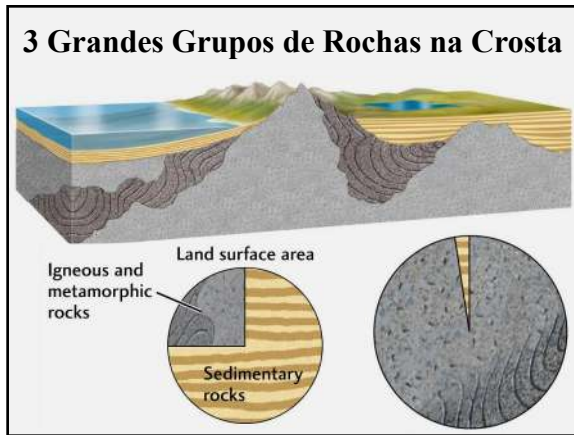




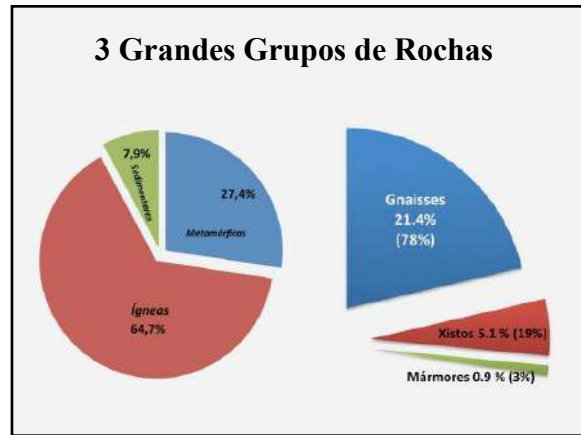
1



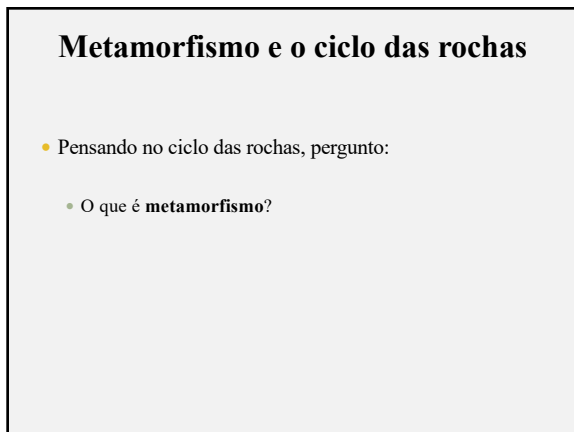
2



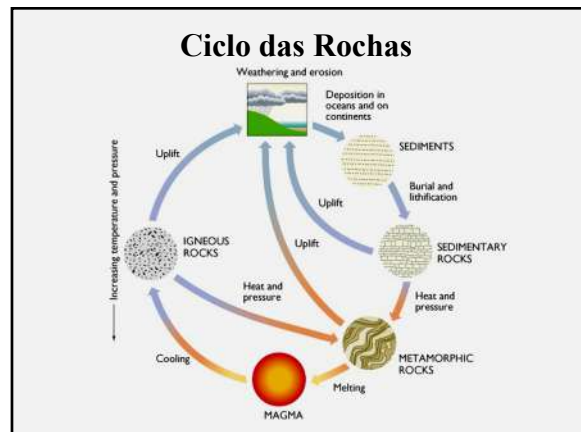
3



4



5

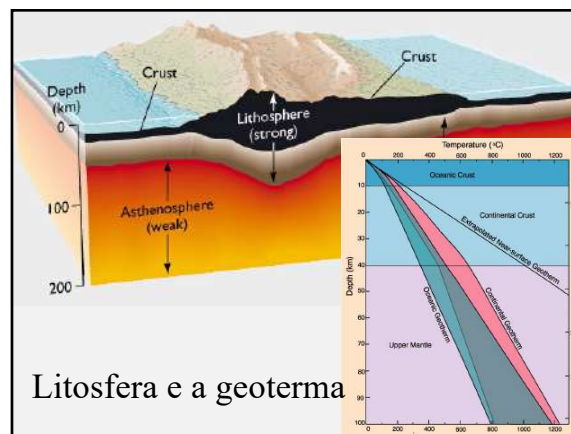


6

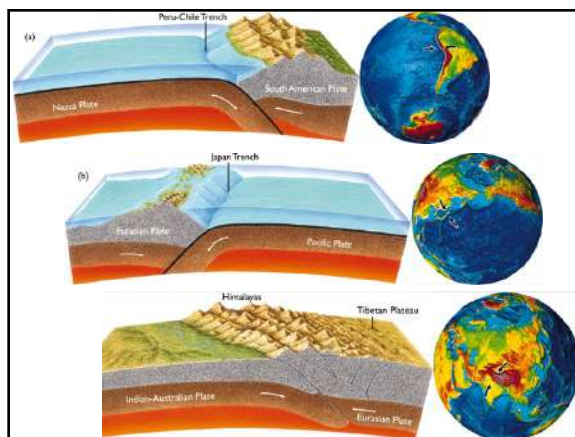
Metamorfismo e o ciclo das rochas

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

7



8



9



10

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

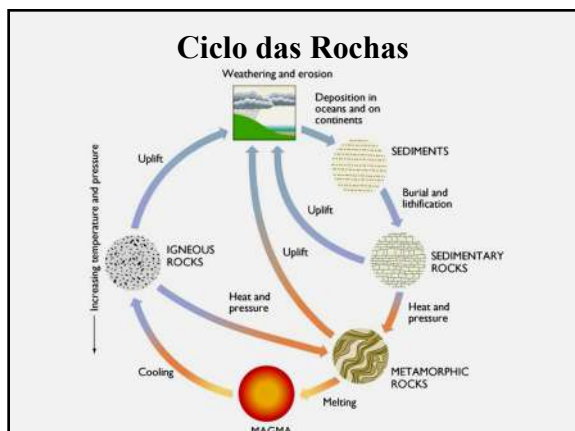
- **Formação das rochas metamórficas**
- Entender a formação e evolução das cadeias de montanhas
- Formação, transformação e evolução da crosta terrestre e do manto
 - crosta continental
 - crosta oceânica
 - manto
- Depósitos minerais
 - Metálicos: Au, Zn, Cu
 - Não-metálicos: brita, cimento, pedra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

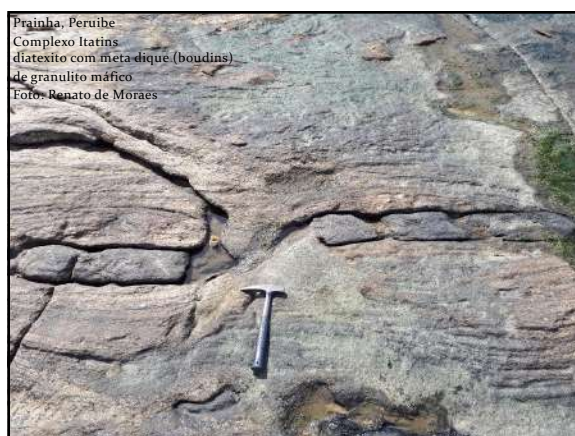
14



15



16

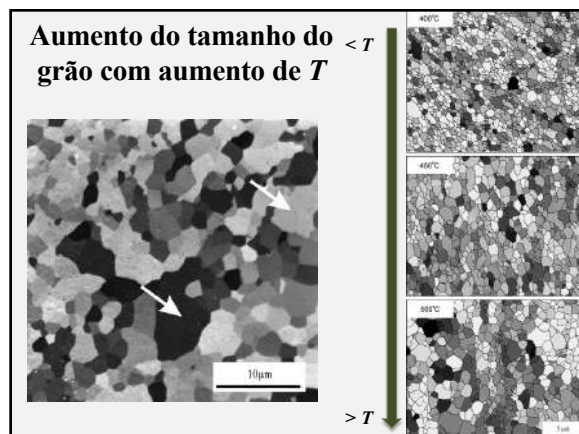


17

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 (σ - 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



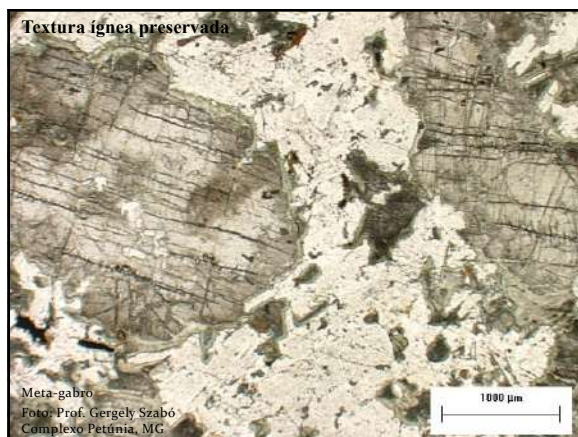
24



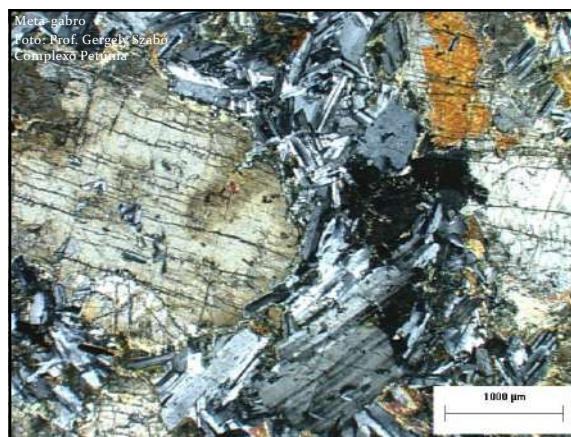
25



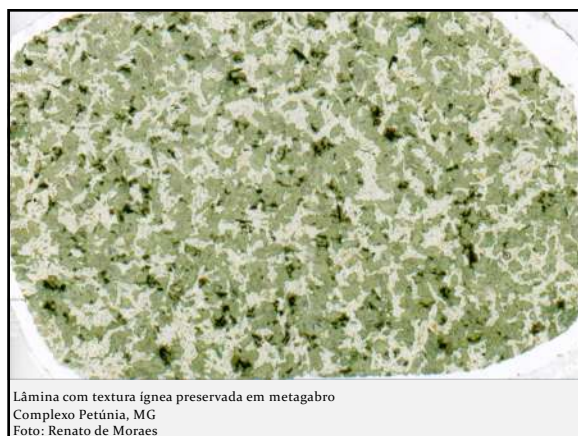
26



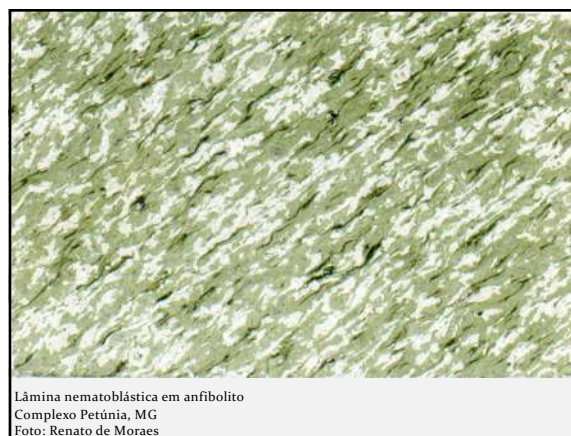
27



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

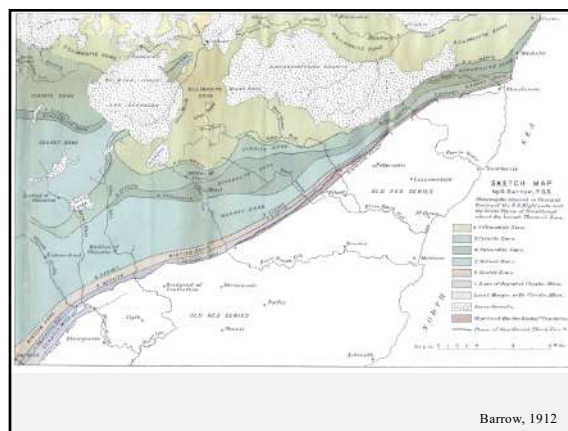


- Charles Lyell (1797-1855) em seu trabalho *Principles of Geology* (1833) elucidou as ideias de Hutton e propôs o nome **rochas metamórficas** para as rochas transformadas



- 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

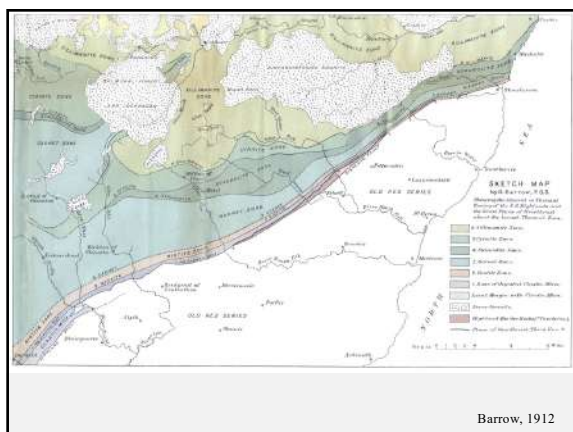
33



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

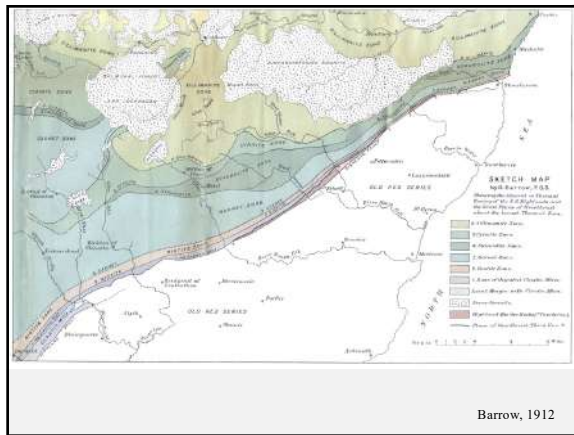
- As reações metamórficas são responsáveis pela formação das **paragêneses minerais**
- Paragênese é a associação mineral estável no **pico metamórfico** (*T* mais alta alcançada no metamorfismo)
- Um conjunto de rochas de certa **composição**, quando submetido a metamorfismo em diversas condições *P-T*, 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

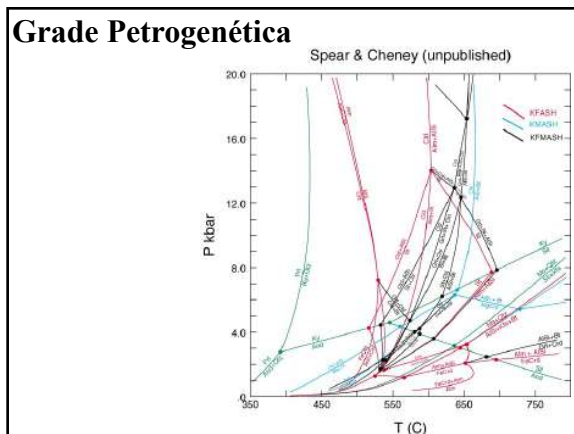


39

Polimorfos de Al_2SiO_5

cyanita
andalusita
sillimanita

40



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

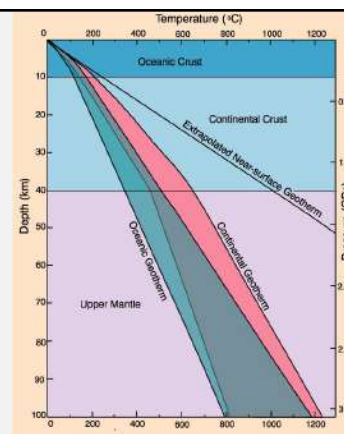
Limites de T do Metamorfismo

- 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 ³	densidade kg/m ³
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 ₂ 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

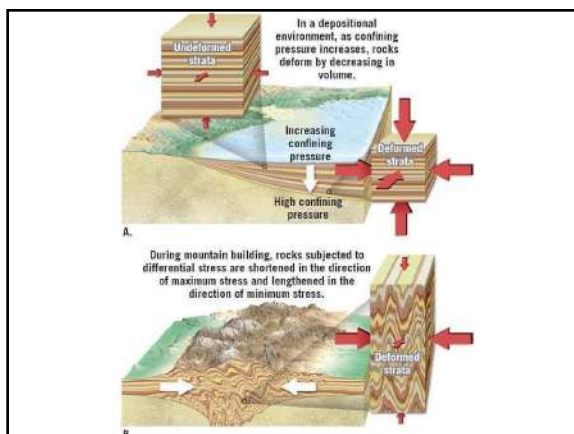
Algumas rochas crustais com coesita e diamante indicam $P > 35$ kbar ou ~ 120 km ou mais

51

Tensão deviatória σ 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

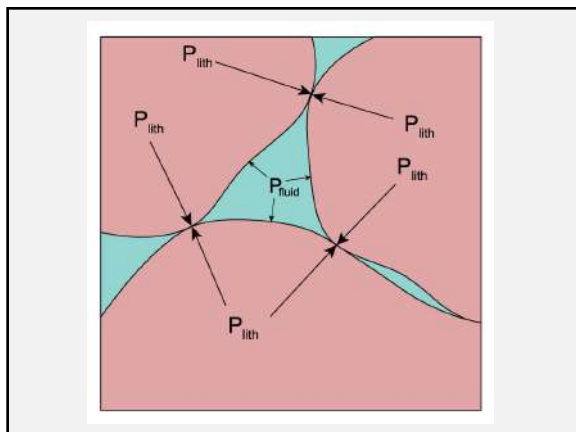


53

Fluidos (voláteis)

- **Fluidos** – ocorrem nos minerais hidratados e nos interstícios dos grãos
 - Espécies principais: H₂O, CO₂, CH₄, S (O₂, 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(-CO₂)
 - calcário impuro – CMSH-CO₂
 - rochas graníticas - NCKASH

56

Sistema fechado e aberto

- O metamorfismo pode ocorrer com **sistema químico fechado**, quando só há troca de calor e H₂O (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 H₂O 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

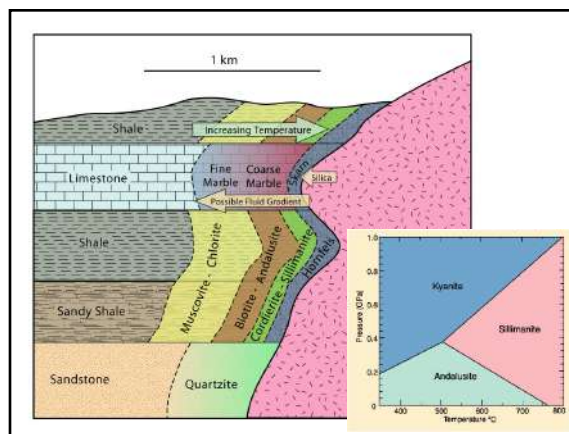
- **Metamorfismo de contato** – ocorre pelo calor oriundo de intrusões
 - Forma auréola de contato ao redor da intrusão
 - Minerais de T mais alta mais próximos da intrusão
 - Paragêneses anidras (e de alta T) próximas da intrusão
 - Paragêneses hidratadas (e de baixa T) distantes da intrusão

60

Auréola de contato



61



62



Cristais de andalusita em hornfels

63

Metamorfismo de impacto (ou choque)

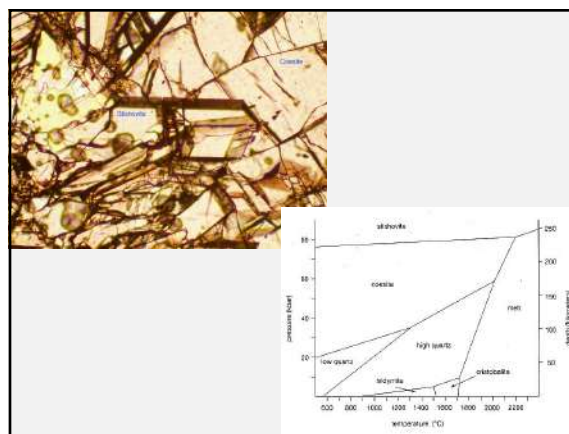
- **Metamorfismo de choque** (impacto) – causado pelo impacto de meteoritos
- Observado nas crateras de impacto
- Forma brechas polimíticas com matriz de vidro e polimorfos de Qtz de alta *P*
- coesita e stishovita



64



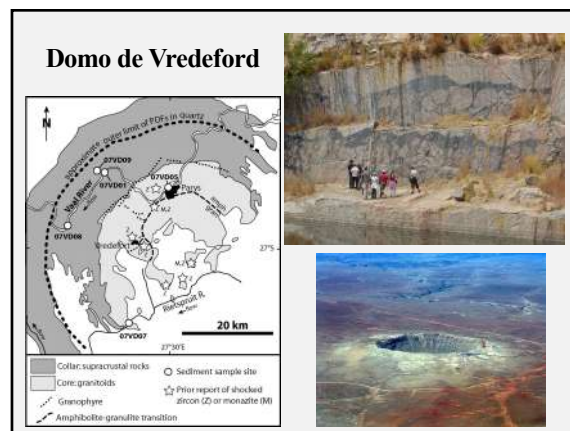
65



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

Geologic sketch map of the South Island of New Zealand showing the Mesozoic metamorphic rocks east of the older Tasmian Belt and the Alpine Fault. The Torlesse Group is metamorphosed predominantly in the prehnite-pumpellyite zone, and the Otago Schists in higher grade zones. X-Y is the Haast River Section of Figure 21-11. From Turner (1981) Metamorphic Petrology: Mineralogical, Field, and Tectonic Aspects, McGraw-Hill.

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

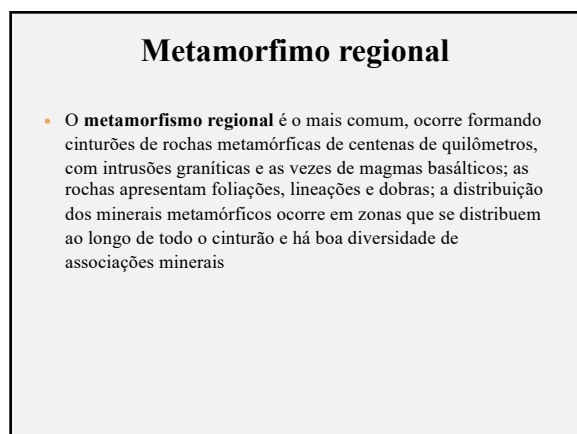
72



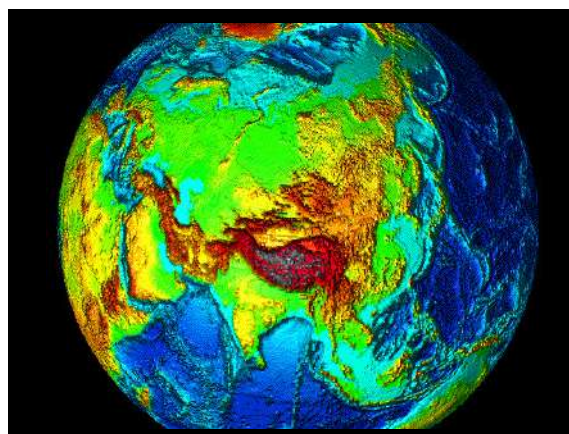
73



74



75



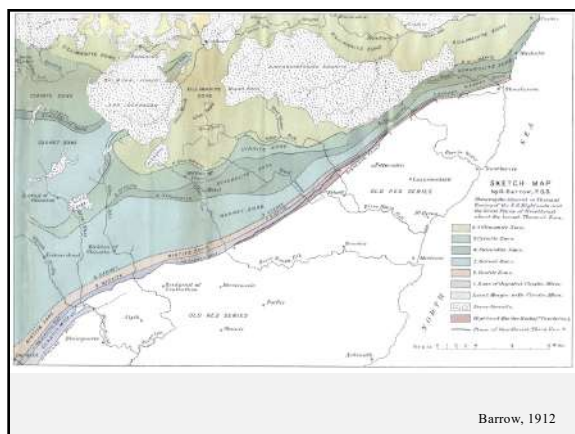
76



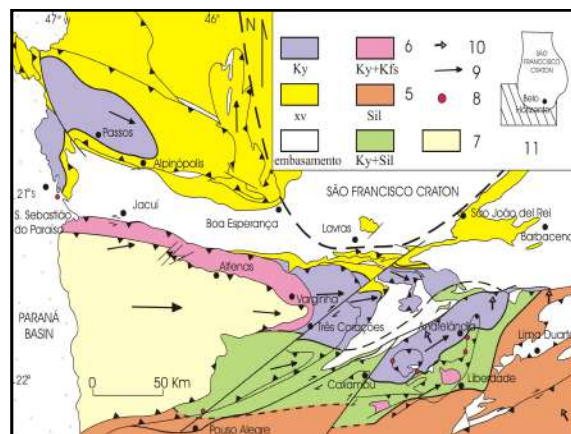
77



78



79



80

Metamorfismo de subducção

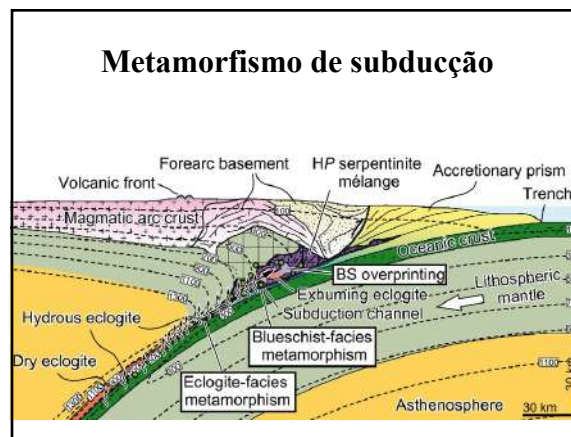
- Ocorre nas zonas de subducção, em que rochas da crosta oceânica são submetidas a altas pressões
- ocorre formação de xisto azul e eclogito

xisto azul, glaucofana e granada

eclogito, Noruega

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

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

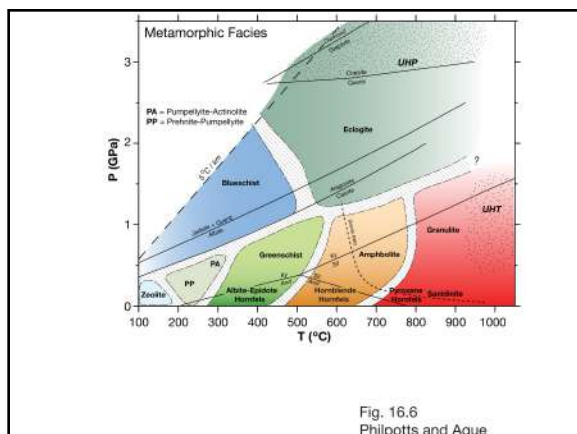


Fig. 16.6
Philpotts and Ague

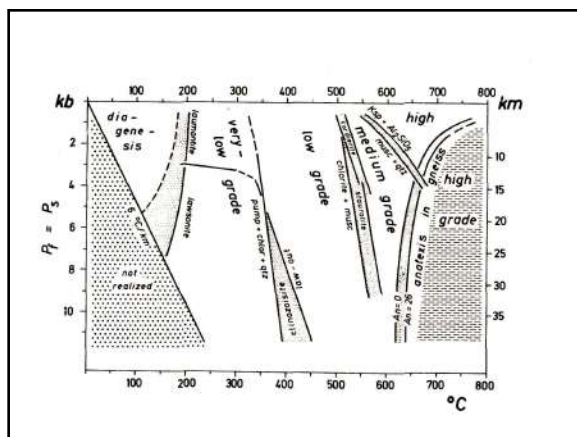
85

Grau metamórfico

- Winkler no final da década de 1960 descontente com variações no crescente número de sub-fácies, propôs que as fácies metamórficas fossem substituídas por 4 subdivisões de **grau metamórfico**
- grau muito baixo (ou incipiente)
- grau baixo
- grau médio
- grau alto



86

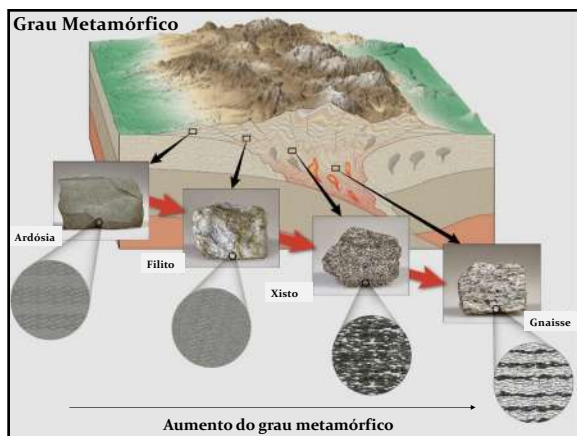


87

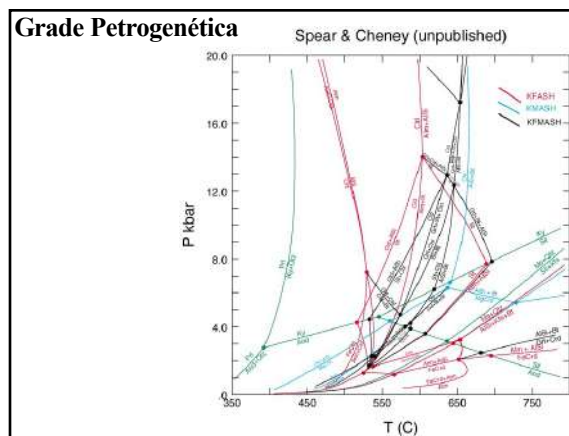
Grau metamórfico

- Embora Winkler tenha usado o termo **grau metamórfico** em substituição às **fácies metamórficas** de um modo formal, **grau metamórfico** comumente é usado de uma maneira informal, para dizer se as rochas sofreram **metamorfismo mais ou menos intenso** em relação à **temperatura**

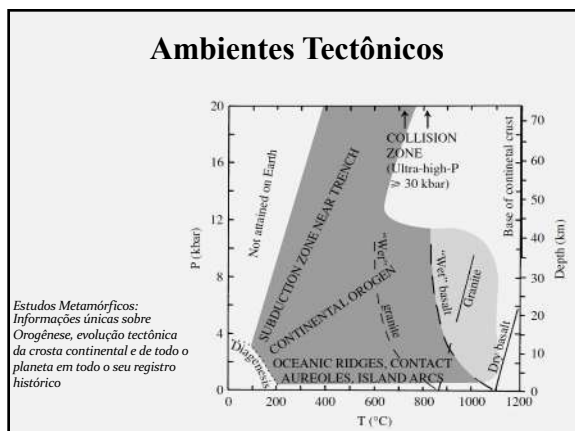
88



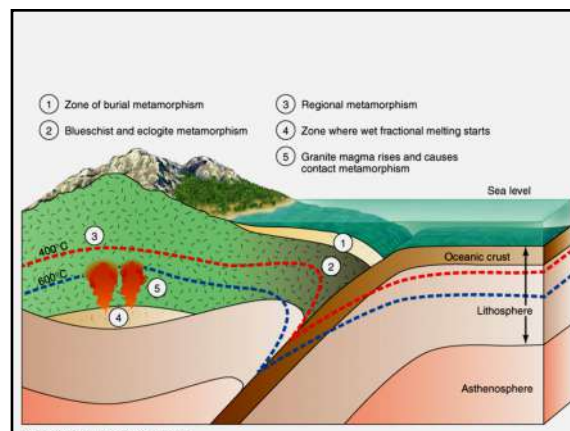
89



90



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)

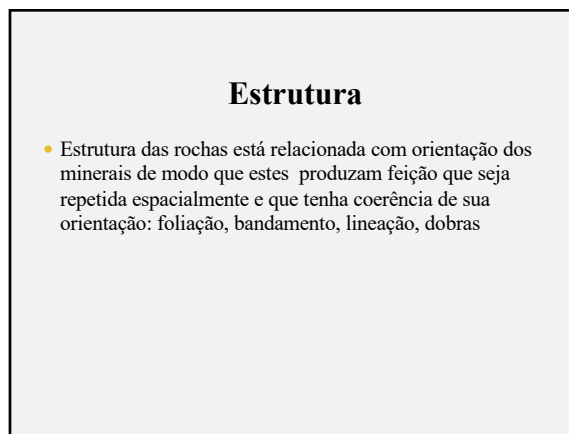
95

Minerais mais comuns em pelitos

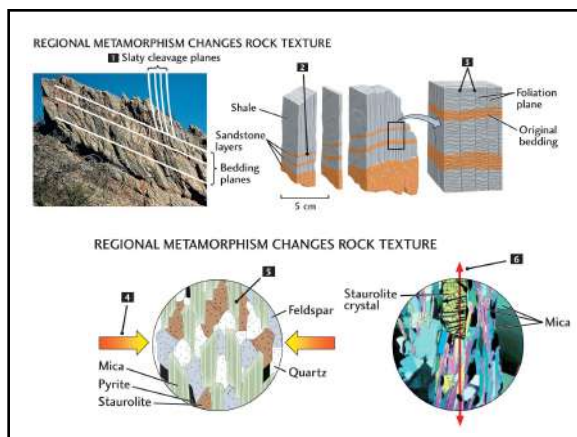
96



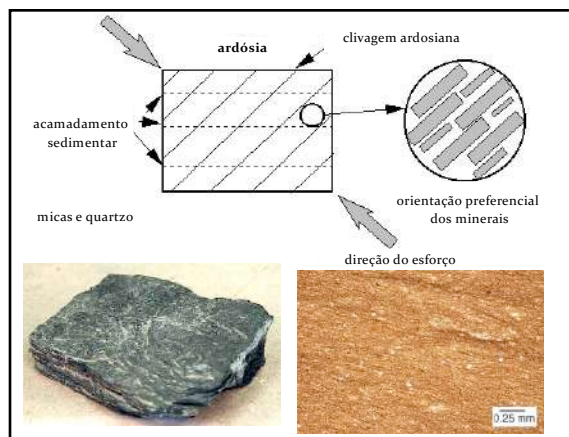
97



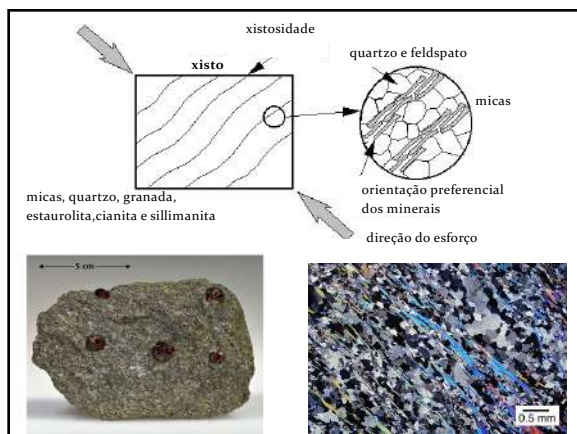
98



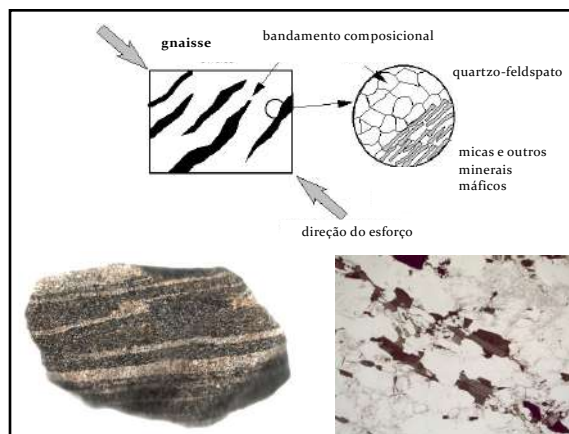
99



100



101



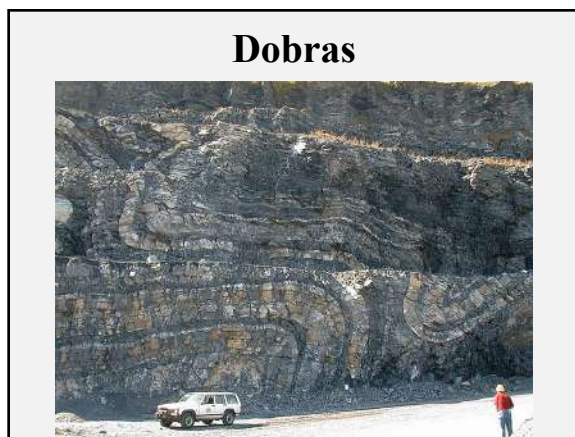
102



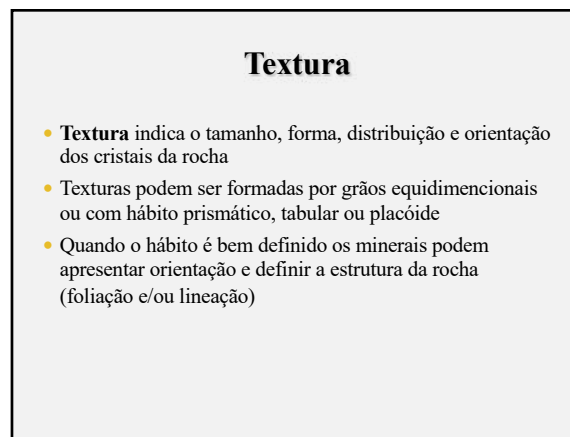
103



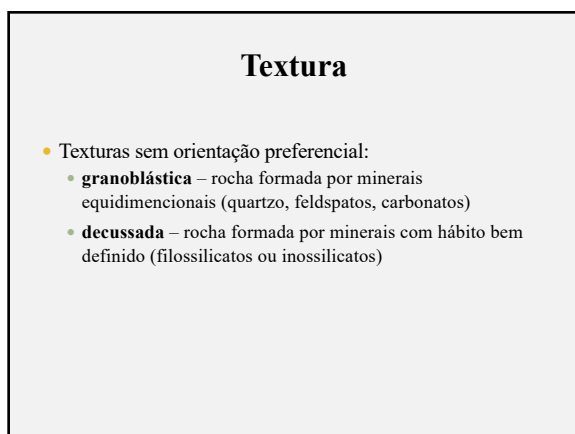
104



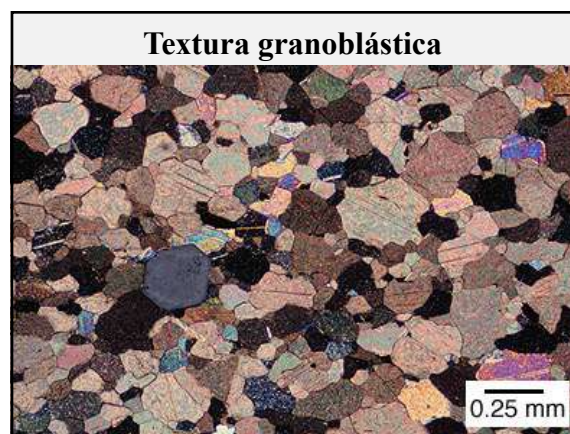
105



106

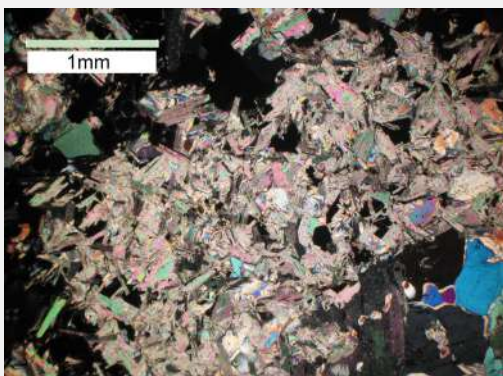


107



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 **cataclásito**

110

Textura granoblástica orientada



111

Textura nematoblástica

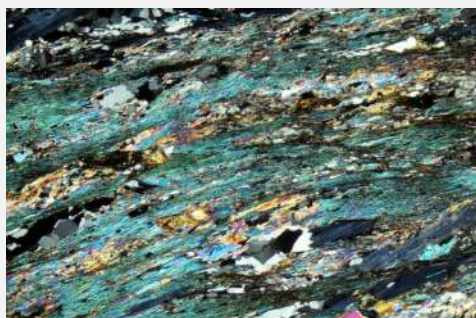
- orientação de minerais prismáticos (anfíbólio)



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	anfíbolito
	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

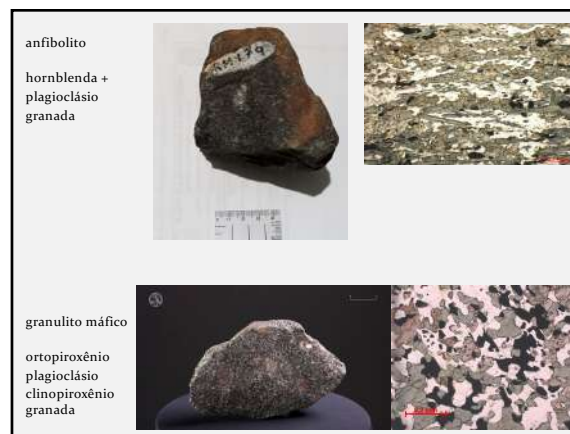
Metamorfismo de basalto

- **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)

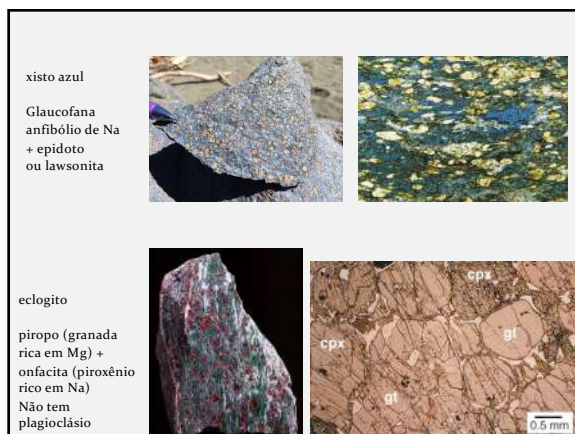
124



125



126



127



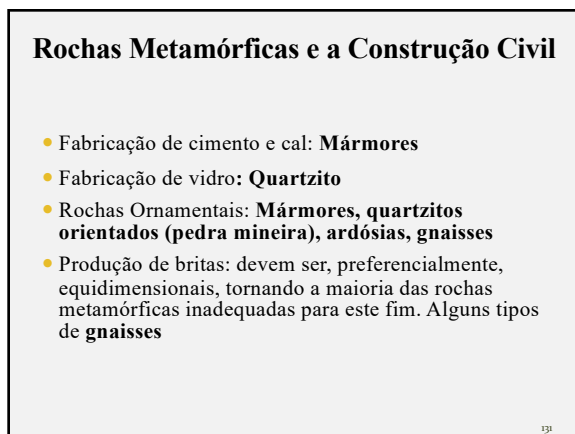
128



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.