

# Diagramas de Fases

## Augusto Camara Neiva

Ternários: exemplo 1

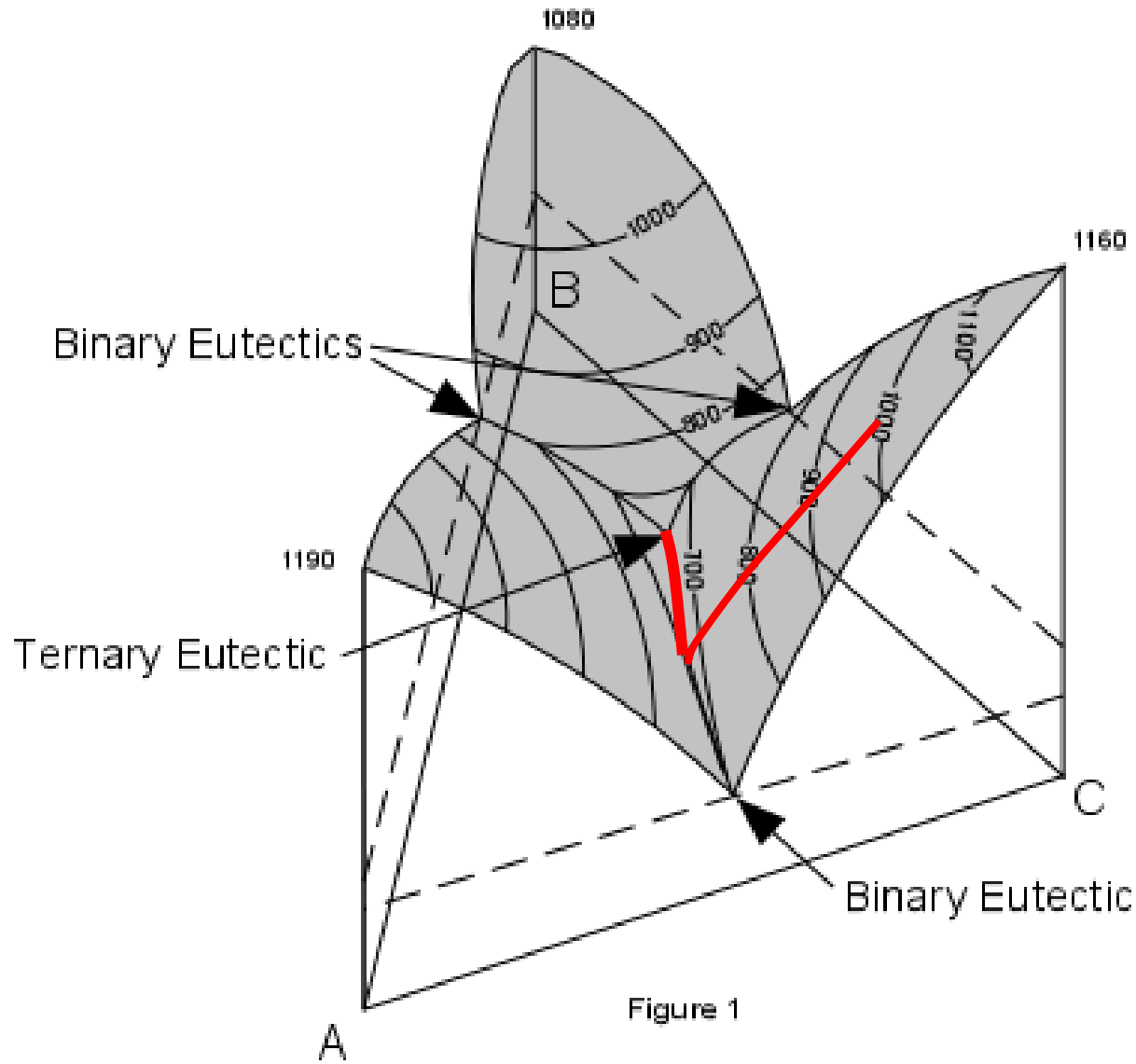
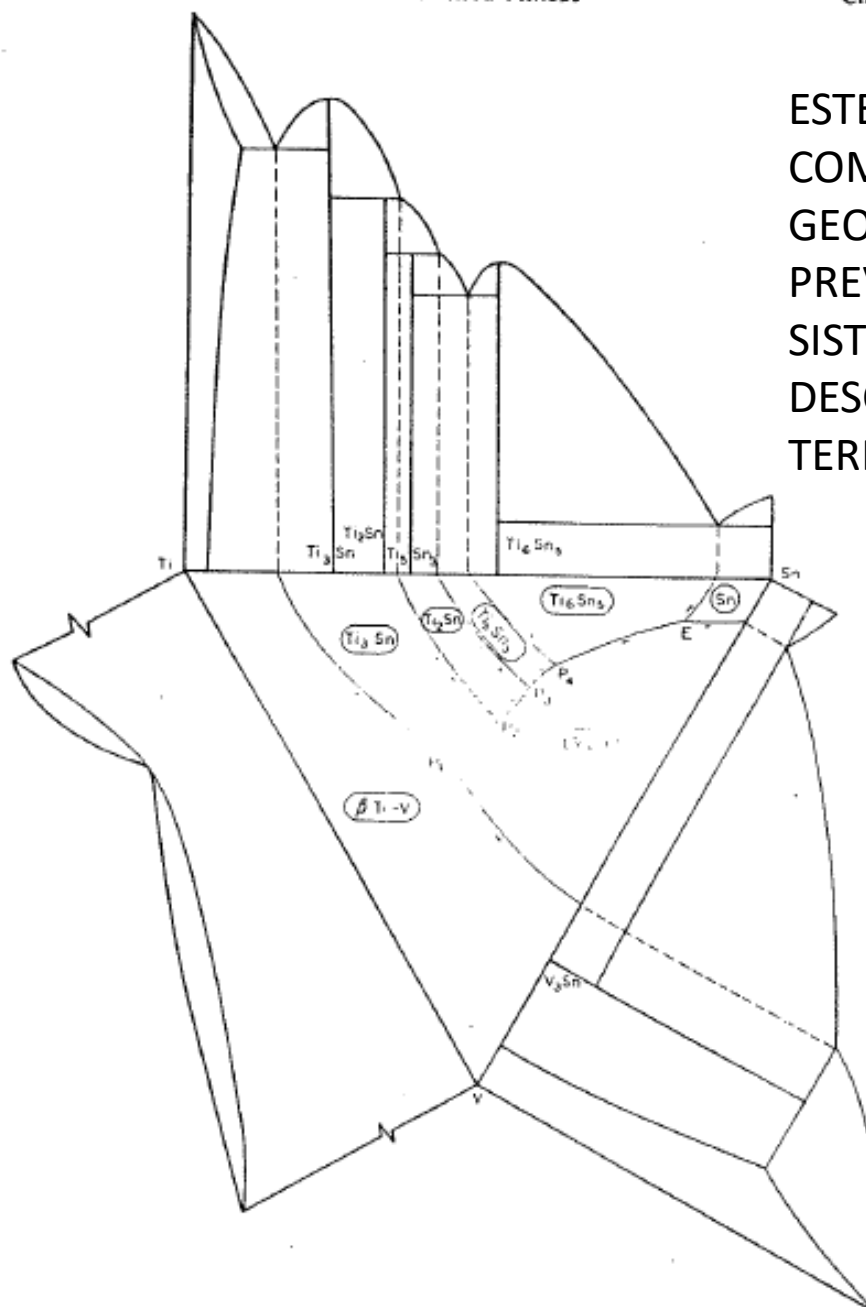


Figure 1

DOIS COMENTÁRIOS:

A – PODE SER BEM MAIS COMPLICADO

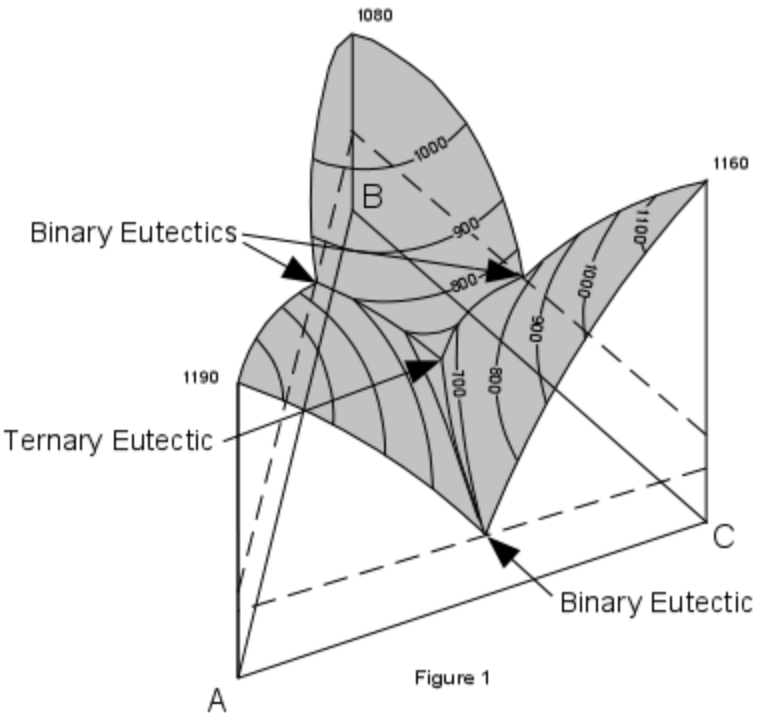
B – CONHECER OS TRÊS BINÁRIOS NÃO TRAZ  
QUALQUER INFORMAÇÃO SOBRE O QUE ACONTECE  
DENTRO DO TERNÁRIO (podem surgir novas fases, por  
exemplo)



ESTE EXEMPLO (Sm-Ti-V) É COMPLICADO, MAS SUA GEOMETRIA É RAZOAVELMENTE PREVISÍVEL, UMA VEZ QUE NESTE SISTEMA NÃO HÁ (OU NÃO SE DESCOBRIRAM) FASES PURAMENTE TERNÁRIAS.

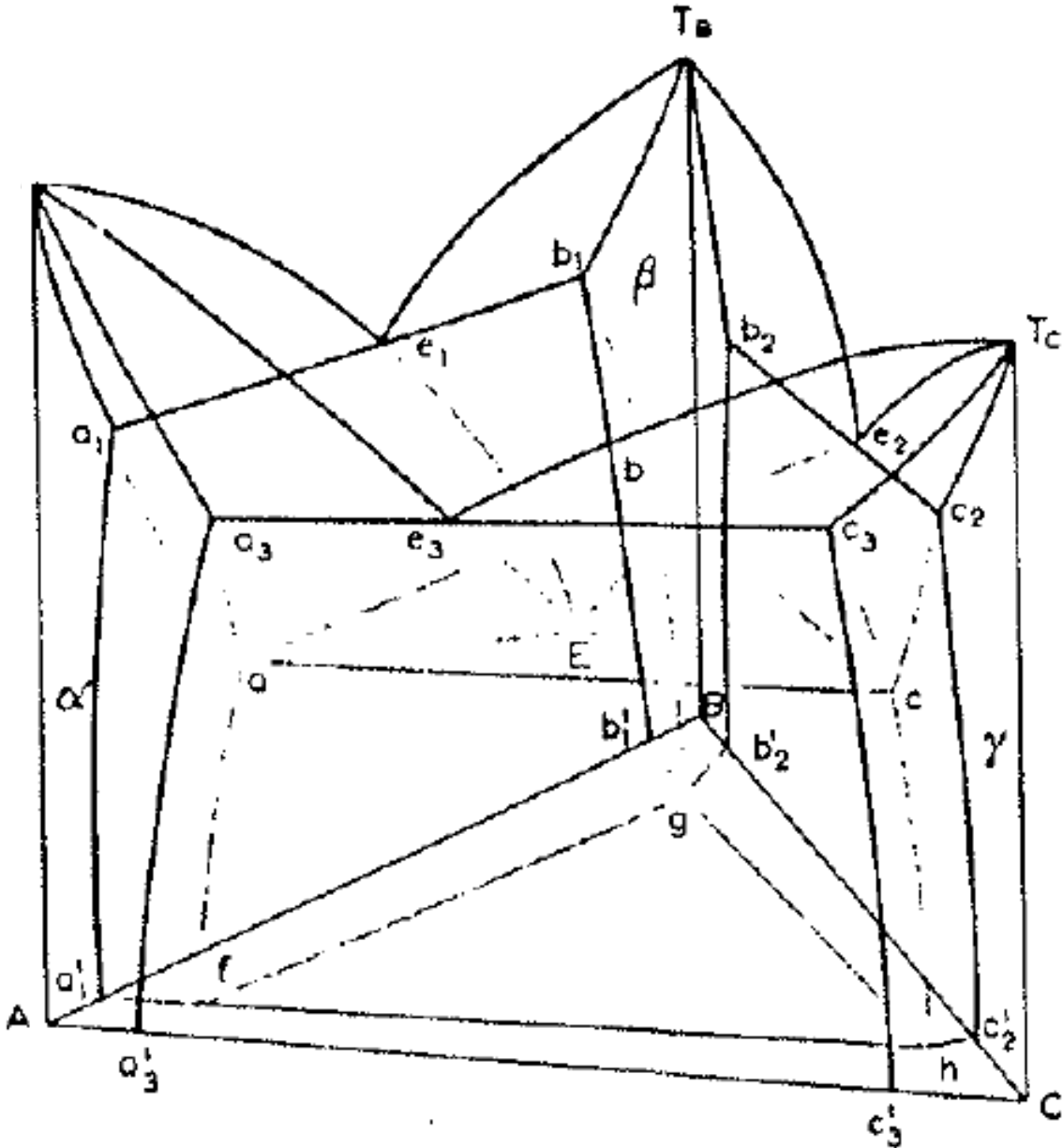
Fig. 202. The Sn-Ti-V system (schematic). (After W. KÜSTER AND K. HAUG, Z. Metallk., 48 (1957) 327 courtesy Dr. Riederer-Verlag GmbH.)

# SEJA UM SISTEMA COM TRÊS EUTÉTICOS BINÁRIOS E UM EUTÉTICO TERNÁRIO

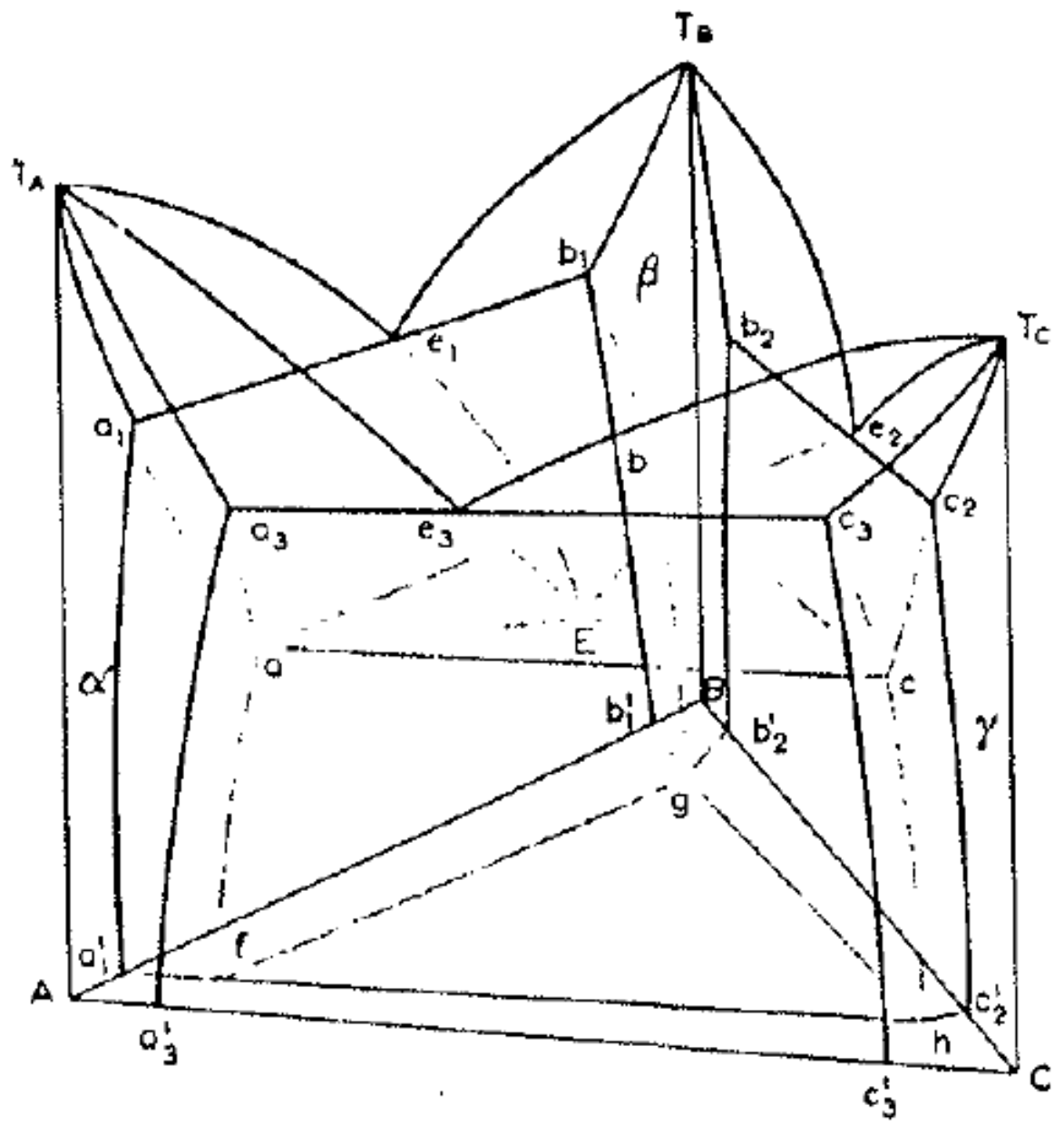


PERSPECTIVA DA  
SUPERFÍCIE LIQUIDUS

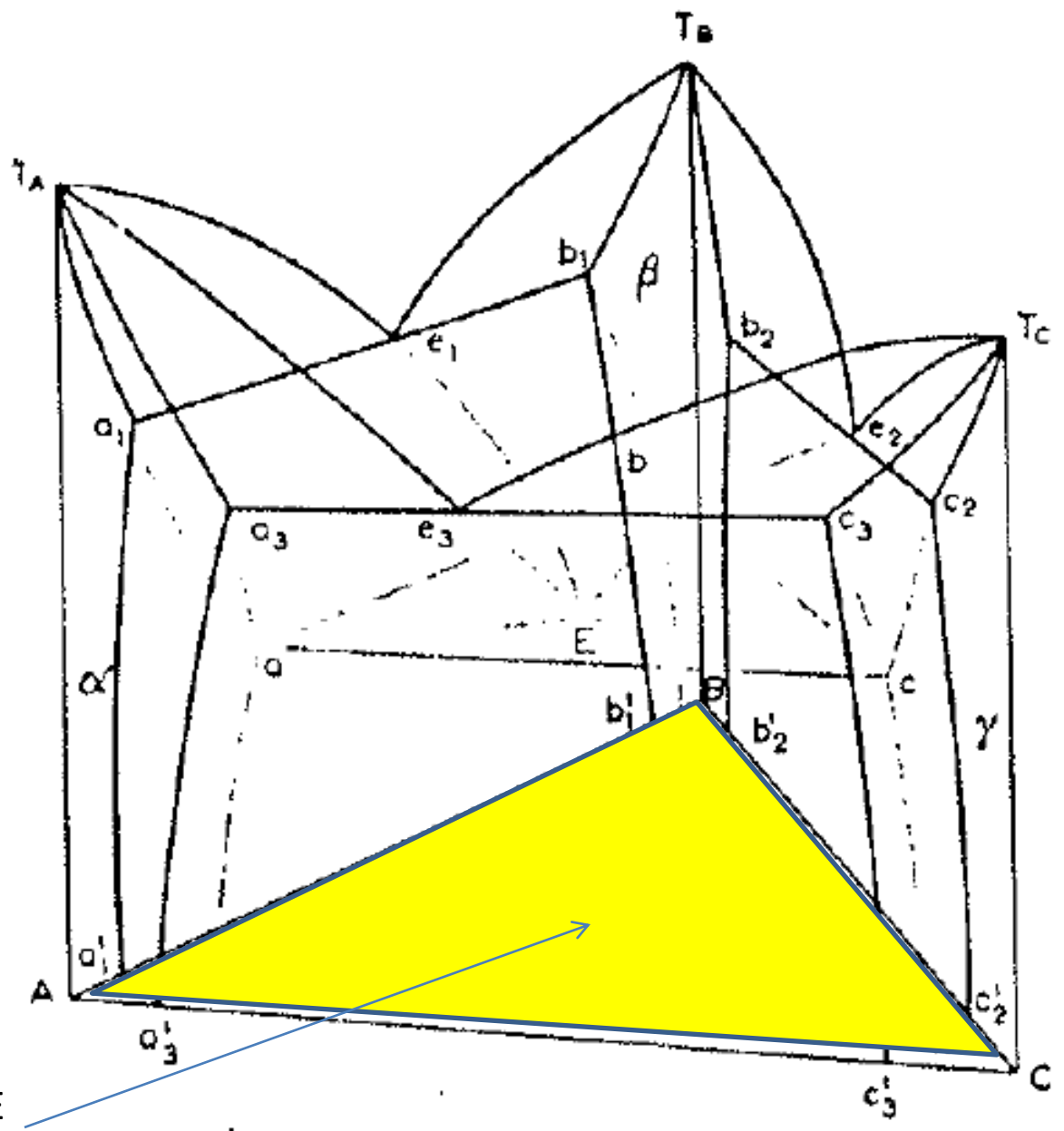
PERSPECTIVA DO  
SISTEMA COMPLETO,  
COM SOLUBILIDADES  
NÃO-NULAS NAS  
TRÊS FASES SÓLIDAS



PERSPECTIVA DO  
SISTEMA  
COMPLETO,  
COM  
SOLUBILIDADES  
NÃO-NULAS NAS  
TRÊS FASES  
SÓLIDAS

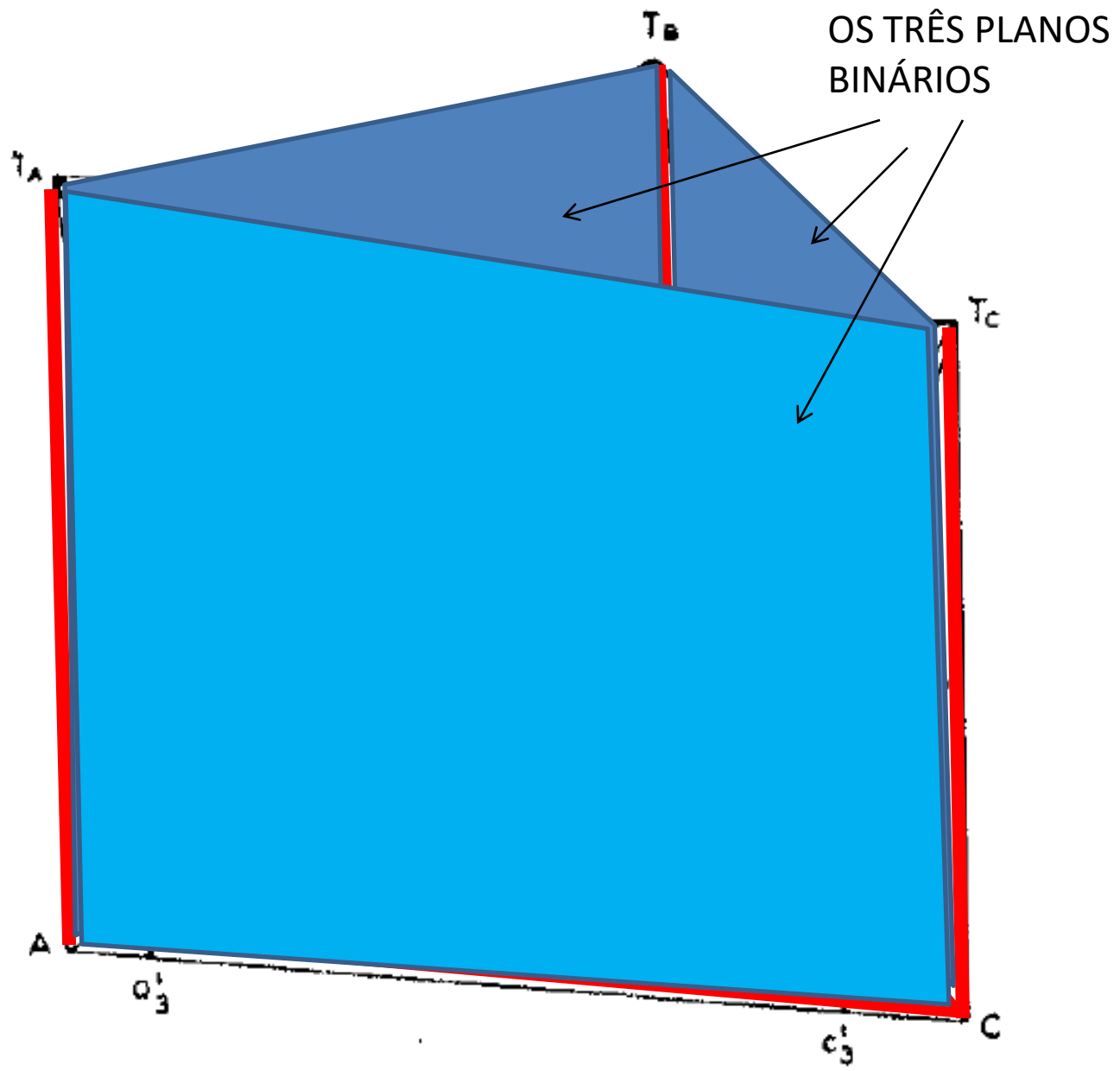


PERSPECTIVA DO SISTEMA COMPLETO, COM SOLUBILIDADES NÃO-NULAS NAS TRÊS FASES SÓLIDAS

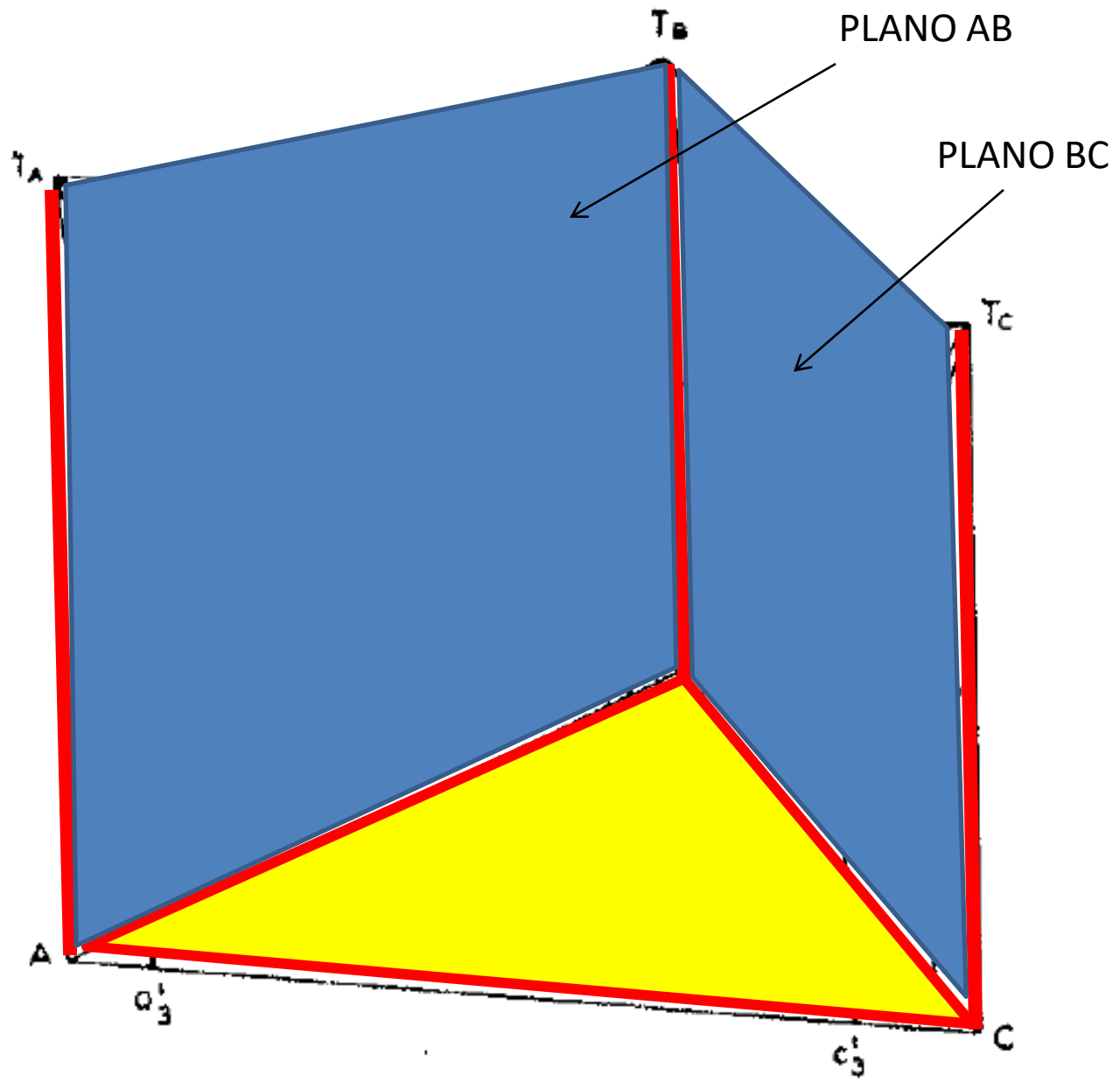


TRIÂNGULO DE COMPOSIÇÕES

PERSPECTIVA DO  
SISTEMA  
COMPLETO,  
COM  
SOLUBILIDADES  
NÃO-NULAS NAS  
TRÊS FASES  
SÓLIDAS







Ponto de fusão de A

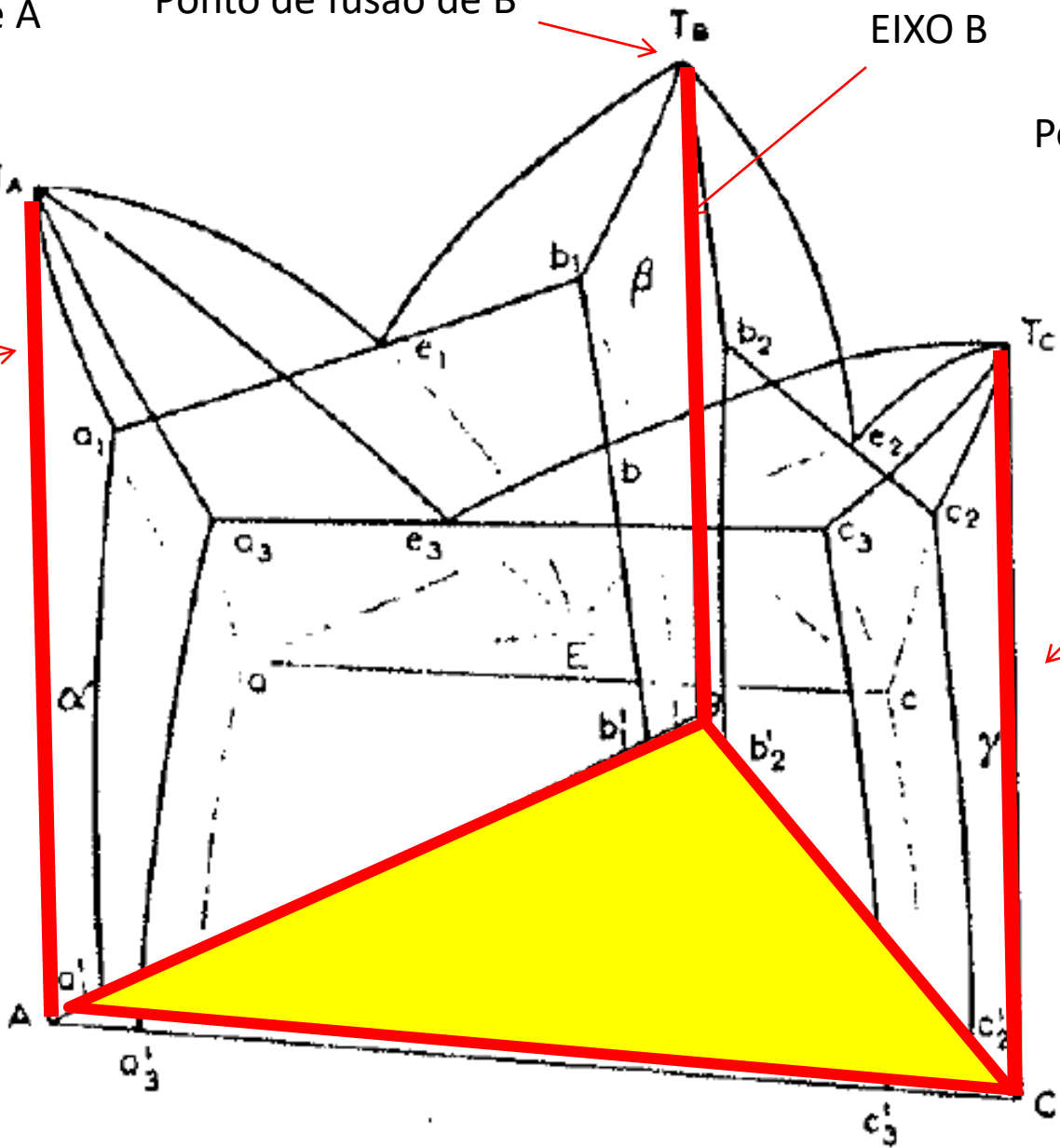
Ponto de fusão de B

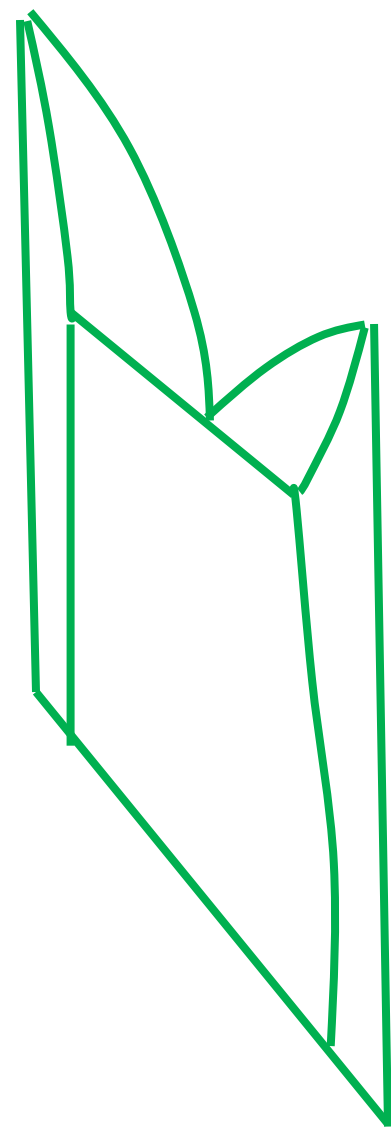
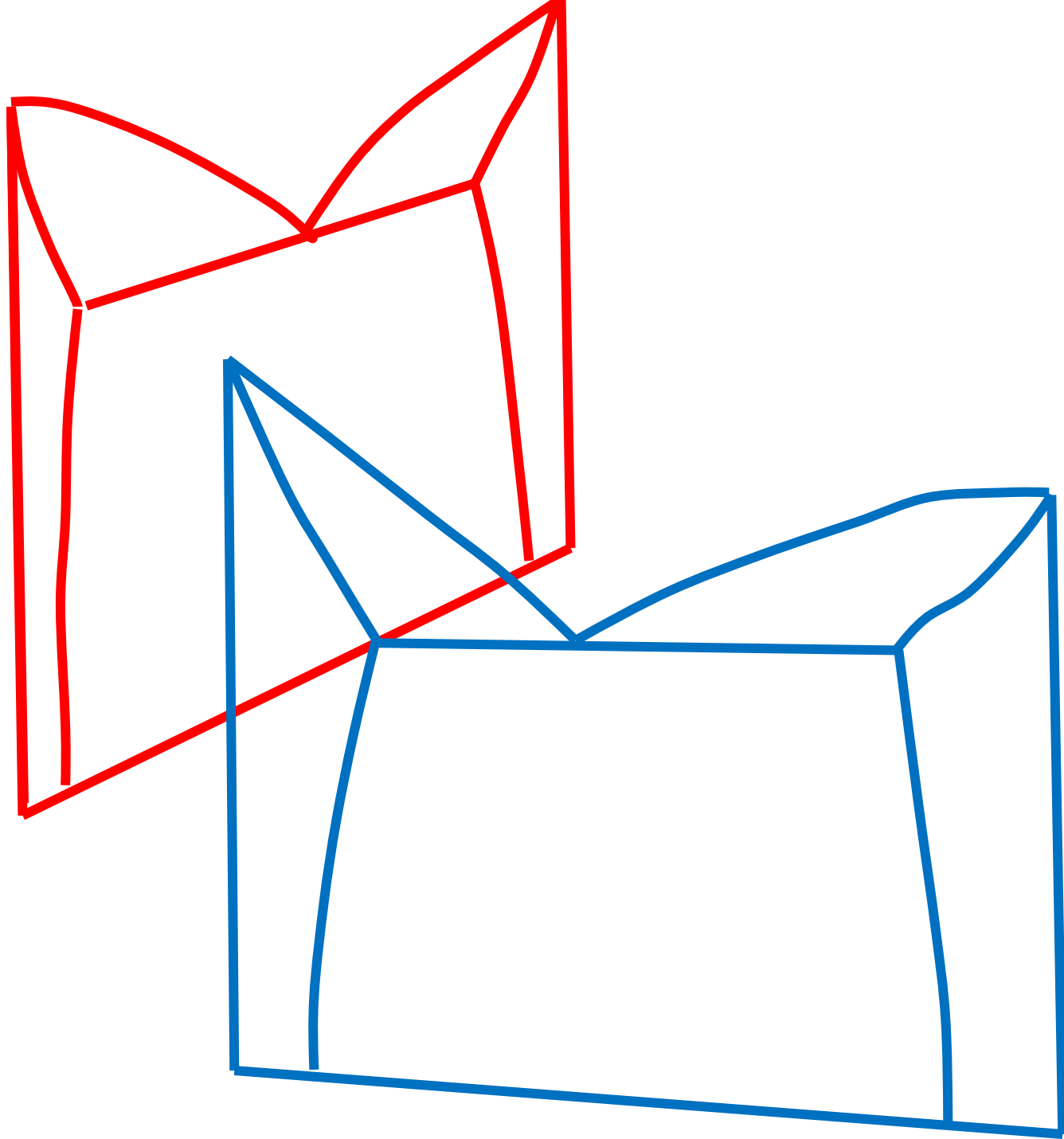
EIXO B

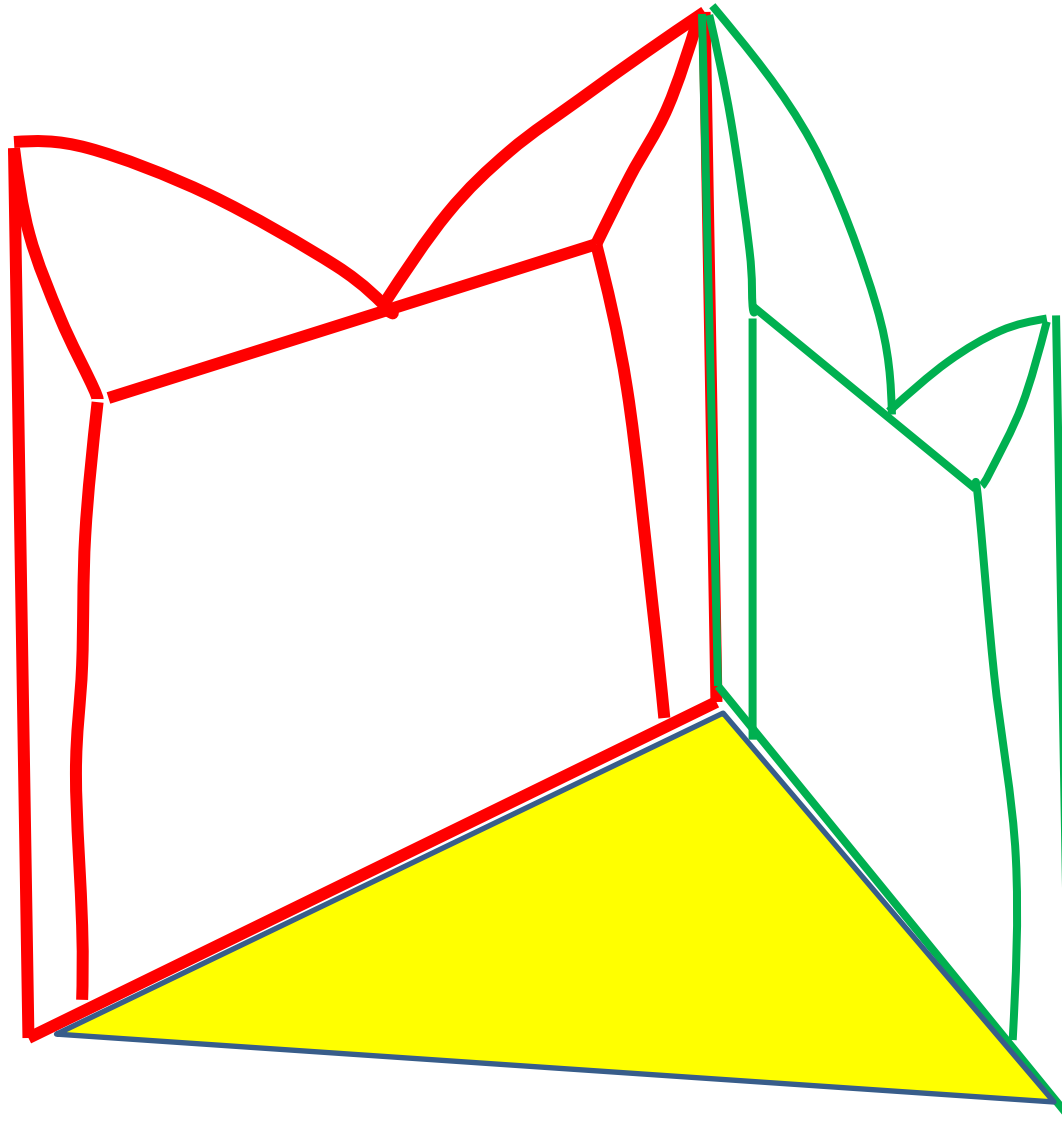
Ponto de fusão de C

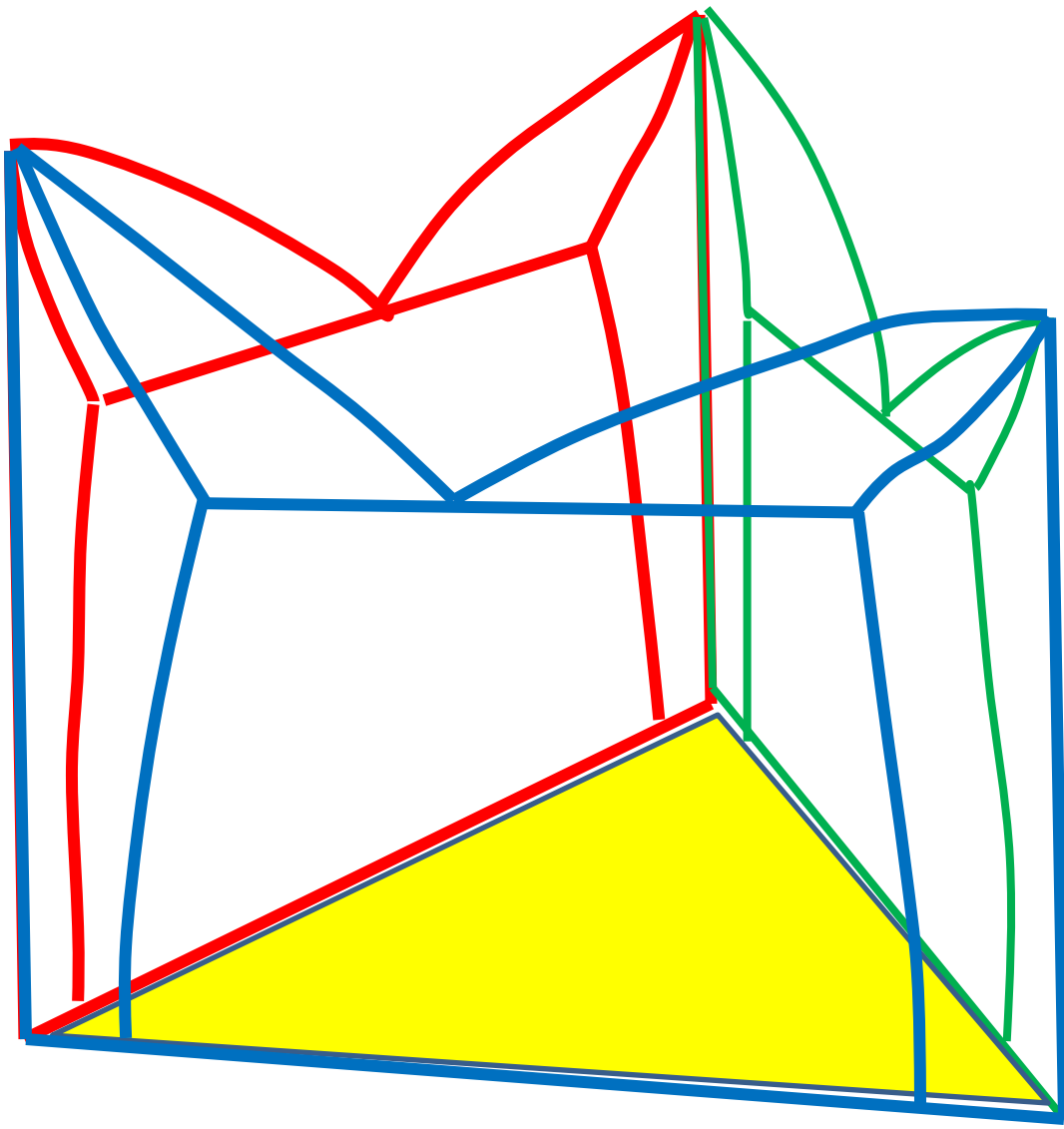
EIXO A

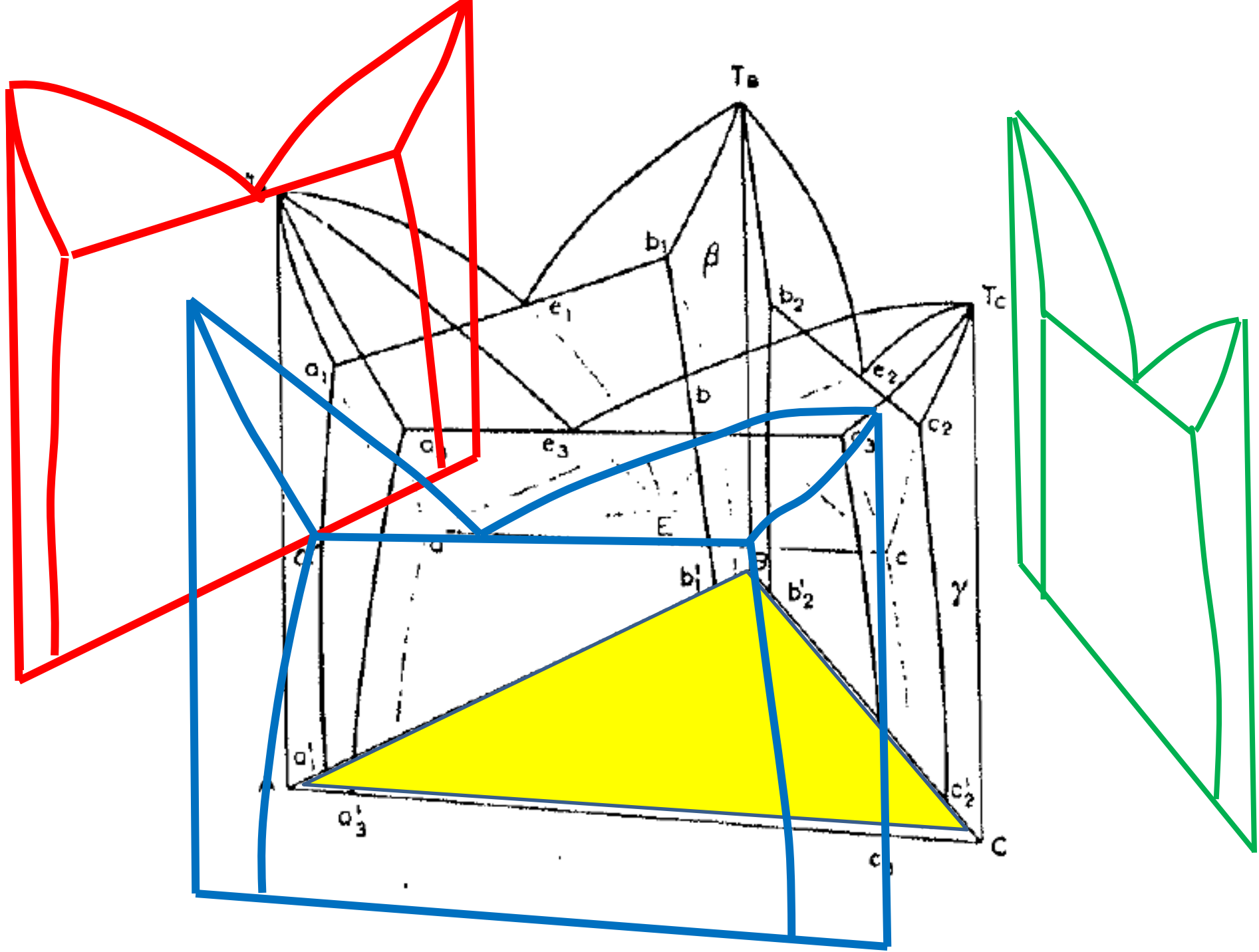
EIXO C



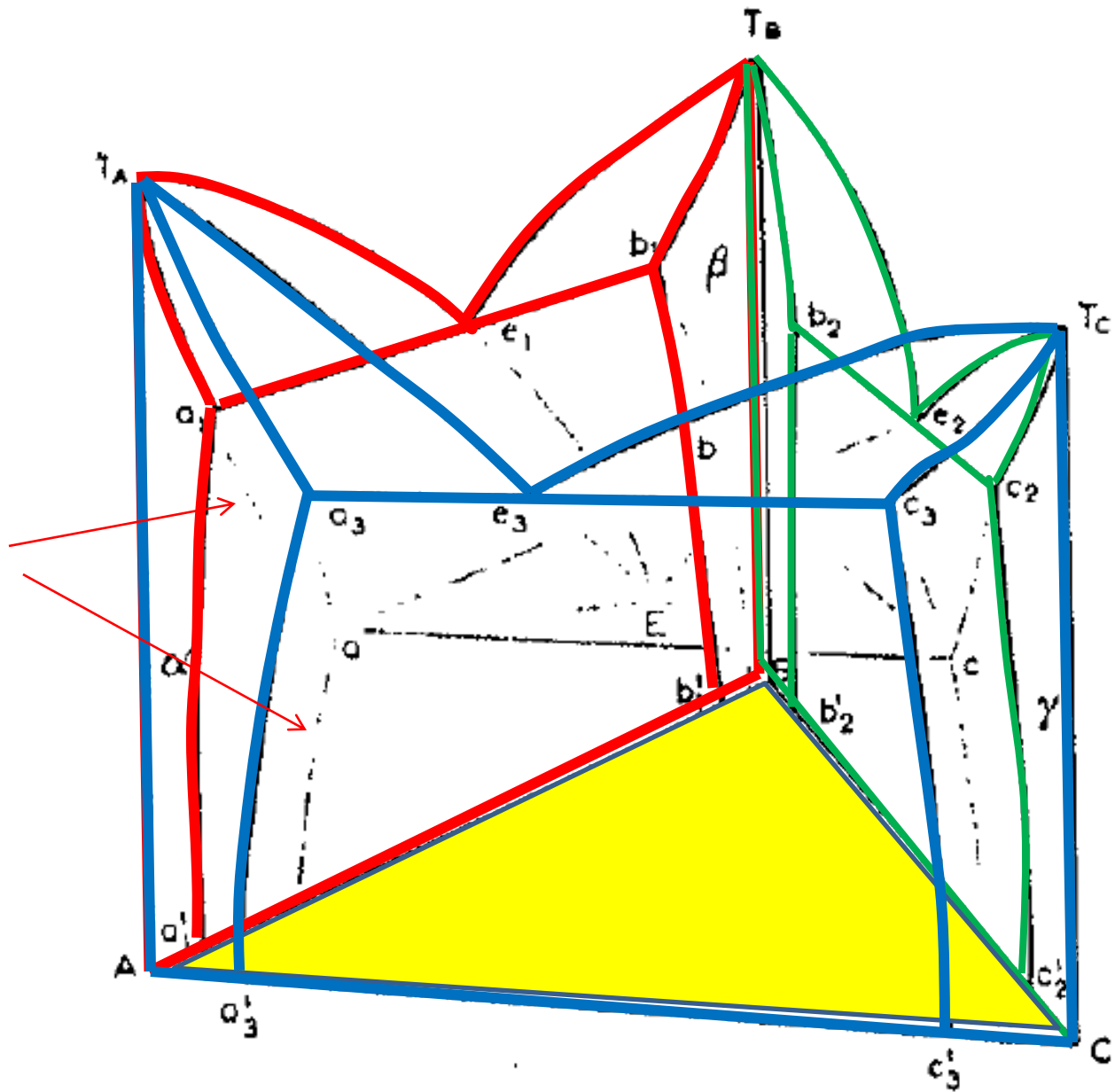


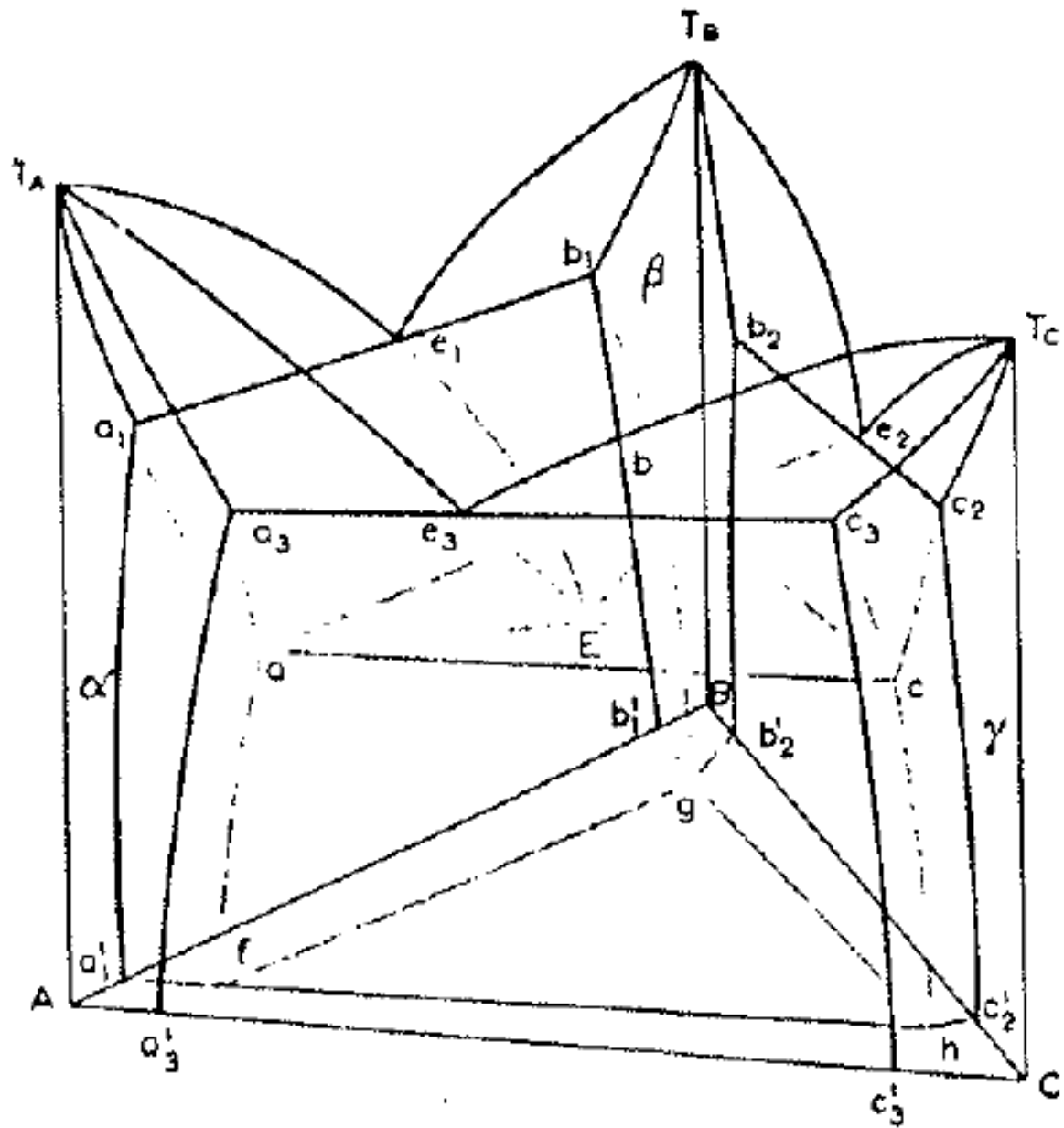






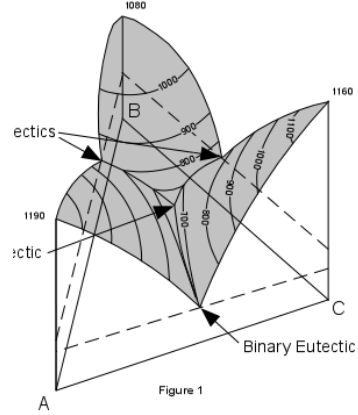
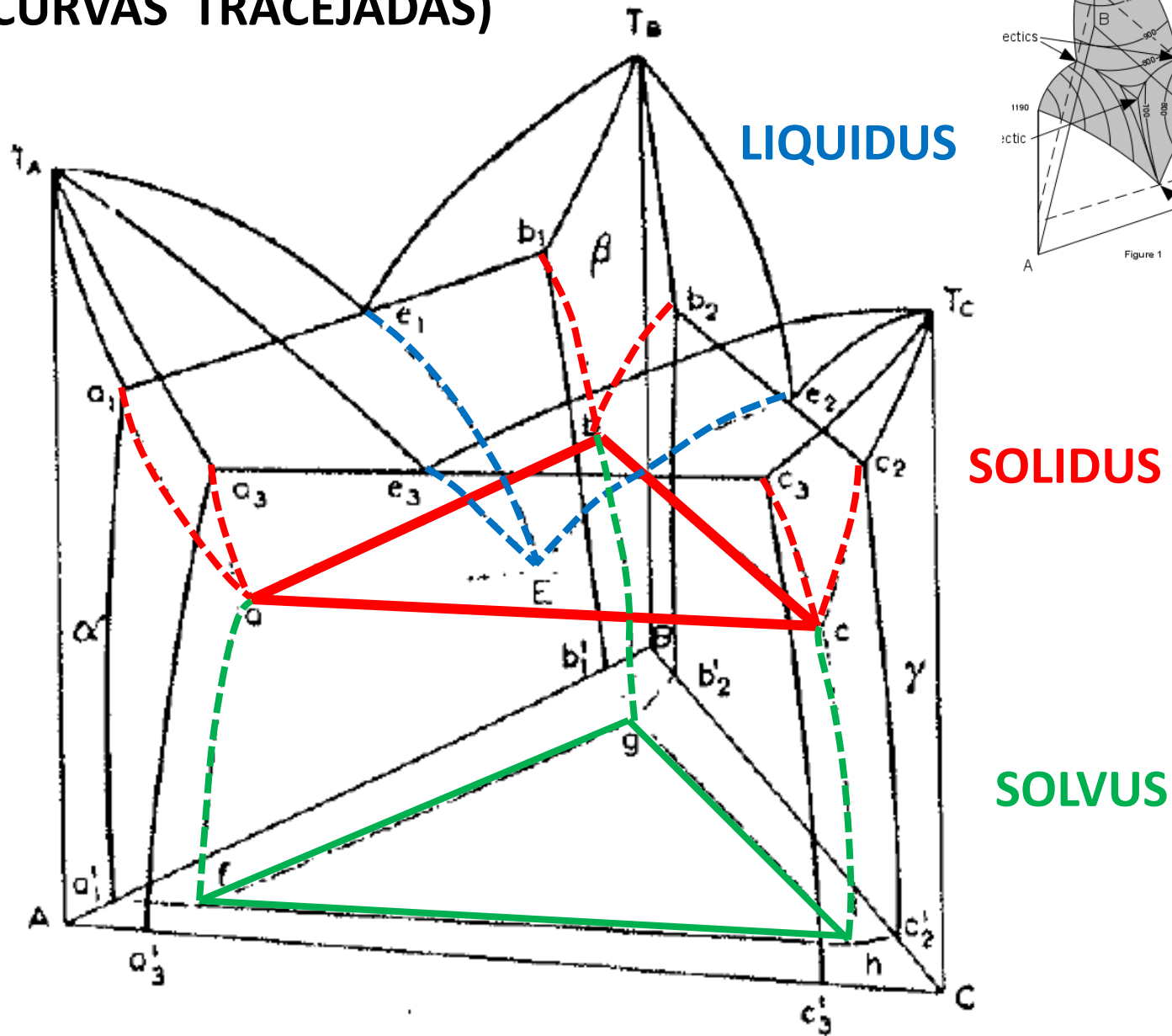
As 9  
curvas e 6  
retas que  
restaram  
sem cor  
são  
internas  
ao  
diagrama

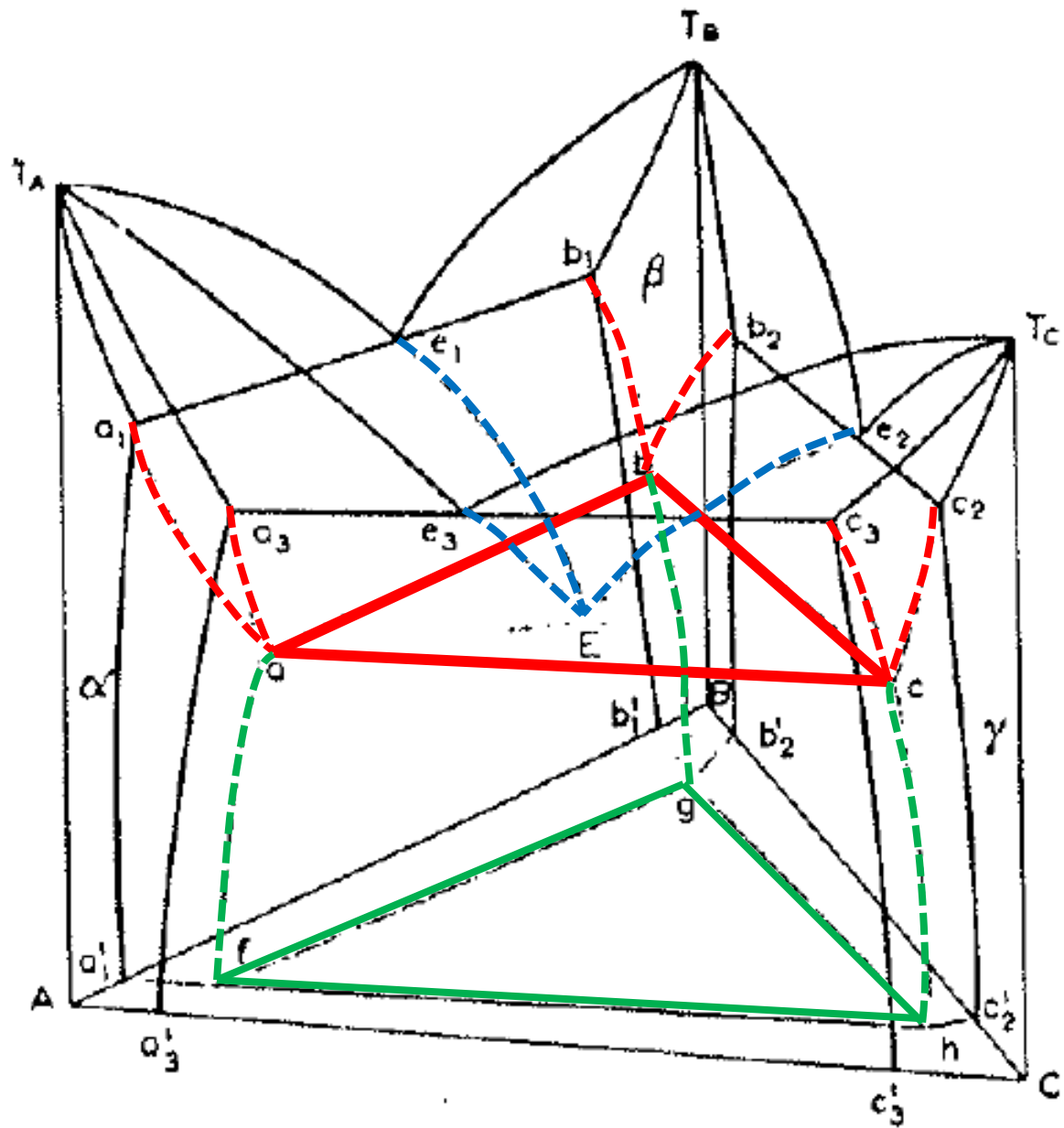




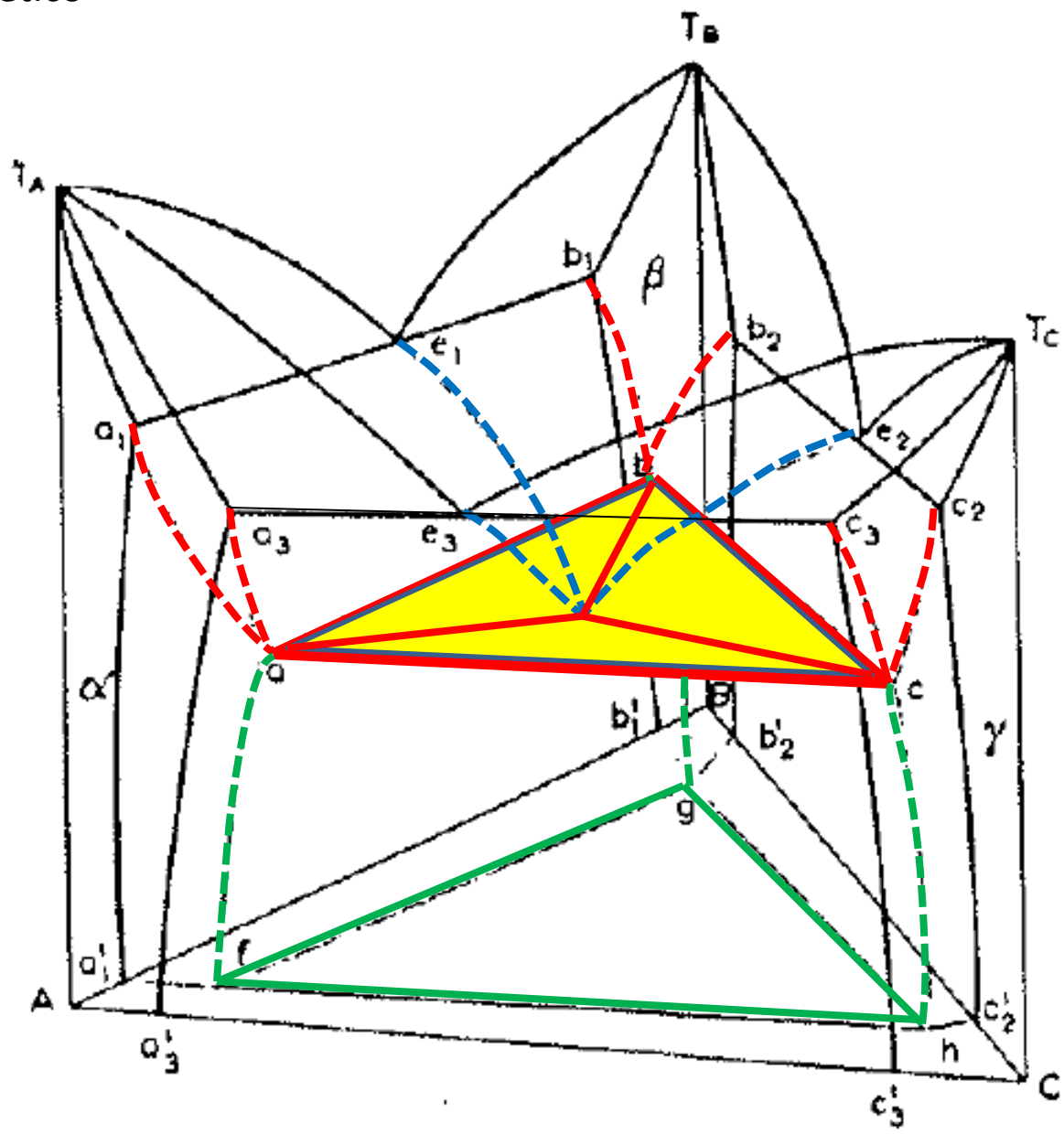


# CALHAS (CURVAS TRACEJADAS)



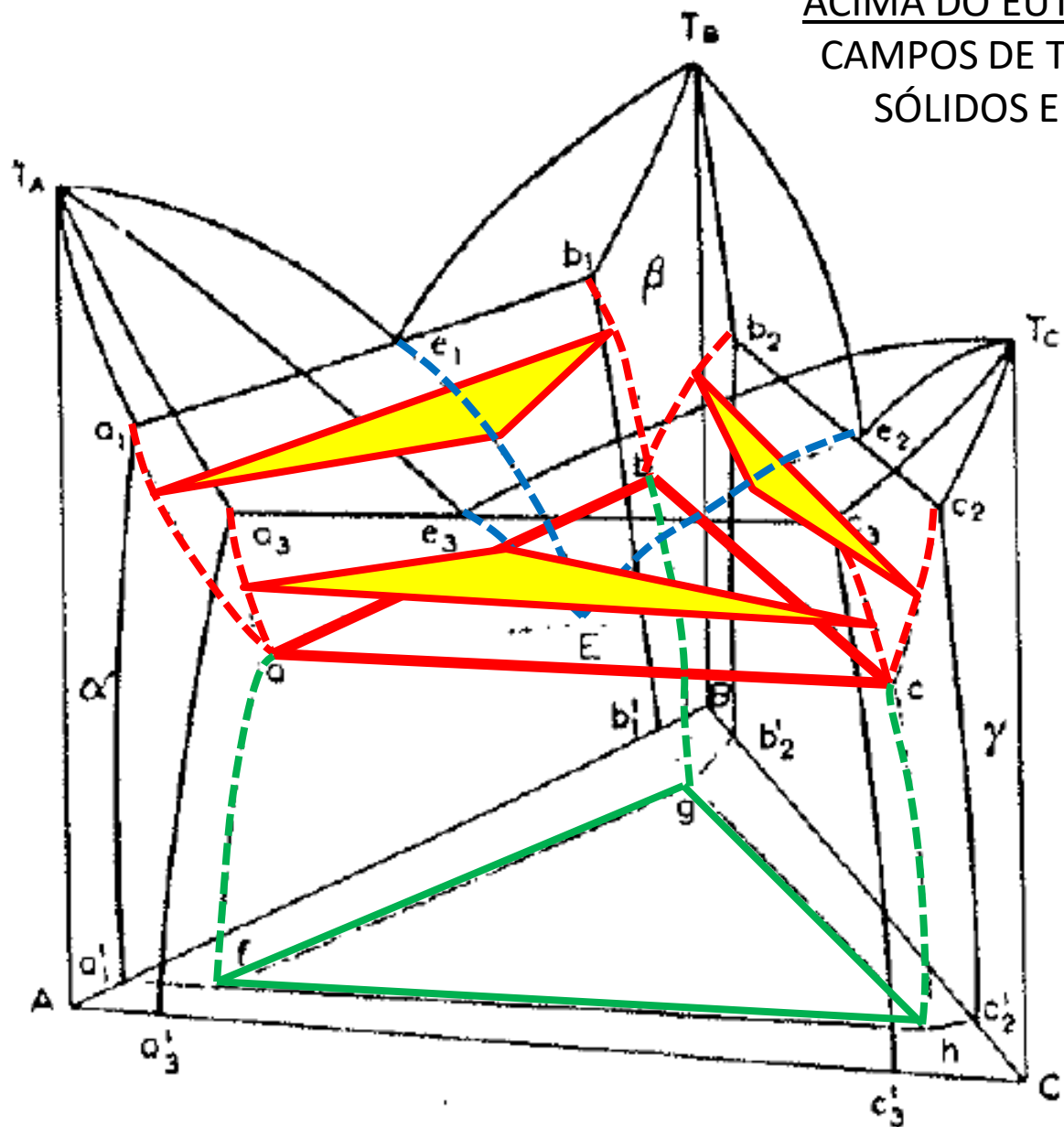


Destaque: eutético ternário



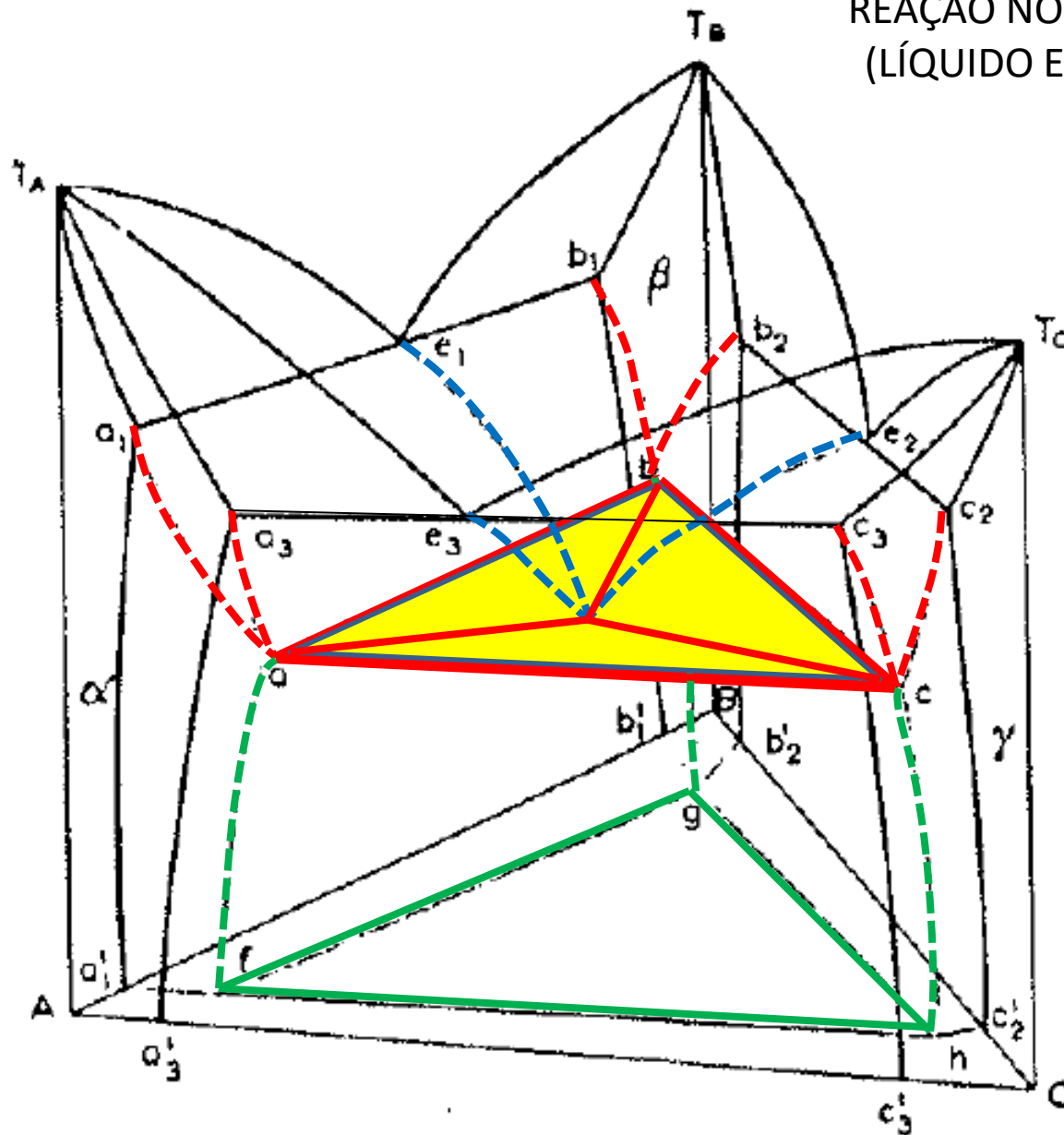
SEQUÊNCIA DE TEMPERATURAS

ACIMA DO EUTÉTICO TERNÁRIO:  
CAMPOS DE TRÊS FASES (DOIS SÓLIDOS E UM LÍQUIDO)



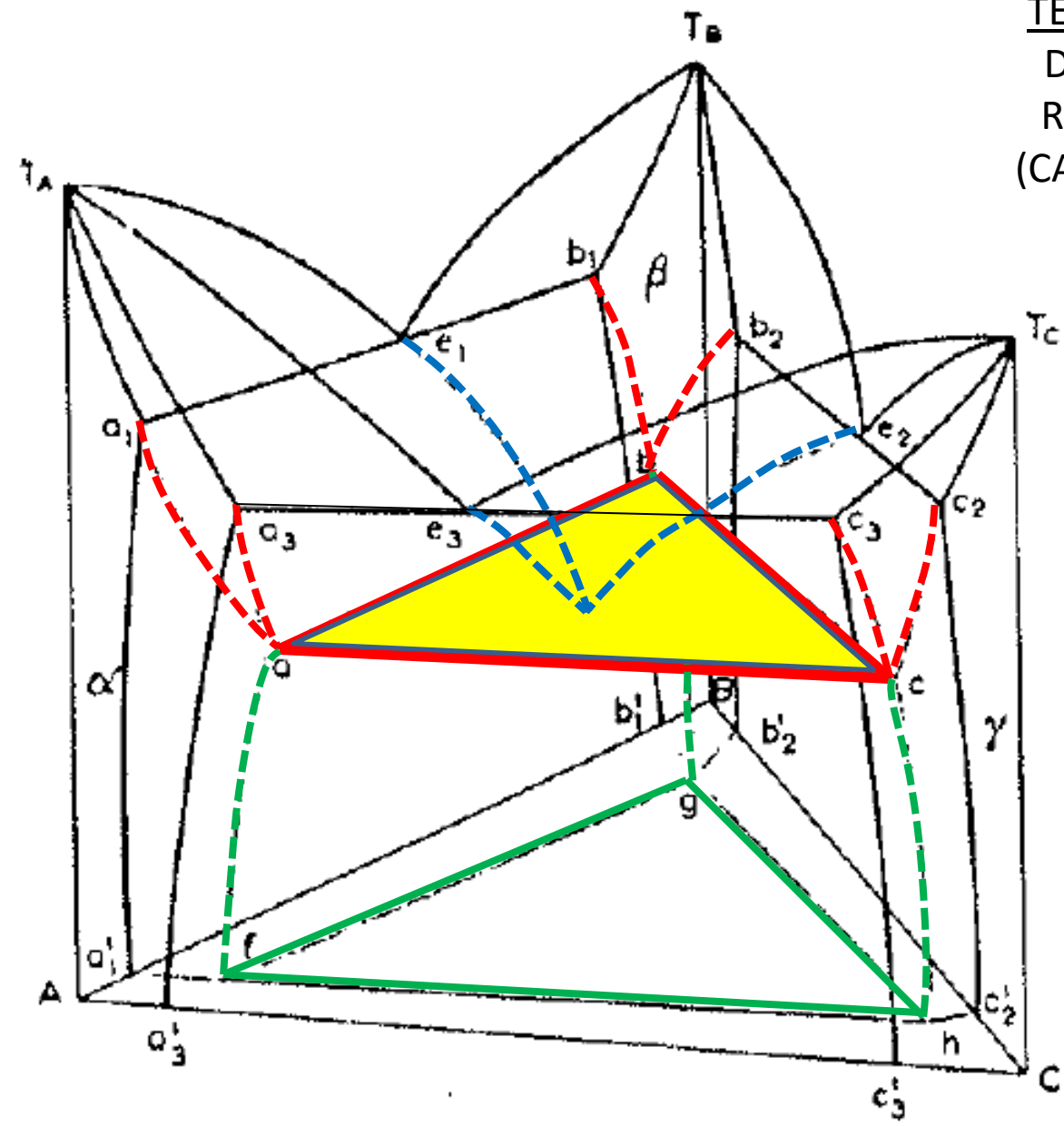
# SEQUÊNCIA DE TEMPERATURAS

EUTÉTICO TERNÁRIO: INÍCIO DA REAÇÃO NO RESFRIAMENTO (LÍQUIDO E TRÊS SÓLIDOS)

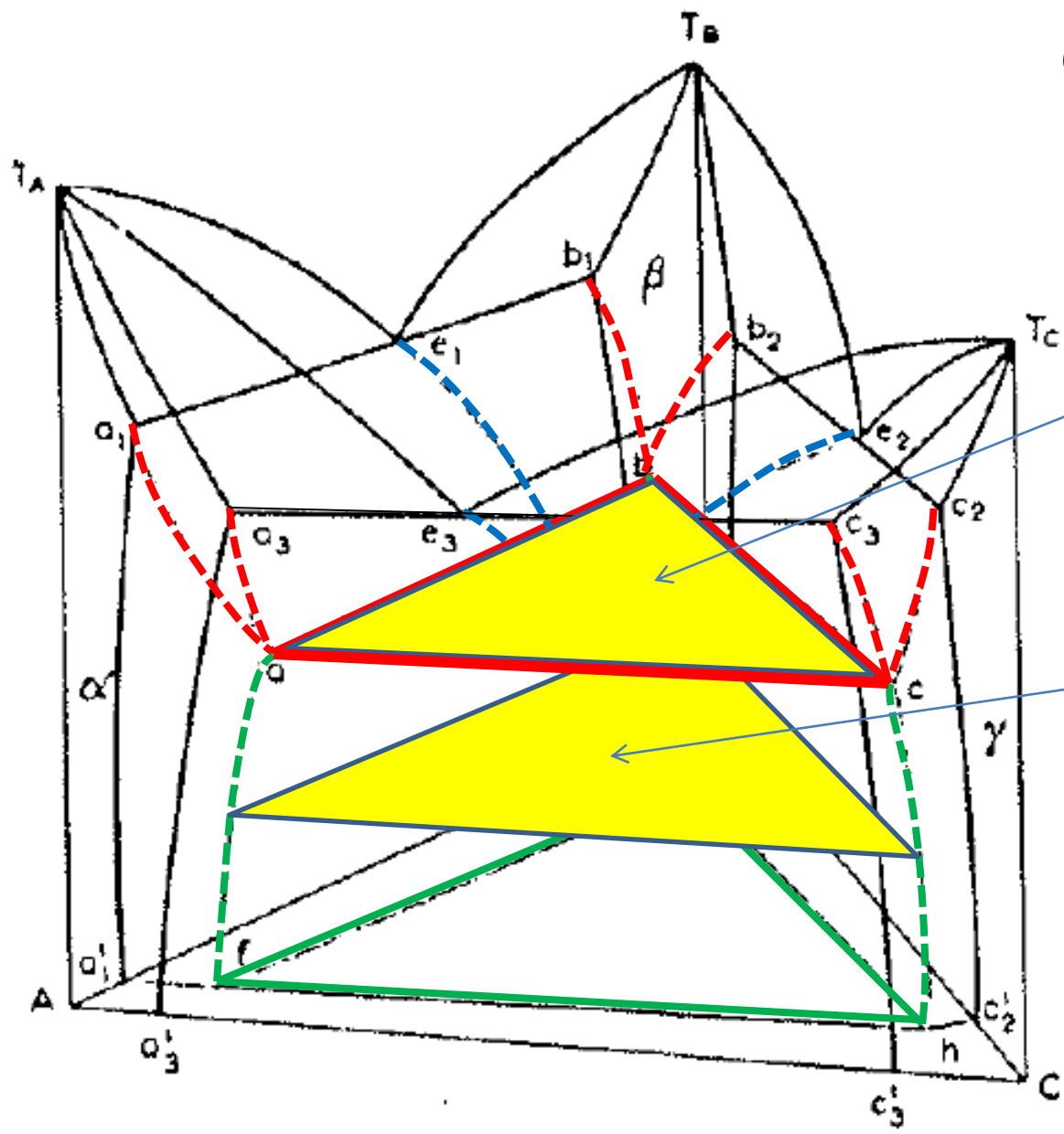


SEQUÊNCIA DE TEMPERATURAS

EUTÉTICO  
TERNÁRIO: FINAL  
DA REAÇÃO NO  
RESFRIAMENTO  
(CAMPO DOS TRÊS  
SÓLIDOS)



# SEQUÊNCIA DE TEMPERATURAS

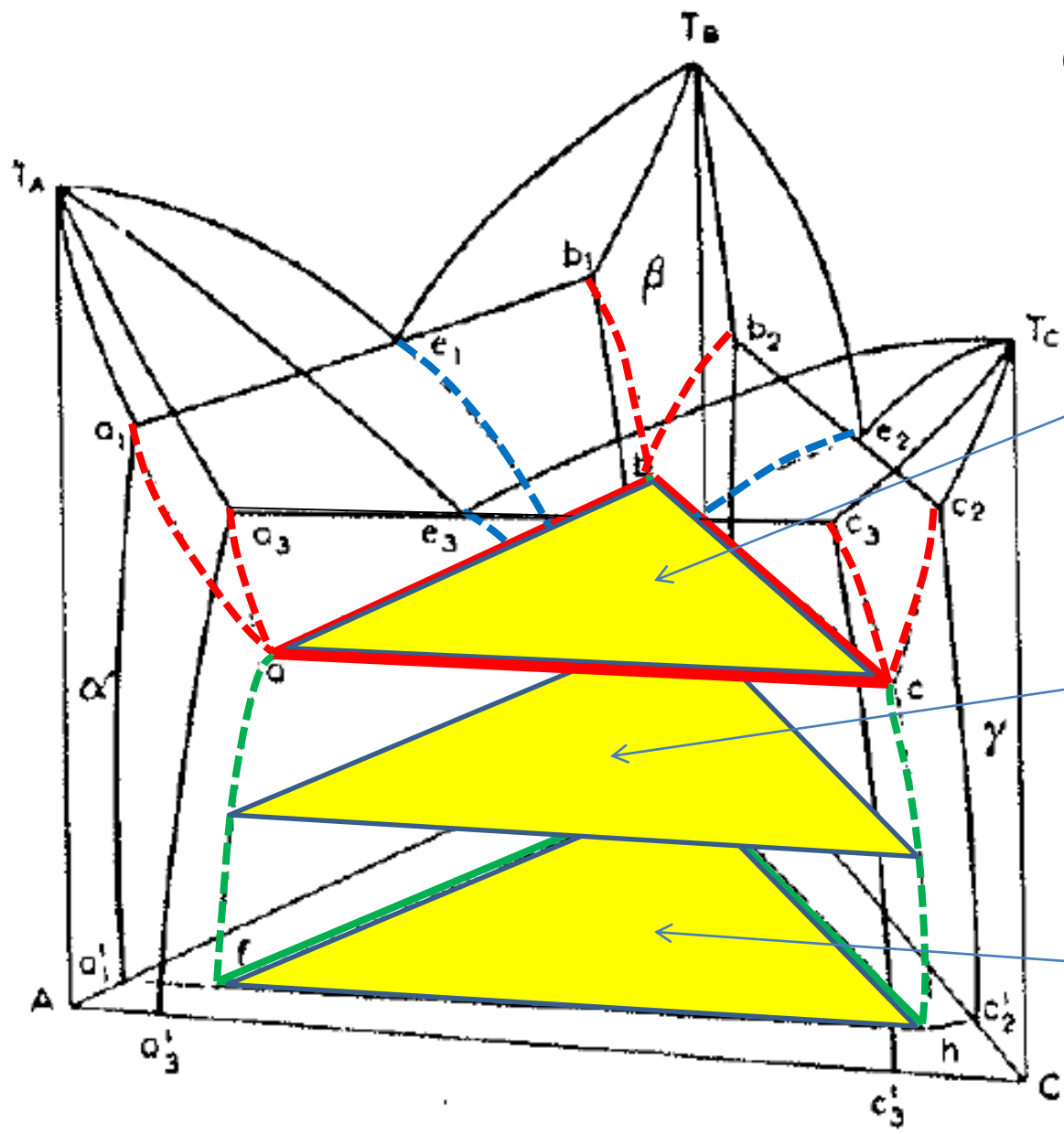


CAMPO DOS TRÊS  
SÓLIDOS EM  
DIFERENTES  
TEMPERATURAS:

EUTÉTICO  
TERNÁRIO

ABAIXO DO  
EUTÉTICO  
TERNÁRIO

# SEQUÊNCIA DE TEMPERATURAS



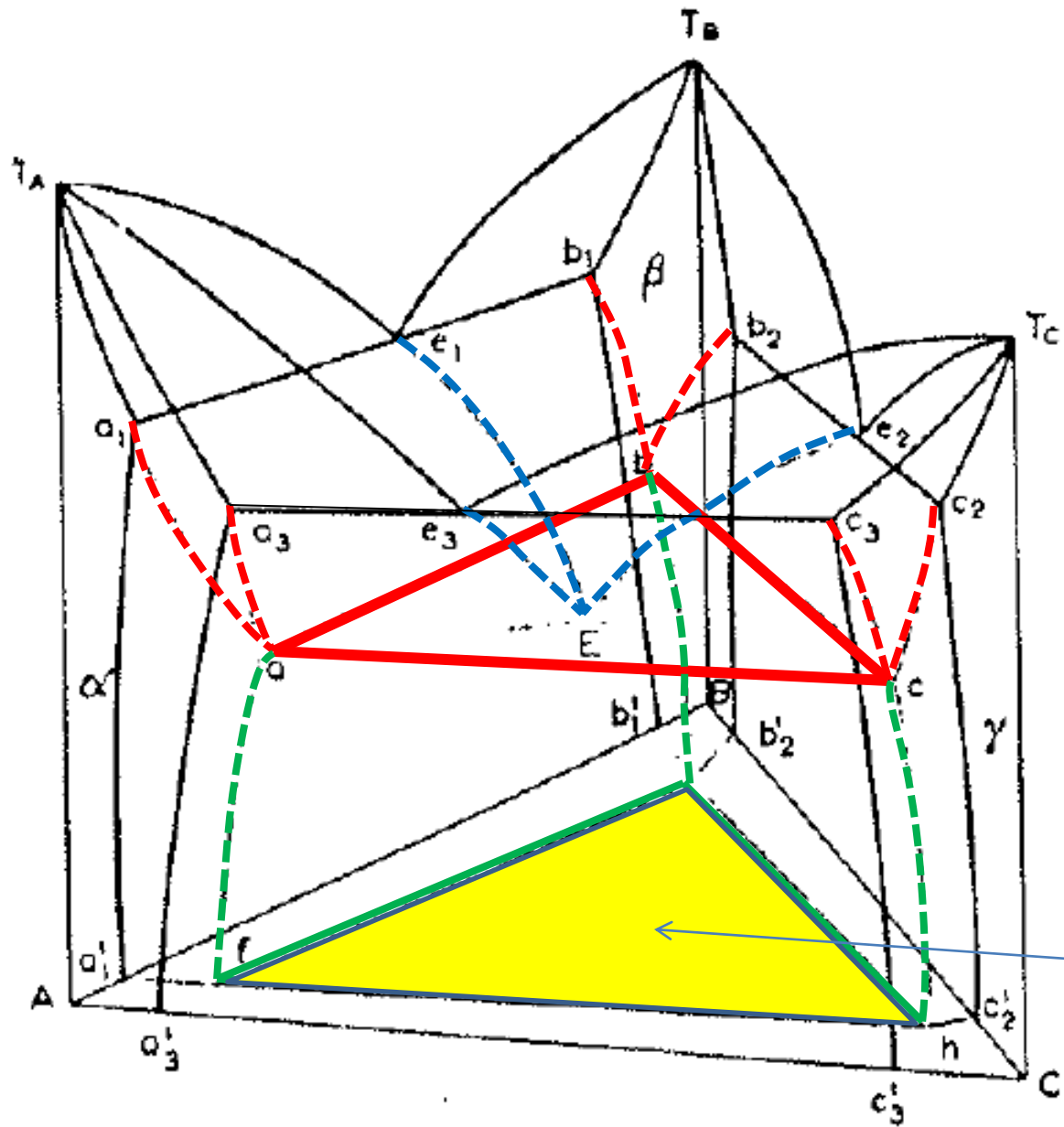
CAMPO DOS TRÊS  
SÓLIDOS EM  
DIFERENTES  
TEMPERATURAS:

EUTÉTICO  
TERNÁRIO

ABAIXO DO  
EUTÉTICO  
TERNÁRIO

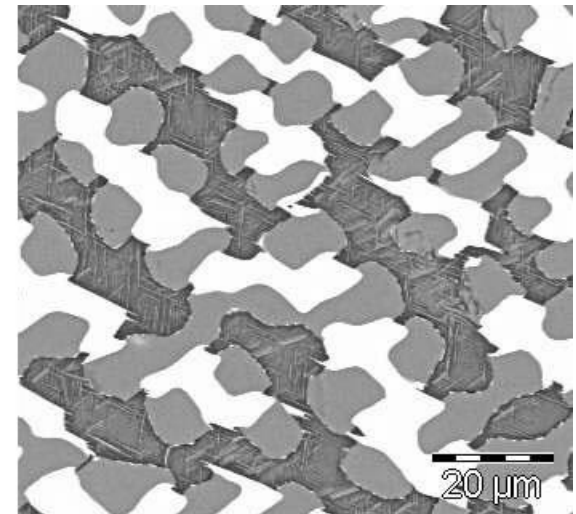
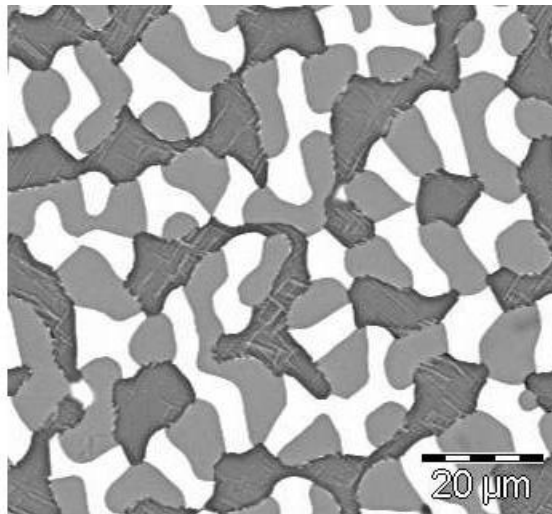
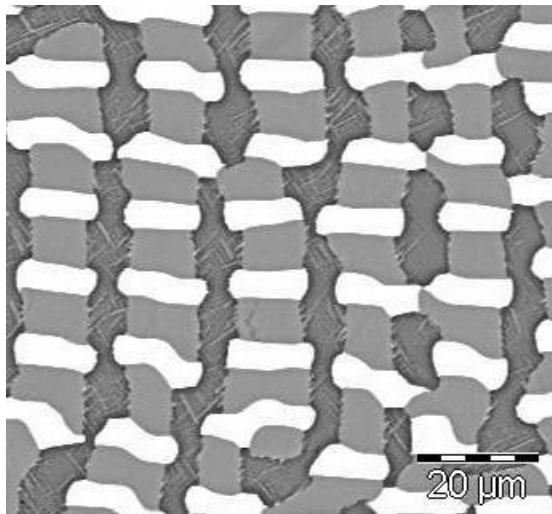
MAIS ABAIXO  
DO EUTÉTICO  
TERNÁRIO





MAIS ABAIXO  
DO EUTÉTICO  
TERNÁRIO

## EXEMPLOS DE MICROESTRUTURAS COM EUTÉTICOS TERNÁRIOS



Example of three eutectic morphologies found on the same cross section of the same sample.

White phase is  $\text{Ag}_2\text{Al}$ ,

Light gray phase is  $\text{Al}_2\text{Cu}$

Darker phase with precipitation is solid solution aluminum.

Comentário 1: Não se observa uma fase primária, nem eutéticos com apenas duas fases. Assim, a composição desta liga deve ser exatamente a do líquido eutético ternário.

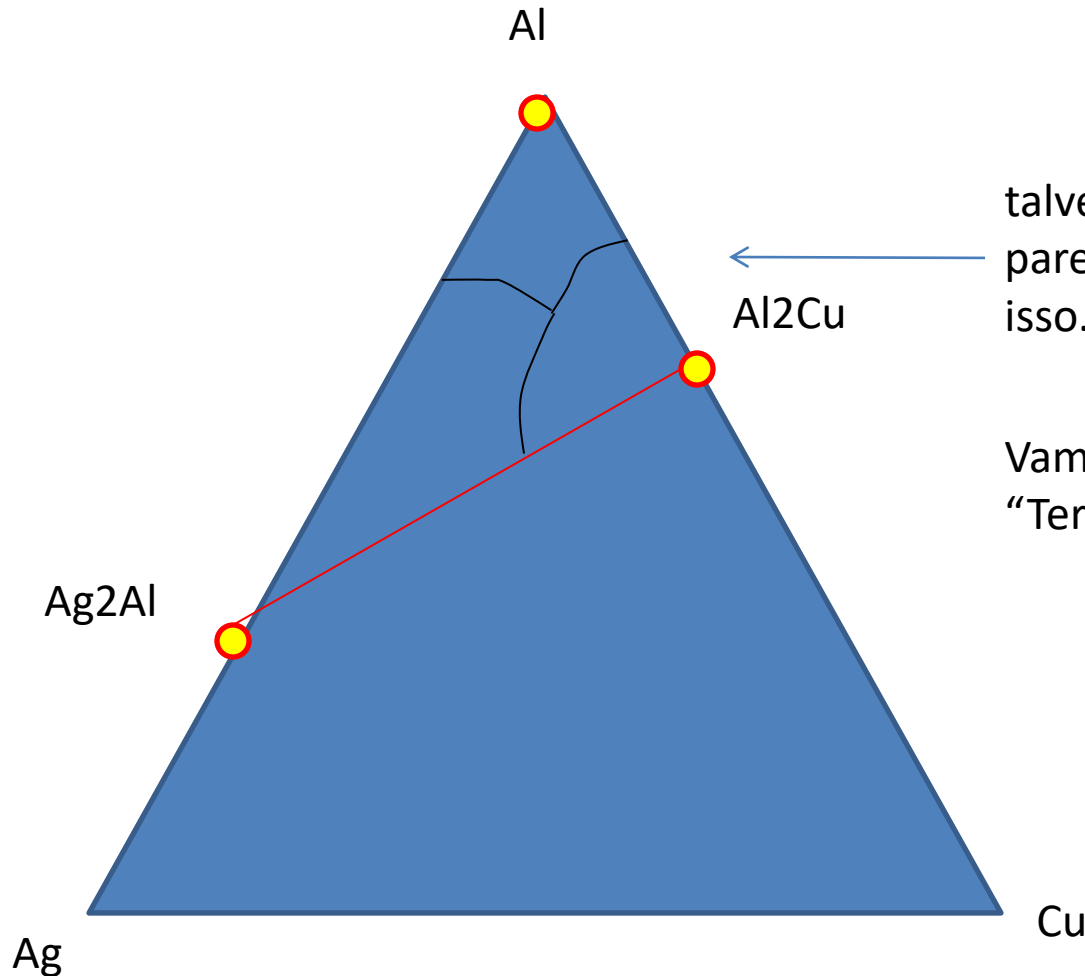
<http://www.uab.edu/engineering/metals/industry/eutectic>

Example of three eutectic morphologies found on the same cross section of the same sample.

White phase is  $\text{Ag}_2\text{Al}$ ,

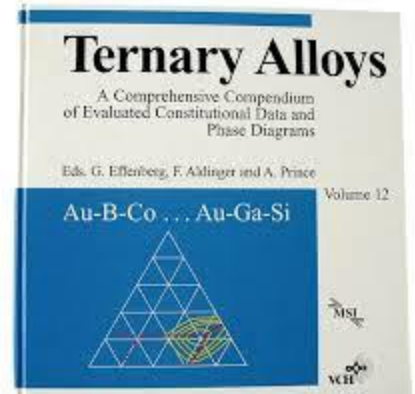
Light gray phase is  $\text{Al}_2\text{Cu}$

Darker phase with precipitation is solid solution aluminum.



talvez seja algo parecido com isso...

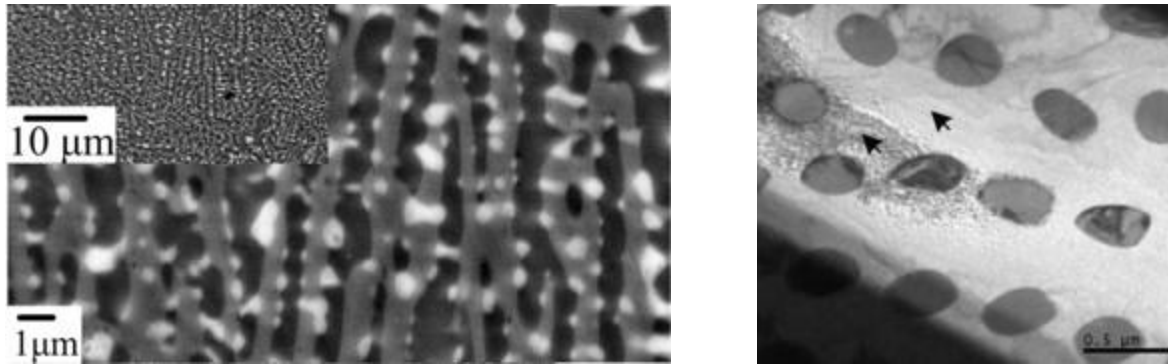
Vamos consultar o "Ternary Alloys"?



"Ternary Alloys — A Comprehensive Compendium of Evaluated Constitutional Data and Phase Diagrams", editada por G. Petzow e G. Effenberg, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Alemanha, 1991 (Volume 4: 652 páginas; Volume 5: 695 páginas; ISBN: 3-527 38370-6):

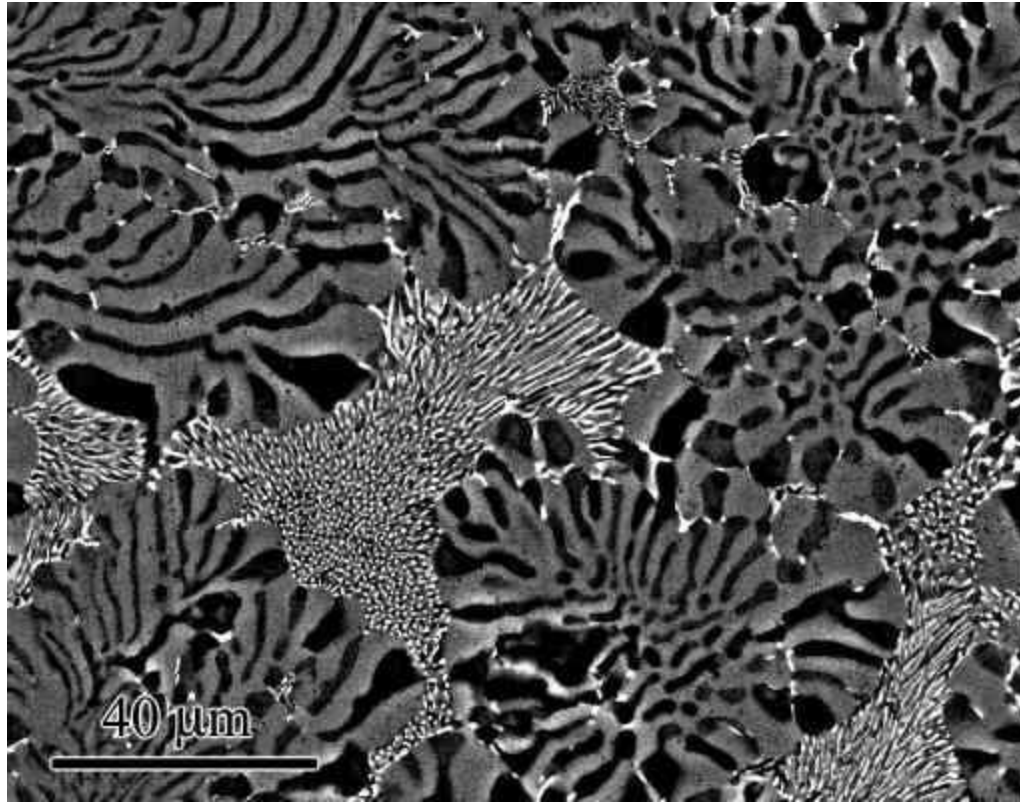
- "Aluminium-Cerium-Niobium", **A. C. Neiva**, Volume 4, 82-84.
- "Aluminium-Cobalt-Niobium", **A. C. Neiva**, Volume 4, 229-232.
- "Aluminium-Manganese-Molybdenum", **A. C. Neiva**, Volume 4, 77.
- "Aluminium-Manganese-Niobium", **A. C. Neiva**, Volume 5, 82.
- "Aluminium-Manganese-Neodymium", **A. C. Neiva**, Volume 5, 83.
- "Aluminium-Manganese-Vanadium", **A. C. Neiva**, Volume 5, 167-177.
- "Aluminium-Manganese-Tungsten", **A. C. Neiva**, Volume 5, 178.

## OUTRO EXEMPLO



**Figure: Nanometer scale Microstructure of Ternary Eutectics formed during solidification. Left: Ag-Pb-Te containing PbTe particles (white) within lamellae composed of  $\text{Ag}_3\text{Te}_5$  and Te. Right:  $\text{Ag}_2\text{Te}$  nanorods embedded in Ag-Sb-Te matrix.**

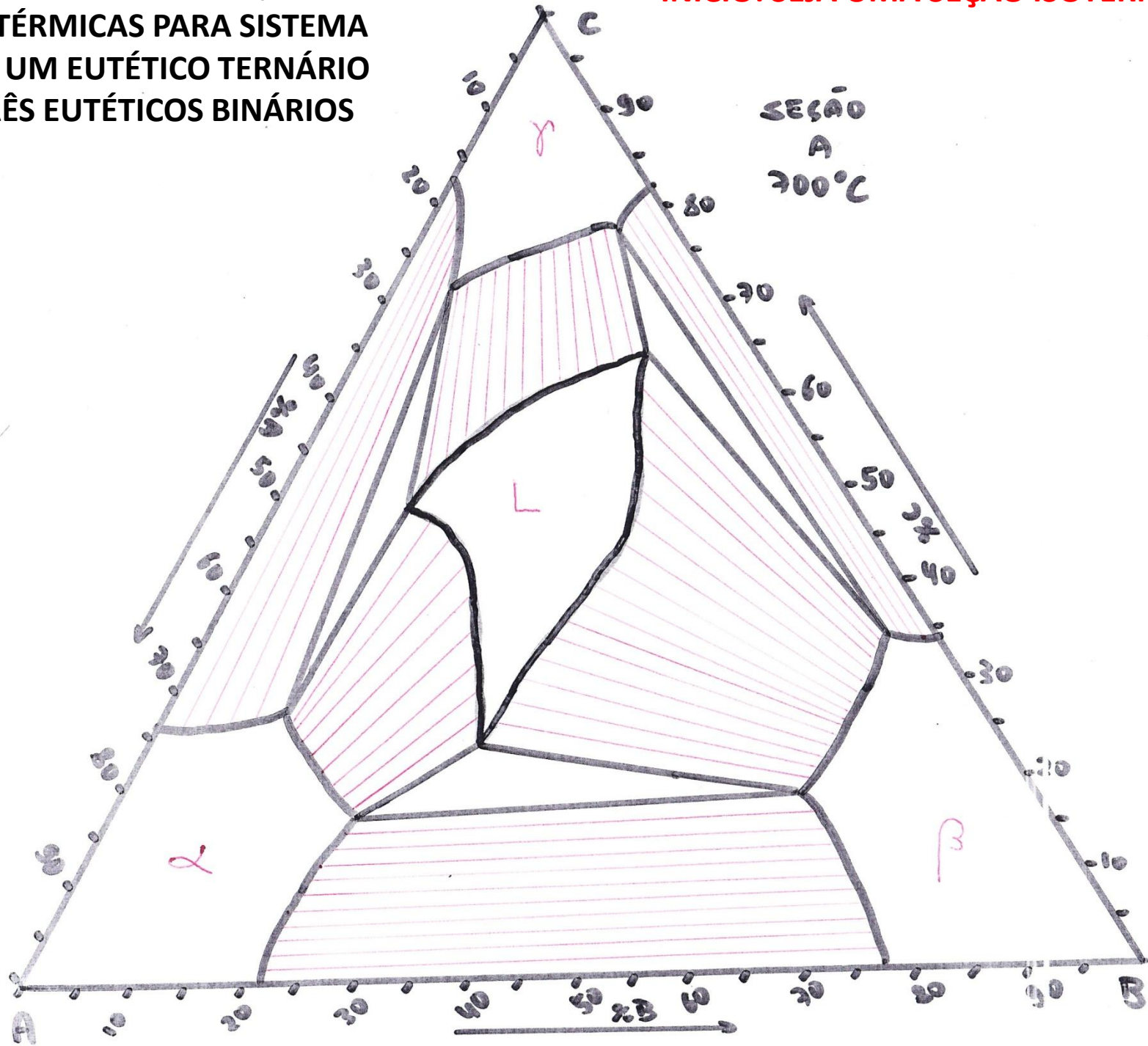
OUTRO EXEMPLO, MAS O SITE NÃO DIZ QUAL É A LIGA

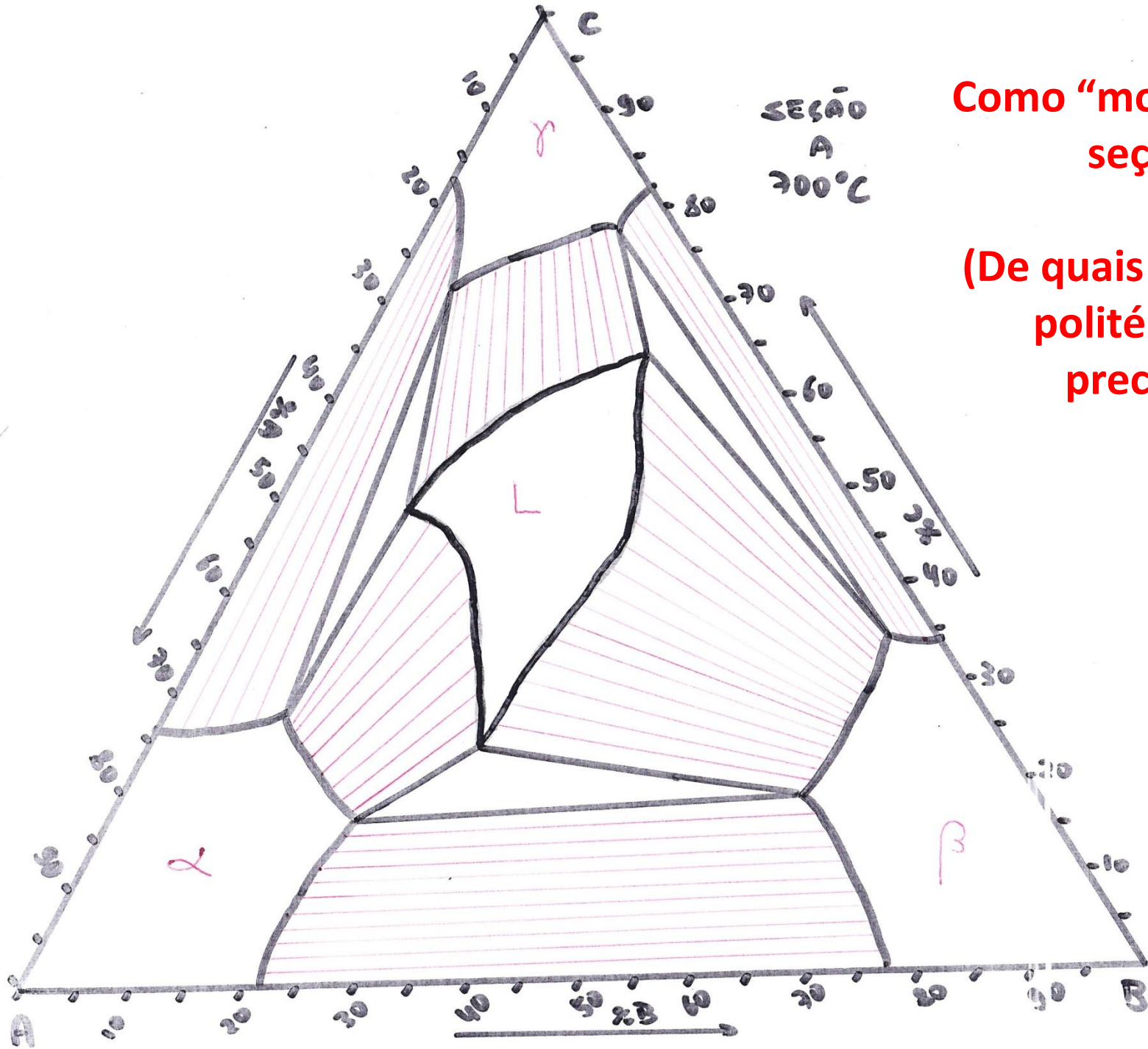


<http://www.surface.mat.ethz.ch/0000-metals/imprint/index>

EXEMPLO DE PROJEÇÕES  
TÉRMICAS PARA SISTEMA  
COM UM EUTÉTICO TERNÁRIO  
E TRÊS EUTÉTICOS BINÁRIOS

INÍCIO: SEJA UMA SEÇÃO ISOTÉRMICA A 700 °C





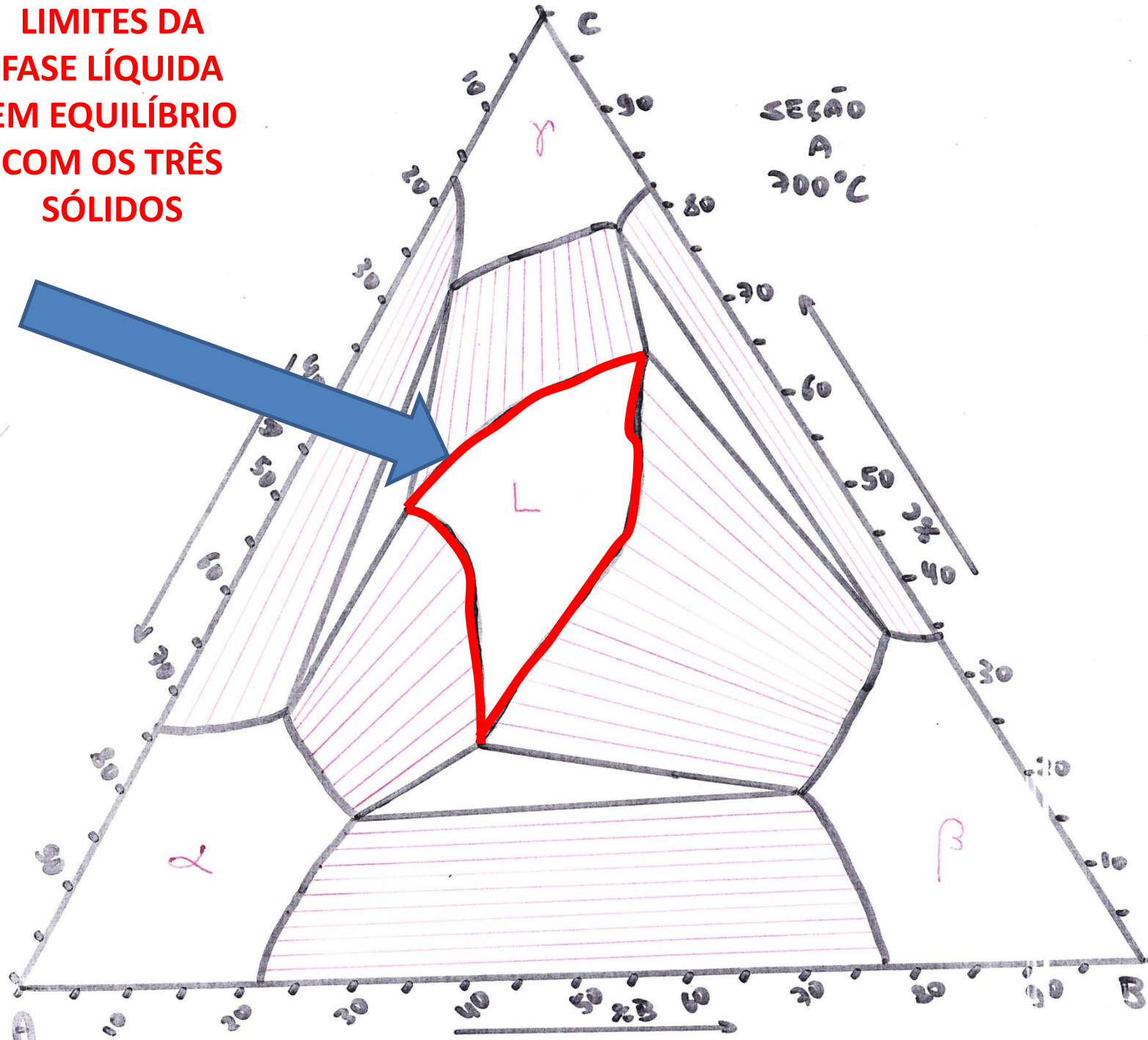
SEÇÃO  
A  
700°C

Como “montar” esta  
seção?

(De quais projeções  
politérmicas  
preciso?)

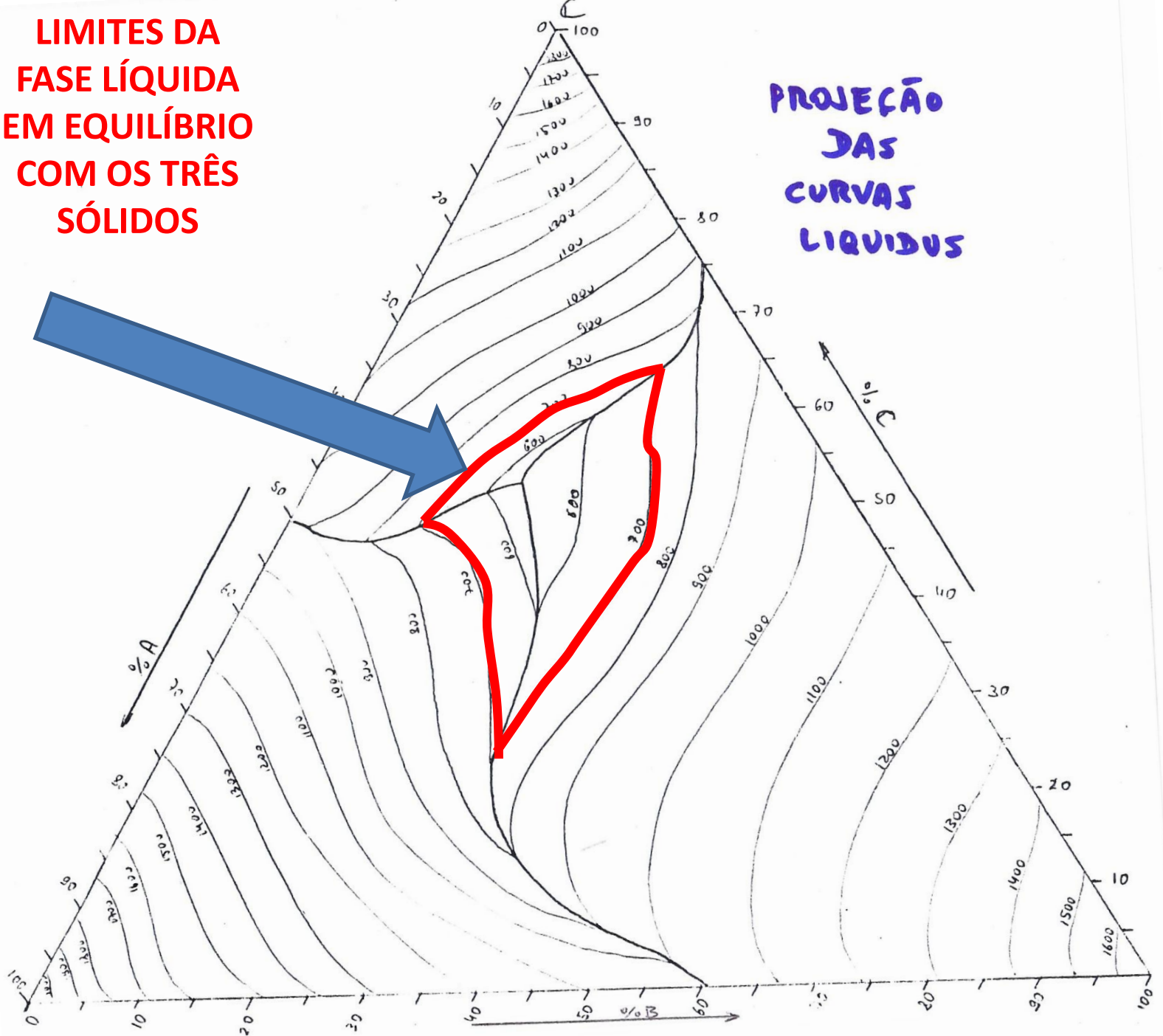
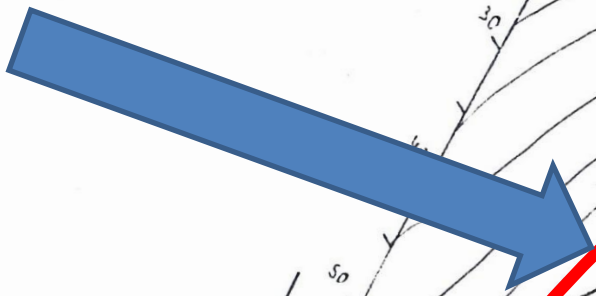


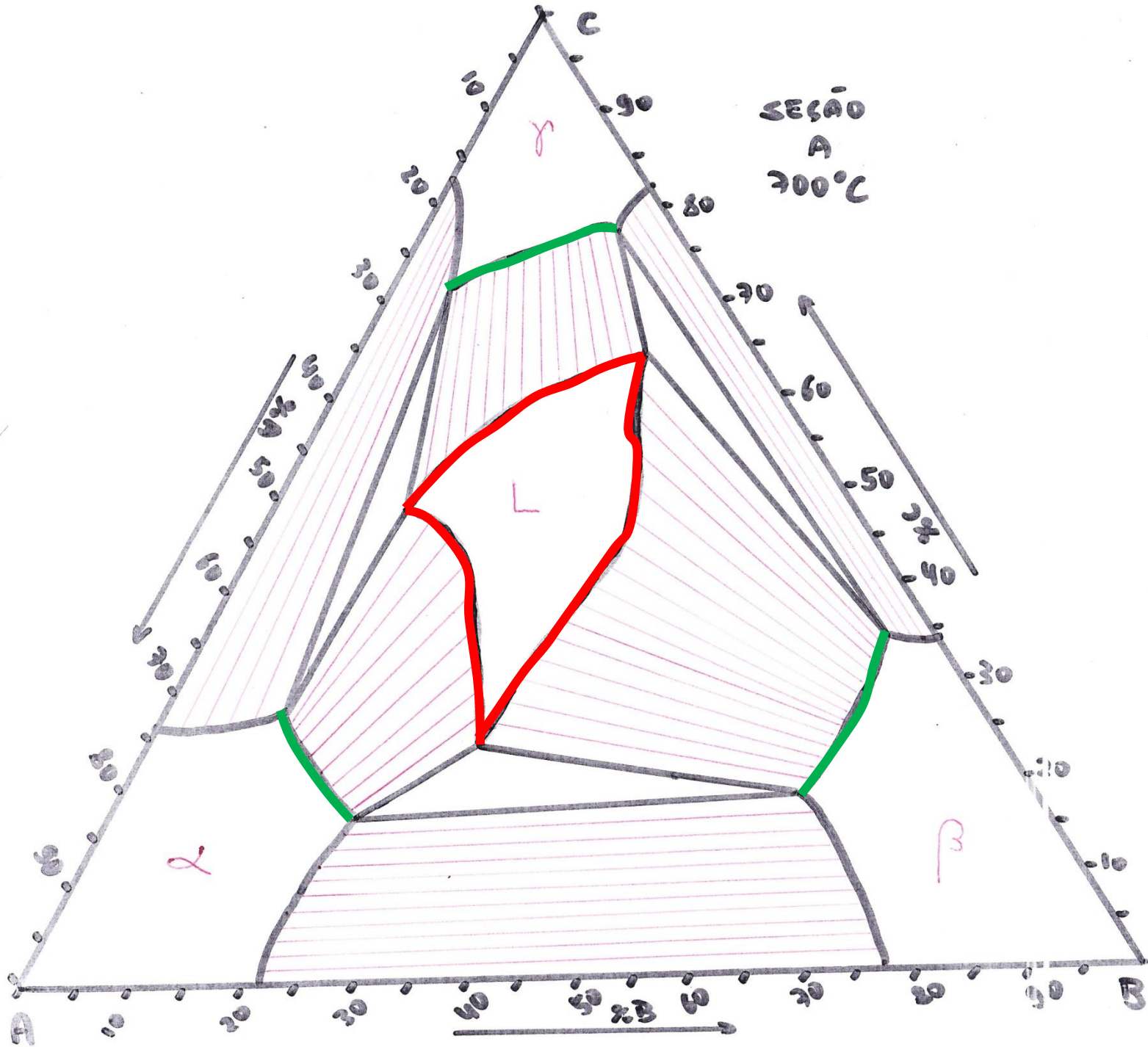
**LIMITES DA  
FASE LÍQUIDA  
EM EQUILÍBRIO  
COM OS TRÊS  
SÓLIDOS**



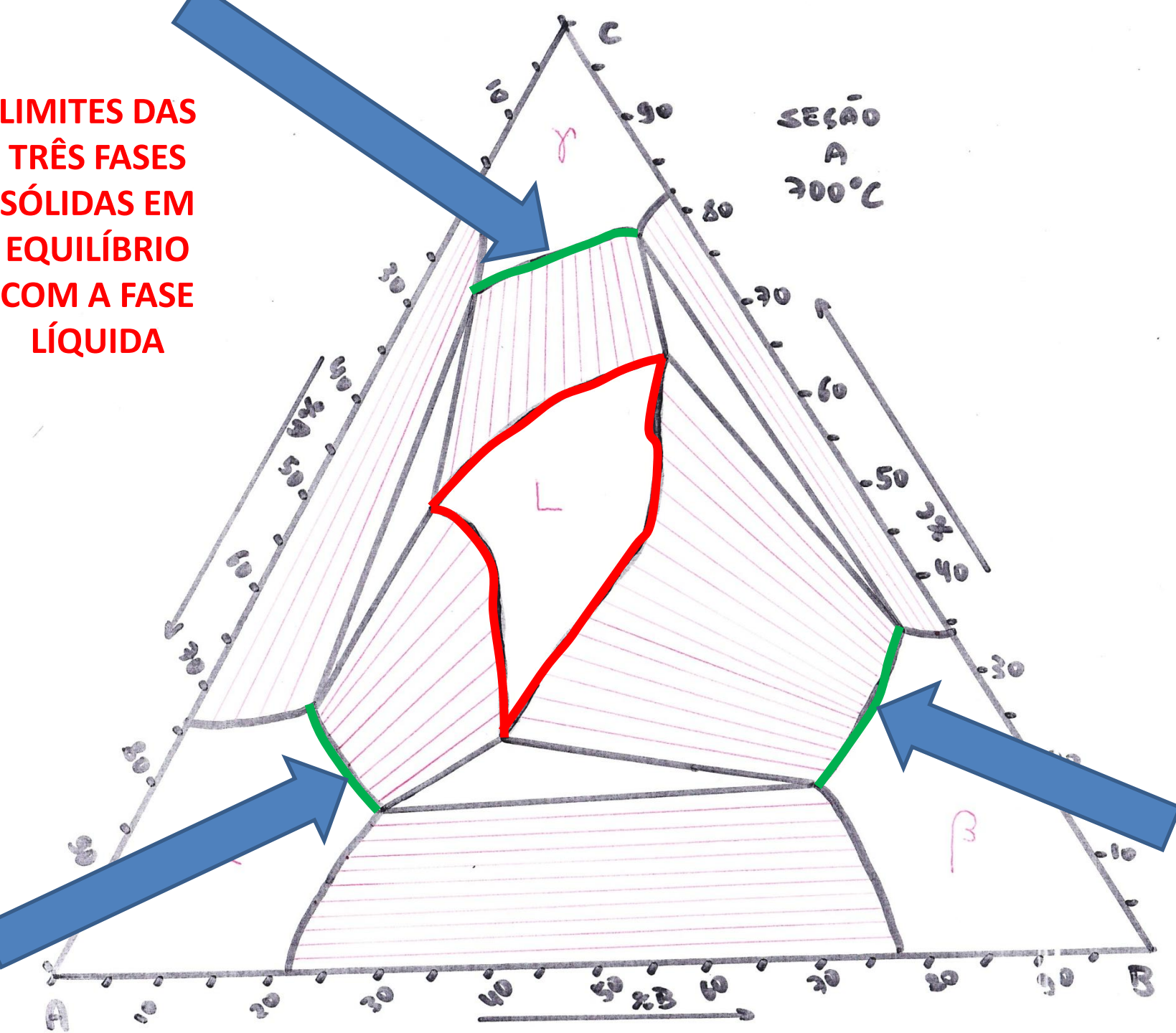
LIMITES DA  
FASE LÍQUIDA  
EM EQUILÍBRIO  
COM OS TRÊS  
SÓLIDOS

PROJEÇÃO  
DAS  
CURVAS  
LIQUIDAS



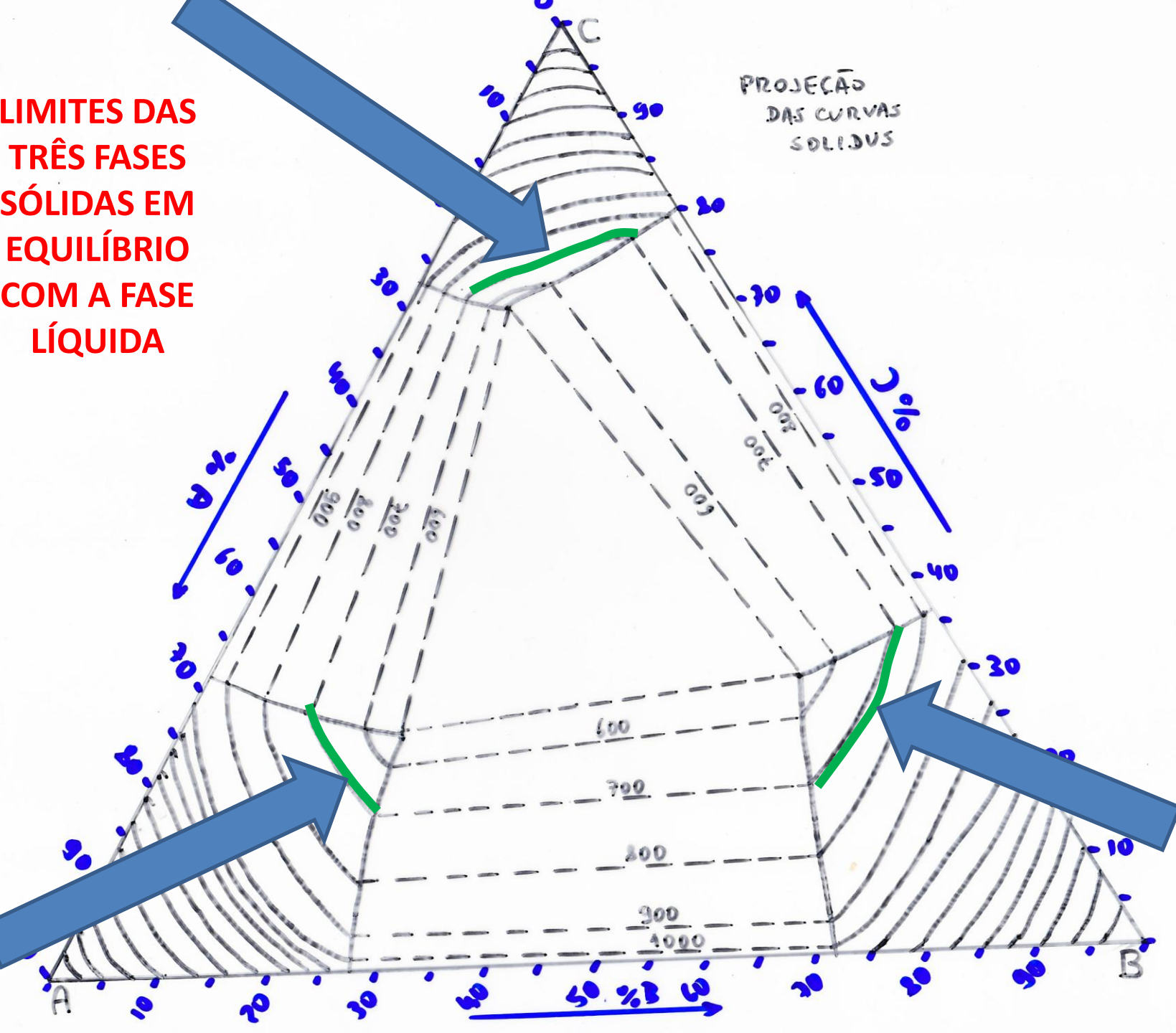


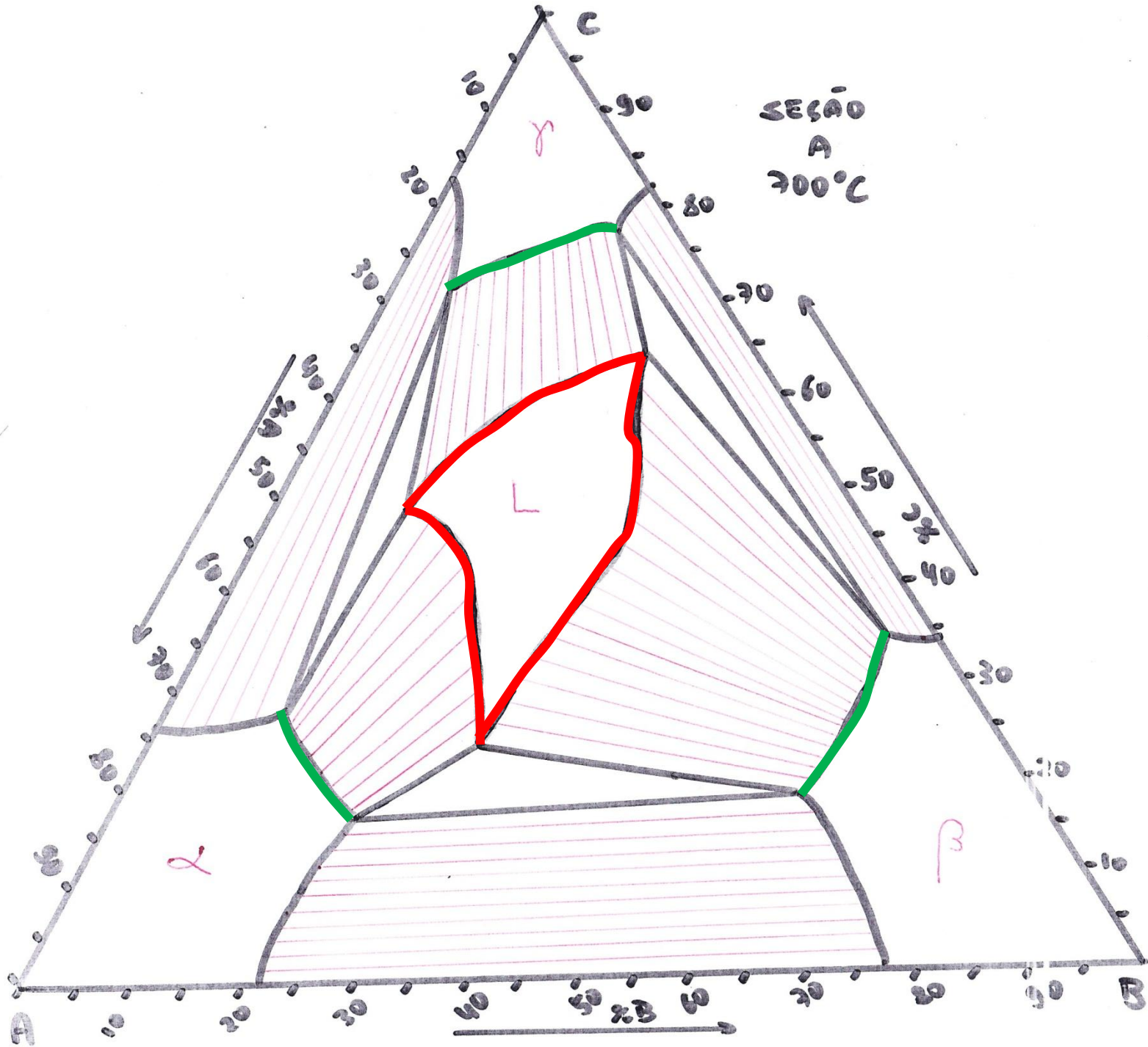
LIMITES DAS  
TRÊS FASES  
SÓLIDAS EM  
EQUILÍBRIO  
COM A FASE  
LÍQUIDA



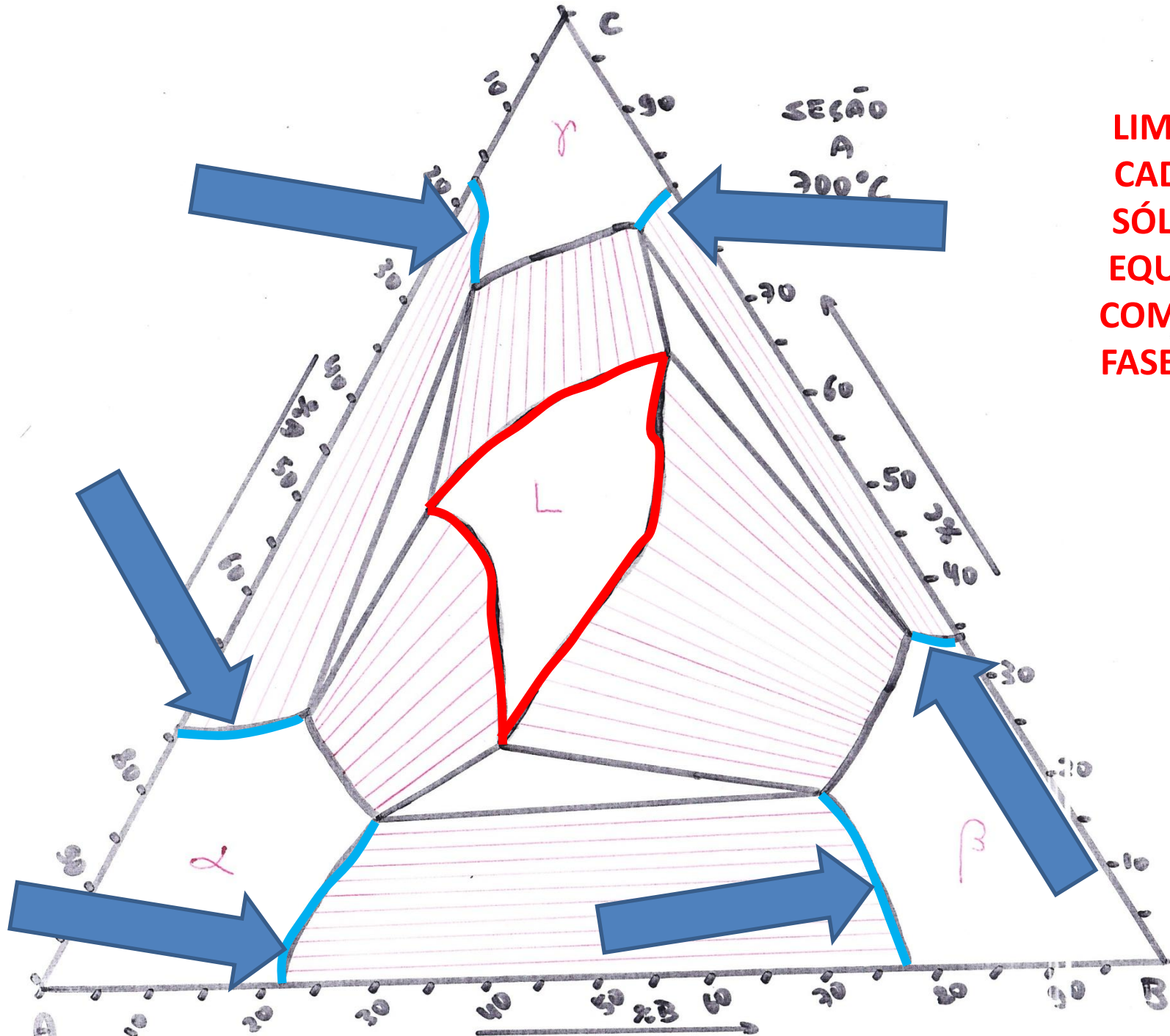
LIMITES DAS  
TRÊS FASES  
SÓLIDAS EM  
EQUILÍBRIO  
COM A FASE  
LÍQUIDA

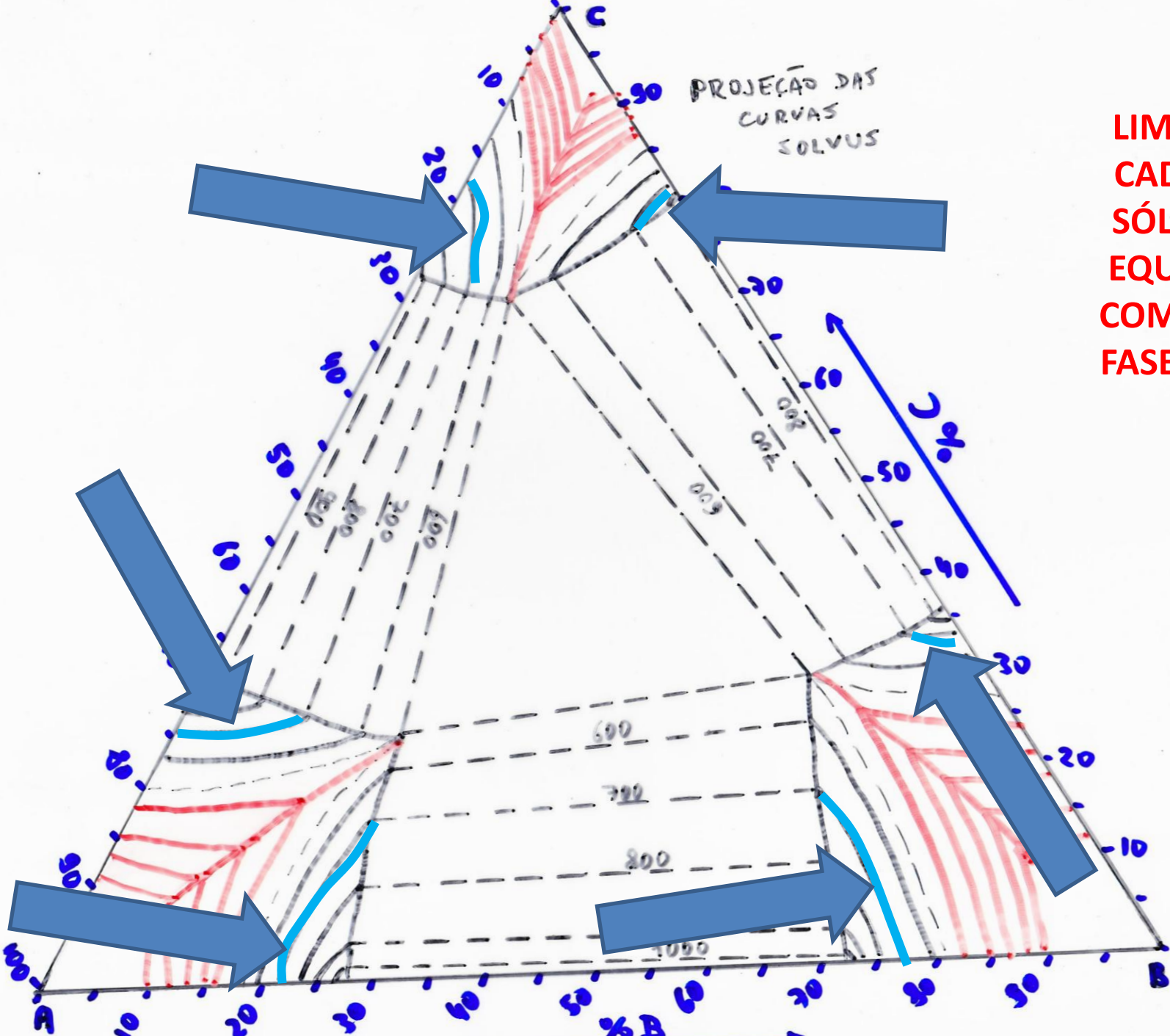
PROJEÇÃO  
DAS CURVAS  
SÓLIDAS





LIMITES DE  
CADA FASE  
SÓLIDA EM  
EQUILÍBRIO  
COM OUTRA  
FASE SÓLIDA

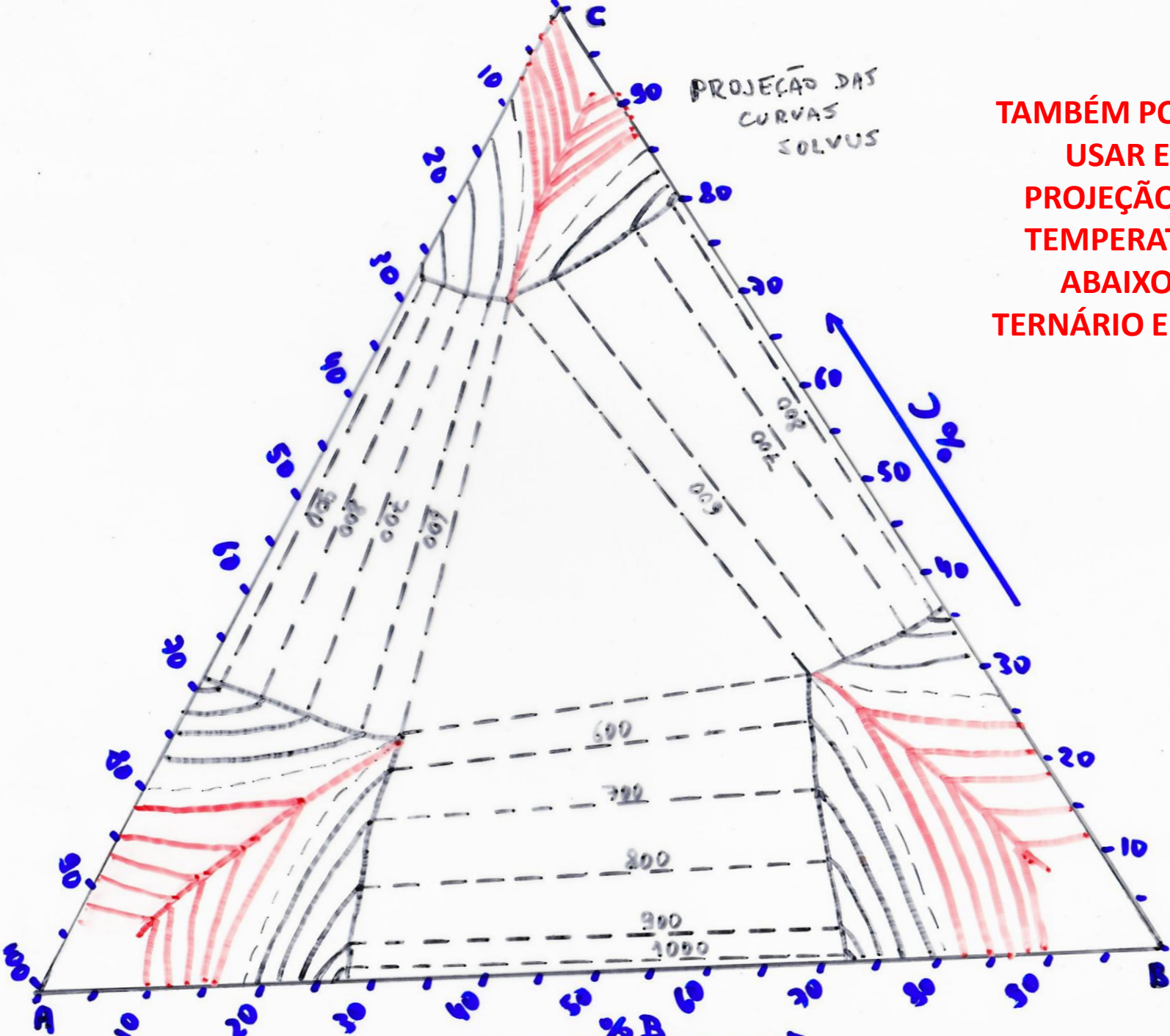




PROJEÇÃO DAS CURVAS SOLVUS

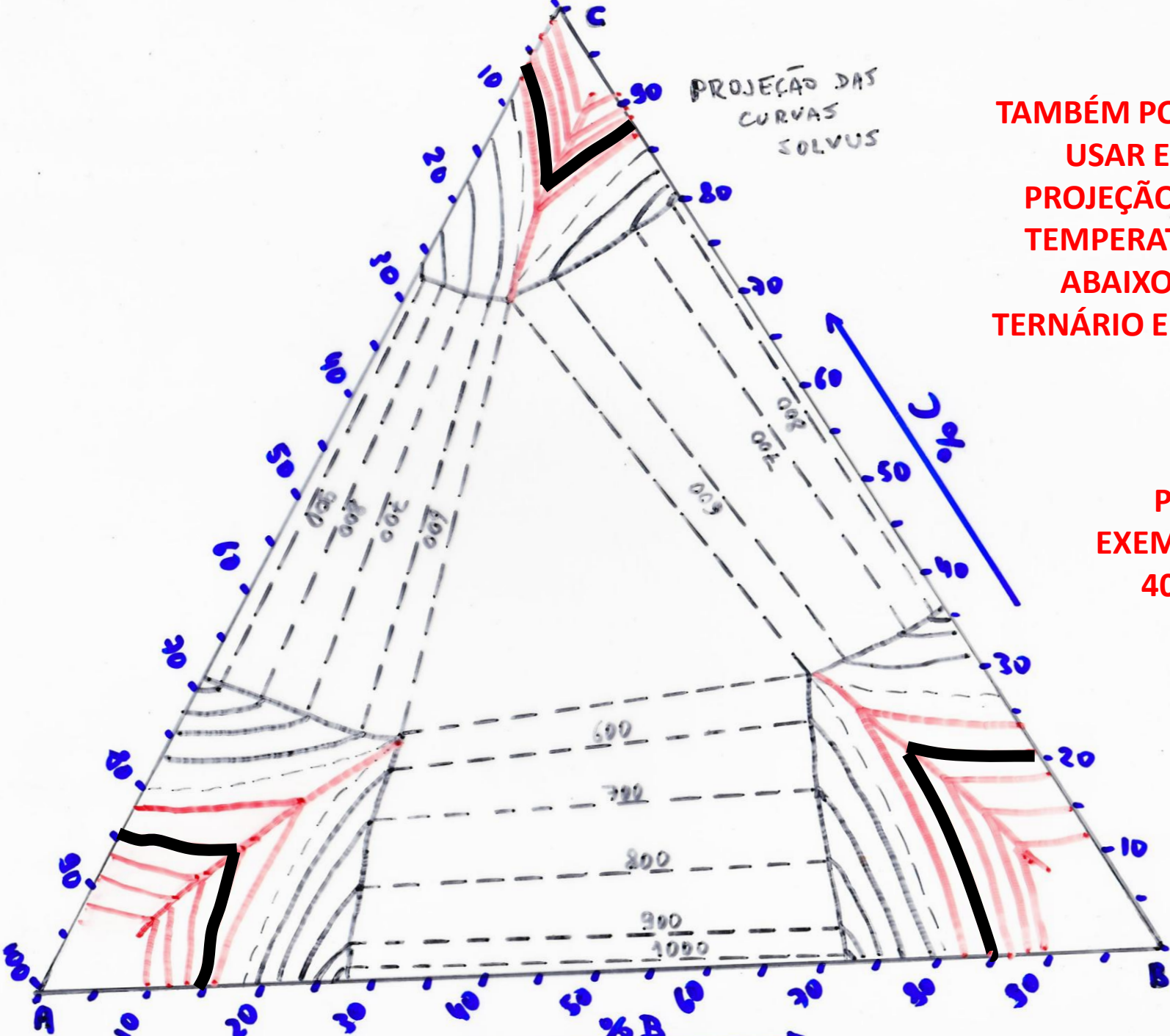
LIMITES DE CADA FASE SÓLIDA EM EQUILÍBRIO COM OUTRA FASE SÓLIDA





PROJEÇÃO DAS  
CURVAS  
SOLVUS

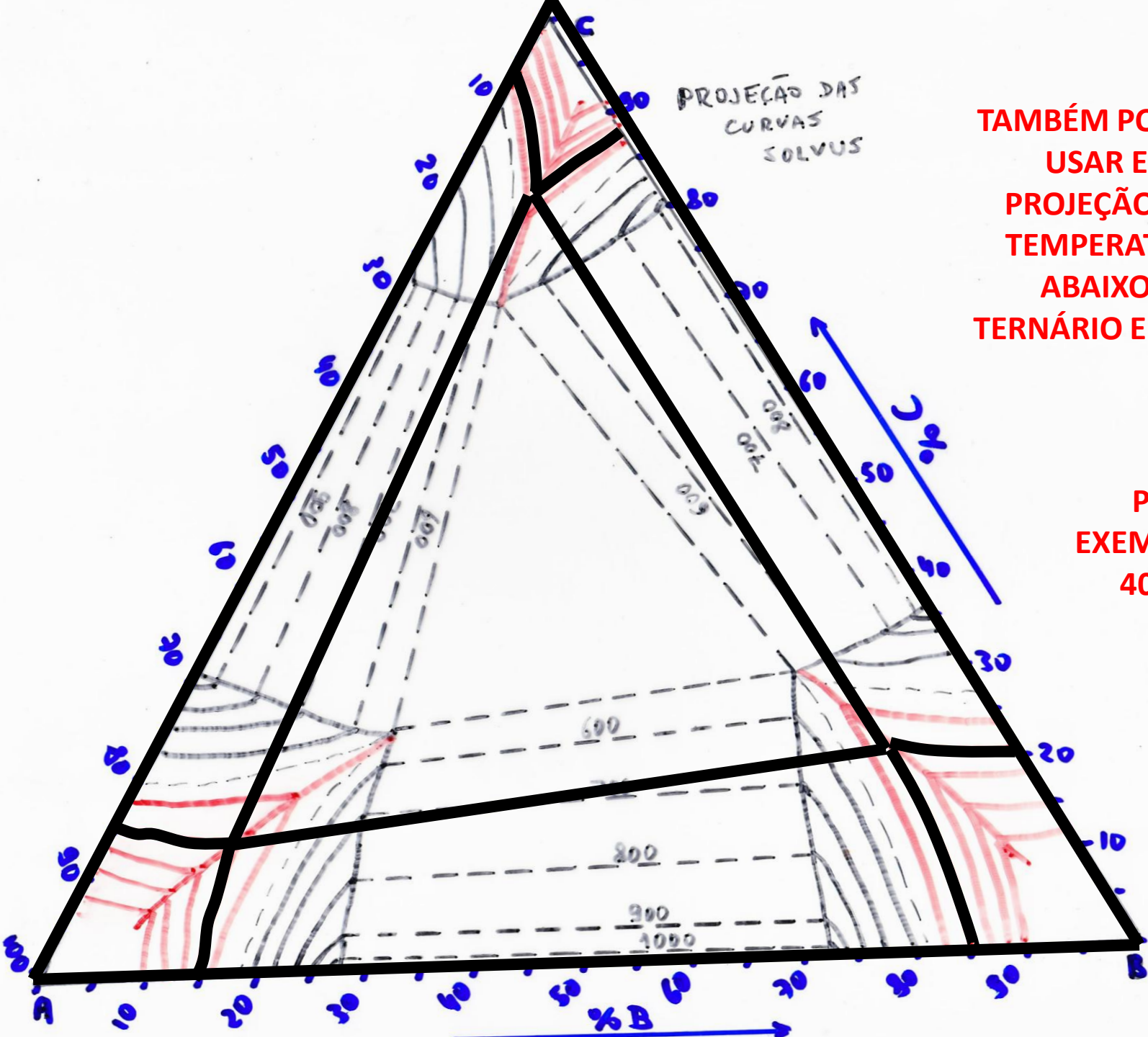
**TAMBÉM PODEMOS  
USAR ESTA  
PROJEÇÃO PARA  
TEMPERATURAS  
ABAIXO DO  
TERNÁRIO EUTÉTICO**



PROJEÇÃO DAS  
CURVAS  
SOLVUS

TAMBÉM PODEMOS  
USAR ESTA  
PROJEÇÃO PARA  
TEMPERATURAS  
ABAIXO DO  
TERNÁRIO EUTÉTICO

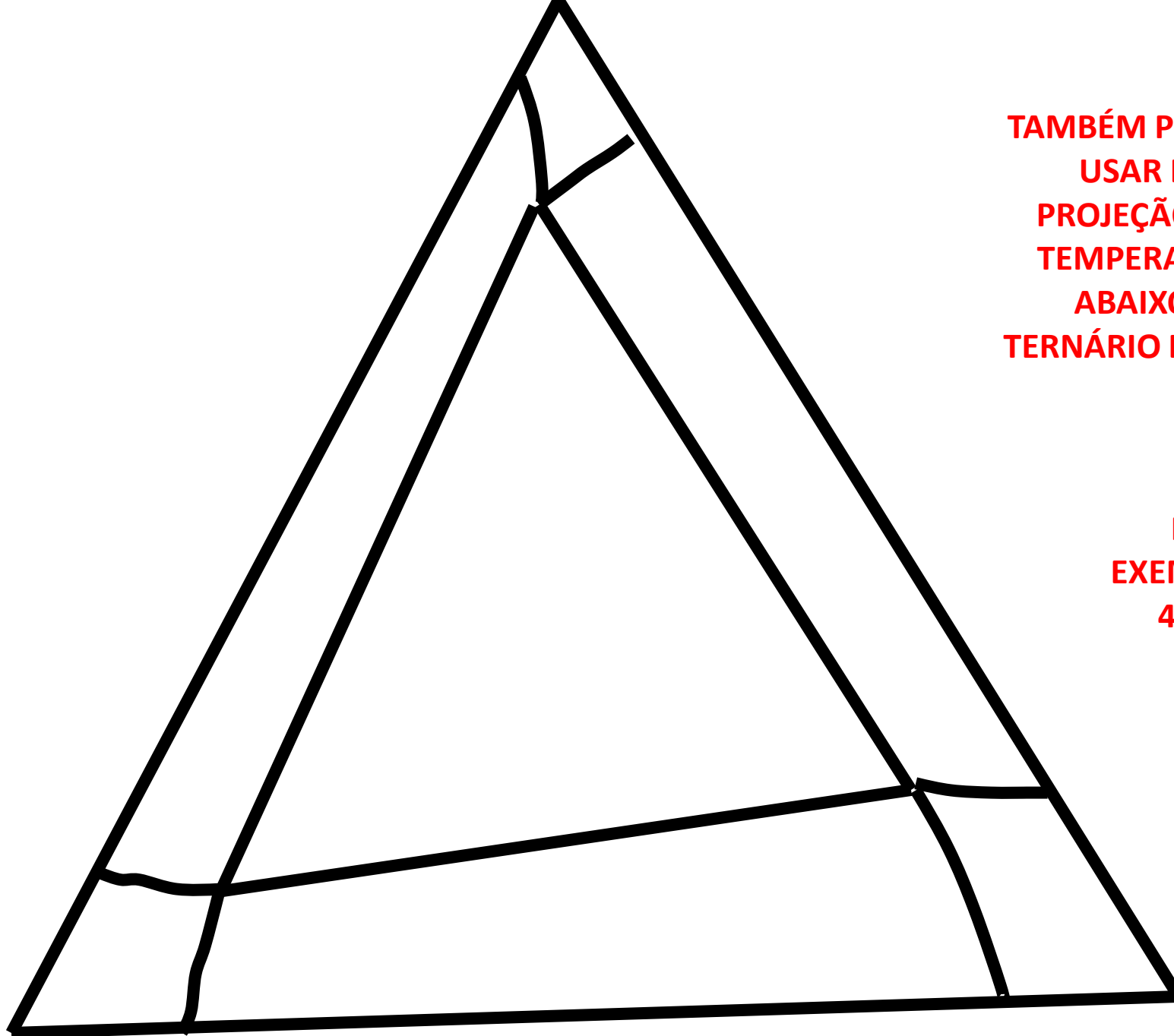
POR  
EXEMPLO, A  
400°C



PROJEÇÃO DAS  
CURVAS  
SOLVUS

TAMBÉM PODEMOS  
USAR ESTA  
PROJEÇÃO PARA  
TEMPERATURAS  
ABAIXO DO  
TERNÁRIO EUTÉTICO

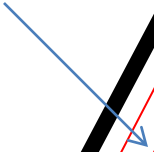
POR  
EXEMPLO, A  
400°C



**TAMBÉM PODEMOS  
USAR ESTA  
PROJEÇÃO PARA  
TEMPERATURAS  
ABAIXO DO  
TERNÁRIO EUTÉTICO**

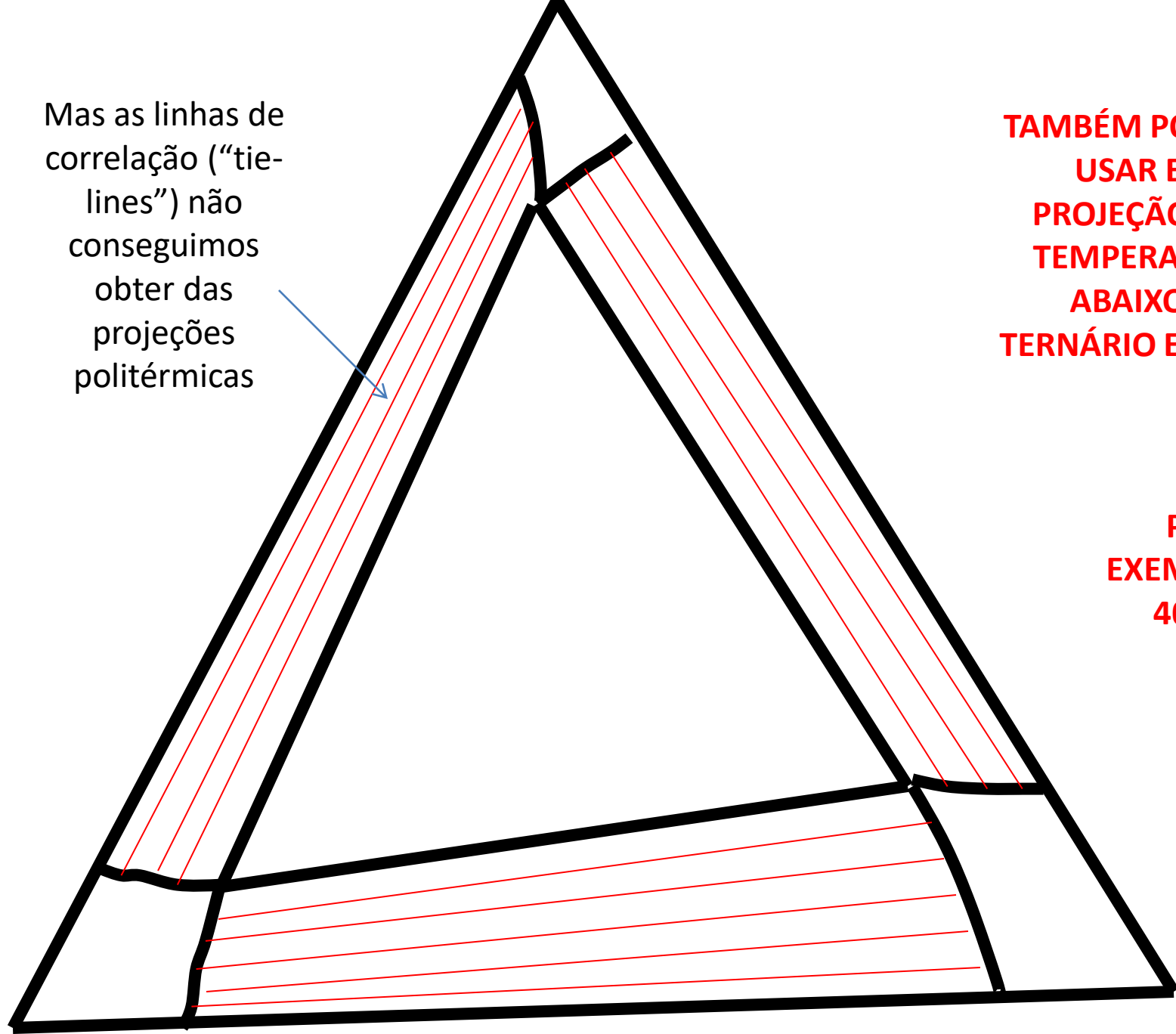
**POR  
EXEMPLO, A  
400°C**

Mas as linhas de correlação (“tie-lines”) não conseguimos obter das projeções politérmicas

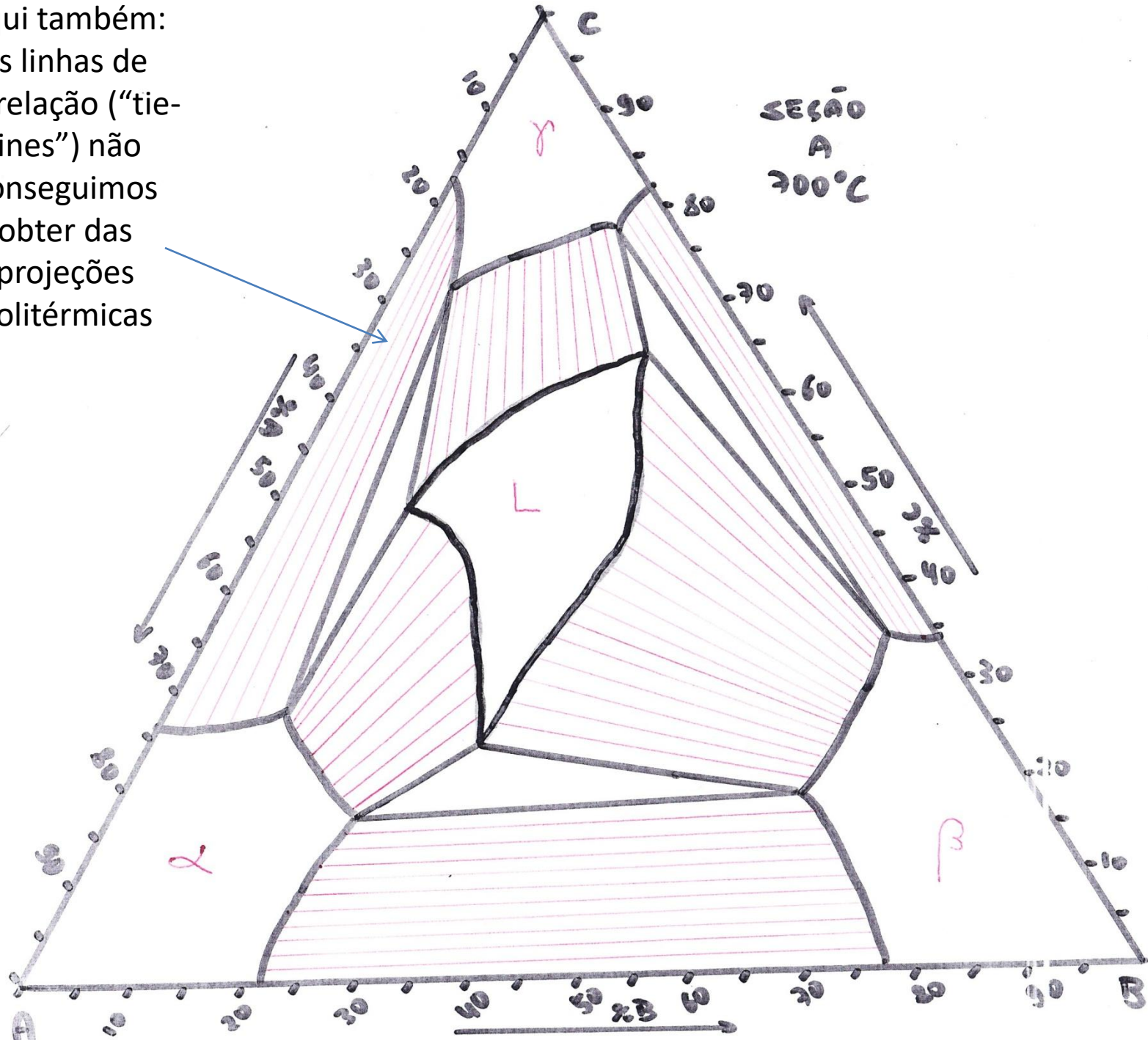


**TAMBÉM PODEMOS USAR ESTA PROJEÇÃO PARA TEMPERATURAS ABAIXO DO TERNÁRIO EUTÉTICO**

**POR EXEMPLO, A 400°C**



Aqui também:  
as linhas de  
correlação ("tie-  
lines") não  
conseguimos  
obter das  
projeções  
politérmicas



SEÇÃO  
A  
700°C

$\gamma$

L

$\alpha$

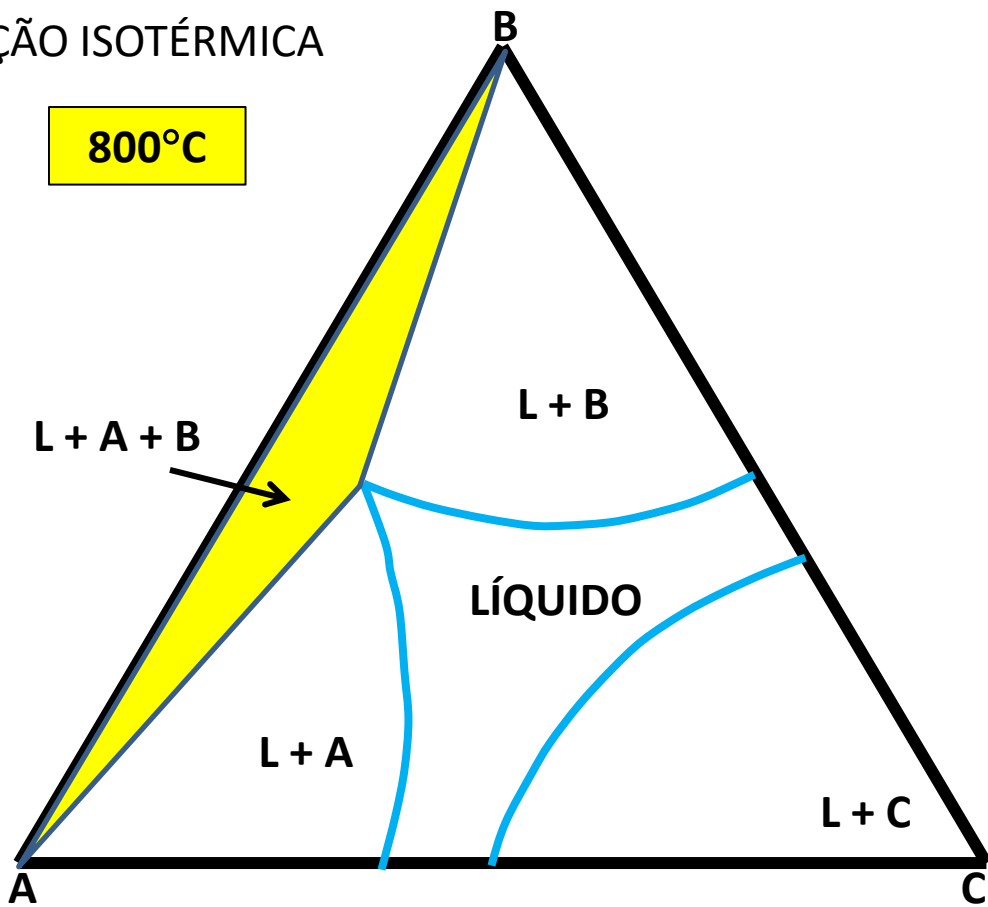
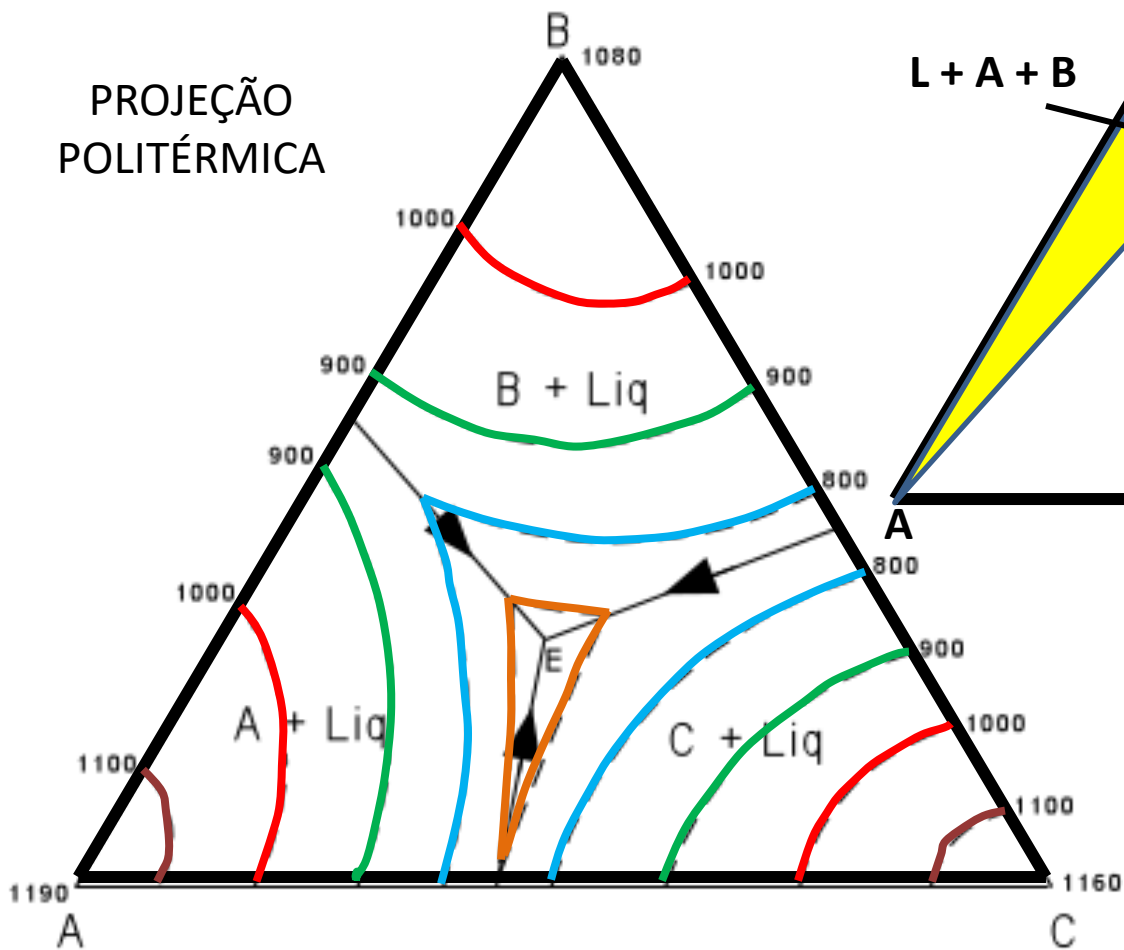
$\beta$

NA AULA 7, HAVÍAMOS SUPOSTO SOLUBILIDADE ZERO NAS FASES SÓLIDAS. ASSIM, ERA POSSÍVEL TRAÇAR LINHAS DE CORRELAÇÃO, POIS A COMPOSIÇÃO DE CADA SÓLIDO ERA ÚNICA

SEÇÃO ISOTÉRMICA

800°C

PROJEÇÃO  
POLITÉRMICA

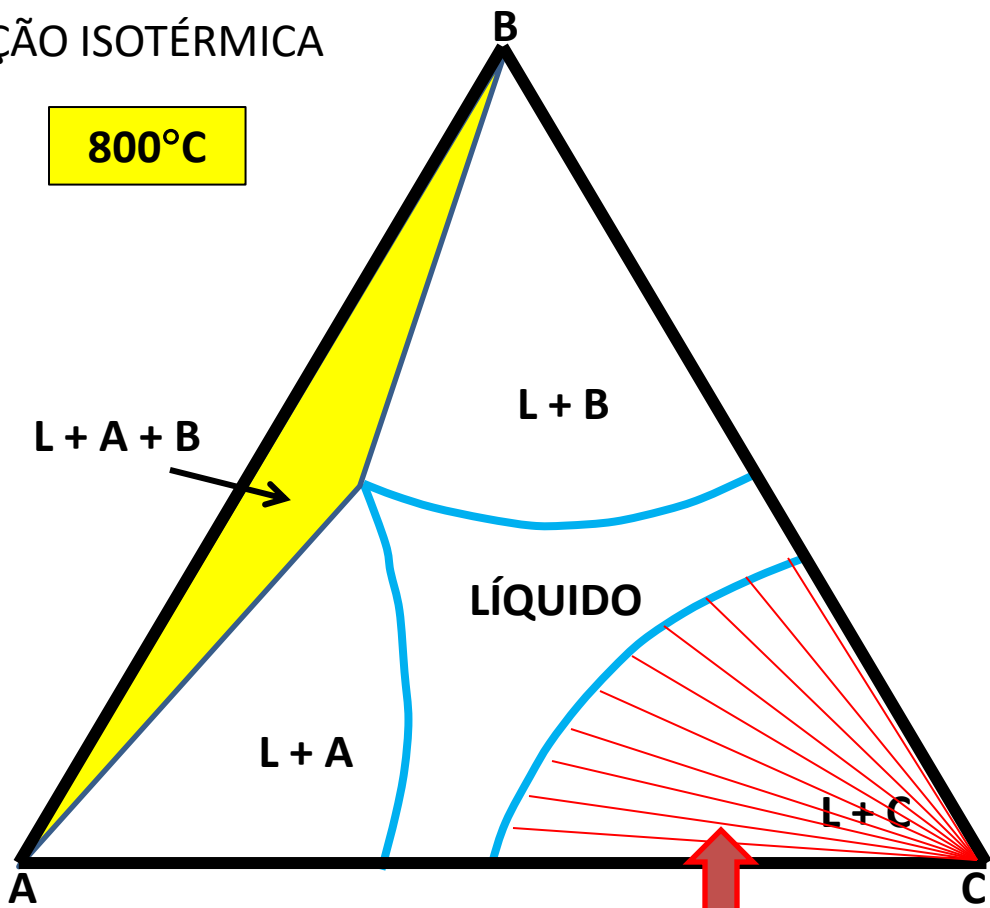
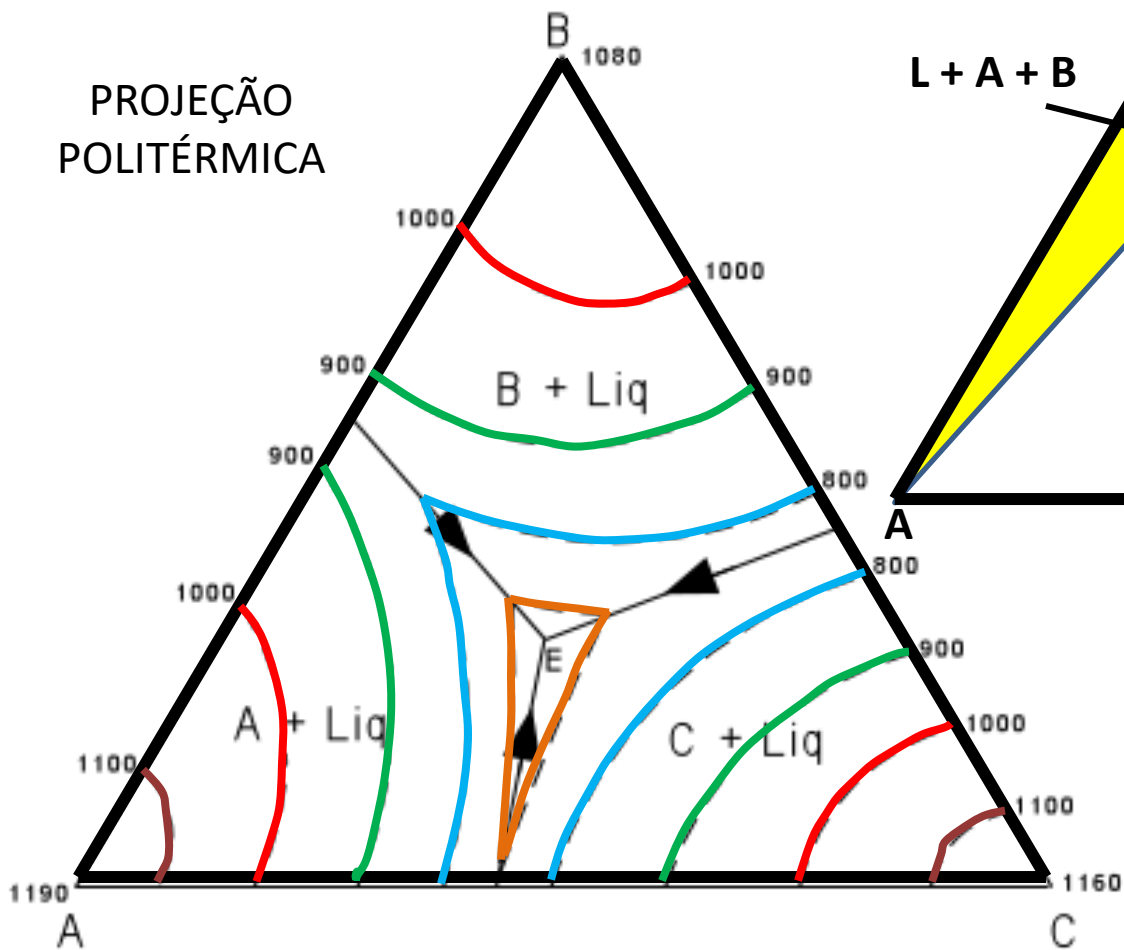


**NA AULA 7, HAVÍAMOS SUPOSTO SOLUBILIDADE ZERO NAS FASES SÓLIDAS. ASSIM, ERA POSSÍVEL TRAÇAR LINHAS DE CORRELAÇÃO, POIS A COMPOSIÇÃO DE CADA SÓLIDO ERA ÚNICA**

SEÇÃO ISOTÉRMICA

800°C

PROJEÇÃO  
POLITÉRMICA



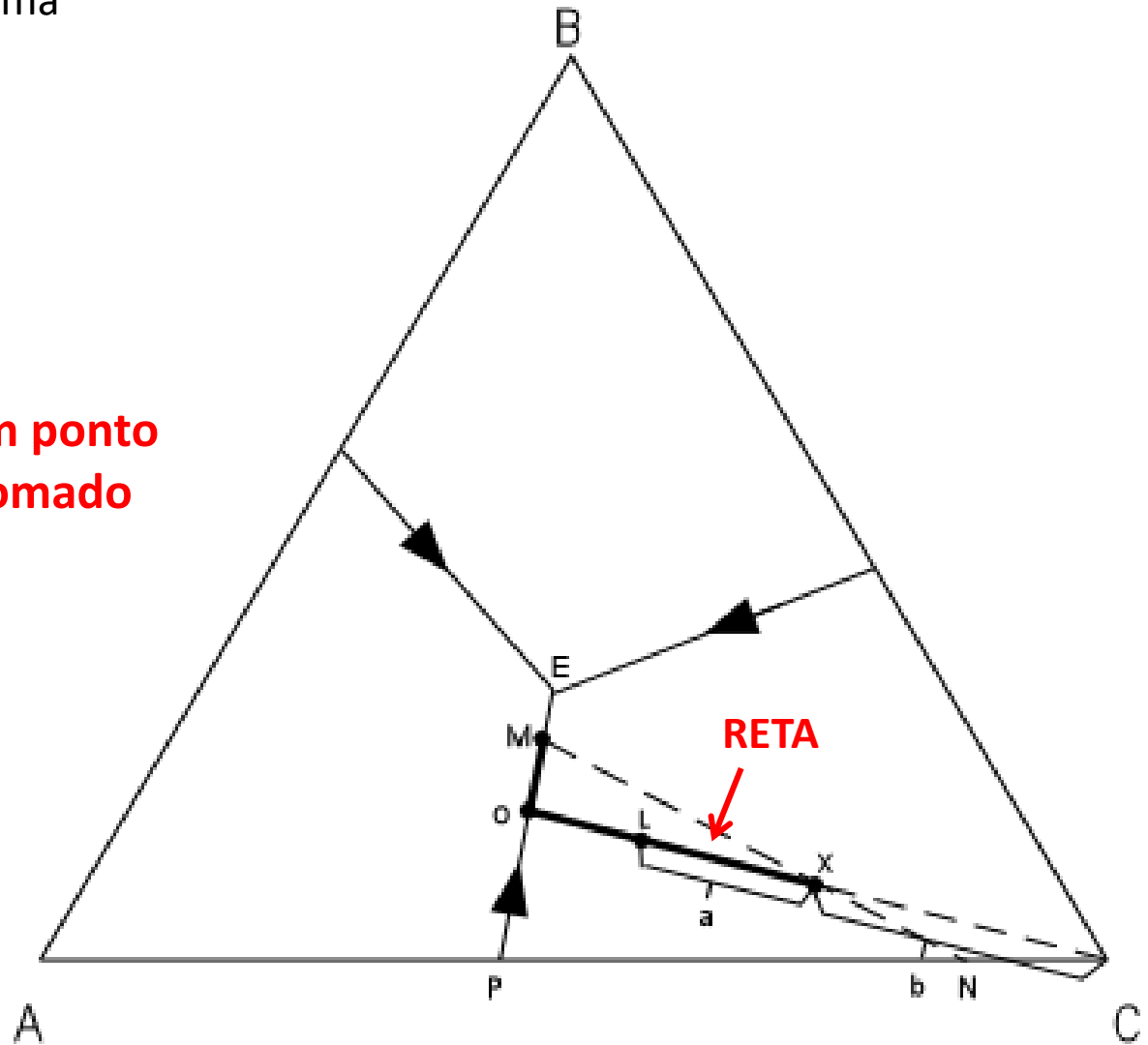
**POR EXEMPLO**



relembrando...

E, assim, podíamos traçar uma sequência de solidificação

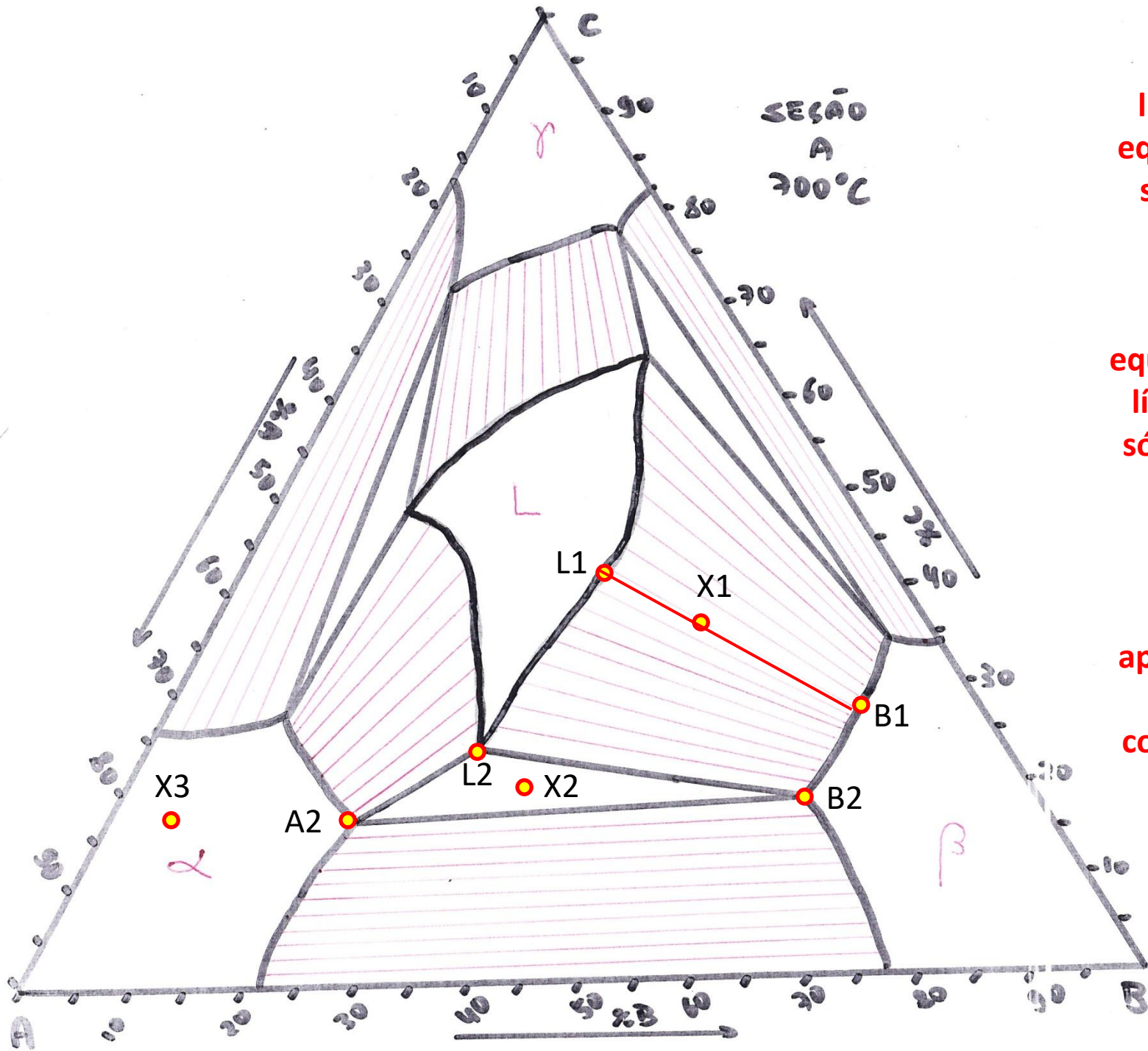
**Atenção:** o ponto "L" é um ponto qualquer da reta C-X-o, tomado apenas como exemplo.



Mas, se as solubilidades não forem nulas, precisamos conhecer ou estimar as linhas de correlação em cada temperatura, desenhando seções isotérmicas, caso estejamos em campos de duas fases.

Se estivermos em campos de três fases, as projeções politérmicas nos indicam suas composições.

Vejamos:



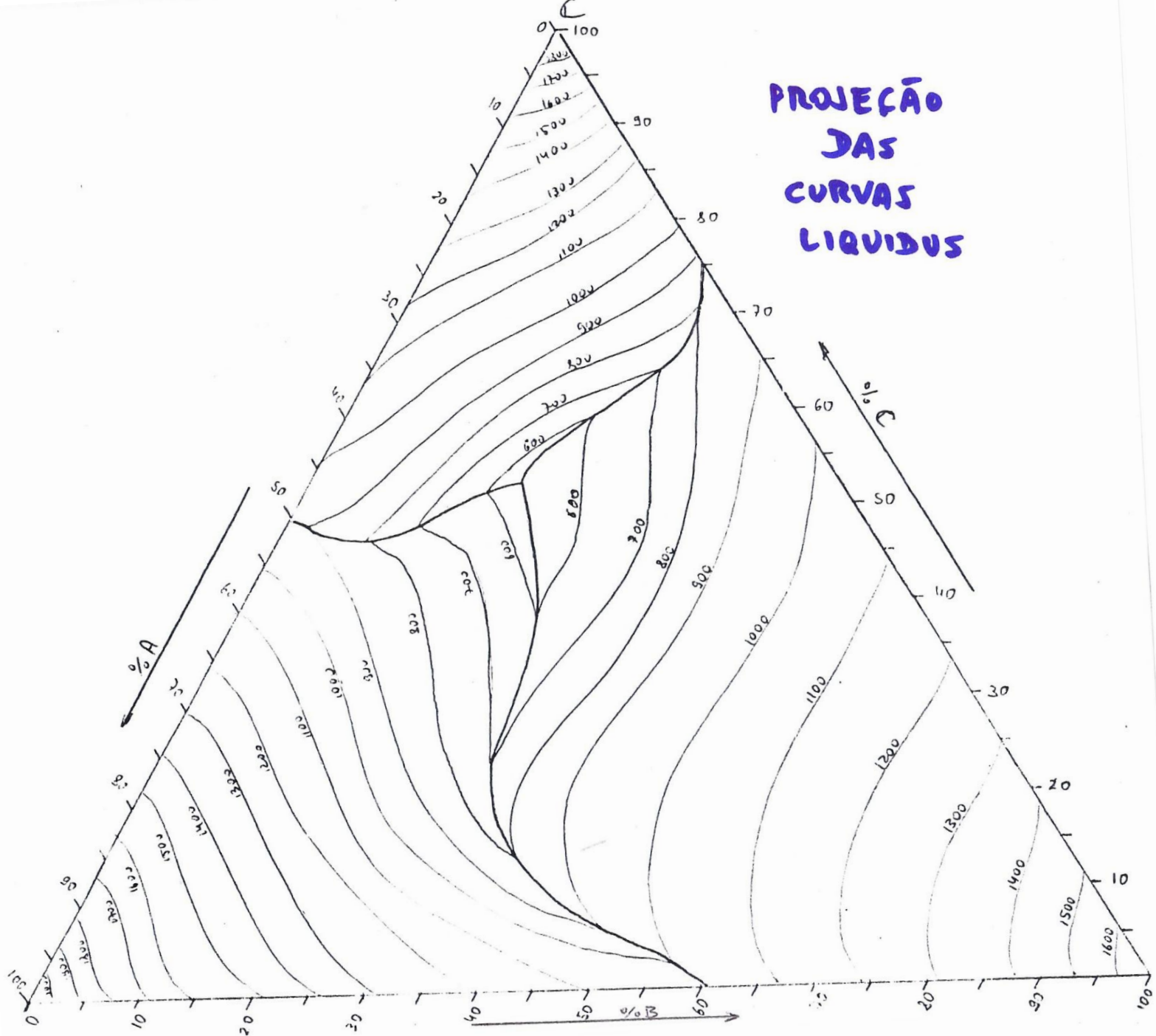
A liga X1 apresenta o líquido L1 em equilíbrio com o sólido  $\beta$  (B1).

A liga X2 apresenta equilíbrio entre o líquido L2 e os sólidos  $\alpha$  (A2) e  $\beta$  (B2).

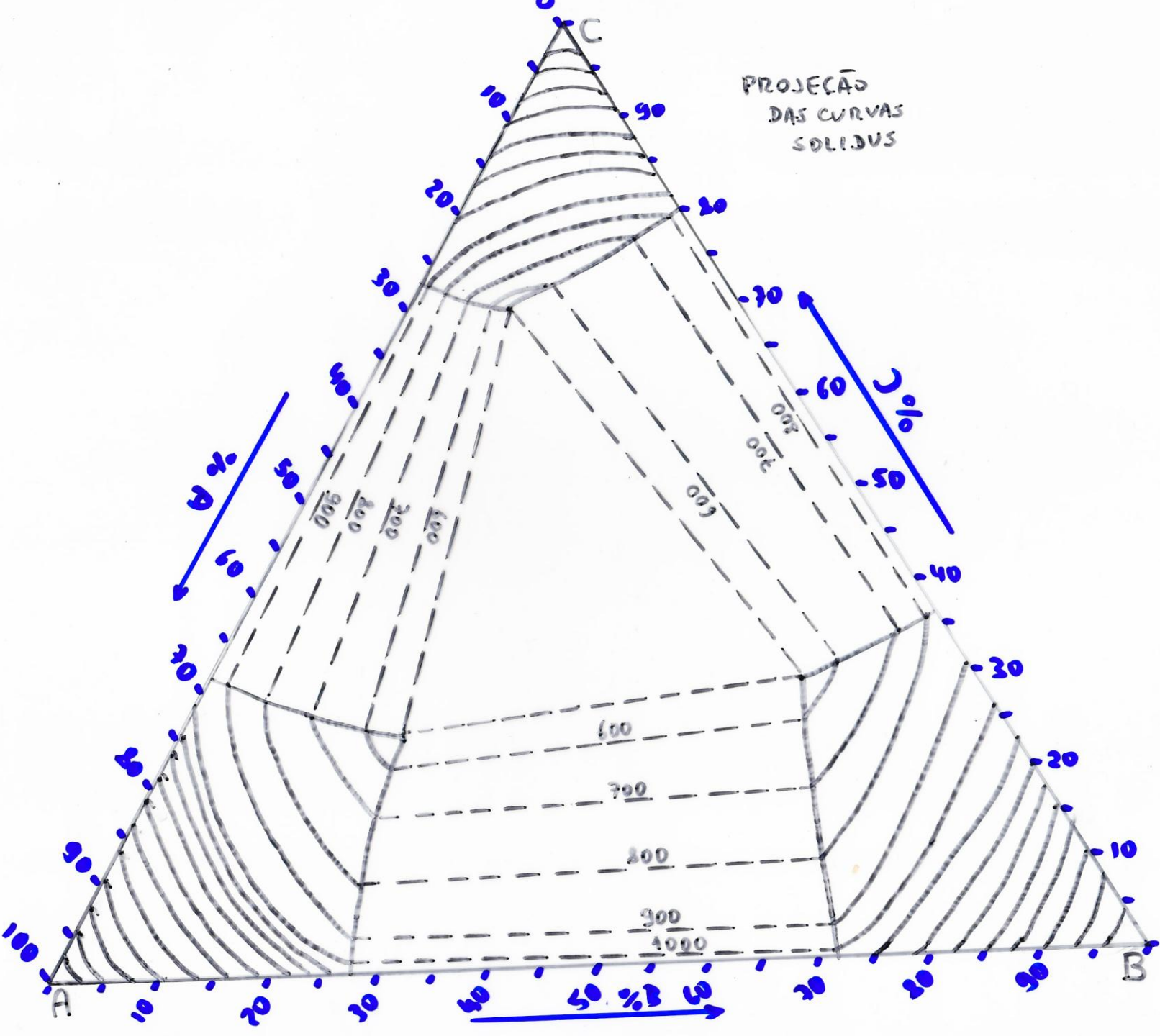
A liga X3 apresenta apenas o sólido  $\alpha$ , com composição X3.

Nos próximos slides, as três  
projeções sem qualquer  
desenho por cima:

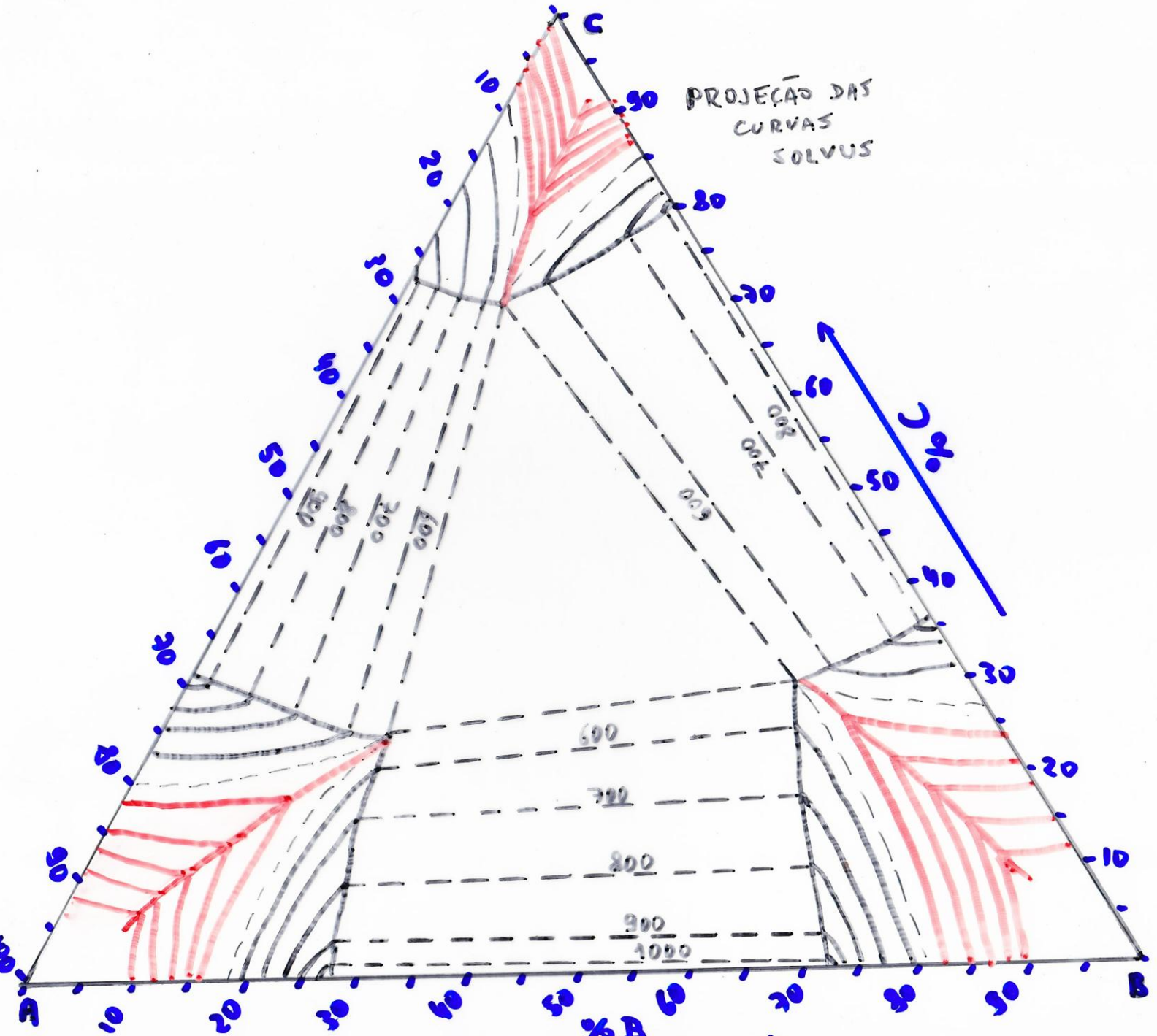
# PROJEÇÃO DAS CURVAS LIQUIDAS



PROJEÇÃO  
DAS CURVAS  
SÓLIDAS

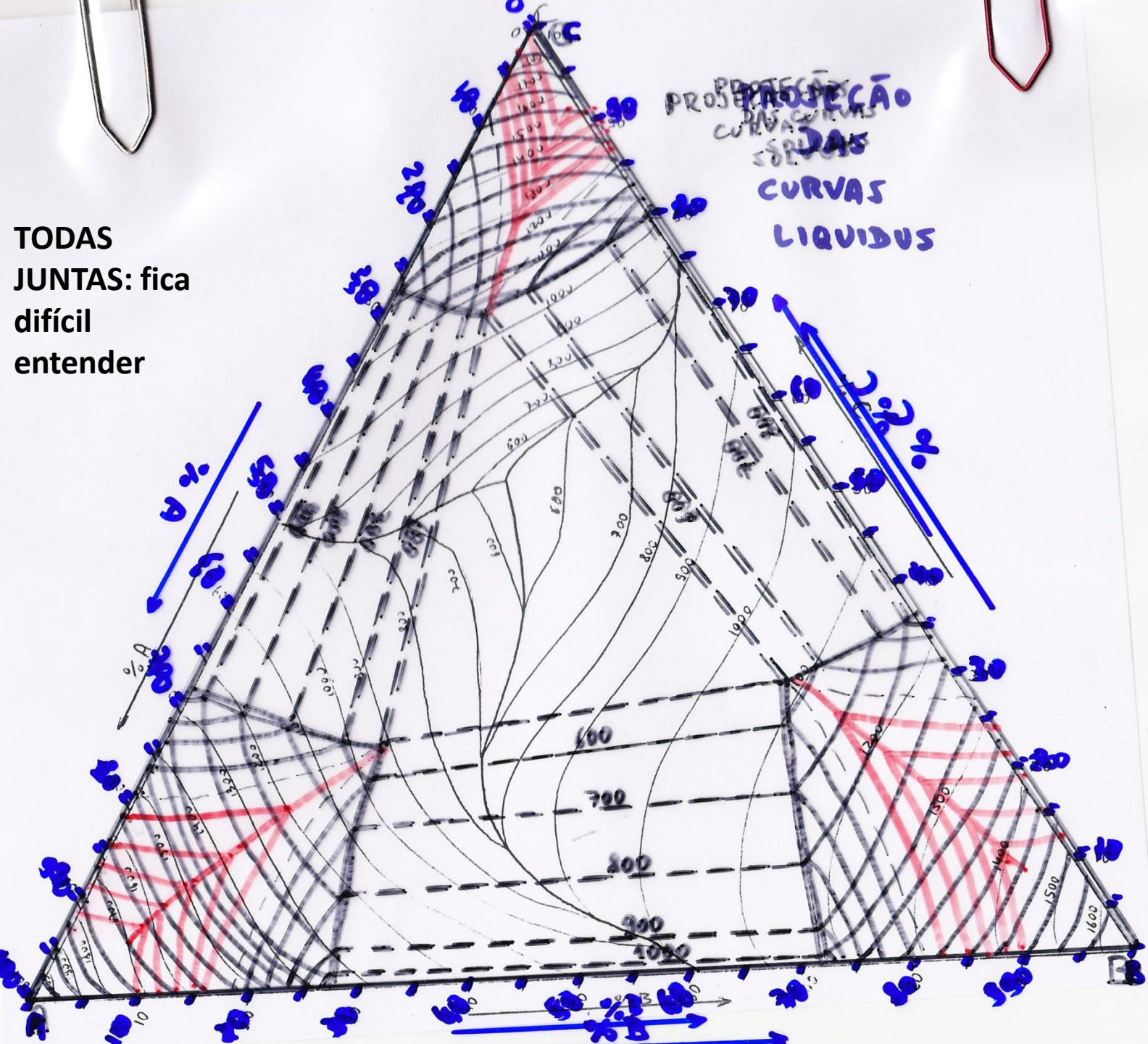


PROJEÇÃO DAS  
CURVAS  
SOLVUS



PROJEÇÃO  
DAS CURVAS  
SOLIDAS  
CURVAS  
LIQUIDAS

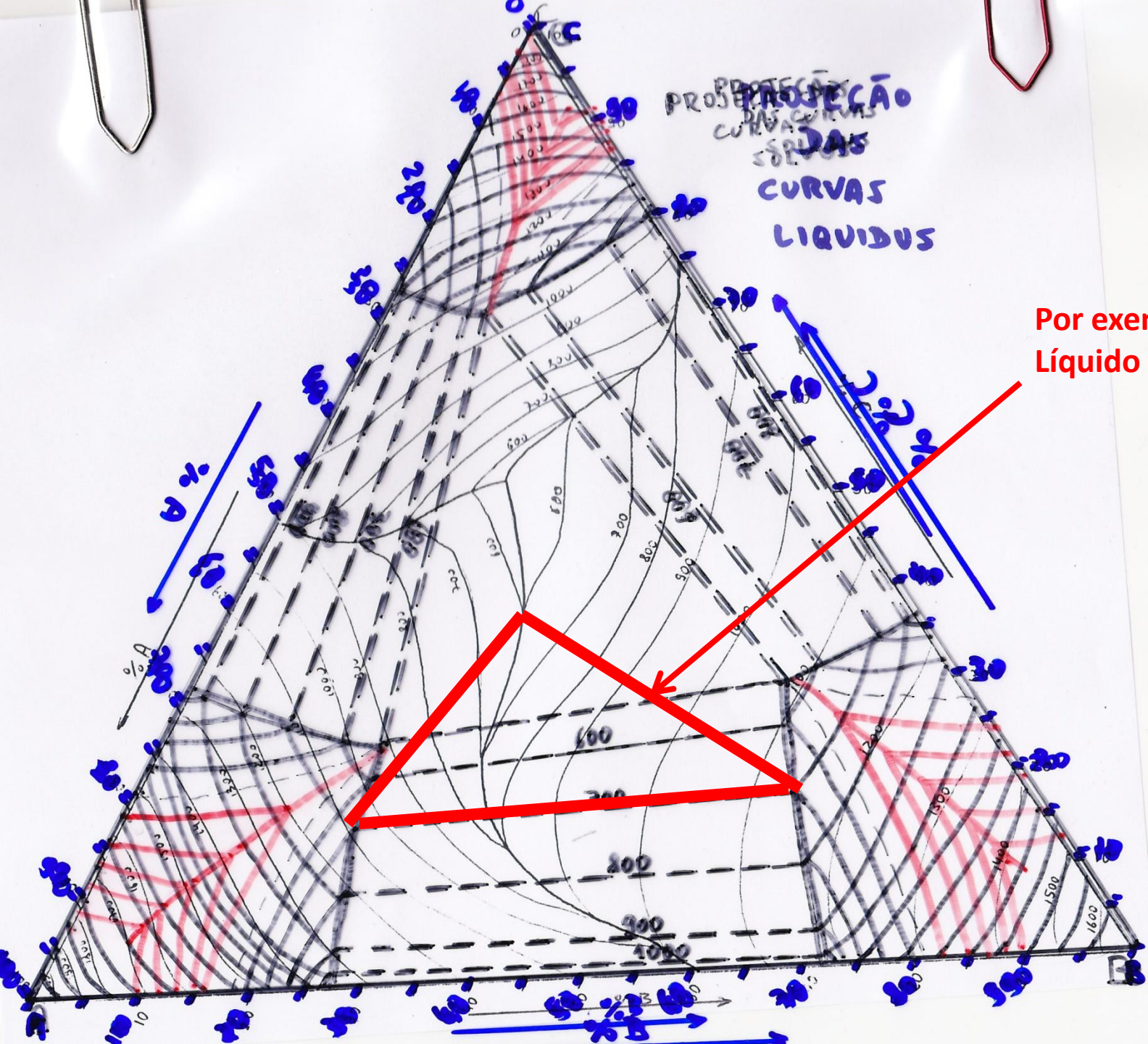
TODAS  
JUNTAS: fica  
difícil  
entender





PROJEÇÃO  
DAS CURVAS  
SOLIDAS  
CURVAS  
LIQUIDAS

Por exemplo, triângulo  
Líquido +  $\alpha$  +  $\beta$  a 700°C



## EXERCÍCIO (A SER PROPOSTO EM AULA FUTURA)

- 1) Façam uma sequência de solidificação em equilíbrio supondo solubilidade nula nos três sólidos (ou seja, o sólido  $\alpha$  não contém os elementos B e C, o sólido  $\beta$  não contém os elementos A e C, e o sólido  $\gamma$  não contém os elementos A e B) para uma liga de composição 40%A, 30%B, 30%C (ou liga com a composição indicada na lousa, se for diferente desta). Indiquem, para cada temperatura escolhida: fases presentes, composições das mesmas, fração das mesmas, reação ocorrendo no caso de resfriamento.
- 2) Calculem as frações das fases presentes em duas ligas a 700°C: uma no campo L +  $\beta$ , outra no campo L +  $\alpha$  +  $\beta$  (usem as composições indicadas na lousa), supondo equilíbrio. Façam o cálculo graficamente (regra da alavanca) e com sistemas de equações.
- 3) Desenhem seções isotérmicas em três temperaturas: 2000°C, 600°C e 400°C (ou nas temperaturas indicadas na lousa, se forem diferentes destas).