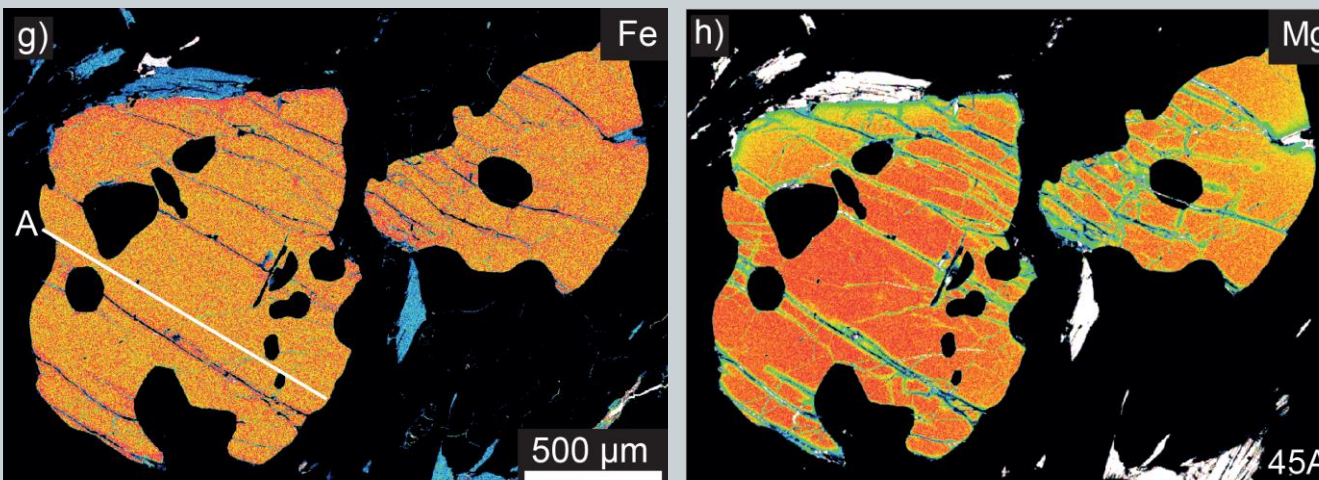
Mapas composicionais em granada metamórfica de metapelitos de diferentes temperaturas



620-637°C
7,9-8,7 kbar

Fusão parcial ausente

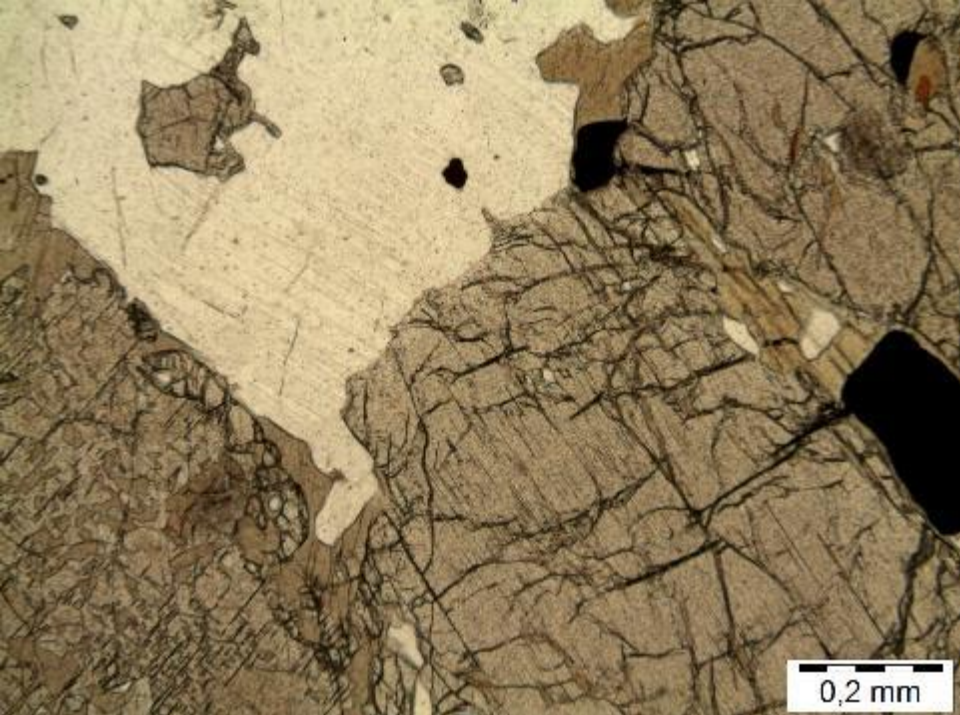
Kim, H.S., 2006. Deformation-induced garnet zoning. *Gondwana Research* 10: 379-383. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.04.015>



725-750°C
6,2-6,9 kbar

Fusão parcial presente

Cabrita et al., 2020. Evidence for a Tonian crustal accretion event in the Embu Complex, southern Ribeira Belt (Brazil). *Precambrian Research*, em avaliação.

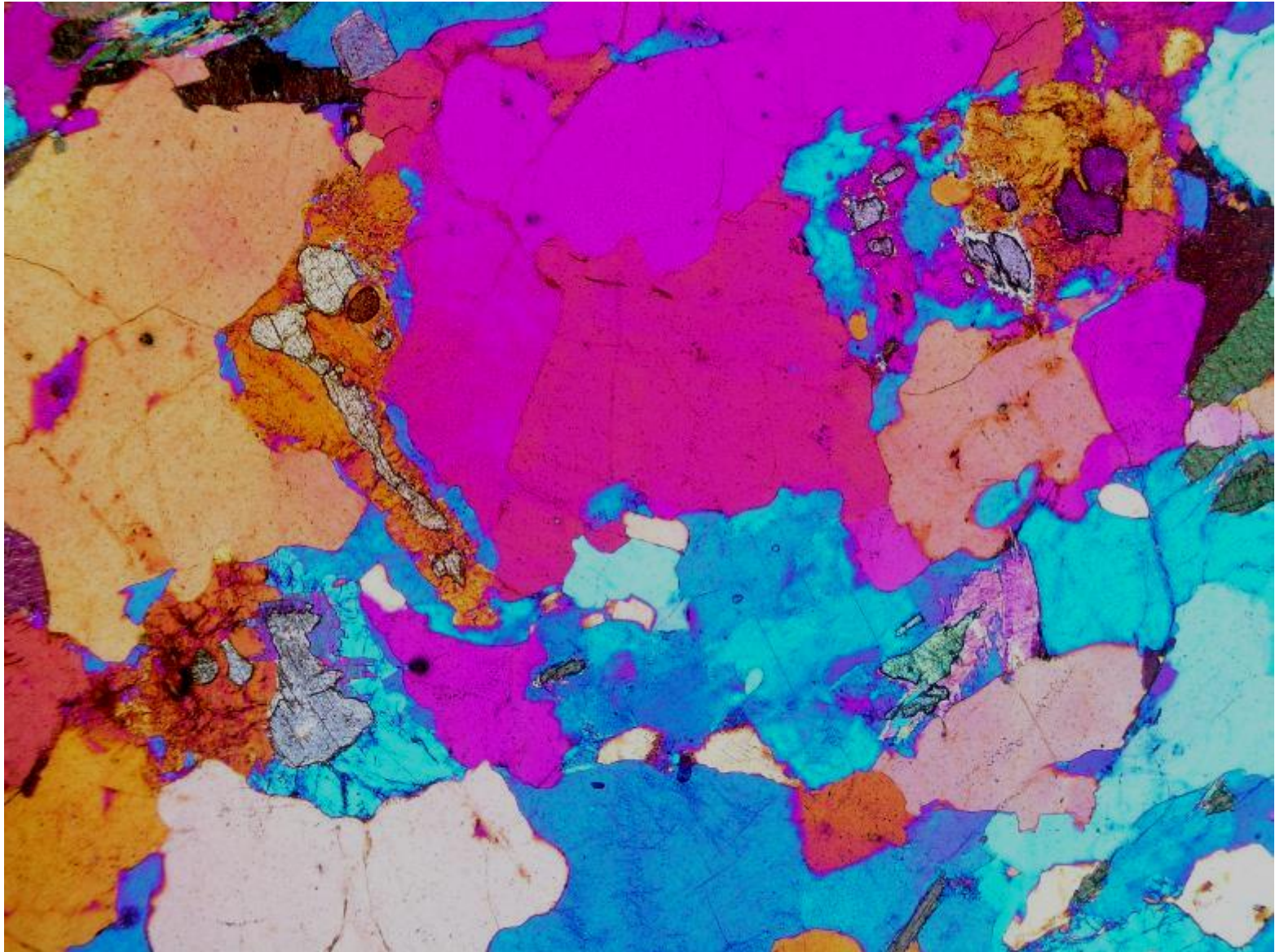


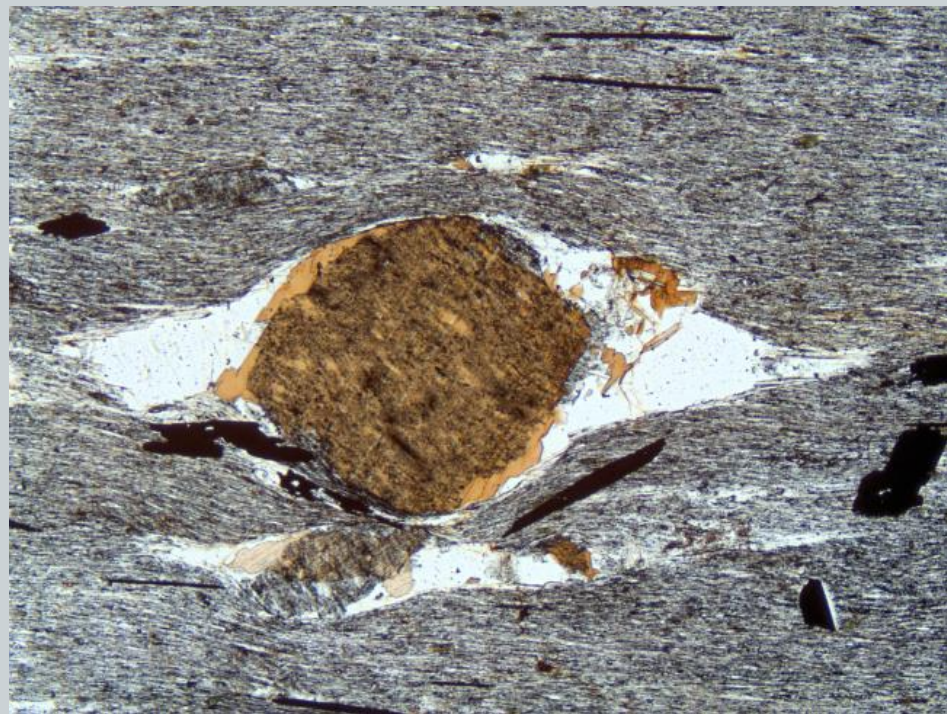
Textura ígnea preservada em metagabro com hornblenda formada nas bordas e clivagem do piroxênio



Difusão em escala restrita

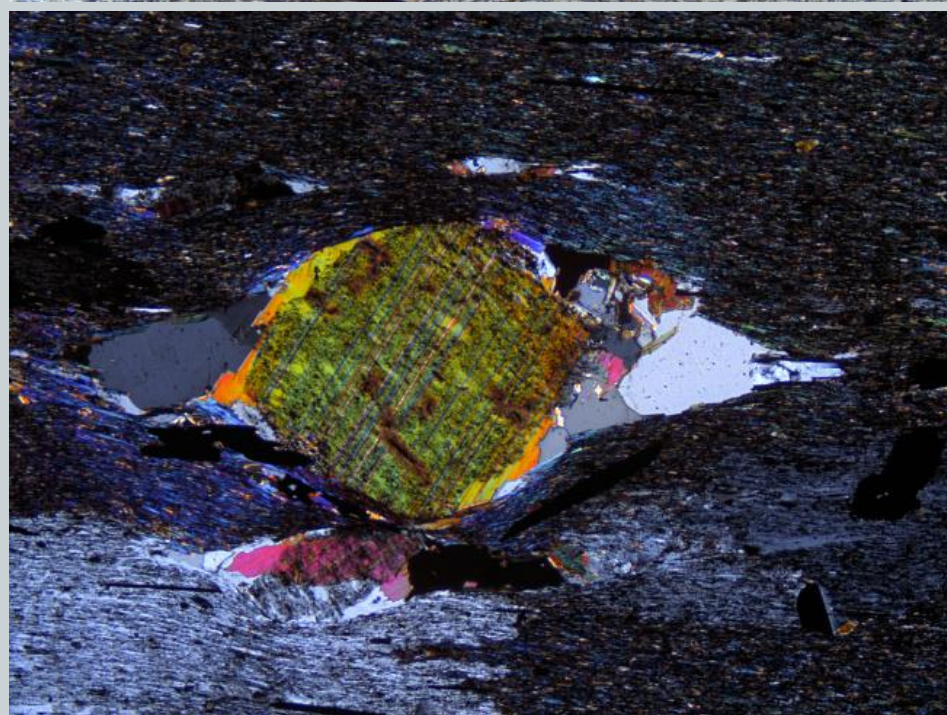
'Reação Reversa' $Ms + Pl + Qtz = Ky + Kfs + Fundido$





Sombras de deformação são formadas quando material é dissolvido em locais de maior pressão e reprecipitados em locais de menor pressão.

O processo de dissolução e reprecipitação é também chamado de difusão em via úmida.



Sombra de deformação com quartzo no entorno de grão de biotita

Reações metamórficas

- As reações metamórficas são responsáveis pela formação da paragênese mineral (produtos) e destruição (consumo) da associação anterior (reagentes)
- Um conjunto de rochas de certa **composição**, quando submetido a metamorfismo em diversas condições P - T , apresenta **diversas associações minerais**, as quais são **típicas e diagnósticas** para **intervalos diferentes de P e T**

Reações metamórficas

- A nova associação mineral é quimicamente equivalente à associação antiga
 - quartzo + muscovita = ortoclásio + sillimanita + H₂O
 - $\text{SiO}_2 + \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 = \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{H}_2\text{O}$

Reações metamórficas

- Existem 3 tipos principais de reações metamórficas
 - **Reação sólido-sólido**
 - cianita = sillimanita
 - diopsídio + granada + quartzo = plagioclásio + ortopiroxênio
 - almandina + flogopita = piropo + annita
 - **Reações de devolatização** (desidratação ou descarbonatação)
 - calcita + quartzo = wollastonita + CO₂
 - cloritoide + cianita = estaurolita + clorita + quartzo + H₂O
 - **Reação de fusão**
 - biotita + sillimanita + quartzo + plagioclásio = granada + cordierita + feldspato potássico + fundido

Metamorfismo Progressivo

- Quando a rocha sofre metamorfismo com aquecimento (aumento progressivo de T), diz-se que o **metamorfismo é progressivo**
- A condição de T mais elevada que a rocha experimenta é o **pico metamórfico**
- A associação mineral estável quando o pico metamórfico é alcançado é denominada de **paragênese**

Fatores físicos e químicos que controlam o metamorfismo

- T – temperatura
- P – pressão litostática
- deformação (esforço diferencial – σ_1 - σ_3)
- composição da rocha
- t - tempo
- Presença e composição de fluídos

Temperatura

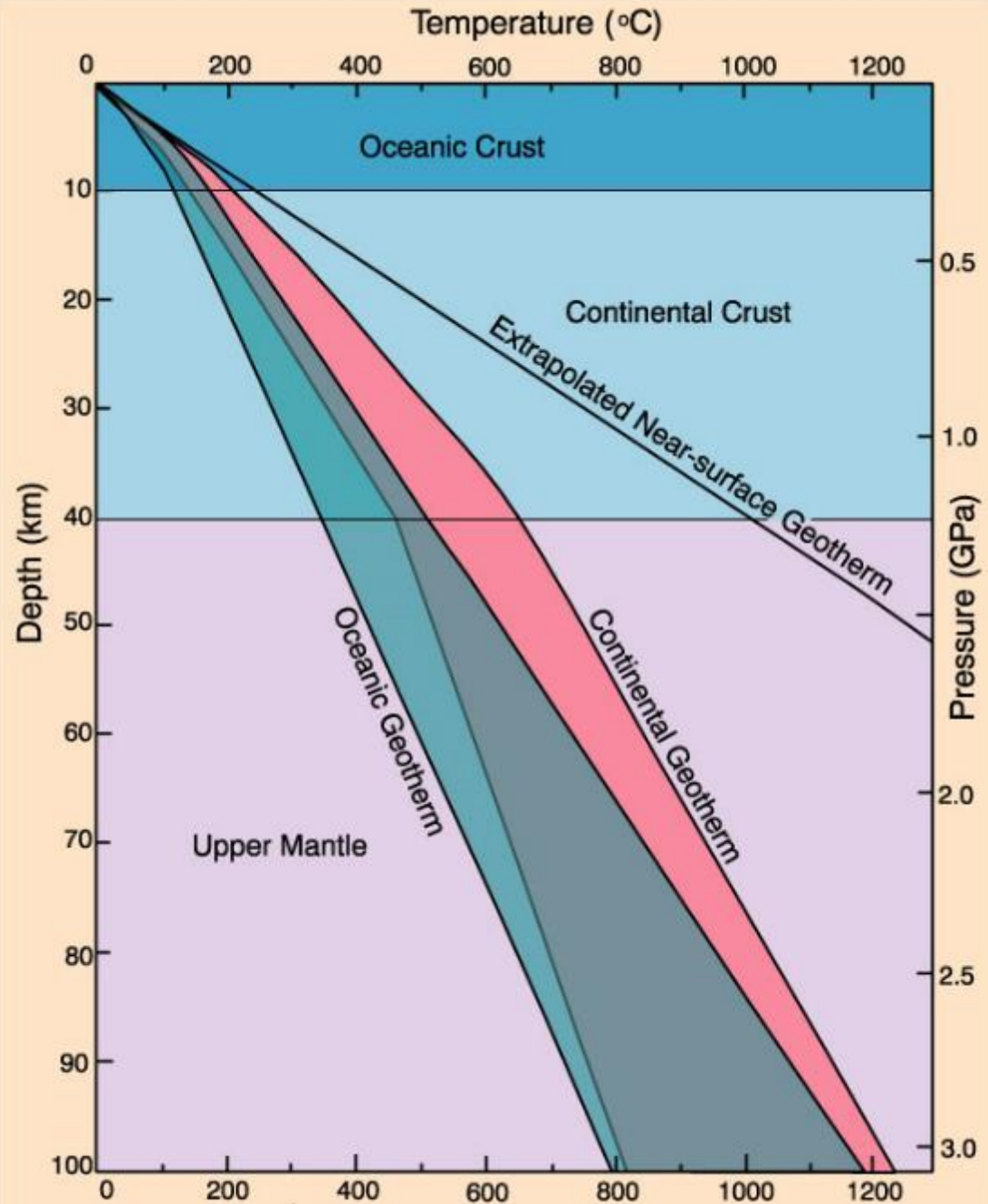
- **Temperatura** (T em °C ou K)
 - O agente mais importante do metamorfismo
- Fontes de Calor
 - Decaimento radioativo dos elementos
 - Magma
 - Manto (Astenosfera)
- $T \text{ K} = \text{°C} + 273,15$
- Temperatura é variável intensiva (independe da quantidade de matéria)

Limites de T do Metamorfismo

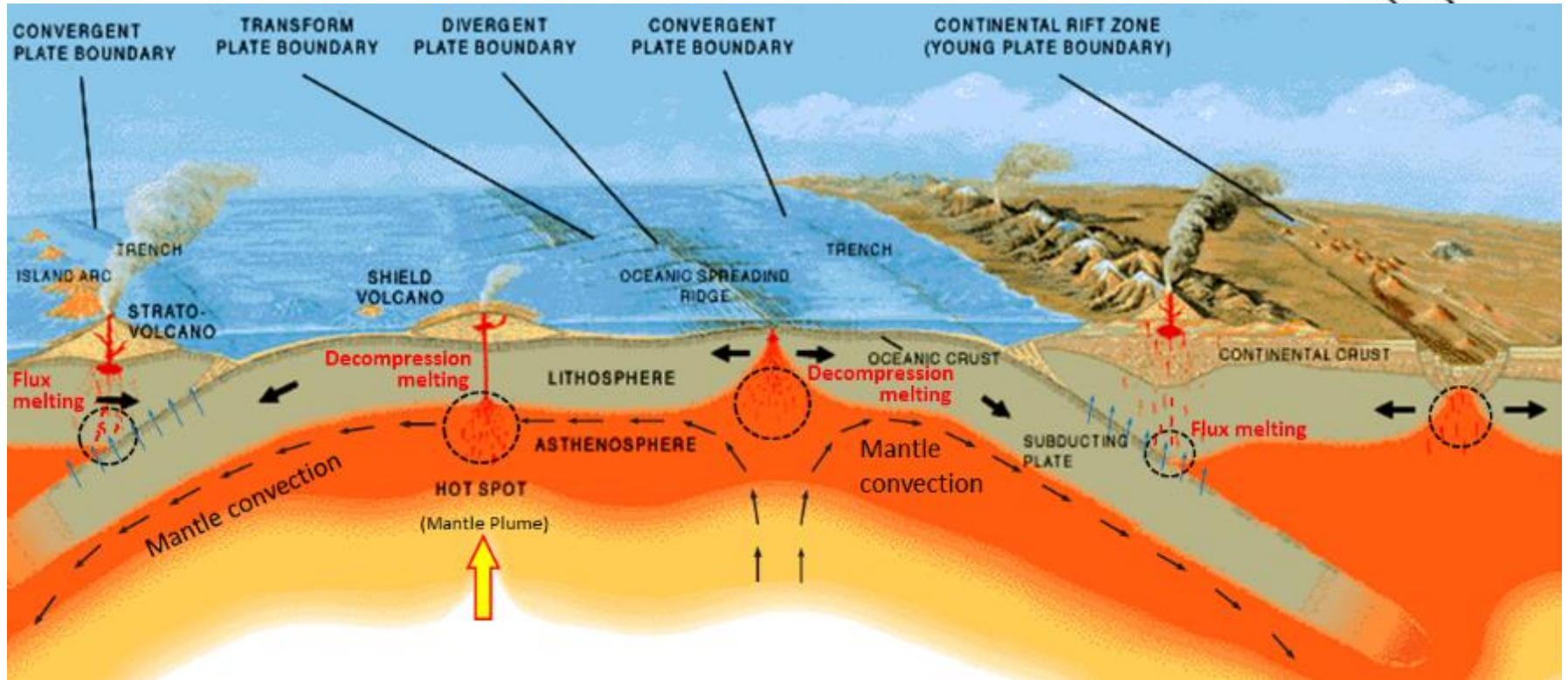
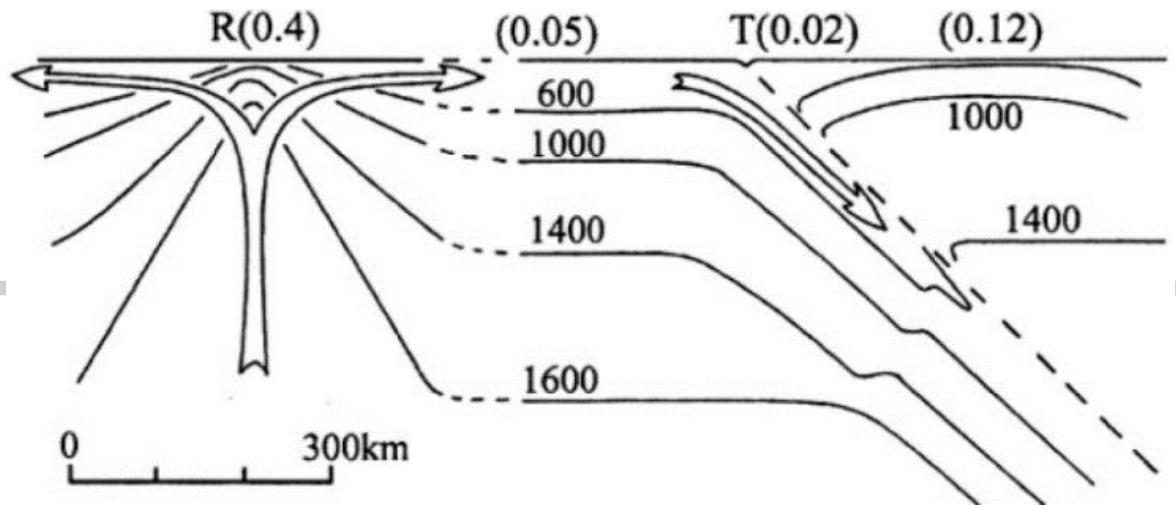
- Limite inferior $T > 200$ °C - diagênese
 - caolinita + quartzo \rightarrow pirofilia
- Limite superior (crustal) – embora a maior parte das rochas entrem em fusão a pressões crustais entre 650 e 900 °C, algumas rochas podem se manter no estado sólido até temperaturas > 1100 °C (Harley & Motoyoshi, 2000; Moraes, *et al.*, 2002).
- No manto os processos metamórficos atingem 1500-2000°C.

Geoterma

- Linha (ou superfície) que descreve a variação de T com a profundidade (ou P) na Terra



Geoterma



Pressão

- **Pressão** é a segunda variável intensiva mais importante do metamorfismo. **Proveniente do peso da coluna de rochas sobrejacente** à rocha que está sendo metamorfozada. Depende da densidade média das rochas da porção da crosta envolvida.
- P em kbar, MPa ou GPa
- 1 baria = 10^5 Pa
- 1 kbar = 100 MPa = 0,1 GPa

$$P = \rho gh$$

rocha	densidade g/cm ³	densidade kg/m ³
granito	2,7	2700
basalto	3,0	3000
peridotito	3,3	3300

P em coluna de 1 km (1000m)

rocha	<i>P</i> em bars	<i>P</i> em kbar
granito	264	0,264
basalto	294	0,294
peridotito	323	0,323

Para atingir 1 kbar de P

H ₂ O mar (fossa das Filipinas)	10 km
rocha	profundidade
granito	3,8 km
basalto	3,4 km
peridotito	3,1 km

Pressão vs profundidade

Crosta oceânica	5 – 10 km	1,5 a 3 kbar
-----------------	-----------	--------------

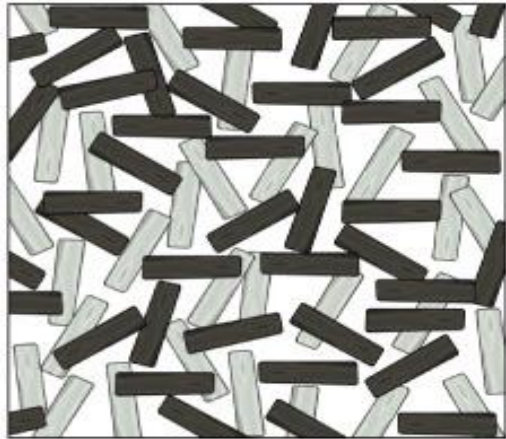
Crosta continental	35 – 40 km	10 kbar
--------------------	------------	---------

orógenos	70 – 80 km	20 kbar
----------	------------	---------

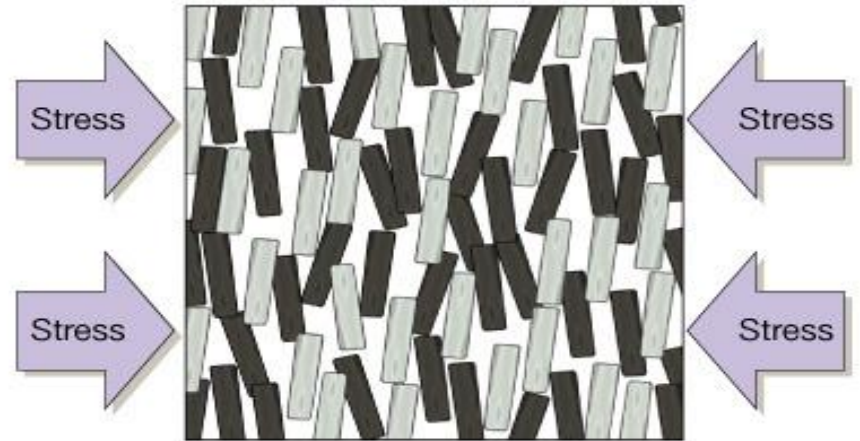
Algumas rochas crustais com coesita e diamante indicam $P > 35$ kbar e >120 km.

Tensão deviatória σ

- **Tensão deviatória** (stress) - pressão litostática (P) é confinante e semelhante à pressão hidrostática, igual em todas as direções. Quando as rochas são submetidas à tensão deviatória (stress), o esforço pode ser diferente em pelo menos uma das direções, causando a deformação da rocha
- Valores de σ variam entre 5 e 10 bars, podendo atingir 100 bars
- Valores dessa ordem são muito baixos e não afetam o campo de estabilidade dos minerais
- A tensão deviatória só é responsável pelo crescimento orientado dos minerais (dobras, foliação, lineação)



Before metamorphism



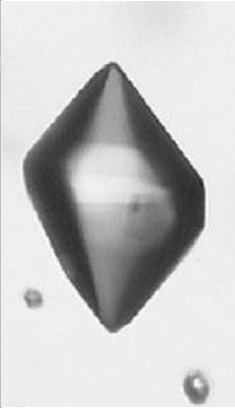
After metamorphism



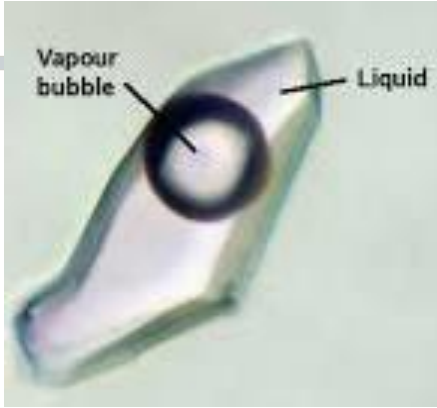
Fluidos (voláteis)

- **Fluidos** – ocorrem nos minerais hidratados, nos interstícios dos grãos e aprisionadas no interior dos grãos
 - Espécies principais: H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2 , S (O_2 , H).
- **Atuação**
 - estabilidade da associação mineral
 - aporte de calor por advecção
 - transferência de massa – alteram a composição da rocha
 - deposição de minério
 - inclusões fluidas indicam composição do fluido e condições P - T de aprisionamento

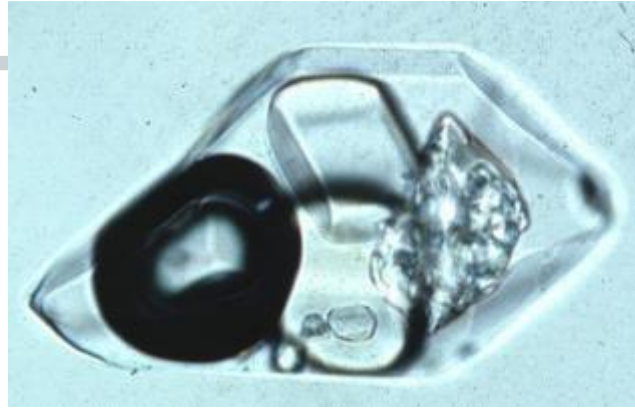
Fluidos (voláteis)



Gasosa



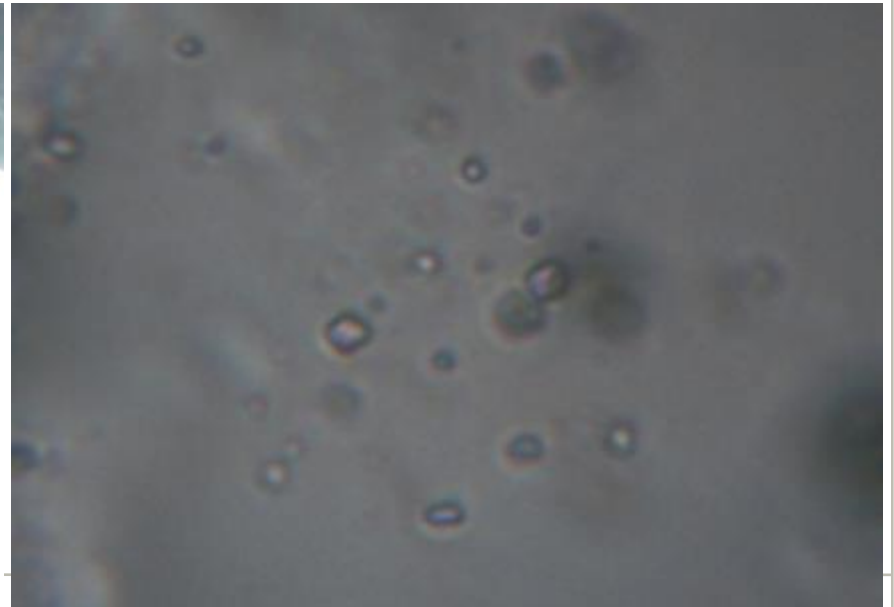
aquosa



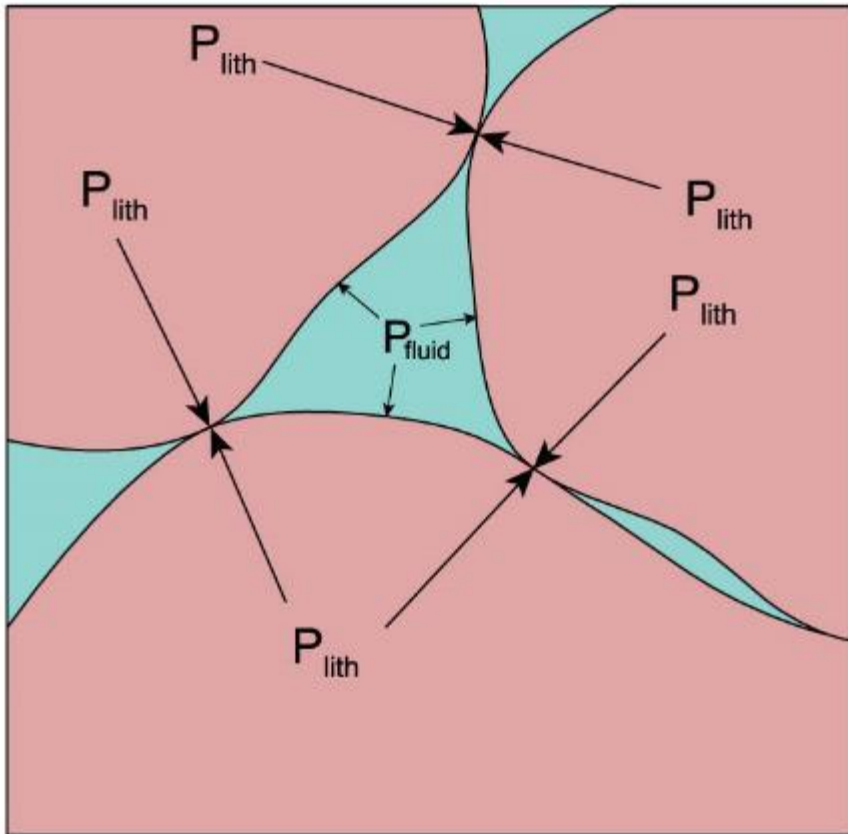
aquosa com sólido



aquocarbônica



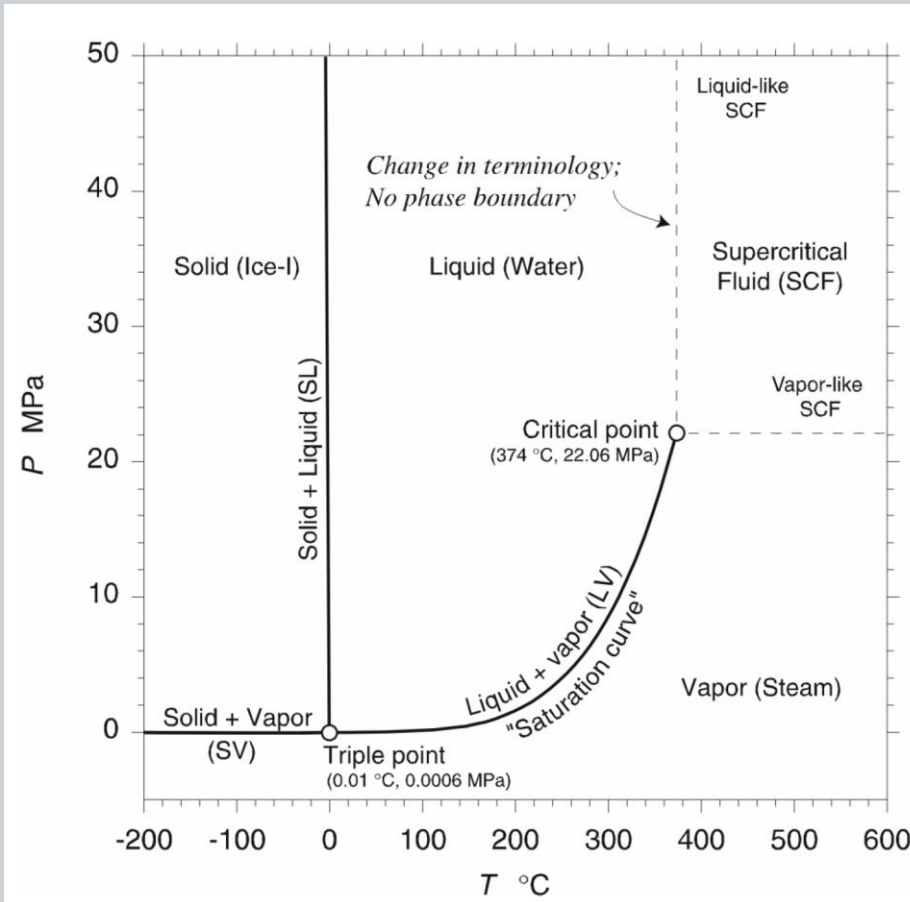
Fluidos (voláteis)



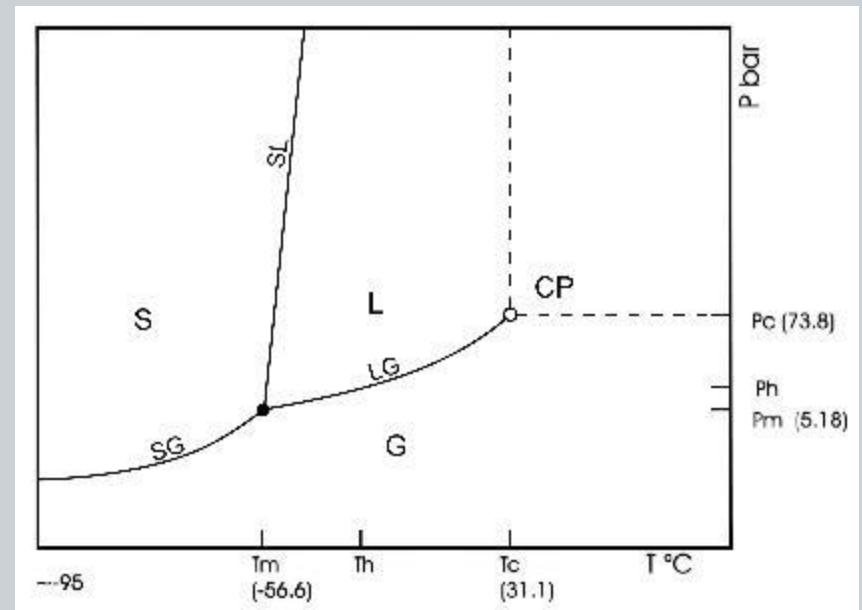
- $P_{\text{fluido}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$
- $P_{\text{fluido}} = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CH}_4}$
- Normalmente $P_{\text{lito}} > P_{\text{fluido}}$
- Em alguns casos $P_{\text{lito}} < P_{\text{fluido}}$

Fluidos (Voláteis)

O fluido é supercrítico, está em T acima de sua temperatura de ebulição, mas a P é alta o suficiente para impedir a mudança de estado. É um fluido não compressível, de alta densidade e sua T e P são mais altas que o ponto crítico



Projeção P-T do sistema H_2O



Projeção P-T do sistema CO_2

Substâncias voláteis versus não voláteis

System	Molar mass (g·mol ⁻¹)	T_{triple} (°C)	P_{triple} (MPa)	T_{critical} (°C)	P_{critical} (MPa)	$V_{\text{m, critical}}$ (cm ³ ·mol ⁻¹)
H ₂	2.0159	-259.15	0.0072	-239.9	1.297	65.0
O ₂	31.999	-218.79	0.00015	-118.57	5.043	73.37
N ₂	28.0134	-210	0.0125	-146.95	3.398	90.10
CO	28.01	-205	0.015	-140.3	3.494	93.1
C ₃ H ₈	44.097	-188	1.7x10 ⁻⁴	96.68	4.248	200.0
Ar	39.948	-185.37	6.89	-122.29	4.898	74.57
CH ₄	16.04	-182.5	0.012	-82.59	4.599	98.6
C ₂ H ₆	30.07	-182	1.1x10 ⁻⁶	32.17	4.872	145.5
H ₂ S	34.08	-85.5	0.0232	100.15	8.963	98.0
NH ₃	17.031	-77.66	0.0061	132.25	11.333	72.47
SO ₂	64.065	-75.51	0.0017	157.65	7.884	122
CO ₂	44.01	-56.57	0.5185	30.978	7.377	94.0
H₂O	18.0153	0.010	0.00061	373.95	22.064	55.95
KCl	74.56	770	5x10 ⁻⁴	2910?	44.0?	
NaCl	58.44	800	< 0.1	3090?	62.0?	

Data from Pitzer (1995), Poling *et al.* (2001) and Lemmon *et al.* (2001)

Agentes químicos do metamorfismo

- **Composição da rocha** – determina os minerais que podem ser “vistos” pela rocha dependendo das condições de P e T do metamorfismo
 - Pelito – sistema KFMASH (NaCaMnKFMASHTO)
 - Rocha máfica – NCFMASH
 - Rocha ultramáfica – CMSH(-CO₂)
 - Calcário impuro – CMSH-CO₂
 - Gnaiss - NCKASH

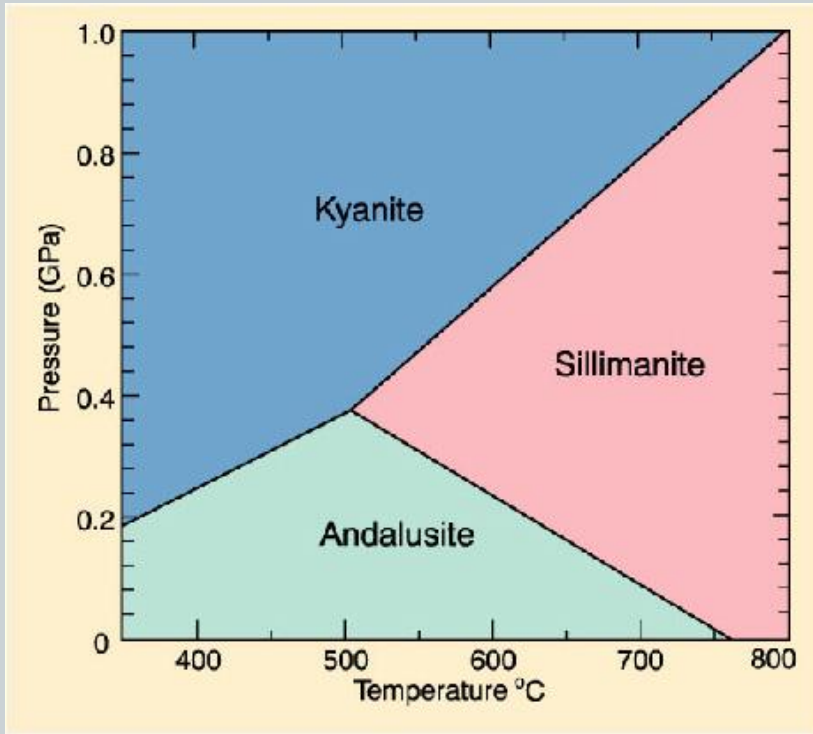
Sistema fechado e aberto

- O metamorfismo pode ocorrer com **sistema** químico **fechado**, quando só há troca de calor e H_2O (perda) com o ambiente.
- O metamorfismo pode ocorrer com **sistema** químico **aberto**, quando a composição da rocha sofre modificações
 - O **hidrotermalismo** é o caso específico quando o volume de H_2O quente é muito grande em relação ao da rocha e as modificações químicas podem ser drásticas
 - Depósitos minerais podem ser gerados

Efeitos de T e P

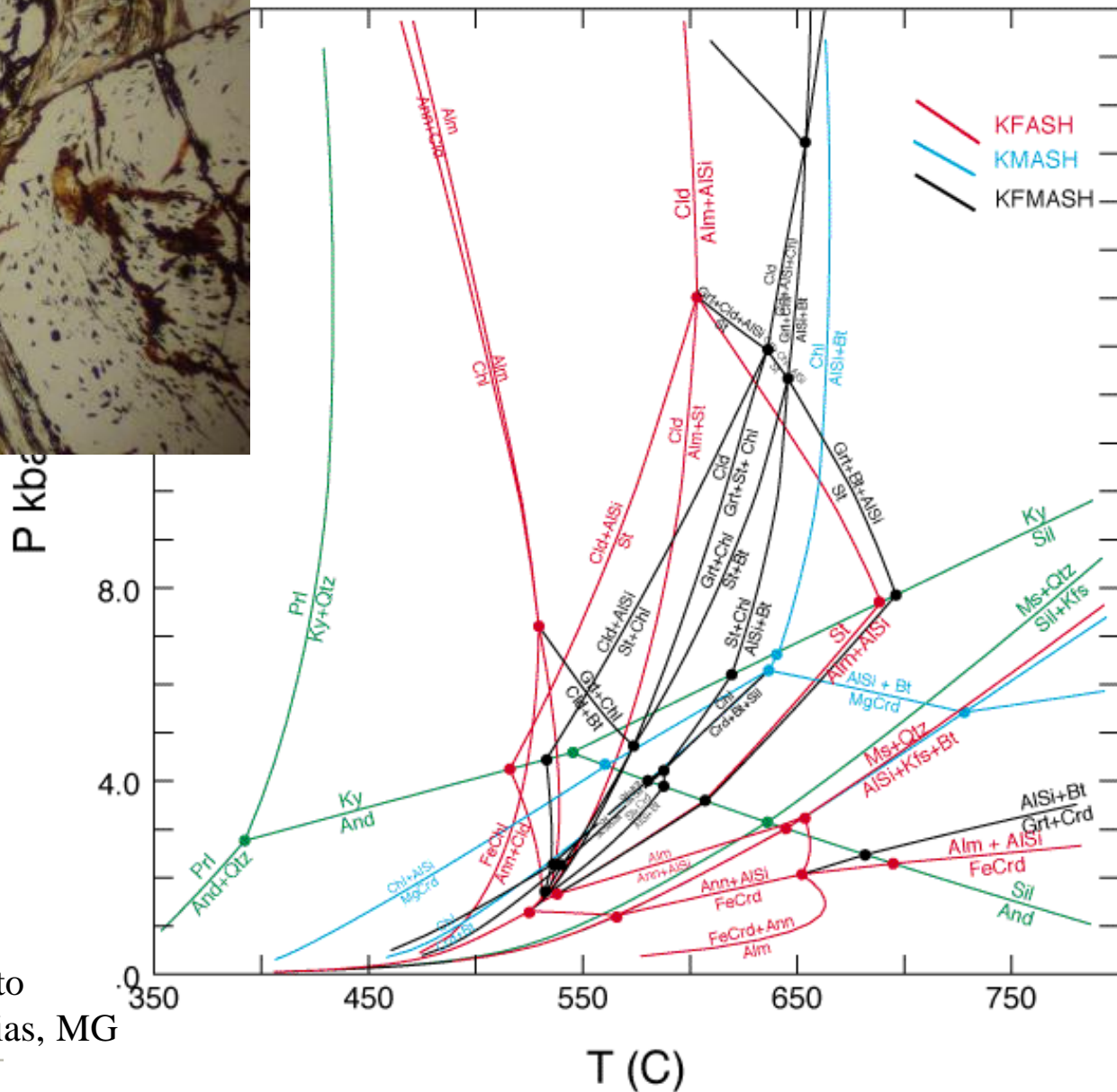


Pressão e temperatura definem quais associações minerais ocorrem em função das suas mudanças





Spear & Cheney (unpublished)



biotita-estaurolita-granada xisto do Grupo Carrancas, Luminárias, MG

Efeitos da fase fluida

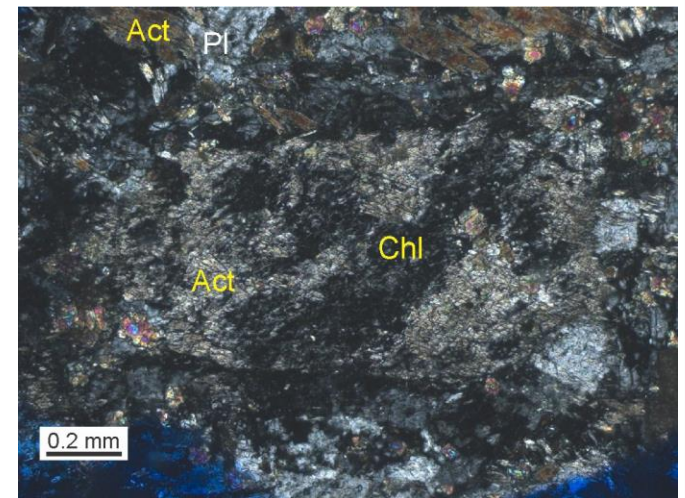
Um diabásio é constituído por minerais anidros

- plagioclásio
- augita
- Ilmenita



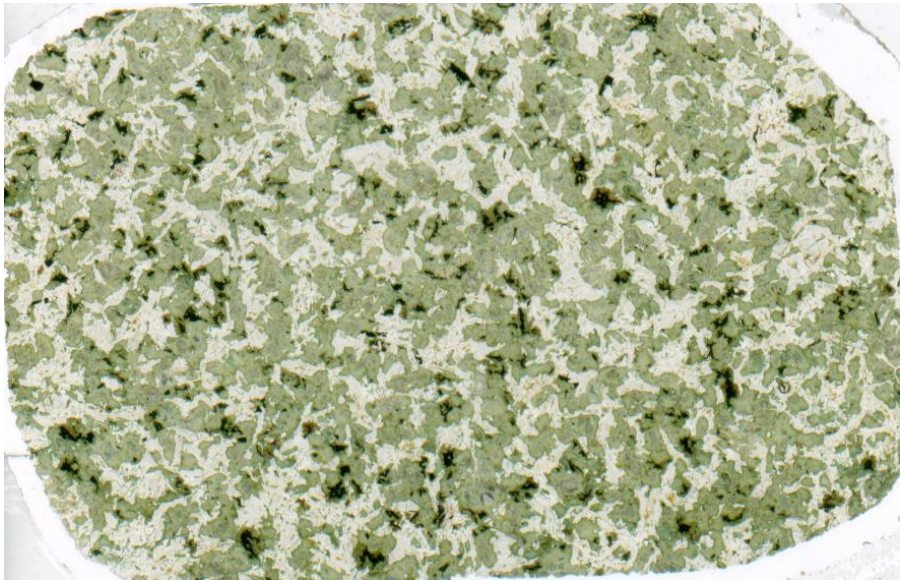
A adição de H_2O durante o metamorfismo permite a cristalização de minerais hidratados

- actinolita
- epidoto
- clorita
- albita

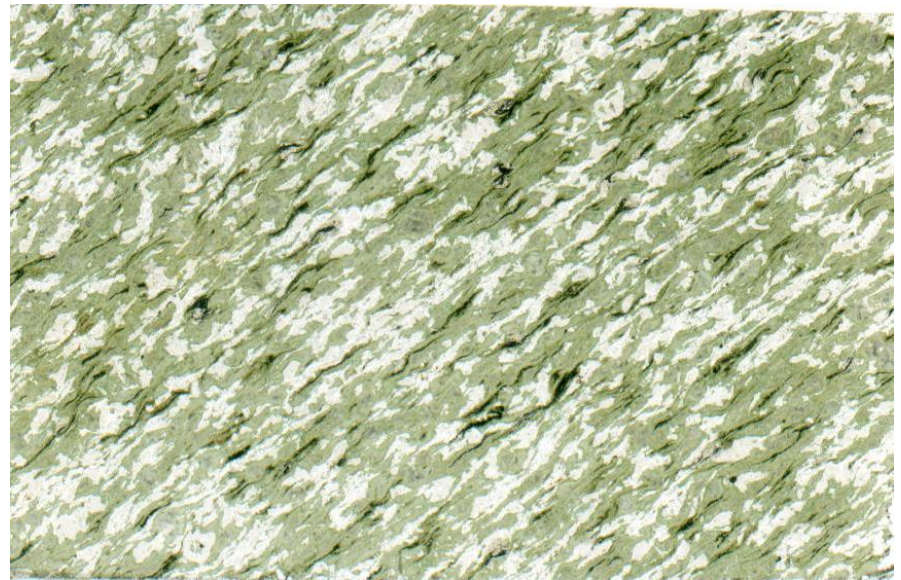


Efeitos da deformação

- A deformação não estabiliza fases minerais, mas...
 - permite a entrada de fluidos na rocha (sistema)
 - com isso ajuda a mudar a mineralogia da rocha
 - muda a textura da rocha



metadiabásio de região de Acaiaca, MG



anfíbolito de região de Acaiaca, MG

Efeitos da composição química da rocha

- A composição química da rocha determina quais minerais podem ocorrer ao longo do metamorfismo
- Basalto-diabásio – rochas com NaCaFeMgAlSiTi, não são saturadas em Al_2O_3 , assim raramente devem apresentar polimorfos de Al_2SiO_5 , mas ocorrem minerais com Ca-Fe-Mg (anfíbolios), ou Fe-Mg (clorita) e Na-Ca-Al (epidoto e plagioclásio)
- Deste modo, é importante conhecer a **química das rochas** e, principalmente, **dos minerais**

Tipos de metamorfismo

Classificação baseada em agentes e processos

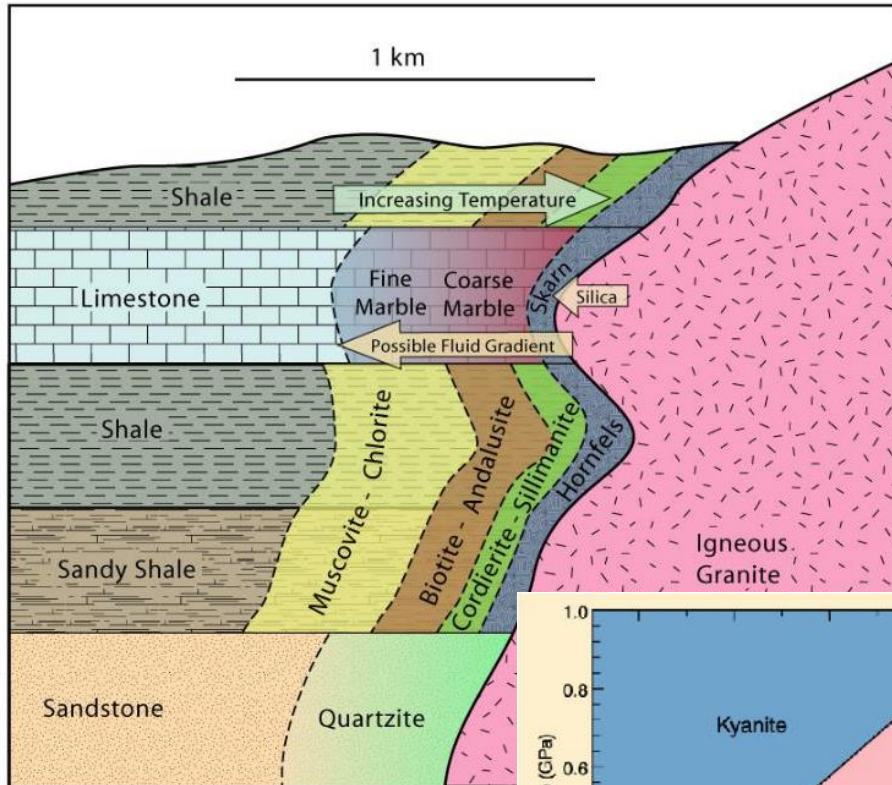
- Metamorfismo termal (transferência de calor)
- Metamorfismo dinâmico (esforço deviatório)
- Metamorfismo dinamotermal (combinação de temperatura e esforço deviatório)
- Metassomatismo (variação química associada a ação de fluidos)

Tipos de metamorfismo

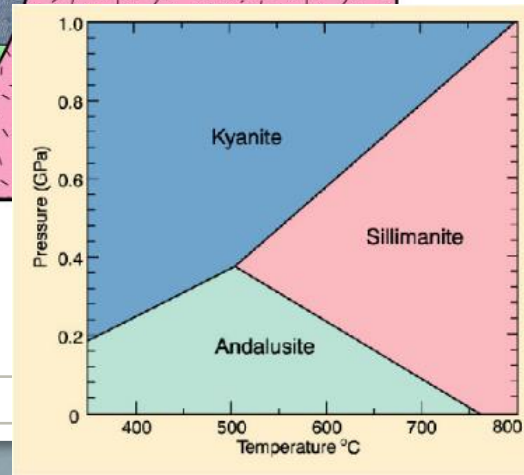
Classificação baseada em aspectos de campo

- Metamorfismo de contato
- Metamorfismo de impacto
- Metamorfismo regional
 - Soterramento
 - Fundo oceânico
 - Orogênico (dínamo-termal ou regional)
 - Subducção

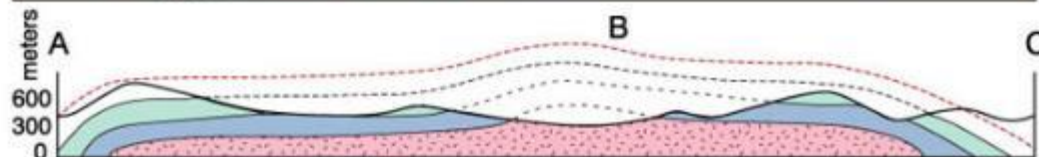
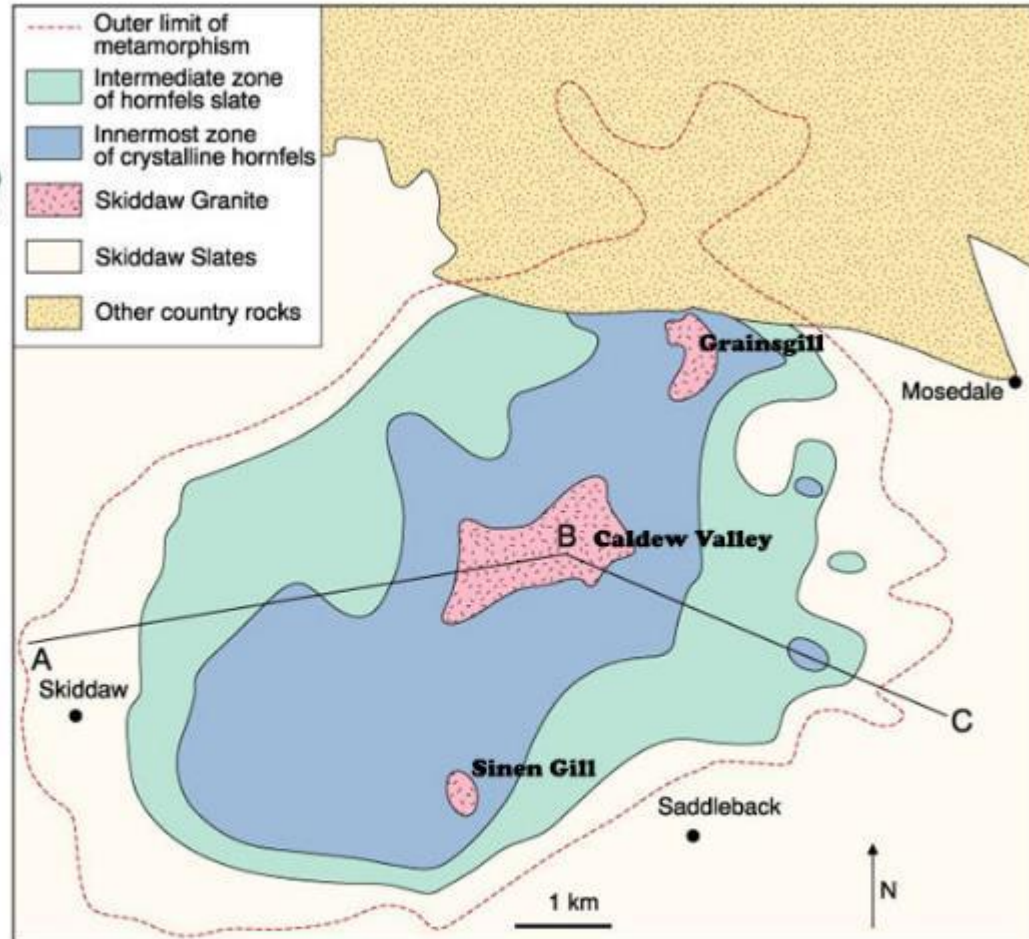
Metamorfismo de contato



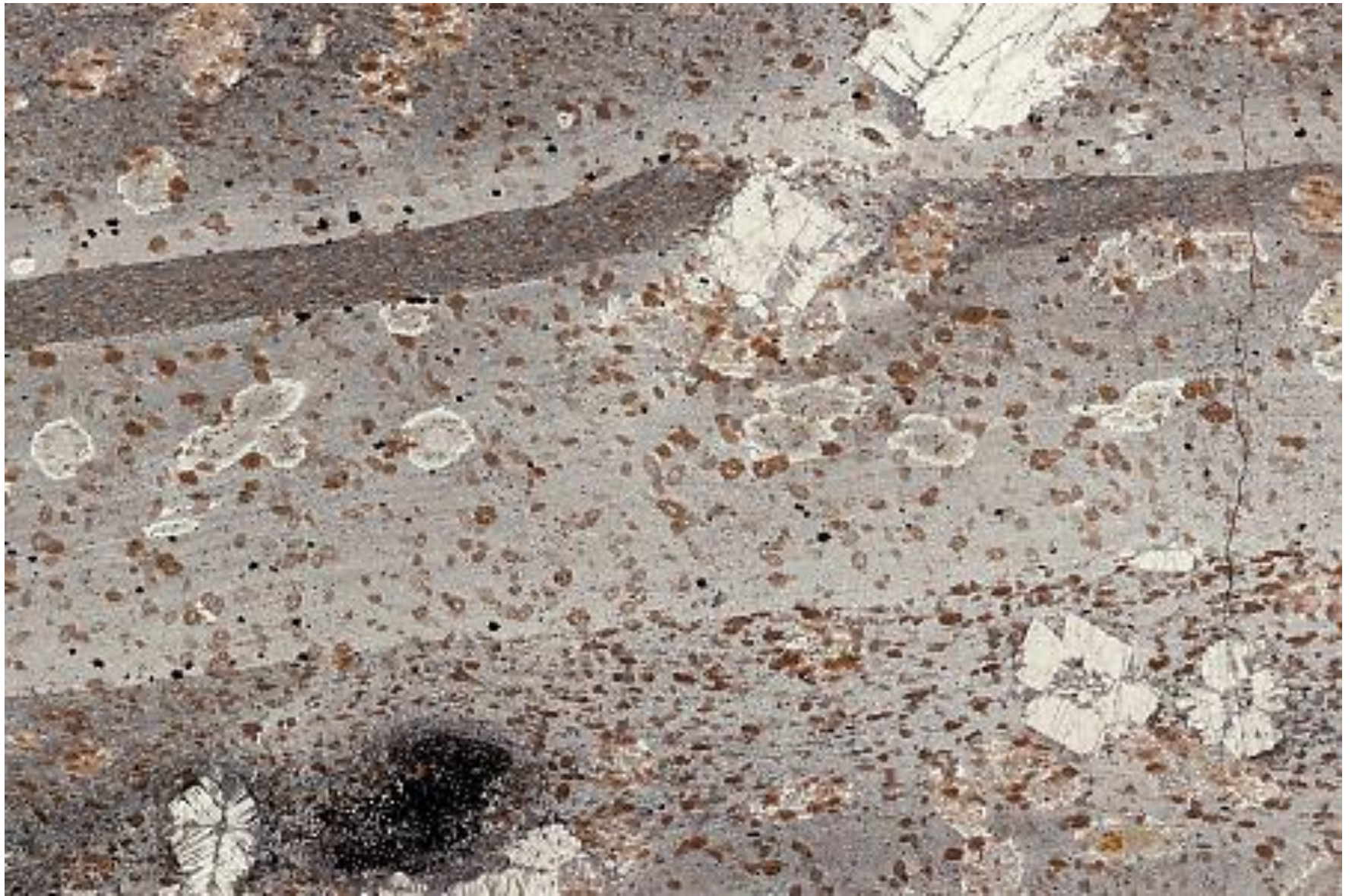
- Ocorre pelo calor oriundo de intrusões
 - Forma auréola de contato ao redor da intrusão
 - Minerais de T mais alta mais próximos da intrusão
 - Paragêneses anidras (e de alta T) próximas da intrusão
 - Paragêneses hidratadas (e de baixa T) distantes da intrusão



Auréola de contato



English Lake District



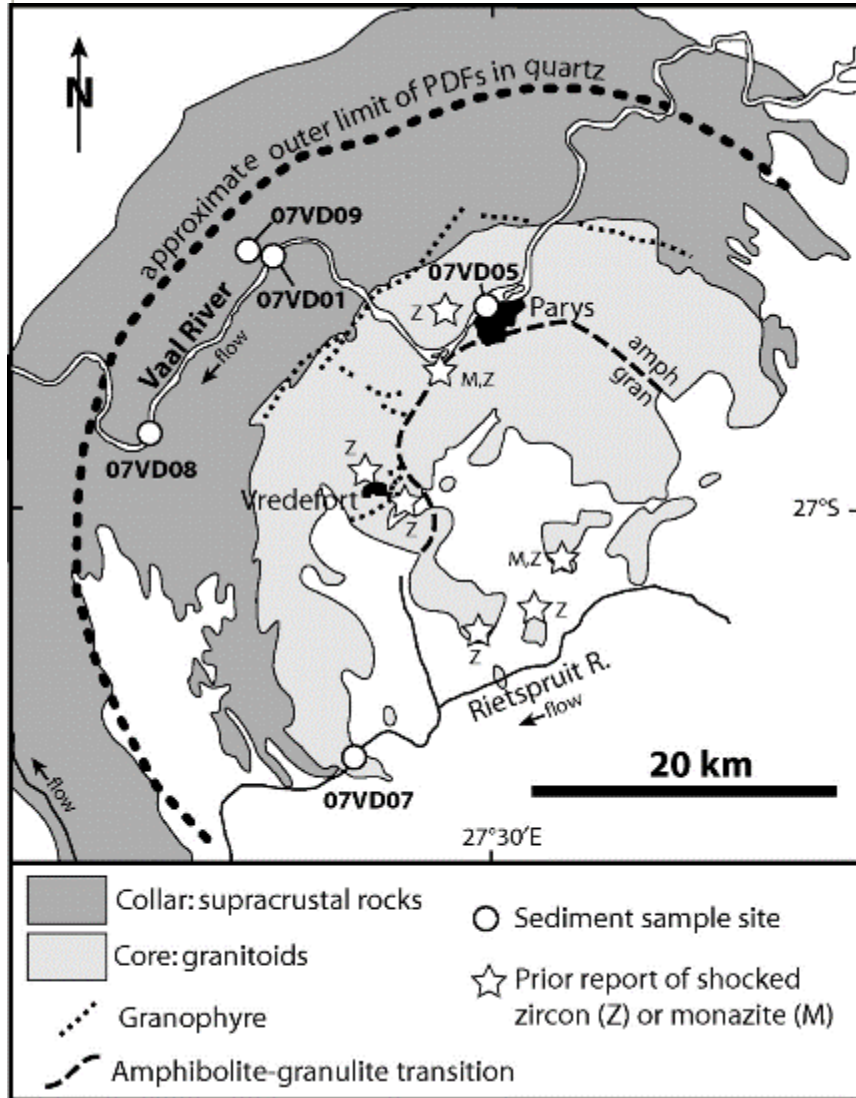
Complexo de Bushveld

Metamorfismo de impacto (ou choque)

- **Metamorfismo de choque** (impacto) – causado pelo impacto de meteoritos
- Observado nas crateras de impacto
- Forma brechas polimíticas com matriz de vidro e polimorfos de Qtz de alta P
- coesita e stishovita

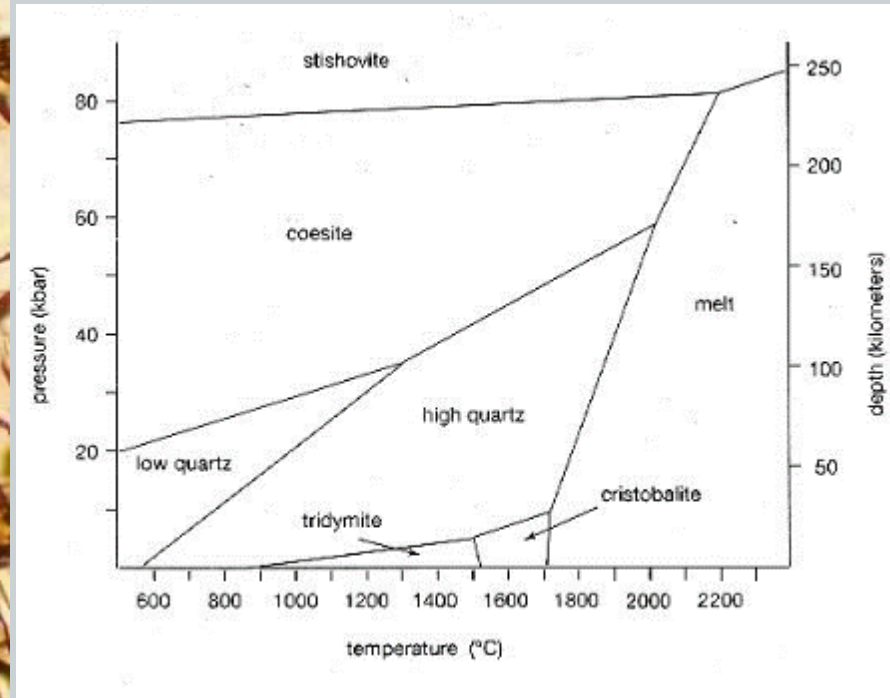
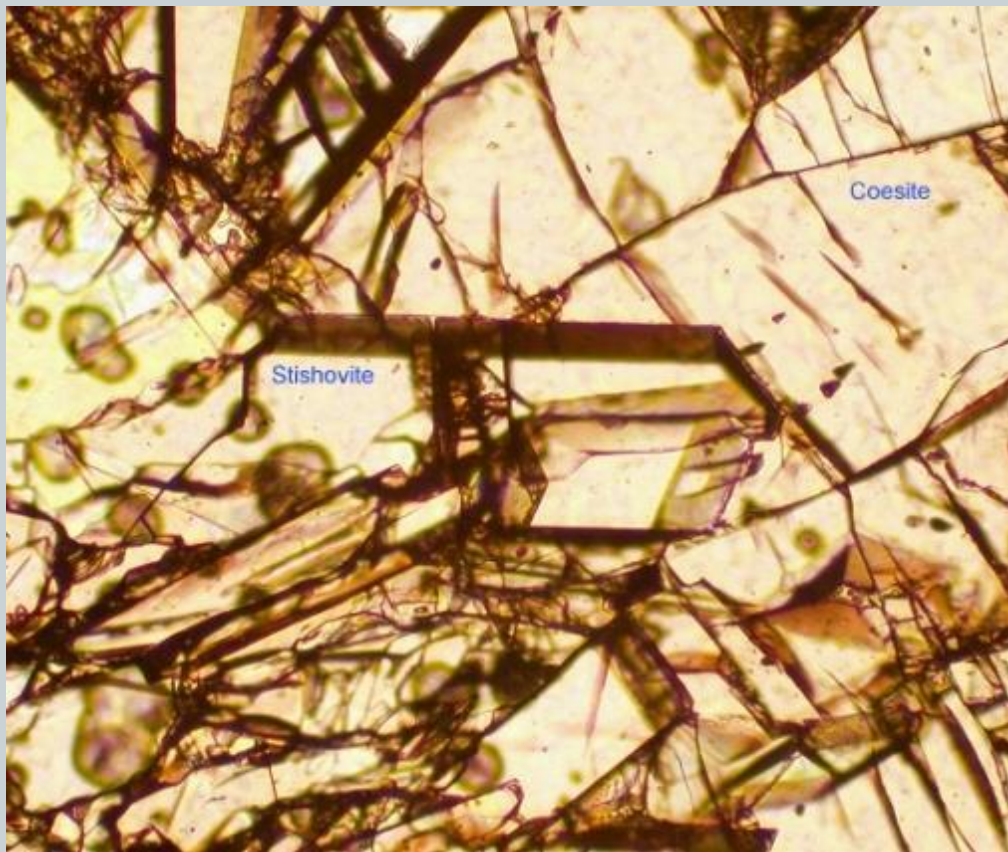


Cratera de Vredefort



brecha com matriz de pseudotaquilito

Metamorfismo de impacto (ou choque)



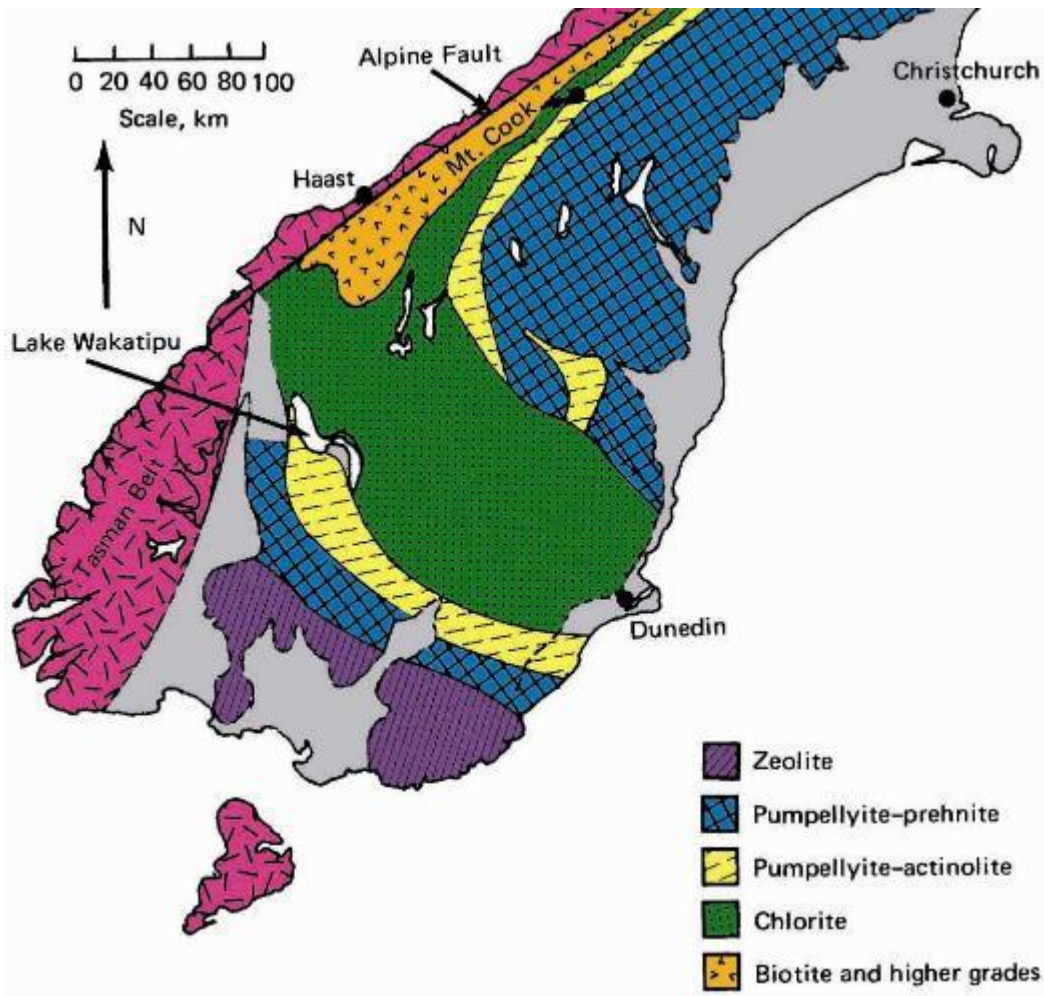
Metamorfismo regional

- **Metamorfismo Regional** – ocorre em ampla região geográfica
- Ocorrem três tipos principais
 - metamorfismo de carga ou de soterramento
 - metamorfismo de fundo oceânico
 - metamorfismo orogenético (**regional**)

Metamorfismo de carga ou de soterramento

- Ocorre em bacias profundas sem muita deformação associada
- Minerais típicos são: zeólitas, prehnita e pumpellyita
- Esse tipo de metamorfismo é o “passo seguinte” da diagênese
- As rochas em geral não perdem sua estrutura original

Metamorfismo regional de soterramento Otago, Nova Zelândia



- Wackes, tufos e rochas vulcânicas (Jurássico) foram metamorfizadas pela carga da bacia no Cretáceo
- Granulometria fina e alta instabilidade do material (vidro) tornam as rochas suscetíveis à alteração e ao metamorfismo, mesmo em T muito baixa
- Zonação (e polaridade) metamórfica sistemática
- T diretamente ligada à profundidade

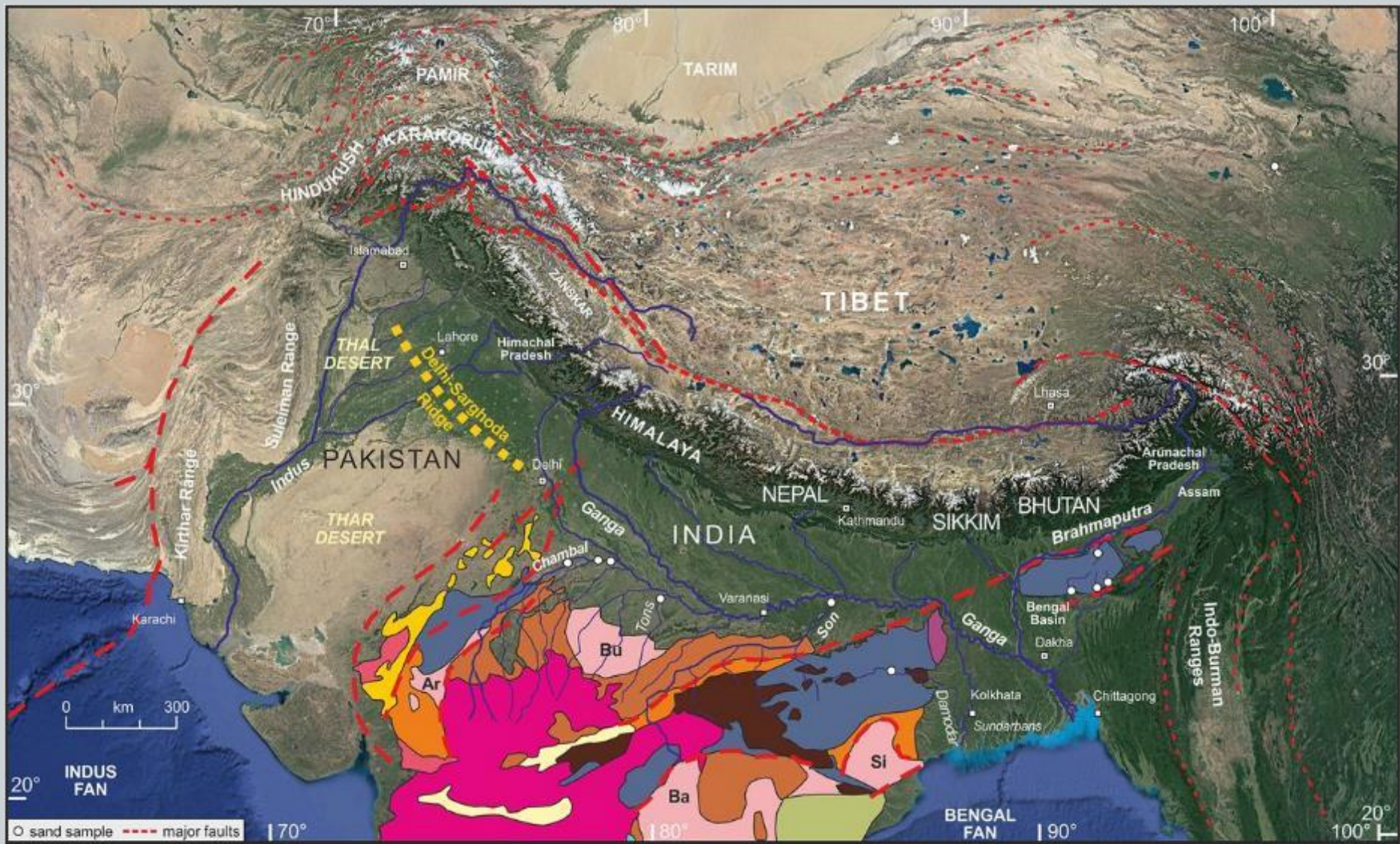
Metamorfismo de fundo oceânico

- Afeta as rochas do assoalho oceânico
- Temperatura variável e baixa pressão
- Funciona como hidrotermalismo e está associado, em geral, à circulação de água do mar por fraturas e falhas
- Ocorre perda de Ca e Si e ganho de Mg e Na

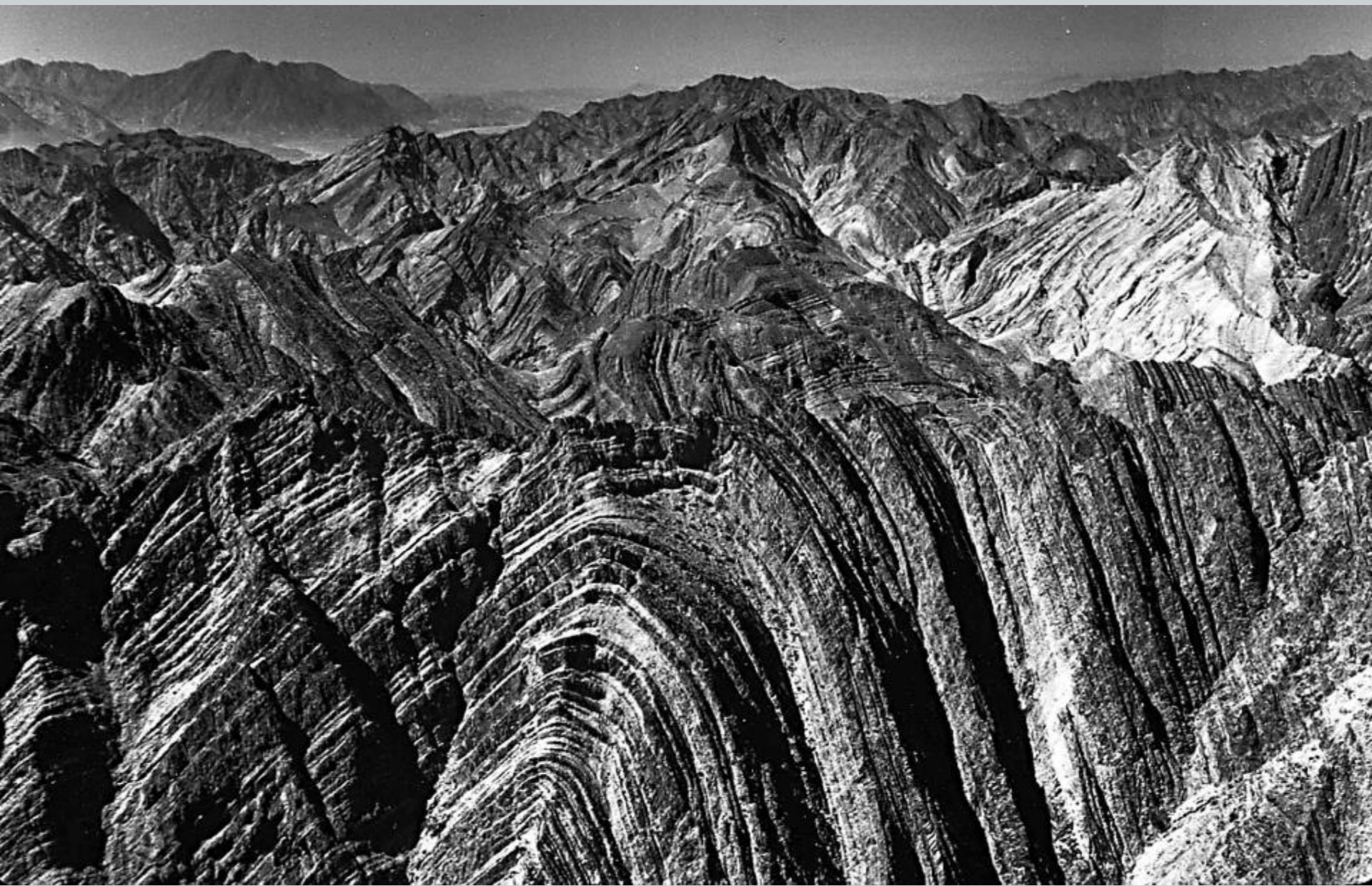


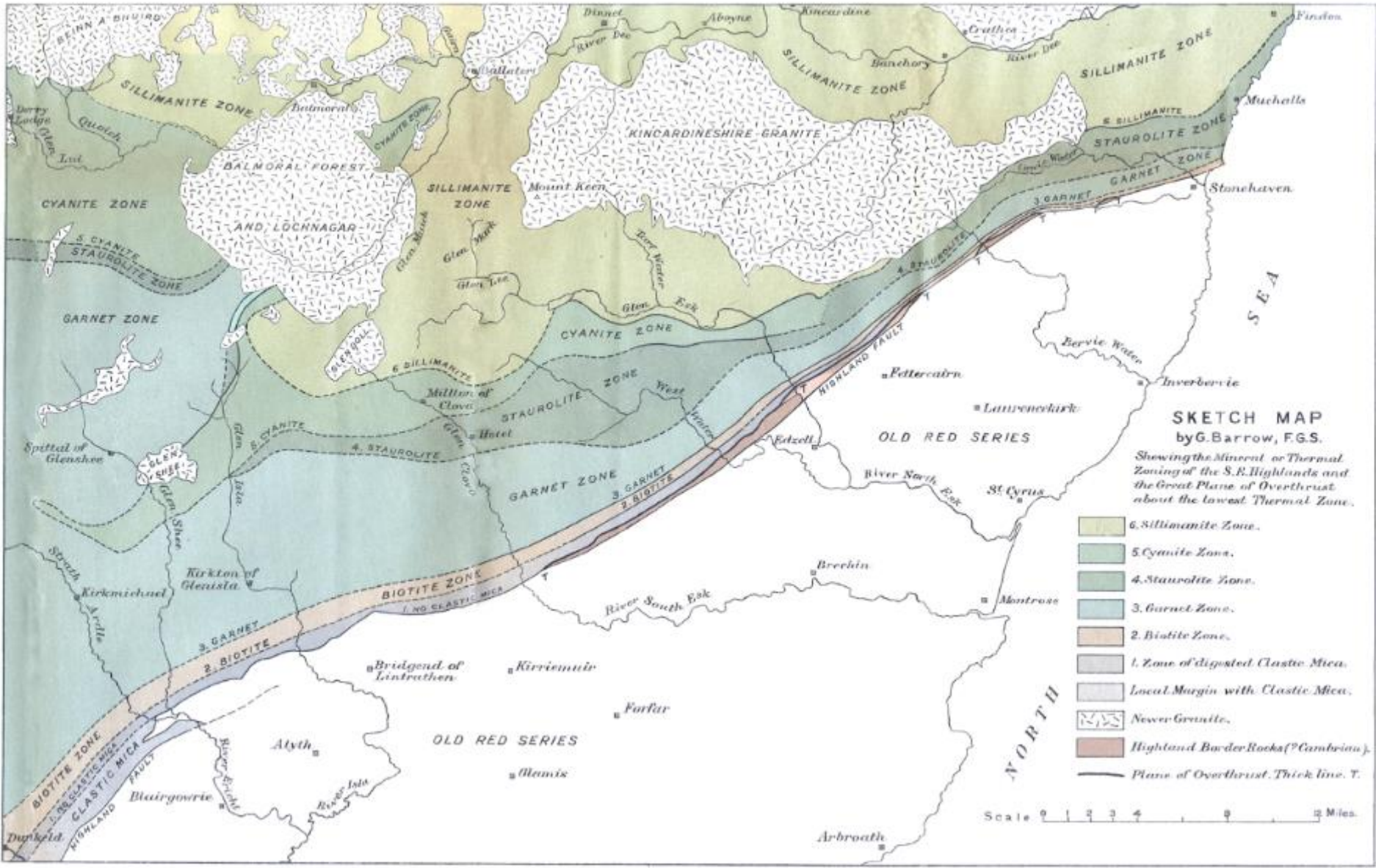
Metamorfismo regional

- O **metamorfismo regional** é o mais comum, ocorre formando cinturões de rochas metamórficas de centenas ou milhares de quilômetros, com intrusões graníticas e as vezes de magmas basálticos
- As rochas apresentam foliações, lineações e dobras; a distribuição dos minerais metamórficos ocorre em zonas que se distribuem ao longo de todo o cinturão e há boa diversidade de associações minerais

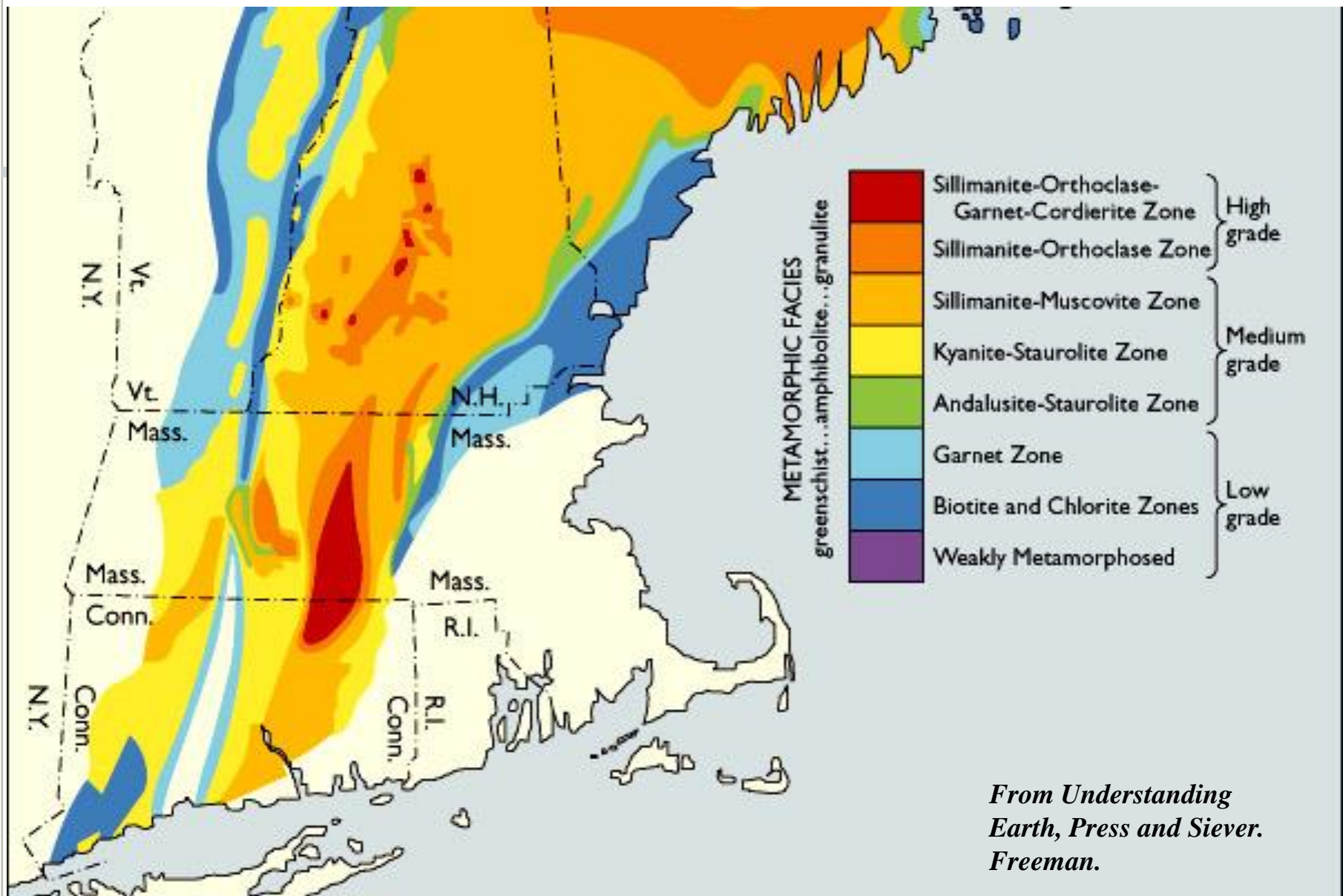


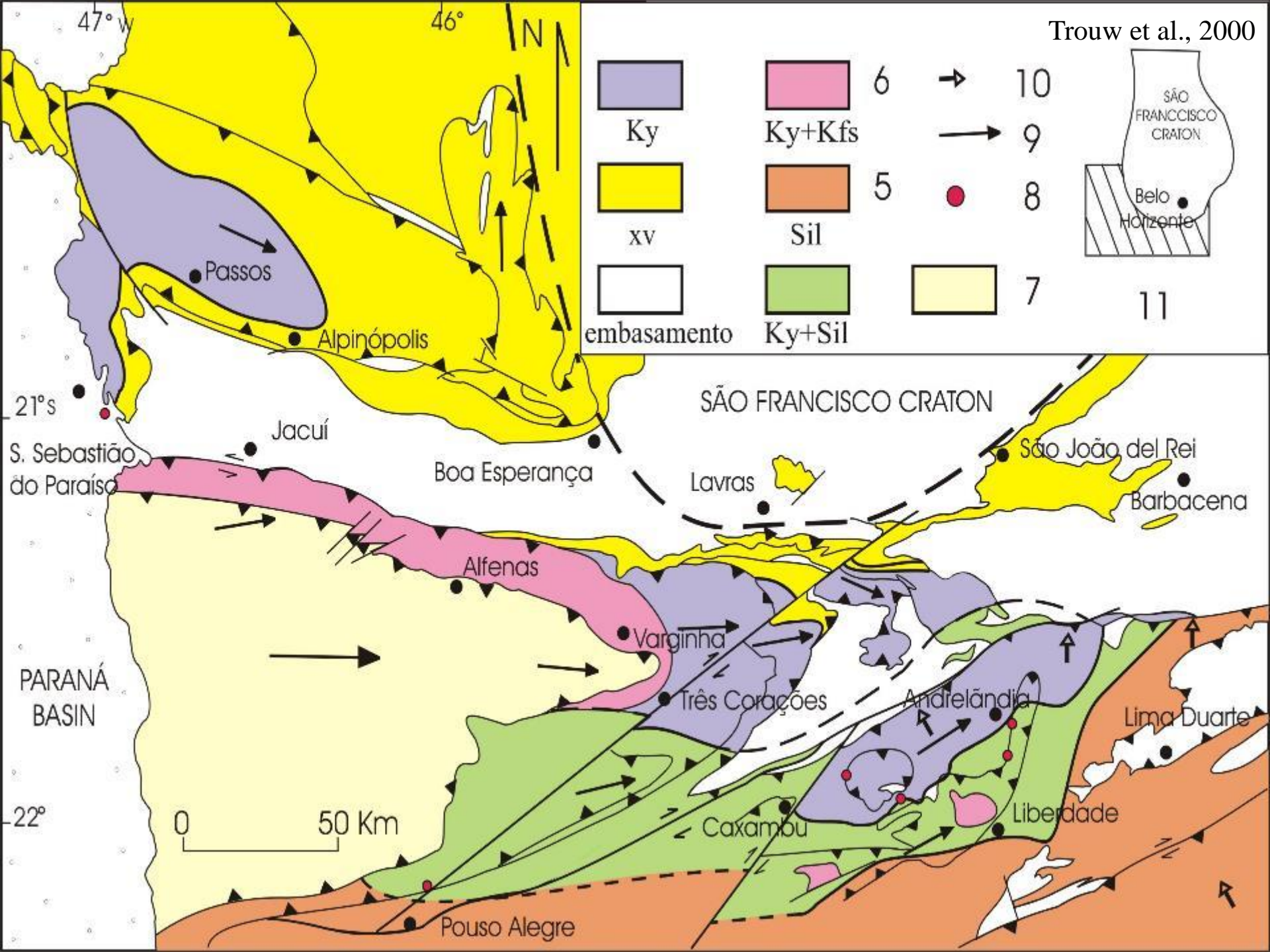
- | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|--|--|
| Deccan Traps (Cretaceous/Tertiary boundary) | Upper Paleozoic Gondwana Supergroup | Vindhyan Supergroup (& Meso/Neoproterozoic strata) | Mesoproterozoic Delhi supracrustal rocks | Paleoproterozoic volcanic & sedimentary rocks |
| Rajmahal Traps (Lower Cretaceous) | Eastern Ghats Belt (Neoproterozoic) | Meso/Neoproterozoic granites & volcanic rocks | Proterozoic granitoid-gneiss complexes | Archean cratons (Aravalli, Bundelkhand, Bastar, Singhbhum) |





Barrow, 1912





Metamorfismo e tectônica

- **Interior das placas** – metamorfismo de contato, metamorfismo de soterramento e talvez metamorfismo regional na base da crosta continental em regiões de riftes
- **Limites divergentes** – metamorfismo de fundo oceânico
- **Limites transformantes** – metamorfismo dinâmico e de fundo oceânico
- **Limites convergentes** – metamorfismo regional, orogênico ou dínamo-termal; metamorfismo de contato e dinâmico

