

GMG 5852  
Petrologia das Rochas  
Metamórficas  
**Metamorfismo de Rochas  
Ultramáficas – Ultrabásicas**

1

À noite, todas as rochas são ultramáficas...

2

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Metaultramafitos na arte: profetas do “Aleijadinho”**



3

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Principais tópicos:**

- Protólitos e suas características;
- Serpentinização;
- Metassomatismo: Ath-Tlc, “black-wall”;
- Metamorfismo progressivo de serpentinitos: sistemas MSH, CMSH;
- Metamorfismo de lherzolitos e komatiitos: sistemas CMASH, NCMASH;
- Metamorfismo com fase fluida mista:  $H_2O + CO_2$

4

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

- Rocha ultrabásica:  $SiO_2$  (% em peso) < 45
- Rocha ultramáfica = ultramelanocrática (IC  $\geq$  90)

Principais protólitos - sempre orto-derivados:

- a) peridotitos do manto: lherzolitos, harzburgitos;
- b) peridotitos cumuláticos: dunitos, harzburgitos, websteritos, wehrlitos, orto- e clinopiroxenitos;
- c) komatiitos: lavas, rochas vulcanoclásticas, corpos intrusivos rasos (diques, sills).

(considerando apenas rochas não-alcálinas!)

5

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Composição mineralógica dos protólitos**

- Ol: Olivina (Fo $\gg$ Fa – geralmente, Fo<sub>93-85</sub>)
- Opx: Enstatita
- Cpx: Augita, Pigeonita
- ± Cromita (Cr-Spl), Magnetita
- ± Plagioclásio (An > 50), Anfibólio (Mg-Hbl, pargasita), Biotita (flogopítica)

6

**Características gerais dos protolitos**

- paragênese ígneas de altas temperaturas (700 a >1.000 °C), **anidras**
- corpos de dimensões variáveis, tabulares a lenticulares (poucos metros a centenas de metros)
- maciços, baixa porosidade, grande contraste reológico e químico com as rochas encaixantes

7

**Fatores que condicionam o metamorfismo de rochas ultramáficas-ultrabásicas**

- Acesso de fluídos (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>);
- Deformação (pervasiva x localizada);
- Composição do fluído (X<sub>CO2</sub>, X<sub>H2O</sub>, a<sub>SiO2</sub>, etc);
- Volume do fluído (relação fluído:rocha);
- Alterações prévias de baixa T (serpentinização, talcificação, uralitização);

8

**Acesso de fluído e relação fluído-rocha - definem o sistema químico**

- **Fechado**: nenhuma troca de componentes com o exterior;
- **Parcialmente fechado**: troca apenas da fase fluída (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>);
- **Sistema aberto**: mobilidade variada de vários componentes = **metassomatismo** (SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc);

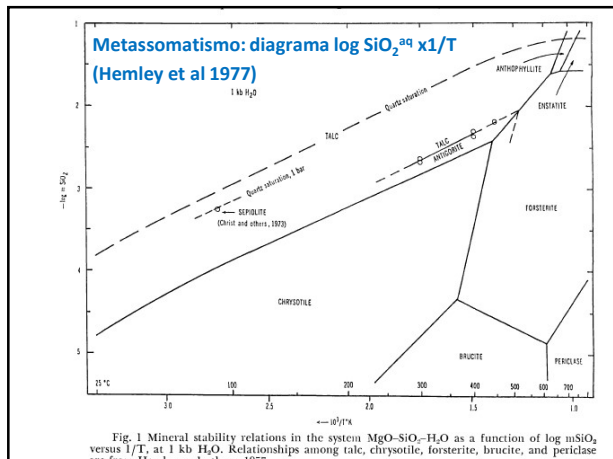
9

**Transformações em sistema aberto**: bastante comuns em rochas ultramáficas

Grande contraste químico com as encaixantes: "capas" de rochas monominerálicas

- **Serpentinização** (parcialmente aberto / aberto)
- **Talcificação**
- **Cloritização, biotitização** ("black wall")
- **Carbonatação**
- **Rochas com antofilita + talco** (± carbonatos)

10



11

**Pseudoseção T x Log a<sub>SiO<sub>2</sub></sub> para o sistema MSH a 2 kbar**

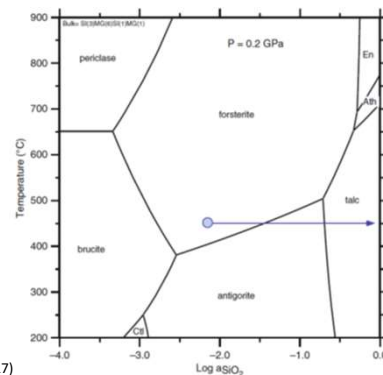


Fig. 5.17 T-a<sub>SiO<sub>2</sub></sub> Diagram at 0.2 GPa for equilibria in the system MSH

12

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

(Bucher & Grapes 2011 Fig.5.16)  $Fo + SiO_{2aq} + H_2O = Tlc.$

13

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Em corpos ultramáficos lenticulares de zonas de cisalhamento: frequentemente, **zoneamento mineral e textural concêntrico**:

- **núcleo granoblástico ou nemato-granoblástico (Fo, En, Di, Spl, Amp, Chl)** ou **fibrado (Ath, Tr, Chl, Tlc)**, seguido de **faixas lepidó-nematoblásticas (Chl, Tr, Tlc)** e **borda lepidoblástica (Tlc, Chl, Srp)**.

14

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Modelo genérico de corpo ultramáfico lenticular talcificado**

Karlsen, T. A. e Olesen, O. 1996. Airborne geophysical prospecting for ultramafite associated talc, Altermark, northern Norway. In: Journal of Applied Geophysics, 35: 215-236.

15

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Modelo de corpo ultramáfico lenticular talcificado em terreno gnáissico-granítico com "black-wall" de biotita**

Bucher & Grapes – Fig.3.3

16

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Modelo de corpo meta-UM lenticular zonado**

Extraído de: Gonçalves et al 2011 – Geonomos 19(1):10-17

17

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Corpo ultramáfico lenticular – vista geral (borda → núcleo)**

18



GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Corpo ultramáfico lenticular – borda foliada**

19

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Corpo ultramáfico lenticular – núcleo maciço**

20

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

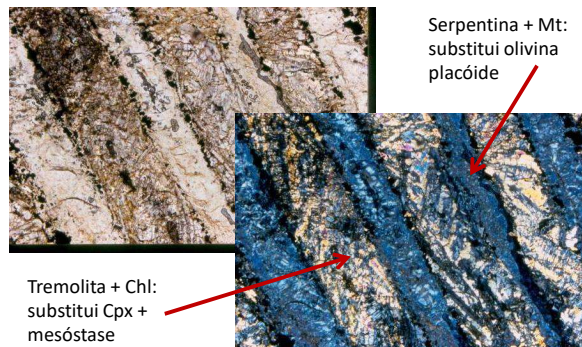
**Metamorfismo progressivo**

**Primeiras etapas da transformação metamórfica de rochas ultramáficas:** via de regra, **hidratação** (com ou sem **carbonatação** adicional) em baixo a médio grau – formação de serpentinas, talco, brucita, magnesita / dolomita, tremolita, etc.

Exemplos: rochas ultramáficas do manto litosférico e de complexos cumuláticos da crosta oceânica, em ofiolitos e peridotitos alpinos, ou komatiitos em *greenstone belts* ( fácies sub-xisto verde a xisto verde).

21

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Textura spinifex em placas serpentinizada (Crixás, GO)**

22

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Serpentinização:** pode ocorrer em sistema parcialmente fechado, com acesso apenas de fluidos aquosos, ou em sistema aberto (remoção de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Atinge preferencialmente os minerais com relação Mg:Si mais elevada: olivina e ortopiroxênio.

**Serpentinitos:** rochas metaultramáficas mais abundantes na crosta – geralmente, ponto de partida para o metamorfismo progressivo.

23

GMG5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Serpentinito com veios de quartzo (Liberdade, MG)**

24



GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

### Serpentinização de olivina

ao longo das bordas e fraturas (“cordas”), envolvendo núcleos não serpentinizados

**Ol (Fo>>Fa) + H<sub>2</sub>O = Serp + Mt (± Br)**

**Cromita:** substituída nas bordas por ferricromita

**Texturas serpentíníticas:** grande variedade

25

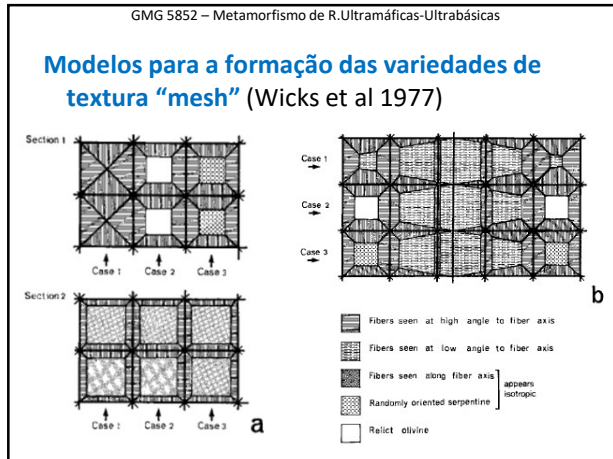
GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Texturas serpentíníticas: pseudomórficas x não-pseudomórficas** (Wicks & Whittaker 1977)

**Pseudomórficas:** “mesh” (olivina), em ampulheta, bastita (opx), *spinifex*, blasto-cumulática;

**Não-pseudomórficas:** recristalização das pseudomórficas ou serpentinização acompanhada de deformação e recristalização: fitada (“ribbon”), interpenetrada (“interlocked”), etc.

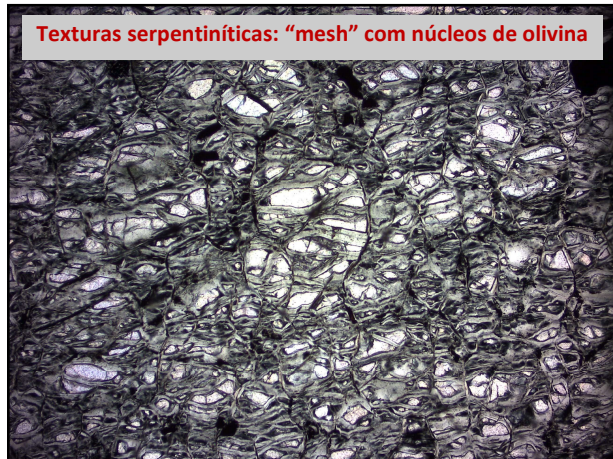
26



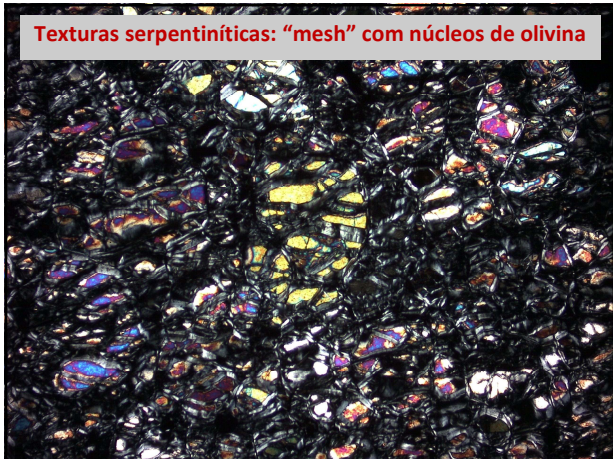
27



28

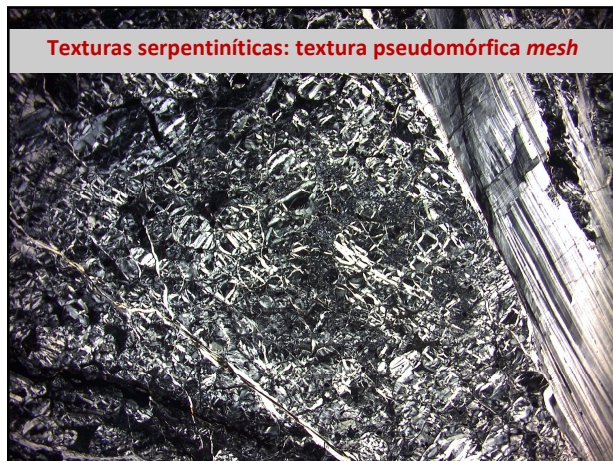


29

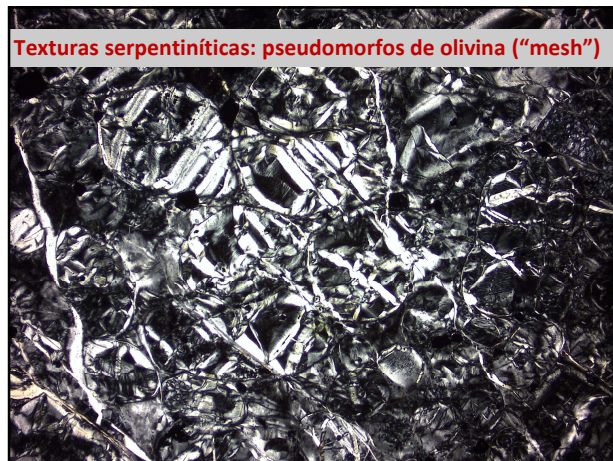


30

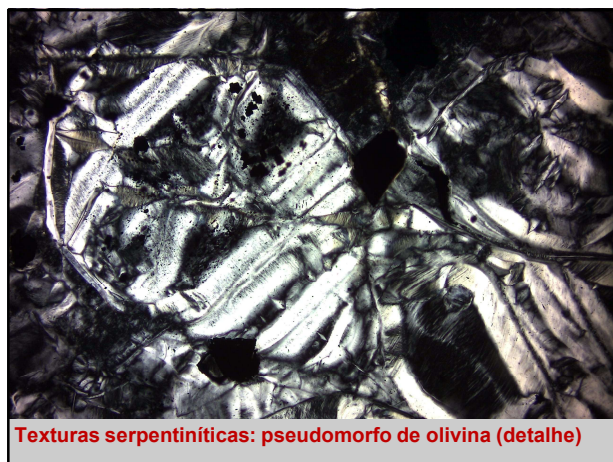




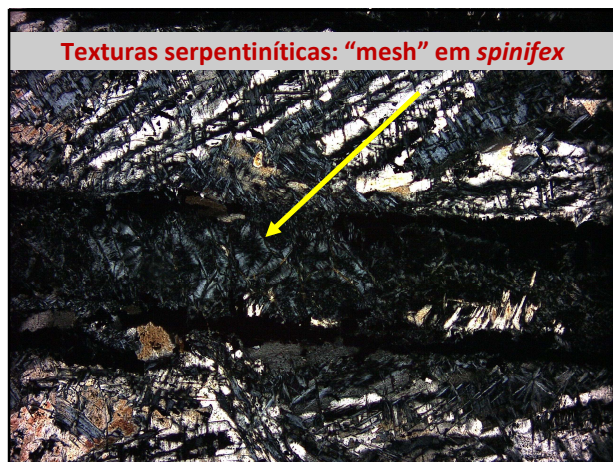
31



32



33



34



35

GMG 5852 – Metamorfismo de R. Ultramáficas-Ultrabásicas

**Composição química dos protolitos - exemplos:**

	Peridotito mantélico	Komatiito (MG)
SiO <sub>2</sub>	44,50	49,02
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,60	5,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50	n.d.
FeO	7,30	10,96 (Fe total)
MnO	0,14	0,15
MgO	41,7	26,25
CaO	2,30	7,77
Na <sub>2</sub> O	0,25	0,35
K <sub>2</sub> O	0,02	0,03

36

### Sistemas e sub-sistemas para rochas ultramáficas-ultrabásicas

- **MSH** – fundamental para dunitos e harzburgitos (peridotitos alpinos, serpentinitos)
- **CMSH** – para lherzolitos simples
- **CMASH** – sistema simplificado para lherzolitos e komatiitos
- **NCMASH** (Saúde!) – sistema mais completo

37

### Componentes geralmente não considerados

- **FeO**: porque  $MgO > FeO_t$  e:  $Fe \leftrightarrow Mg$ ;
- **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**: restrito a Mt e Cr-Spl;
- **K<sub>2</sub>O**: teores insignificantes (exceto em rochas ultramáficas alcalinas);
- **TiO<sub>2</sub>**: restrito a ilmenita em baixo-médio grau (anfibólios e espinélios a altas T);
- **MnO**: baixos teores,  $Mn \leftrightarrow Mg$ ;
- **Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**: restrito a Mt e Cr-Spl – baixa mobilidade

38

### Sistema MSH: 3 componentes - Diagrama triangular MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

Representação linear MgO-SiO<sub>2</sub> – projeção a partir do vértice H (H<sub>2</sub>O)

Composições dos protolitos – dunitos e harzburgitos: entre Fo e En (anidros – base do triângulo). Hidratação simples: composições deslocam-se em direção a H (campo dos serpentinitos com Br ou Tlc)

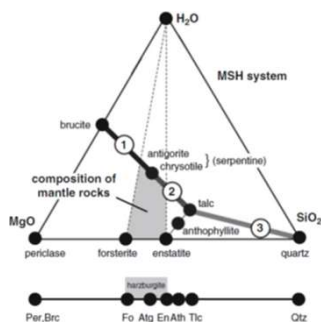
39

### MSH (MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) - dunitos e harzburgitos - metamorfismo progressivo de serpentinitos (Trommsdorf & Evans 1972, Evans 1977)

- **Serpentinas**: antigorita (Atg), lizardita (Liz), crisotila (Ctl) ~  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  (3MgO:2SiO<sub>2</sub>:2H<sub>2</sub>O)
- **Brucita** (Br) –  $Mg(OH)_2$  (1MgO:1H<sub>2</sub>O)
- **Talco** (Tlc) –  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$  (3MgO:4SiO<sub>2</sub>:1H<sub>2</sub>O)
- **Forsterita** (Fo) –  $Mg_2SiO_4$  (2MgO:1SiO<sub>2</sub>)
- **Antofilita** (Ath) –  $Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$  (7MgO:8SiO<sub>2</sub>:1H<sub>2</sub>O)
- **Enstatita** (En) –  $Mg_2Si_2O_6$  (1MgO:1SiO<sub>2</sub>)

40

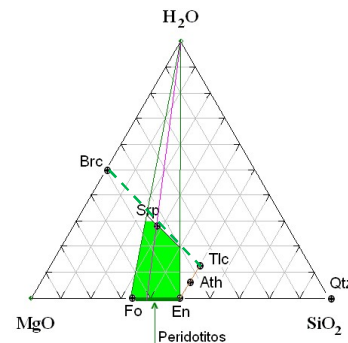
### Quimiografia do sistema MSH com projeção para o sistema MS (H<sub>2</sub>O em excesso)



41

### Diagrama MSH

linha Fo-En  
(verde escuro)  
= **peridotitos anidros**  
(harzburgitos);  
**campo verde**  
= **peridotitos hidratados**  
(Srp, Brc, Tlc)



42



## Sistema MSH

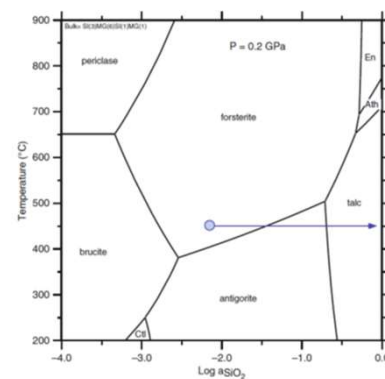
### Metassomatismo com aumento de SiO<sub>2</sub>:

composições “fogem” do triângulo Fo-En-H<sub>2</sub>O, em direção a Tlc e Ath = rochas com antofilita-talco e talco (alta a<sub>SiO<sub>2</sub></sub>)

**Brucita:** complemento das serpentinas na substituição de Fo (dunito). Difícil de identificar (DRX). Não ocorre sob alta a<sub>SiO<sub>2</sub></sub>.

43

### Pseudoção T x Log a<sub>SiO<sub>2</sub></sub> para o sistema MSH a 2 kbar

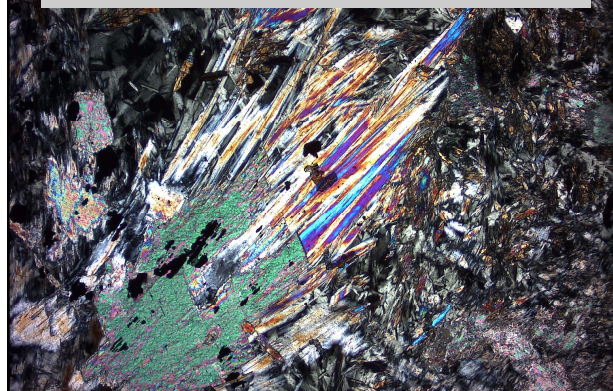


(Bucher &amp; Grapes 2011 Fig.5.17)

Fig. 5.17 T– $a_{\text{SiO}_2}$  Diagram at 0.2 GPa for equilibria in the system MSH

44

### Antofilita-talco xisto: textura fibro-radiada



45

**Sistema MSH:** 3 componentes. Se H<sub>2</sub>O em excesso: 2 componentes (MS)

Variáveis T e P (representação bi-dimensional das curvas de equilíbrio):

$$F = C - P + 2 \text{ (Regra de fases)}$$

3 fases: F = 2 (campo divariante)

4 fases: F = 1 (curva univariante)

5 fases: F = 0 (ponto invariante)

46

## Reações no sistema MSH

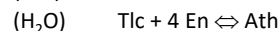
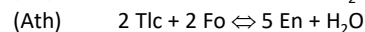
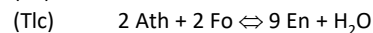
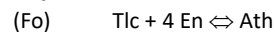
- (1) 15 Ctl + Tlc  $\Leftrightarrow$  Atg (não representado no diagrama)
- (2) Atg  $\Leftrightarrow$  Atg + Brc (não representado no diagrama)
- (3) Atg + 20 Brc  $\Leftrightarrow$  34 Fo + 51 H<sub>2</sub>O
- (4) Atg  $\Leftrightarrow$  18 Fo + 4 Tlc + 27 H<sub>2</sub>O
- (5) 9 Tlc + 4 Fo  $\Leftrightarrow$  5 Ath + 4 H<sub>2</sub>O
- (6) 2 Tlc + 2 Fo  $\Leftrightarrow$  5 En + H<sub>2</sub>O
- (7) 2 Ath + 2 Fo  $\Leftrightarrow$  9 En + H<sub>2</sub>O
- (8),(8') Tlc + 4 En  $\Leftrightarrow$  Ath
- (9) Tlc  $\Leftrightarrow$  Ath + Qtz + H<sub>2</sub>O
- (10) Ath  $\Leftrightarrow$  Qtz + 7 En + H<sub>2</sub>O
- (11) Tlc  $\Leftrightarrow$  3 En + Qtz + H<sub>2</sub>O
- (12) Brc  $\Leftrightarrow$  Per + H<sub>2</sub>O

47

### Sistema MSH: ponto invariante I

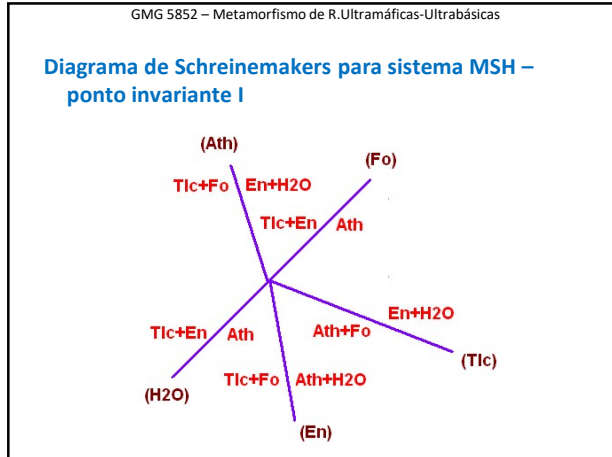
5 Fases no ponto invariante: Fo, En, Tlc, Ath, H<sub>2</sub>O

5 reações:

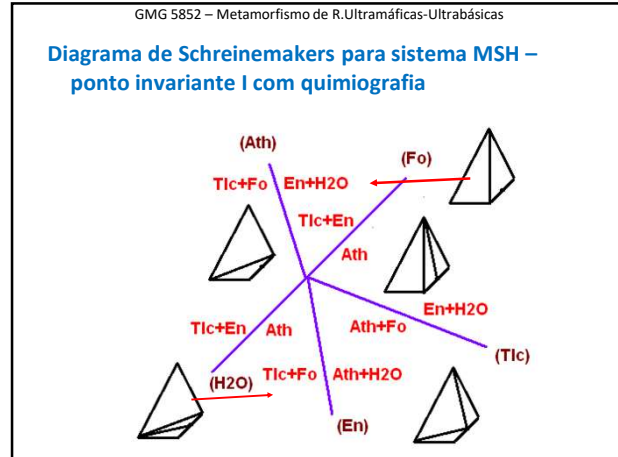


**ATENÇÃO! Sistema degenerado** – colinearidade composicional entre En, Ath e Tlc – reações (Fo) e (Ath) se sobrepõem às respectivas pontas metaestáveis, em continuidade (180°)

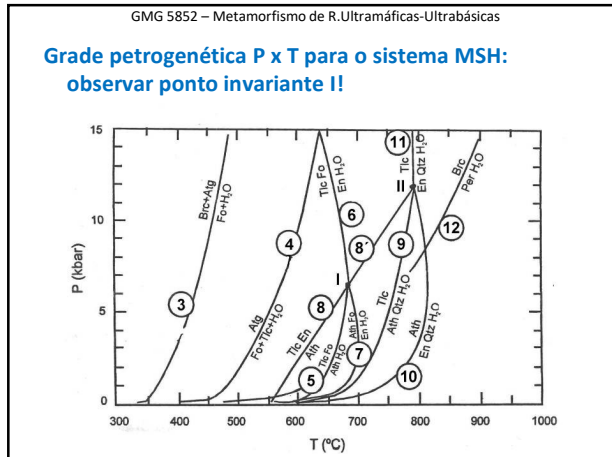
48



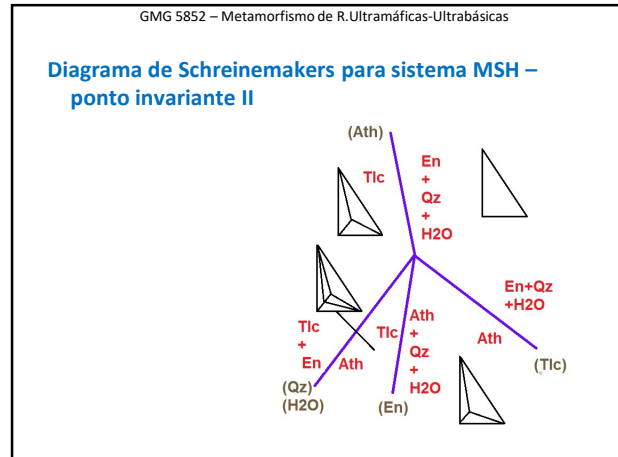
49



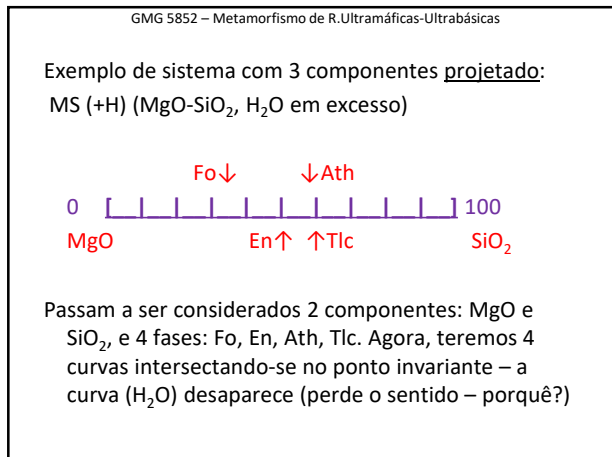
50



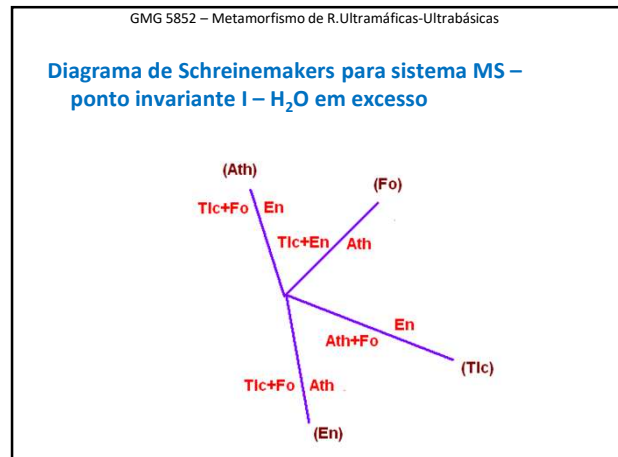
51



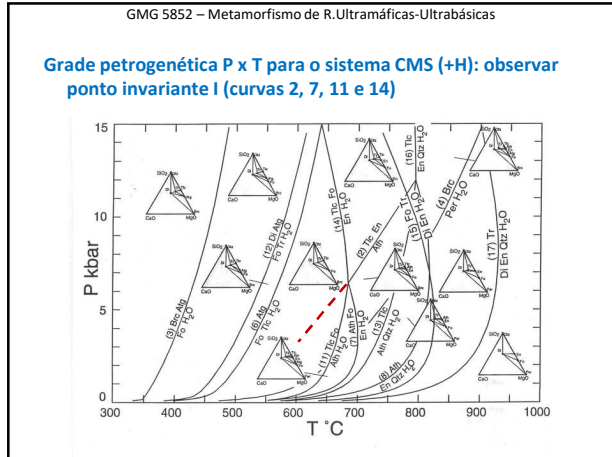
52



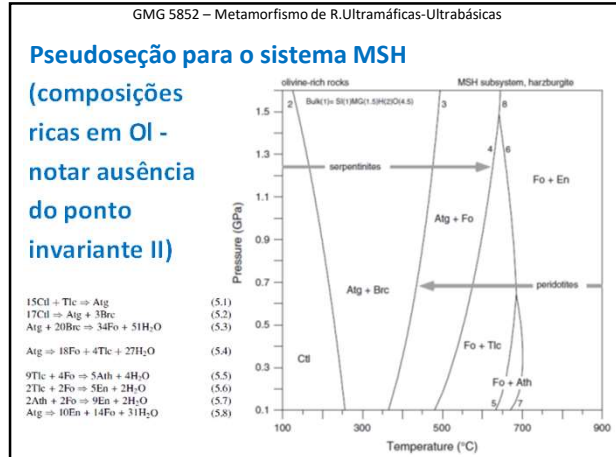
53



54



55



56

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

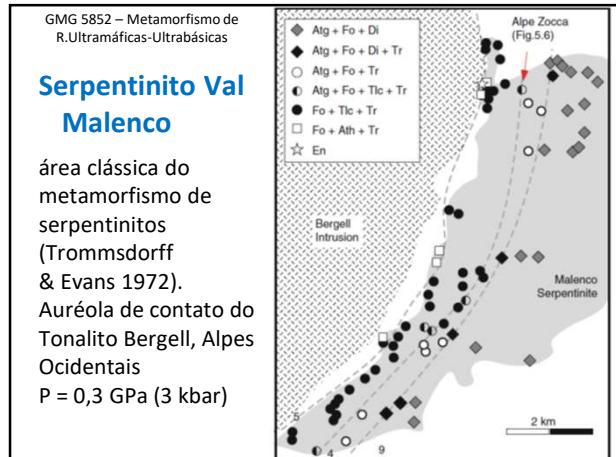
**CMSH (CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) – lherzolitos “simples” (Evans 1977, Evans & Trommsdorff 1974)**

Os minerais do sub-sistema CMS, e mais:

- **Tremolita (Tr)** – Ca<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>
- **Diopsídio (Di)** – CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>

4 componentes: representação bi-dimensional = triângulo CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> (projeção a partir do vértice H<sub>2</sub>O do tetraedro CMSH)

57



58

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

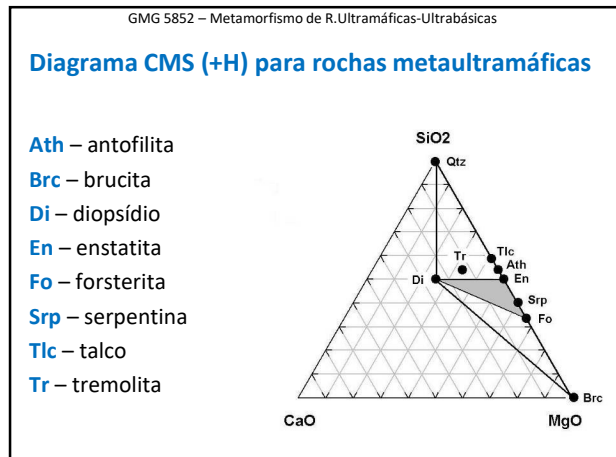
**Sistema CMSH: 4 componentes. Representação bidimensional: H<sub>2</sub>O em excesso (C = 3)**

3 fases: F = 2 (campo divariante)  
 4 fases: F = 1 (curva univariante)  
 5 fases: F = 0 (ponto invariante)

**“Novidade” em relação MSH: Di e Tr (reações 12, 15 e 17) – as demais curvas permanecem.**

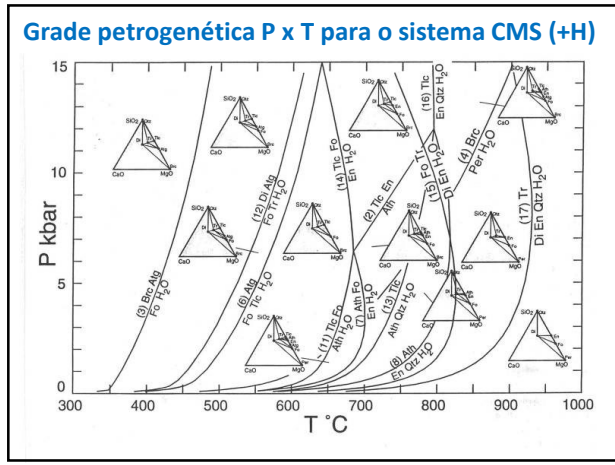
(12) Atg + 8 Di ⇌ 18 Fo + 4 Tr + 27 H<sub>2</sub>O  
 (15) Tr + Fo ⇌ 5 En + 2 Di + H<sub>2</sub>O  
 (17) Tr = Di + Fo + Qtz (+ H<sub>2</sub>O)

59

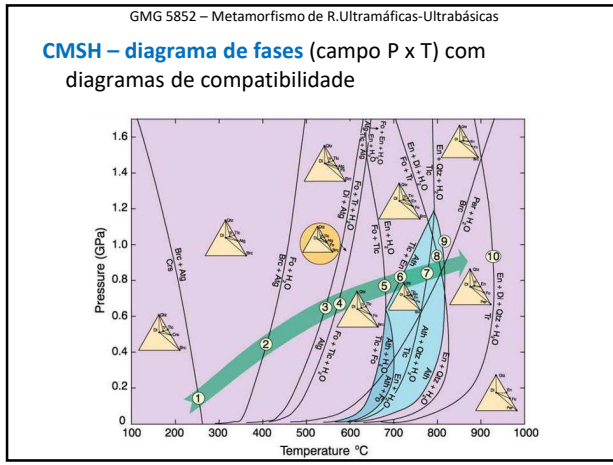


60

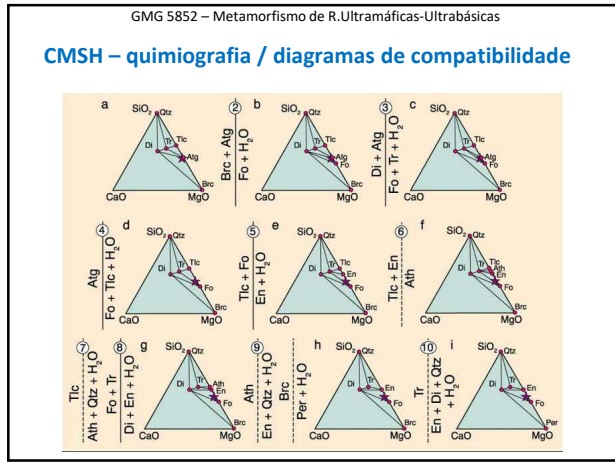




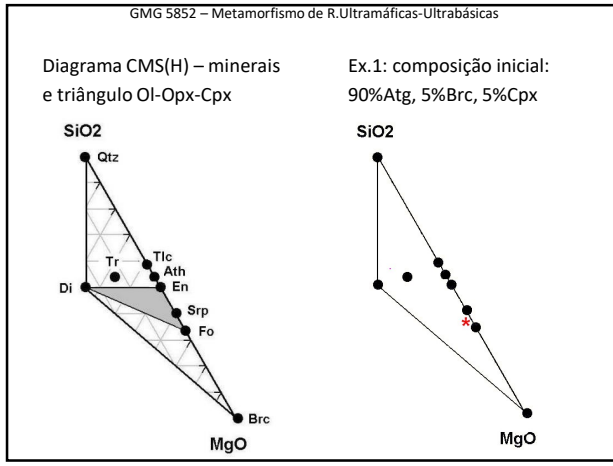
61



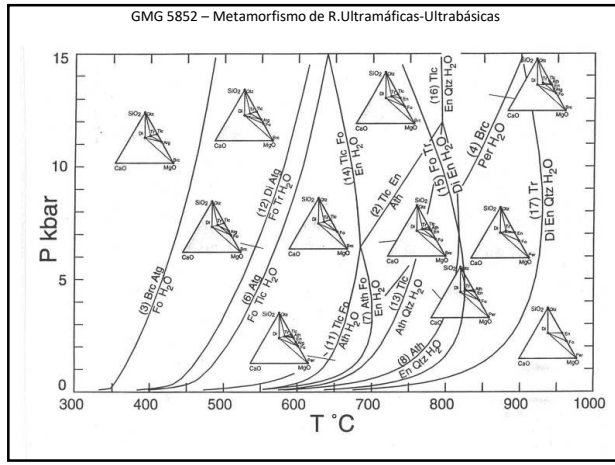
62



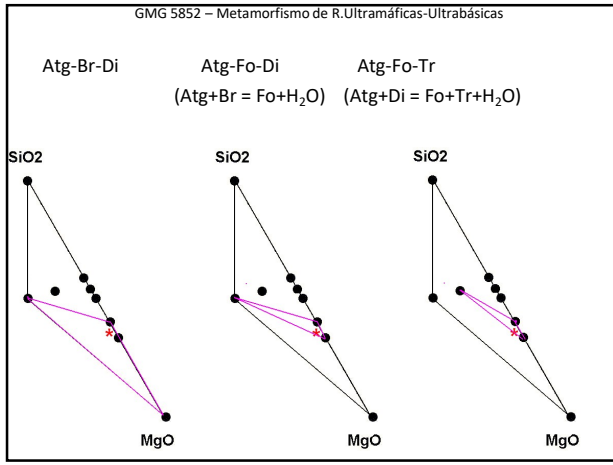
63



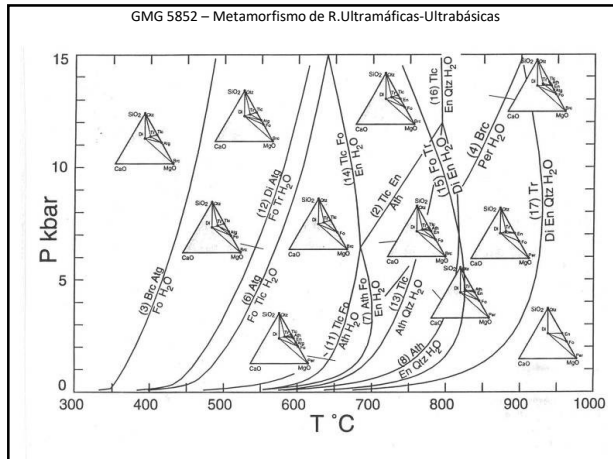
64



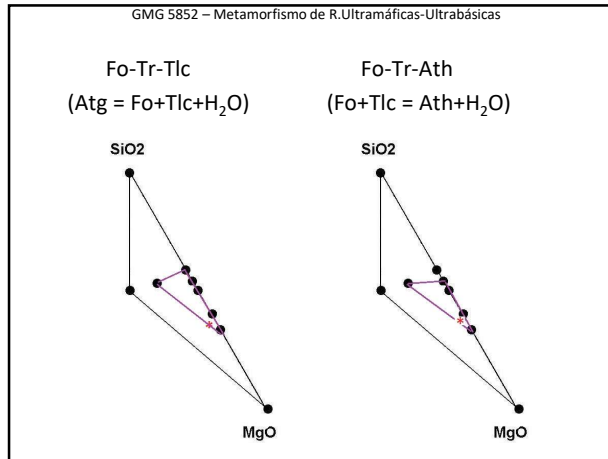
65



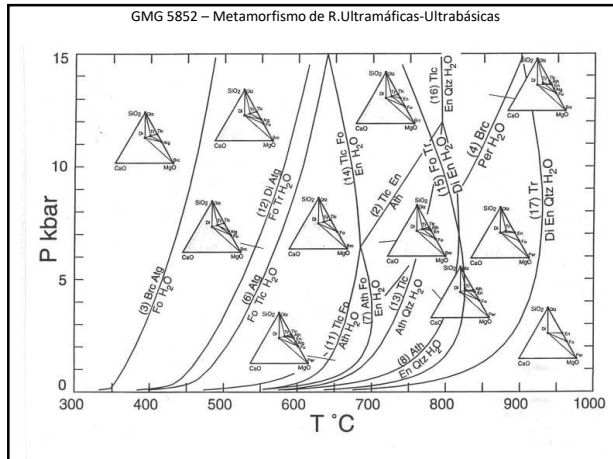
66



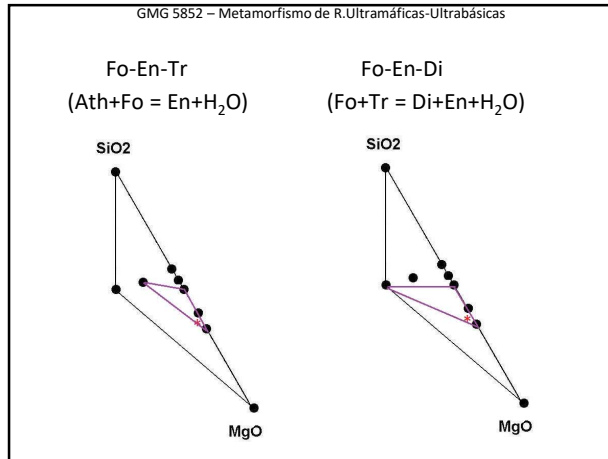
67



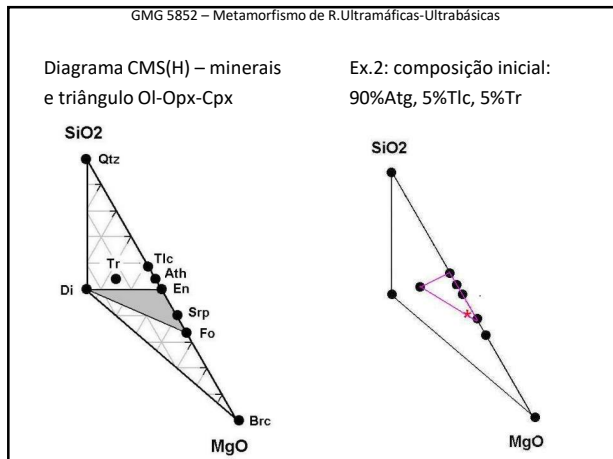
68



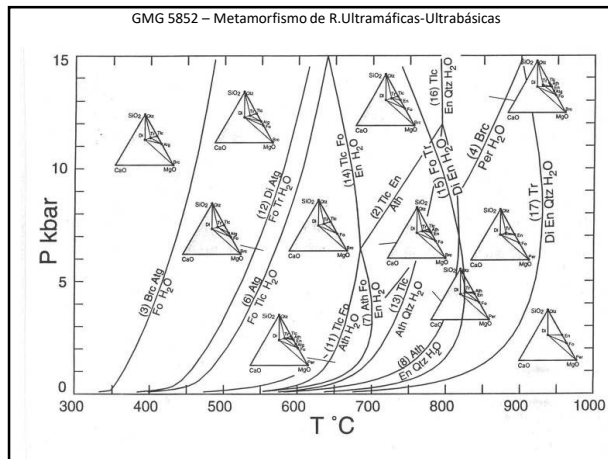
69



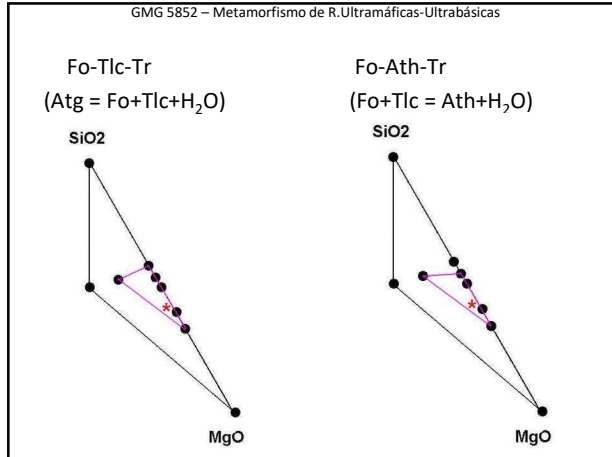
70



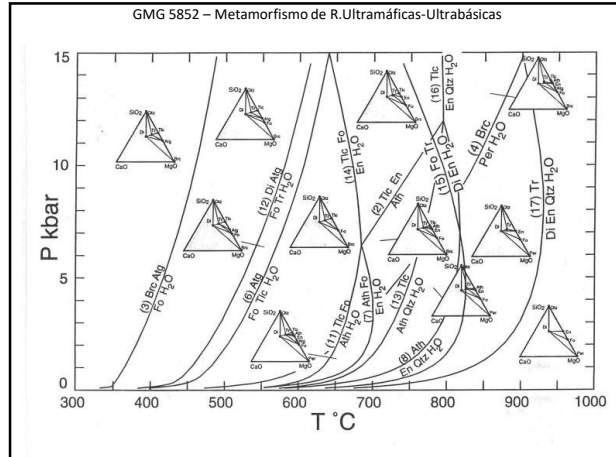
71



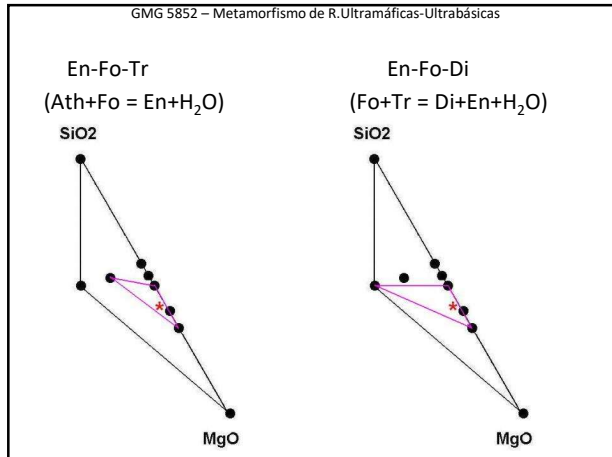
72



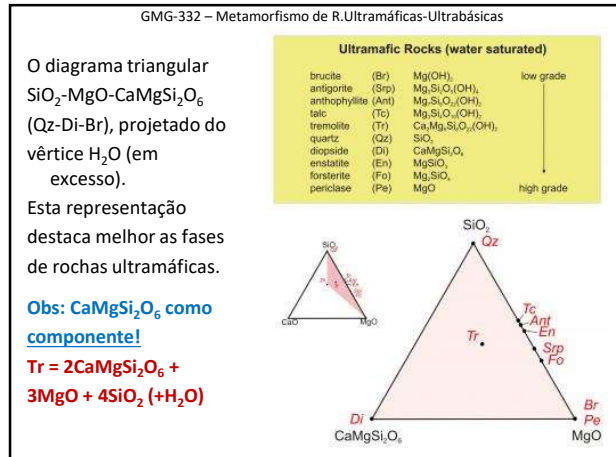
73



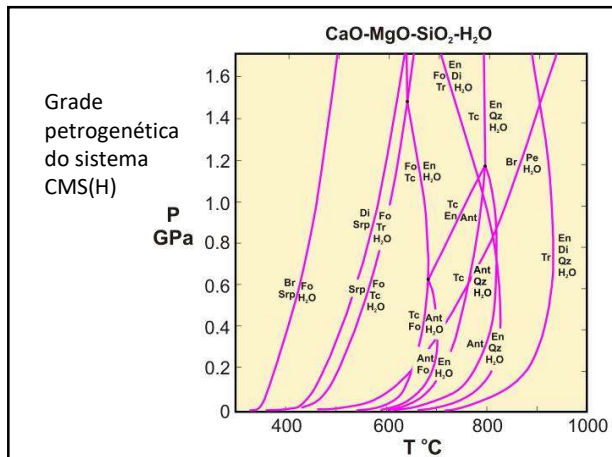
74



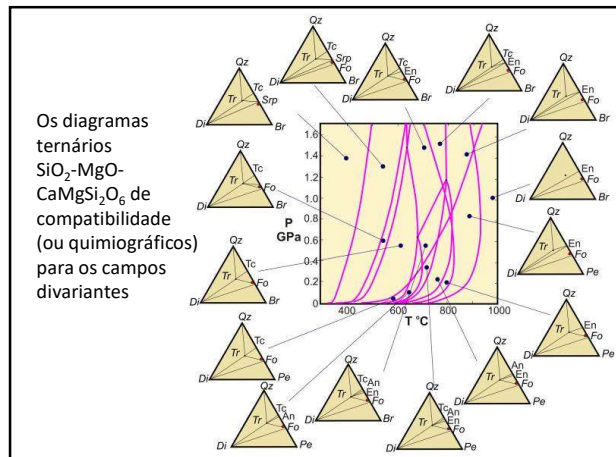
75



76

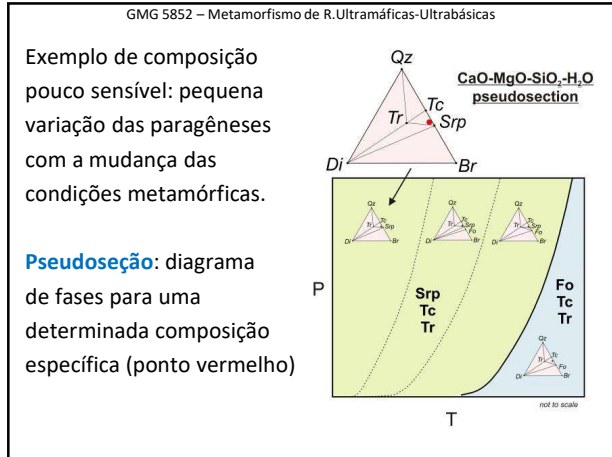


77

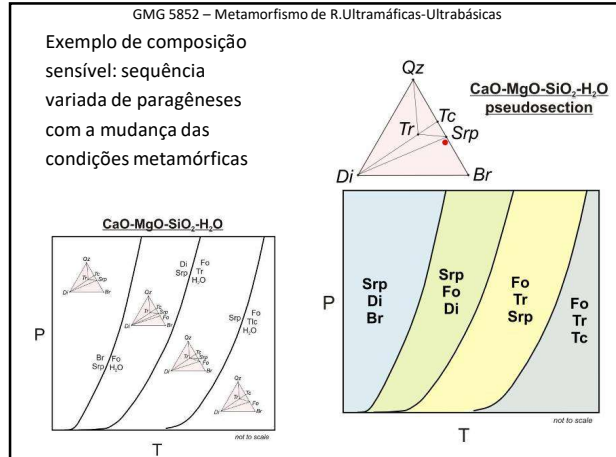


78





79



80

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Estabilidade dos minerais / paragéneses no sistema CMS (+H)**

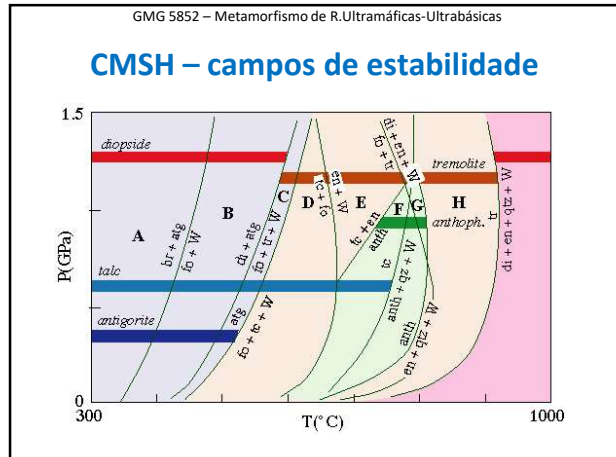
Campo de estabilidade máxima das **serpentinhas**: ~ 500 a 600°C; variedade de mais alta T: antigorita;

**Antofilita, Ath + Tlc** : campos bem delimitados – definem bem condições de fácies anfibolito;

**Diopsídio**: com Atg nos serpentinitos a baixas T e E e En a altas T. Grau médio: substituída por tremolita.

**Alta T**: paragéneses reproduzem as dos protólitos anidros (**En+Fo+Di**).

81



82

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**CMASH (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O)** – lherzolitos, piroxenitos e komatiitos (simplificado)

Os minerais de MSH e CMS, e mais:

**Clorita (Chl)** – (Mg,Fe,Mn,Al)<sub>6</sub>[(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>4</sub>

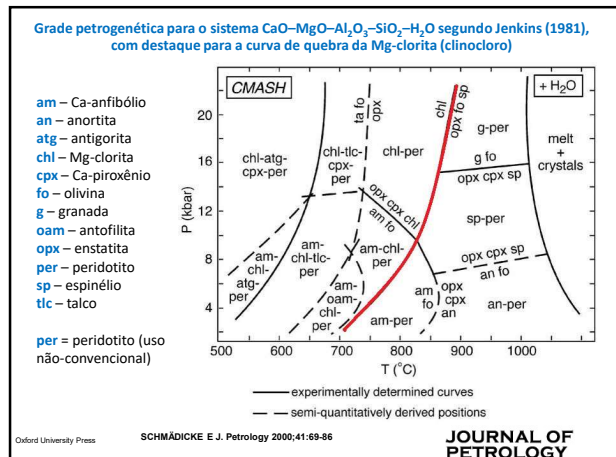
**Espinélio (Spl)** – MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Reações adicionais em CMASH:

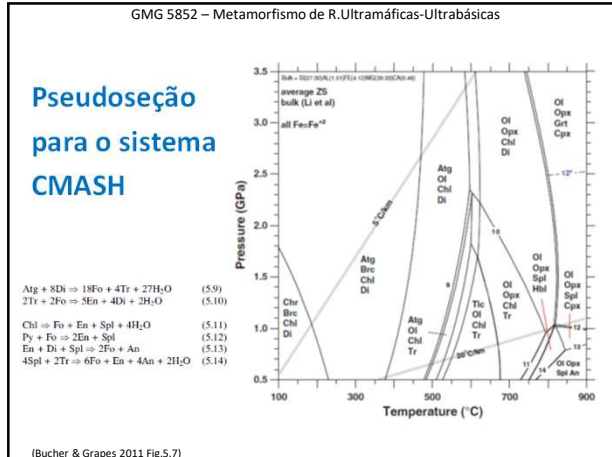
**(12) Chl ⇌ Fo + En + Spl + H<sub>2</sub>O**

Considera-se todo o Al contido em **clorita** (clinocloro) ou **espinélio** (a altas T), e não em solução sólida nas demais fases (anfibiólios!)

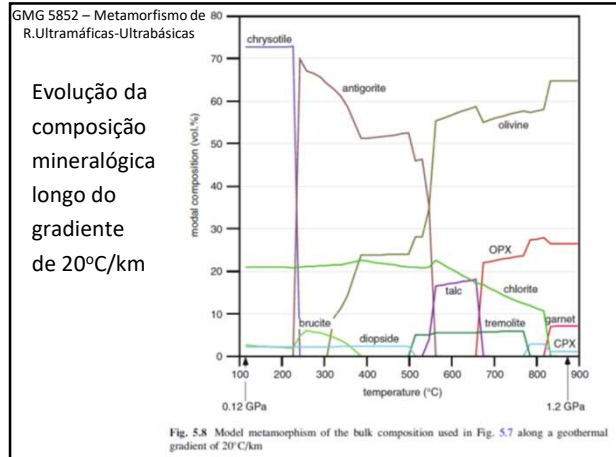
83



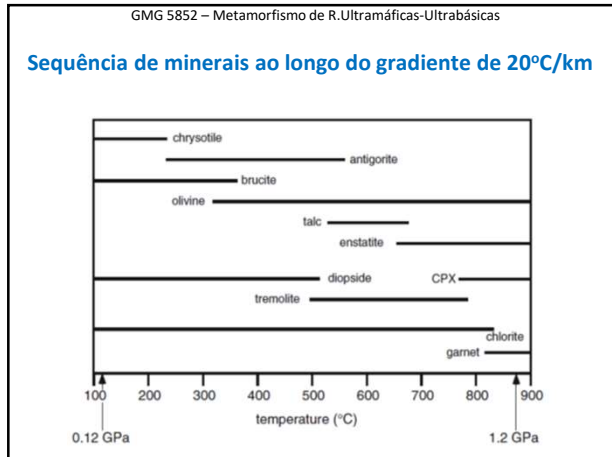
84



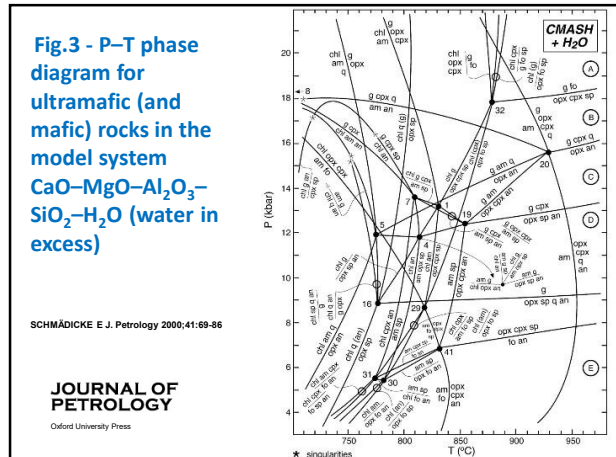
85



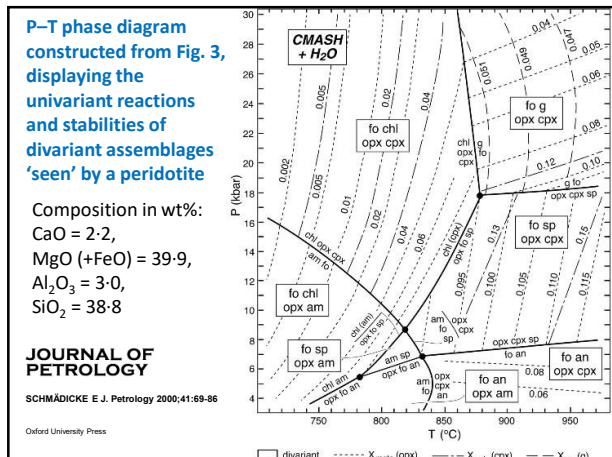
86



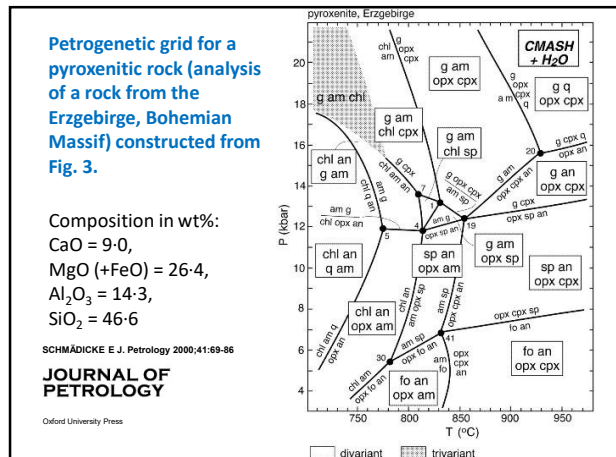
87



88



89



90

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**NCMASH (Na<sub>2</sub>O-CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) –**  
Iherzolitos e komatiitos – sistema mais próximo da realidade.

Os minerais de MSH, CMSH, CMASH e mais:  
**Mg-Hornblenda: NaCa<sub>2</sub>Mg<sub>4</sub>Al[Al<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>]O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>**

Reações contínuas, envolvendo séries de soluções sólidas (anfíbólios, clorita, espinélios).

A paragênese característica de baixo-médio grau é **clorita-tremolita**.

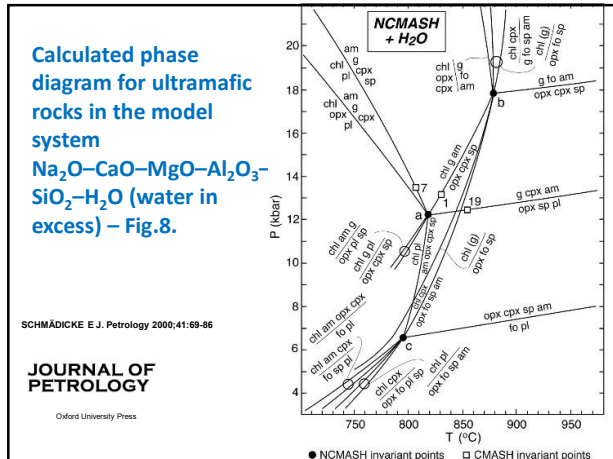
91

Ca<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>22</sub>(OH)

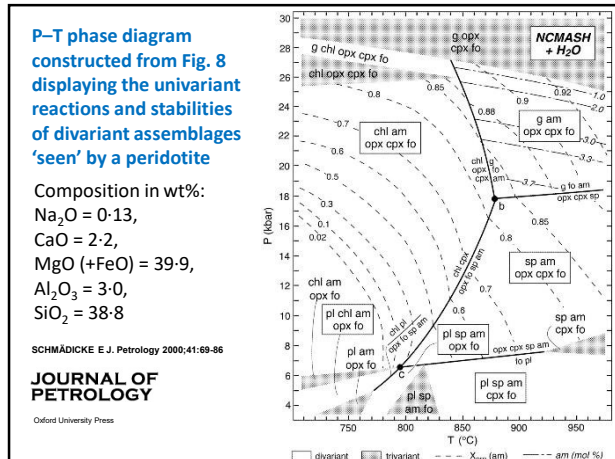
Mg(VI)Si(IV) = Al(VI)Al(IV) Tschermakítica  
\_\_\_ (A) Si(IV) = Na (A) Al(Si) Edenítica

NaCa<sub>2</sub>Mg<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>  
Hornblenda pargasítica

92



93



94

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

No **sistema NCMASH**, a paragênese fundamental:  
**Mg-Chl + Ca-Amp (Trem ⇒ Mg-Hbl) + Mt / Ilm**

que define os clorita-tremolita xistos e fels,  
persiste através das fácies xisto verde e  
anfíbólito praticamente imutável.

Na fácies anfíbólito, a clorita e o anfibólio  
enriquecem em Al (substituições tschermakítica  
e edenítica), e se formam **antofilita** e/ou  
**olivina**.

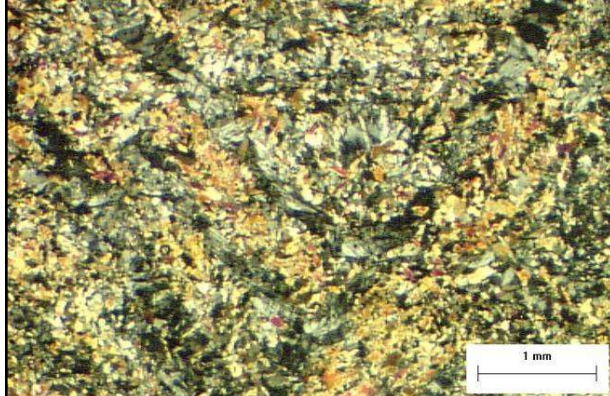
95



96



**Textura blasto-spinifex – tremolita ( $\Rightarrow$  Cpx) e clorita ( $\Rightarrow$  Ol) em placas alternadas**



97

**Text. spinifex em placas em clorita-tremolita fels – detalhe**



98



**Pseudomorfos de Cpx plumoso (tremolita)**

99

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Formam-se porfiroblastos de olivina e microporfiroblastos de antofilita associados preferencialmente aos domínios composicionais ocupados por clorita – por exemplo, às placas de agregados de clorita que substituem a olivina ígnea na textura *spinifex*.

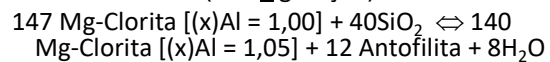
O anfibólio enriquece paulatinamente em Al, adquirindo composição de Mg-Hbl, e perde eventuais feições pseudomórficas (pseudomorfos de Cpx dendrítico-plumoso).

100

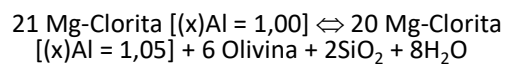
GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Reações de formação da **antofilita** e **olivina** a partir do enriquecimento em Al da Mg-clorita

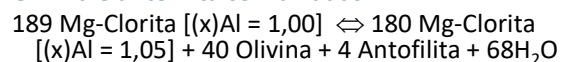
**Para a antofilita** (de 1ª geração)



**Para a olivina**

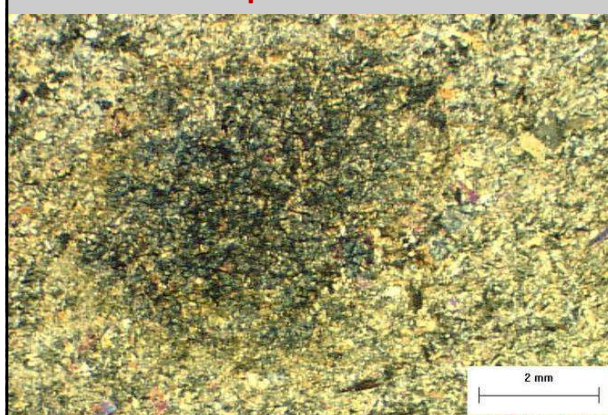


**Olivina e antofilita combinadas**



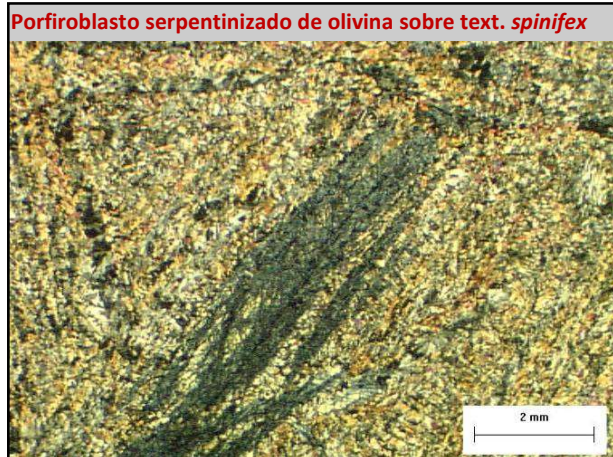
101

**Porfiroblasto serpentinizado de olivina**



102





103



104



105

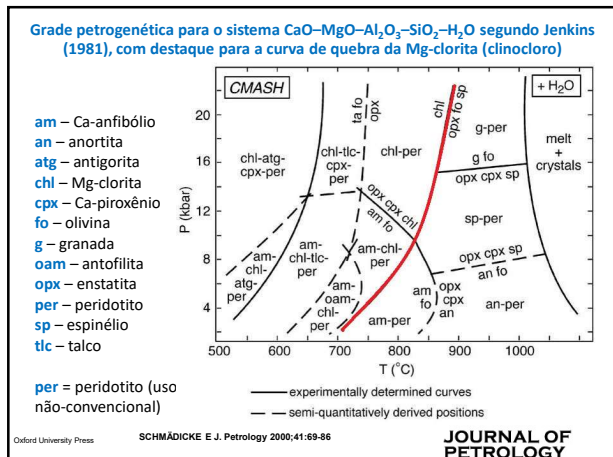
GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Na fácies anfibolito superior, transicional para fácies granulito, Mg-clorita é consumida pela reação:

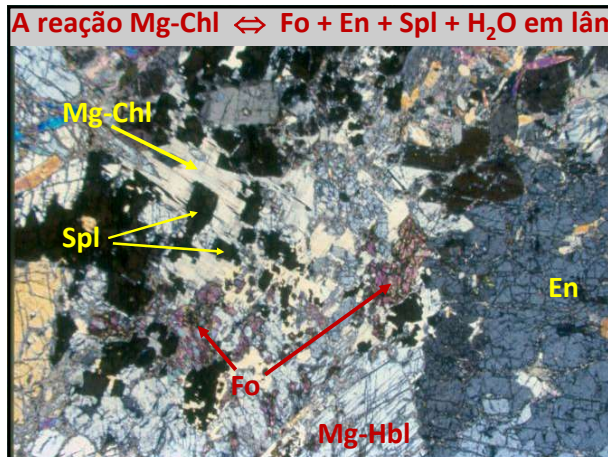
**Mg-Chl ⇌ Fo + En + Spl + H<sub>2</sub>O**

Como resultado, formam-se rochas com **espinélio – olivina – enstatita - Mg-hornblenda**. O conteúdo em Al da Mg-clorita é o máximo possível no momento do consumo, e também quando reconstituída imediatamente após o pico metamórfico (retrometamorfismo).

106



107



108



GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Uma vez estabelecida a paragênese

### Mg-Hbl – En – Fo – Spl

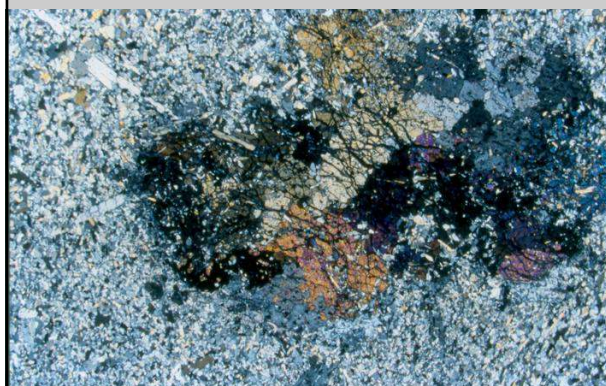
a Mg-hornblenda irá enriquecer em Al segundo a reação contínua:

$X1 \text{ Hornblenda } [(x)\text{Al} = N] + Y1 \text{ Enstatita} + Z1 \text{ Olivina} + W1 \text{ Mg-Al-Espinélio} \Leftrightarrow X2 \text{ Hornblenda } [(x)\text{Al} > N] + Y2 \text{ Enstatita} + Z2 \text{ Olivina} + W1 \text{ Mg-Al-Espinélio},$

onde:  $X1 \approx X2$ ,  $Y2 > Y1$ , e  $Z2, W2 < Z1, W1$

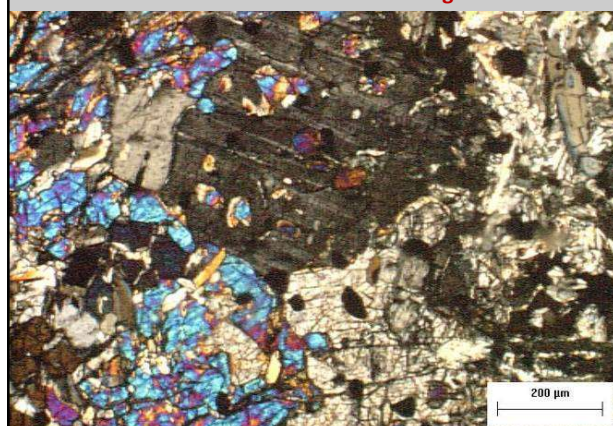
109

Spl – Fo – En – Mg-Hbl fels nodoso. As nódoas são “glomeroporfiroblastos” de Fo e En



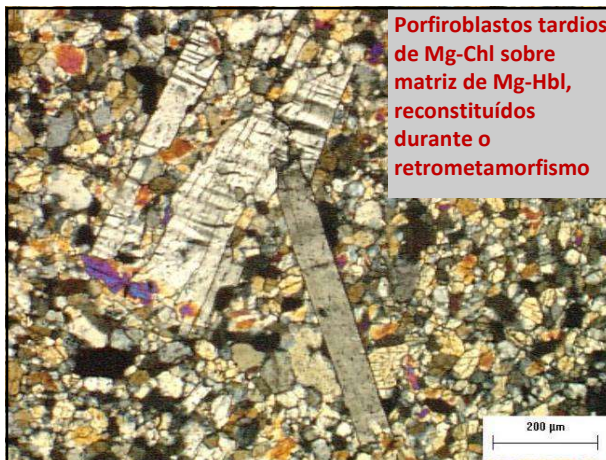
110

Porfiroblastos de Fo e En em matriz de Mg-Hbl - detalhe



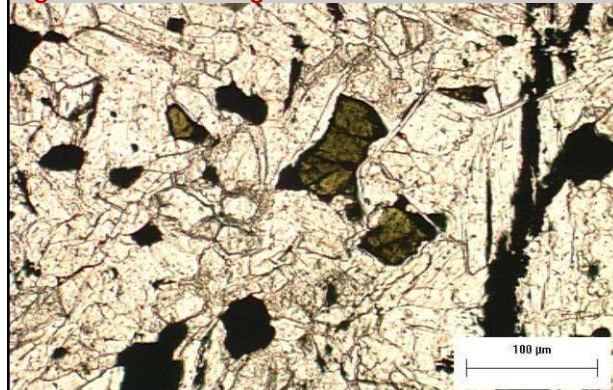
111

Porfiroblastos tardios de Mg-Chl sobre matriz de Mg-Hbl, reconstituídos durante o retrometamorfismo



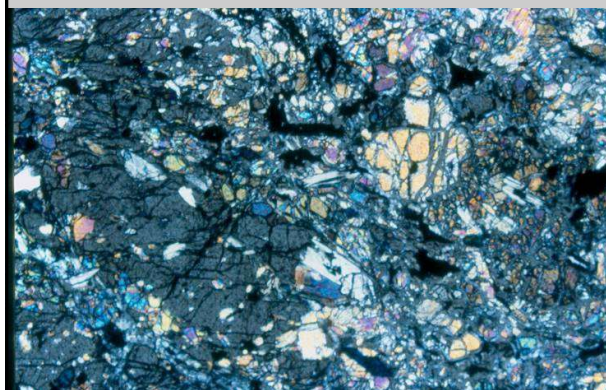
112

Espinélio verde (Mg-Al, metamórfico) em matriz granoblástica de Mg-Hbl



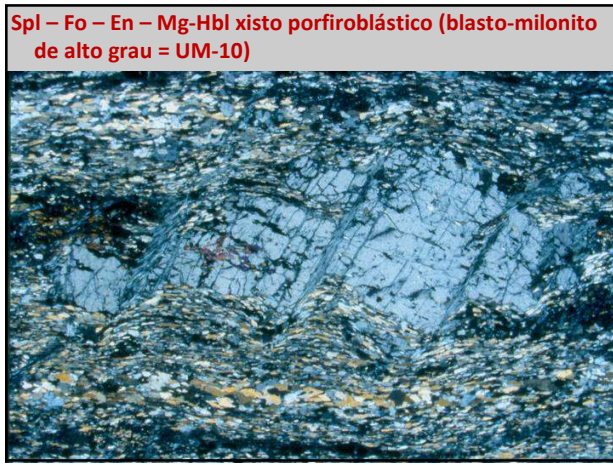
113

Spl – Fo – En – Mg-Hbl fels porfiroblástico



114





115

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Metamorfismo de rochas ultramáficas sob condições de fluidos mistos – H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>

**Sistema MS-CH**

Fase adicional: **Magnesita (Mgs)** – MgCO<sub>3</sub>

No sistema CMS-CH (não será discutido): fases adicionais

- **Calcita (Cal)** – CaCO<sub>3</sub>
- **Dolomita (Do)** – CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

116

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Exemplos de reações com participação de CO<sub>2</sub>**

- 1) 1Srp + 2Qtz ⇌ 1Tlc + H<sub>2</sub>O
- 2) 1En + 2Mgs ⇌ 2Fo + 2CO<sub>2</sub>
- 3) 1 Tlc + 5Mgs ⇌ 4Fo + 1H<sub>2</sub>O + 5CO<sub>2</sub>
- 4) Mgs + H<sub>2</sub>O ⇌ Br + CO<sub>2</sub>
- 5) 2Srp + CO<sub>2</sub> ⇌ 1Tlc + 3Mgs + H<sub>2</sub>O
- 6) Tlc + En ⇌ Ath

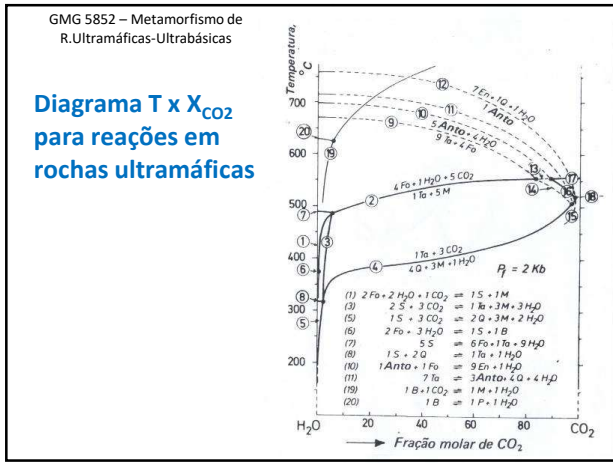
117

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Diagrama T x X<sub>CO<sub>2</sub></sub> ilustrando os padrões das curvas de equilíbrio das reações com fase fluida mista.

A reação (6) – tipo sólido-sólido – será uma reta a T fixa neste diagrama

118



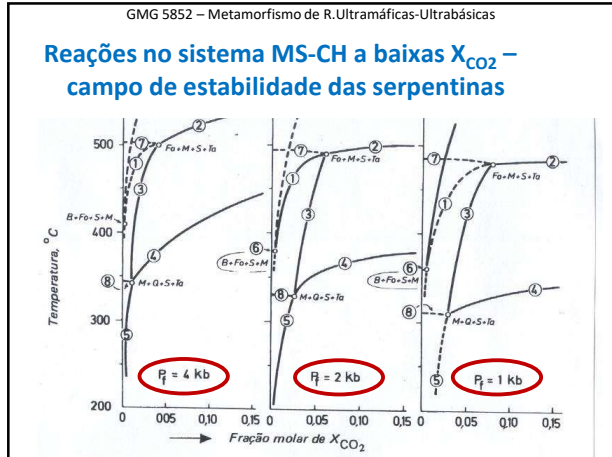
119

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

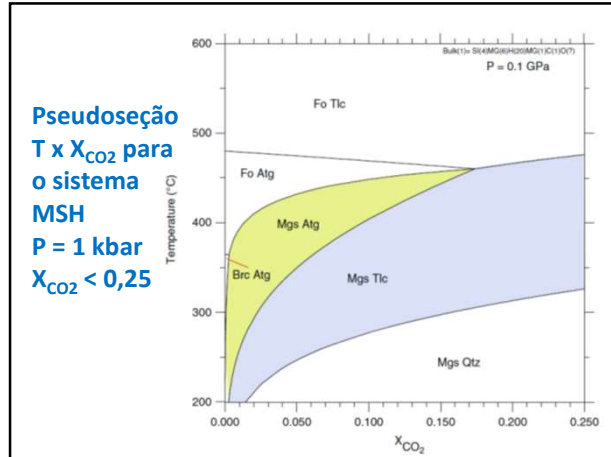
**Grade petrogenética T x X<sub>CO<sub>2</sub></sub> para o sistema MS-HC a X<sub>CO<sub>2</sub></sub> < 0,1**

Notar limite de estabilidade das **serpentinhas** com o aumento de X<sub>CO<sub>2</sub></sub>

120



121



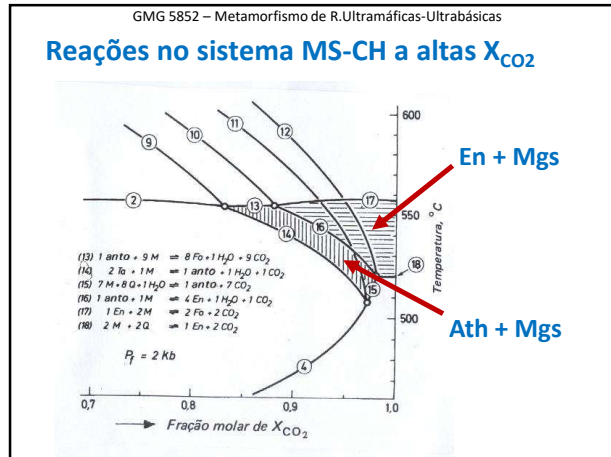
122

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

### Principais consequências da adição de $CO_2$

- Campo de estabilidade das serpentinas reduzido (apenas a baixa  $X_{CO_2}$ )
- $2Srp + CO_2 \Leftrightarrow 1Tlc + 3Mgs + H_2O$
- **Mgs** se torna fase comum em fácies xisto-verde, sob condições de  $X_{CO_2}$  não demasiadamente altas ou baixas;
- A altas  $X_{CO_2}$ , formam-se **sagvanditos – En + Mgs**

123



124

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

### Bibliografia

- Bucher, K.; Grapes, R. - 2011 – Petrogenesis of Metamorphic Rocks (8th Ed). Springer . Cap.5 – p.191-224
- Evans, B.W. - 1977 - Metamorphism of alpine peridotite and serpentinite. Ann.Rev.Earth Planet.Sci. 5: 397-447
- Evans, B.W.; Trommsdorff, V. - 1970 - Regional metamorphism of ultramafic rocks in the Central Alps: parageneses in the system CaO - MgO - SiO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O. Schweiz.Mineral.Petrogr.Mitt. 50 : 481-492
- Hemley, J.J.; Montoya, J.W.; Shaw, D.R.; Luce, R.W. - 1977 - Mineral equilibria in the MgO - SiO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O system: II - Talc - antigorite - forsterite - anthophyllite - enstatite stability relations and some geologic implications in the system. Am.J.Sci. 277 : 353-383
- Korikovsky, S.P.; Janák, M.; Lupták, B. – 1998 – Phase relations in olivine-orthopyroxene-chlorite-spinel-hornblende metultramafics from the Malá Fatra Mts, Western Carpathians. Geologica Carpathica 49: 369-376
- Schmädicke, E. – 2000 – Phase relations in peridotitic and pyroxenitic rocks in the model systems CMASH and NCMASH. Journal of Petrology 41: 69-86

Cont.

125

GMG 5852 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

### Bibliografia – cont.:

- Szabó, G.A.J. 1996 - "Petrologia da Suite Metultramáfica da Sequência Vulcano-Sedimentar Morro do Ferro na Região de Sul a Oeste de Alpinópolis, MG (Domínio Norte do Complexo Campos Gerais)" - Tese de Doutorado, IG-USP. 354 p.
- Szabó, G.A.J.; Candia, M.A.F.; Choudhuri, A. - 1999 - Metamorfismo progressivo de fácies anfíbolito de rochas ultramáficas de Alpinópolis (MG): as variações composicionais em minerais. In: 5.Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e 7. Congr.Bras. de Geoquímica - Porto Seguro, BA, 1999. Anais... Porto Seguro, SBGq: 617-619.

126