

PETROLOGIA DAS ROCHAS METAMÓRFICAS

Metamorfismo: definições, agentes, tipos, distribuição na crosta

1

Petrologia Metamórfica

Definição de metamorfismo

IUGS – “Processo subsólido que produz modificações na composição mineralógica e/ou na textura (por exemplo, no tamanho dos grãos) e, frequentemente, também na composição química de uma rocha. As modificações se devem a condições físicas e/ou químicas distintas daquelas encontradas na superfície de planetas e em zonas de cimentação e diagênese abaixo desta, podendo coexistir com fusão parcial.”

2

Petrologia Metamórfica

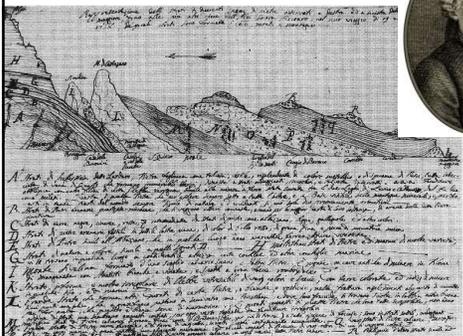
Primeiras observações sobre metamorfismo e rochas metamórficas:

- **séc.XVIII** – **Giovanni Arduíno**, nos Alpes italianos: evidências de deformação em rochas e transformação (“metamorfose”) de calcário em mármore;
- Na mesma época, **Hutton**, na Escócia: micaxistos interpretados como folhelhos modificados pela ação da P e T;
- **Charles Lyell** (1830): cunhou o termo “metamorfismo” para diferenciar da “metamorfose” de seres vivos (lagarta – crisálida – borboleta);

3

Petrologia Metamórfica

Giovanni Arduíno

4

Petrologia Metamórfica

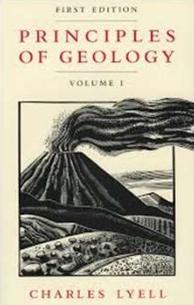
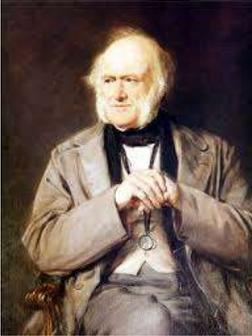
James Hutton



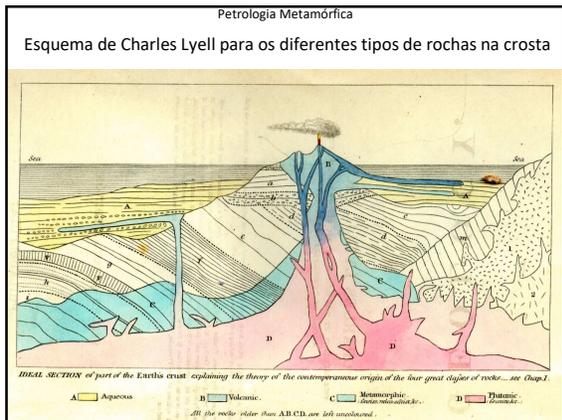

5

Petrologia Metamórfica

Charles Lyell

6



7

Petrologia Metamórfica

- **Harry Rosenbusch** (1877): descrição de uma auréola metamórfica ao redor de um granito intrusivo (ardósia → micaxisto → hornfels);
- **Grubenmann** (1904-1906): classificação das rochas metamórficas segundo sua composição e profundidade de formação estimada na crosta (**catazona, mesozona, epizona e anquizona**) – uma sistemática estática, meramente descritiva.

8

Petrologia Metamórfica

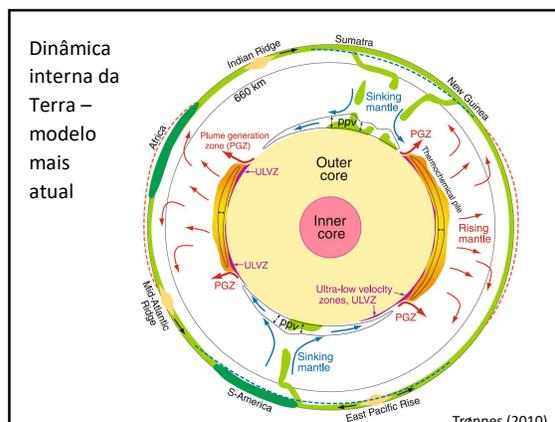
Existência de rochas metamórficas

Somente em planetas e satélites que apresentam (ou apresentaram) dinâmica interna (manto convectivo) que se reflete em uma crosta diferenciada e móvel. Principal motor: **calor interno**.

O manto da Terra, por definição, é constituído de rochas metamórficas (contínua deformação e recristalização dinâmica a altas T e P, com mudanças de fases e paragêneses).

Em planetas e satélites sem dinâmica interna, o único tipo de metamorfismo atuante é o de **impacto** (meteoritos).

9



10

Petrologia Metamórfica

Modificações promovidas pelo metamorfismo

- **Composição mineralógica** (reações metamórficas geram novas fases / associações minerais e modificam a composição destas fases);
- **Textura e estrutura** (recristalização, combinada ou não com deformação);
- **Composição química** (desidratação, decarbonatação, hidrotermalismo, metassomatismo, extração de fase fundida);

11

Petrologia Metamórfica

Rocha original = protolito

Pode ser **sedimentar** (prefixo **para-**), **ígnea** (prefixo **orto-**) ou mesmo **metamórfica** mais antiga;

As feições das rochas originais podem ser preservadas em escala e grau variáveis, permitindo reconhecer sua identidade mesmo depois do metamorfismo;

Prefixo **meta-**: metaconglomerado, metarenito, metagabro, metadiabásio, rocha metapelítica – feições preservadas, permitem identificar facilmente o protolito.

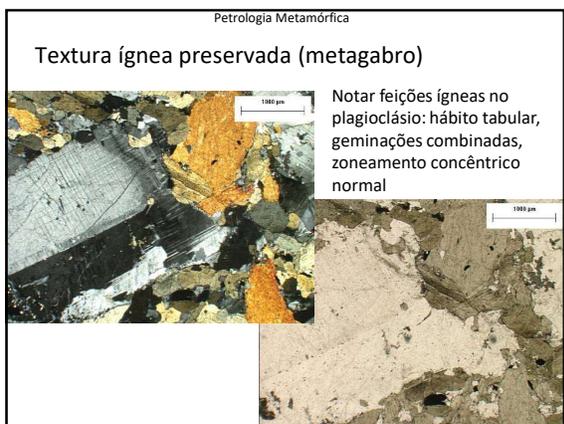
12



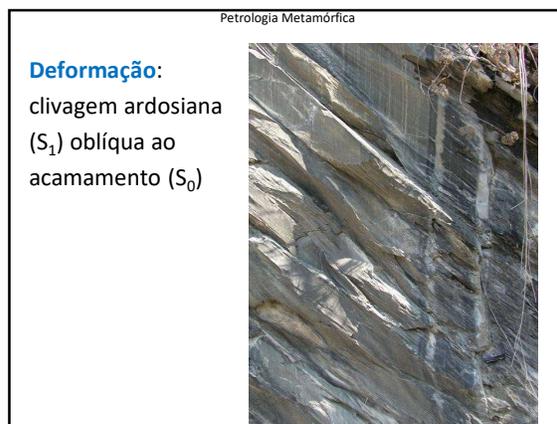
13



14



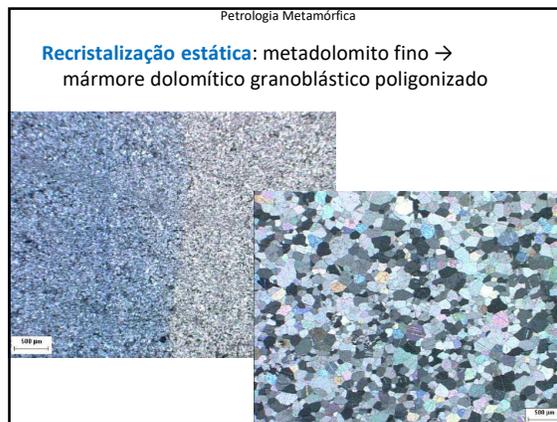
15



16



17



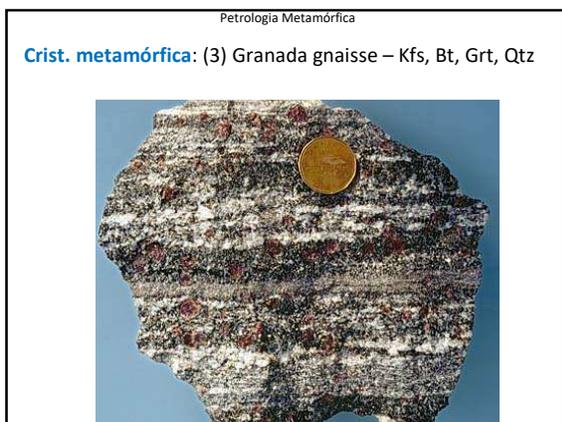
18



19



20



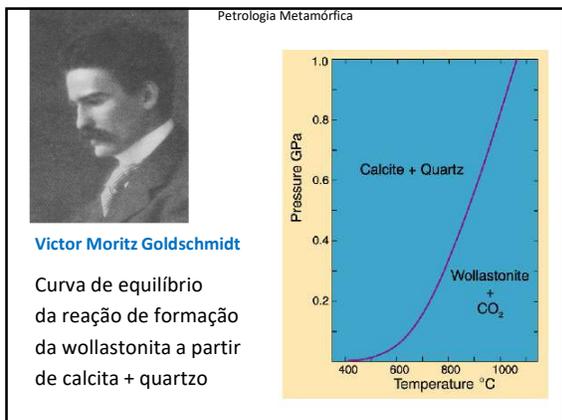
21

Petrologia Metamórfica

O estudo de terrenos metamórficos era meramente descritivo e especulativo até 1911, quando **V.M.Goldschmidt** estudou os piroxênio hornfels das auréolas de contato de corpos de granito e sienito na região de Oslo, Noruega, empregando métodos químicos e termodinâmicos; determinou que as associações de minerais metamórficos se desenvolvem seguindo regras termodinâmicas, e calculou a curva de equilíbrio da reação:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (calcita)} + \text{SiO}_2 \text{ (quartzo)} = \text{CaSiO}_3 \text{ (wollastonita)} + \text{CO}_2$$

22



23

Petrologia Metamórfica

Reações metamórficas

As **reações metamórficas** são responsáveis pela formação das **paragênese mineralis** (associações mineralis em equilíbrio termodinâmico);

Um conjunto de rochas de mesma composição, quando submetido a metamorfismo sob diversas condições P-T, apresenta associações mineralis diversas, que são típicas e diagnósticas para intervalos diferentes de P e T;

As associações metamórficas podem ser previstas, desde que sejam conhecidas a composição da rocha e as condições de P e T;

24

Petrologia Metamórfica

Reações metamórficas:
 (P1, T1) → metamorfismo → (P2, T2)
 $B + C = D + E + F$

△ - A
 ● - B
 ▭ - C

△ - A
 ● - D (+/- B OU C)
 ▭ - E
 ▮ - F

25

Petrologia Metamórfica

Reações metamórficas

Idealmente, a nova associação mineral é quimicamente equivalente à associação antiga (mesmos componentes nas mesmas proporções – **sistema fechado**)

quartzo + muscovita = ortoclásio + sillimanita + H₂O
 $SiO_2 + KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 = KAlSi_3O_8 + Al_2SiO_5 + H_2O$

A mudança das paragêneses ocorre de forma sistemática e é controlada pela composição da rocha, pressão e temperatura

26

Petrologia Metamórfica

Transporte de componentes nas reações

- **Difusão intracristalina:** muito lenta, facilitada pela propagação de defeitos cristalinos; aumenta com T e deformação;
- **Difusão intercristalina** = transporte por fase fluida; nos contatos intergranulares e em microfissuras / clivagens - mais eficiente, especialmente se houver disponibilidade de fluido e porosidade / permeabilidade (primária ou induzida por deformação)
- **Volume de reação:** definido pela distância de transporte dos componentes na textura.

27

Petrologia Metamórfica

Difusão intracristalina: facilitada pelos defeitos do retículo cristalino – modelo simplificado em ligas metálicas

www.substech.com

28

Petrologia Metamórfica

Blastese = nucleação + crescimento cristalino

Breakdown of reactants in matrix
 Growing grain of product
 Nucleus of product
 Transport to growing surfaces
 Heat Supply

29

Petrologia Metamórfica

Tipos principais de reações metamórficas

Reações com participação de fluidos (hidratação / desidratação ou carbonatação / decarbonatação)

- cloritóide + cianita = estauroлита + clorita + quartzo + H₂O
- calcita + quartzo = wollastonita + CO₂

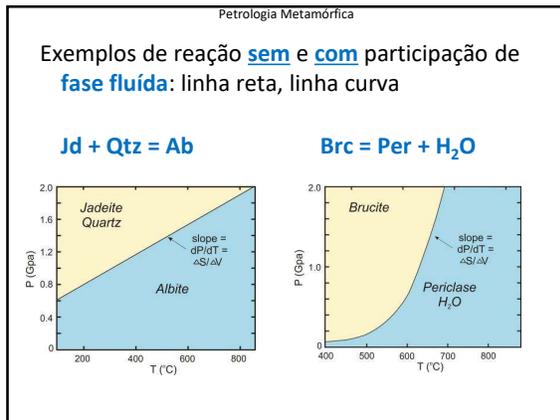
Reação sólido-sólido

- cianita = sillimanita (polimórfica)
- dióxido de silício + granada + quartzo = plagioclásio + ortopiroxênio

Reação com participação de fusão

- biotita + sillimanita + quartzo + plagioclásio = granada + cordierita + feldspato potássico + líquido

30



31

Petrologia Metamórfica

Tipos de reações metamórficas:
descontínuas x contínuas

- **Descontínuas**: as reações ocorrem sem variação significativa de composição (substituições catiônicas; solução sólida) nas fases envolvidas. A curva de equilíbrio é uma linha bem definida no espaço P x T;
- **Contínuas**: a composição das fases varia com as condições metamórficas; a reação não pode ser representada por uma linha simples no espaço P x T; as fases reagentes e produto coexistem por grandes intervalos, com mudança sistemática nas respectivas composições.

32

Petrologia Metamórfica

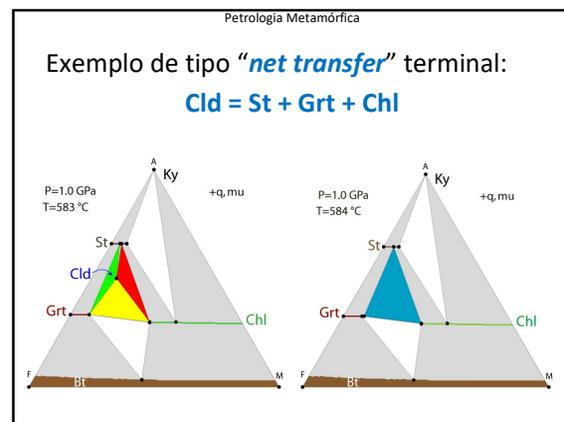
Tipos de reações metamórficas

- Reações de **transferência integral** (“*net transfer*”): componentes químicos são transferidos de fases antigas para as recém-formadas; ou seja: fases aparecem e desaparecem.

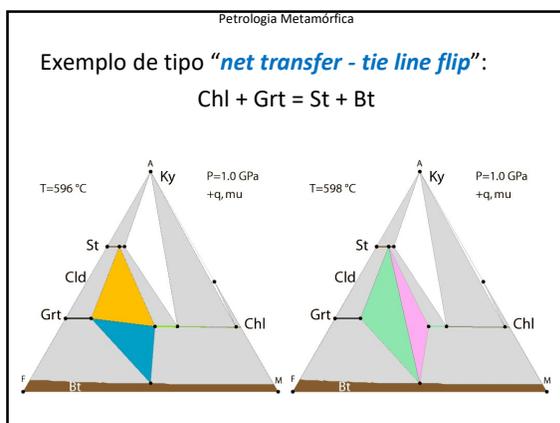
Ex: $Jd + Qtz = Ab$; $2Alm + 4Sil + 5Qtz = 3Fe-Crd$; $Gr + Qtz = An + 2Wo$.

Podem ser do tipo **terminal** (uma fase se quebra por si em outras fases) ou de “**tie line flip**” (fases anteriormente em desequilíbrio passam a coexistir em equilíbrio e fases originalmente em equilíbrio passam a não mais coexistir em equilíbrio).

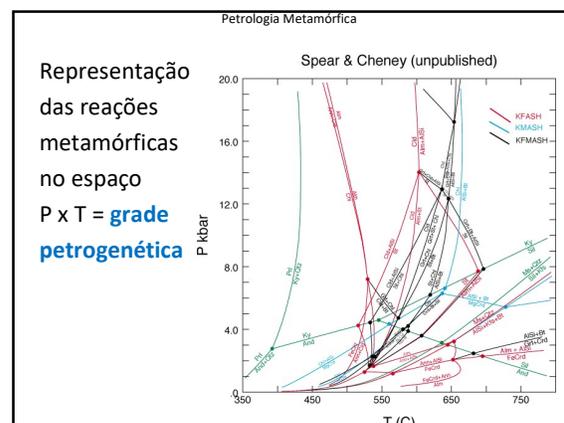
33



34



35



36

Petrologia Metamórfica

Limites do Metamorfismo (arbitrários, variáveis)

Limite inferior: diagênese. O limite varia em função da sensibilidade da associação mineral dos protólitos (algumas mais reativas, outras mais estáveis mesmo a $T > s$), de 150 ± 50 °C até em torno de 300 °C.

- Formação dos minerais Fe-Mg-carpofilita, glaucofânio, lawsonita, paragonita, prehnita, pumpellyita ou stilpnomelano (problema: grãos detríticos destes em sedimentos não-metamórficos exigem critérios texturais);
- Reação **caolinita + quartzo = pirofilita**
- Transformação de matéria orgânica em carvão (antracito)

37

Petrologia Metamórfica

Limite superior: anatexia (fusão parcial). Líquidos graníticos podem ser gerados a partir de aproximadamente 600 °C na crosta, mas rochas mais refratárias podem persistir sem fusão a temperaturas superiores a 1.000 °C até.

- Em ambiente litosférico / crustal: interface com as rochas ígneas, através da fusão parcial (entre 650 – 1100 °C). **Onde acabam os migmatitos e começam os magmas *sensu stricto*?**
- Em ambiente mantélico: na recristalização de peridotitos, temperaturas superiores a até 1.500 °C;

38

Petrologia Metamórfica

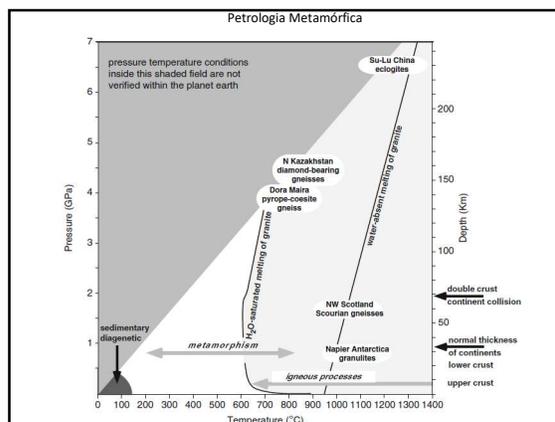
Limites em termos de Pressão (P)

- **Limite inferior:** metamorfismo de contato próximo à superfície – poucos bar;
- **Limite superior:** em função do ambiente tectônico

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 com coesita e diamante: $P > 35 - 45$ kbar, profundidade > 150 km; granada peridotitos de complexos ofiolíticos: $> 30 - 40$ kbar (P mantélicas).

39



40

Petrologia Metamórfica

Agentes do metamorfismo
calor, pressão, deformação e fluidos

Fatores condicionantes:

- I. Temperatura
- II. Pressão: litostática e dirigida (deviatória)
- III. Fluidos
- IV. Composição dos protólitos (química, mineral)
- V. Características físicas dos protólitos
- VI. Tempo

41

Petrologia Metamórfica

I. Temperatura = energia térmica - várias fontes:

- **Calor residual da formação do planeta**
- **Decaimento radioativo** (isótopos de meia-vida longa)
- Calor de fricção (falhas: pseudotaquilitos)
- Reações exotérmicas (infinitesimal)

Crosta continental antiga: calor residual – 45 a 75%

Crosta oceânica: calor residual – 75 a 90%

42

Petrologia Metamórfica

Formas de transmissão de calor:

- **Radiação** (e.g. através de vácuo)
- **Condução** (estado sólido, fluídos baixa viscosidade)
- **Convecção** (fluídos, massas viscosas)

Fontes de calor na litosfera:

- Fluxo de calor do manto para a base da crosta (convecção + condução);
- Calor gerado por decaimento radioativo na crosta continental;
- Calor transportado por intrusões magmáticas e fluídos hidrotermais

43

Petrologia Metamórfica

Conseqüências do aumento de temperatura nas rochas:

- **Recristalização** (diminui relação superfície / volume – aumenta estabilidade);
- Promove **reações metamórficas** (modifica campos de estabilidade: fases em desequilíbrio são consumidas, novas fases em equilíbrio produzidas);
- Facilita a **transposição de barreiras cinéticas** (metaestabilidade). T^o altas: equilíbrio mais eficiente;
- Promove **circulação de fluídos metamórficos**

Via de regra, T aumenta com P (ou seja: profundidade) na crosta terrestre = **grau geotérmico**

44

Petrologia Metamórfica

Fluxo térmico em diversos locais da crosta terrestre:

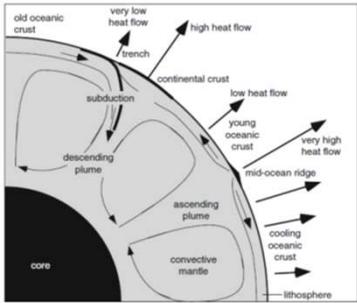
- **Crosta oceânica jovem** (< 4 Ma): 250 mW/m²
- **Crosta oceânica antiga** (~ 200 Ma): 38 mW/m²
- **Cinturões orogênicos jovens**: 150 mW/m²
- **Crosta continental** (> 800 Ma): 40 mW/m²

Gradientes geotérmicos na superfície da crosta: entre 10 a 60 °C / km (sondagens, minas profundas). Em regiões estáveis, não-orogênicas: ~ 25 °C / km.

45

Petrologia Metamórfica

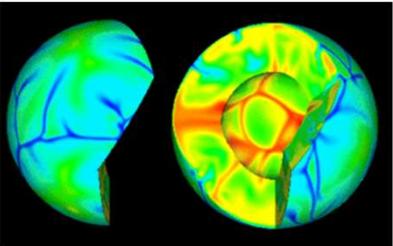
Fluxo térmico na superfície da Terra em diferentes compartimentos tectônicos



46

Petrologia Metamórfica

Tomografia térmica da Terra: em azul: T mais baixas (placas oceânicas “frias” em subducção); em laranja-vermelho: T mais altas (ascensão de plumas mantélicas, celas de convecção no manto)



47

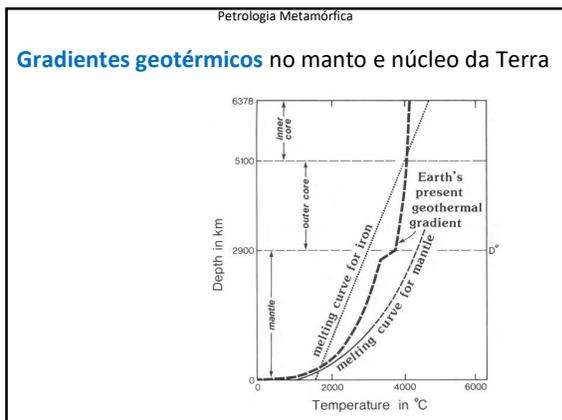
Petrologia Metamórfica

Gradientes geotérmicos: estáveis (*steady-state geotherms*) e **transicionais** (*transient geotherms*):

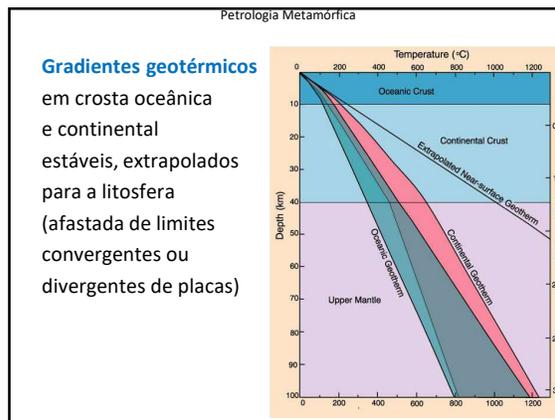
Gradiente geotérmico estável: balanço na quantidade de calor que entra e sai de um determinado volume crustal – perfil profundidade (P) x T se mantém constante ao longo do tempo – mantém T constante;

Gradiente geotérmico transicional: quantidade de calor que chega é maior ou menor do que sai – aumento de temperatura do volume crustal (metamorfismo progressivo, reações endotérmicas) ou resfriamento (favorece reações exotérmicas)

48



49



50

Petrologia Metamórfica

II. Pressão: litostática, de fluidos e dirigida (deviatória = tensões)

Pressão litostática (P_{lit}) = $\rho g z$

ρ = densidade das rochas sobrejacentes
 g = aceleração da gravidade
 z = profundidade (ou h = alt.coluna de rochas)

Unidades: GPa (1Pa = 1N/m² = kgm/s²) ou:
 kb (1 kb = 10⁻¹ GPa)

51

Petrologia Metamórfica

P_{lit} : depende da coluna de rochas sobrejacente

Rocha:	ρ (g/cm ³):	Prof.1 km: P em kbar
granito	2,7	0,264
basalto	3,0	0,294
peridotito	3,3	0,323

Para atingir $P_{lit} = 1$ kbar:

Rocha:	Profundidade:
granito	3,8 km
basalto	3,4 km
peridotito	3,1 km

H₂O mar: 9 – 10 km (fossa das Filipinas)

52

Petrologia Metamórfica

Pressão de fluidos (P_{fl}):

pressão transmitida através dos fluidos intersticiais. É a soma das pressões parciais dos vários componentes da fase fluida ($P_{fl} = P_{H_2O} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_{\dots}$)

- $P_{lit} > P_{fl}$: a pressão é toda concentrada nos contatos dos grãos
- $P_{lit} = P_{fl}$: a pressão dos fluidos atenua a pressão nos contatos dos grãos e se equipara à pressão litostática;
- $P_{lit} < P_{fl}$: pode ocorrer fraturamento hidráulico, se a resistência tensional da rocha for superada

53

Petrologia Metamórfica

A grandes profundidades (e pressões), qdo $P_{lit} > P_{fl}$, os contatos entre grãos sólidos começam a se dissolver e migrar, diminuindo o espaço intergranular no qual estão os fluidos, até que $P_{lit} = P_{fl}$.

54

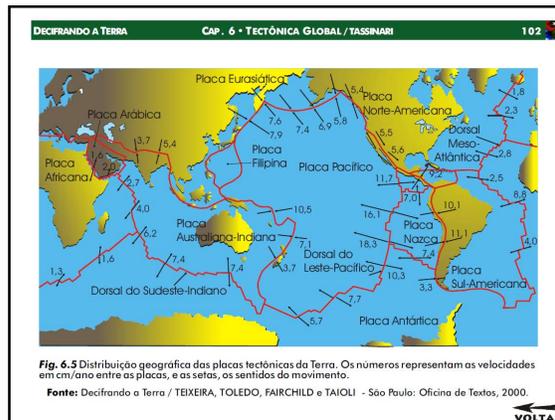
Petrologia Metamórfica

Pressão dirigida, ou deviatória: varia conforme a direção, em um campo de tensões heterogêneo.
Origem: movimentos tectônicos da litosfera.

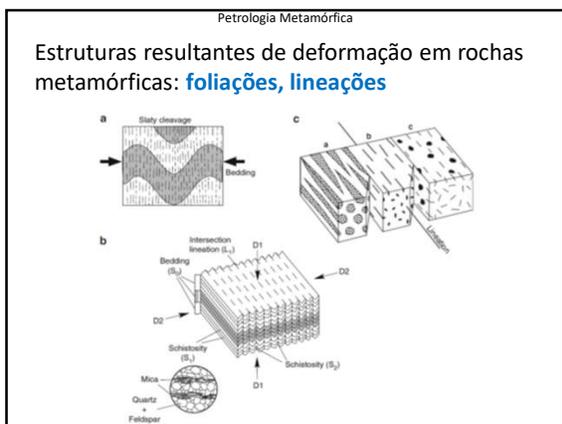
Descrita através de 3 componentes ortogonais:
 σ_1 = direção de maior tensão
 σ_2 = direção da tensão intermediária
 σ_3 = direção de menor tensão

Consequências:
 - **Deformação** (achatamento, cisalhamento, ruptura);
 - Desenvolvimento de orientação dos minerais = **foliação metamórfica**

55



56



57



58

- Petrologia Metamórfica
- III. Fluidos:** várias origens
- **Devolatilização de pilhas sedimentares** (água intersticial: salmouras!, água estrutural de argilominerais, CO₂ de carbonatos, etc); importante nos estágios iniciais
 - **Reações metamórficas de devolatilização;**
 - **Fluidos magmáticos** (granitos);
 - **Águas oceânicas;**
 - **Águas meteóricas.**

59

- Petrologia Metamórfica
- Importância dos fluidos no metamorfismo**
- Transporte de componentes nas reações entre as fases reativas;
 - Catalizadores de reações metamórficas;
 - Estabilidade de fases e associações minerais (hidratadas, carbonatadas, etc);
 - Transporte de calor (advectivo);
 - Transporte de componentes (metassomatismo);
 - Deposição de minerais de minérios

60

Petrologia Metamórfica

IV. Composição das rochas (protólitos):

define as paragêneses que irão (poderão) se desenvolver sob as diferentes condições no campo P x T

- **Pelitos** – sistema fundamental: **KFMASH** (mais completo: **NaCaMnKFMASHTiO**)
- **R. máficas / básicas** – **NCMASH**
- **R. ultramáficas / ultrabásicas** – **MSH, MSHCO₂, CMSH, CMASH, NCAMSH**, etc
- **R. carbonáticas silicosas** – **CMSHCO₂**
- **Gnaisses** – **NCKASH**
- **R. calciosilicáticas** – “sopa de letrinhas”...

61

Petrologia Metamórfica

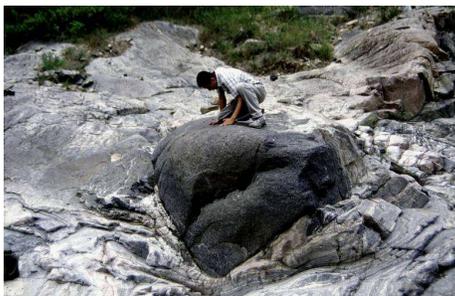
V. Características físicas dos protólitos:

- **Comportamento reológico** - se dúctil, dúctil-rúptil ou rúptil; comparativamente: rochas competentes x incompetentes – boudinagem, lenticularização, fraturamento, tipo de foliação;
- **Se orientado ou isotrópico;**
- **Porosidade;**
- **Geometria e dimensão dos corpos** - se tabular ou irregular, espessura, etc;

62

Petrologia Metamórfica

Boudin de anfibolito em migmatito deformado:
estrutura resultante da diferença de competência



63

Petrologia Metamórfica

VI. Tempo: velocidade e duração dos processos

Exemplos:

- empilhamento tectônico x aquecimento (relaxamento termal)
- exumação x resfriamento
- velocidade de deformação
- difusão dos componentes nos retículos cristalinos
- tempo de permanência em contato com uma fase fluida, etc

64

Petrologia Metamórfica

Tipos de metamorfismo**Com base nos agentes predominantes:**

- De contato ou termal (T)
- Dinâmico (P_{dir})
- Dínamo-termal (T, P_{lit}, P_{fl}, P_{dir})

Com base no ambiente e extensão na crosta:

- I. Regional (orogênico, fundo oceânico, soterramento)
- II. Termal (inclui pirometamorfismo)
- III. De zonas de falha (dinâmico)
- IV. De impacto ou de choque (meteoritos)
- V. Hidrotermal

65

Petrologia Metamórfica

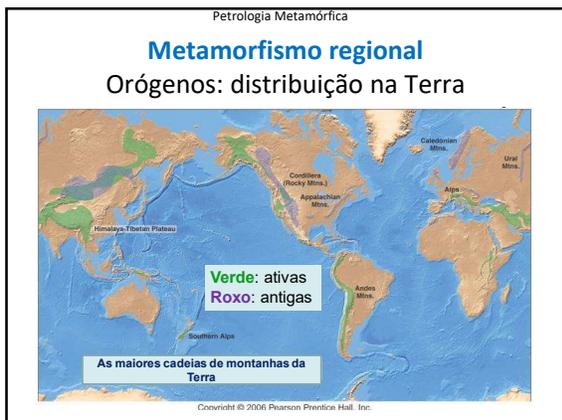
I. Metamorfismo regional (*sensu lato*): afeta grandes extensões da crosta

(1) Orogênico: em orógenos de margens convergentes (arcos de ilha, colisões continentais)

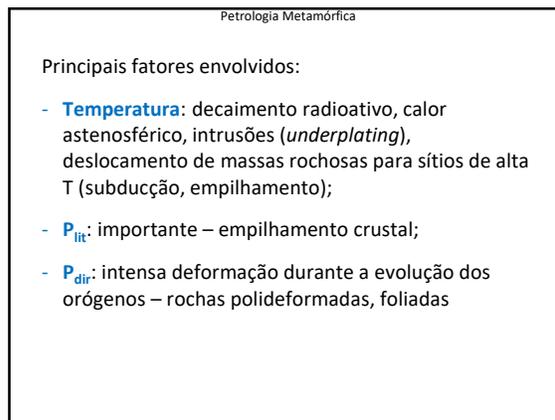
Dinamotermal, gradientes geotérmicos elevados, intensa deformação (rochas tipicamente foliadas), padrões polimetamórficos, batólitos graníticos s.l. nas zonas centrais de alto grau.

Exemplos: Andes, Himalaias, Japão, Escócia, Apalaches, Cinturão Brasileiro, Cinturão Ribeira, Alpes, etc.

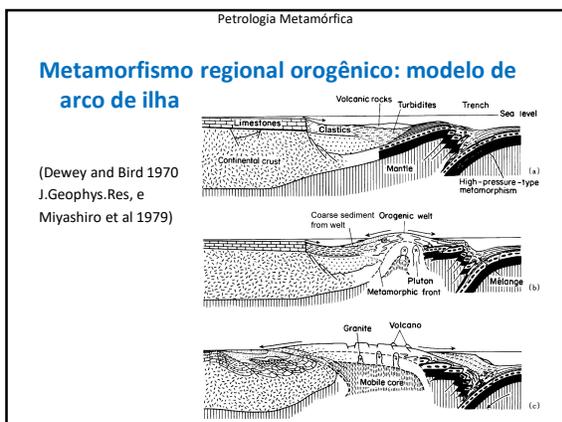
66



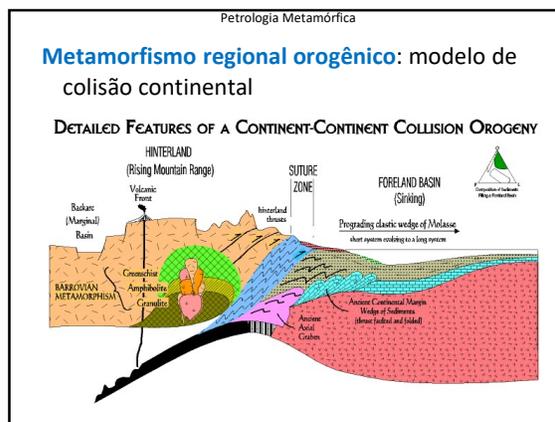
67



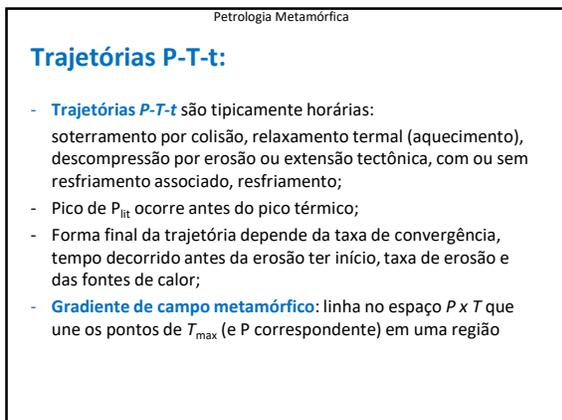
68



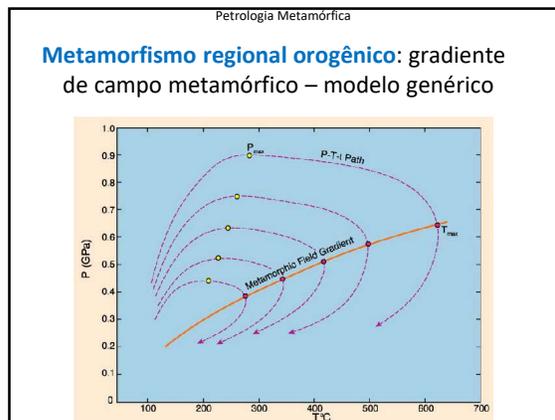
69



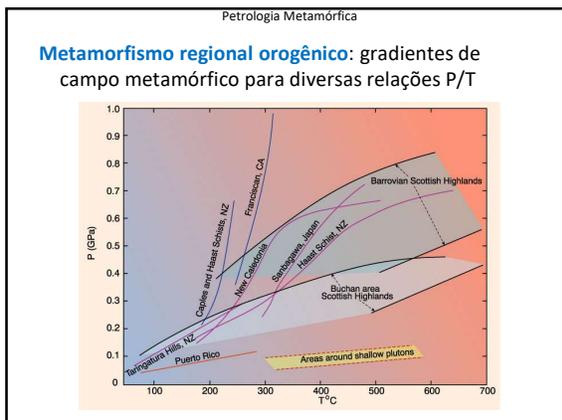
70



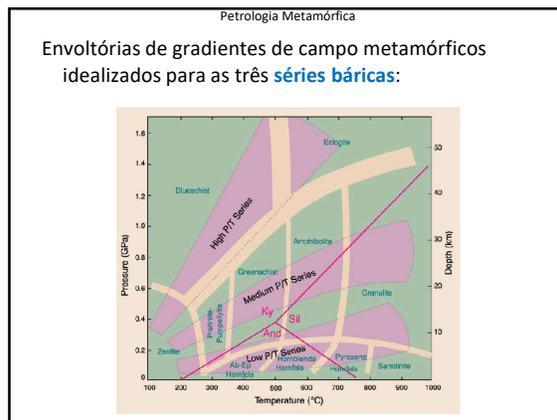
71



72



73



74

Petrologia Metamórfica

Metamorfismo regional orogênico – tipos báricos

- **Alta pressão (altas P/T)** – tipo Franciscano, Sanbagawa, etc
- **Pressão intermediária (P/T intermediária)** – tipo Barroviano;
- **Baixa pressão (baixas P/T)** – tipo Buchan, Abukuma, etc

Cinturões pareados (Miyashiro, 1961, 1967) : em arcos de ilha, e.g. Japão – justaposição de terrenos de alta P/T e baixa P/T.

75

Petrologia Metamórfica

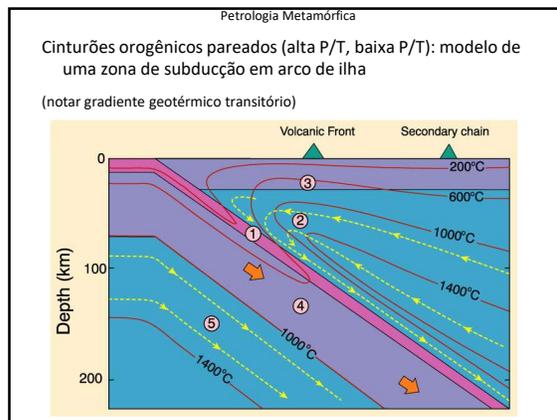
Cinturões orogênicos pareados (alta P/T, baixa P/T) – Ex: Japão

Akiho Miyashiro

76



77



78

Petrologia Metamórfica

Metamorfismo regional orogênico de tipo Barroviano:
 área-tipo – região SE das Terras Altas (Highlands) da Escócia (Barrow, 1893, 1912; Tilley, 1925), submetidas à orogênese Caledoniana (500 Ma).

Nas rochas pelíticas, definição da clássica série de **isógradas (minerais-índice) – zonas** minerais (zonas barrovianas – P/T intermediárias):

clorita–biotita–granada–estaurolita–cianita–sillimanita

79

Petrologia Metamórfica

Mapa metamórfico das Terras Altas da Escócia com as **Zonas Metamórficas Barroviana e de Buchan.**

80

Petrologia Metamórfica

- **George Barrow (1893, 1912):** estudo dos folhelhos metamorfizados (“Série Dalradiana”) da região SE das Terras Altas (“Highlands”) da Escócia e reconhecimento de uma seqüência de minerais que aparecem neles sistematicamente à medida que as condições metamórficas (T, principalmente) se tornam mais intensas – conceitos de **mineral-índice**, **zona metamórfica** e **isógrada**, posteriormente refinados por **Tilley (1925)** e estendidos para outras áreas.

clorita–biotita–granada–estaurolita–cianita–sillimanita

81

Petrologia Metamórfica

George Barrow **Cecil F. Tilley**

82

Petrologia Metamórfica

Mapa original de Barrow

83

Petrologia Metamórfica

Mapa metamórfico simplificado da região estudada por Barrow e Tilley

Metamorphic mineral zones in NE Scotland, after Barrow and Tilley

84

Petrologia Metamórfica

Os estudos de Barrow e Tilley permitiram reconhecer e representar o **metamorfismo progressivo** de rochas pelíticas, através dos conceitos de:

- **Mineral-índice**: mineral cujo aparecimento no terreno serve de marcador para o aumento da intensidade do metamorfismo;
- **Isógrada** (de aparecimento): linha imaginária na superfície que une os pontos onde um determinado mineral-índice foi observado pela primeira vez; para cada mineral-índice teremos a respectiva isógrada (isógrada da biotita, da granada, etc);

85

Petrologia Metamórfica

- **Zona Metamórfica**: uma faixa no terreno entre duas isógradas; uma zona inicia-se na isógrada do mineral de T mais baixa, que lhe dá nome, e termina na isógrada do mineral subsequente, aonde se inicia a zona metamórfica do novo mineral;
- **IMPORTANTE**: o mineral da zona anterior não desaparece necessariamente na isógrada do mineral seguinte: biotita e granada, por exemplo, persistem através das zonas da estaurolita e cianita, alcançando até a zona da sillimanita.

86

Petrologia Metamórfica

Exemplo esquemático de **minerais-índice, isógradas e zonas** no esquema barroviano

87

Petrologia Metamórfica

Metapelitos das zonas metamórficas barrovianas

- **Zona da clorita**: ardósias e filitos - $Chl+Ms+Qtz+Ab$
- **Zona da biotita**: filitos e xistos finos - $Bt+Chl+Ms+Qtz+Ab$
- **Z. da granada**: xistos finos a médios - $Grt(Alm!)+Bt+Ms+Chl+Qtz+Ab/Olig.$
- **Z. da estaurolita**: xistos médios - $St+Grt+Bt+Ms+Qtz+Pl(\pm Chl)$
- **Zona da cianita**: xistos - $Ky+Grt+Bt+Ms+Qtz+Pl(\pm St)$
- **Zona da sillimanita**: $Sill+Grt+Bt+Qtz+Pl(\pm Ky, \pm Ms)$

88

Petrologia Metamórfica

Ardósia com acamamento (S_0) e clivagem ardósiana (S_1): afloramento e amostra de mão (**Zona da clorita**)

89

Petrologia Metamórfica

Filito: brilho sedoso por causa das micas finas (Ms, Chl, Bt), com relíquia do acamamento (S_0) e textura lepidoblástica fina (**Zona da biotita**)

Granada micaxisto: porfiroblastos de granada em matriz lepidoblástica (Ms, Bt, Qtz) (**Zona da granada**)

90

Petrologia Metamórfica

Estauroлита micaxisto (St, Bt, Ms, Qtz): estrutura xistosa, textura porfiroblástica com matriz lepidoblástica

91

Petrologia Metamórfica

Ky-Grt-Ms-Bt xisto (Zona da cianita)

Granada gnaiss (consumo da muscovita)

92

Petrologia Metamórfica

Alguns cuidados a serem tomados:

- Apenas a **granada almandínica (vermelha, rica e Fe)** define a isógrada da granada; granada espessartítica (rica em Mn) pode aparecer antes, junto a Chl e Bt;
- Em rochas muito aluminosas, a **cianita** pode aparecer já no início do metamorfismo, pela quebra da **pirofilita**; é necessário conferir se ela se formou desta maneira, ou na sequência à estauroлита!
- Minerais precusores podem permanecer metaestáveis em rochas de zonas superiores, mesmo quando já deveriam ter sido consumidos, como inclusões em granada, por exemplo, e são importantes pistas para determinar a evolução metamórfica de uma rocha.

93

Petrologia Metamórfica

A sequência de minerais-índice, isógradas e zonas metamórficas observadas por Barrow na Escócia definem o **modelo metamórfico barroviano**, que pode ser aplicado a diversos outros terrenos metamórficos (“terrenos barrovianos”, “zonas barrovianas”);

No entanto, em outros terrenos, metapelitos composicionalmente idênticos podem apresentar seqüências de minerais-índice diferentes, por exemplo na região a NE da anterior, distritos de Buchan e Banff:

clorita-biotita-cordierita-andaluzita-sillimanita

94

Petrologia Metamórfica

A NE dos terrenos mapeados por Barrow (distritos de Buchan e Banff): sequência de minerais-índice um pouco diferente, em metapelitos com composições similares aos barrovianos:

clorita-biotita-cordierita-andaluzita-sillimanita

Razão: condições de metamorfismo

95

Petrologia Metamórfica

Nos passos de Goldschmidt, **P.Eskola (1915, 1920)** propôs um esquema de caracterização de terrenos metamórficos baseado na relação entre composições química e mineralógica de rochas que alcançaram equilíbrio químico (= termodinâmico).

O princípio do esquema de Eskola, baseado na variação das associações mineralógicas em rochas metabásicas, retratadas através do **diagrama ACF**, é que **rochas de mesma composição química desenvolverão as mesmas associações mineralógicas quando alcançarem equilíbrio químico sob as mesmas condições P x T.**

Associação mineral em equilíbrio químico = **paragênese**

96

Fácies metamórficas



Oslo
Kfs + And
Kfs + Crd
Kfs + Opx + Pl
Opx

Orijärvi
Ms + Qtz
Bt + Ms
Bt + Hbl
Ath

Pentti Eskola

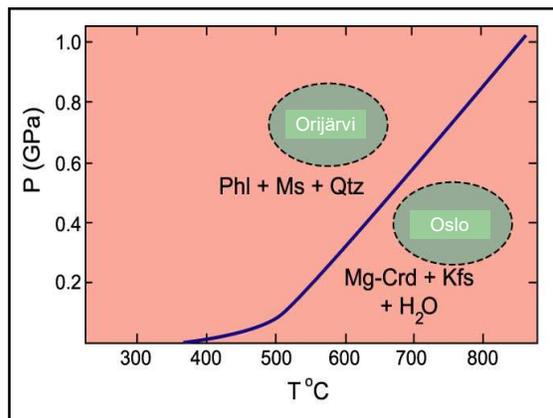
$$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6 \text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 15 \text{SiO}_2$$

Bt Ms Qtz

$$= 3 \text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} + 8 \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 8 \text{H}_2\text{O}$$

Crd Kfs

97



98

Petrologia Metamórfica

Eskola (1915):

“...uma fácies metamórfica inclui rochas que se supõe terem sido metamorfozadas sob condições idênticas. Para pertencerem a uma certa fácies consideramos rochas que, se tiverem a mesma composição, serão constituídas dos mesmos minerais. Toda fácies deve incluir todas as possíveis variedades composicionais e genéticas. Uma mesma fácies pode ser encontrada em partes distantes entre si no mundo, enquanto em localidades vizinhas fácies diferentes podem ser encontradas.”

99

Petrologia Metamórfica

Vantagens do modelo de fácies de Eskola:

- É baseada na noção de **associação mineral em equilíbrio químico** (= **paragénesis**), não apenas no aparecimento de um determinado mineral;
- Permite correlacionar terrenos no que diz respeito às condições do metamorfismo, baseado nas paragéneses desenvolvidas em rochas de composição equivalente, sem necessidade de determinar as condições P x T com precisão;
- Permite uma subdivisão mais ampla dos terrenos metamórficos, sem a necessidade de um detalhamento por vezes complicado.

100

Petrologia Metamórfica

Problemas do modelo de Eskola:

- Só considera as variáveis intensivas P e T: o papel da **fase fluida** (H₂O, CO₂) é desprezado;
- Todas as composições de rochas são consideradas, ainda que as fácies tenham sido denominadas pelas associações minerais das rochas máficas: algumas rochas desenvolvem paragéneses de grande estabilidade no campo P x T, não sendo portanto suficientemente “sensíveis” às mudanças nas condições metamórficas (e.g. quartzito) – é preciso reconhecer as **associações minerais diagnósticas**.

101

Petrologia Metamórfica

- A proposta original de Eskola permite uma proliferação de fácies, complicando a aplicação prática do esquema; Eskola propôs originalmente 5 fácies, que aumentou posteriormente para 8. Vários pesquisadores propuseram novas fácies e sub-fácies (v. **Winkler 1977**), baseado em variações sutis em composições muito sensíveis às variações nas condições P x T.

Atualmente, o esquema de fácies se mantém como uma ferramenta útil para estudos de campo e regionais, permitindo correlações entre terrenos diversos.

102

Petrologia Metamórfica

As 5 fácies originalmente propostas por Eskola:

- Fácies Xisto-Verde
- Fácies Anfibolito
- Fácies Piroxênio-Hornfels (original: Hornfels)
- Fácies Sanidinito
- Fácies Eclogito

As 3 fácies acrescentadas por ele depois:

- Fácies Xisto Azul (original: Glaucofânio Xisto)
- Fácies Epidoto-Anfibolito
- Fácies Granulito

103

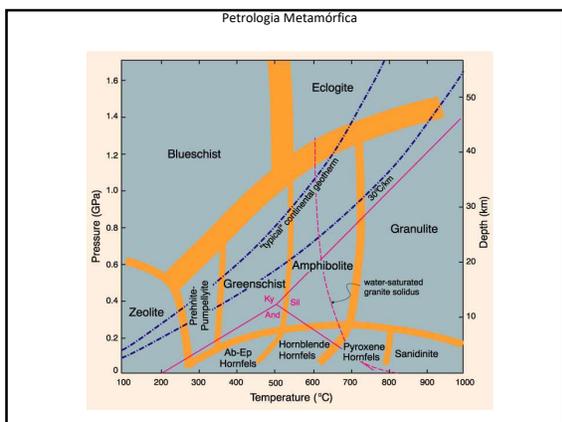
Petrologia Metamórfica

Fácies metamórficas no campo P x T

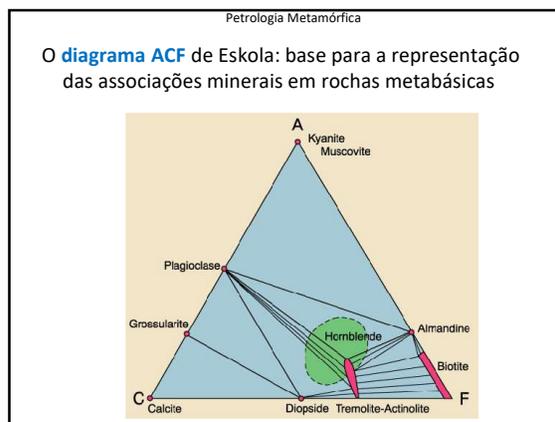
Temperature →

Pressure ↓

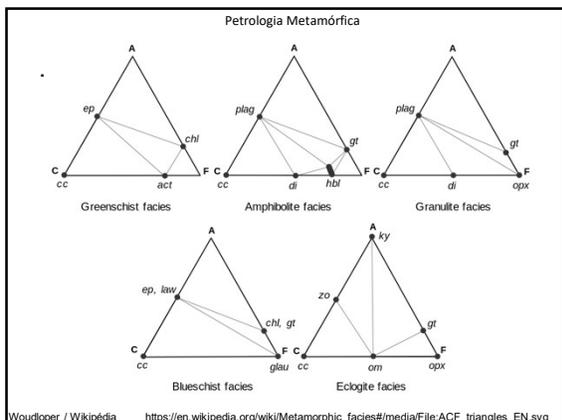
104



105



106



107

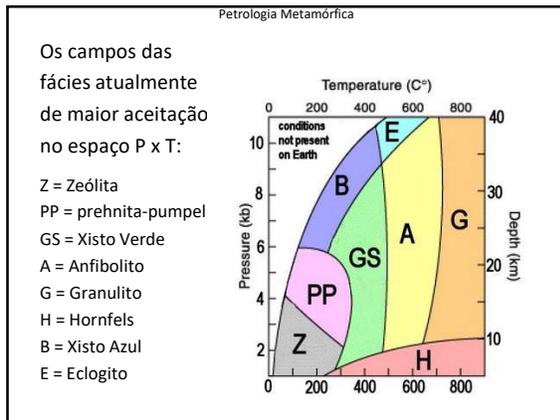
Petrologia Metamórfica

Das várias fácies e sub-fácies posteriores, apenas as **"Fácies Sub-Xisto Verde"** propostas por Coombs e colaboradores (1959-1961), definidas em terrenos de metamorfismo de soterramento de baixo grau na Nova Zelândia, são utilizadas:

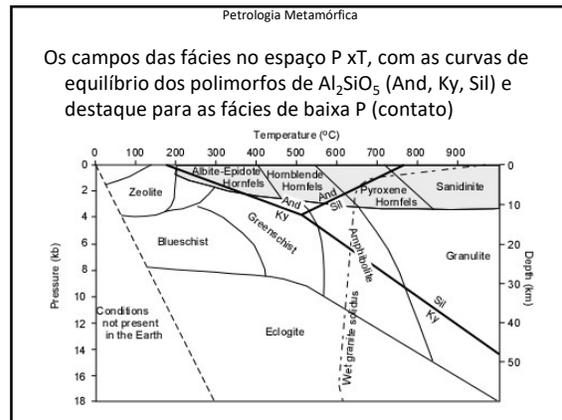
- Fácies Zeólita
- Fácies Prehnita-Pumpellyita
- Fácies Lawsonita-Albita-Clorita

A **fácies Epidoto Anfibolito** é controversa: alguns autores a utilizam, outros não.

108



109



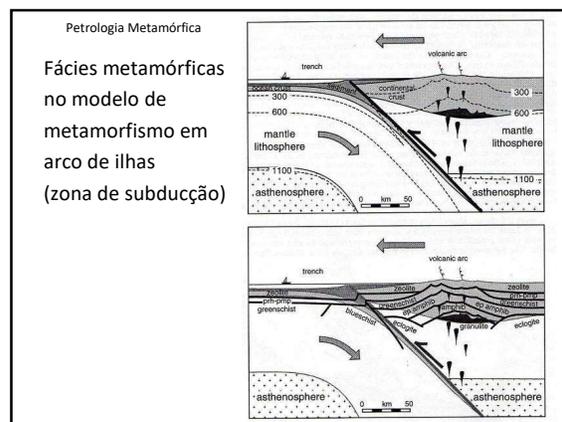
110

Petrologia Metamórfica

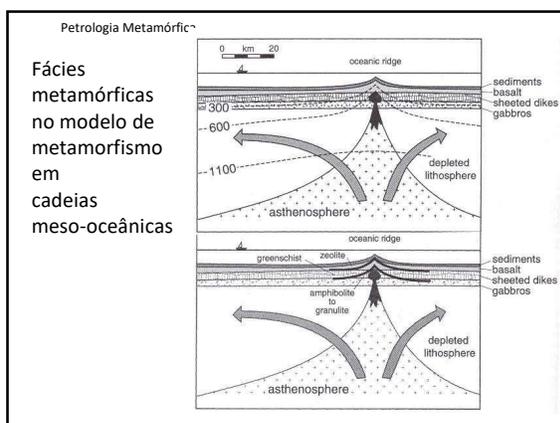
Correlação entre **fácies metamórficas** (em rochas máficas / básicas) e **zonas metamórficas** (em metapelitos)

R.máficas / básicas	Metapelitos	R.calciossilicáticas
Fácies xisto verde (Act+Ab+Ep+Chl) (F.ep-anfibolito: Ab+Ep±Hbl)	Zona da clorita Zona da biotita Zona da granada	Tlc + Phl Tr / Act
Fácies anfibolito (Hbl+ Pl ± Cpx)	Zona da estauroлита Zona da cianita Zona da sillimanita	Ep+Zo+Hb Di Gro, Scp
Fácies granulito (Opx + Pl + Cpx ± Grt ± Hbl)	Zona da sillimanita + feldspato-K (cordierita + granada)	Fo

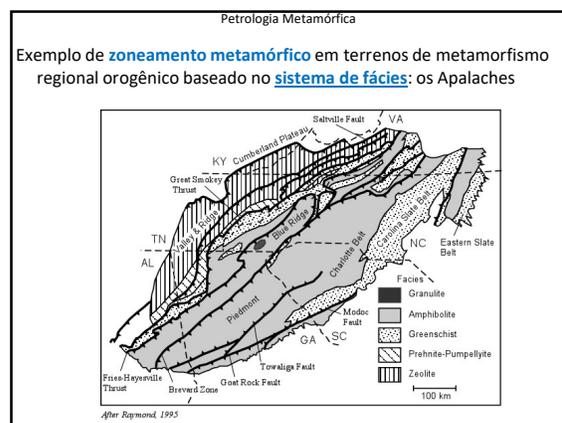
111



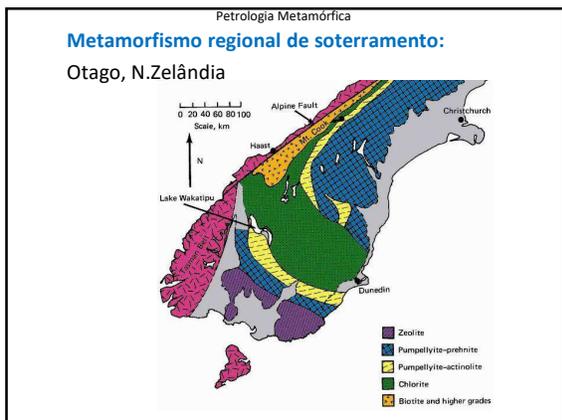
112



113



114



121

Petrologia Metamórfica

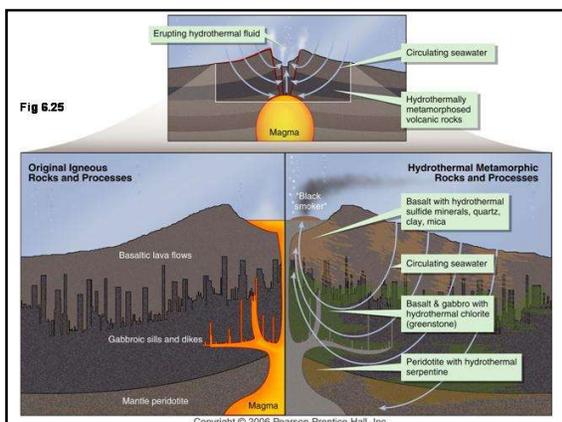
I. Metamorfismo regional
(3) De fundo oceânico

Nas dorsais (cordilheiras) meso-oceânicas (margens de placas divergentes);

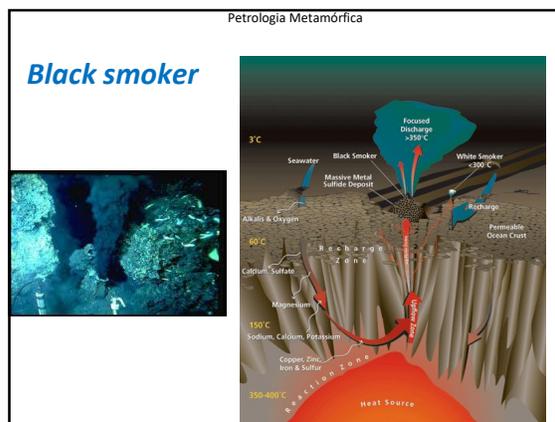
Baixa deformação, predominam alterações hidrotermais – metassomáticas de baixa T.

Circulação de águas oceânicas aquecidas através de sistemas de fraturas na pilha de basaltos e gabros do fundo oceânico. Lixiviação de Ca e Si, aporte de Mg e Na. Formação dos *black smokers* e *white smokers* (hidrotermalismo): condutos das águas aquecidas em profundidade.

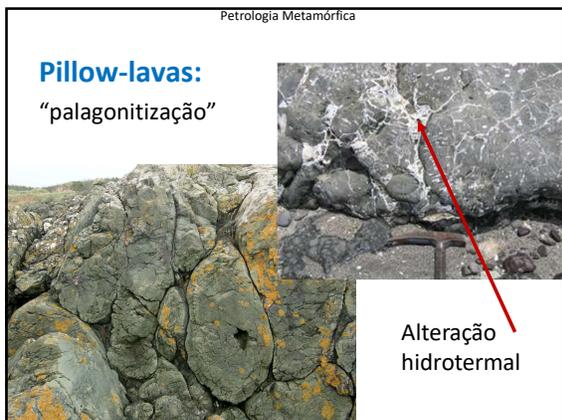
122



123



124



125

Petrologia Metamórfica

II. Metamorfismo de contato:
formação de **auréola metamórfica**

Tamanho da auréola: depende de vários fatores:

- Dimensões (volume) e forma do corpo intrusivo;
- Composição e temperatura do magma;
- Composição e temperatura (profundidade) da rocha encaixante;
- Características físicas (permeabilidade, etc) da rocha encaixante

126

Petrologia Metamórfica

Metamorfismo de contato: mais evidente quando a intrusão de alta temperatura (magma básico) ocorre em ambiente estático raso (grande contraste de temperatura, ausência de deformação), em rochas encaixantes reativas (pelitos).

Nestes casos, desenvolve-se o típico **hornfels** (ou **cornubianito**), com estruturas sedimentares preservadas e brilho característico.

Pirometamorfismo: temperaturas extremamente altas, baixa pressão (rochas vulcânicas).

Metamorfismo de contato sobreposto a rochas de metamorfismo regional: pode ser difícil de identificar.

127

Petrologia Metamórfica

Metamorfismo de contato

1 km

Shale, Limestone, Shale, Sandy Shale, Sandstone, Quartzite, Igneous Granite

Increasing Temperature

Fine Marble, Coarse Marble

Possible Fluid Gradient

Muscovite-Chlorite, Biotite-Anorthite, Epidote-Gillmanite, Hornblende

128

Petrologia Metamórfica

Metamorfismo de contato: exemplo

Ardósias Skiddaw (Lake District, UK) com intrusões de granitos rasas

1 km

129

Petrologia Metamórfica

III. Metamorfismo dinâmico: zonas de cisalhamento, falhas

Na superfície: deformação rúptil = brechas, cataclitos

Em profundidade: deformação dúctil = milonitos ($P_{lit}, T > s$);

Em grandes profundidades: **blastomilonitos**;

Agente principal: pressão dirigida – deformação;

- em ambiente raso: predomina cataclase;
- em ambiente mais profundo: recristalização dinâmica

130

Petrologia Metamórfica

Metamorfismo dinâmico: brechas e milonitos

Região mais rasa de uma falha = **brechas** (comportamento mais rúptil)

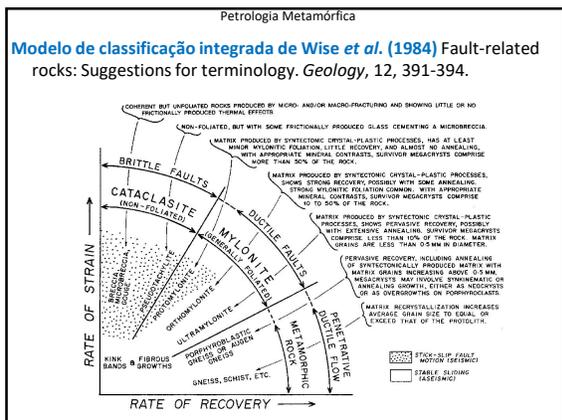
Região mais profunda de uma falha = **milonitos** (comportamento mais dúctil)

131

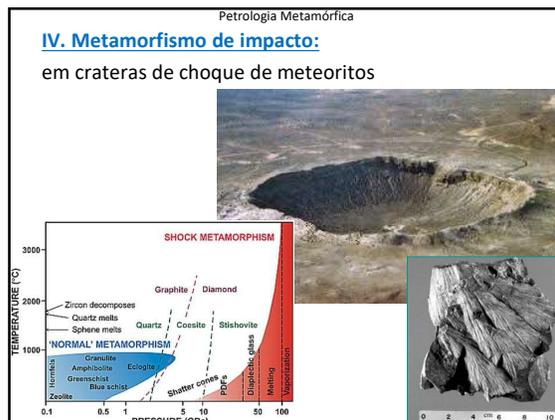
Petrologia Metamórfica

Metamorfismo dinâmico: milonitos

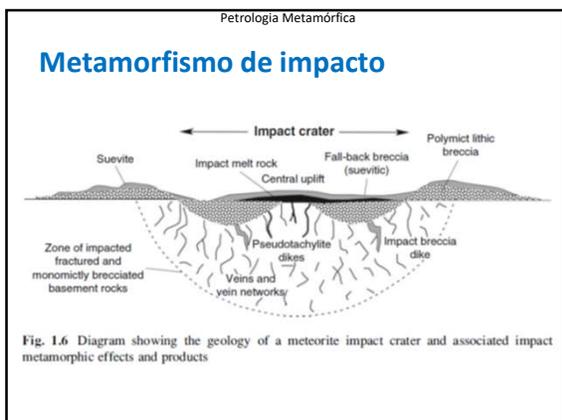
132



133



134



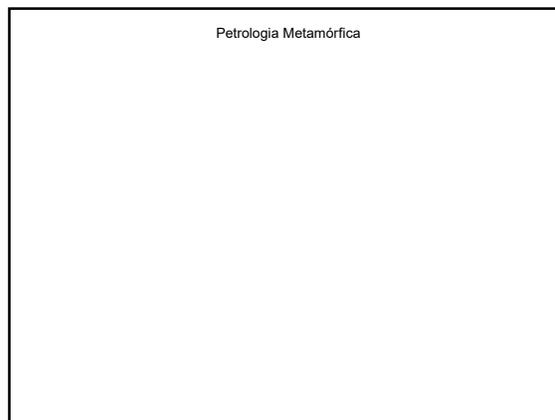
135



136

- Petrologia Metamórfica
- Referências bibliográficas recomendadas**
- Yardley 2004 – Introdução à Petrologia Metamórfica – Capítulo 1
 - Winter 2010 – Principles of Igneous and Metamorphic Petrology – Capítulo 21
 - Ruberti et al 2009 – Metamorfismo: processo e produtos. In: Teixeira et al (eds) – Decifrando a Terra – 2ª Ed. p.400 – 419
 - Bucher & Frey 2002 – Petrogenesis of Metamorphic Rocks – 7ª Ed – Capítulo 1 (idem Bucher & Grapes 2011)

137



138