

GMG 5852 - Petrologia das Rochas Metamórficas

Metamorfismo de Rochas Carbonáticas Silicosas (Mármore Silicosos) e Calciossilicáticas

1

Rochas carbonáticas: calcários, dolomitos – componentes importantes do registro sedimentar (plataforma continental).

Equivalentes metamórficos: **mármore calcíticos, mármore dolomítico.**

Se não houver componentes adicionais a CaO, MgO, CO₂: ocorre apenas recristalização (com ou sem deformação) com o aumento do grau metamórfico - texturas granoblásticas, estrutura maciça: mármore “puros” (e.g. mármore de Carrara).

2



3



4



5



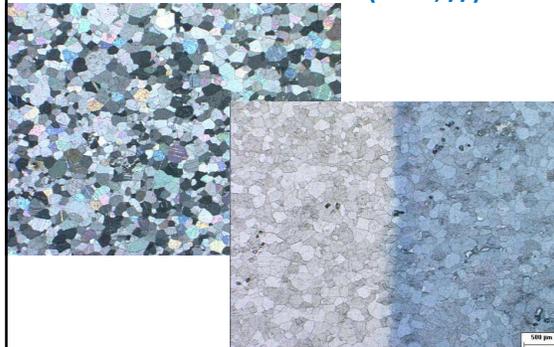
6

Mármore com estrutura estratificada (metadolomito)



7

Textura granoblástica polygonizada em mármore dolomítico (Pol X, //)



8

Calcários e dolomitos "impuros": silicosos e/ou argilosos, ou mesmo ferruginosos.

- **Silicosos:** SiO_2 proveniente de quartzo detrítico ou de níveis de *chert*.
- **Argilosos:** + Al_2O_3 , K_2O - proporções variáveis de argila (e.g. margas).
- **Rochas calciossilicáticas** s.l. (*marls* = margas): misturas de componentes silicáticos (arenitos, arcósios, *wackes* = grauvas, lamitos) e carbonáticos (calcários e/ou dolomitos), estes em menor proporção;

9

Rochas calciossilicáticas: composição mineralógica variada – epidoto, diopsídio, wollastonita, escapolita, vesuvianita, grossulária, Ca-anfíbio, flogopita, clorita, etc;

Skarn, ou escarnito: rocha calciosilicática formada por metassomatismo atuante sobre rochas carbonáticas, através de fluidos silicosos, no contato com camadas sedimentares contíguas ou pela ação de intrusões graníticas. Hospedam importantes depósitos minerais (W,Sn,Pb-Zn,Cu,Fe,Mo,Au).

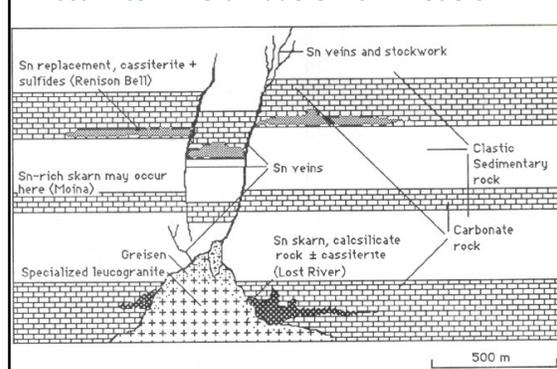
10

Metassomatismo de contato, ou pirometassomatismo: formação de **escarnitos (skarns)** – rochas cálcio-silicáticas metassomáticas

- Contato de rocha intrusiva (geralmente granitos s.l.) com encaixante carbonática (dolomitos, calcários)
- Mineralogia exótica: granada, wollastonita, piroxênios (Di, Hed), sulfetos, sulfossais, magnetita, cassiterita, vesuvianita, allanita, etc
- Principais minérios: **Fe, Cu, W, Zn, Pb, Mo, Sn, U, Au**, grafita, granada e wollastonita

11

Escarnito mineralizado em Sn: modelo



12

Rochas carbonáticas silicosas: caso mais simples, com predomínio do componente carbonático e contribuição variável de SiO_2

Sistema fundamental:

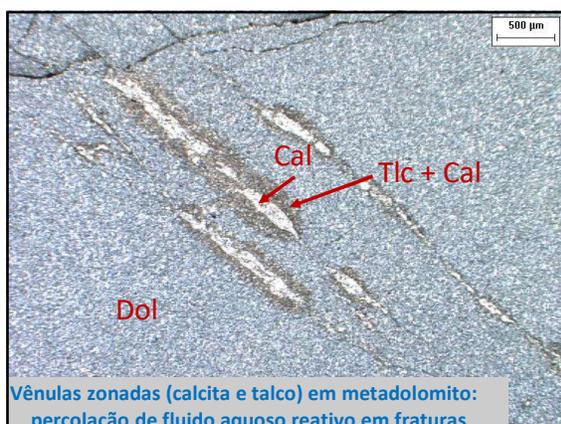
CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ (CMS±CH) – lado esquerdo do diagrama CMS

Origem da sílica: sedimentar (quartzo detrítico, *chert*, esteiras algais), ou trazido dissolvido na fase fluída (metassomatismo)

13



14



15

Fatores envolvidos no metamorfismo de rochas carbonáticas silicosas

- Proporção (modal) dos minerais e (molar) dos componentes do protólito (relações entre calcita-Cal, dolomita-Do e quartzo-Qtz)
- Características da fase fluída: $X_{\text{CO}_2}/X_{\text{H}_2\text{O}}$, temperatura, salinidade, pH, etc;
- Razões fluído-rocha, fonte do fluído, porosidade da rocha e tempo de residência do fluído na rocha.

16

Possíveis fontes para os fluídos

- Metamórficos:** reações de desidratação / decarbonatação da pilha metamórfica: fluxo +/- contínuo, T inicial em equilíbrio com as rochas;
- Ígneos:** de corpos intrusivos no pacote sedimentar, alta T inicial, injetados em volume finito;
- Meteóricos ou infiltrados:** provenientes de níveis superiores, mobilizados pelo calor de intrusões ou pelo gradiente geotérmico;
- Provenientes de zonas de cisalhamento:** alta T inicial, bombeados em grande volume (alta razão fluído/rocha) nas discontinuidades tectônicas (*tectonic plumbing*).

17

Fase fluída: duas situações extremas

- Composição externamente controlada** (grande volume de fluído, altas razões fluído/rocha, baixo tempo de permanência no sistema) – as reações metamórficas não afetam significativamente sua composição;
- Composição tamponada pelas reações metamórficas** (fase fluída em volume restrito, alto tempo de residência no sistema – sistema “fechado”) – a progressão das reações metamórficas altera sensivelmente a composição da fase fluída.

18

Principais minerais das paragêneses metamórficas no sistema **CMS (HC)** em sequência aproximada de aparecimento

- **calcita** (Cal) CaCO_3
- **dolomita** (Do) $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
- **quartzo** (Qtz) SiO_2
- **talco** (Tlc) $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- **tremolita** (Tr) $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F},\text{Cl})_2$
- **diopsídio** (Di) $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
- **forsterita** (Fo) Mg_2SiO_4
- **wollastonita** (Wo) CaSiO_3 (altas T°)
- **periclásio** (Per) MgO (met.contato)

19

Diagrama CMS-HC com os principais minerais e campos das rochas **ultramáficas** e **carbonáticas silicosas**

qz: quartzo
tlc: talco
tr: tremolita
en: enstatita
di: diopsídio
atg: antigorita
fo: forsterita
cc: calcita
do: dolomita
br: brucita
mgs: magnésita

20

Diagrama CMS: os principais minerais e os campos das rochas carbonáticas silicosas dolomíticas e calcíticas

Winter 2001

21

Diagrama quimiográfico CMS (+CH)

1a, 1b, 1c: mármores dolomíticos

2a, 2b: mármores calciossilicáticos

Bucher & Grapes 2011

22

Reações metamórficas: controladas pela fase fluida (X_{CO_2}) – representação do sistema através de 3 componentes: CaO, MgO, SiO_2 (fase fluida em excesso);

Diagrama pseudo-binário T x X_{CO_2} - campos divariantes (3 fases sólidas), linhas univariantes (4 fases sól.), pontos invariantes (5 fases sól.);

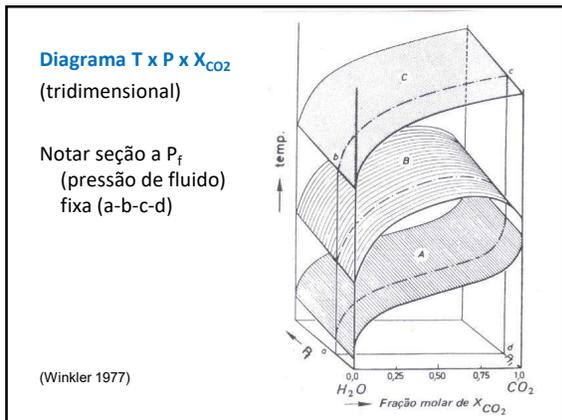
O padrão das curvas (= reações, linhas univariantes) depende da atuação dos componentes da fase fluida (H_2O , CO_2): qual é produto, qual reagente, etc.

23

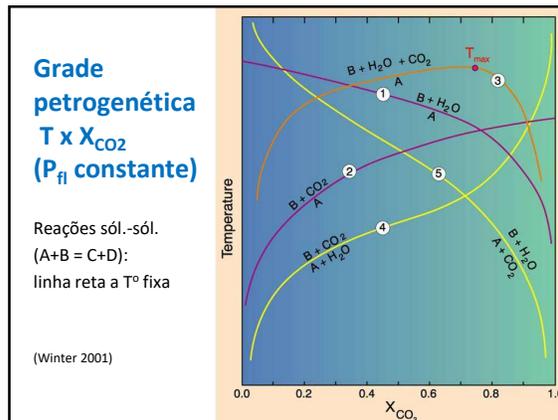
As principais reações

- 1) $3 \text{ Do} + 4 \text{ Qtz (sílica)} + \text{H}_2\text{O} = \text{Tlc} + 3 \text{ Cal} + 3 \text{ CO}_2$
- 2) $5 \text{ Do} + 8 \text{ Qtz} + \text{H}_2\text{O} = \text{Tr} + 3 \text{ Cal} + 7 \text{ CO}_2$
- 3) $\text{Do} + 2 \text{ Qtz} = \text{Di} + 2 \text{ CO}_2$
- 4) $2 \text{ Tlc} + 3 \text{ Cal} = \text{Tr} + \text{Do} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 5) $\text{Tr} + 3 \text{ Cal} = 4 \text{ Di} + \text{Do} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 6) $\text{Tr} + 11 \text{ Do} = 8 \text{ Fo} + 13 \text{ Cal} + 9 \text{ CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 7) $3 \text{ Tr} + 5 \text{ Cal} = 11 \text{ Di} + 2 \text{ Fo} + 5 \text{ CO}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O}$
- 8) $107 \text{ Do} + 17 \text{ Tr} + 107 \text{ H}_2\text{O} = 141 \text{ Cal} + 4\text{Atg} + 73 \text{ CO}_2$
- 9) $\text{Di} + 3 \text{ Do} = 2 \text{ Fo} + 4 \text{ Cal} + 2 \text{ CO}_2$
- 10) $20 \text{ Do} + \text{Atg} = 20 \text{ Cal} + 34 \text{ Fo} + 20 \text{ CO}_2 + 31 \text{ H}_2\text{O}$
- 11) $\text{Do} = \text{Cal} + \text{Per} + \text{CO}_2$
- 12) $\text{Do} + \text{H}_2\text{O} = \text{Cal} + \text{Brc} + \text{CO}_2$
- 13) $\text{Brc} = \text{Per} + \text{H}_2\text{O}$
- 14) $5 \text{ Tlc} + 6 \text{ Cal} + 4 \text{ Qtz} = 3 \text{ Tr} + 6 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
- 15) $\text{Tr} + 3 \text{ Cal} + 2 \text{ Qtz} = 5 \text{ Di} + 3 \text{ CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 16) $\text{Cal} + \text{Qtz} = \text{Wo} + \text{CO}_2$

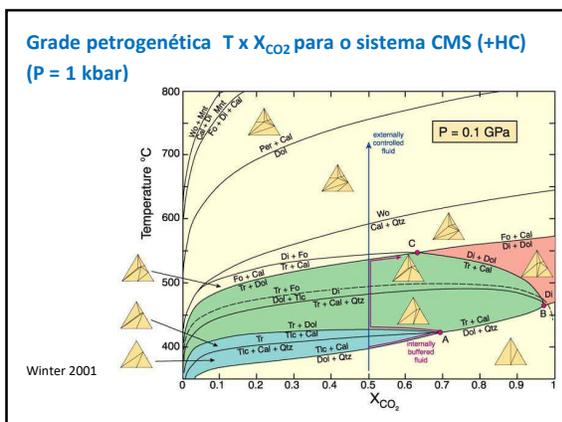
24



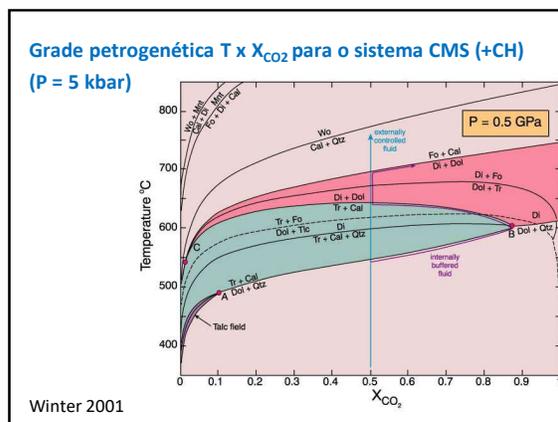
25



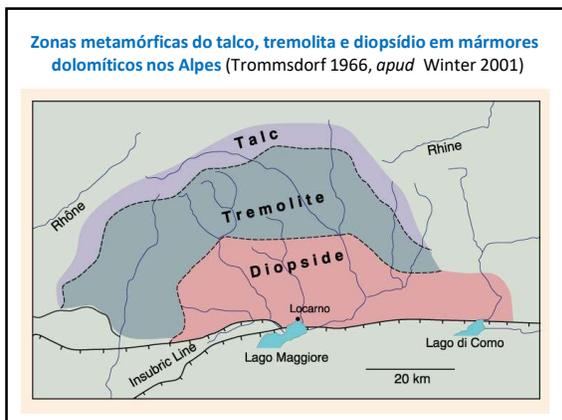
26



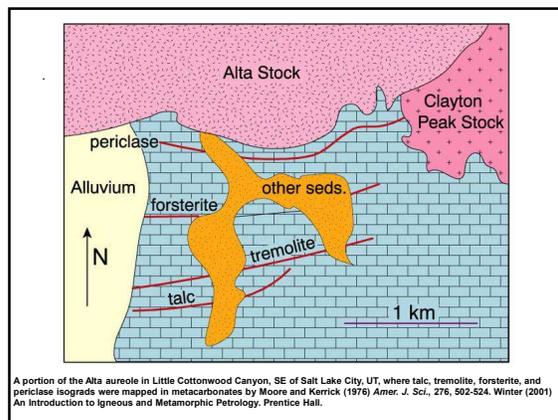
27



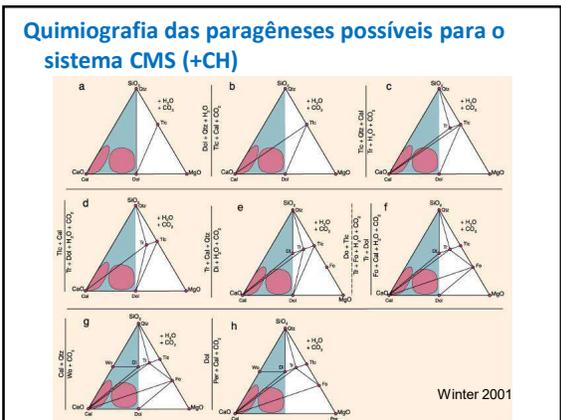
28



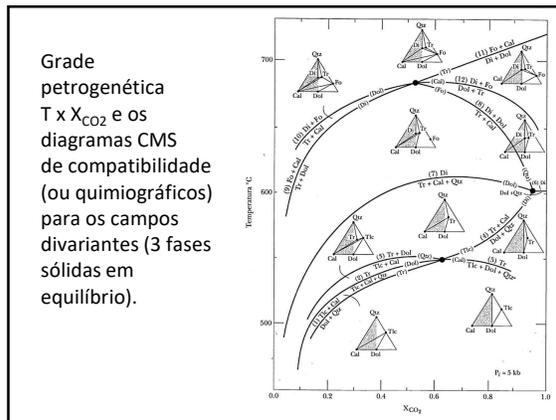
29



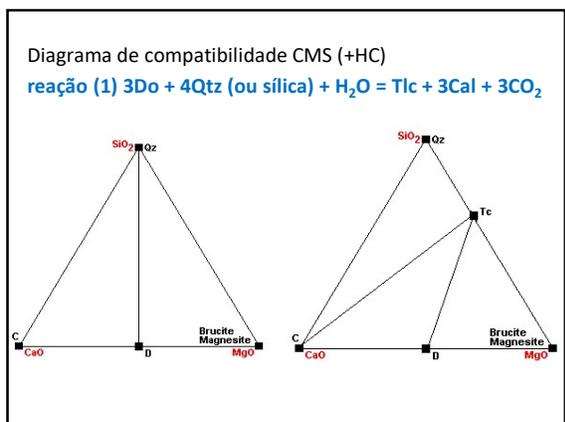
30



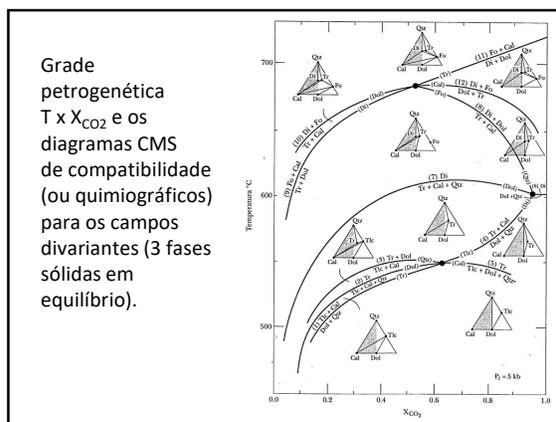
31



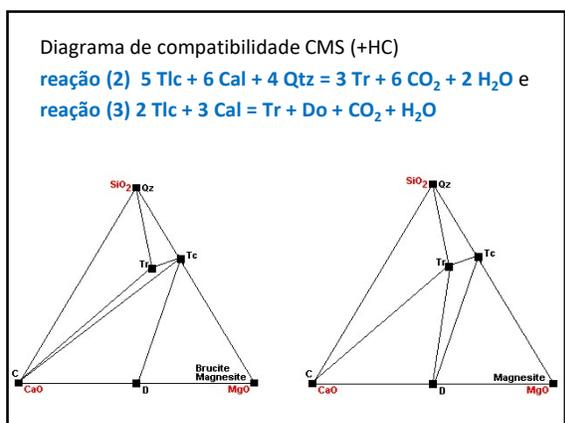
32



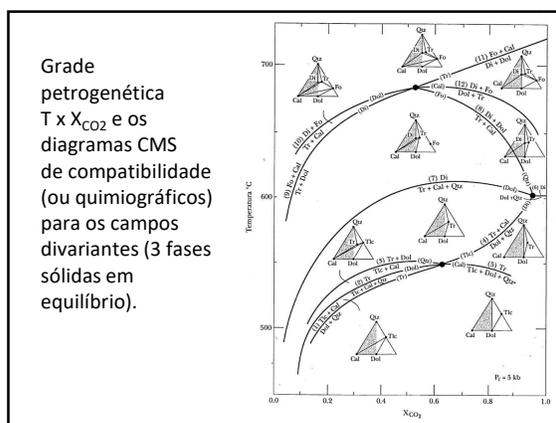
33



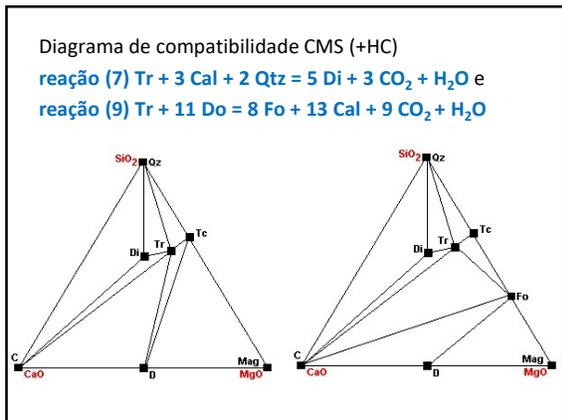
34



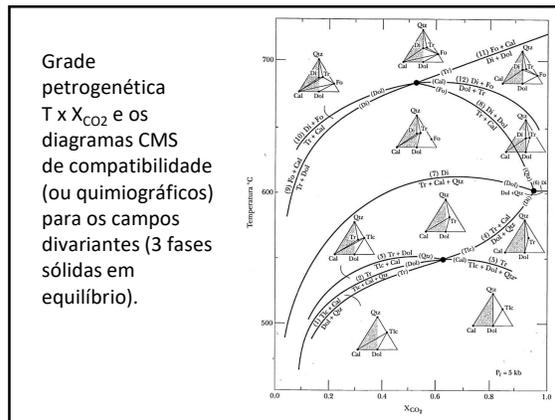
35



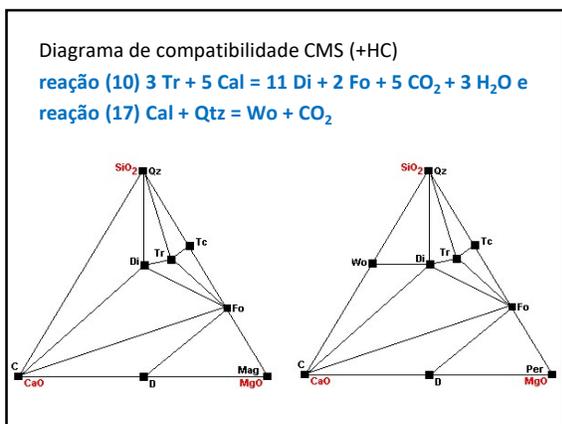
36



37



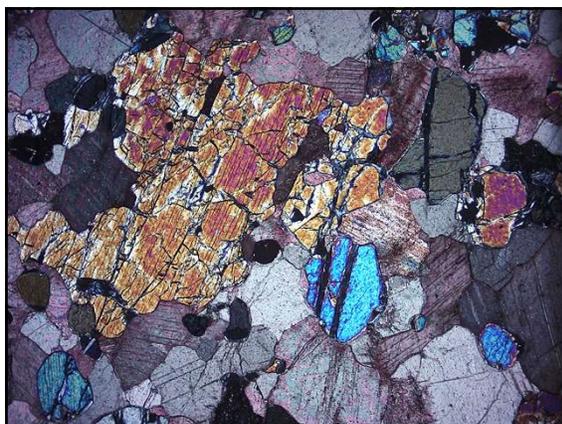
38



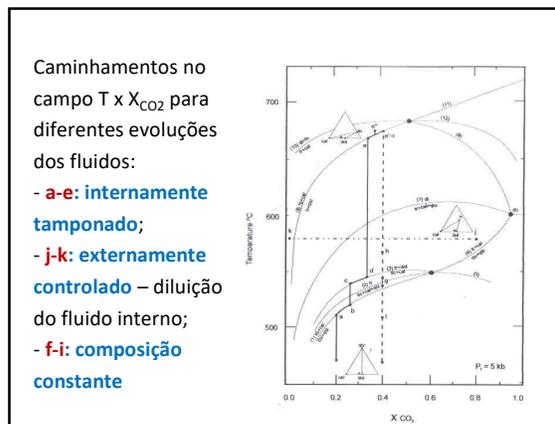
39



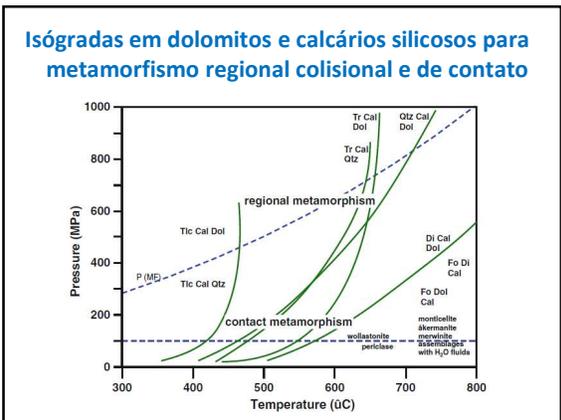
40



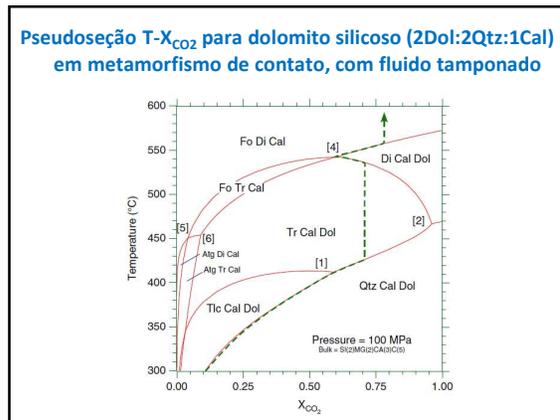
41



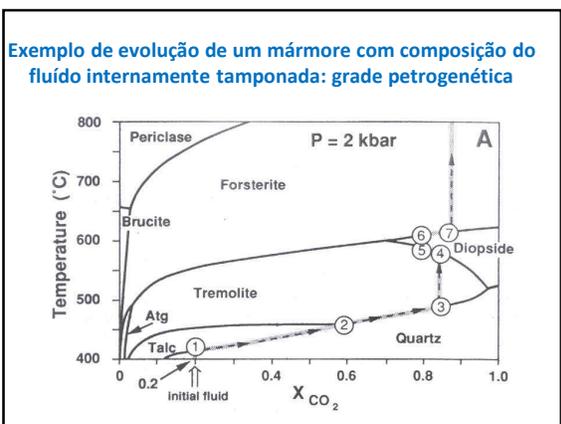
42



43



44

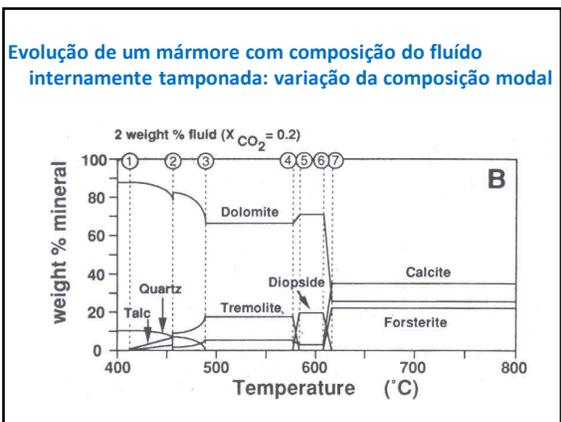


45

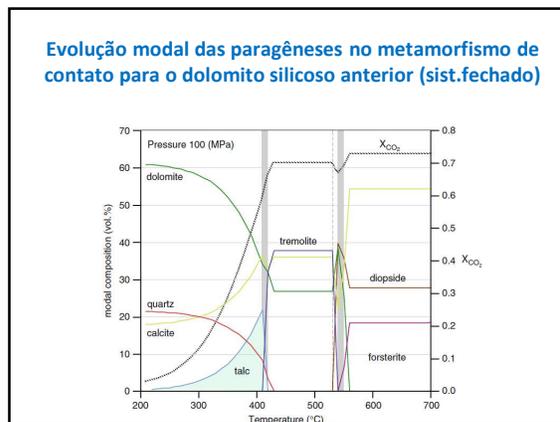
Rocha inicial: dolomito silicoso (Do + Qtz)

- $3 Do + 4 Qtz + H_2O = Tlc + 3 Cal + 3 CO_2$
(em 2, atinge ponto invariante: permanece até Tlc esgotar)
- $2 Tlc + 3 Cal = Tr + Do + CO_2 + H_2O$
(após Tlc esgotar, segue para 3 sobre curva univariante)
- $5 Do + 8 Qtz + H_2O = Tr + 3 Cal + 7 CO_2$
(em 3, Qtz esgota - abandona curva univariante e T aumenta até 4)
- $Tr + 3 Cal = 4 Di + Do + CO_2 + H_2O$
(segue curva univariante até 5, onde Tr esgota - X_{H2O} aumenta - T aumenta até 6)
- $Di + 3 Do = 2 Fo + 4 Cal + 2 CO_2$
(segue curva univariante até 7, onde Di esgota: a rocha final é um Fo-Do-Cal mármore)

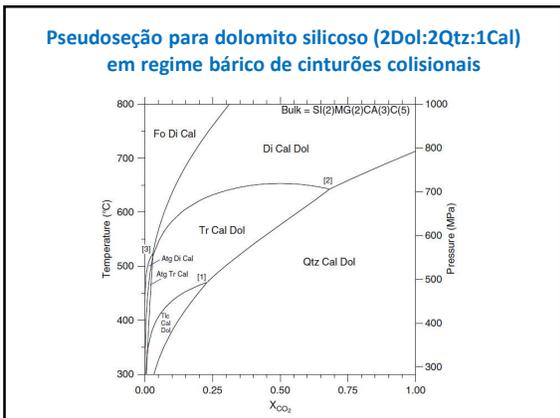
46



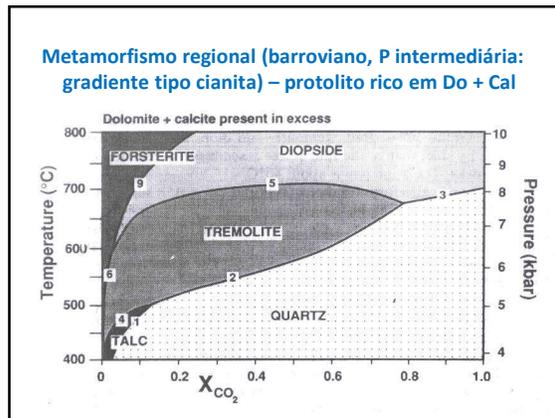
47



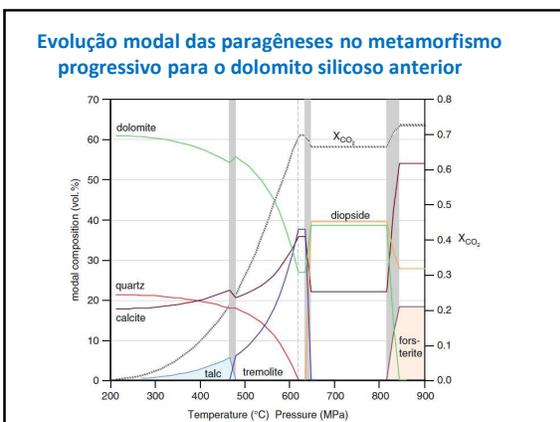
48



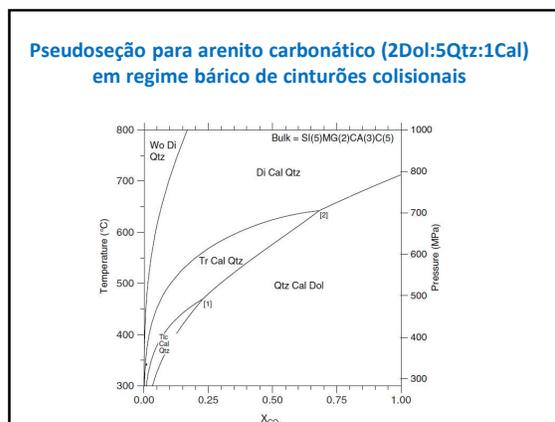
49



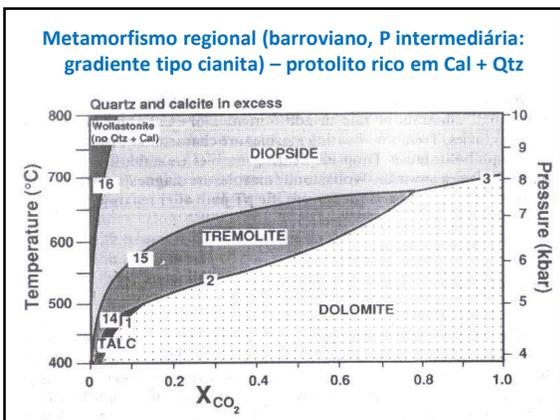
50



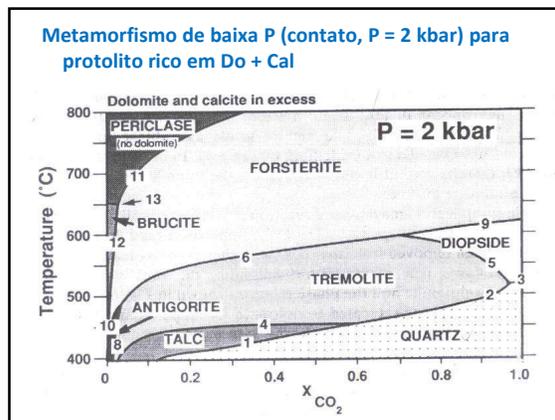
51



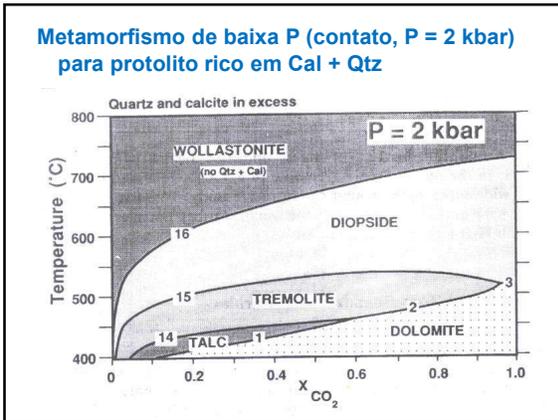
52



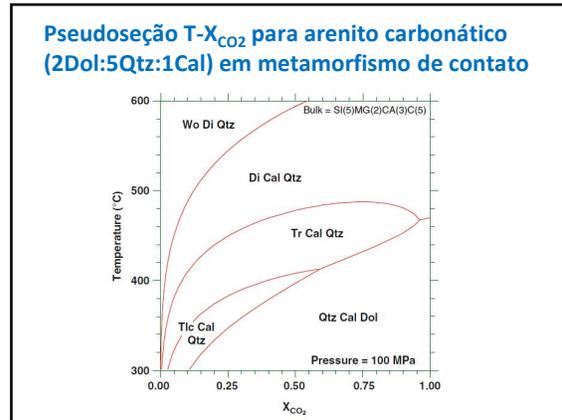
53



54



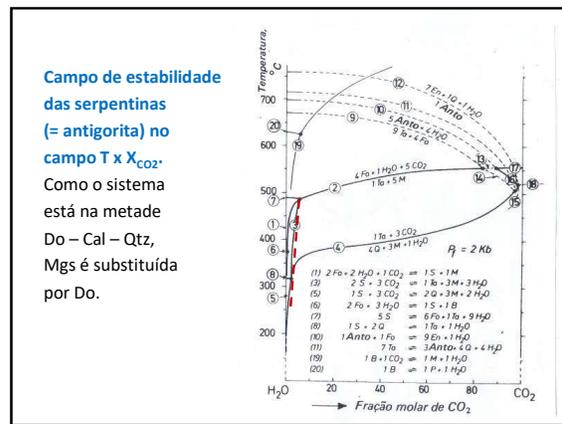
55



56



57

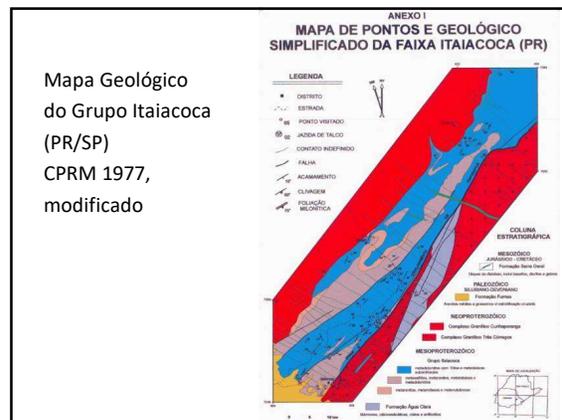


58

Metassomatismo silicoso por percolação de fluido em zona de cisalhamento e em contato intrusivo com granito: o exemplo do Grupo Itaiacoca (PR)

- **Grupo Itaiacoca:** seqüência (vulcano-) sedimentar com predomínio de metadolomitos, às vezes estromatolíticos
- **Contato E:** tectônico, com o Granito Três Córregos e Grupo Águas Claras, através da Z.C. Itaipirapuã; calcificação na Z.C. e em bolsões dentro da faixa carbonática, às vezes com tremolita
- **Contato W:** intrusivo, com o Granito Cunhaporanga; tremolita acompanhando fraturas, com diopsídio e olivina mais próximo ao contato.

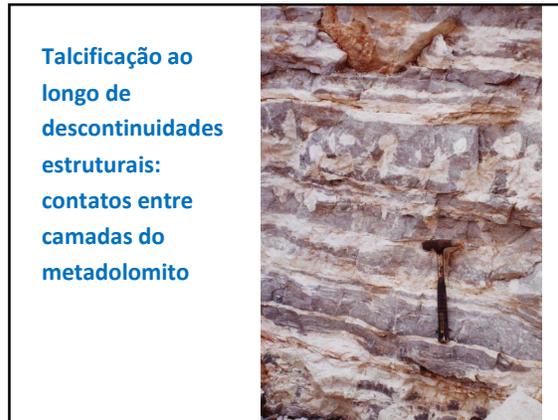
59



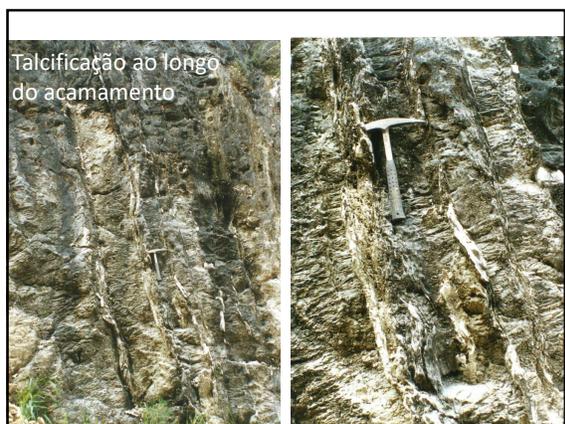
60



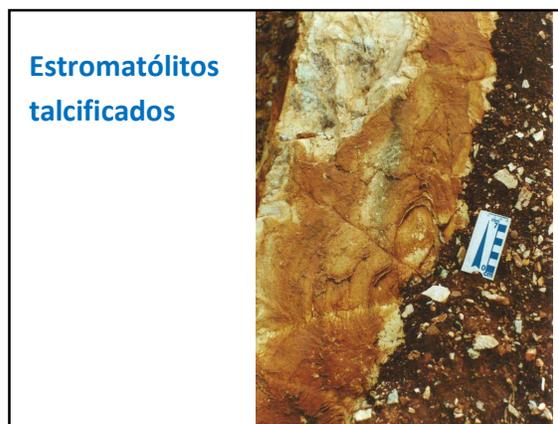
61



62



63



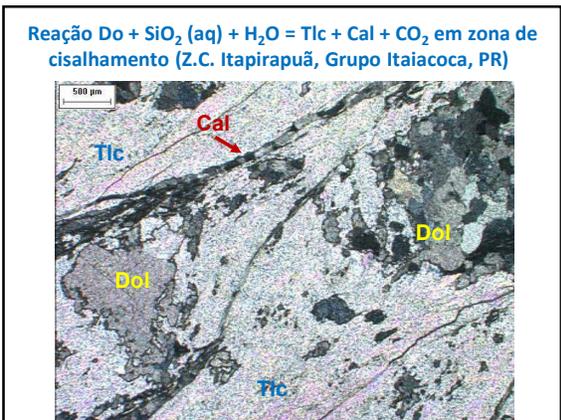
64



65



66



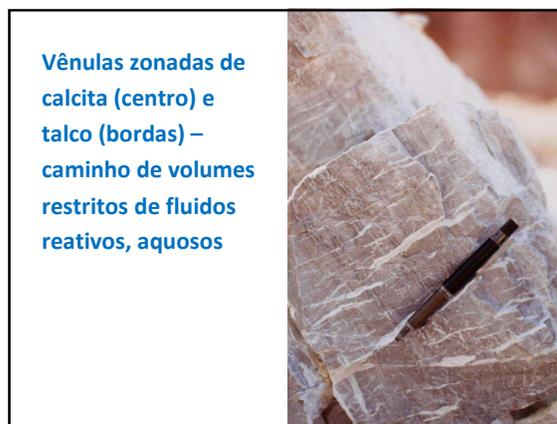
67



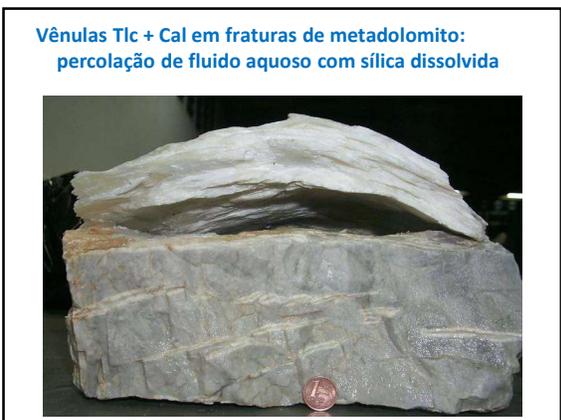
68



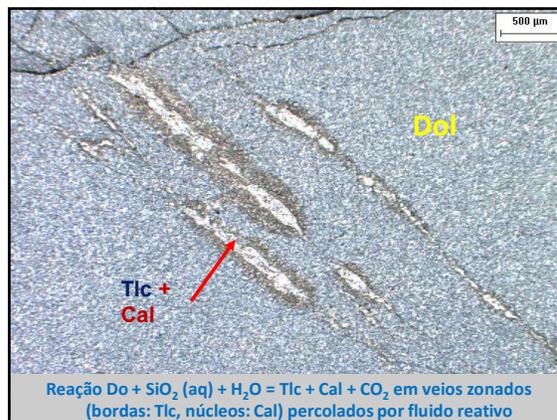
69



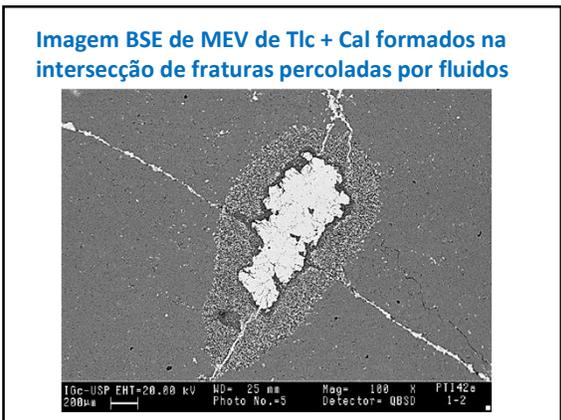
70



71



72



73



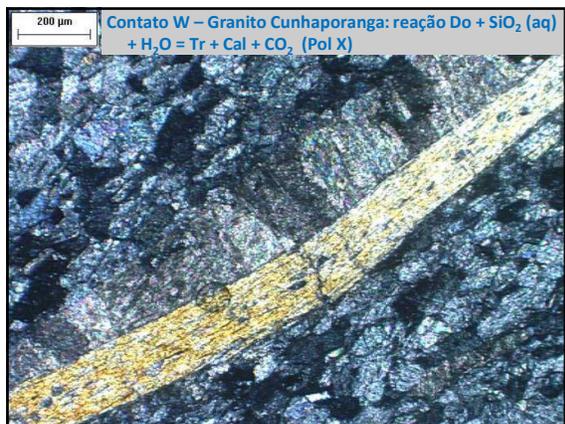
74



75



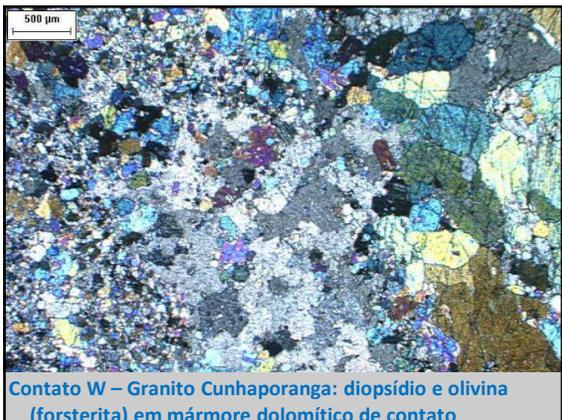
76



77



78

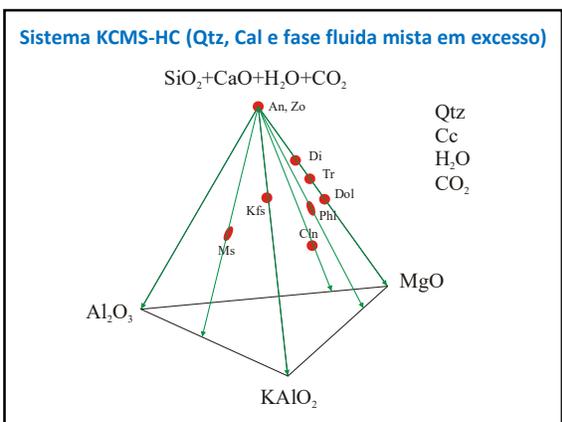


79

ROCHAS CALCISSILICÁTICAS: maior complexidade composicional – várias possibilidades de mistura entre rochas silicosas a argilosas e carbonáticas;

- Arenitos “puros” + dolomita (e.g. como cimento): tremolita quartzitos = sistema **CMS-HC**;
- Argilitos / folhelhos (arenosos / siltosos ou não) + dolomita e calcita em proporções variadas: paragéneses diversificadas – tremolita, clorita (clinocloro), diopsídio, epidoto-clinozoisita-zoisita, grossulária, wollastonita, vesuvianita, escapolita, flogopita, muscovita, margarita, anortita, K-feldspato, dolomita, calcita, Mg-hornblenda = sistema **KCMAS-HC** (e subsistemas). Geralmente: quartzo em excesso. Componentes adicionais, não considerados: Ti (titanita, comum), Na, Fe, Cl, etc.

80

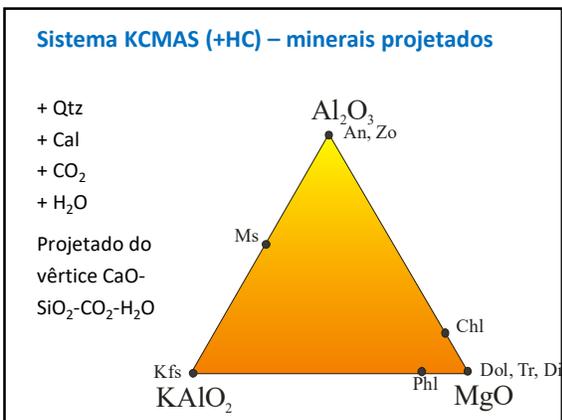


81

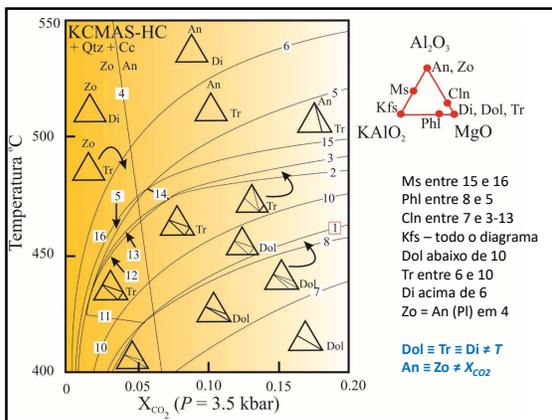
Minerais / fases no sistema KCMAS-HC

- Quartzo - SiO₂
- Calcita - CaCO₃
- Dolomita - CaMg(CO₃)₂
- Diopsídio - CaMgSi₂O₆
- Grossulária - Ca₃Al₂Si₃O₁₂
- Tremolita - Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂
- Anortita - CaAl₂Si₂O₈
- Zoisita, Clinozoisita - Ca₂Al₃Si₃O₁₂(OH)
- Clorita - Mg₅Al₂Si₃O₁₀(OH)₈
- Flogopita - KMg₃AlSi₁₀(OH)₂
- Muscovita - KAl₂AlSi₁₀(OH)₂
- Ortoclásio - KAlSi₃O₈
- Fluido - H₂O +/- CO₂

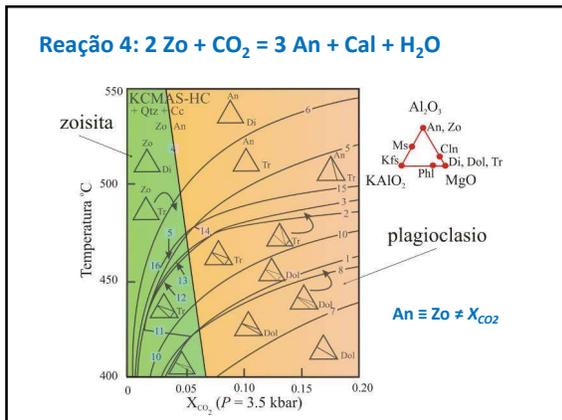
82



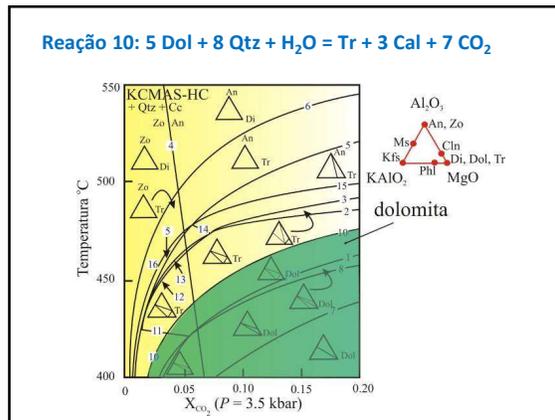
83



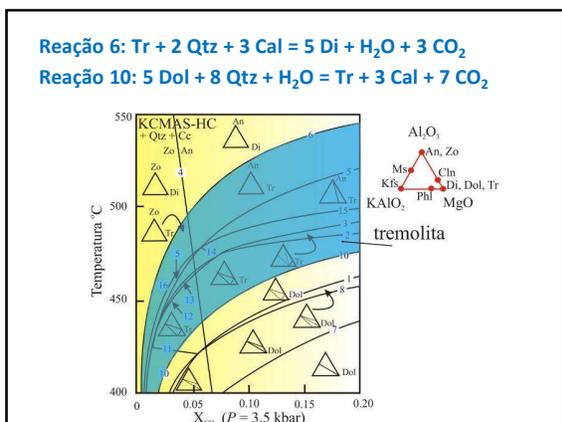
84



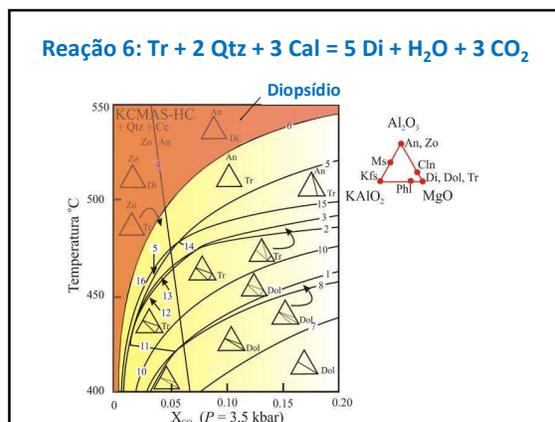
85



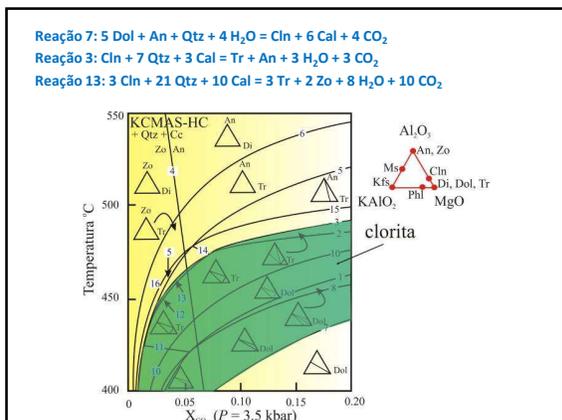
86



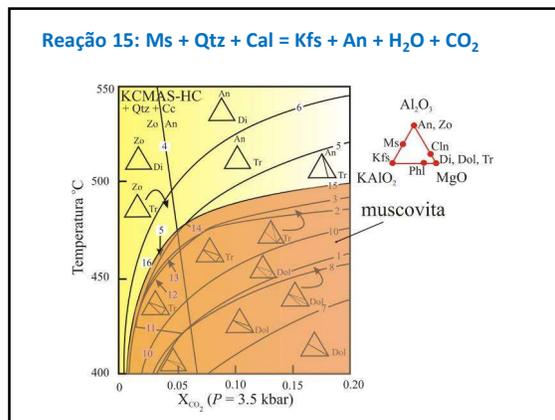
87



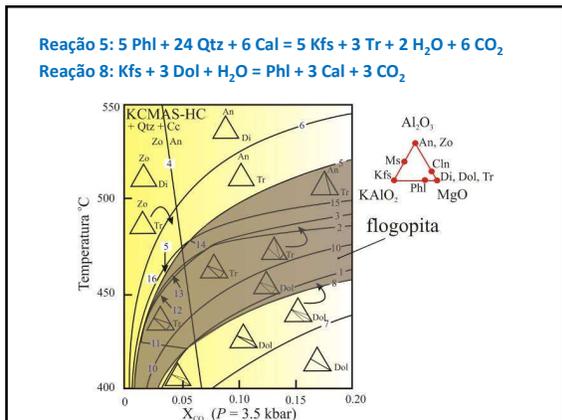
88



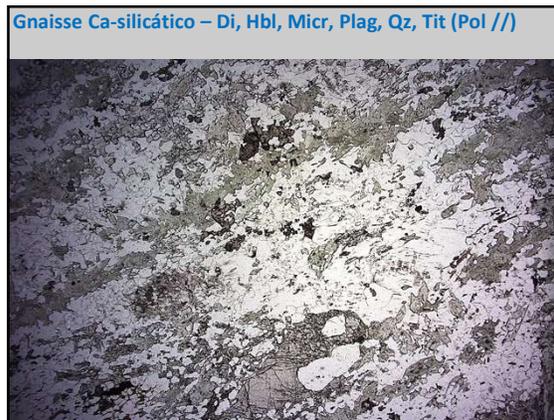
89



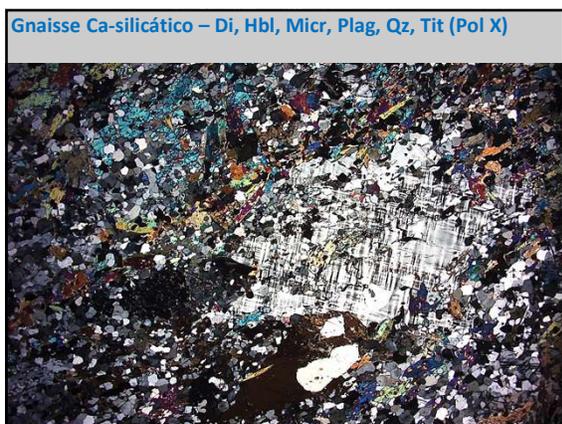
90



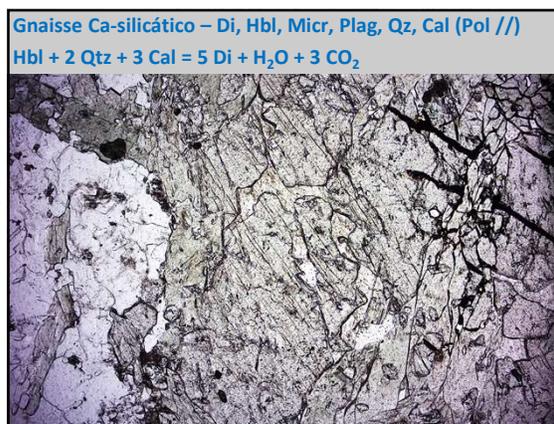
91



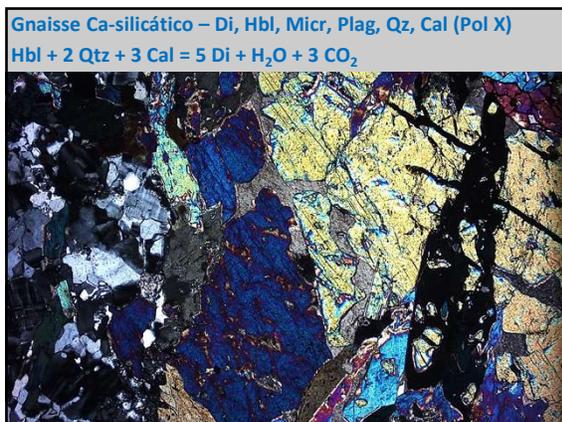
92



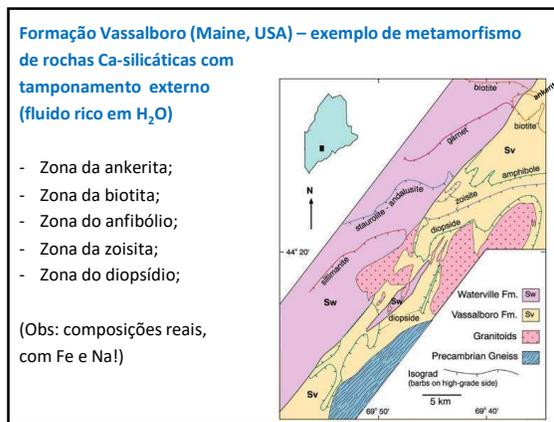
93



94



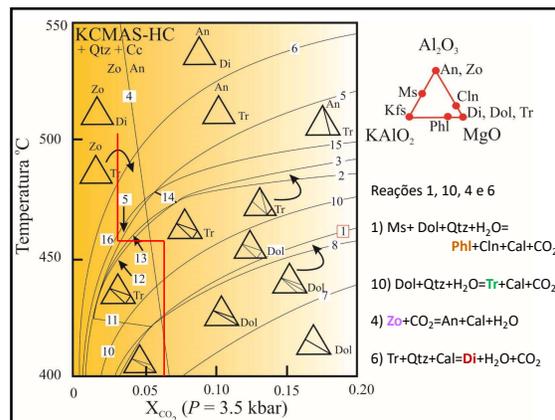
95



96

- **Zona da ankerita:**
 - Ankerita, $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2 + \text{Qtz} + \text{Ab} + \text{Ms} + \text{Cc} \pm \text{Chl}$
- **Zona da biotita: Bt + Chl sem Ca-Anf**
 - $\text{Ms} + \text{Qtz} + \text{Ank} + \text{H}_2\text{O} = \text{Cc} + \text{Chl} + \text{Bt} + \text{CO}_2$
 - $\text{Ms} + \text{Cc} + \text{Chl} + \text{Qtz} + \text{Ab} = \text{Bt} + \text{Ca-Pl} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- **Zona do anfibólio (Hbl)**
 - $\text{Ca-Anf} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Cc} + \text{Bt} + \text{Chl}$
 - $\text{Chl} + \text{Cc} + \text{Qtz} + \text{Pl} = \text{Ca-Anf} + \text{Ca-Pl} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- **Zona da zoisita**
 - Zo forma coroa entre Pl e Cc
 - $\text{Ca-Pl} + \text{Cc} + \text{H}_2\text{O} = \text{Zo} + \text{CO}_2$
 - $\text{Bt} + \text{Cc} + \text{Qtz} = \text{Ca-Anf} + \text{Kfs} + \text{CO}_2$
 - Kfs com Ca-Anf = isógrada da Sil em metapelitos
- **Zona do diopsídio**
 - $\text{Di} + \text{Zo} + \text{Ca-Anf} + \text{Cc} + \text{Qtz} + \text{Pl} \pm \text{Bt} \pm \text{Kfs}$
 - $\text{Ca-Anf} + \text{Cc} + \text{Qtz} = \text{Di} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

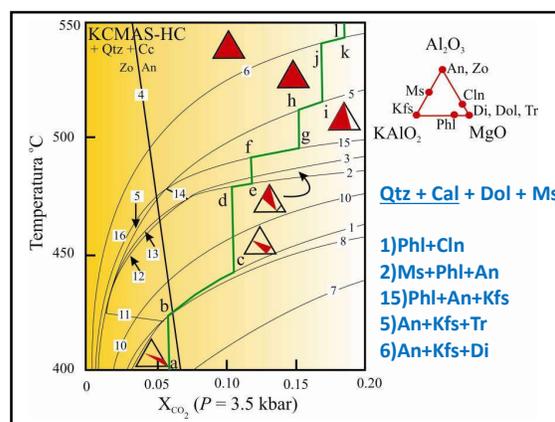
97



98

- Modelo de metamorfismo de rochas calciosilicáticas no sistema **KCMAS-HC** com tamponamento interno da fase fluida (Bucher & Grapes 2011 – Cap. 8)
- Paragênese inicial: muscovita – dolomita – calcita – quartzo;
 - Fluido inicial: $X_{\text{CO}_2} = 0,06$ (= 6 %)
 - $P_{\text{lit}} = 3,5$ kbar (0,35 GPa)
 - A composição da fase fluida é modificada à medida que as reações metamórficas se processam; as reações consomem H_2O e produzem CO_2 , ou produzem CO_2 em uma proporção que aumenta a fração molar deste componente na fase fluida;

99



100

Reações no sistema tamponado

- 1) $\text{Ms} + 8\text{Dol} + 3\text{Qtz} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Phl} + \text{Cln} + 8\text{Cal} + 8\text{CO}_2$
- 2) $5\text{Ms} + 3\text{Cln} + 7\text{Qtz} + 8\text{Cal} = 5\text{Phl} + 8\text{An} + 12\text{H}_2\text{O} + 8\text{CO}_2$
- 15) $\text{Ms} + 2\text{Qtz} + \text{Cal} = \text{Kfs} + \text{An} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (+ Phl)
- 5) $5\text{Phl} + 24\text{Qtz} + 6\text{Cal} = 5\text{Kfs} + 3\text{Tr} + 2\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2$ (+ An)
- 6) $\text{Tr} + 2\text{Qtz} + 3\text{Cal} = 5\text{Di} + \text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2$ (+ An, Kfs)

101

Bibliografia

- Bucher, K.; Frey, M. – 2002 – Petrogenesis of Metamorphic Rocks (7th Ed.). Springer Verlag, Heidelberg. 341p. Cap.6 e 8
- Bucher, K.; Grapes, R. – 2011 – Petrogenesis of Metamorphic Rocks (8th Ed.). Springer Verlag, Heidelberg. 428p. Cap.6 e 8
- Candia, M.A.F.; Szabó, G.A.J.; Del Lama, E.A. – 2003 – Petrologia Metamórfica: Fundamentos para a Interpretação de Diagramas de Fase. EDUSP, São Paulo. 190 p. Cap. 8
- Szabó, G.A.J.; Andrade, F.R.D.; Guimarães, G.B.; Carvalho, F.M.S.; Moya, F.A. – 2006 – As jazidas de talco no contexto da história metamórfica do Gr. Itaiacoca, PR. Geol. USP Sér. Cient. 5(2):13-31
- Yardley, B.W. – 2004 – Introdução à Petrologia Metamórfica (2ª Ed.). Editora UnB, Brasília. 434p. Cap.5
- Aulas em Power Point do Prof. Winter (parte das ilustrações): [http://www.whitman.edu/geology/winter/Petrology/Ch%2029%20Calc%20and%20UM.ppt#t273,18,Metamorphism of Ultramafic Rocks](http://www.whitman.edu/geology/winter/Petrology/Ch%2029%20Calc%20and%20UM.ppt#t273,18,Metamorphism%20of%20Ultramafic%20Rocks)

102