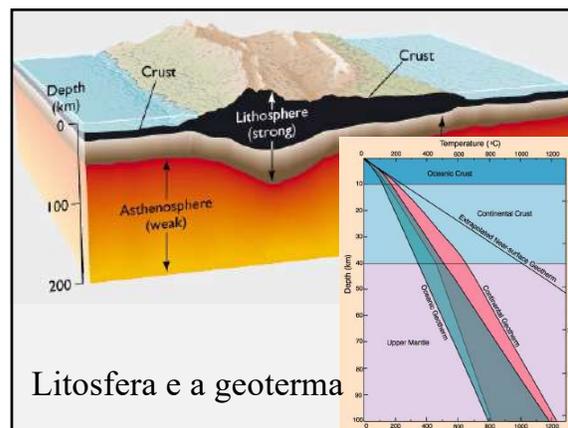




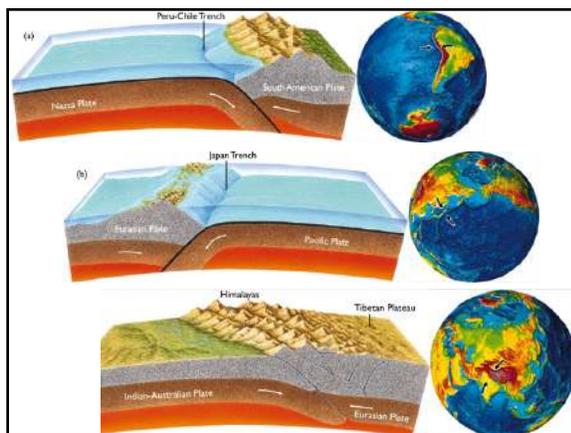
## Metamorfismo e o ciclo das rochas

- Pensando no ciclo das rochas, pergunto:
  - O que é **metamorfismo**?
  - todas as transformações inerentes ao processo aquecimento/soterramento que ocorre entre a diagenese e a fusão

7



8



9



10

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

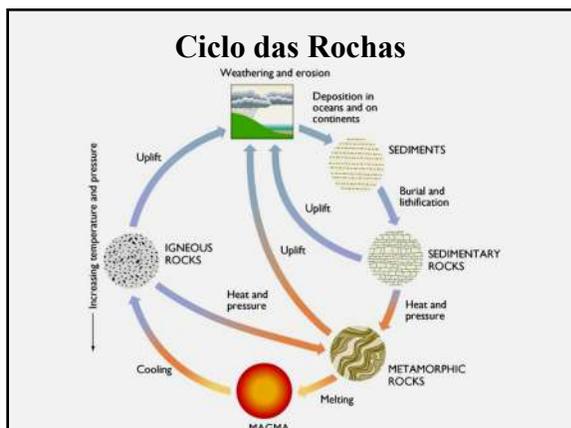
- **Formação das rochas metamórficas**
- Entender a formação e evolução das cadeias de montanhas
- Formação, transformação e evolução da crosta terrestre e do manto
  - crosta continental
  - crosta oceânica
  - manto
- Depósitos minerais
  - Metálicos: Au, Zn, Cu
  - Não-metálicos: brita, cimento, pedra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

11

## 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
- **Metamorfismo** inclui todas as mudanças que as rochas sofrem após a **diagenese** e antes da **fusão**
- As transformações do metamorfismo ocorrem no **estado sólido**, sem que haja fusão ou dissolução completa do **protólito**

12

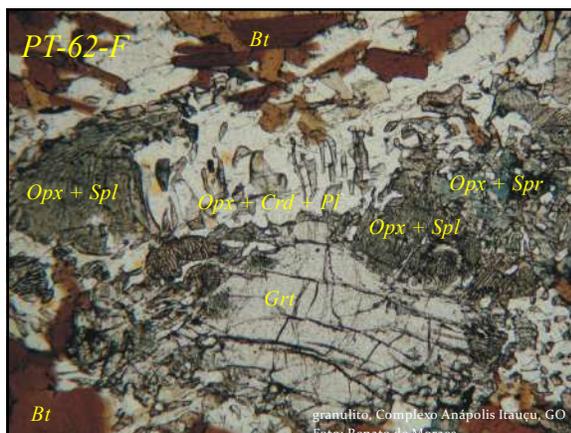


13

## 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)
- Apesar de ocorrerem minerais neo-formados no metamorfismo, diz-se que a rocha sofreu **recristalização**

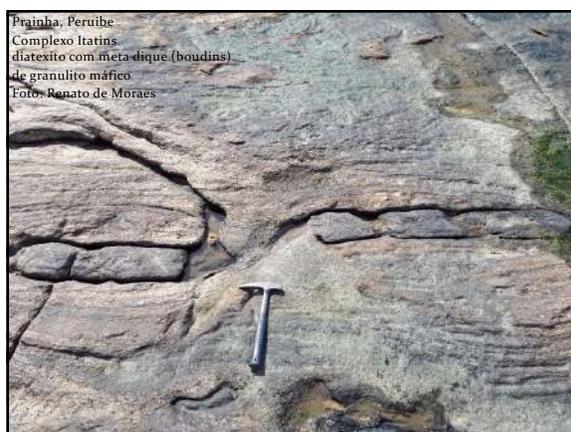
14



15



16

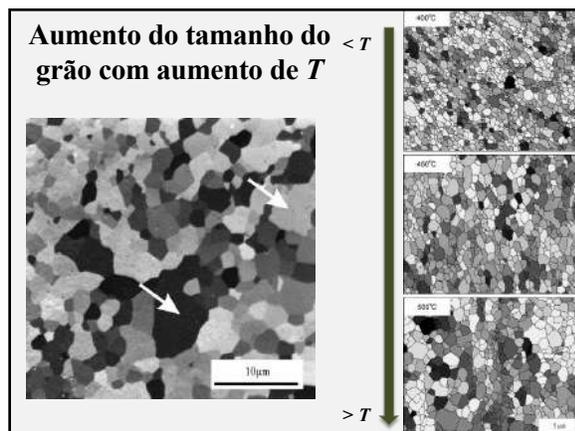


17

## Recristalização

- Recristalização pode ser dividida em dois tipos:
  - **recristalização** – quando nenhum mineral novo é formado, mas o quartzo que já estava na rocha, por exemplo, tem a forma (ou limites) do grão modificada, ficando maior ( $\uparrow T$ ) ou menor ( $\sigma$  - deformação)
  - **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  $P-T$

18



19



20

**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 (argila), calcários, psamitos (areia)
- 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

21

**Metamorfismo**  
**processo com transformações no estado sólido**

- A rocha **não funde nem é desagregada!** As transformações ocorrem no **estado sólido** através das reações metamórficas
- As reações metamórficas ocorrem através da **difusão**
  - Difusão** – movimento de átomos individuais através de grupo de átomos. Os átomos movem-se através dos defeitos dos cristais no estado sólido
- Difusão é dependente de  $T$  (quanto maior a temperatura mais rápida e eficaz é a difusão)
- Como as transformações ocorrem no estado sólido é possível que características da rocha original sejam preservadas (textura e estrutura ígnea ou sedimentar)

22

**Difusão no estado sólido**

Os cristais são imperfeitos, apresentam vacâncias no retículo, que são usadas para a movimentação dos átomos

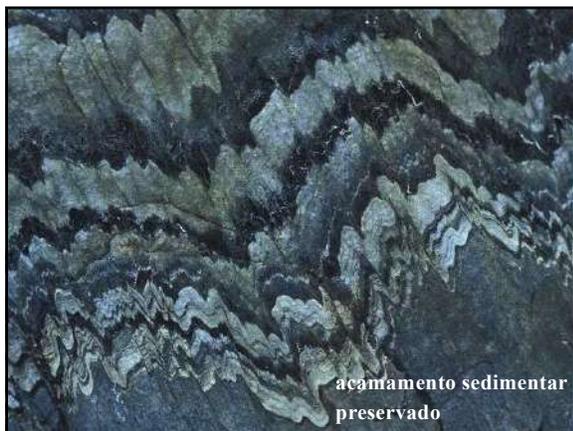
A difusão permite o rearranjo dos átomos sem destruir o retículo cristalino

Os átomos escuros agora estão mais próximos e podem começar a se reagrupar para formar novos minerais

23



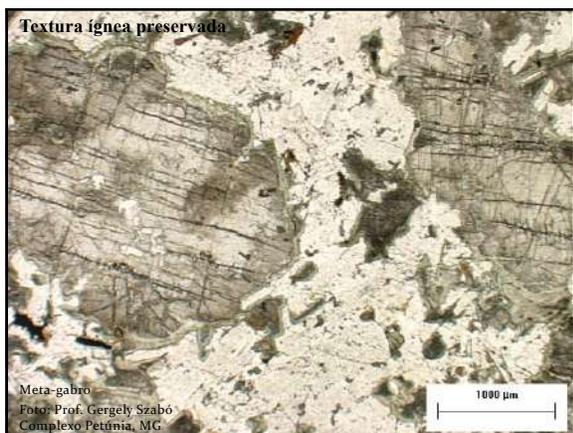
24



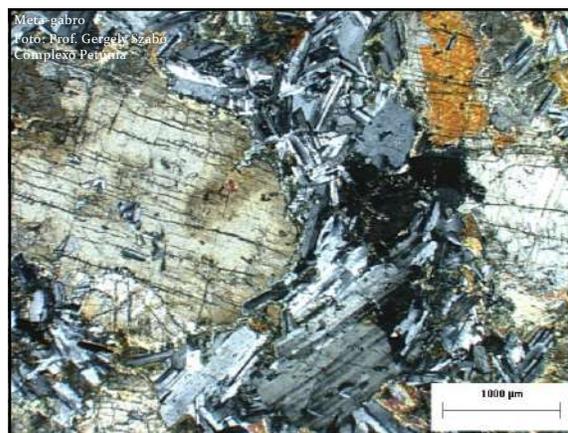
25



26



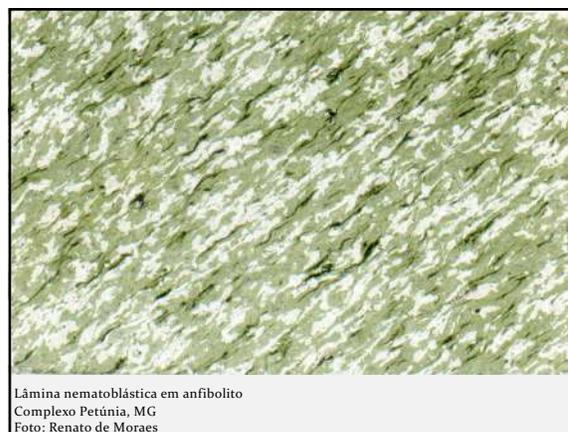
27



28



29



30

## Como e onde foi descoberto o metamorfismo?



- James Hutton (1726-1797) foi o primeiro a reconhecer que certas rochas tinham origem sedimentar, mas haviam sido transformadas por calor subterrâneo

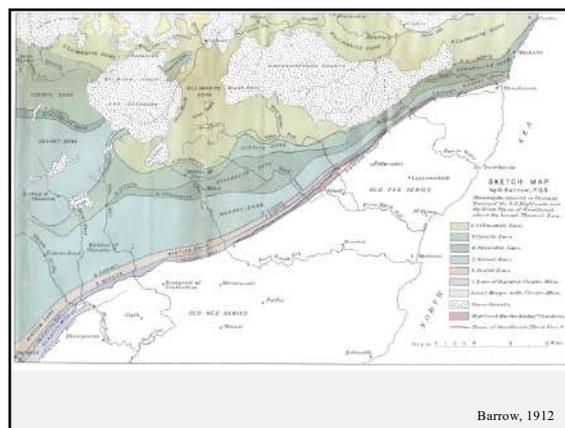


- Charles Lyell (1797-1855) em seu trabalho *Principles of Geology* (1833) elucidou as ideias de Hutton e propôs o nome **rochas metamórficas** para as rochas transformadas



- George Barrow (1853-1932) em seus trabalhos de 1893 e 1912 caracterizou o metamorfismo nos Highlands da Escócia com zonas de minerais índices

31



Barrow, 1912

32

## Metamorfismo barroviano

- Barrow definiu uma sequência de minerais que indicam aumento de  $T$  do metamorfismo em pelitos, chamando as regiões em que ocorrem de **zonas**
- Zona da clorita
- Zona da biotita
- Zona da granada
- Zona da estauroлита
- Zona da cianita
- Zona da sillimanita
- Em todas as rochas sempre ocorrem quartzo e muscovita

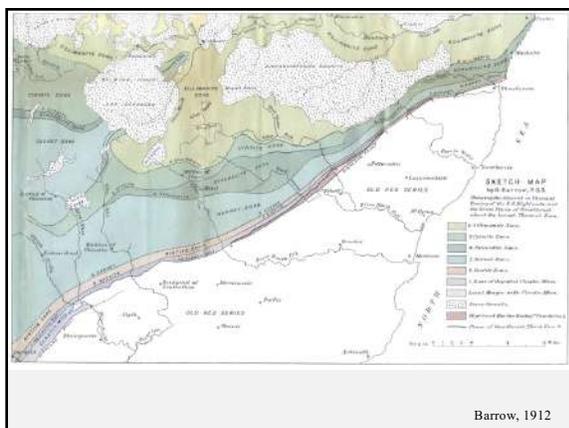
33



## Isógrada, mineral índice e paragênese

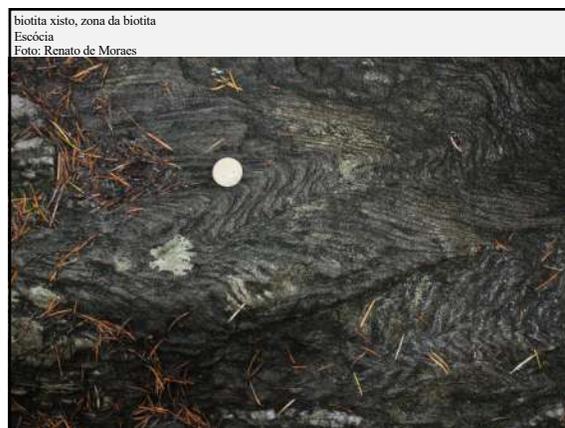
- Cecil F. Tilley (1924, 1925) estendeu as zonas de Barrow por toda a região do Dalradiano
- **Mineral índice** caracteriza uma zona metamórfica
- O limite de cada zona mineral é marcado por **isógradas** (termo cunhado por Tilley) linha que marca o **primeiro aparecimento** ou **desaparecimento** do mineral índice
  - isógrada da biotita (**Bt in**)
  - isógrada do desaparecimento da muscovita (**Ms out**)

34



Barrow, 1912

35



36

## Reações metamórficas

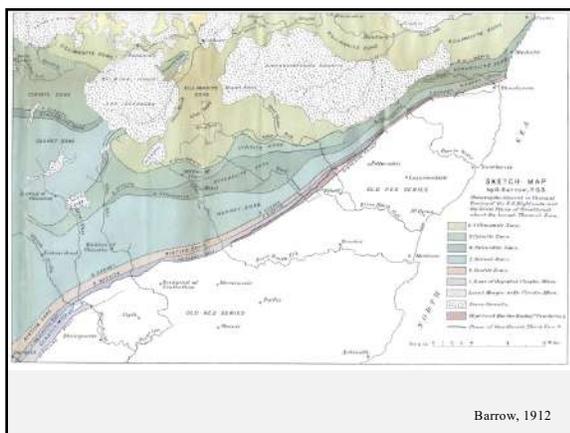
- As reações metamórficas são responsáveis pela formação das **paragêneses minerais**
- Paragênese é a associação mineral estável no **pico metamórfico** ( $T$  mais alta alcançada no metamorfismo)
- Um conjunto de rochas de certa **composição**, quando submetido a metamorfismo em diversas condições  $P$ - $T$ , apresenta **diversas associações minerais**, as quais são **típicas e diagnósticas** para **intervalos diferentes de  $P$  e  $T$**
- As associações metamórficas podem ser previstas, desde que sejam conhecidas a composição da rocha e as condições de  $P$  e  $T$  (ou *vice-versa*)

37

## Reações metamórficas

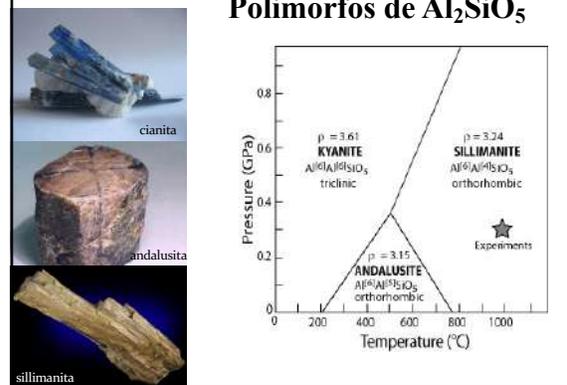
- A nova associação mineral é quimicamente equivalente à associação antiga
  - $\text{quartzo} + \text{muscovita} = \text{ortoclásio} + \text{sillimanita} + \text{H}_2\text{O}$
  - $\text{SiO}_2 + \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 = \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{H}_2\text{O}$
- A mudança das paragêneses ocorre de forma sistemática e é controlada pela composição da rocha, pressão e temperatura

38



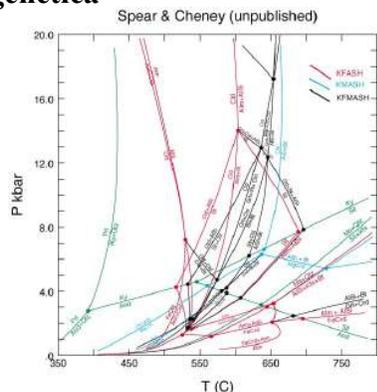
39

## Polimorfos de $\text{Al}_2\text{SiO}_5$



40

## Grade Petrogenética



41

## 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**

42

### Fatores físicos e químicos que controlam o metamorfismo

- $T$  – temperatura
- $P$  – pressão litostática
- deformação
- composição da rocha
- $t$  - tempo
- Presença e composição de fluidos

43

### Agentes físicos do metamorfismo 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

44

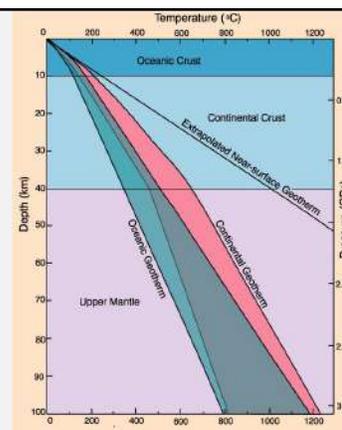
### Limites de $T$ do Metamorfismo

- Limite inferior  $T > 200$  °C - diagênese
  - caolinita + quartzo → pirofilia
- Limite superior – embora a maior parte das rochas entrem em fusão a pressões crustais entre 750 e 900 °C, algumas rochas podem se manter no estado sólido até temperaturas > 1000 °C (Harley & Motoyoshi, 2000; Moraes, *et al.*, 2002).

45

### Geoterma

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



46

### Agentes físicos do metamorfismo pressão

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

47

$$P = \rho gh$$

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

48

**$P$  em coluna de 1 km (1000m)**

rocha	$P$ em bars	$P$ em kbar
granito	264	0,264
basalto	294	0,294
peridotito	323	0,323

49

**Para atingir 1 kbar de  $P$** 

H <sub>2</sub> O mar (fossa das Filipinas) rocha	9 – 10 km profundidade
granito	3,8 km
basalto	3,4 km
peridotito	3,1 km

50

**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

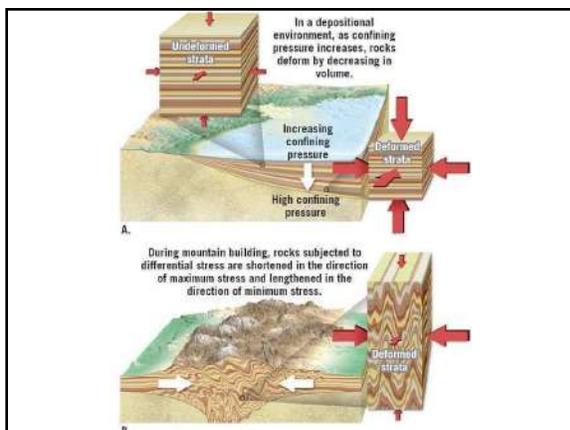
Algumas rochas crustais com coesita e diamante indicam  $P > 35$  kbar ou ~ 120 km ou mais

51

**Tensão deviatória  $\sigma$  ou pressão dirigida**

- **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
- A tensão deviatória só é responsável pelo crescimento orientado dos minerais (dobras, foliação, lineação)

52

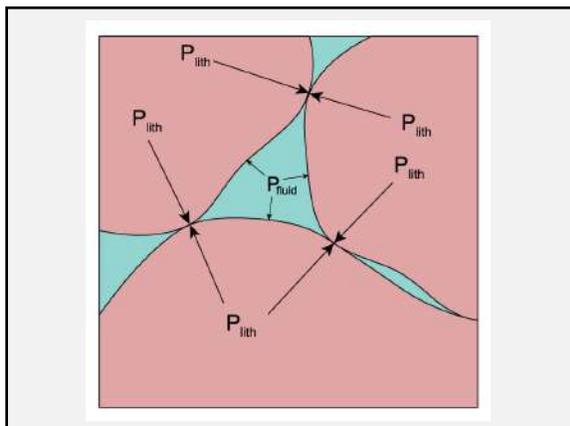


53

**Fluidos (voláteis)**

- **Fluidos** – ocorrem nos minerais hidratados e nos interstícios dos grãos
  - Espécies principais: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, S (O<sub>2</sub>, N, 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

54



55

## 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 (NCKFMASHTO)
  - rocha máfica (basálticas) – NCFMASH
  - rocha ultramáfica – CMSH(-CO<sub>2</sub>)
  - calcário impuro – CMSH-CO<sub>2</sub>
  - rochas graníticas - NCKASH

56

## Sistema fechado e aberto

- O metamorfismo pode ocorrer com **sistema químico fechado**, quando só há troca de calor e H<sub>2</sub>O (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<sub>2</sub>O é muito grande em relação ao da rocha e as modificações químicas podem ser drásticas
  - Depósitos minerais podem ser gerados

57

## Alteração hidrotermal



58

## Tipos de metamorfismo

- **Metamorfismo de contato**
- Metamorfismo de impacto
- Metamorfismo dinâmico
- **Metamorfismo regional**
  - Soterramento
  - Fundo oceânico
  - **Orogênico** (dinamo-termal ou regional)
  - Subducção

59

## Metamorfismo de contato

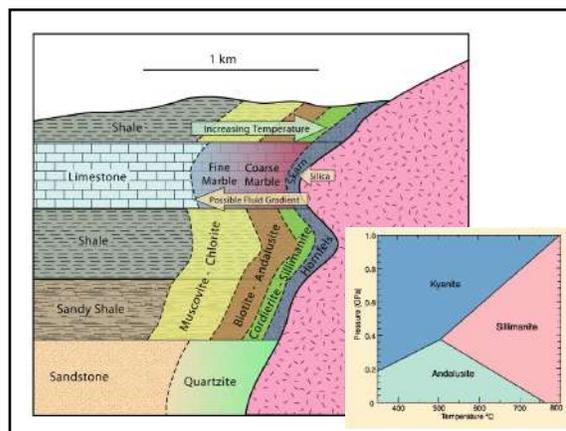
- **Metamorfismo de contato** – ocorre pelo calor oriundo de intrusões
  - Forma auréola de contato ao redor da intrusão
  - Minerais de  $T$  mais alta mais próximos da intrusão
    - Paragéneses anidras (e de alta  $T$ ) próximas da intrusão
    - Paragéneses hidratadas (e de baixa  $T$ ) distantes da intrusão

60

### Auréola de contato



61



62



Cristais de andalusita em hornfels

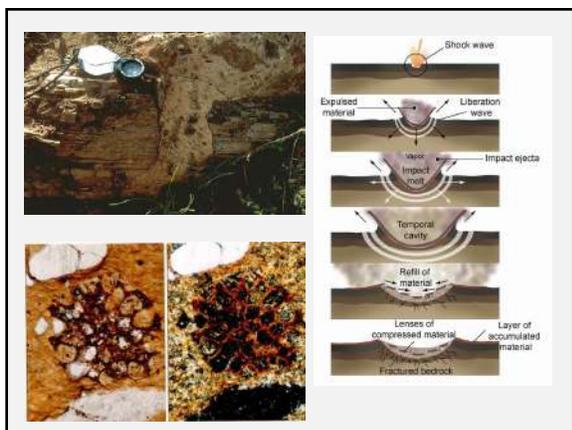
63

### Metamorfismo de impacto (ou choque)

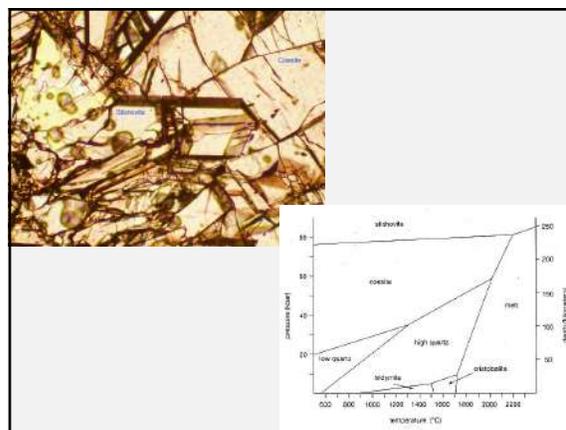
- **Metamorfismo de choque** (impacto) – causado pelo impacto de meteoritos
- Observado nas crateras de impacto
- Forma brechas polimíticas com matriz de vidro e polimorfos de Qtz de alta *P*
- coesita e stishovita



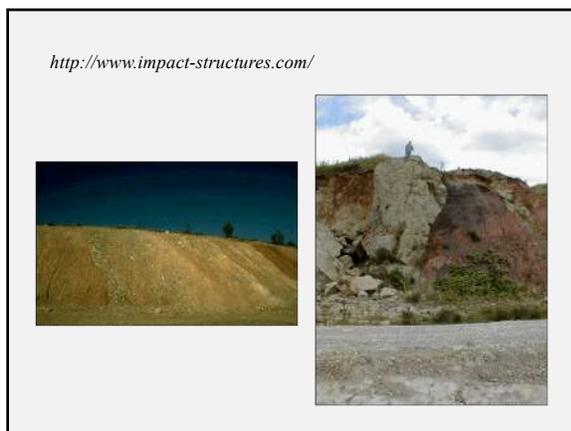
64



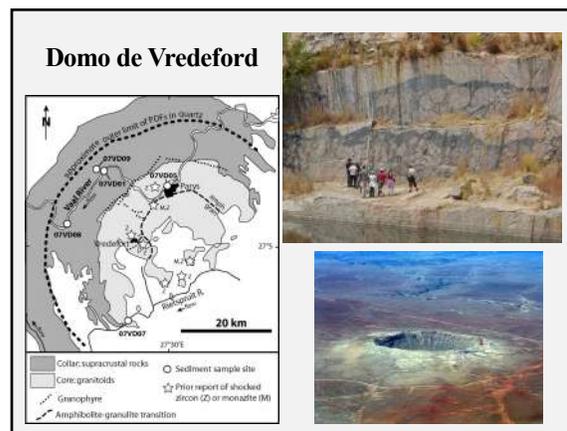
65



66



67



68

## Metamorfismo regional

- **Metamorfismo Regional** – ocorre em ampla região geográfica
- Em livros mais antigos também designado dinamothermal
- Ocorrem quatro tipos principais
  - metamorfismo de carga ou de soterramento
  - metamorfismo de fundo oceânico
  - metamorfismo orogênico (**regional**)
  - metamorfismo de subducção

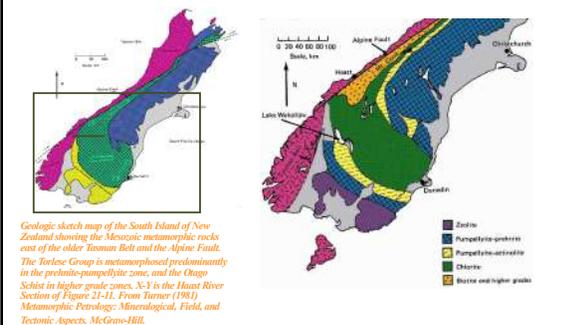
69

## 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
- Exemplo típico: Otago, Nova Zelândia

70

## Metamorfismo regional de soterramento Otago, Nova Zelândia



71

## Metamorfismo de fundo oceânico

- Afeta as rochas do assoalho oceânico
  - Várias temperaturas e baixa pressão
- Funciona como hidrotermalismo e está associado, em geral, à fraturas e falhas
- Ocorre perda de Ca e Si e ganho de Mg e Na
- Ocorrem reações com a água do mar

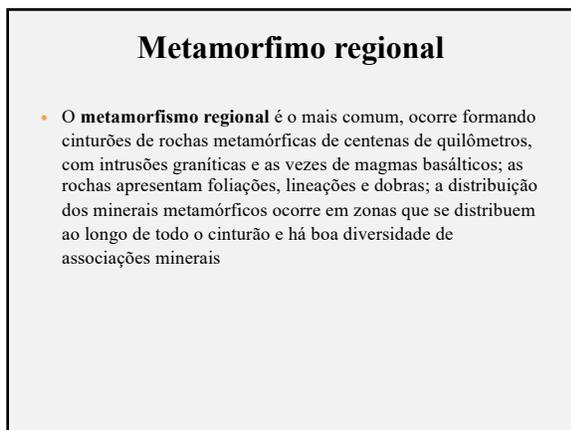
72



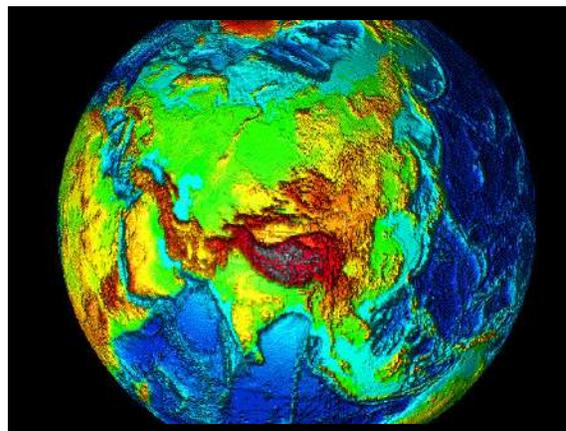
73



74



75



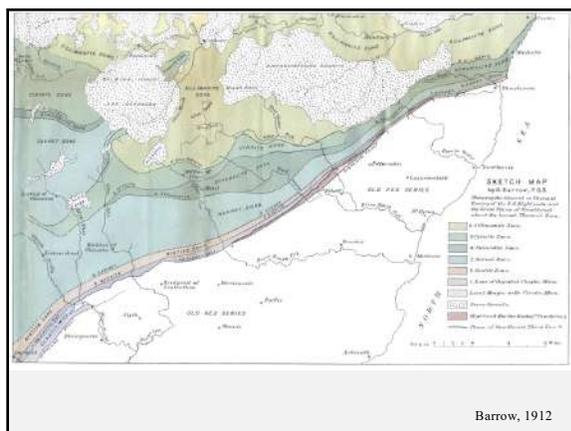
76



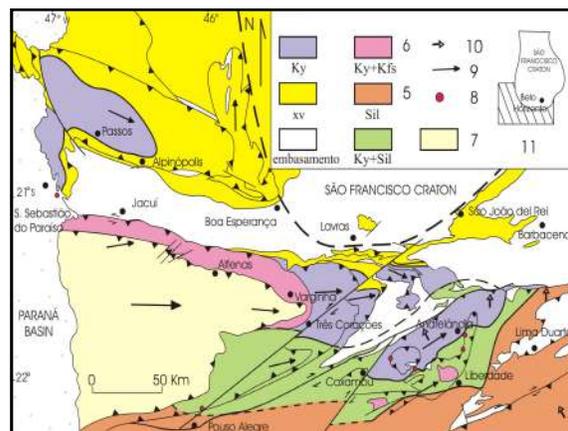
77



78



79



80

### Metamorfismo de subducção

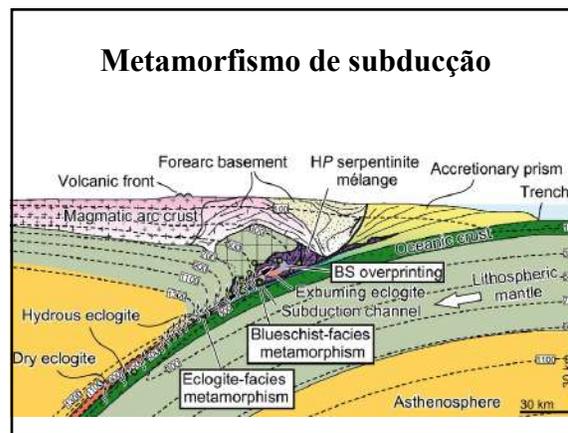
- Ocorre nas zonas de subducção, em que rochas da crosta oceânica são submetidas a altas pressões
- ocorre formação de xisto azul e eclogito

xisto azul, glaucofana e granada

xisto azul, CA, USA  
<https://speakinmetamorphically.wordpress.com/2015/05/11/one-schist-two-schists/>

eclogito, Noruega

81



82

### Divisões do metamorfismo

- Para dividir as regiões *P-T* do metamorfismo foi elaborado o conceito das fácies metamórficas
- O conceito foi elaborado por Pentti Eskola (1914, 1915) estudando auréolas de contato
- A fácies metamórfica é representada por várias associações minerais estáveis em diferentes rochas nas mesmas condições *P-T*

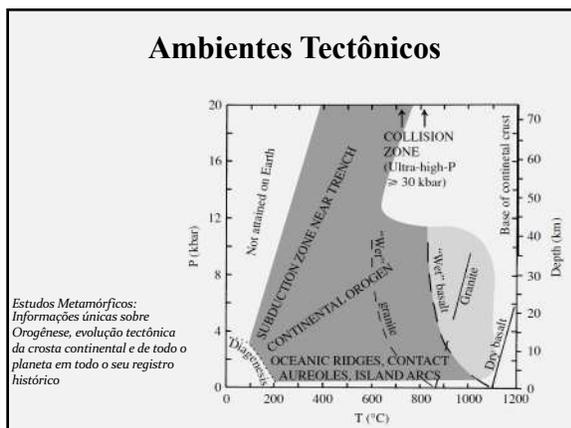
83

### Fácies metamórficas

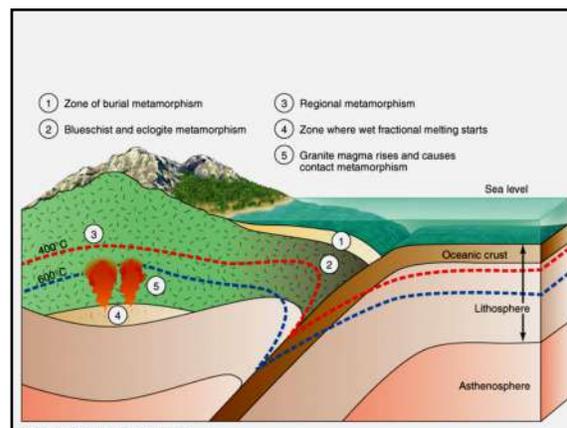
- fácies albíta-epidoto hornfels
- fácies hornblenda hornfels
- fácies piroxênio hornfels
- fácies zeólita
- fácies prehnita-pumpeliita
- fácies xisto verde
- fácies anfibolito
- fácies granulito
- fácies xisto azul
- fácies eclogito

84





91



92

### Rochas Metamórficas

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

93

### Rochas Metamórficas

- Terminologia
  - Rochas Metamórficas Foliadas
    - ardósia
    - filito
    - xisto
    - gnaíse
  - Rochas Metamórficas não foliadas
    - mármore
    - quartzito (pode ser foliado)
    - eclogito (pode ser foliado)
    - anfibolito (pode ser foliado)

94

### Minerais de Rochas Metamórficas

- Minerais metamórficos comuns:
  - anfibólios (hornblenda, actinolita)
  - granada
  - filossilicatos: biotita, muscovita, clorita, talco
  - estaurólita, sillimanita, andalusita e cianita
  - carbonatos: calcita e dolomita
  - quartzo e feldspatos
  - piroxênios (diopsídio e ortopiroxênio)

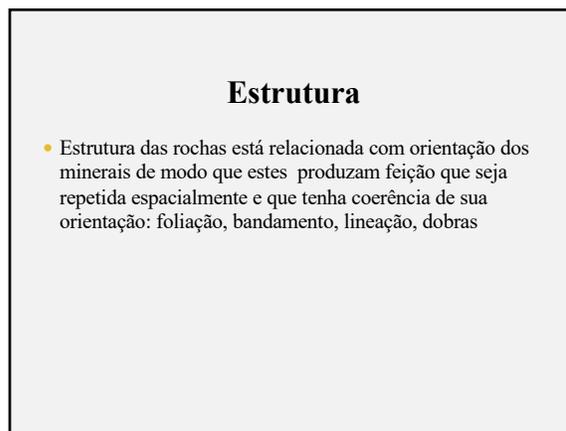
95



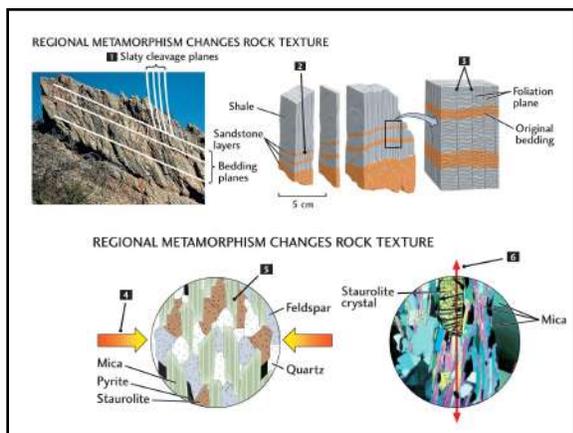
96



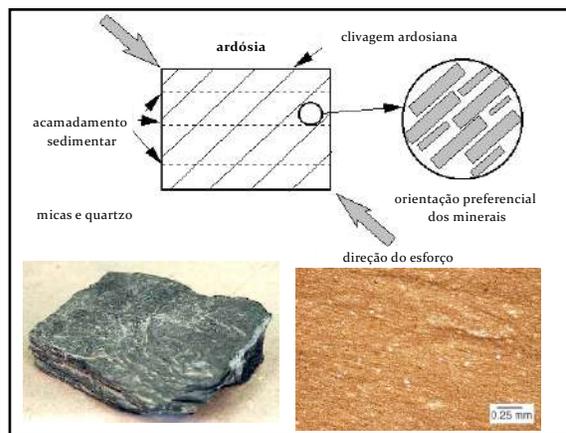
97



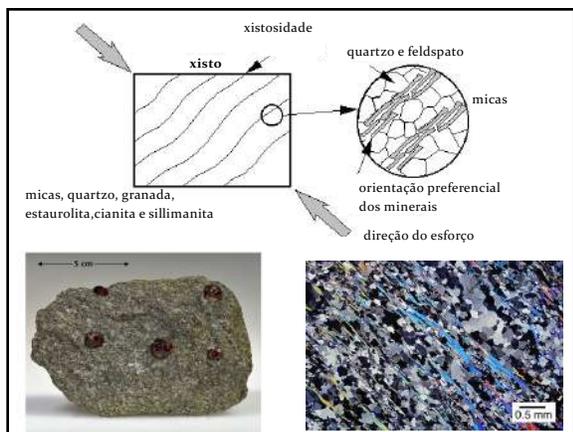
98



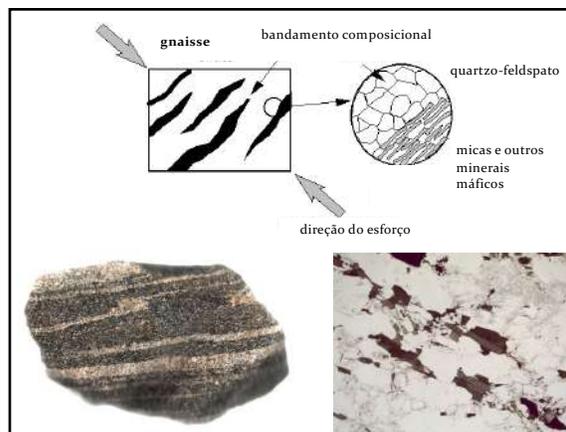
99



100



101



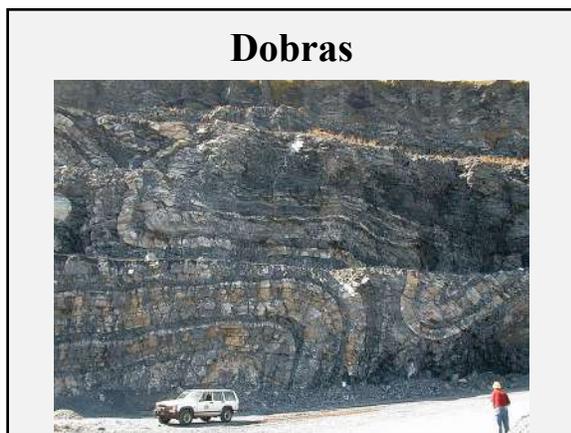
102



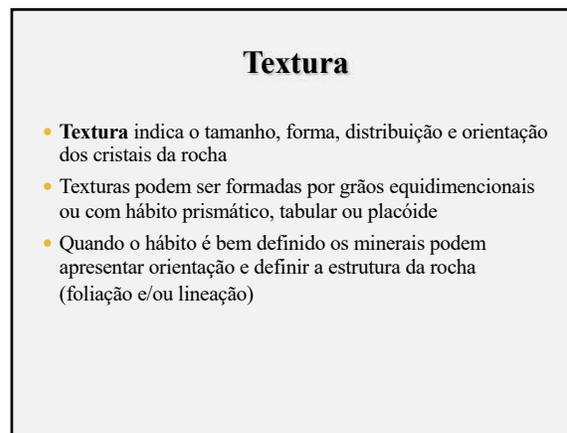
103



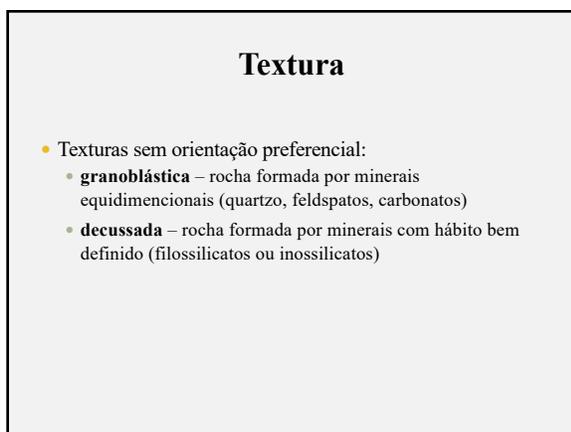
104



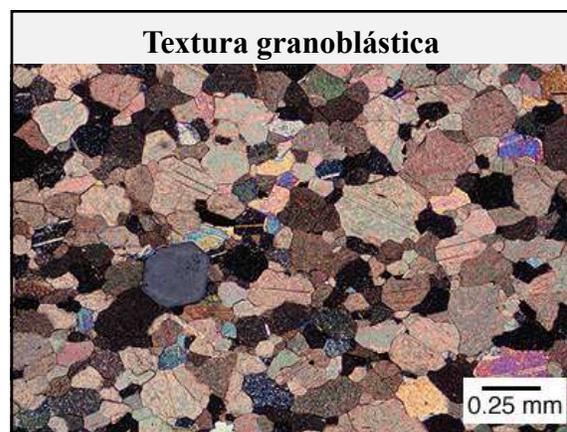
105



106

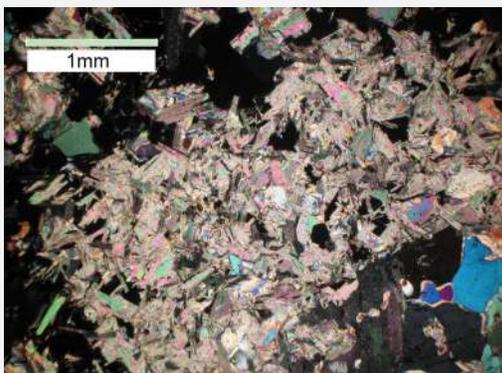


107



108

### Textura decussada



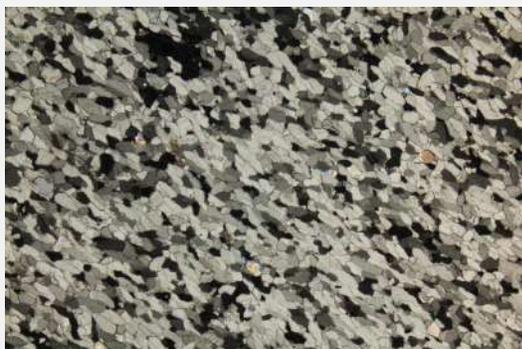
109

### Textura

- Texturas com orientação preferencial:
  - **granoblástica** – rocha formada por minerais quase equidimensionais (quartzo, feldspatos)
  - **nematoblástica** - rocha formada por minerais prismáticos (anfíbólio e piroxênio)
  - **lepidoblástica** – rocha formada por predomínio de minerais placóides (micas)
  - **milonítica** – textura (estrutura) formada por intensa deformação em zonas de cisalhamento
    - qualquer rocha intensamente deformada de forma dúctil recebe o nome de **milonito** e de forma rúptil de **cataclasto**

110

### Textura granoblástica orientada



111

### Textura nematoblástica

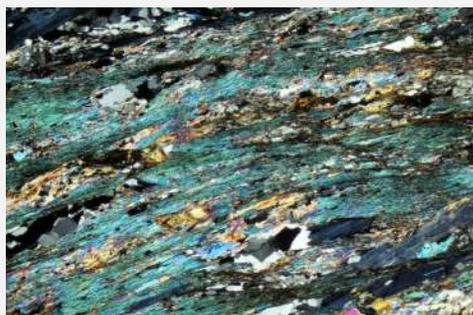
- orientação de minerais prismáticos (anfíbólio)



112

### Textura lepidoblástica

- orientação de minerais placóides (micas)



113

### Milonito

Rocha formada por cominuição de minerais por deformação dúctil  
Intensa recristalização dinâmica e pode ocorrer cataclase subsidiária (dependendo da temperatura, de minerais mais resistentes)



114

### Textura porfiroblástica

- Textura relacionada ao tamanho dos cristais
  - **porfiroblástica** – presença de porfiroblastos, que são cristais 10 vezes maiores que a matriz



115

### Granulação

muito grossa	> 8 mm
grossa	entre 4 e 8 mm
média	entre 1 e 4 mm
finha	< 1 mm

116

### Classificação das Rochas Metamórficas

- As rochas metamórficas são classificadas em parte pela estrutura, em parte pela mineralogia principal, ou por ambas as feições

Estruturação	Tipo	MINERAIS	NOME DA ROCHA
Foliada	clivagem ardósiana	não visíveis a olho nu	ardósia
	foliação	não visíveis a olho nu	filito
	xistosidade	micas	xisto
	gnáissica (bandamento)	qtz, feld, micas	gnaisse
Não-foliada	orientada	quartzo + micas	quartzito
	orientada	carbonatos	mármore
	orientada	anfíbolios	anfibolito
	maciça	quartzo	quartzito
	maciça	carbonatos	mármore

117

### 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, estauroлита, cianita, sillimanita)
- **ardósia**
  - minerais não são identificáveis a olho nu e muitas vezes nem com a lupa
  - plano da foliação é perfeito

118

#### • 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

119

#### • migmatito

- rocha mista com porção ígnea (camadas que cristalizaram de um fundido) e metamórficas (camadas que resistiram à fusão)

#### • granulito

- dominada por minerais anidros: feldspatos, ortopiroxênio, granada
- biotita e hornblenda podem ocorrer, mas são raras

120



121

## 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)

122



123

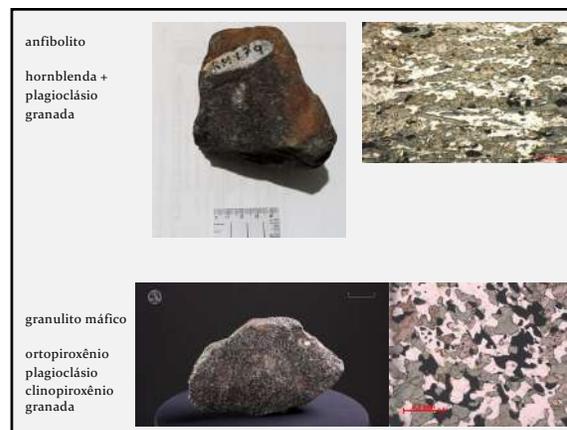
## Metamorfismo de basalto

- **Basalto** é a rocha usada para dar nome as fácies, pois a sua mineralogia muda com as condições *P-T*, gerando rochas com aspectos diferentes
- **xisto verde** – clorita + epidoto + albita + actinolita
- **anfibolito** – hornblenda + plagioclásio ± granada
- **granulito máfico** – ortopiroxênio + plagioclásio + clinopiroxênio ± granada
- xisto azul – glaucofânio + epidoto + albita ± granada
- eclogito – onfacita + piropro (não tem plagioclásio)

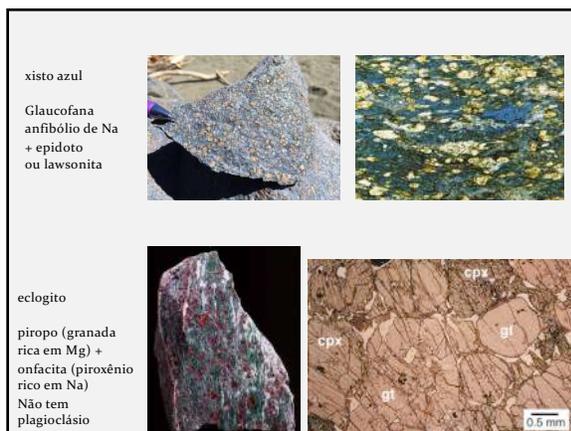
124



125



126



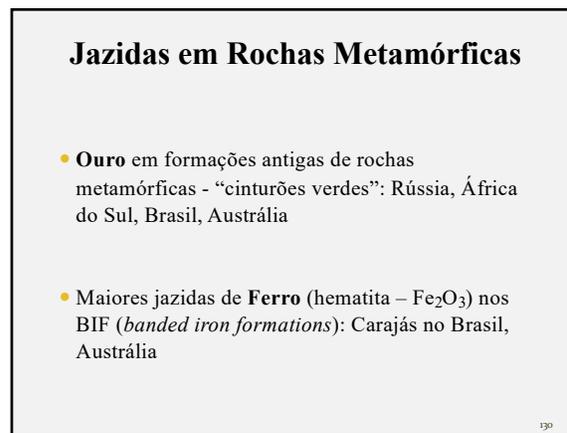
127



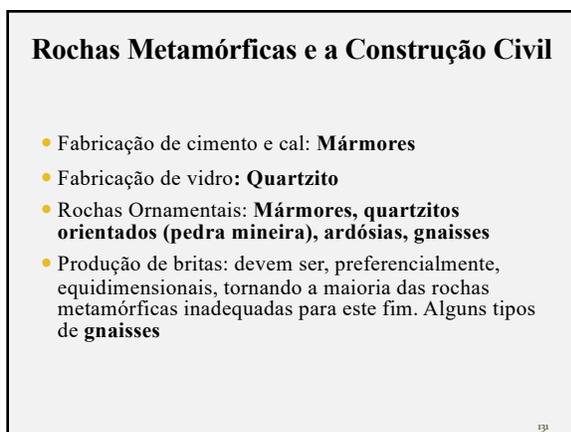
128



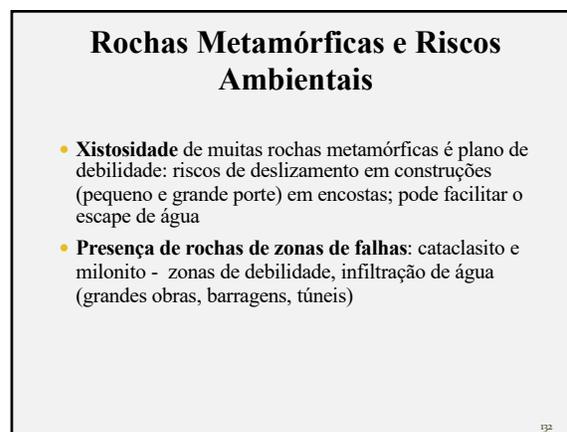
129



130



131



132

## REFERÊNCIAS

- TEIXEIRA, W., FAIRCHILD, T., TOLEDO, M.C.M. & TAIOLI, F. (2009) *Decifrando a Terra*. 2ª 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.
- BEST, M.G. (2002) *Igneous and Metamorphic Petrology*. Ed. Blackwell Publishing, 729 p.
- BUCKER, K. & FREY, M. (2002) *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer-Verlag, 340p.