

GMG0332
Petrologia Metamórfica
Metamorfismo de Rochas
Básicas / Máficas

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Principais tópicos

- Os **protólitos** e suas características;
- Feições petrográficas gerais;
- O sistema **NCMFASH (TO)** e o **diagrama ACF**;
- Metamorfismo progressivo de metabasitos: as **fácies de Eskola**;
- Metamorfismo de corpos lenticulares ("**boudins**") com acesso restrito de fluidos;
- Metamorfismo de **alta P**

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Conceitos fundamentais

Rocha básica: SiO₂ (% em peso) entre 45 e 52

Rocha máfica: s.l. melanocrática (IC ≥ 50)

Principais protólitos:

- **orto-derivados** - basalto, diabásio (microgabro), gabro, rochas piroclásticas s.l. basálticas; andesitos e dioritos (rochas intermediárias) tem comportamento semelhante no metamorfismo;
- **para-derivados** – margas (rochas sedimentares mistas, pelíticas-carbonáticas).

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Composição mineralógica fundamental dos protólitos

Plagioclásio + clinopiroxênio (cálcico e/ou sub-cálcico) + **óxidos Fe-Ti**

- **Plagioclásio:** labradorita a andesina (An₇₀-An₃₀), com zoneamento composicional
- **Clinopiroxênio:** augita e/ou pigeonita
- **Óxidos Fe-Ti:** magnetita +/- ilmenita

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Outros minerais

Mais frequentes: ortopiroxênio, quartzo, olivina, biotita, hornblenda, feldspato alcalino, vidro vulcânico;

Acessórios comuns: apatita, sulfetos (calcopirita, pirita, pirrotita);

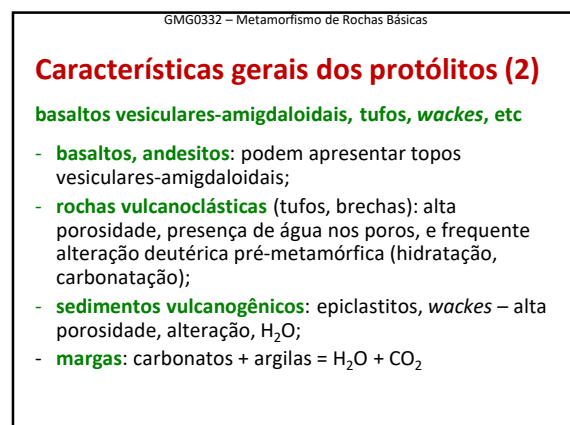
De alteração: "clorofeita", clorita, epidoto, calcita, "uralita" = actinolita fina-fibrosa, hidróxidos de Fe, muscovita, vermiculita, argilominerais.

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Características gerais dos protólitos (1)

gabros, microgabros (= diabásios), basaltos e andesitos

- paragênese ígneas de altas temperaturas (>1.000 a 700 °C), **anidras**;
- corpos de dimensões variáveis, geralmente tabulares (espessuras de poucos centímetros a centenas de metros);
- corpos maciços intrusivos e vulcânicos: baixa porosidade, grande contraste reológico com as demais rochas ao redor;



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Pillow-lavas com paragênese de Fácies Xisto Azul (glaucofânio xisto) nos domínios inter-pillow e características ígneas preservadas nos núcleos



<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/harker/geo102C/lectures/part13.html>

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Estruturas comuns em rochas metabásicas

- **Maciça** (e.g. núcleos de *boudins*);
- **Foliada**: xistosa ou milonítica (nas bordas).

Texturas comuns em rochas metabásicas

- **Ígneas preservadas**: blastosubofítica, blastointergranular, blastoporfirítica, etc;
- **Nematoblástica, granonematoblástica;**
- **Decussada, granoblástica poligonizada;**
- **Texturas miloníticas** (nas bordas).


GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Boudins de anfibolito em gnaisses / migmatitos



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Boudinagem – o processo



Klein & Philippot 2016 – Fig.15.11

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

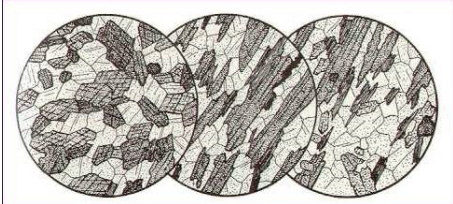
“Boudin” máfico em gnaisses miloníticos (saprolito de...):



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Texturas em anfibolitos

- **granoblástica poligonizada** (corte normal à foliação)
- **grano-nematoblástica** (corte // à foliação)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Textura granoblástica polygonizada

Atenção: corte **perpendicular à lineação!**
Notar seções basais da Hbl!

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Textura grano-nematoblástica – Hbl + Plag

Corte // à lineação

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Textura granonematoblástica inequigranular seriada

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Textura blasto-porfirítica, matriz polygonizada

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Milonito de anfibolito

porfiroclastos de plagioclásio

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Textura milonítica – estiramento, lenticularização

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Composição química dos protolitos (médias):

	Gabros	Basaltos MORB
SiO ₂	48,36	49,20
TiO ₂	1,32	2,03
Al ₂ O ₃	16,84	16,09
Fe ₂ O ₃	2,55	2,72
FeO	7,92	7,77
MnO	0,18	n.d.
MgO	8,06	6,44
CaO	11,07	10,46
Na ₂ O	2,26	3,01
K ₂ O	0,56	0,14
H ₂ O*	0,64	0,70
P ₂ O ₅	0,24	n.d.
Total:	100,00	98,56

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Minerais característicos de metabasitos

Clorita (Chl) – (Mg,Fe²⁺,Fe³⁺,Al)₆[(Si,Al)₄O₁₀](OH)₈
Actinolita (Act) – Ca₂(Fe,Mg)₅Si₈O₂₂(OH)₂
Hornblenda (Hbl) – NaCa₂Mg₄Al[Al₂Si₆]O₂₂(OH)₂
Albita (Ab) – NaAlSi₃O₈
Anortita (An) – CaAl₂Si₂O₈
Grupo do Epidoto (Ep, Zo, Cz) – Ca(Fe³⁺,Al)Al₂Si₃O₁₂(OH)
Calcita (Cal) – CaCO₃
Diopsídio (Di) – Ca(Fe,Mg)Si₂O₆
Granada (piropo / almandina - Grt) – (Mg,Fe)₃Al₂Si₃O₁₂
Ortopiroxênio ("Hiperstênio" - Opx) – (Fe,Mg)₂Si₂O₆

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

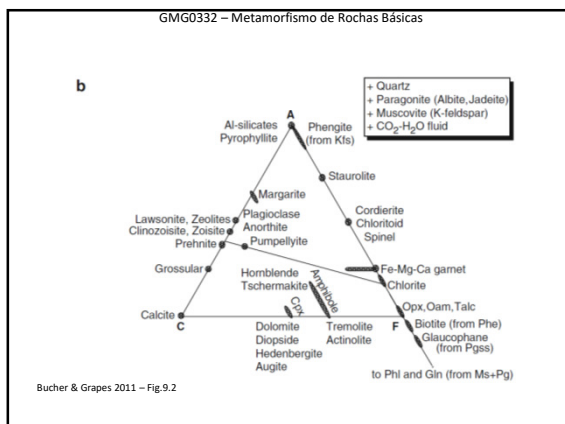
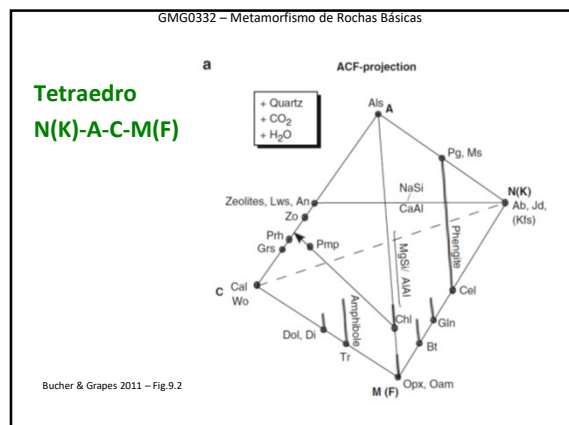
Espaço composicional

- Sistema mais completo: **NCMFASH (TO)**
- Sistema "reduzido": **ACF (F = F + M)**

Diagrama ACF (Eskola) – não é um **diagrama de fases** no sentido termodinâmico restrito! (altas variâncias)

Para projetar composições de rochas (em P.M.):
A = Al₂O₃ + Fe₂O₃ – Na₂O – K₂O
C = CaO
F = FeO + MgO + MnO

Obs: ACF de Spear = AlO_{3/2} / CaO / (FeO+MgO+MnO)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Soluções sólidas principais em minerais de metabasitos

- **Mg ↔ Fe** (em piroxênios, anfibólios, etc)
- **Plagioclásios:** NaSi ↔ CaAl (aumento do teor de An com aumento de grau)
- **Anfibólios** (incremento de Al com aumento de grau):
 - **substituição edenítica** - ^{Asi}Si^{IV} ↔ Na^AAl^{IV}
 - **substituição tschermakítica** - Mg^VSi^{IV} ↔ Al^VAl^{IV}

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Para projetar fases minerais no diagrama ACF

Decompor em moléculas Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO , MnO

Mineral	A	C	F
- An - $CaAl_2Si_2O_8$	1	1	0
- Di - $Ca(Fe,Mg)Si_2O_6$	0	1	1
- Grt - $(Fe,Mg)_2Al_2Si_2O_{12}$	1	0	3
- Ep - $Ca_2(Fe^{3+},Al)Al_2Si_2O_{12}(OH)$	1,5	2	0
- Opx - $(Fe,Mg)_2Si_2O_6$	0	0	1
- Act - $Ca_2(Fe,Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	0	2	5
- Hbl - $NaCa_2Mg_4Al[Al_2Si_2O_{22}(OH)_2]$	1,5	2	4
- etc, etc, etc....			

Para projetar:
 A = Al_2O_3 (+ Fe_2O_3) - Na_2O - K_2O
 C = CaO
 F = FeO + MgO + MnO

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Diagrama ACF, com os principais minerais

□, ● = composição média das rochas básicas:

Winter 2010

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Fácies metamórficas de Eskola: nomes baseados nas rochas máficas – básicas

Sub-Xisto Verde: **Zéolita, Pehnhita-Pumpellyita**

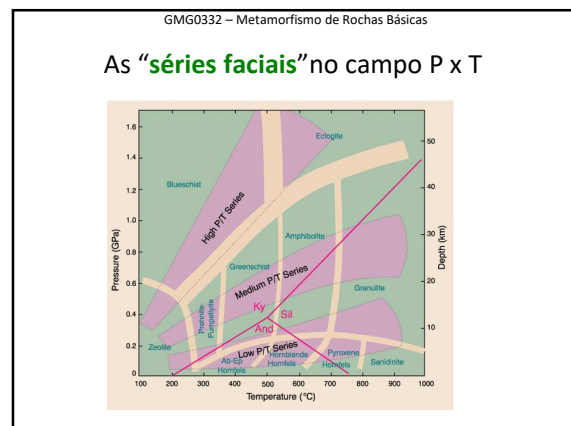
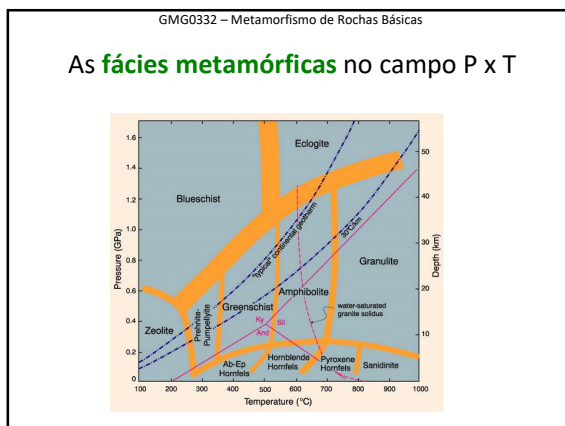
Pressão intermediária (“Barrowiano”) – sequ. progressiva:
Xisto Verde → **(EpidotoAnfibolito)** → **Anfibolito** → **Granulito**

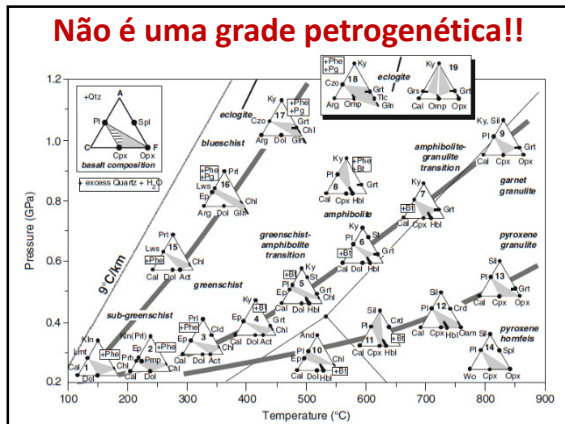
Alta Pressão: **Xisto Azul, Eclogite**

Baixa Pressão / de contato: **Albita-Epidoto Hornfels, Hornblenda Hornfels, Piroxênio Hornfels, Sanidinito**

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Woudloper / Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Metamorphic_facies#/media/File:ACF_triangles_EN.svg



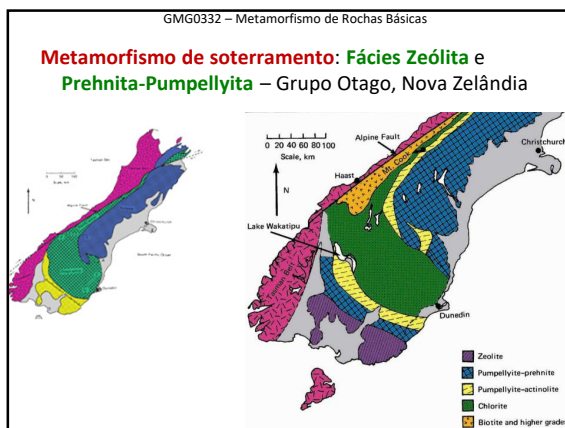


GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Fácies sub-Xisto Verde: Fácies Zeólita e Fácies Prehnita-Pumpellyita (e Pumpellyita-Actinolita)

Geralmente: **metamorfismo de soterramento (burial)** ou **hidrotermal** de rochas vulcanogênicas porosas (tufos, brechas, basaltos vesiculares, grauvascas = wackes);

Metamorfismo **não-pervasivo**: reações minerais em domínios composicionais susceptíveis (e.g. vidro vulcânico, matriz cripto-cristalina)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Fácies Zeólita

- Vidro e mesóstase cripto/ microcristalina ⇒ **zeólitas (heulandita, analcima, wairakita)** ± quartzo e filossilicatos (montmorillonita, celadonita); fases ígneas + ou – pristinas;
- Com grau crescente: desenvolve-se **laumontita**, clorita e Ca-plag ⇒ albita (pseudomorfos);

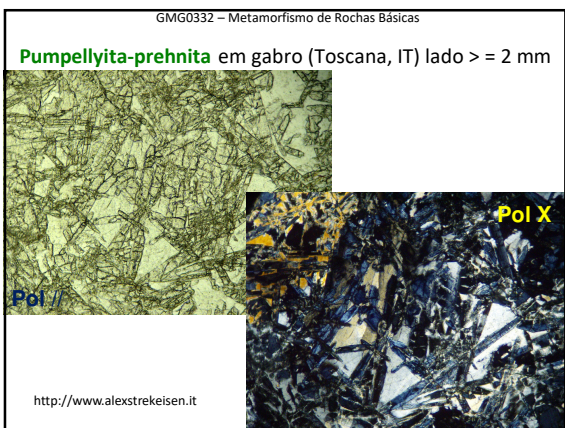
Obs: analcima = $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$;
 heulandita = $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;
 wairakita = $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
 laumontita = $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

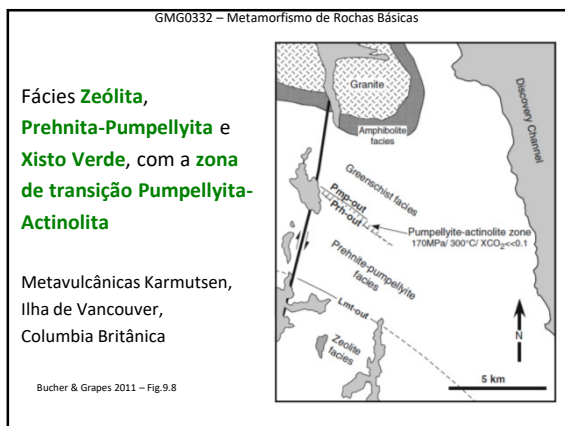
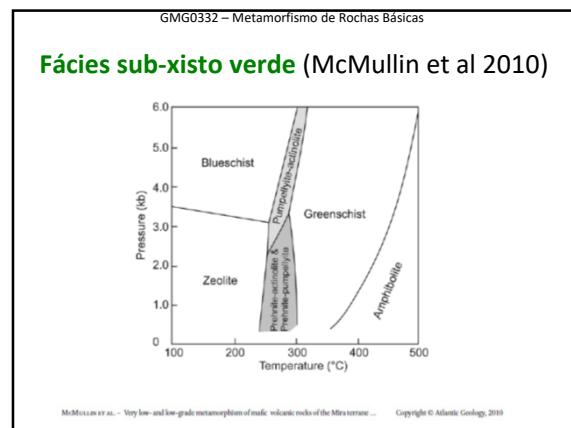
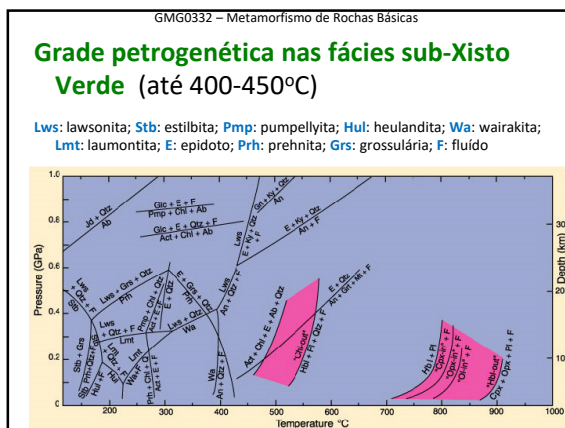
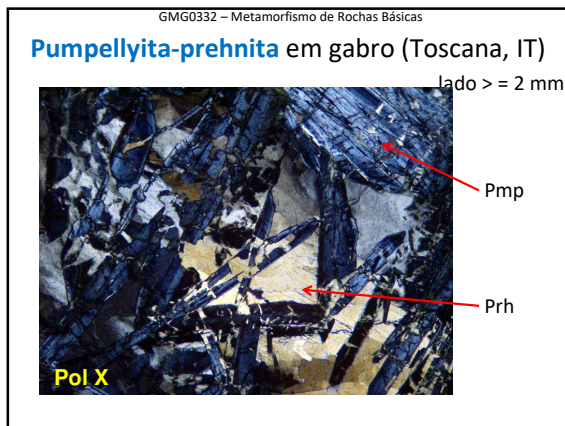
GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Fácies Prehnita-Pumpellyita: prehnita, pumpellyita e epidoto substituem laumontita.

- $T^\circ <$: prehnita + pumpellyita ± clorita ± albita ± epidoto;
- $T^\circ >$: prehnita + pumpellyita + actinolita;
- P >: lawsonita + albita
- Presença de CO_2 inibe laumontita e prehnita.

Prehnita - $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
 Pumpellyita - $\text{Ca}_4(\text{Mg,Fe})(\text{Al, Fe}^{+3})_5\text{O}(\text{OH})_3(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{SiO}_4)_2 \rightarrow$





GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

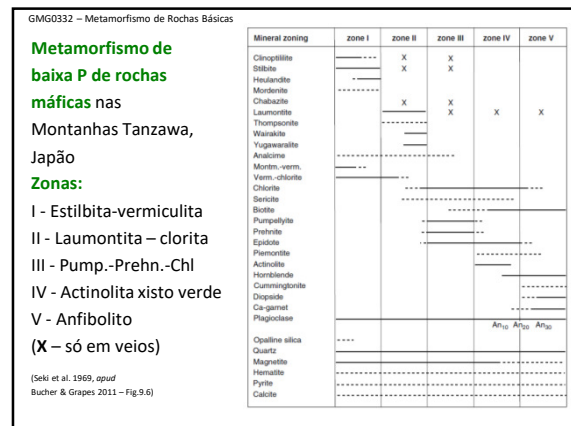
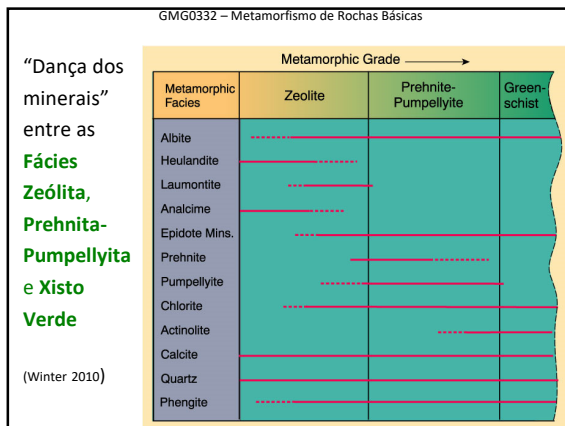
Em **campos geotermiais** (gradientes geotérmicos acentuados – circulação intensa de água aquecida = gêiseres) – e.g. Reykjanes, Islândia: associações minerais comparáveis às de terrenos com metamorfismo de soterramento, T entre 100 – 300 °C.

Nas partes superiores: **zeólitas** (mordenita, estilbita, mesolita, analcima, wairakita);

Nas partes mais profundas, T° > 230 °C: **prehnita, epidoto e clorita**; plagioclásio ↔ albita e/ou Kf;

Qdo T° > 300 °C: presença de **actinolita**;

Águas ricas em CO₂ (Salton Sea, Califórnia, EUA): **zeólitas e prehnita não se desenvolvem**, e **clorita e epidoto** marcam o início das transformações.



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Transição fácies Prehnita-Pumpellyita ⇒ fácies Xisto Verde

Exemplos de reações:

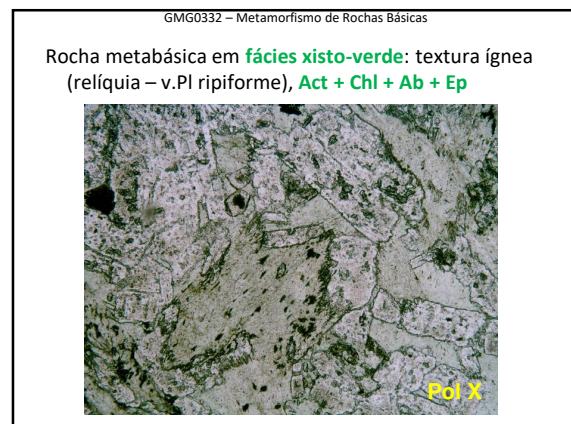
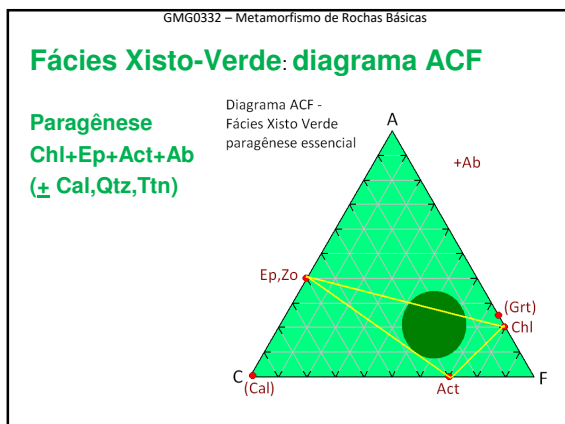
- $5Prh + Chl + 2Qtz = 4Zo + Tr + 6H_2O$
- $25Pmp + 2Chl + 29Qtz = 7Tr + 43Zo + 67H_2O$
- $14Lws + 5Pmp = 17Zo + Chl + 4Qtz + 33H_2O$
- $4Wa + Ab = Pg + 2Zo + 10Qtz + 6H_2O$
- $4Lmt + Ab = Pg + 2Zo + 10Qtz + 14H_2O$

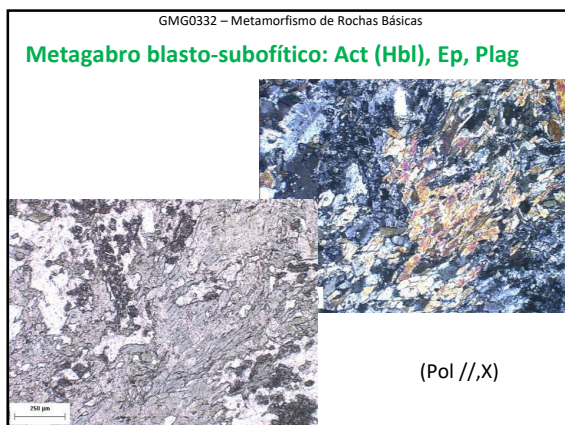
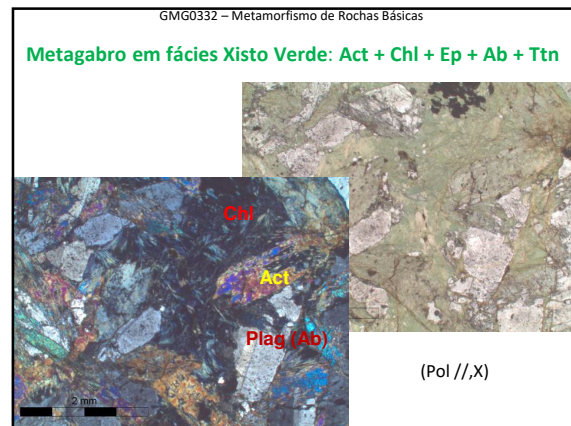
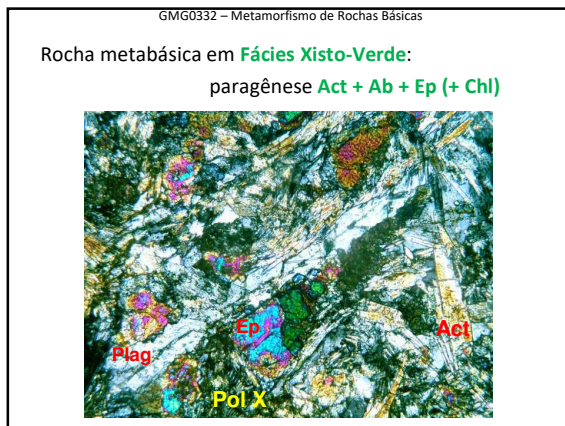
GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo progressivo de P intermediária

Fácies Xisto Verde – rocha-tipo: **clorita-albita-epidoto-actinolita xisto/fels**

- **Outros minerais comuns:** titanita (leucoxênio), magnetita e/ou ilmenita, calcita, quartzo, granada, biotita
- **Texturas:** lepidogranonematoblástica ou relíquias ígneas (blastofítica, blastosubofítica)





GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo progressivo de P intermediária

Transição **Fácies Xisto Verde – Fácies Anfibolito**

- **clorita, epidoto** (e **calcita**) são consumidos;
- **actinolita** se transforma em **hornblenda** (s.s.);
- **albita** (ou Na-oligoclásio) enriquece em Ca e Al (aumento do teor de An) continuamente, após transpor a **lacuna da peristerita** (s.s.);
- **leucoxênio** e **ilmenita** dão lugar a **titanita**.

Obs: s.s. = solução sólida!

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

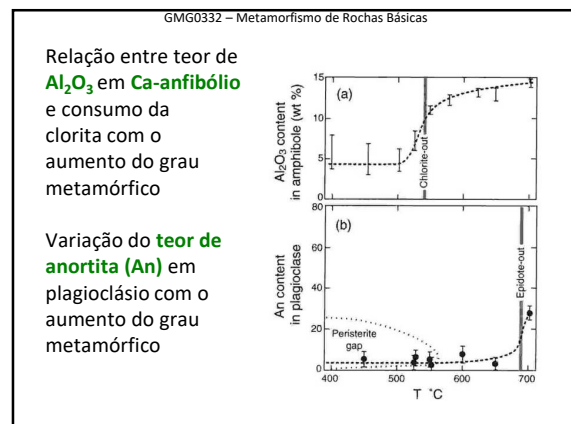
Transição **Fácies Xisto Verde – Fácies Anfibolito**

Reações descontínuas

- $Chl + Al-Ep + Qtz = Hbl(Tsch) + An + H_2O$
- $Ab + Act = Hbl(Eden) + Qtz$ (v. bordas carcomidas em Plag rípiforme ígneo!)
- $Act + Chl + Qtz + Al-Ep = Hbl(Tsch) + H_2O$

Reações contínuas (sliding reactions)

$Act \Rightarrow Hbl$ (Tschermakítica, Edenítica), $Ab \Rightarrow Plag$ (An > 17)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo progressivo de P intermediária

Fácies Epidoto - Anfibolito – intermediário entre Fácies Xisto Verde e Anfibolito a P maiores

Rocha-tipo: epidoto anfibolito = Hbl (hornblenda) + Pl (plagioclásio, **An < 17!!!**) + Ep (epidoto)

- **Outros minerais comuns:** granada, quartzo, titanita, magnetita e/ou ilmenita, biotita;
- **Texturas:** nemato-granoblástica, mais raramente relíquias ígneas (blastofítica, blastosubofítica, blastoporfírica)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Epidoto anfibolito

(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Transição Fácies Xisto Verde – Anfibolito

- **P < s:** epidoto é consumido antes da clorita:
 $Ab + Ep + Chl + Qtz = Olg + Hbl (Tsch) + Mt + H_2O$ ou:
 $Hbl_1 + Chl_1 + Ep + Ab = Hbl_2 + Chl_2 + Qtz + H_2O$
- **P > s:** clorita é consumida antes do epidoto:
 $Chl + Ttn + Qtz + Act = Hbl (Tsch) + Ilm + H_2O$

⇒ **Fácies Epidoto-Anfibolito**
 Finalmente – **Ep-out** (P > s):
 $Ab + Ep + Hbl_1 + Qtz = Hbl_2 + H_2O$

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Curvas de consumo da clorita e do epidoto
 (Apted & Liou 1983)

AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE, VOL. 283-A, 1983, P. 328-354

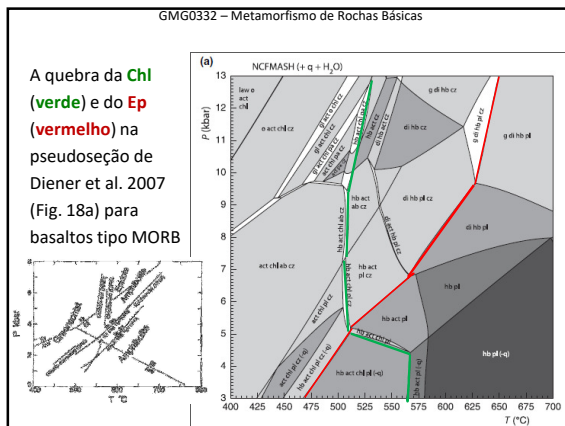
GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Transição Xisto Verde – Epidoto Anfibolito – Anfibolito

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Varição da proporção modal das fases entre Fácies Xisto-Verde e Anfibolito, segundo resultados experimentais
 (Apted & Liou 1983)

AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE, VOL. 283-A, 1983, P. 328-354



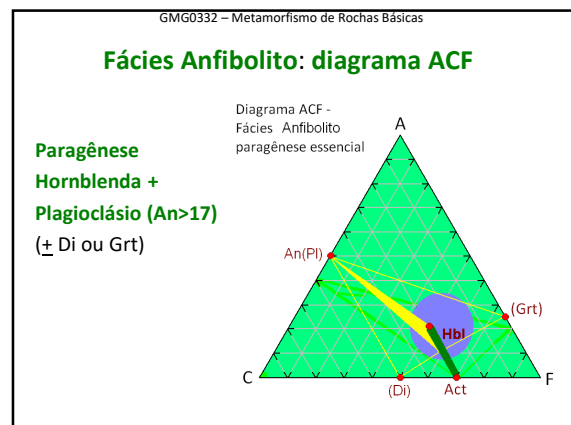
GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo progressivo de P intermediária

Fácies Anfibolito

Rocha-tipo: **anfibolito** = Hbl (hornblenda) + Pl (plagioclásio, An \geq 17)

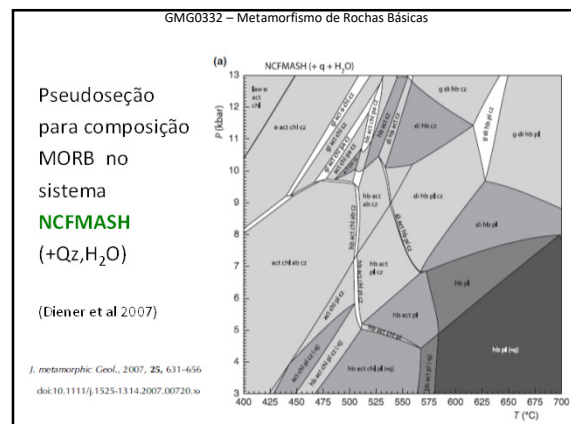
- **Outros minerais comuns:** granada, quartzo, diopsídio, titanita, magnetita e/ou ilmenita, biotita;
- **Texturas:** nemato-granoblástica, decussada, porfiroblástica, mais raramente relíquias ígneas (blastofítica, blastosubofítica)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Comparação da sequência de desenvolvimento de paragêneses e minerais-índice entre rochas metabásicas e metapelíticas entre **Fácies Xisto-Verde** e **Anfibolito**

Metamorphic facies	Greenschist		Amphibolite		
	Chlorite	Biotite	Garnet	Staurolite	Sillimanite
Metamafites					
Albite	-----				
Albite-oligoclase	-----				
Oligoclase-andesine		-----			
Andesine		-----			
Epitote		-----			
Actinolite		blue-green		green	green and brown
Hornblende					
Chlorite	-----				
Calcite		green-brown		brown	
Biotite		-----			
Muscovite	-----				
Quartz	-----				
Metapelites					
Chlorite	-----				
Muscovite	-----				
Biotite		-----			
Garnet			-----		
Staurolite				-----	
Alamosiccate				andalusite	sillimanite
Chloritoid	-----				
Plagioclase	clastic			oligoclase	
Quartz	-----				



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Substituição da paragênese ígnea diretamente no Fácies Anfibolito: núcleos de boudins e corpos maiores

- $Cpx (Aug) + H_2O = Hbl + Qtz + Ilm/Rt$
- $Opx + H_2O = Cum + Qtz$

Plagioclásio: bordas corroídas (substituição edenítica em Hbl: ${}^A Si^{IV} \leftrightarrow Na^A Al^{IV}$); núcleo preservado, eventualmente reequilibrado-recristalizado (Pl metamórfico: poligonizado, zoneamento inverso)

Cpx: pseudomorfo, às vezes até monocristalinos (grão a grão), com **Qtz** goticular e **Ilm** em nuvens de opacos

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metagabro em Fácies Anfibolito: Pl ígneo, Hbl



(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

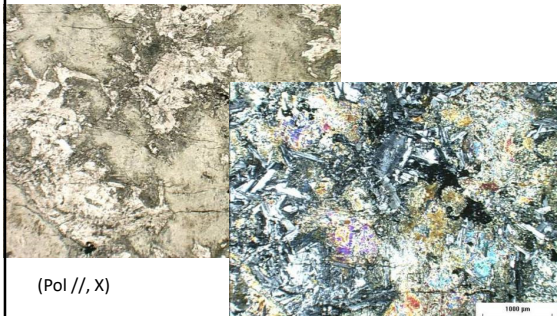
Metagabro em Fácies Anfibolito: Pl ígneo, Hbl



(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metagabro: textura mista, parcialmente reconstituída. Pl ripiforme ígneo, Hbl nas bordas do Cpx



(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Textura blasto-porfirítica, matriz poligonizada



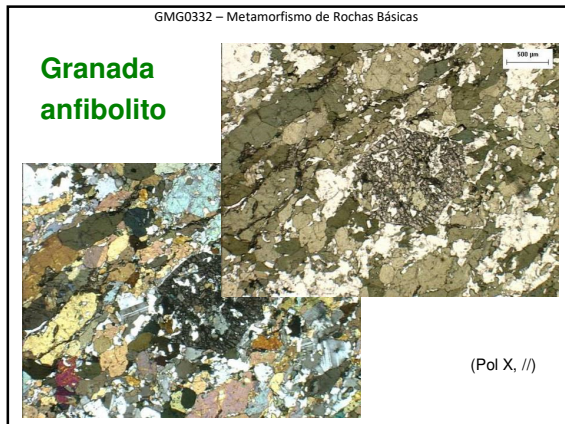
(Pol //, X)

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metagabro blasto-subofítico, F. Anfibolito: Hbl, Plag (And)



(Pol X, //)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo progressivo de P intermediária

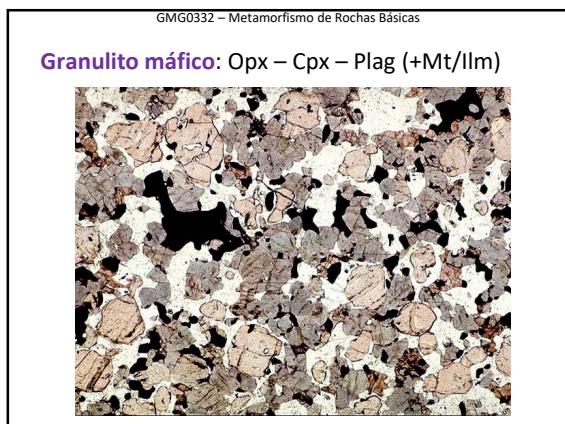
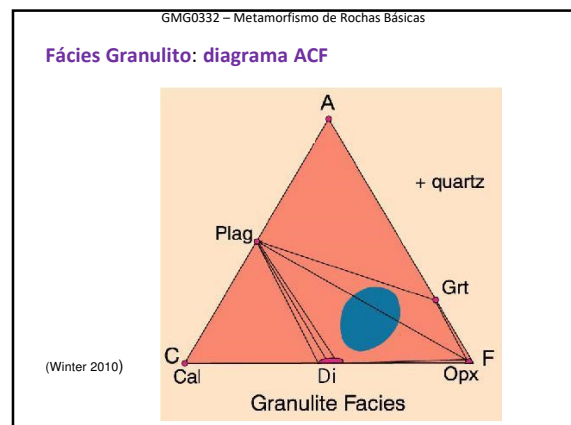
- **Fácies Anfibolito inferior = Fácies Epidoto Anfibolito** (Ep + Ab + Hbl)
- **Fácies Anfibolito superior:** presença de **Cpx** (diopsídio) – início da “quebra” da **Hbl** por desidratação da rocha;
- **Fácies Granulito:** presença de **Opx** – substituição da **Hbl** por **Opx + Cpx** (reações de “quebra” da Hbl, fusão parcial).

GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Reações na transição para Fácies Granulito:

Hbl (Tsch) = Plg (An) + Cpx + Opx + H₂O
 Hbl (Eden) + Qtz = Plg (Ab) + Cpx + Opx + H₂O
 Qtz + Hbl = Cpx + H₂O
 Qtz + Hbl = Opx + Cpx + H₂O
 Hbl = Cpx + Opx + H₂O
 Cpx + Qtz + Grt = Opx + Pl
 Qtz + Hbl ± Pl + H₂O = Opx + Cpx ± Grt + fundido

- **Baixa P:** Opx, Cpx, Plg ± Hbl, Ol
- **P Intermediária:** Opx, Cpx, Plg, Grt ± Hbl
- **Alta P:** Grt, Cpx, Qtz + **Opx OU Plg !!**
 (Obs: Opx+Plg = Grt+Cpx+Qtz)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo de alta P

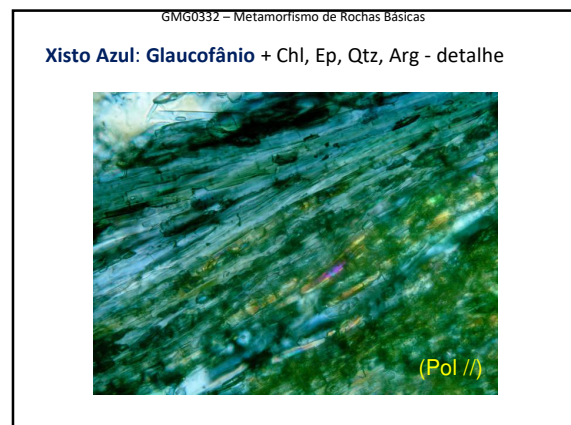
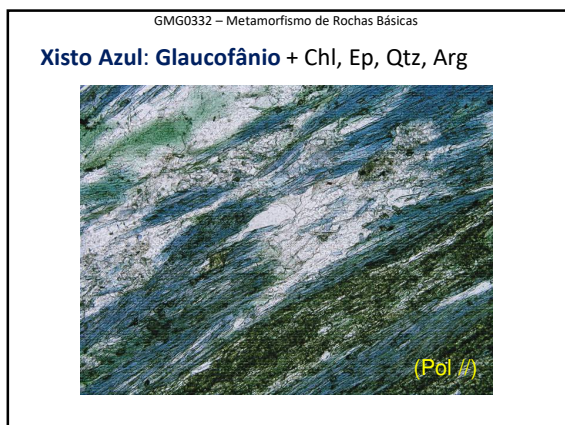
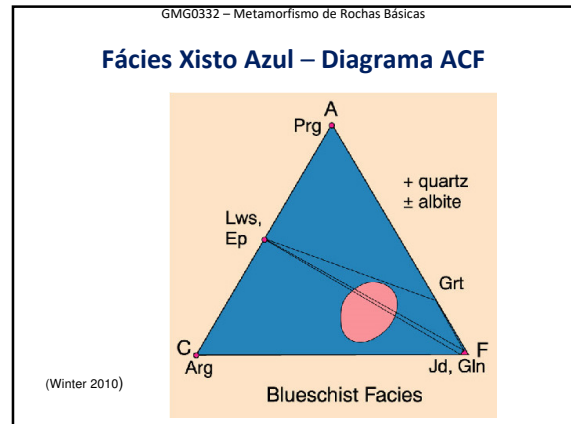
Fácies Xisto Azul e Eclogito

Fácies Xisto Azul – alta P, baixa T (300-500°C, >6kbar)

Mineral tipo: **Glaucofânio** (azul) - $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

(Substituição catiônica: $\text{NaAl}^{\text{VI}}\text{Ca}_{-1}\text{Mg}_{-1}$)

Outros minerais característicos: Lawsonita (Lws), Cpx jadeítico, Aragonita (Arg) ± Ab, Chl, Ep, Grt, Ttn, Rt



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Metamorfismo de alta P

Fácies Eclogito

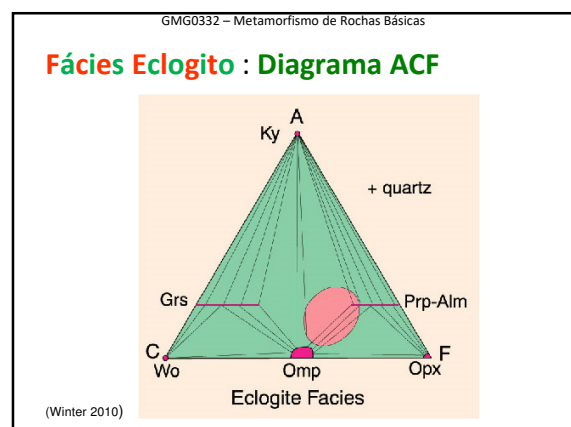
Fácies Eclogito : alta P (20-30 Kb) e T (500-750°C)

Associação característica: **Onfacita** (Na-Cpx, Omp) e **Granada** (Grt – Alm-Prp-Grs) ± Rutilo (característico), Qtz, Ky, Tlc, Phl, Ms (fengita)

Diamante, coesita, aragonita: **P muito alta!**

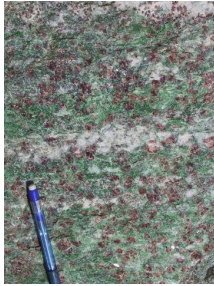
Plagioclásio ausente!!

Rocha-tipo: eclogito (basaltos MORB conduzidos ao manto em zonas de subducção e colisão continental)



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Eclogitos



GMG0332 – Metamorfismo de Rochas Básicas

Referências bibliográficas

- **Bucher, K.; Frey, M. – 1994, 2002 - Petrogenesis of Metamorphic Rocks - 6th/7th Edition: Complete Revision of Winkler's Textbook. Springer-Verlag. Cap.9 - Metamorphism of mafic rocks**
- **Bucher, K.; Grapes, R. – 2011 - Petrogenesis of Metamorphic Rocks - 8th Edition. Springer-Verlag. Cap.9 - Metamorphism of mafic rocks**
- **Yardley, B.W.D. – 1989 (2ª Ed. revista em português – 2004) - Introdução à Petrologia Metamórfica. Ed. Universidade de Brasília (Trad. R.A. Fuck). Cap. 4 – Metamorfismo de rochas ígneas básicas**