

Equilíbrio de Fases

Ana M. Segadães, DECV—UA

UFRN, 2011

*A excelência não é um ato, é um hábito
(somos aquilo que fazemos consistentemente)*

Aristóteles

A. M. Segadães, "Diagramas de Fases—Teoria e Aplicação em Cerâmica", Edgard Blücher, São Paulo, 1987

Conteúdo geral

- ➔ Parte 1: Revisão de definições e conceitos
 - A Regra das fases
 - O equilíbrio de fases das substâncias puras
 - Sistemas de dois componentes
 - ◆ A Regra da alavanca
 - O equilíbrio de fases dos sistemas binários
 - ◆ Eutéticos, peritéticos e monotéticos
 - Sistemas binários complexos
- ➔ Parte 2: Sistemas de três componentes
- ➔ Parte 3: Estudo de casos

Conteúdo: parte 2

- Sistemas de três componentes
 - O triângulo de Gibbs
 - A Regra da alavanca planar
- Sistemas ternários isomórficos
- Sistemas ternários com duas fases sólidas
- O equilíbrio invariante em sistemas ternários
- Sistemas de tipo eutético
- Formação de compostos
 - Sistemas de tipo peritético
- Sistemas ternários complexos

3

Terceiro componente

- Com a introdução do terceiro componente, todos os equilíbrios ganham **mais um grau de liberdade**:
- as áreas de cristalização primária de cada componente são substituídas por **volumes de cristalização primária**;
- nas curvas univariantes binárias (nas faces do prisma), começam (ou terminam) **superfícies divariantes** ternárias:
 - duas fases em equilíbrio, uma infinidade de linhas conjugadas
- nos pontos invariantes binários (três fases) nascem **linhas univariantes** (intersecção de duas superfícies divariantes):
 - três fases em equilíbrio, um único triângulo conjugado
- a intersecção de três linhas define um **ponto invariante**:
 - quatro fases em equilíbrio

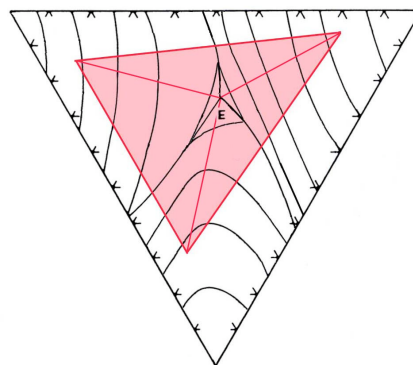
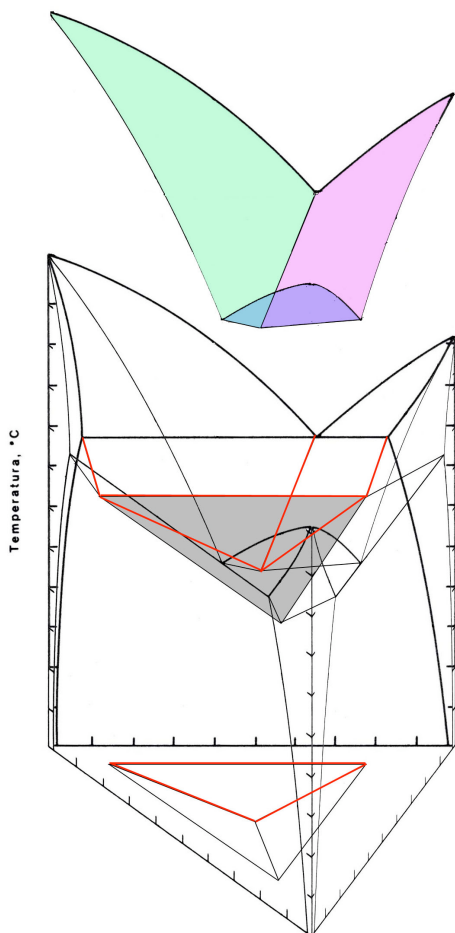
4

Sistemas com três fases sólidas

- O equilíbrio de três sólidos e um líquido resulta da confluência de três equilíbrios de três fases (univariantes);
- por imposição da Regra das Fases para sistemas condensados, o equilíbrio de quatro fases é um **equilíbrio invariante** ($C = 3, F=4 \rightarrow V= C+1-F = 0$);
- o equilíbrio de quatro fases é isotérmico (i.e. plano horizontal na representação gráfica temperatura vs. composição): **plano invariante ternário**;
- a intersecção de três linhas fronteiras (vales univariantes) é um **ponto** que representa a composição da fase líquida que pode coexistir em equilíbrio com essas três fases sólidas.

5

Plano invariante ternário

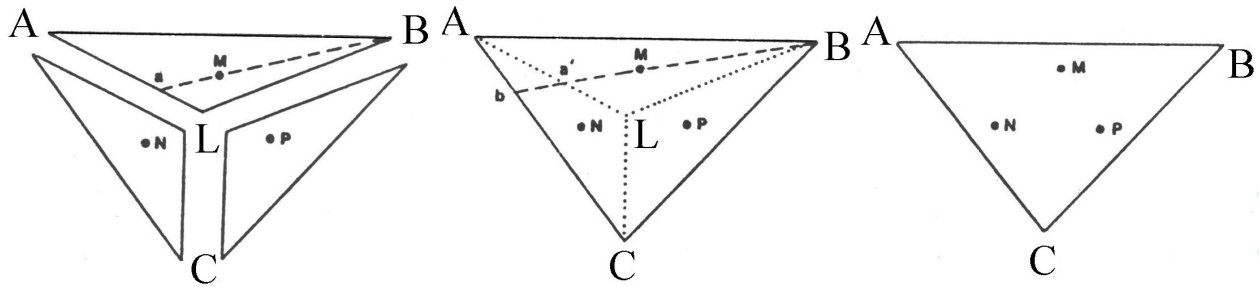


6

Equilíbrio invariante ternário

→ três sistemas binários de tipo eutético: **equilíbrio eutético**

- três triângulos conjugados acima do plano invariante convergem e formam um só triângulo conjugado abaixo do plano invariante

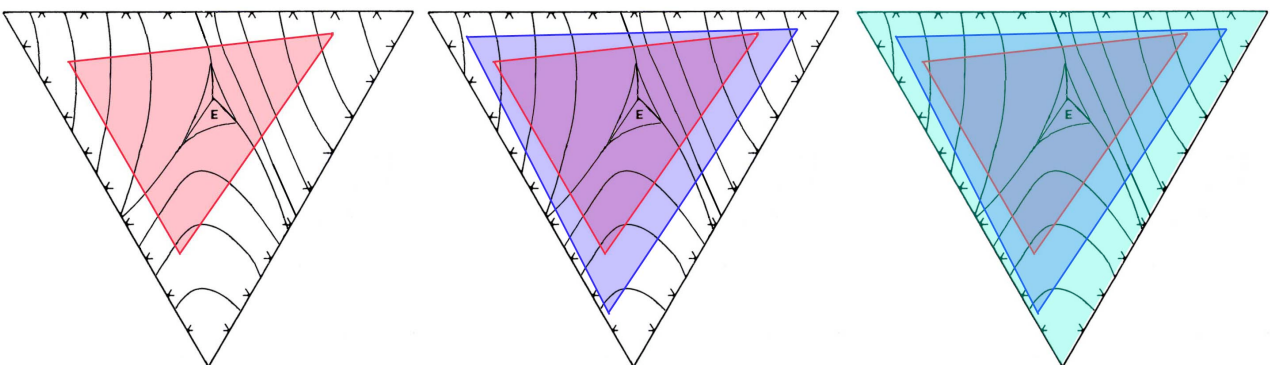


- os três sólidos formam-se simultaneamente a partir do líquido original (no interior do triângulo) e as suas quantidades aumentam.

7

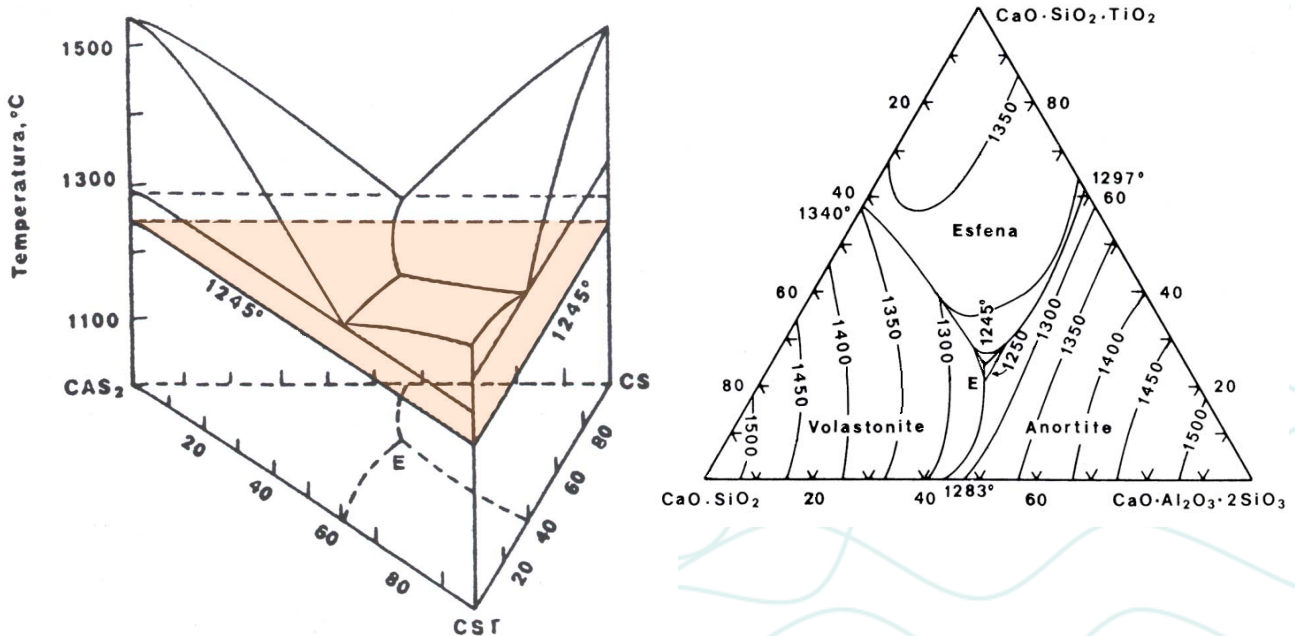
Sistemas com três sólidos imiscíveis

→ À medida que a extensão das soluções sólidas diminui, o triângulo das fases sólidas aproxima-se dos vértices da base do prisma:



8

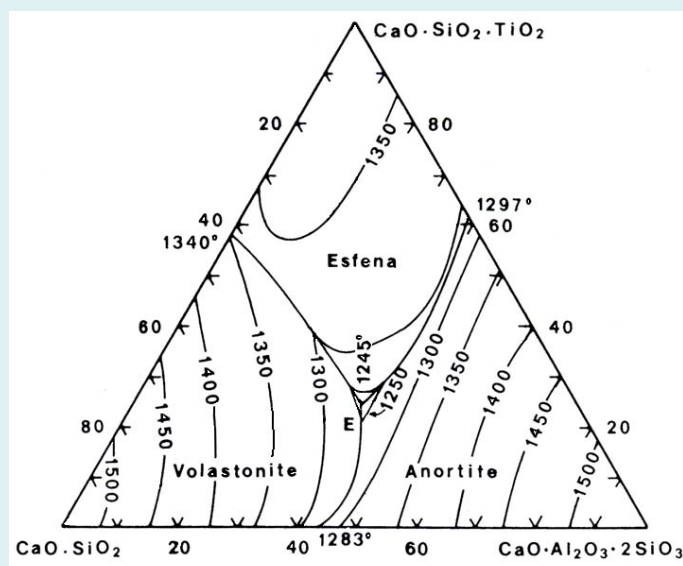
Equilíbrio invariante e projecção do *Liquidus*



9

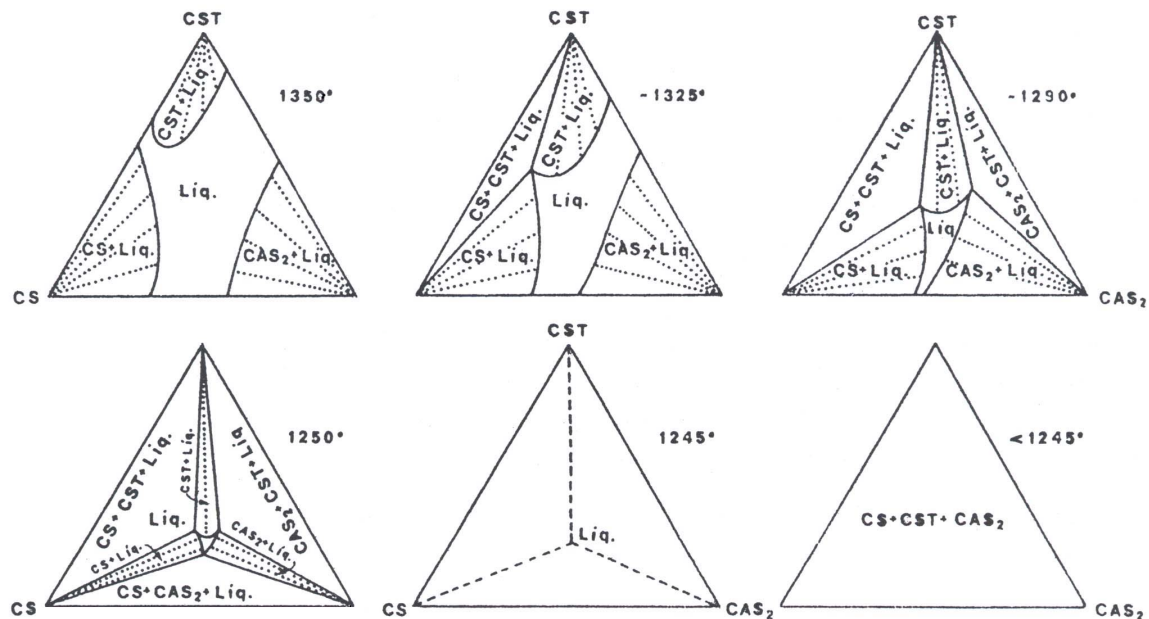
Exercício

Considere o sistema ternário
Volastonite (CS) – Anortite(CAS₂) – Esfena (CST):



Construa as secções isotérmicas (horizontais) a 1350, 1325, 1290, 1250, 1245 e 1200°C.

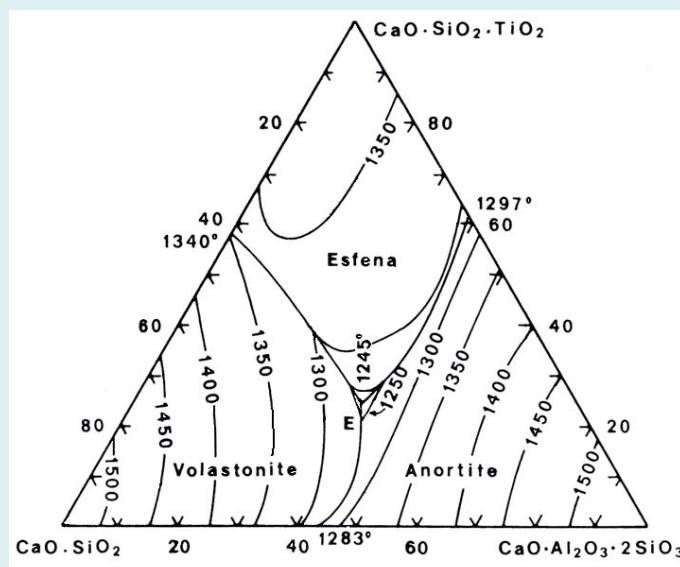
Secções isotérmicas



11

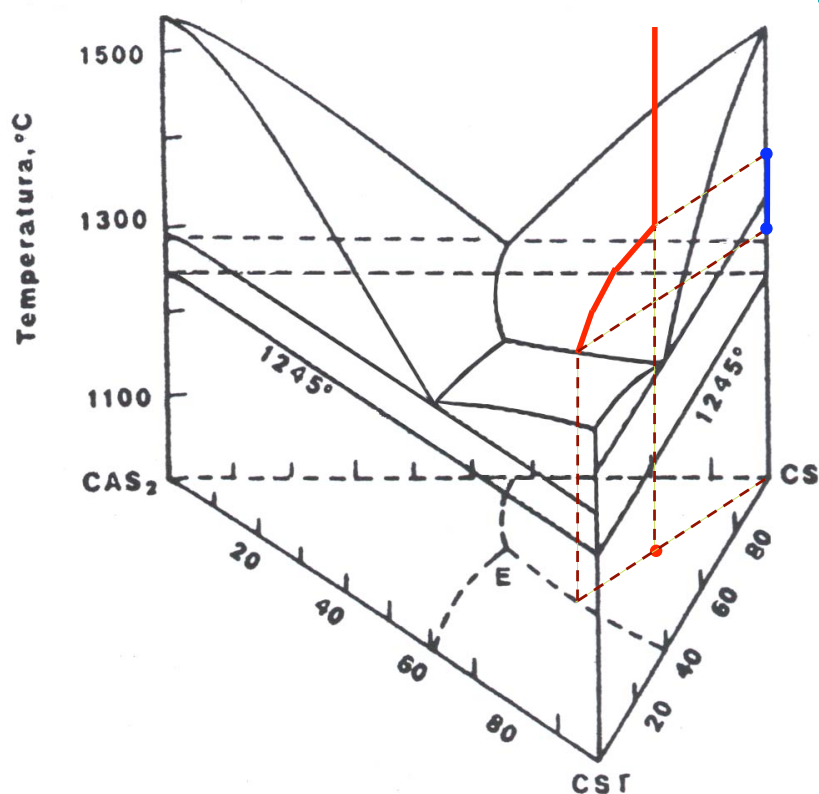
Exercício

Considere o sistema ternário
Volastonite (CS) – Anortite (CAS₂) – Esfena (CST):



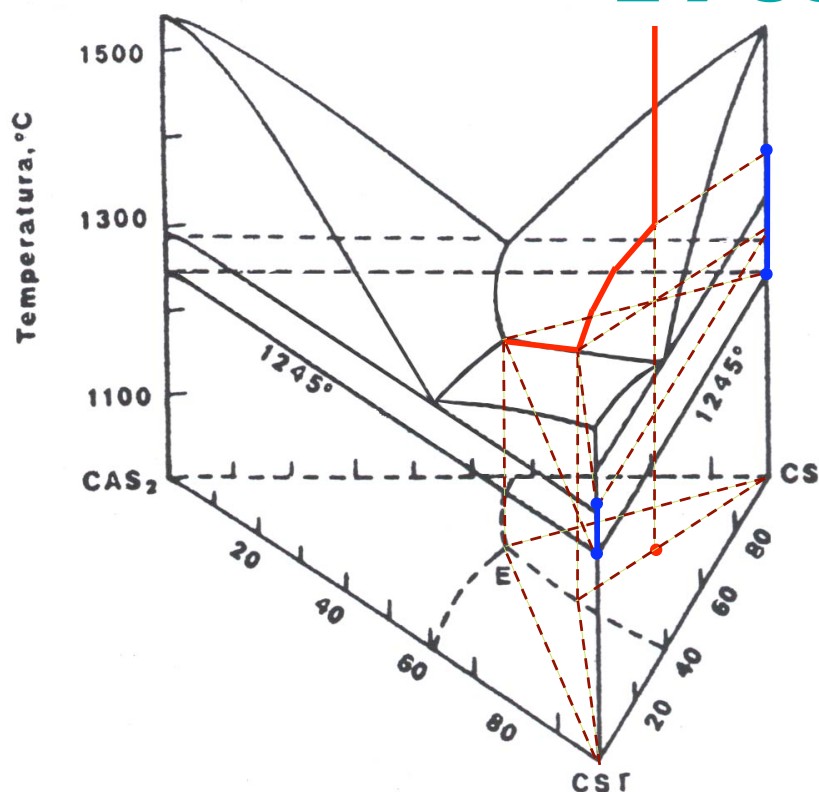
Descreva a cristalização de um líquido M com
23% CST + 62% CS + 15% CAS₂.

Cristalização primária: $L \rightarrow CS$



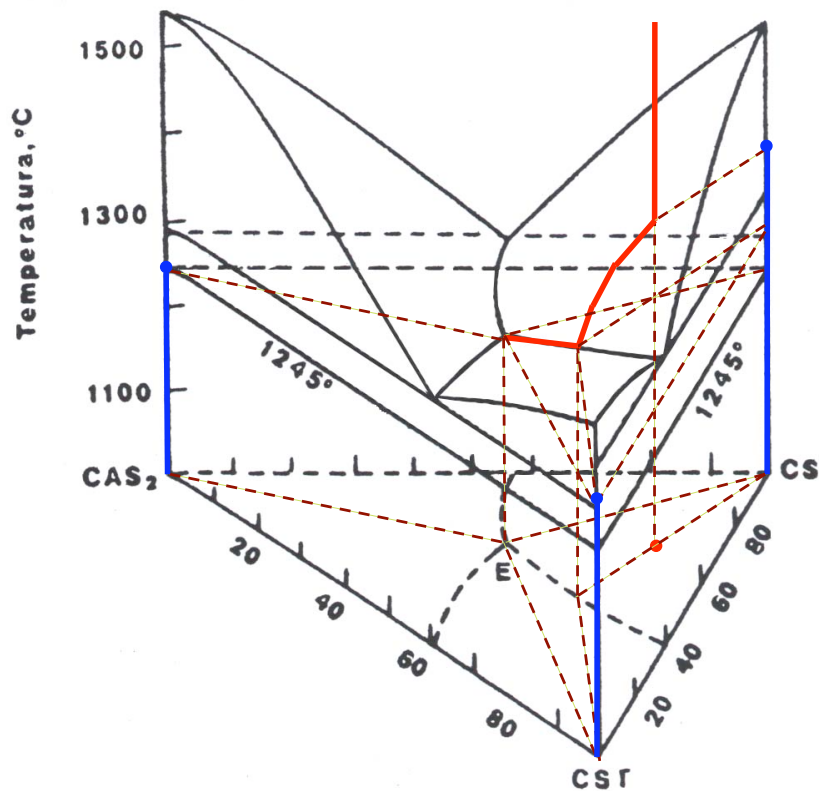
13

Cristalização secundária: $L \rightarrow CS + CST$



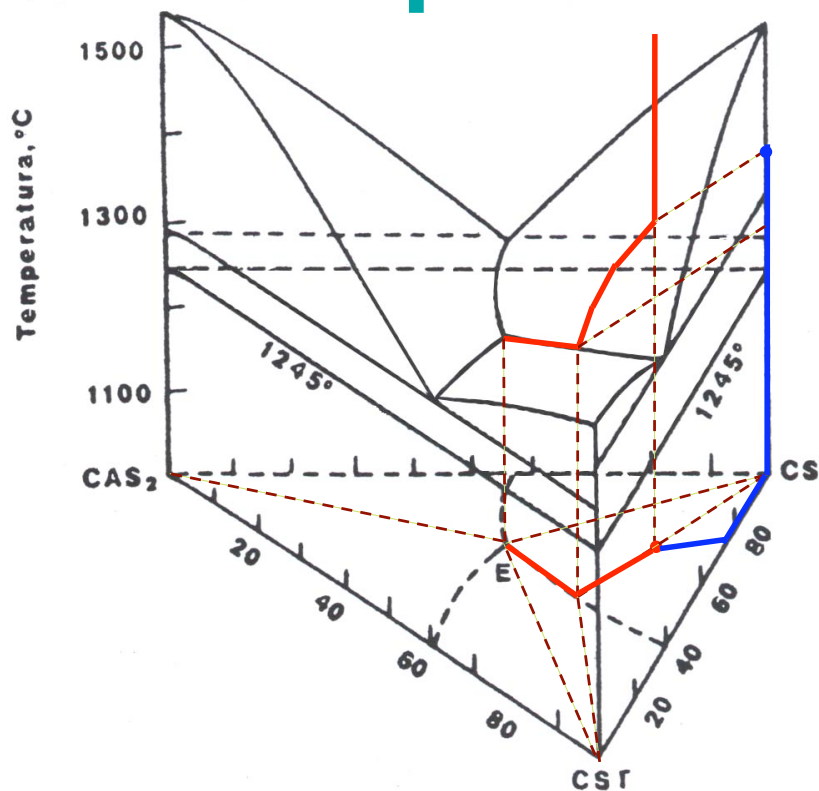
14

Cristalização terciária: $L \rightarrow CS + CST + CAS_2$



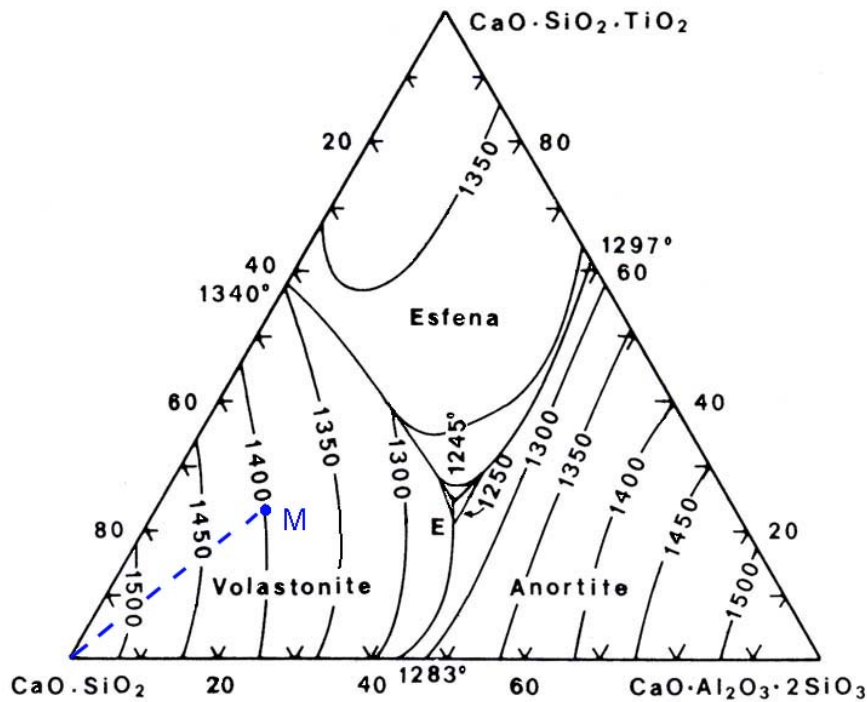
15

Projecção dos caminhos do líquido e do sólido



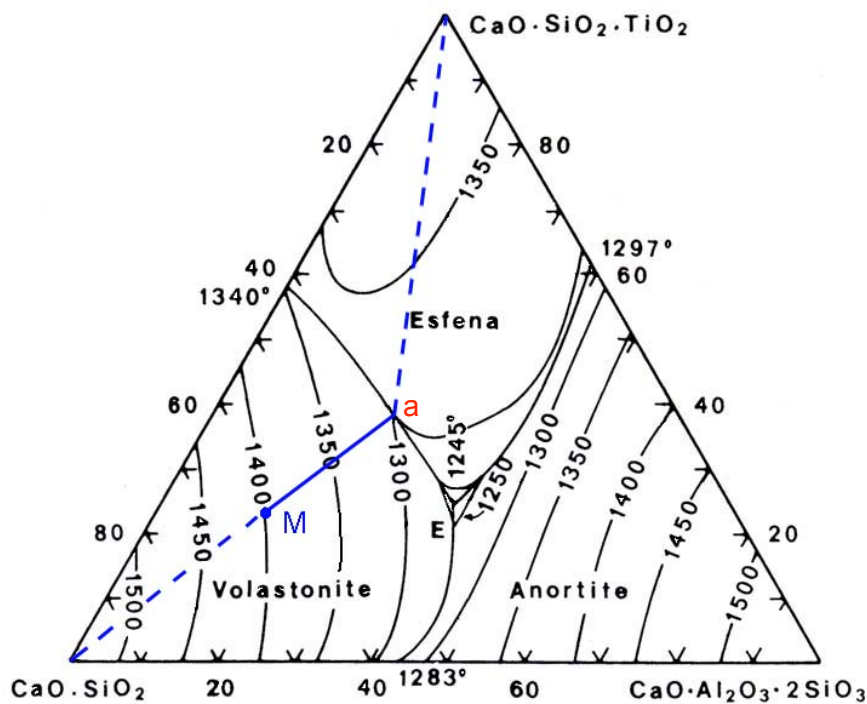
16

Cristalização de M:



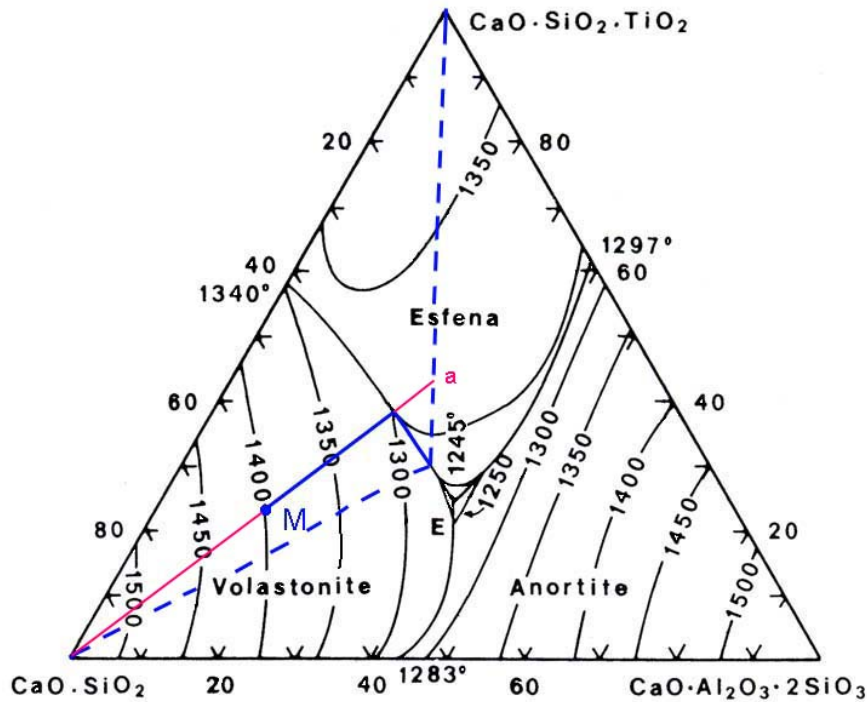
18

Cristalização de M:



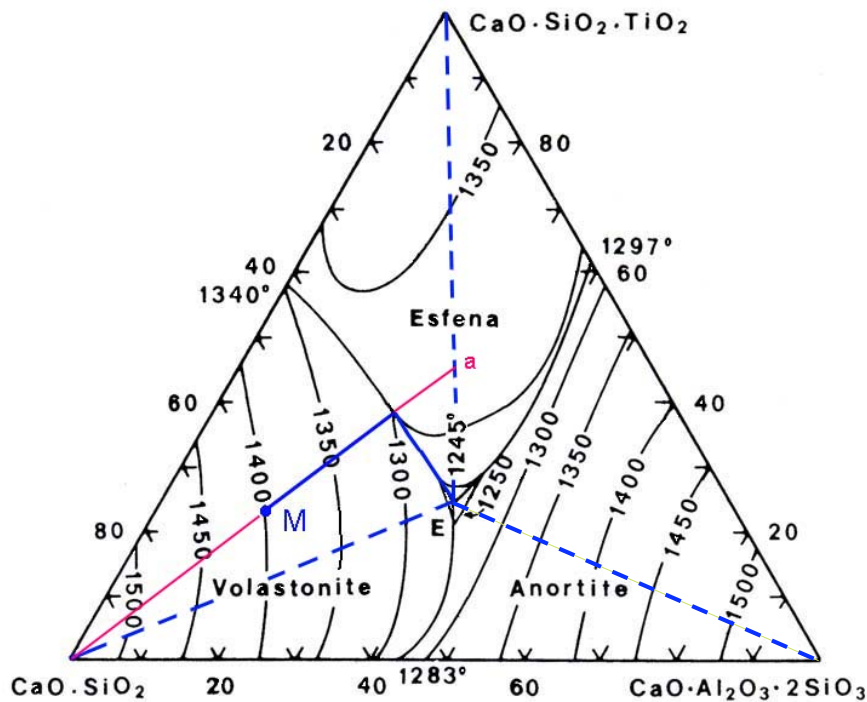
19

Cristalização de M:



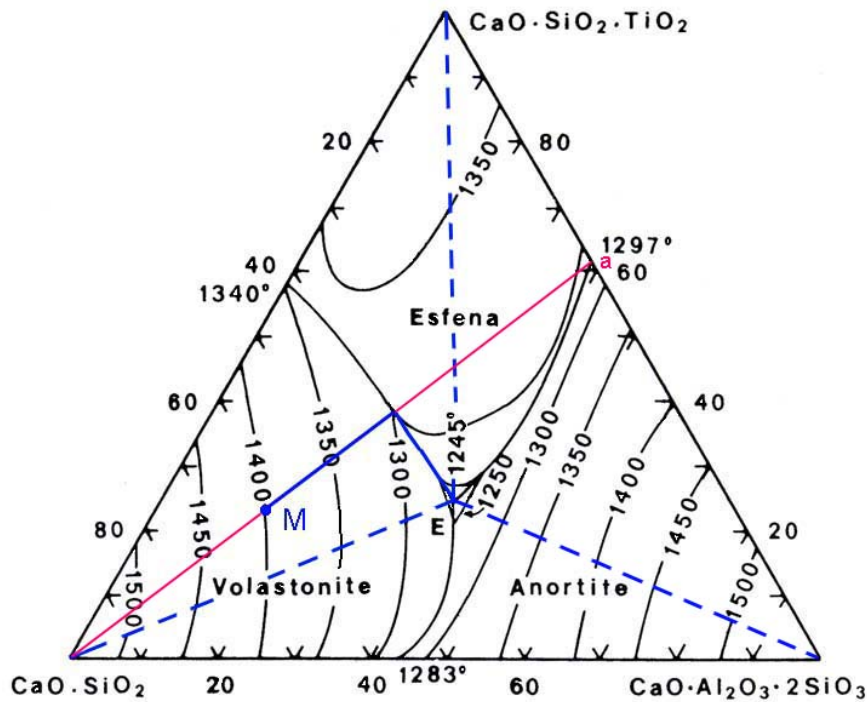
20

Cristalização de M:



21

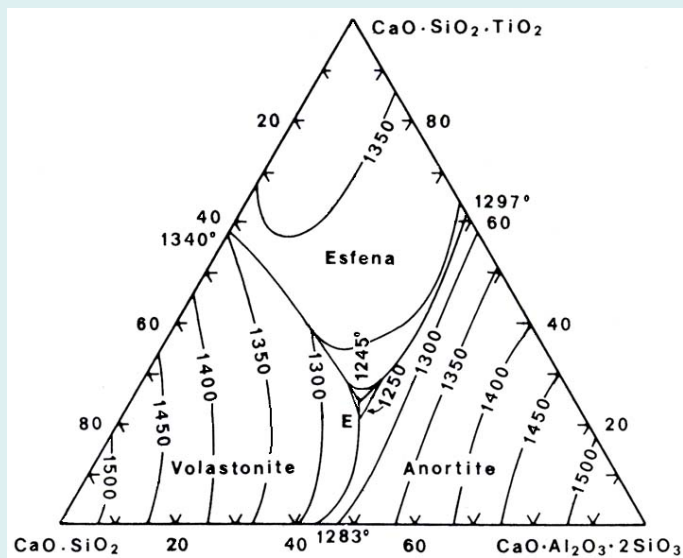
Cristalização de M:



22

Exercício

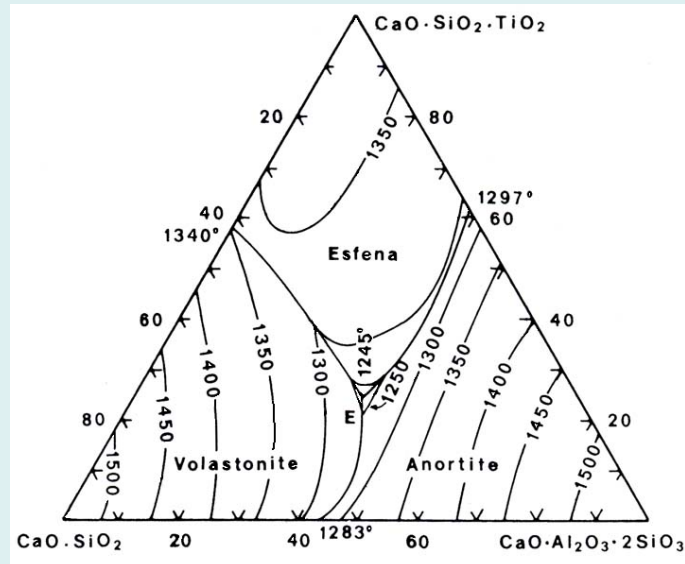
Considere o sistema ternário
Volastonite (CS) – Anortite (CAS₂) – Esfena (CST):



Descreva a cristalização de um líquido N com
39% CST + 39% CS + 22% CAS₂.

Exercício

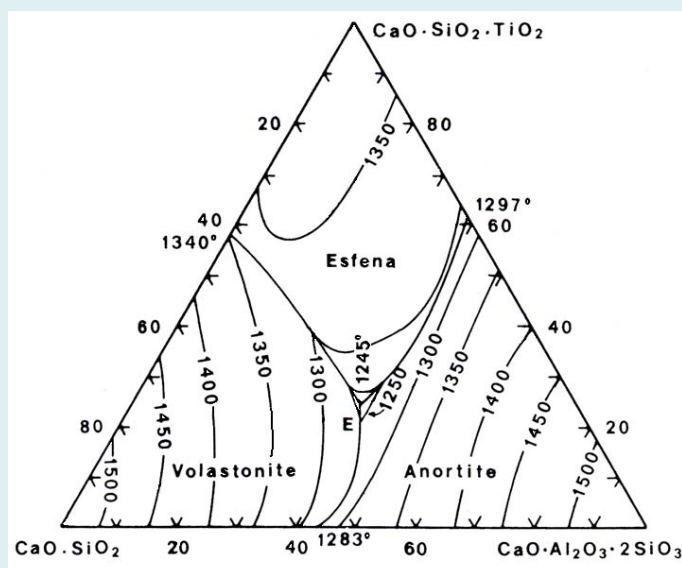
Considere o sistema ternário
Volastonite (CS) – Anortite (CaSi_2O_6) – Esfena (CST):



Descreva a cristalização de um líquido P com
17% CST + 56% CS + 27% CaSi_2O_6 .

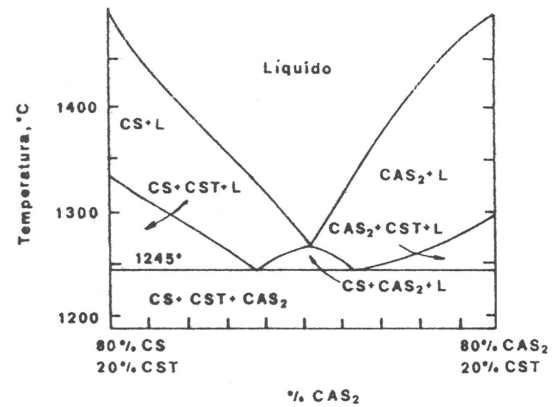
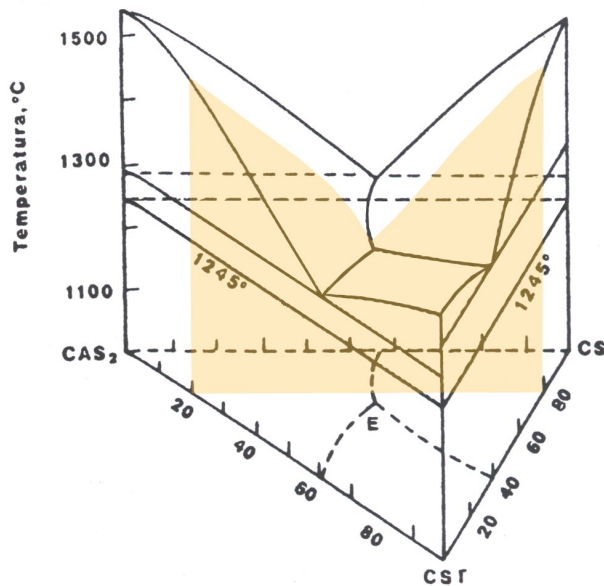
Exercício

Considere o sistema ternário
Volastonite (CS) – Anortite (CaSi_2O_6) – Esfena (CST):



Esquematize a secção isoplética com 20% CST constante.

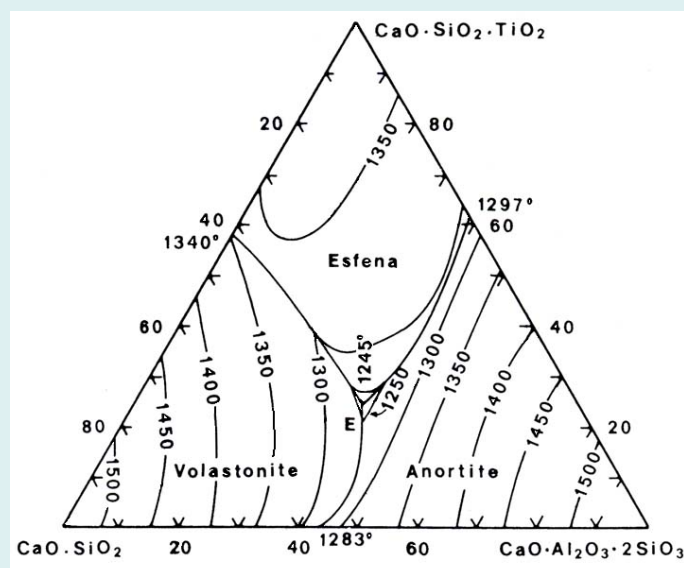
Secções verticais



26

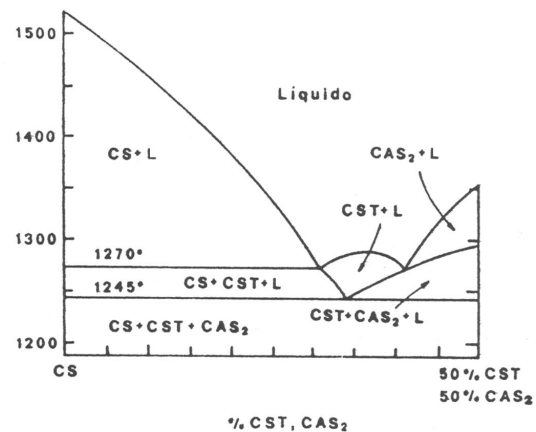
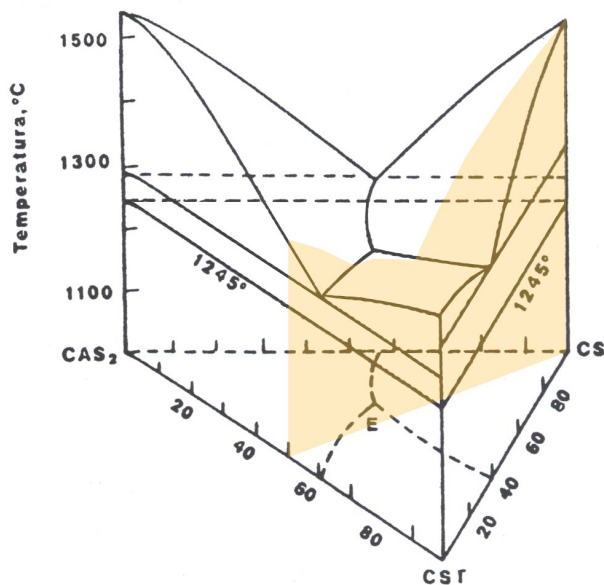
Exercício

Considere o sistema ternário
Volastonite (CS) – Anortite (CAS₂) – Esfena (CST):



Esquematize a secção isoplética com a proporção
50% CST / 50% CAS₂ constante.

Secções verticais



28

Conteúdo: parte 2

- ➔ Sistemas de três componentes
 - O triângulo de Gibbs
 - A Regra da alavanca planar
- ➔ Sistemas ternários isomórficos
- ➔ Sistemas ternários com duas fases sólidas
- ➔ O equilíbrio invariante em sistemas ternários
- ➔ Sistemas de tipo eutético
- ➔ Formação de compostos
 - Sistemas de tipo peritético
- ➔ Sistemas ternários complexos

29