

GMG0332
Petrologia Metamórfica

**Metamorfismo de Rochas
Ultramáficas – Ultrabásicas**

GMG-332 – 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 komatiítos: sistemas **CMASH, NCMASH**;
- Metamorfismo com **fase fluida mista**: $H_2O + CO_2$

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Conceitos fundamentais, protólitos

- Rocha **ultrabásica**: SiO_2 (% em peso) < 45
 - Rocha **ultramáfica** = ultramelanocrática ($IC \geq 90$)
- Principais protólitos - sempre orto-derivados:
- peridotitos do manto**: lherzolitos, harzburgitos;
 - peridotitos cumuláticos**: dunitos, harzburgitos, websteritos, wehrlitos, orto- e clinopiroxenitos;
 - komatiítos**: lavas, vulcanoclásticas, corpos intrusivos rasos (diques, sills).
- (considerando apenas rochas não-alcálinas!)

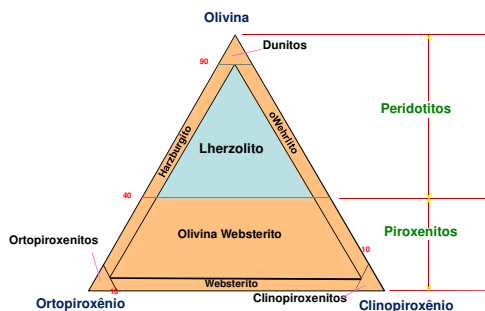
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Composição mineralógica dos protólitos

- **OI**: Olivina ($Fo \gg Fa$ – geralmente, Fo_{93-85})
 - **Opx**: Enstatita
 - **Cpx**: Augita, Pigeonita
- ± Cromita, Magnetita
- ± Plagioclásio ($An > 50$), Anfibólio (Mg-Hbl), Biotita (flogopita)

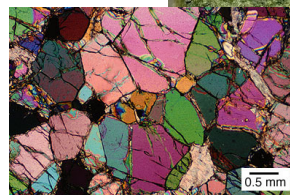
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Classificação de peridotitos e piroxenitos (IUGS)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

**Dunito
OI >> Px**



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Harzburgito Ol+Opx




GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Peridotito do manto (Ol, Opx, Cpx)




GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Peridotitos acamadados

Complexos estratiformes



Skaergaard, Groenlândia

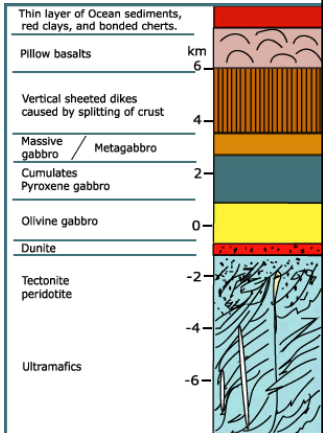
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Ofiolitos: lascas da litosfera oceânica, gerada nas dorsais meso-oceânicas e bacias retro-arco, obductadas (empurradas) sobre a crosta continental

Base da crosta oceânica

Moho

Peridotitos do Manto



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Características gerais dos protólitos

- paragêneses 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 (gnaiesses, xistos, migmatitos);

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Fatores que condicionam o metamorfismo de rochas ultramáficas-ultrabásicas

- T, P_{lit}, P_{dir}
- Acesso (ou não) de **fluidos** (H_2O, CO_2)
- **Deformação** (pervasiva x localizada)
- Composição do fluido ($X_{CO_2}, X_{H_2O}, a_{SiO_2}$, etc)
- Volume do fluido (**relação fluido: rocha**)
- Alterações de baixa T (**serpentinização, talcificação, uralitização**)

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Acesso de fluido e relação fluido-rocha - definem o **sistema químico**:

- **Fechado**: nenhuma troca de componentes com o exterior;
- **Parcialmente fechado**: troca apenas da fase fluida (H₂O +/- CO₂);
- **Sistema aberto**: mobilidade variada de vários componentes = **metassomatismo** (SiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃, etc);

GMG-332 – 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 **fibro-radiado** (**Ath, Tr, Chl, Tlc**), seguido de **faixas lepido-nematoblásticas** (**Chl, Tr, Tlc**) e **borda lepidoblástica** (**Tlc, Chl, Srp**).

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Texturas de rochas metaultramáficas

- **Relíquias ígneas** (*spinifex*, cumulática, granular);
- **Granoblástica** (recristalização estática a altas T);
- **Lepido-nematoblástica, nematoblástica** (e.g. clorita-tremolita xistos);
- **Lepidoblástica, entrelaçada** (talco, clorita);
- **Fibro-radiada** (e.g. antofilita-tremolita-talco xisto fibro-radiado – não confundir com *spinifex*!);
- **Decussada** (e.g. tremolíticos);
- **Serpentiniticas** (*mesh*, fitada, etc) – terminologia específica!

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

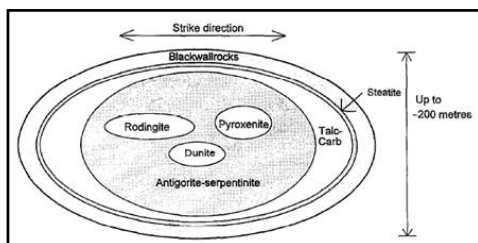
Transformações em sistema aberto: bastante comuns em rochas ultramáficas

Grande contraste químico com as encaixantes: “capas” de rochas monominerálicas

- **Serpentinização** (parcialmente aberto ou aberto);
- **Talcificação**;
- **Cloritização ou biotitização** (“*blackwall*”) - complemento da talcificação ou serpentinização;
- **Rochas com antofilita + talco** (± carbonatos);

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

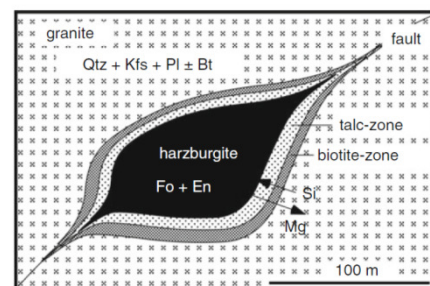
Modelo de corpo ultramáfico lenticular talcificado



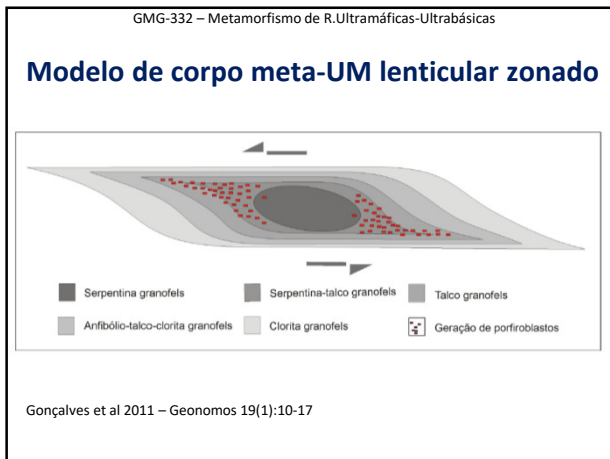
Karlsen, T. A. e Olesen, O. 1996. Airborne geophysical prospecting for ultramafite associated talc, Altermark, northern Norway. *In: Journal of Applied Geophysics*, 35: 215-236.

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

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



Bucher & Gr.



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Primeiras etapas da transformação metamórfica de rochas ultramáficas

Via de regra, **hidratação** (com ou sem carbonatação adicional) em baixo a médio grau – formação de **serpentinhas, 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).



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Serpentinização

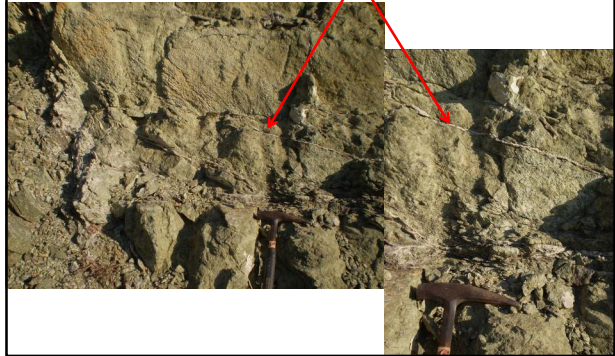
Pode ocorrer em **sistema parcialmente fechado**, com acesso apenas de fluidos aquosos, ou em **sistema aberto** (remoção de Na_2O , CaO , Al_2O_3)

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.

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

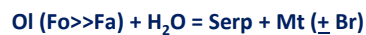
Serpentinito com veios de quartzo (Liberdade, MG)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Serpentinização de olivina

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



Cromita: substituída nas bordas por **ferricromita**

Texturas serpentínicas: grande variedade

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

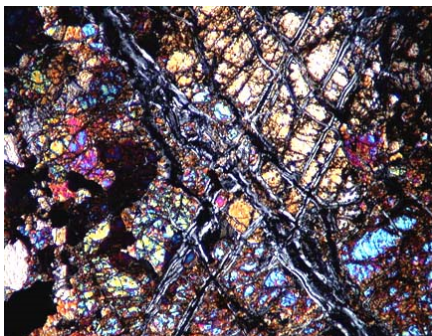
Texturas serpentínicas: pseudomórficas x não-pseudomórficas (Wicks & Whittaker 1977)

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.

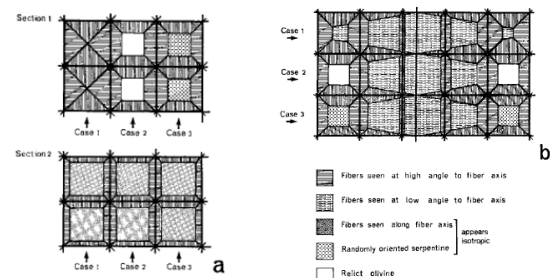
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Serpentinização ao longo de fraturas, bordas e clivagens



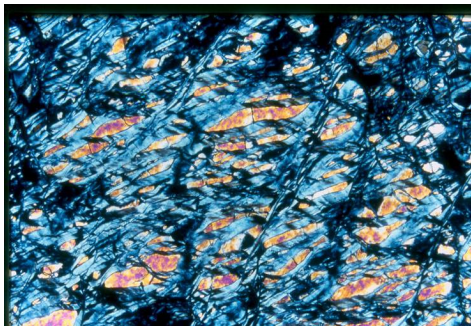
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Modelos para a formação das variedades de textura “mesh” (Wicks et al 1977)



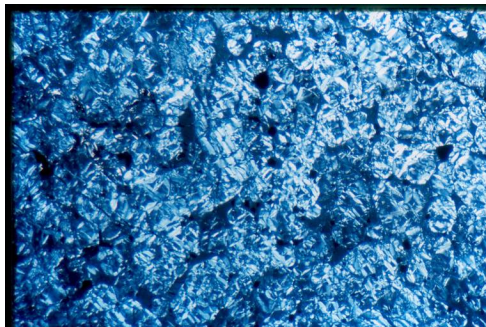
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Texturas serpentínicas: "mesh" com núcleos de olivina



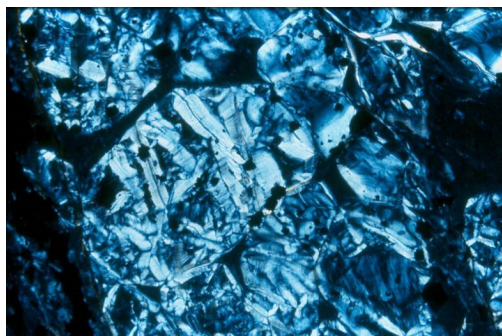
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Textura pseudomórfica "mesh", blasto-cumulática



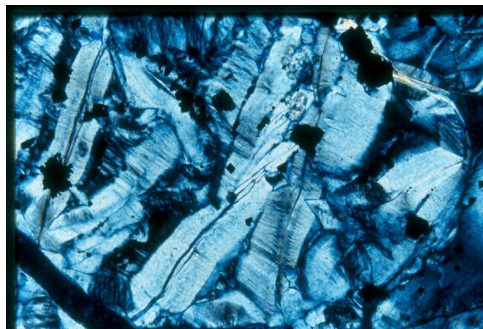
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Texturas serpentínicas: pseudomorfo de olivina ("mesh")



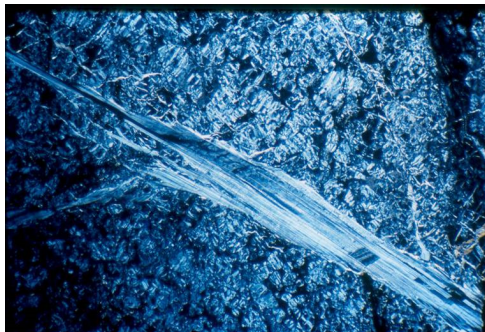
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Texturas serpentínicas: pseudomorfo de olivina (detalhe)



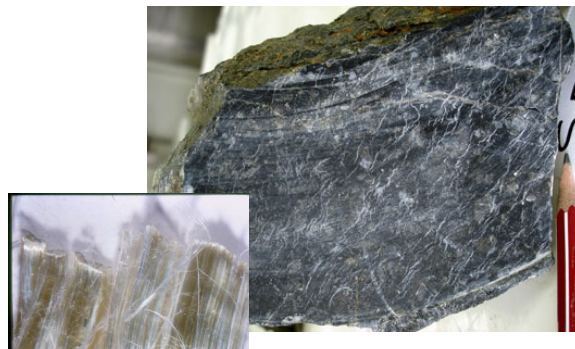
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Texturas serpentínicas: veio fibroso sobre textura "mesh"



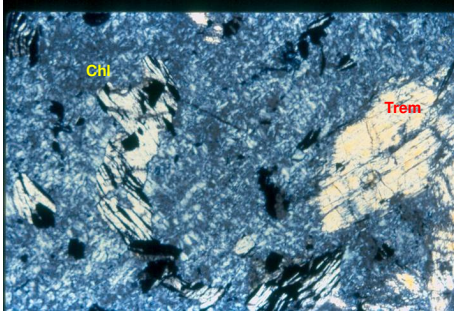
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Serpentinito; fibras de crisotila (= asbesto de serpentina)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Serpentinização em **sistema aberto** (perda de Ca e Al):
substituição de tremolita (**Trem**) e de clorita (**Chl**)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Composição química dos protólitos - exemplos

| | Peridotito mantélico | Komatiito (MG) |
|--------------------------------|----------------------|------------------|
| SiO ₂ | 44,50 | 49,02 |
| TiO ₂ | 0,15 | 0,46 |
| Al ₂ O ₃ | 2,60 | 5,00 |
| Fe ₂ O ₃ | 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 ₂ O | 0,25 | 0,35 |
| K ₂ O | 0,02 | 0,03 |

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistemas e subsistemas 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** – sistema mais completo

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Componentes geralmente não considerados

- **FeO, Fe₂O₃**: porque MgO > FeO_t e: Fe ↔ Mg; subtraindo FeO em Mt e cromita, o restante pode ser considerado junto com MgO
- **Al₂O₃**: restrito a clorita (T <) ou espinélio (T >)
- **MnO**: baixos teores, Mn ↔ Mg;
- **K₂O**: teores insignificantes (exceto em rochas ultramáficas alcalinas);
- **TiO₂**: restrito a ilmenita em baixo-médio grau (anfíbólios e espinélios a altas T);
- **Cr₂O₃**: restrito a cromita / magnetita – baixa mobilidade

GMG 332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

MSH (MgO-SiO₂-H₂O) - dunitos e harzburgitos -
metamorfismo progressivo de serpentinitos
(Evans & Trommsdorf 1970, Evans 1977)

- **Serpentinas**: antigorita (Atg), lizardita (Liz),
crisotila (Ct) \approx Mg₃Si₂O₅(OH)₄ (3MgO:2SiO₂:2H₂O)
- **Brucita** (Br) – Mg(OH)₂ (1MgO:1H₂O)
- **Talco** (Tlc) – Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ (3MgO:4SiO₂:1H₂O)
- **Forsterita** (Fo) – Mg₂SiO₄ (2MgO:1SiO₂)
- **Antofilita** (Ath) – Mg₇Si₈O₂₂(OH)₂ (7MgO:8SiO₂:1H₂O)
- **Enstatita** (En) – Mg₂Si₂O₆ (1MgO:1SiO₂)

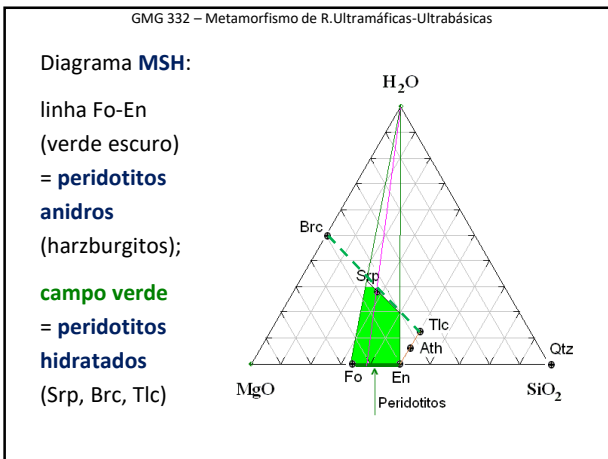
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema MSH: 3 componentes - Diagrama
quimiográfico triangular **MgO-SiO₂-H₂O**

Representação linear MgO-SiO₂ – projeção a partir do
vértice H (H₂O)

Composições dos protólitos – dunitos e harzburgitos:
entre **Fo** e **En** (anidros – base do triângulo).

Hidratação simples: composições deslocam-se em
direção ao vértice H (campo dos serpentinitos com
Br ou **Tlc**)



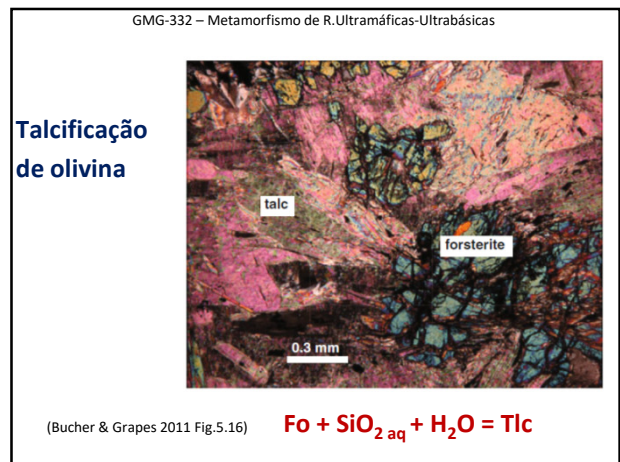
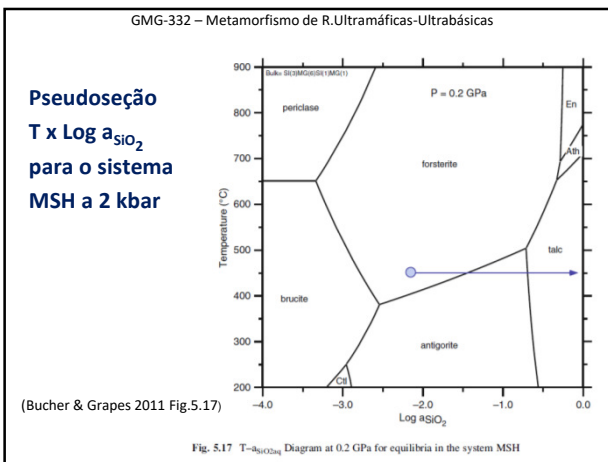
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema MSH

Metassomatismo com aumento de SiO_2 :

composições “fogem” do triângulo **Fo-En-H₂O**, em direção a Tlc e Ath = **rochas com antofilita-talco e talco (alta a_{SiO_2})**

Brucita: complemento das serpentinas na substituição de Fo (dunito). Difícil de identificar (DRX). Não ocorre sob alta a_{SiO_2} .



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema MSH: 3 componentes. Se H₂O em excesso: 2 componentes (MS)

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

F = C - P + 2 (Regra de fases de Gibbs)

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

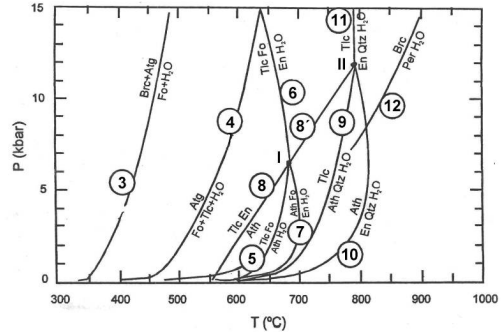
GMG 332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Reações no sistema MSH

- (1) 15 Ctl + Tlc ⇌ Atg (não indicada no diagrama)
- (2) 17 Ctl ⇌ Atg + Brc (não indicada no diagrama)
- (3) Atg + 20 Brc ⇌ 34 Fo + 51 H₂O
- (4) Atg ⇌ 18 Fo + 4 Tlc + 27 H₂O
- (5) 9 Tlc + 4 Fo ⇌ 5 Ath + 4 H₂O
- (6) 2 Tlc + 2 Fo ⇌ 5 En + H₂O
- (7) 2 Ath + 2 Fo ⇌ 9 En + H₂O
- (8),(8') Tlc + 4 En ⇌ Ath
- (9) Tlc ⇌ Ath + Qtz + H₂O
- (10) Ath ⇌ Qtz + 7 En + H₂O
- (11) Tlc ⇌ 3 En + Qtz + H₂O
- (12) Brc ⇌ Per + H₂O

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Grade petrogenética P x T para o sistema MSH:
observar ponto invariante I!



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema MSH: ponto invariante I

5 Fases no ponto invariante: **Fo, En, Tlc, Ath, H₂O**

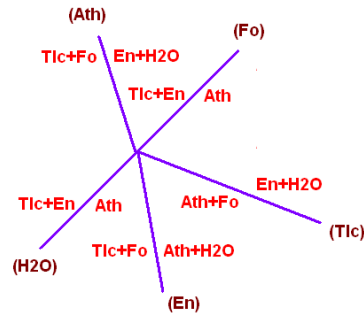
5 reações:

- (Fo)** Tlc + 4 En ⇌ Ath
- (En)** 9 Tlc + 4 Fo ⇌ 5 Ath + 4 H₂O
- (Tlc)** 2 Ath + 2 Fo ⇌ 9 En + H₂O
- (Ath)** 2 Tlc + 2 Fo ⇌ 5 En + H₂O
- (H₂O)** Tlc + 4 En ⇌ Ath

ATENÇÃO! Sistema degenerado – colinearidade composicional entre **En, Ath e Tlc** – reações (Fo) e (H₂O) se sobrepõem às respectivas pontas metaestáveis, em continuidade (180°)

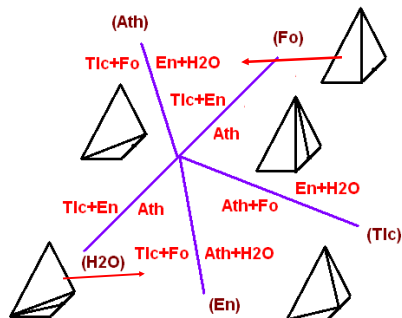
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Diagrama de Schreinemakers para sistema MSH – ponto invariante I (topologia)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Diagrama de Schreinemakers para sistema MSH – ponto invariante I com quimiografia

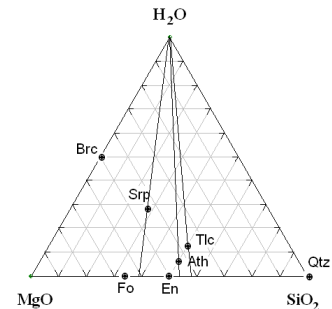


GMG 332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema MSH

H₂O em excesso:
sistema MS (+H)

Projeção do vértice H₂O sobre a base MgO – SiO₂ (reduz um componente)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Exemplo de sistema com 3 componentes **projetado**:
MS (+H) (MgO-SiO₂, H₂O em excesso)

Passam a ser considerados 2 componentes: **MgO** e **SiO₂**, e 4 fases: **Fo, En, Ath, Tlc**. Agora, teremos 4 curvas intersectando-se no ponto invariante – a curva (H₂O) desaparece (perde o sentido – porquê?)

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Diagrama de Schreinemakers para sistema MS – ponto invariante I – H₂O em excesso

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Grade petrogenética P x T para o sistema CMS (+H):
observar ponto invariante I (curvas 2, 7, 11 e 14)

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Pseudoseção para o sistema MSH – harzburgitos

(5.1) 15Ctl + Tlc ⇒ Atg
(5.2) 17Ctl ⇒ Atg + 3Brc
(5.3) Atg + 20Brc ⇒ 34Fo + 51H₂O
(5.4) Atg ⇒ 18Fo + 4Tlc + 27H₂O
(5.5) 9Tlc + 4Fo ⇒ 5Ath + 4H₂O
(5.6) 2Tlc + 2Fo ⇒ 5En + 2H₂O
(5.7) 2Ath + 2Fo ⇒ 9En + 2H₂O
(5.8) Atg ⇒ 10En + 14Fo + 31H₂O

(Bucher & Grapes 2011 Fig.5.5)

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema CMSH (CaO-MgO-SiO₂-H₂O)

Lherzolitos “simples” (Evans 1977, Evans & Trommsdorf 1974)

Os minerais do **sub-sistema MSH**, e mais:

- **Tremolita** (Tr) – Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂
- **Diopsídio** (Di) – CaMgSi₂O₆

4 componentes: representação bi-dimensional = triângulo **CaO-MgO-SiO₂** (projeção a partir do vértice H₂O do tetraedro CMSH)

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Sistema CMSH: 4 componentes. Representação bidimensional: H₂O em excesso (C = 3)

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

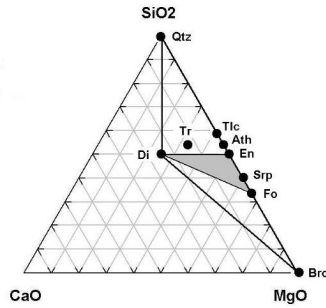
“Novidade” em relação a **MSH**: **Di** e **Tr** (reações 10 e 11) – as demais curvas permanecem.

(10) Atg + 8 Di ⇌ 18 Fo + 4 Tr + 27 H₂O
(11) Tr + Fo ⇌ 5 En + 2 Di + H₂O

GMG 332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

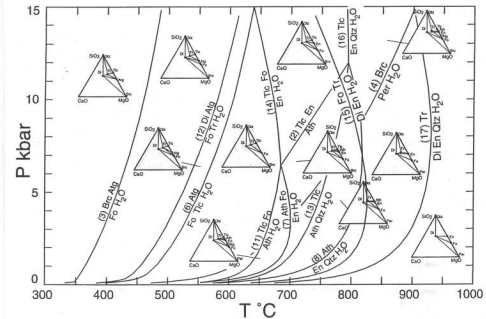
Diagrama CMS (+H) para rochas metaultramáficas

- Ath** – antofilita
- Brc** – brucita
- Di** – diopsídio
- En** – enstatita
- Fo** – forsterita
- Srp** – serpentina
- Tlc** – talco
- Tr** – tremolita



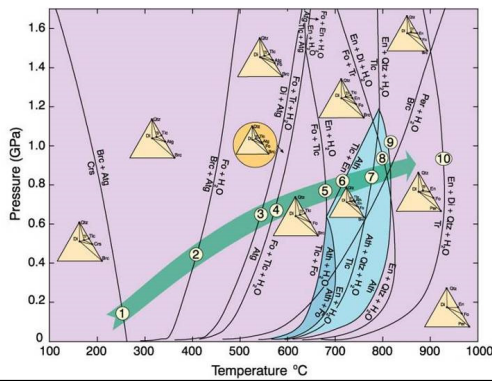
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Grade petrogenética P x T para o sistema CMS (+H)



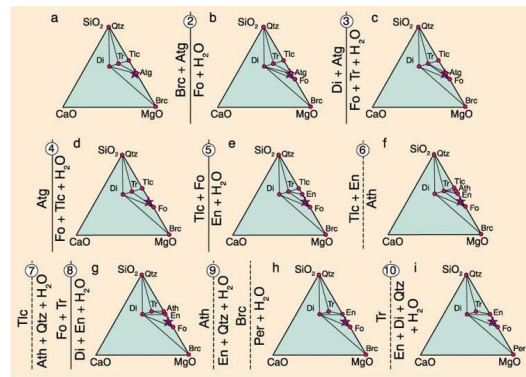
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

CMS(H) – grade petrogenética (PxT) com diagramas quimiográficos



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

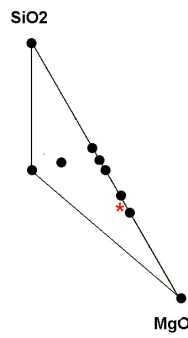
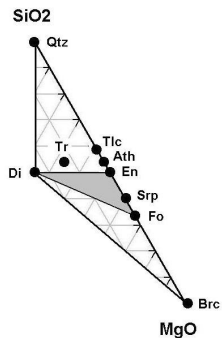
Sistema CMSH - quimiografia (reações segundo grade P x T anterior)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

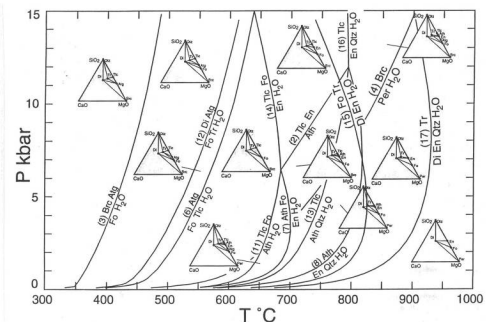
Diagrama CMS(H) – minerais e triângulo OI-Opx-Cpx

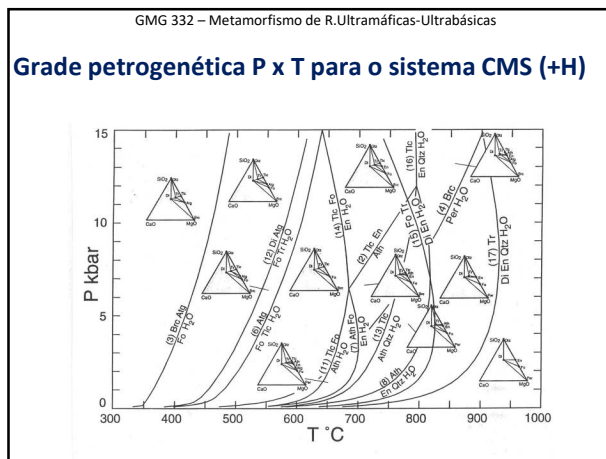
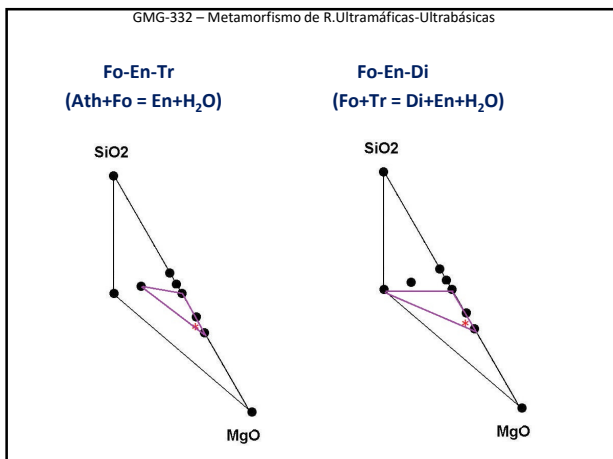
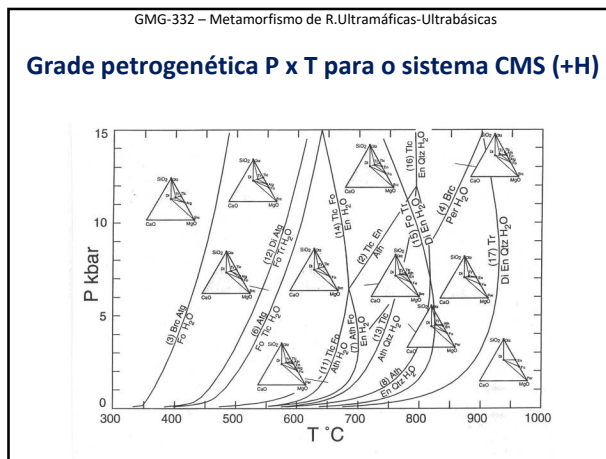
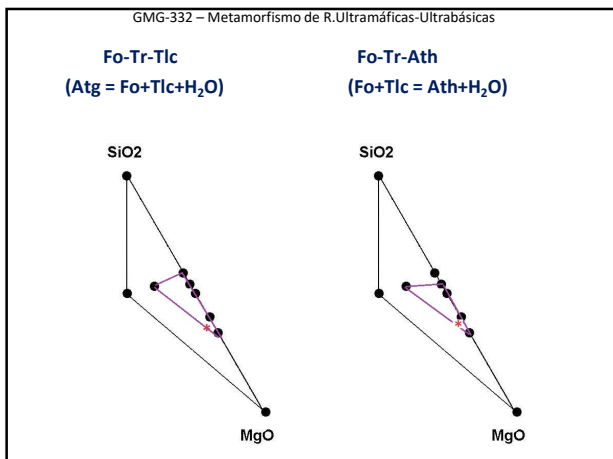
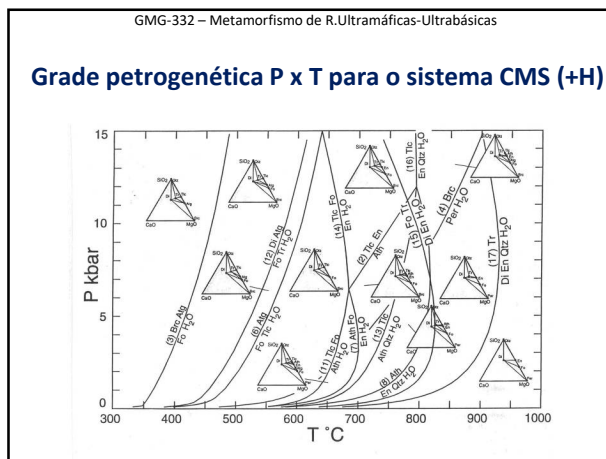
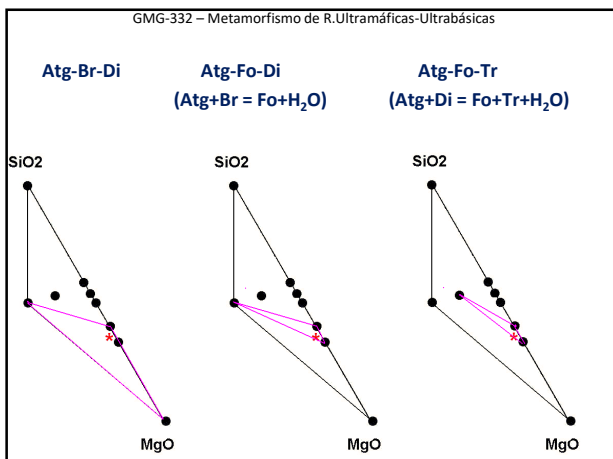
Ex.1: composição inicial: 90%Atg, 5%Brc, 5%Cpx

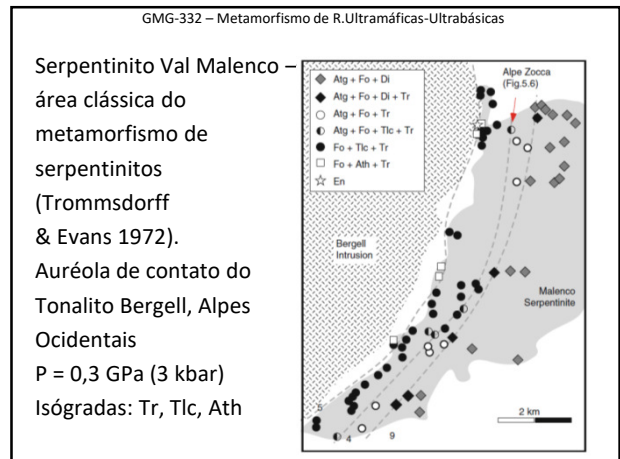
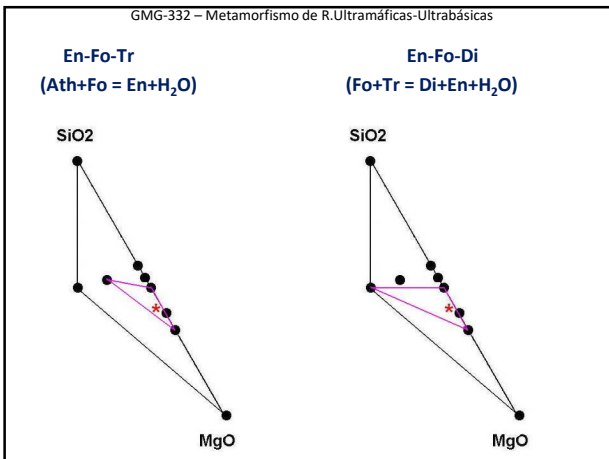
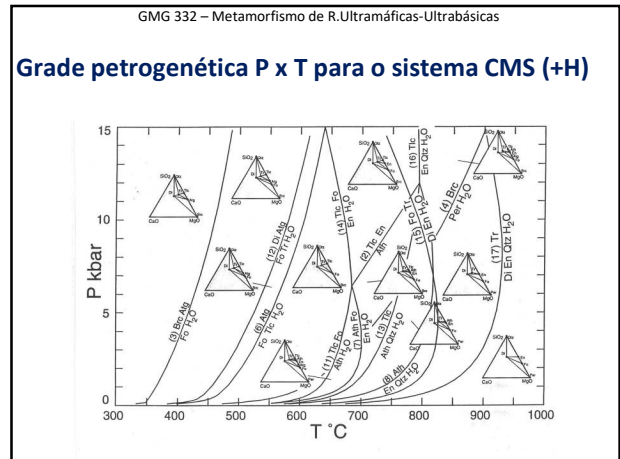
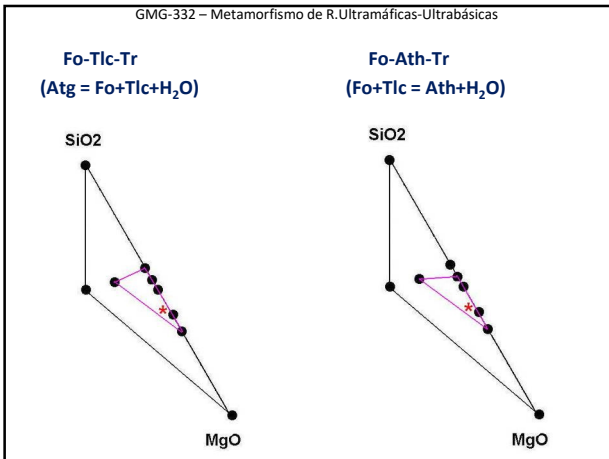
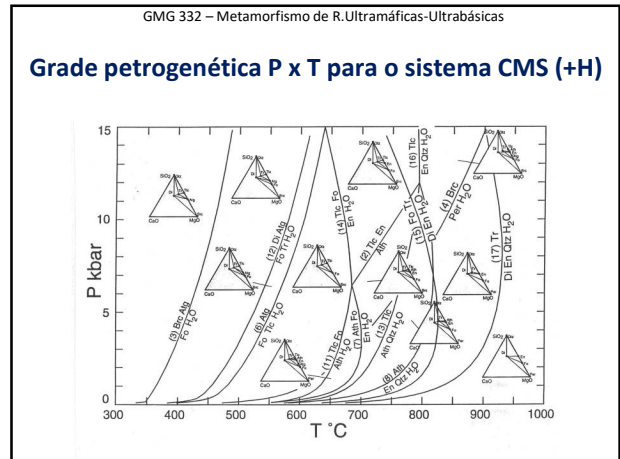
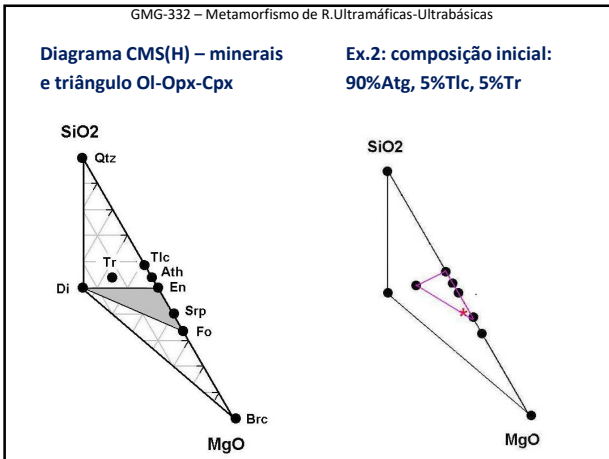


GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Grade petrogenética P x T para o sistema CMS (+H)



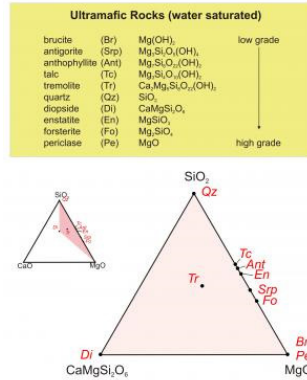




GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

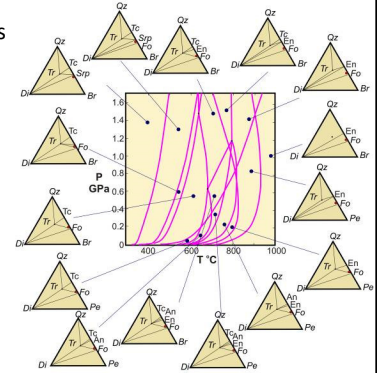
O diagrama triangular **SiO₂-MgO-CaMgSi₂O₆** (**Qz-Di-Pe**), projetado do vértice H₂O (em excesso). Esta representação destaca melhor as fases de rochas ultramáficas.

Obs: **CaMgSi₂O₆** como **componente!**
 $Tr = 2CaMgSi_2O_6 + 3MgO + 4SiO_2 (+H_2O)$



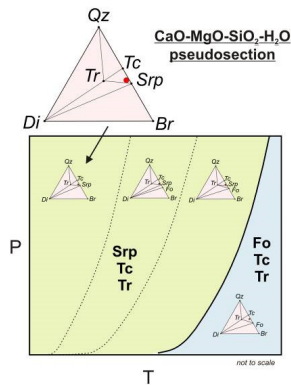
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Os diagramas ternários **SiO₂-MgO-CaMgSi₂O₆** de compatibilidade (ou quimiográficos) para os campos divariantes do sistema CMS (+H)



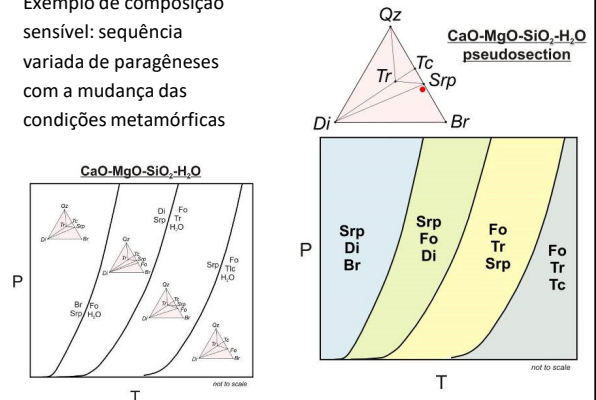
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Exemplo de composição pouco sensível: pequena variação das paragêneses com a mudança das condições metamórficas. **Pseudoção**: diagrama de fases para uma determinada composição específica (ponto vermelho) – só interessam as reações da grade petrogenética que esta composição “verá” no decorrer do metamorfismo.



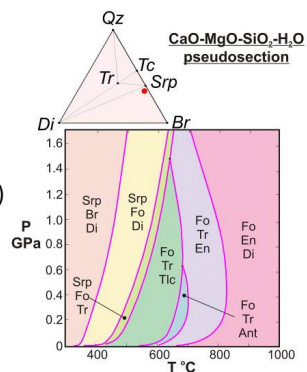
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Exemplo de composição sensível: sequência variada de paragêneses com a mudança das condições metamórficas



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Pseudoção completa para a composição “sensível” anterior – campo P x T, entre 0,0 - 1,6 GPa (0 a 16 Kbar) e 0 - 1000°C



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Campo de estabilidade máxima das serpentinas: de ~ 500 a 600°C; variedade de mais alta T: antigorite;

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

Diopside: com Atg nos serpentinitos a baixas T e Fo e En a altas T. Grau médio: substituída por tremolita (esta com campo extenso de estabilidade).

Alta T: paragêneses reproduzem as dos protólitos anidros (**En+Fo+Di** – composições ricas em Mg).

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

NCMASH (Na₂O-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O)

Lherzolitos e komatiitos – mais próximo da realidade.

Os minerais de **MSH**, **CMSH**, **CMASH** e mais:**Mg-Hbl** = Mg-Hornblenda (pargasítica):

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

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

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Substituições catiônicas em anfíbólios cálcicos com aumento do grau metamórfico: maiores teores em Al e Na

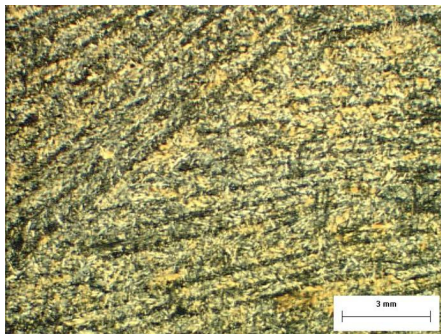
(ATENÇÃO: Ca permanece igual!)

Tr - Tremolita: $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ **Substituição tschermakítica:** $\text{Mg}^{\text{VI}}\text{Si}^{\text{IV}} = \text{Al}^{\text{VI}}\text{Al}^{\text{IV}}$ **Substituição edenítica:** $\square^{\text{A}}\text{Si}^{\text{IV}} = \text{Na}^{\text{A}}\text{Al}^{\text{IV}}$

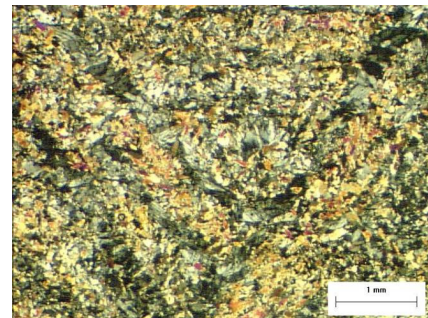
Somando ambas =

Mg-Hornblenda - $\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}[\text{Al}_2\text{Si}_6]\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

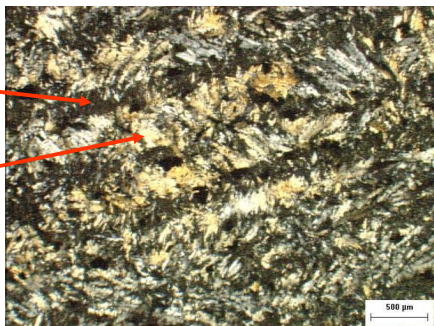
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Textura *spinifex* em placas em clorita-tremolita fels

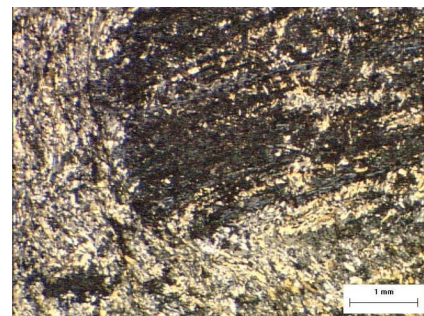
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

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

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Textura *spinifex* em placas em clorita-tremolita fels – detalhe**Mg-Chl**
(subst. Ol)**Ca-Amp**
(subst. Cpx)

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Porfiroblasto de olivina sobre textura *spinifex* – notar foliação “amoldada” (à esquerda) contra o porfiroblasto rígido durante deformação

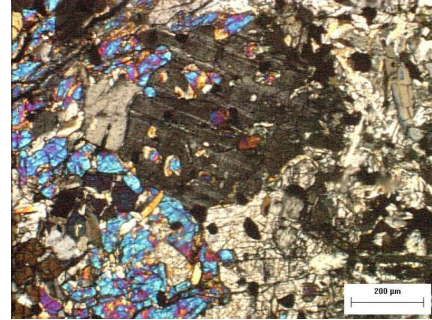
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

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



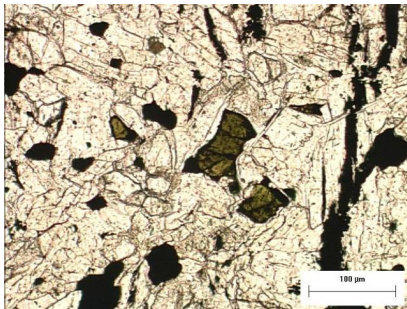
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

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



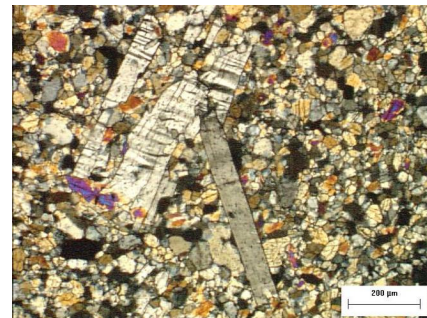
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Espinélio verde (Fe-Mg-Al, metamórfico) com bordas de Mt cromífera em matriz granoblástica de Mg-Hbl



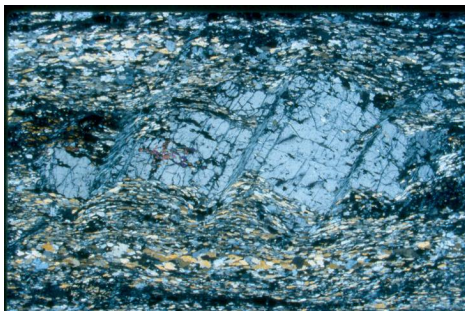
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

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



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Spl-Fo-En-Mg-Hbl xisto porfiroblástico
(blasto-milonito de alto grau = UM-10)



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Metamorfismo de rochas ultramáficas sob condições de fluidos mistos – H₂O + CO₂

Sistema MS-CH

Fase adicional: **Mgs** - Magnesita – MgCO₃

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

Cal - Calcita – CaCO₃

Do - Dolomita – CaMg(CO₃)₂

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Exemplos de reações no sistema **MS-CH**:

- 1) $1\text{Srp} + 2\text{Qtz} \rightleftharpoons 1\text{Tlc} + \text{H}_2\text{O}$
- 2) $1\text{En} + 2\text{Mgs} \rightleftharpoons 2\text{Fo} + 2\text{CO}_2$
- 3) $1\text{Tlc} + 5\text{Mgs} \rightleftharpoons 4\text{Fo} + 1\text{H}_2\text{O} + 5\text{CO}_2$
- 4) $\text{Mgs} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Br} + \text{CO}_2$
- 5) $2\text{Srp} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 1\text{Tlc} + 3\text{Mgs} + \text{H}_2\text{O}$
- 6) $\text{Tlc} + \text{En} \rightleftharpoons \text{Ath}$

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Principais consequências da adição de CO_2 ao sistema:

- Campo de estabilidade das serpentinas reduzido (apenas a baixa X_{CO_2})



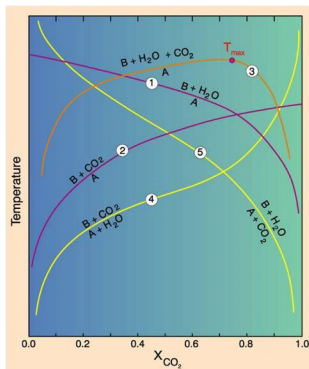
- **Mgs** se torna fase comum em fácies xisto-verde, sob condições de X_{CO_2} não demasiadamente altas ou baixas;
- A altas X_{CO_2} , formam-se os **sagvanditos** – rochas com **En e Mgs**

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Diagrama **T x X_{CO_2}**

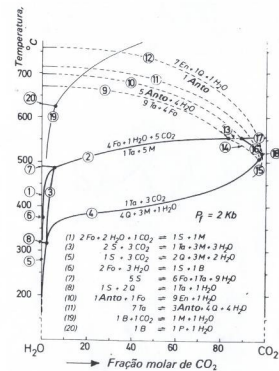
ilustrando os padrões das curvas de equilíbrio das reações com fase fluida mista.

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



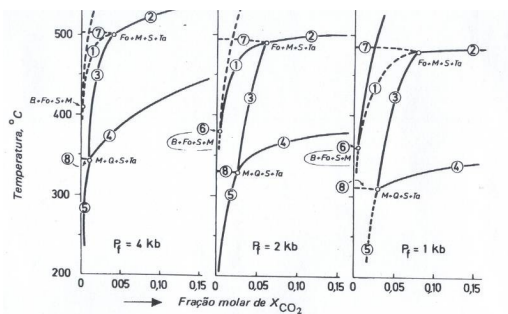
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Diagrama **T x X_{CO_2}** para reações em rochas ultramáficas



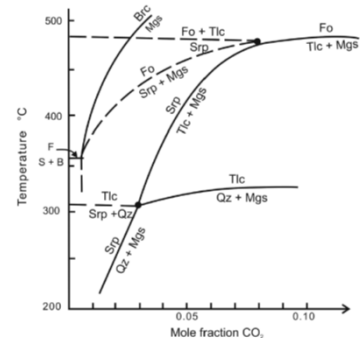
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Reações no sistema **MS-CH** a baixas X_{CO_2}



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

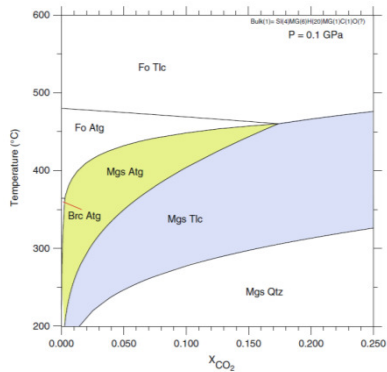
Grade petrogenética **T x X_{CO_2}** para o sistema **MS-HC** a $X_{\text{CO}_2} < 0,1$



(Schandl & Gorton 2012 Can.Mineral. 50:138)

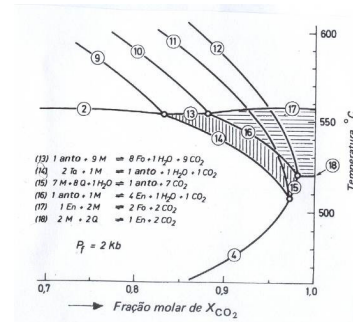
GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Pseudoseção
T x X_{CO_2} para o
sistema **MSH**
para P = 1 kbar
e $X_{CO_2} < 0,25$



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Reações no sistema **MS-CH** a altas X_{CO_2} :



GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas

Bibliografia

- Bucher, K.; Grapes, R. - 2011 - Petrogenesis of Metamorphic Rocks (8th Ed). Springer . Cap.5 – p.191-224
- Bucher, K.; Frey, M. - 2002 - Petrogenesis of Metamorphic Rocks – (7th Ed). Springer Verlag. Cap.5
- 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 - SiO₂ - H₂O. Schweiz.Mineral.Petrogr.Mitt. 50 : 481-492
- Schmädicke, E. - 2000 - Phase relations in peridotitic and pyroxenitic rocks in the model systems CMASH and NCMASH. Journal of Petrology 41: 69-86
- Wicks, F.J.; Whittaker, E.J.W. - 1977 - Serpentine textures and serpentinization. Can.Mineral. 15: 459-488

GMG-332 – Metamorfismo de R.Ultramáficas-Ultrabásicas