

GEOTECTÔNICA TECTÔNICA GLOBAL

Prof. Eduardo Salamuni

**AULA 10b: BORDAS DE
PLACAS CONVERGENTES –
PROCESSOS METAMÓRFICOS**

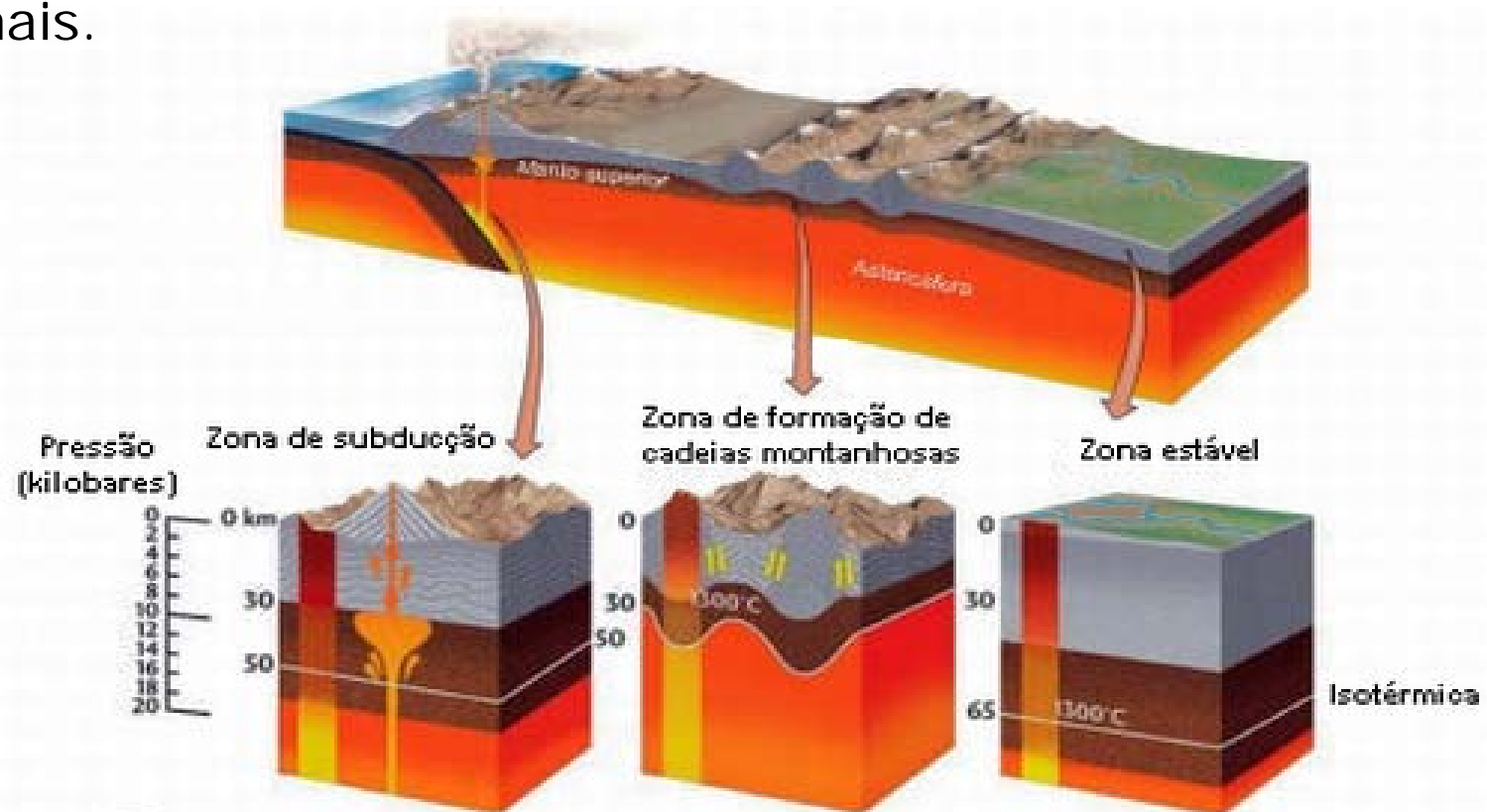
REGIMES METAMÓRFICOS

Introdução

- Desde o século 19 o metamorfismo e a intrusão granítica foram consideradas geneticamente relacionadas à formação de cinturões de dobramento (intensa deformação em rochas metamórficas).
- Em zonas convergentes, em profundidades maiores, predomina o regime dúctil. Neste regime as temperaturas altas e as pressões surgentes induzem cristalizações metamórficas.
- As paragêneses minerais formadas permitem deduzir as condições físicas tanto para o metamorfismo progressivo quanto para o regressivo.

- Em cinturões de cisalhamento (*shear-belts*) típico de margens ativas o metamorfismo é denominado de regional, podendo ser chamado também de dinâmico e ou dínamotermal.
- Além de cinturões de cisalhamento há dobras. Esta associação caracteriza os regimes tectônicos compressivos, possibilitando o espessamento crustal.

- As tentativas de estabelecer conexão entre o metamorfismo regional e os ambientes relacionadas à tectônica de placas concentrou-se em regiões de convergência ou zonas colisionais.



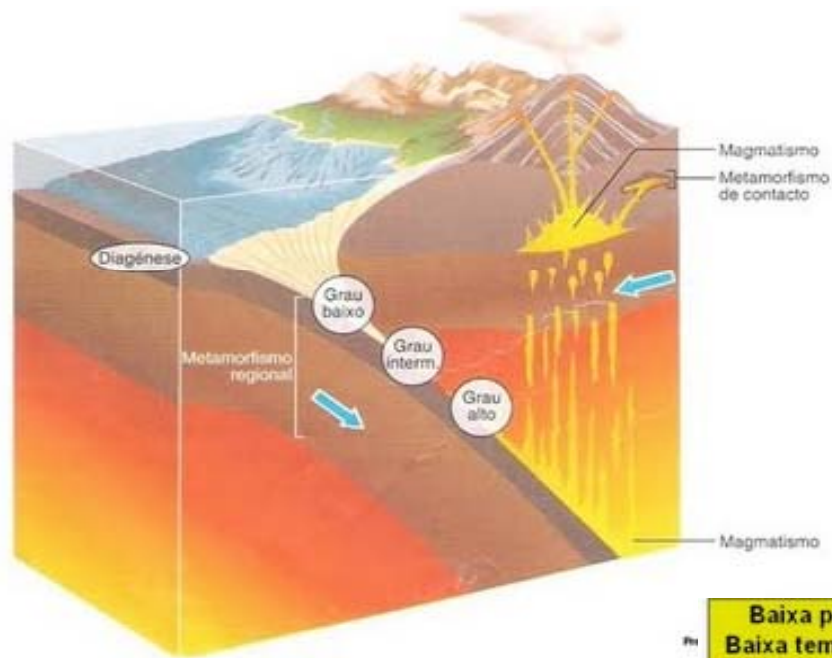
Fonte da figura: Marco Antonio B. Lima

- Nas zonas convergentes o metamorfismo pode ser gerado a partir dos seguintes processos:
 - (a) em função de **processos de baixa pressão** ($< 0,6$ Gpa) e baixa temperatura ($< 350^{\circ}$ C) nos basaltos, formando paragêneses das fácies da zeólita e prehnita-pumpellyita;
 - (b) em função de um **acréscimo de temperatura** formando a lawsonita. Nesta situação haveria uma transição entre a fácies da zeólita e fácies xisto azul;
 - (c) em função da **alta pressão** caracterizado pelo desenvolvimento dos xistos azuis com paragênese com glaucofana (anfibólio sódico), jadeíta (piroxênio) e secundariamente cianita.

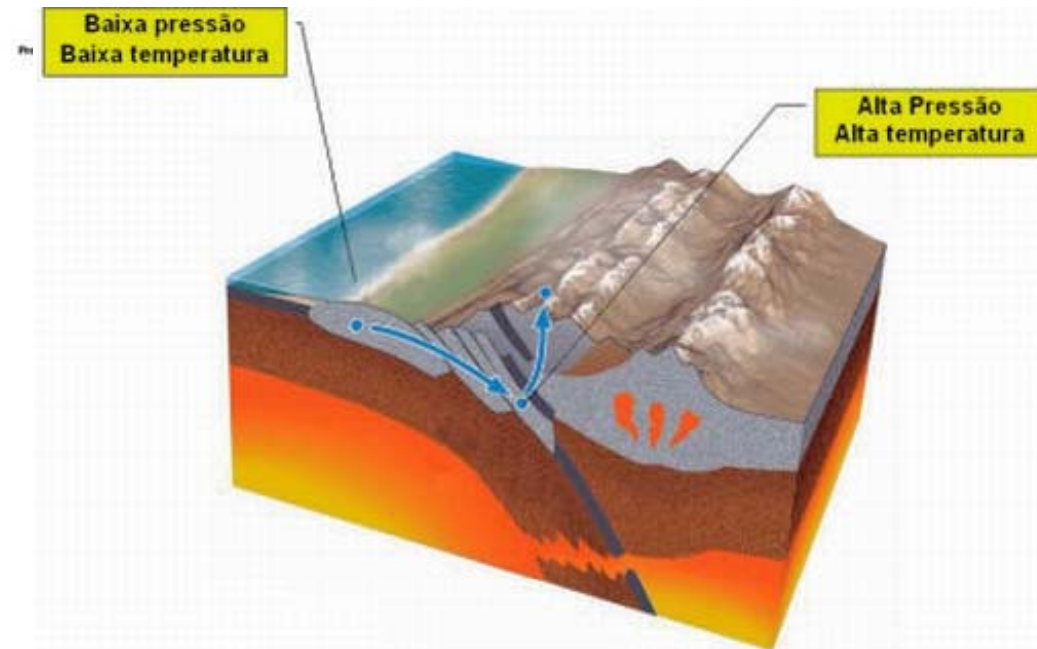
Séries metamórficas “normais” reconhecidas em vários cinturões orogênicos pelo mundo:

- Média a alta T; baixa a alta P
- Moderado a alto gradiente geotérmico
- Sequência mineral:
Caolinita → pirofilita → cianita → sillimanita
- Sequência textural (em rochas pelíticas):
Ardósia → filito → xisto → gneiss
- Sequência de Fácies :
Zeólita → prehnita-pumpellyita → xisto-verde → anfibolito → granulito

- Barroviano (média-alta T and P):
 - Desenvolvido em cinturões orogênicos em margens convergente.
 - Fluxo e calor é incrementado pela ascensão do magma e pela migração de fluidos.
 - Falha de cavalgamento com espessamento de crosta, incremento de pressão e stress dirigido.
 - Gradiente geotermal de $\sim 20\text{-}40^{\circ}\text{C}/\text{km}$
- "Xisto azul" (tipo Franciscano) (baixa T e alta P):
 - Ocorre nos cinturões orogenéticos de idade Fanerozóica
 - Associado com zonas de subducção
 - Rápida subducção da crosta oceânica com depressão das isotermas
 - Gradiente geotermal $\sim 10\text{-}20^{\circ}\text{C}/\text{km}$



- Zoneamento clássico dos tipos de metamorfismo gerado em zonas de convergência e/ou no complexo de subducção

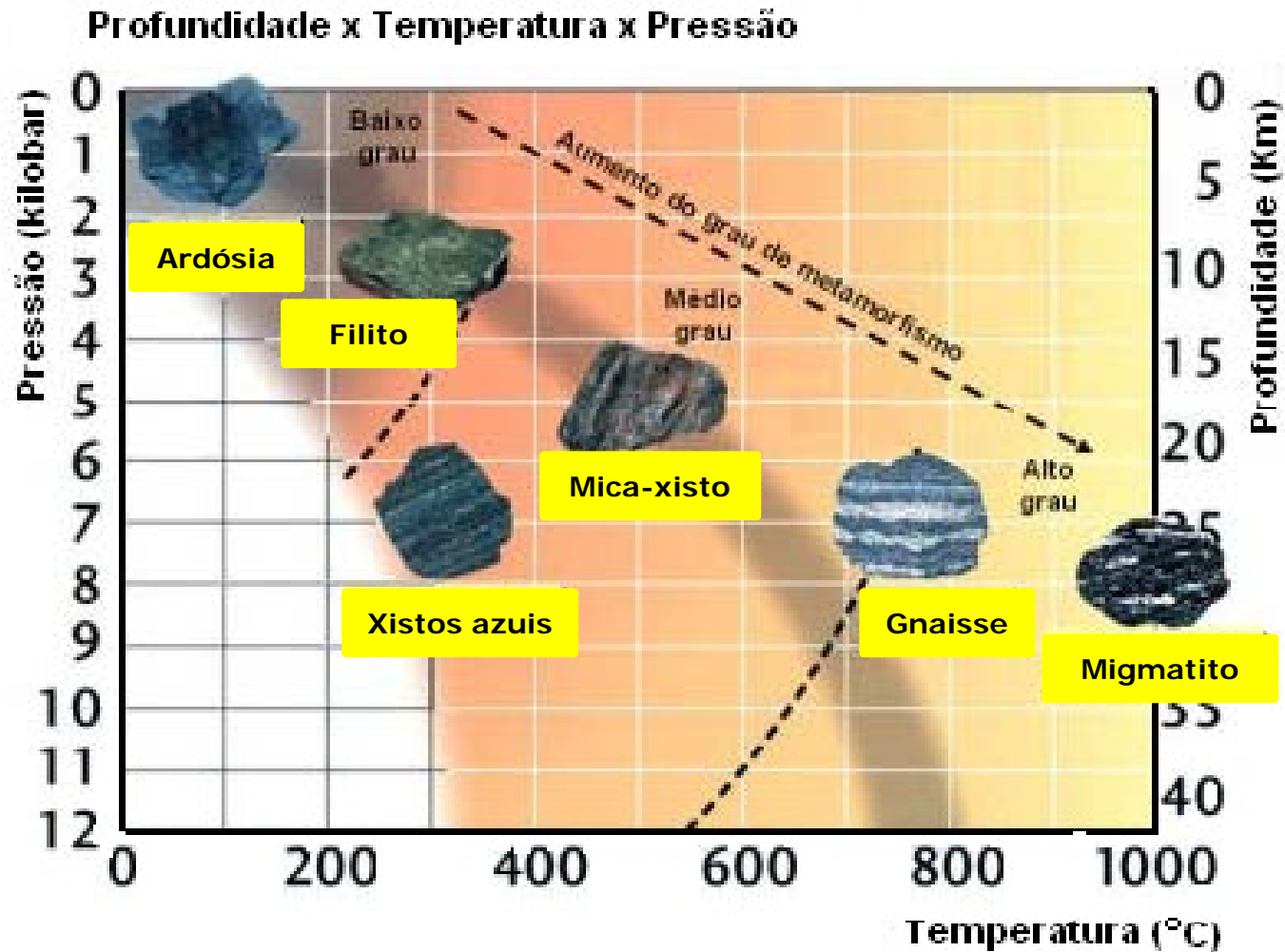


Fonte das figuras:
Marco Antonio B. Lima

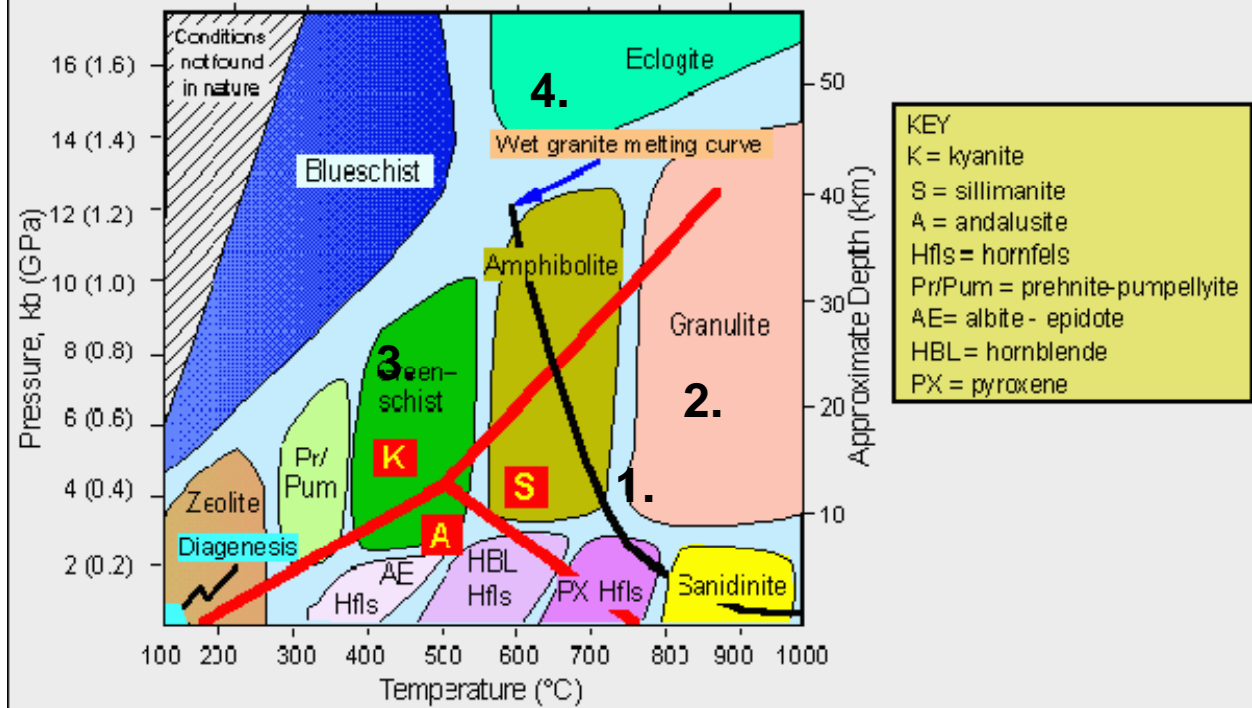
Metamorfismo regional

- Caracteriza-se por apresentar:
 - (a) grande área
 - (b) distribuição da temperatura em escala regional, independente da distribuição das massas plutônicas individuais.
- A progressividade da deformação cisalhante também torna o metamorfismo progressivo. É possível, então, demonstrar a coexistência de diversas fácies metamórficas em um mesmo ambiente tectônico com idades similares.
- O retrometamorfismo pode ser explicado da mesma maneira com origem no regime de arrefecimento, após a deformação.

- Litotipos básicos gerados nas zonas onde ocorre o metamorfismo regional / dínamotermal



Generalized Metamorphic Facies Boundaries (after Yardley, 1988)



- Rochas foliadas desenvolvidas sob média-alta T e P
 1. Buchaniano
 2. Barroviano
- Rochas desenvolvidas sob baixa-média T e alta P:
 3. Sanbagawa
 4. Franciscano

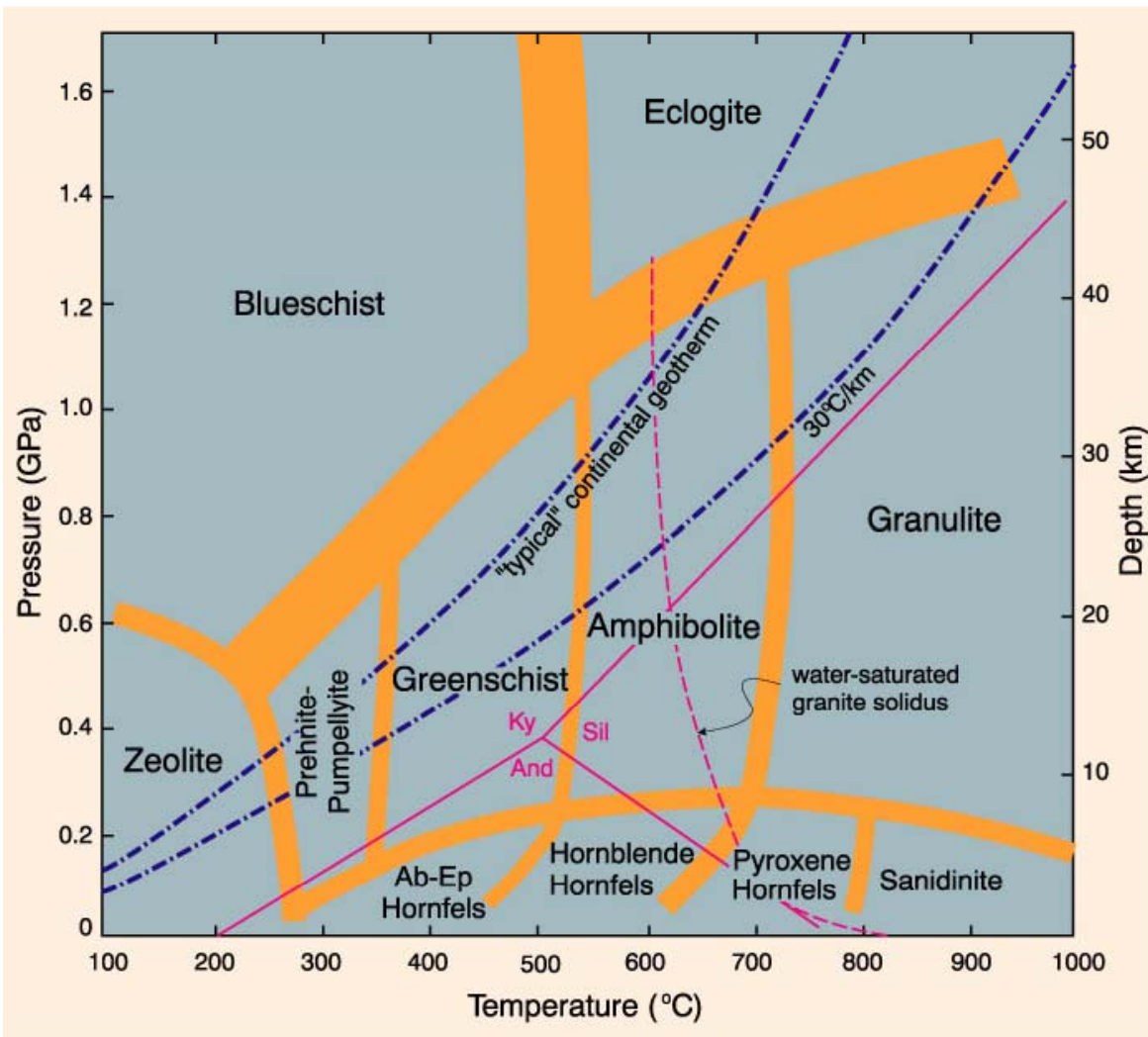
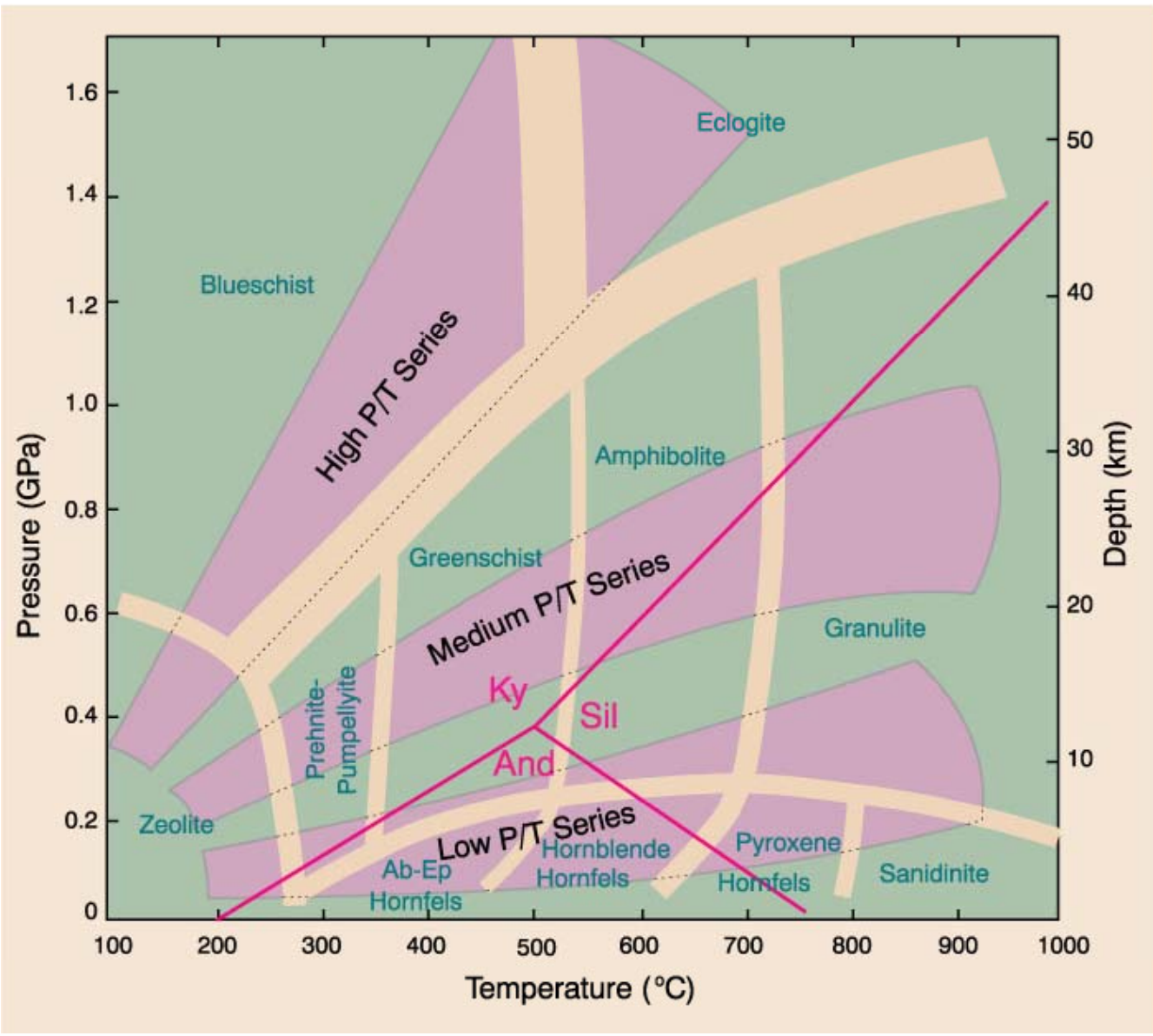
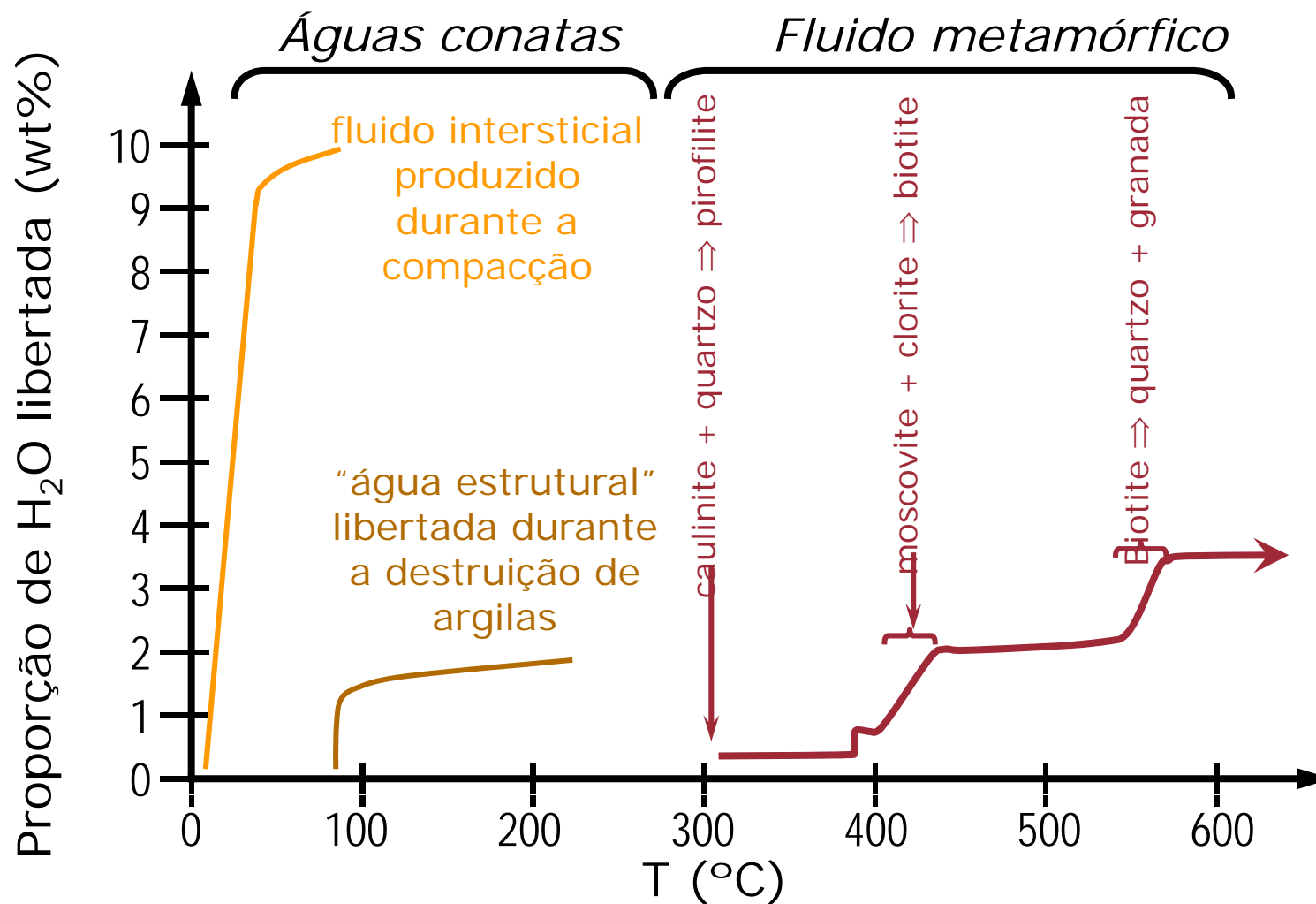


Diagrama P-T ilustrando os limites (graduais) para as diferentes fácies geotérmicas continental (Brown and Mussett , 1993).

Adaptado de Winter (2001): *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

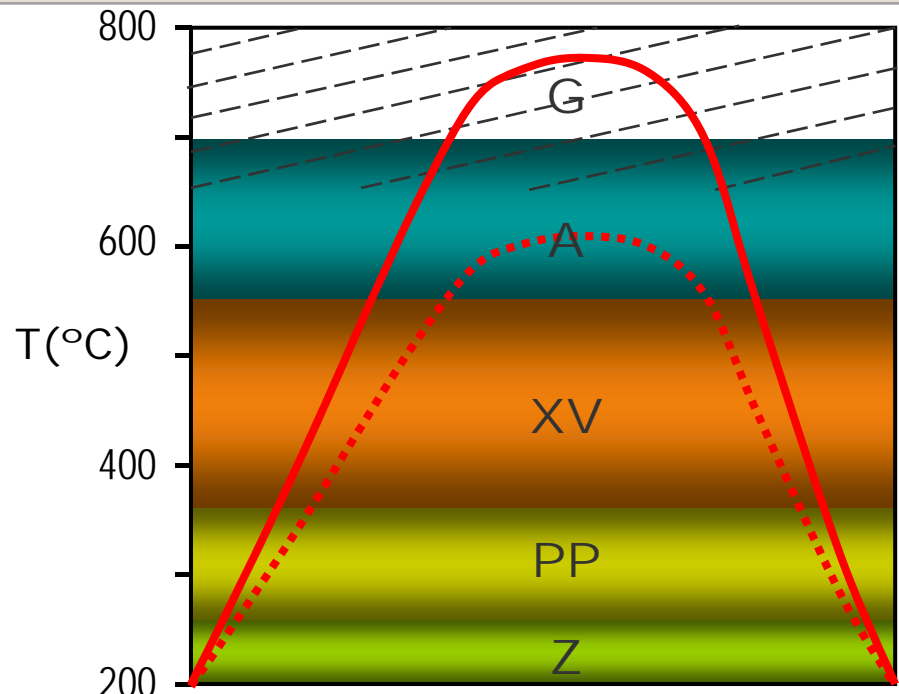


As três principais séries básticas de Miyashiro (1973, 1994).

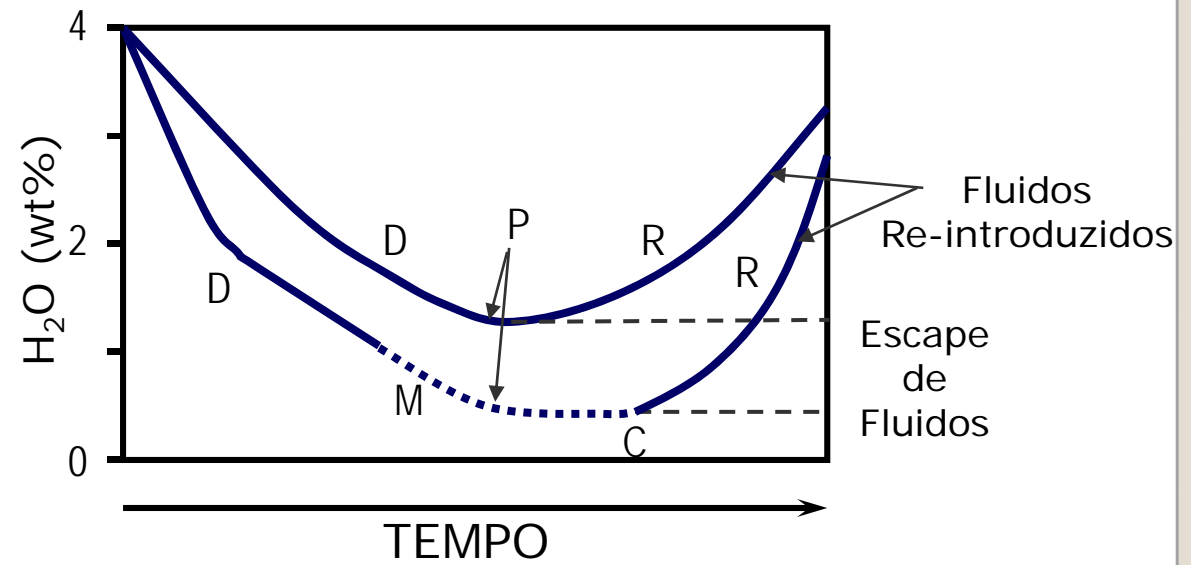


Bacia de Witwatersrand
(segundo Stevens *et al.*, 1997)

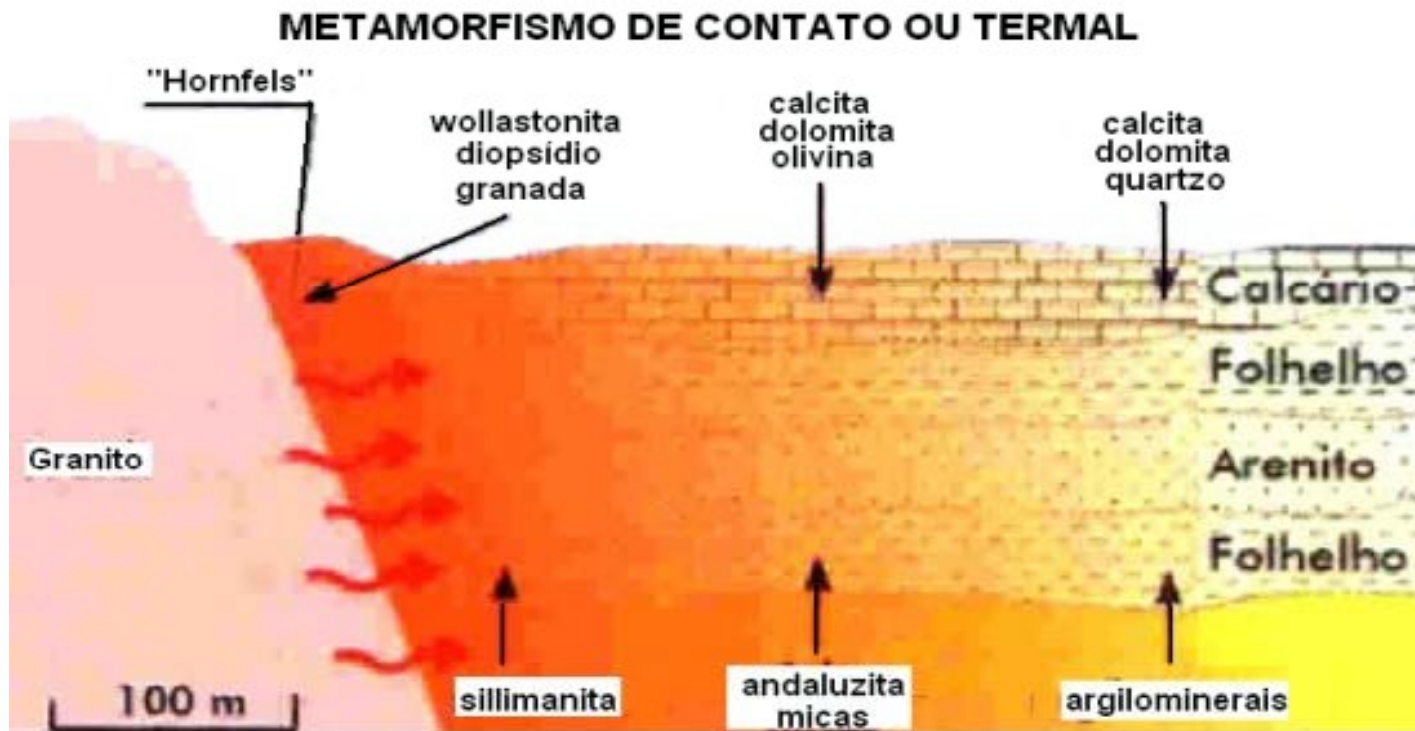
Adaptado de
Cartwright &
Oliver (2000)



D – desidratação;
M – fusão (anatexia)
C – cristalização
R – retrogradação



- Paragêneses principais relacionadas ao metamorfismo de contato, gerado em zonas onde o arco magmático se desenvolve (processos ígneos em zona de convergência).



Fonte da figura: Marco Antonio B. Lima

Evolução dos cinturões metamórficos (segundo Akiho Miyashiro)

As séries de fácies metamórficas no metamorfismo regional são classificadas nas seguintes categorias, de acordo com uma ordem de rocha geradas em pressão crescente:

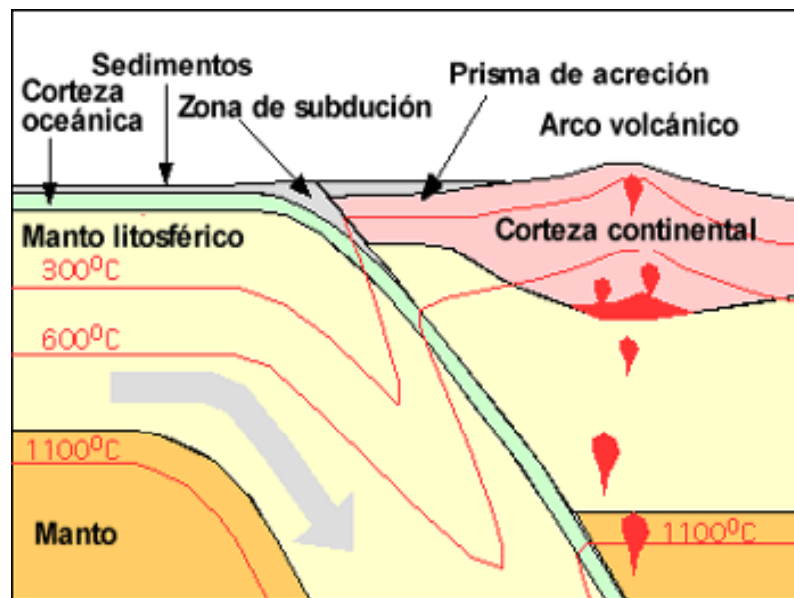
- (1) de baixa pressão grupo intermediário -tipo sillimanita-andaluzita
- (2) de intermediária a alta pressão –tipo cianita-sillimanita
- (3) de alta pressão - tipo jadeíta-glaucófana.

- No Japão e na região circum-Pacífico, um cinturão metamórfico do tipo **sillimanita-andaluzita** e/ou baixa pressão (grupo intermediário) e outro cinturão metamórficas do tipo **jadeíta-glaucófana** e/ou de alta pressão ocorrem lado a lado, formando um par.
- **São os chamados cinturões pareados.**

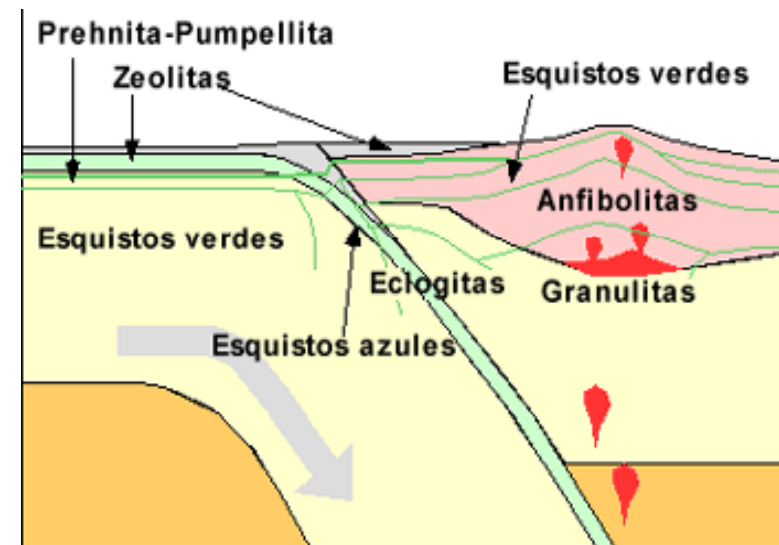
Cinturões Metamórficos Pareados

- São compostos de dois cinturões (faixas paralelas) de características contrastantes.
- A maioria é formado por um **cinturão de baixa-pressão** situado no lado continental da cadeia e um **cinturões de alta-pressão** situados no lado oceânico.
- A idade de deposição das rochas originais é geralmente mais nova nos cinturões de alta pressão que nas associações de baixa pressão.
- O cinturão de alta pressão, que pode representar antiga zona de fossa, é produzido pela subducção de uma placa tectônica fria. Os de baixa pressão em geral estão no arco magmático.

- O metamorfismo nos dois cinturões de um par é considerado como aproximadamente contemporâneo (ex. Mesozóico da costa oeste norte Americano).
- Cinturões metamórficos pareados são conhecidos em regiões circum-pacíficas: Chile, Califórnia, Alaska, Nordeste da Ásia, Japão e Nova Zelândia.

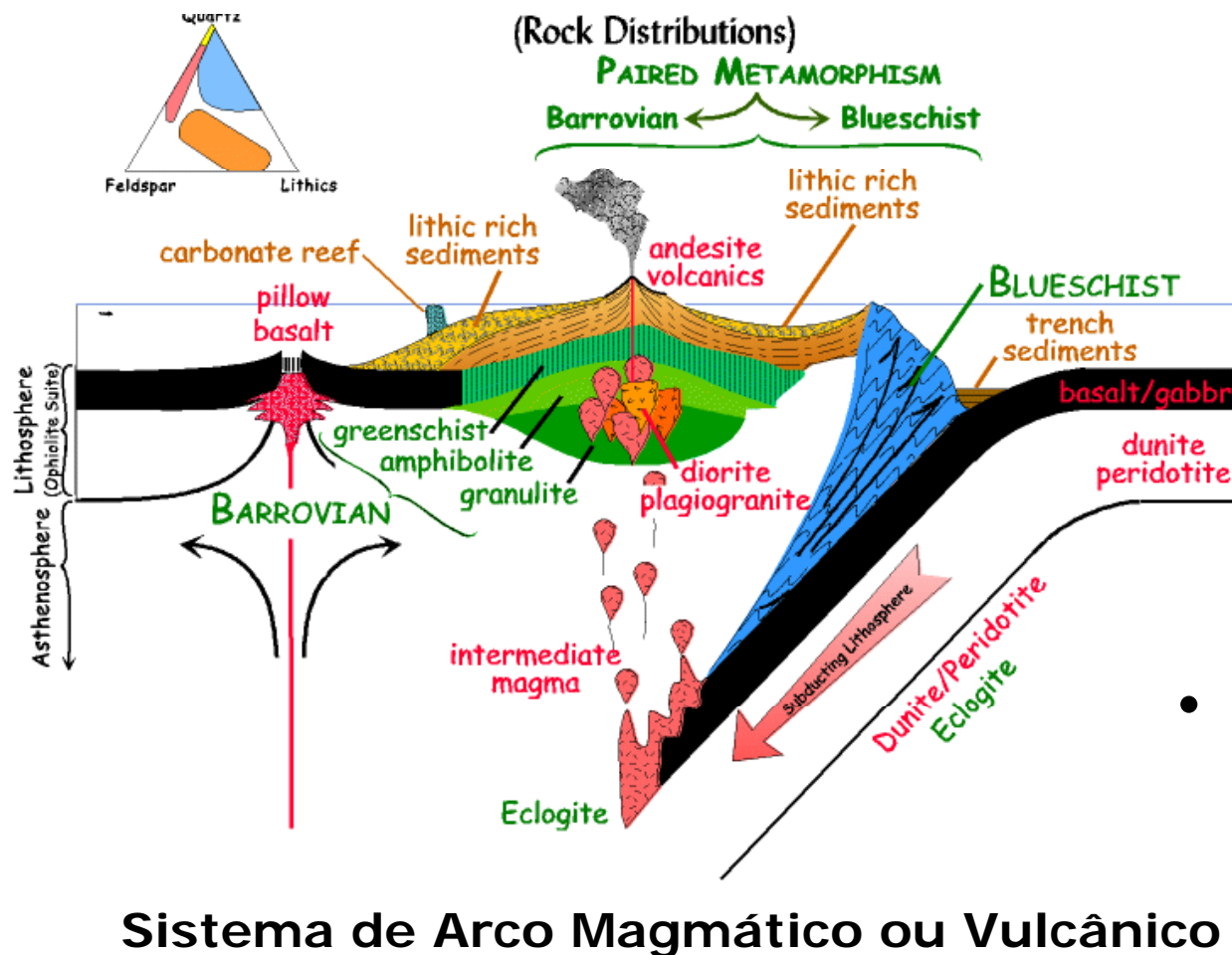


Distribución de temperaturas en una zona de subducción. Las temperaturas, con respecto a las normales a esas profundidades, son inferiores en el contacto de las dos placas y superiores bajo el arco volcánico.



Distribución de las diferentes facies metamórficas en una zona de subducción. Las facies de alta presión (esquistos azules y eclogitas) se sitúan en rocas de la litosfera que subduce y prisma de acreción, y las de alta temperatura (granulitas y anfibolitas) en proximidades del arco volcánico.

- Cinturões metamórficos pareados característicos de zonas de subducção

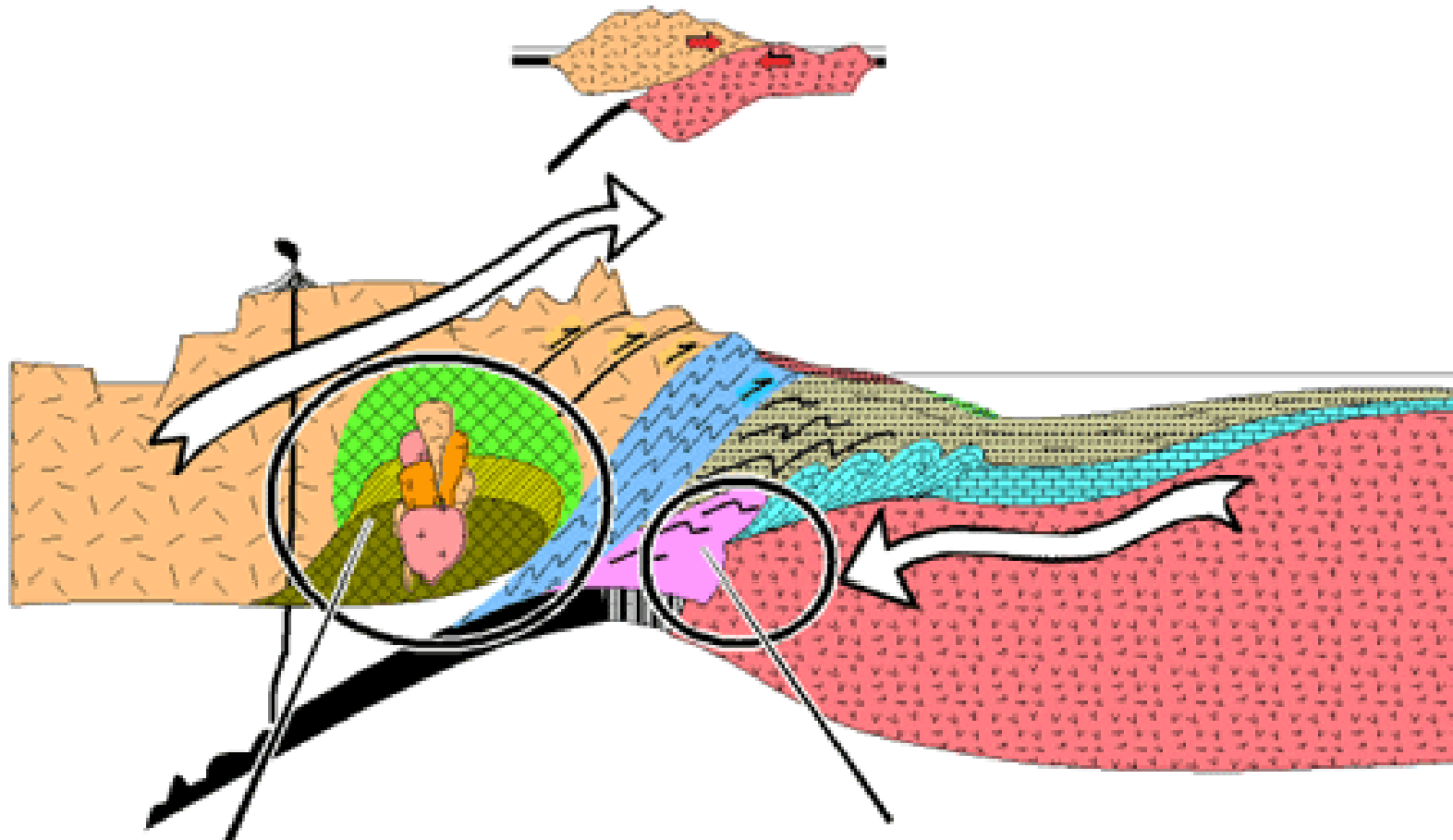


- Barroviano

- formado em rochas dentro e ao redor do arco
- Aquecimento devido à atividade magmática do arco

- Xisto azul

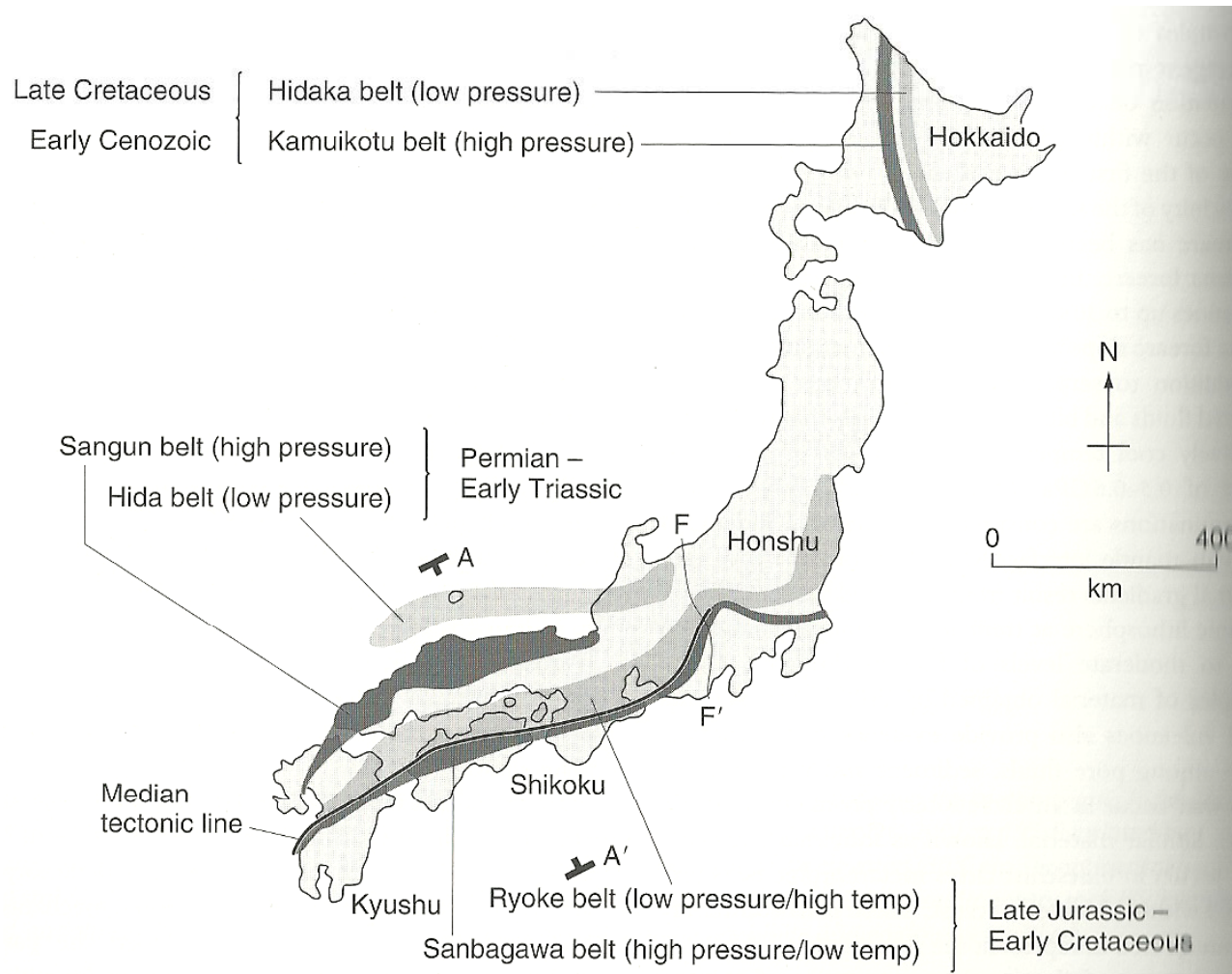
- formado na melange da trincheira



Metamorfismo de altas temperaturas debido a la intusión de rocas plutónicas

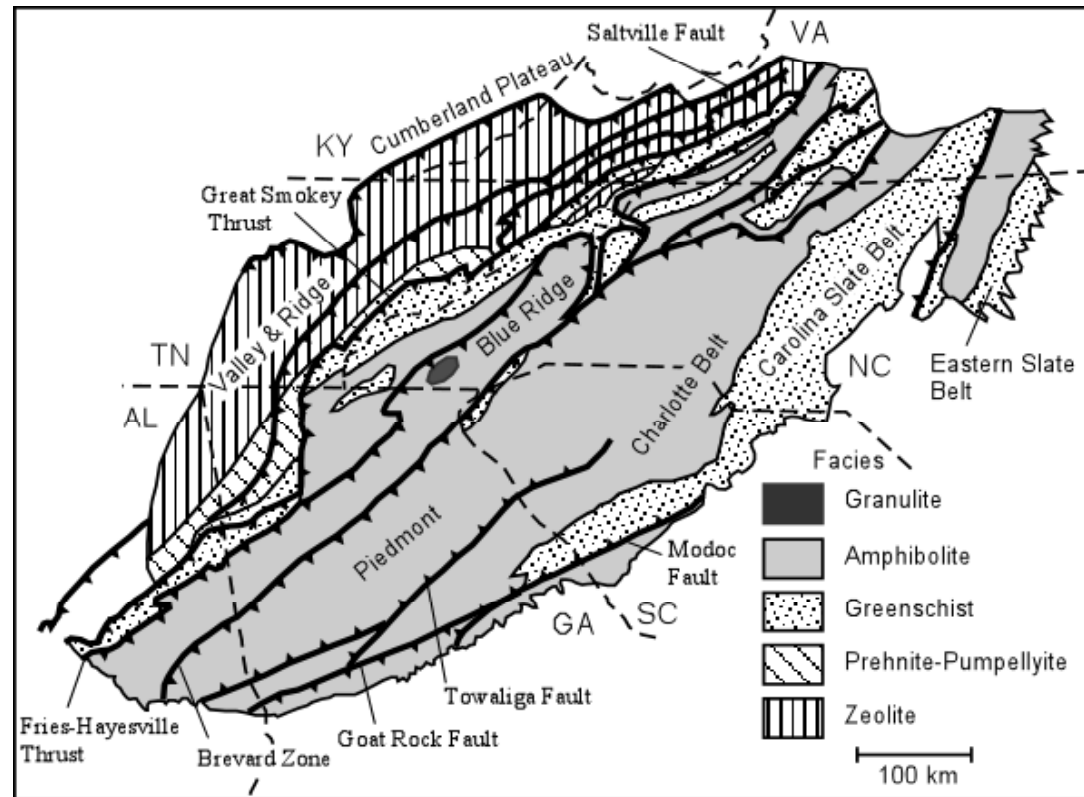
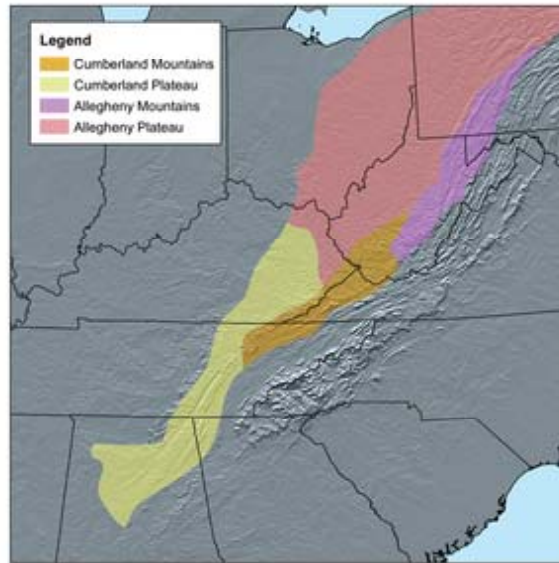
Metamorfismo de alta presión debido al aumento de presión por apilamiento de escamas tectónicas

- Subdivisão do arco do Japão por meio de cinturões metamórficos de alta e baixa pressão



Fonte: P.Kearey et al. (2009) – Global Tectonics (3ª Ed).

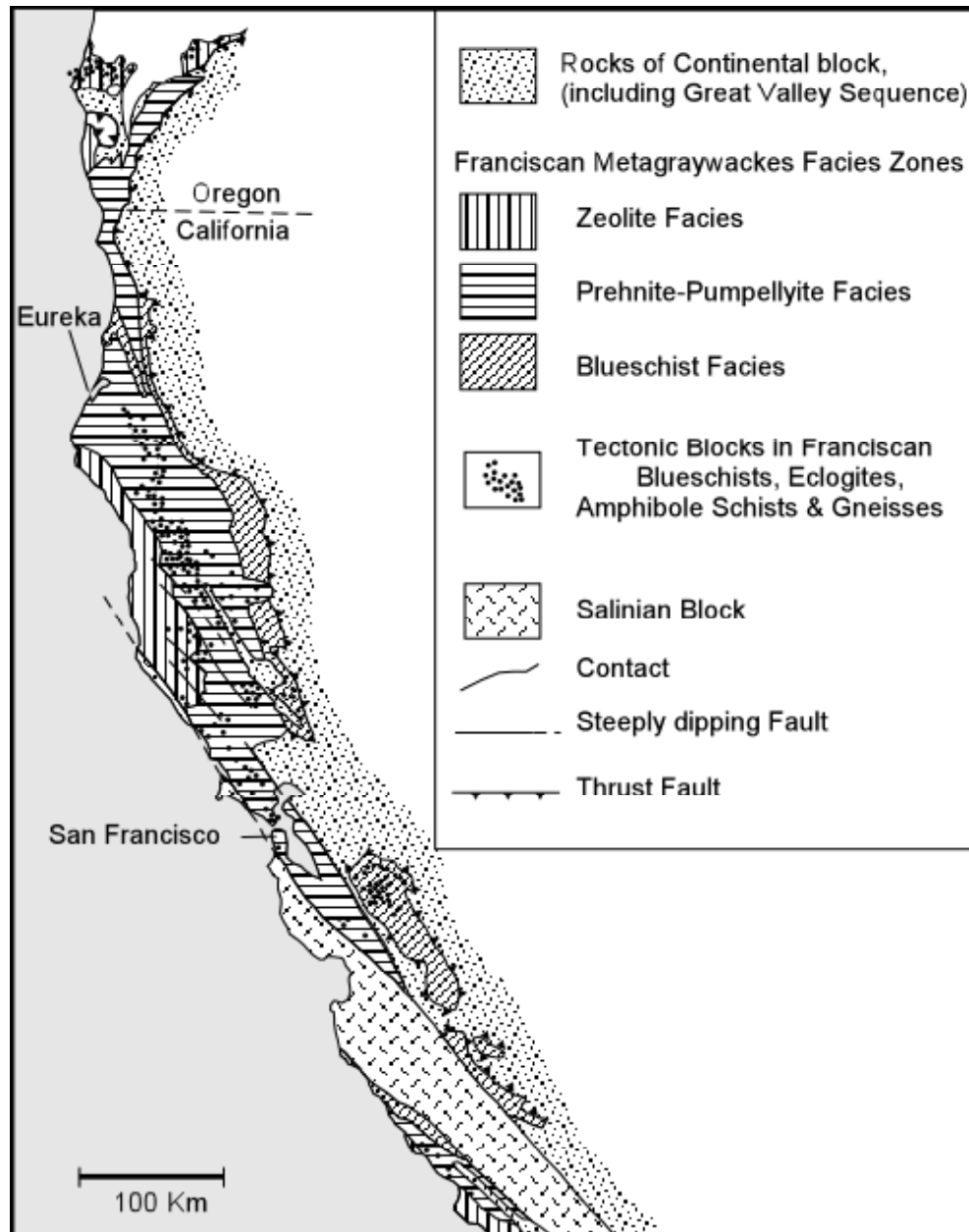
Platô Cumberland (a NW) e cadeia Apalachiana (a SE)



After Raymond, 1995

Metamorfismo de Alta Pressão em Zonas de Subducção

- Em cinturões metamórficos de alta pressão, tanto o grau metamórfico como a idade da cristalização crescem em direção ao continente.
- Cinturões metamórficos de baixa-pressão mostram estruturação mais simétrica: apresentam eixo termal a partir do qual o grau metamórfico decresce para ambos os lados.
- Entre os cinturões de alta e baixa pressão de um par existe, em geral, limitado por largas zonas de falha – principalmente - de empurrão.
- O par mais novo sempre ocorre voltado lado do Oceano Pacífico. Os cinturões provavelmente foram formados em diferentes fases de um mesmo ciclo orogênico.



- Subdivisão da zona de de falha de Santo André, por meio de cinturões metamórficos de alta e baixa pressão

Modelos de Cinturões Metamórficos de Alta Pressão

- Grupo 1: A falha entre os dois cinturões metamórficos é uma zona de Wadati-Benioff fóssil. Um complexo metamórfico de alta pressão, originado na base da zona de falha, será alçado e exposto na superfície por um movimento reversos ao longo da falha após a subducção.
- Grupo 2: O metamorfismo de alta pressão ocorre em pilhas sedimentares e na base de falha da Zona de Wadati-Benioff. O complexo metamórfico resultante é parte da crosta no lado continental da falha. A subducção tende a produzir uma distribuição estacionária da temperatura e pressão.

Obs: no **Grupo 1** a zona de falha de Wadati-Benioff está situada no limite do lado continental de terreno metamórfico de alta-pressão, enquanto o **Grupo 2** está situado perto do limite do lado oceânico do mesmo terreno

- Grupo 3: O metamorfismo de alta-pressão pode ocorrer tanto na base quanto no topo em relação à falha que demarca a zona de Wadati-Benioff. Pode haver junção dos três modelos e durante o metamorfismo as pilhas sedimentares estão sujeitas à sucessiva imbricação e de material mais jovem em sua porção basal.
- A subducção resulta na relação e subsequente exposição de porções mais velhas. Um sumário das feições geológicas dos cinturões metamórficos de alta pressão é descrito a seguir:

Características principais

(a) são caracterizados por gradientes geotermiais em torno de $10^{\circ}\text{C}/\text{Km}$.

(b) maior parte das rochas pertencem ao grau da laumontita (fácies da zeólita), da prehnita-pumpellyta (fácies glaucofana-xisto) e da fácies xisto verde.

(c) a temperatura da recristalização tende a aumentar nas proximidades das falhas maiores que limitam cinturões metamórficos de alta e baixa pressão.

(d) um terreno de alta-pressão é comumente composto de variado número de áreas menores que foram metamorfisadas em momentos diferentes (diacrônico).

(e) usualmente cinturões metamórficos de alta pressão não são acompanhados por rochas graníticas

Metamorfismo de Baixa Pressão em Zonas de Subducção

- Os arcos vulcânicos estabelecem um ambiente propício, em termos de fluxo térmico, para o metamorfismo de baixa pressão e médias a altas temperaturas ($> 500^{\circ}\text{C}$)
- Este metamorfismo também pode estar associado com *stress* diferencial, deformação e afinamento crustal. Afeta largas áreas da crosta em margens convergentes.
- A paragênese típica de baixa pressão, dependendo da composição das rochas metamorfasadas, pode ser subdividida nas seguintes zonas:
 - (a) zona da clorita-biotita
 - (b) zona da biotita-andaluzita
 - (c) zona da sillimanita.

- Os grupos mais comuns de rochas associadas ao metamorfismo de baixa pressão e temperaturas mais altas são os **xistos verdes**, os **anfíbolitos** e a **fácies granulito**.
- A transição entre as fácies xisto verde e anfíbolito se dá pelo acréscimo de T, P e presença de fluidos.
- No basalto isto se dá pela troca de actinolita para hornblenda (acréscimo de alumina e álcalis em alta temperatura).
- Em T maiores o anfíbolito transforma-se em granulito, que é formado por minerais anídricos (ortopiroxênio, clinopiroxênio e plagioclásio).

- Altas T com hidratação formam migmatitos, que é uma descrição textural de rocha composta por faixas metamórficas e material ígneo (com fusão parcial ou injeção ígnea granítica e/ou tonalítica) e a posterior segregação de material silicático. Este tipo de metamorfismo ocorre em ambientes de crosta atenuada, em arco. São formados sob gradiente geotérmico mais alto que 25°C/Km.
- Mapeamento zonal é relativamente fácil e rochas das fácies anfibolito usualmente formam zona mais extensa.
- Em zonas de baixo grau metamórfico há associação de corpos graníticos. O **emplacement** de rochas graníticas ocorre principalmente no declínio ou após o fim do metamorfismo.

O metamorfismo Barroviano pode ser sintetizado da seguinte forma:

- Baixa T e alta P
- Baixo gradiente geotermal
- Pouco *stress* dirigido (pouca deformação)
- Distinguido pela presença de anfibólios azuis sódicos
- Sequência de Fácies:
Zeolita → prehnita-pumpellyita → xisto azul → eclogito

Obs: O termo metamorfismo barroviano descreve rochas de fácies cuja as pressões são intermediárias.