

# Diagramas de Fases

## Augusto Camara Neiva

Diagramas ternários: princípios e  
representação

# DIAGRAMAS TERNÁRIOS

## REPRESENTAÇÕES

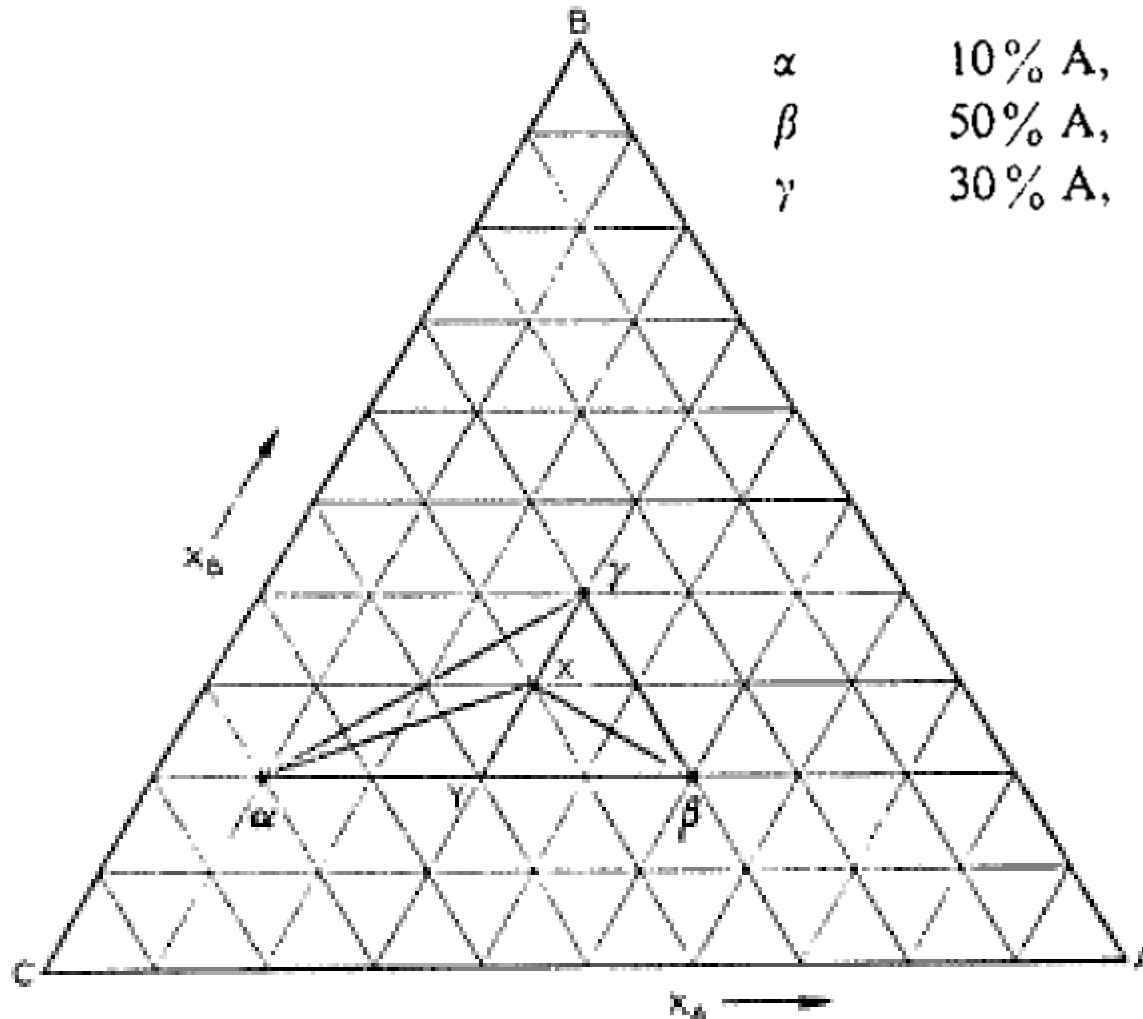
Regra das fases  $L = 4 - F$

supondo pressão fixa

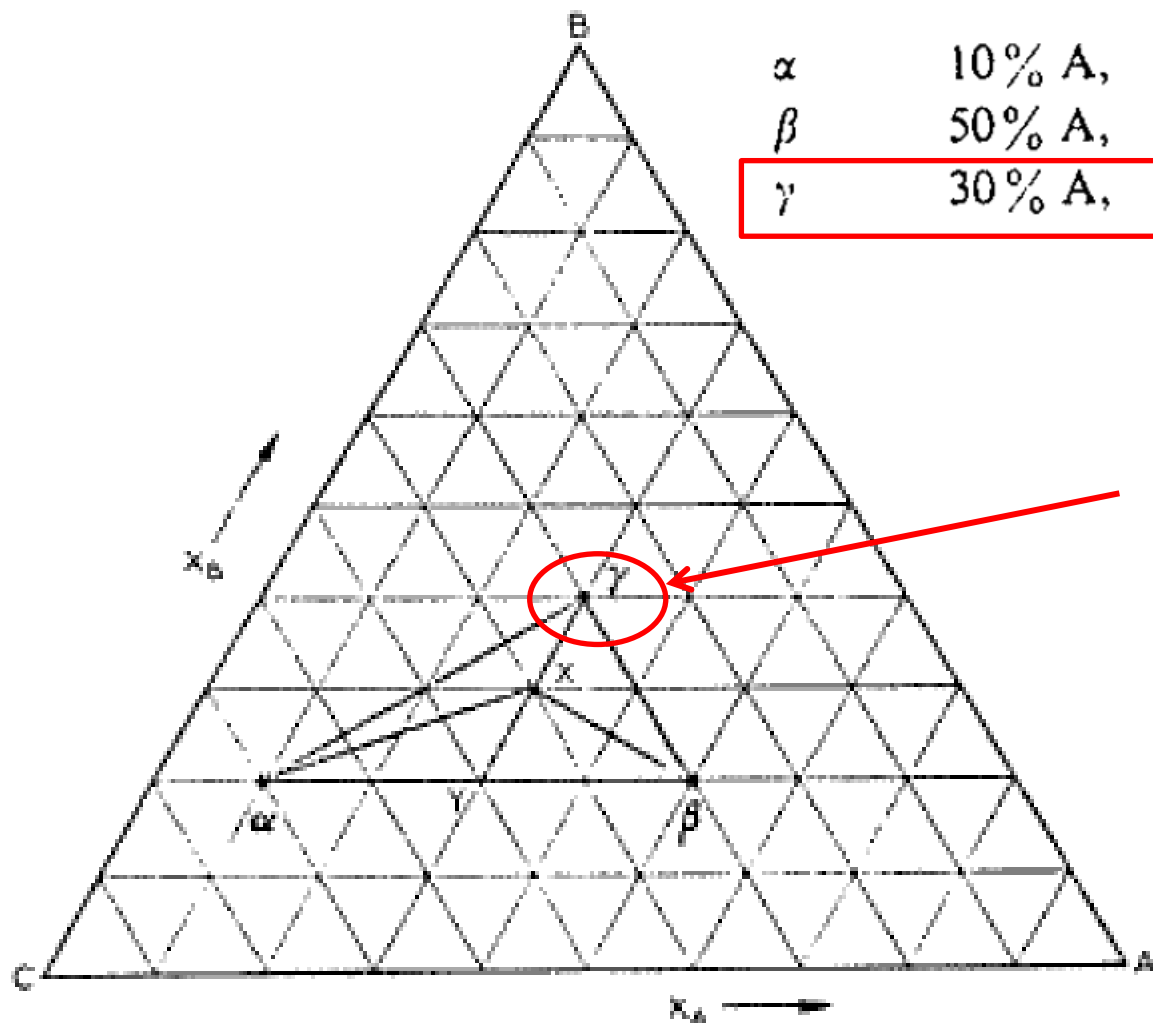
- Seções horizontais isotérmicas
- Seções horizontais politérmicas
- Seções verticais
- Perspectivas tridimensionais (apenas ilustrativas)

REGRA DAS FASES		VARIÁVEIS		
F	L	Temperatura	Composição das fases	
			no espaço	em seção isotérmica
1	3	Livre	Livre (volume)	Livre (área)
2	2	Livre	Duas superfícies intervencionadas	Duas curvas intervencionadas
3	1	Livre	Três curvas	Três pontos
4	0	Fixa	Quatro pontos	Quatro pontos

# TRIÂNGULO DE COMPOSIÇÕES



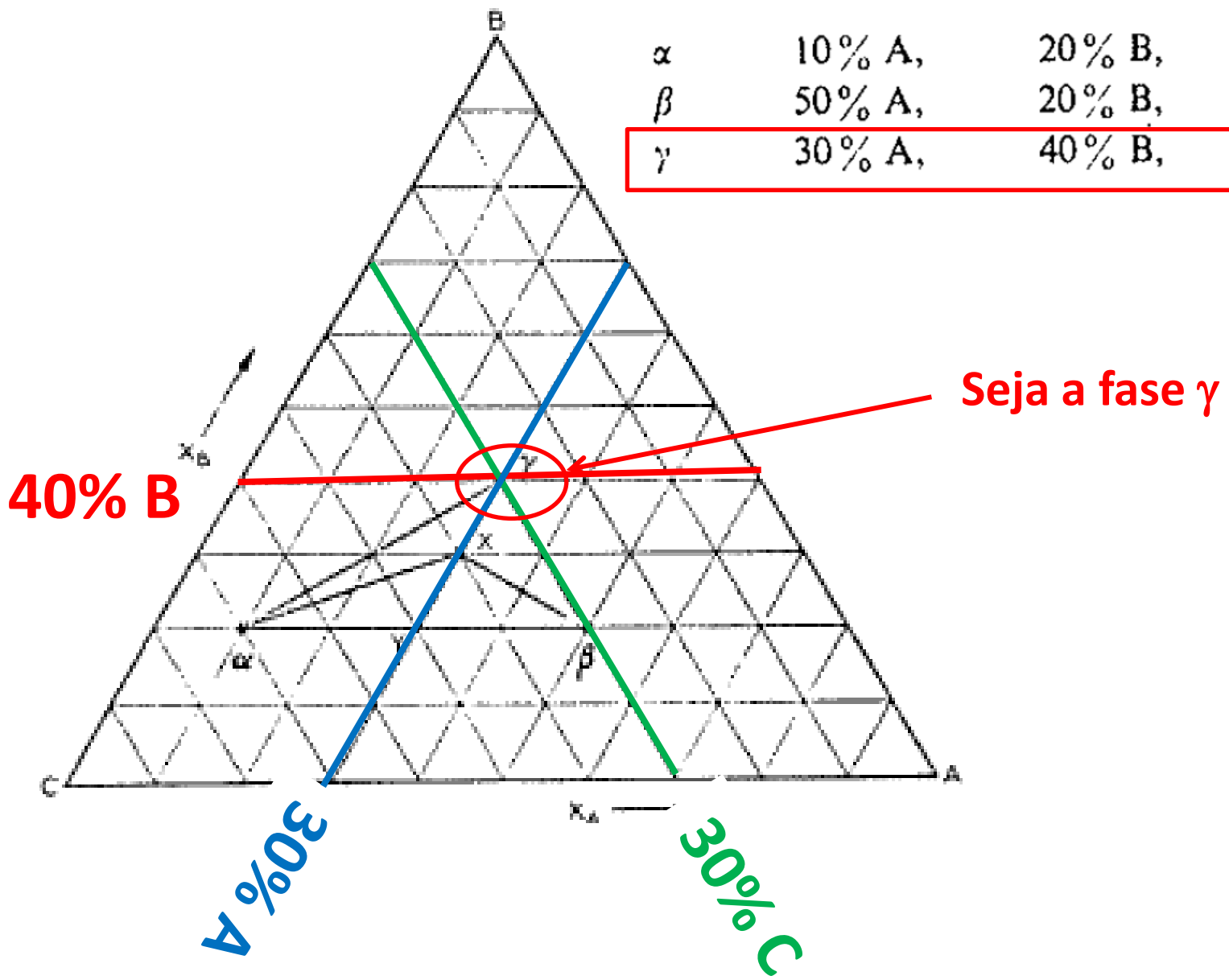
$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.



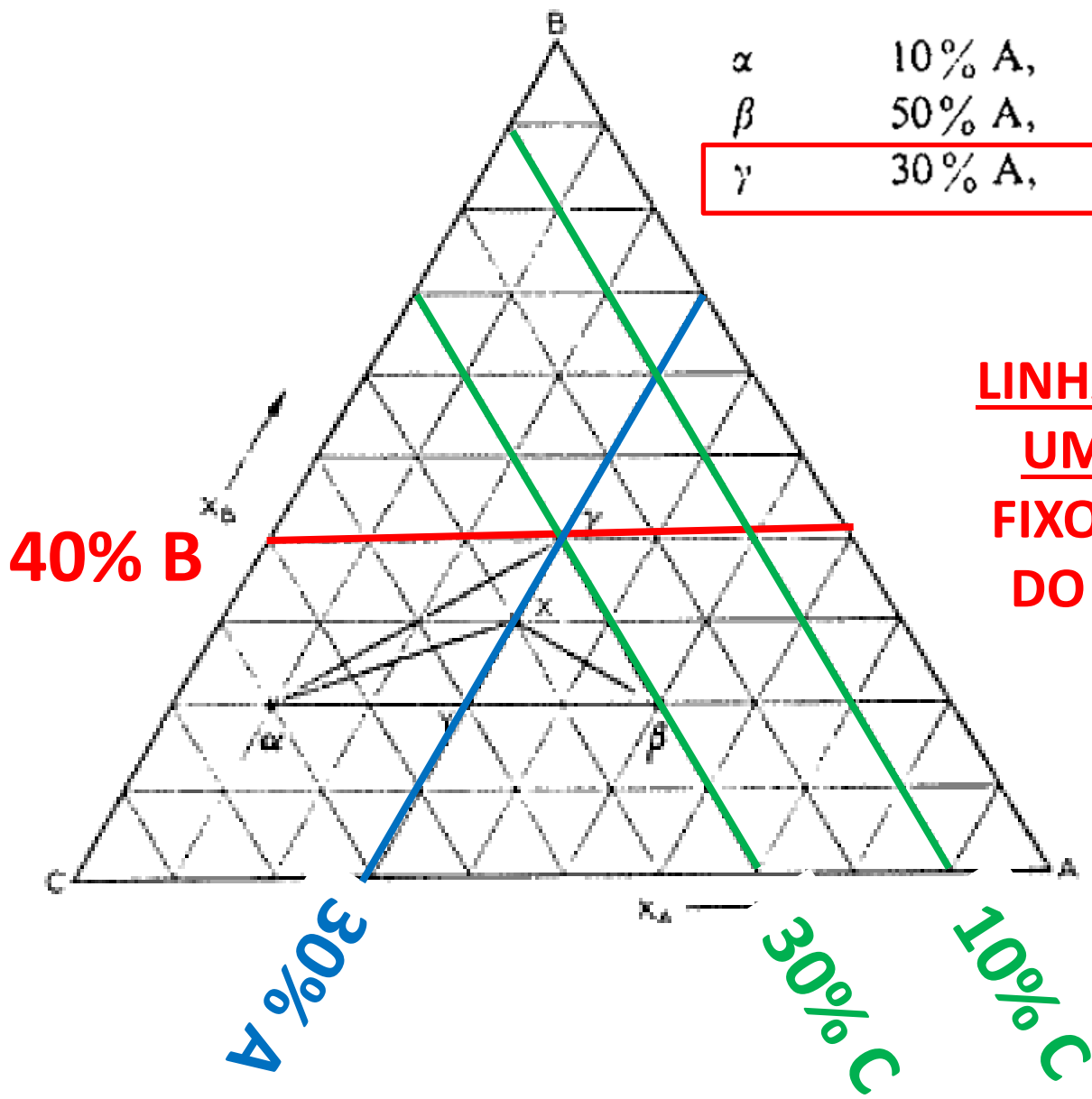
$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.

Seja a fase  $\gamma$

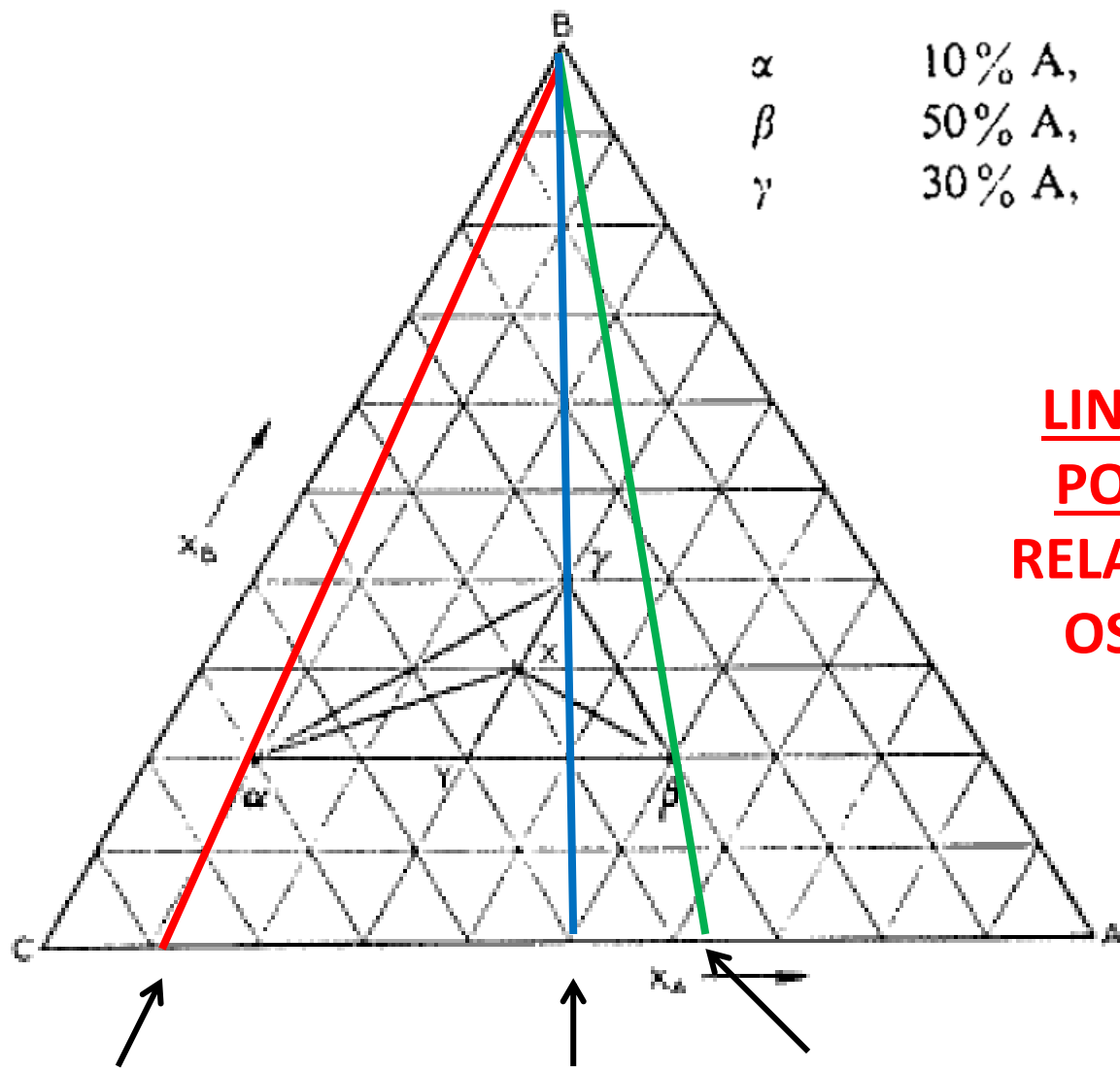
$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.



$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.



**LINHAS PARALELAS A**  
**UMA BASE: TEOR**  
**FIXO DO ELEMENTO**  
**DO LADO OPOSTO**



$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.

**LINHAS PASSANDO  
POR UM VÉRTICE:  
RELAÇÃO FIXA ENTRE  
OS OUTROS DOIS  
ELEMENTOS**

**A/C=1/7**

**A/C=1/1**

**A/C=5/3**

TIE LINES AND TIE TRIANGLES

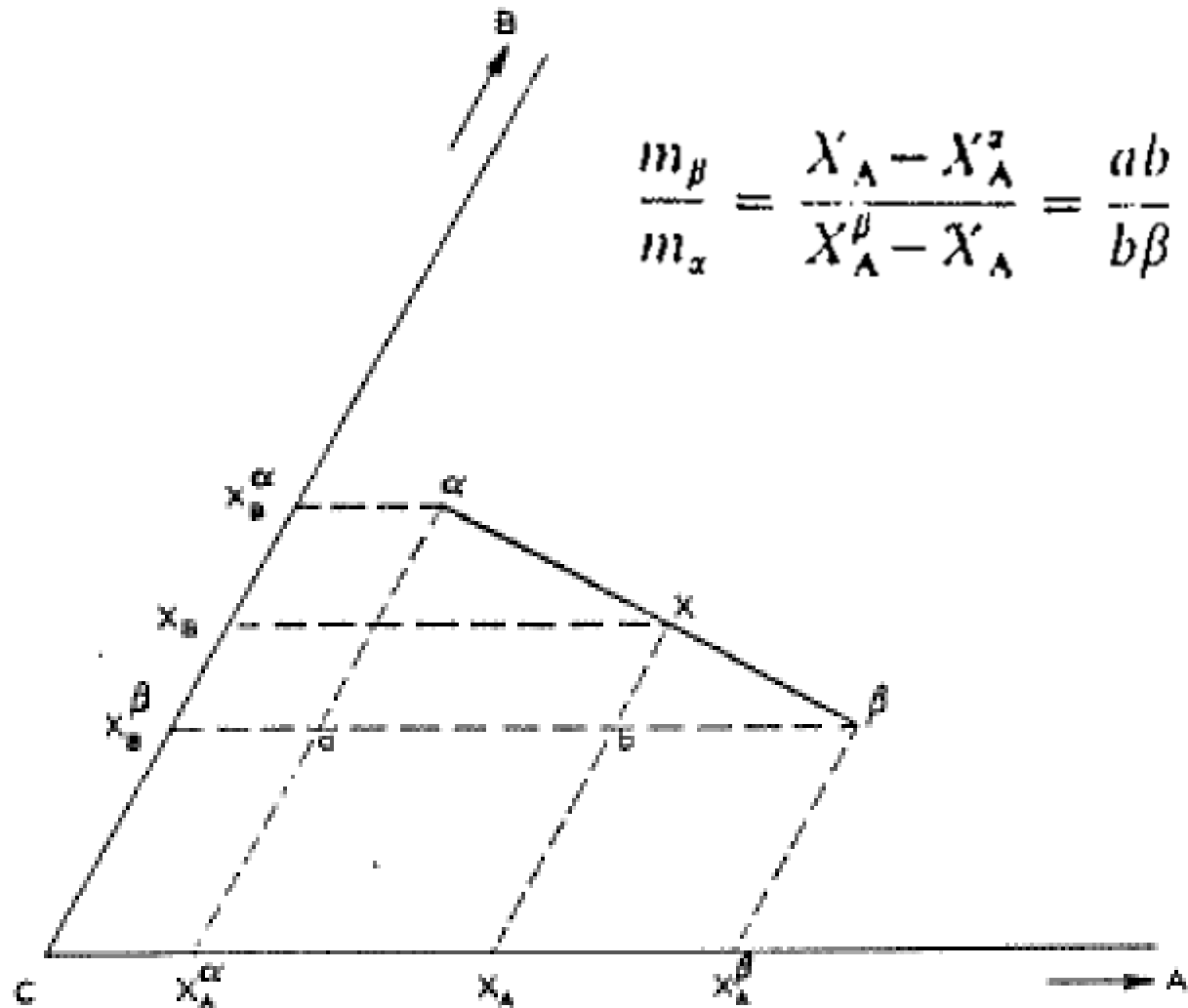
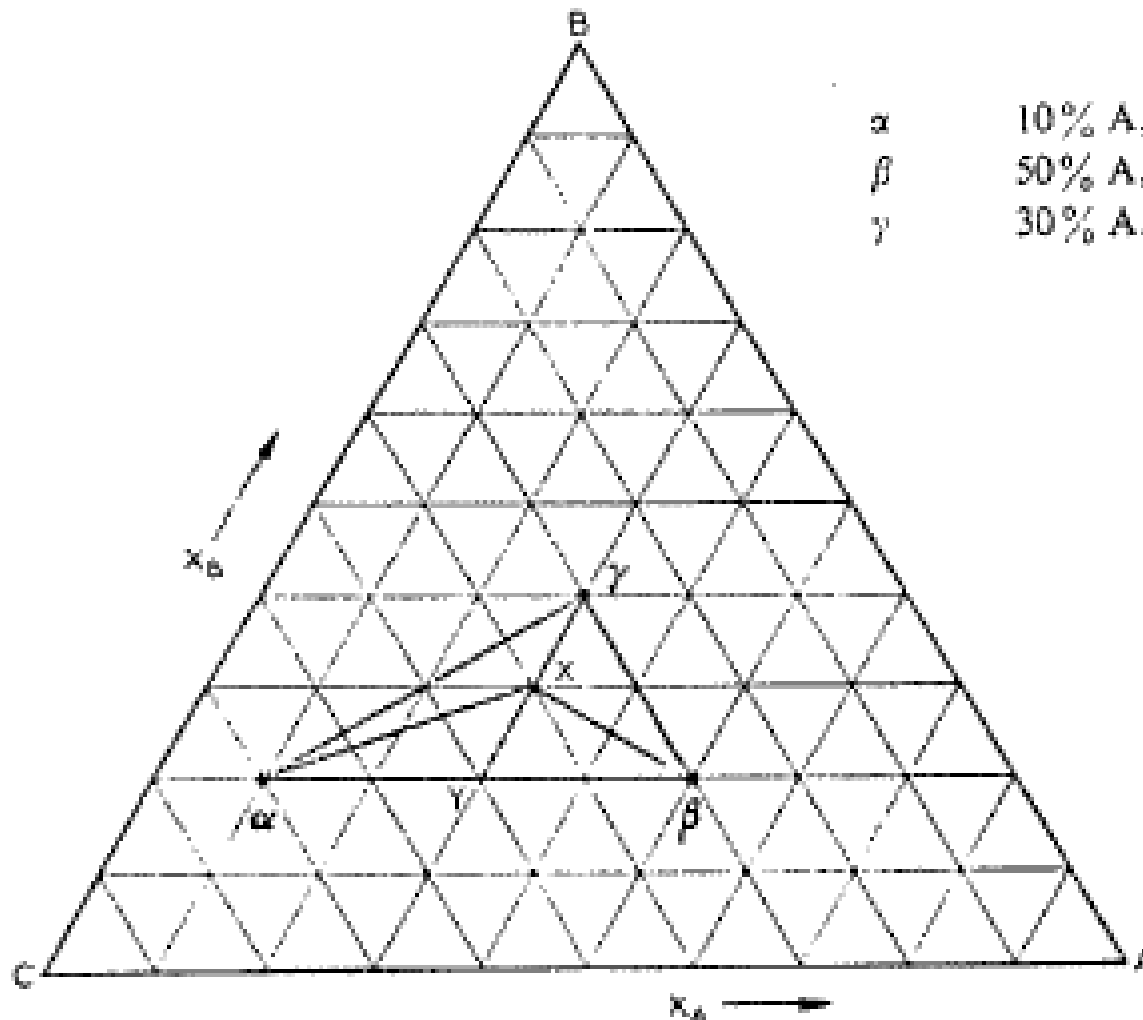


Fig. 108. Application of the lever rule to a ternary alloy  $X$  consisting of the two phases  $\alpha$  and  $\beta$ .



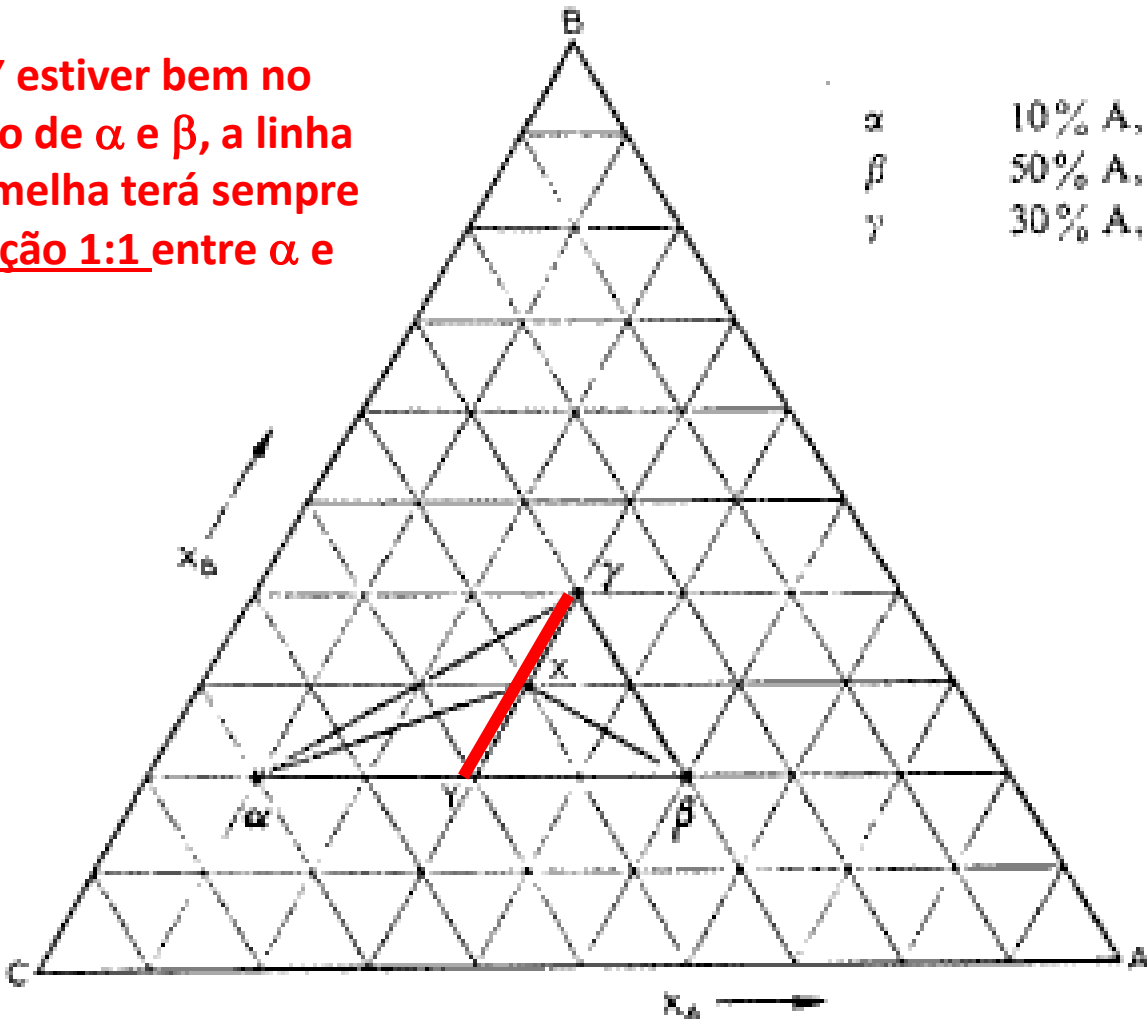


$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.

Vamos supor que a liga tenha 25%  $\alpha$ , 25%  $\beta$  e 50%  $\gamma$ . Qual a composição da liga?

Se Y estiver bem no meio de  $\alpha$  e  $\beta$ , a linha vermelha terá sempre relação 1:1 entre  $\alpha$  e  $\beta$ .

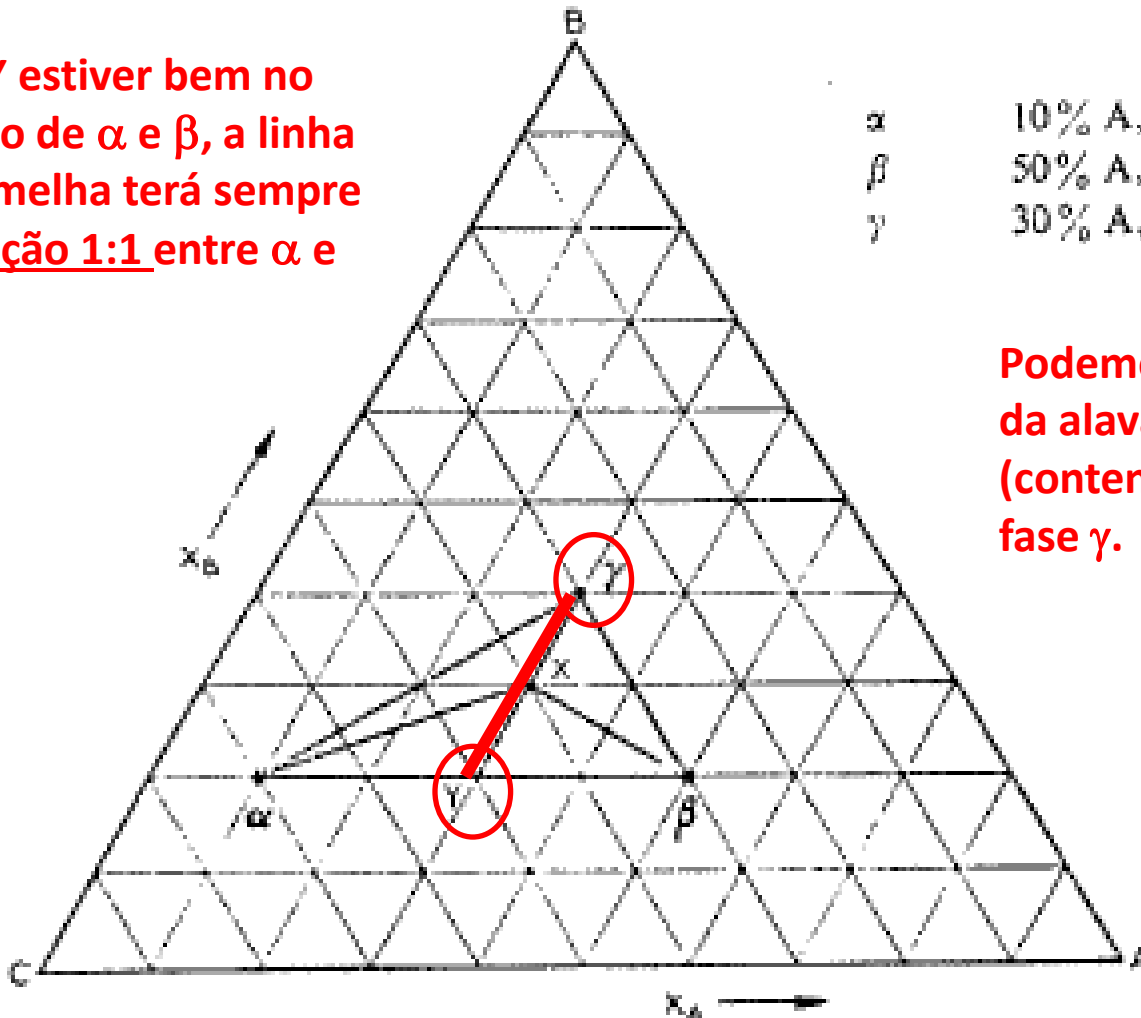
$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.



Vamos supor que a liga tenha 25%  $\alpha$ , 25%  $\beta$  e 50%  $\gamma$ . Qual a composição da liga?

Se Y estiver bem no meio de  $\alpha$  e  $\beta$ , a linha vermelha terá sempre relação 1:1 entre  $\alpha$  e  $\beta$ .

$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.

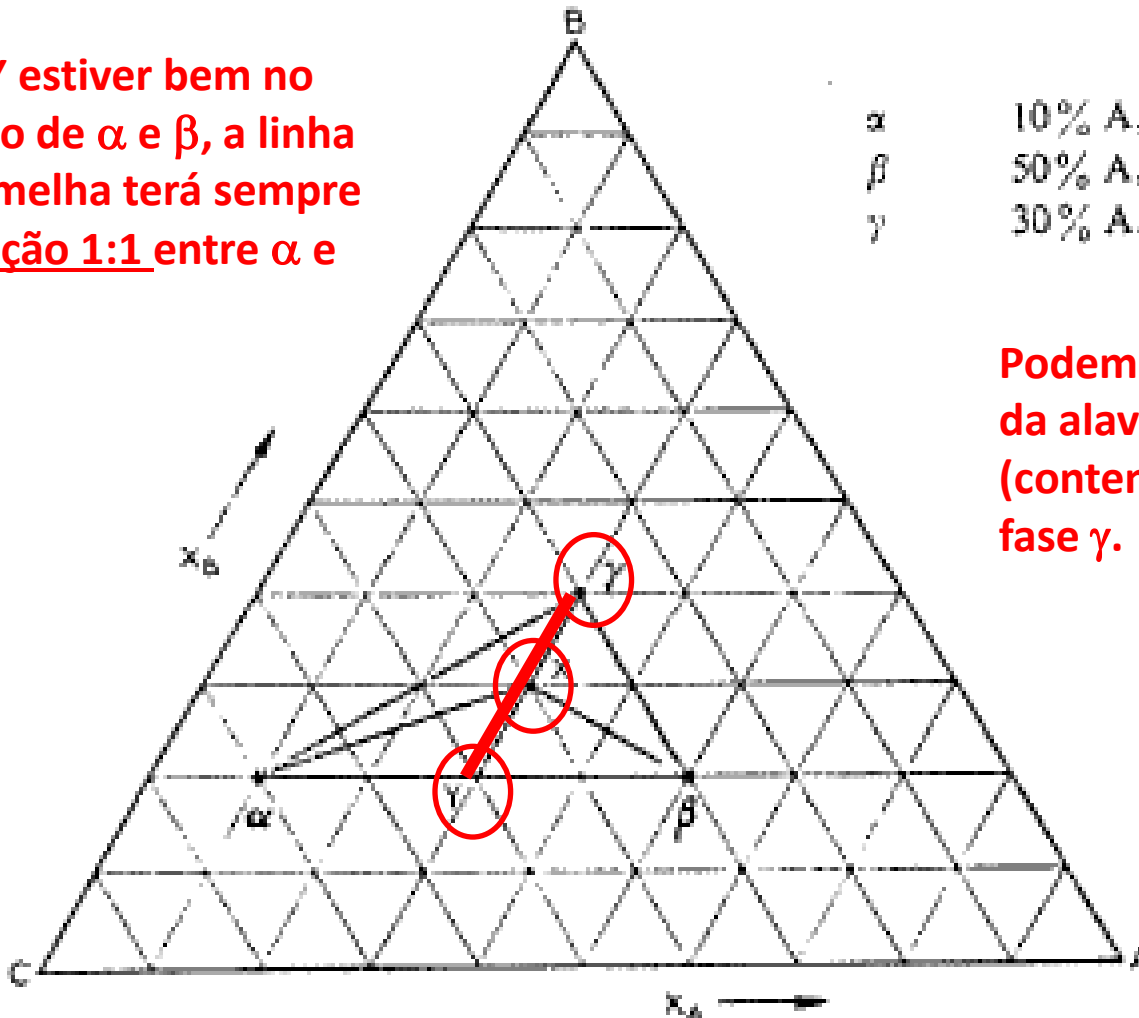


Podemos agora aplicar a regra da alavanca entre uma liga Y (contendo apenas  $\alpha$  e  $\beta$ ) e a fase  $\gamma$ .

Vamos supor que a liga tenha 25%  $\alpha$ , 25%  $\beta$  e 50%  $\gamma$ . Qual a composição da liga?

Se Y estiver bem no meio de  $\alpha$  e  $\beta$ , a linha vermelha terá sempre relação 1:1 entre  $\alpha$  e  $\beta$ .

$\alpha$	10% A,	20% B,	70% C,
$\beta$	50% A,	20% B,	30% C,
$\gamma$	30% A,	40% B,	30% C.

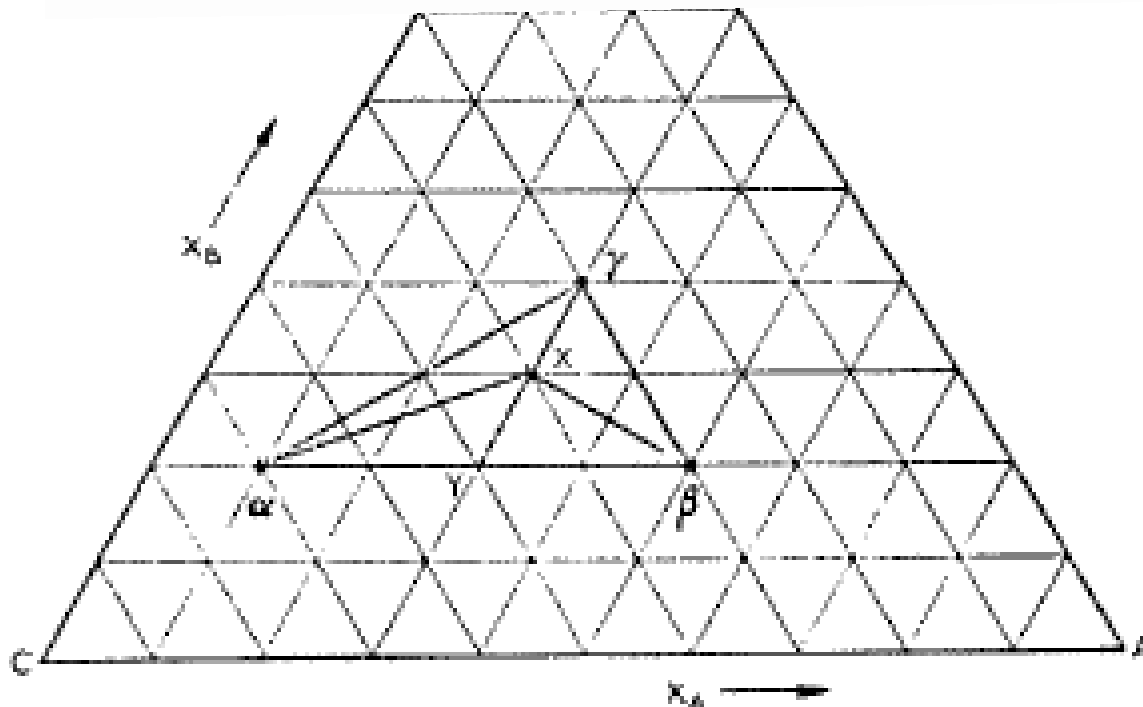


Podemos agora aplicar a regra da alavanca entre uma liga Y (contendo apenas  $\alpha$  e  $\beta$ ) e a fase  $\gamma$ .

Y terá 50% e a fase  $\gamma$ . Assim, a liga X está bem no meio entre Y e  $\gamma$ .

Vamos supor que a liga tenha 25%  $\alpha$ , 25%  $\beta$  e 50%  $\gamma$ . Qual a composição da liga?

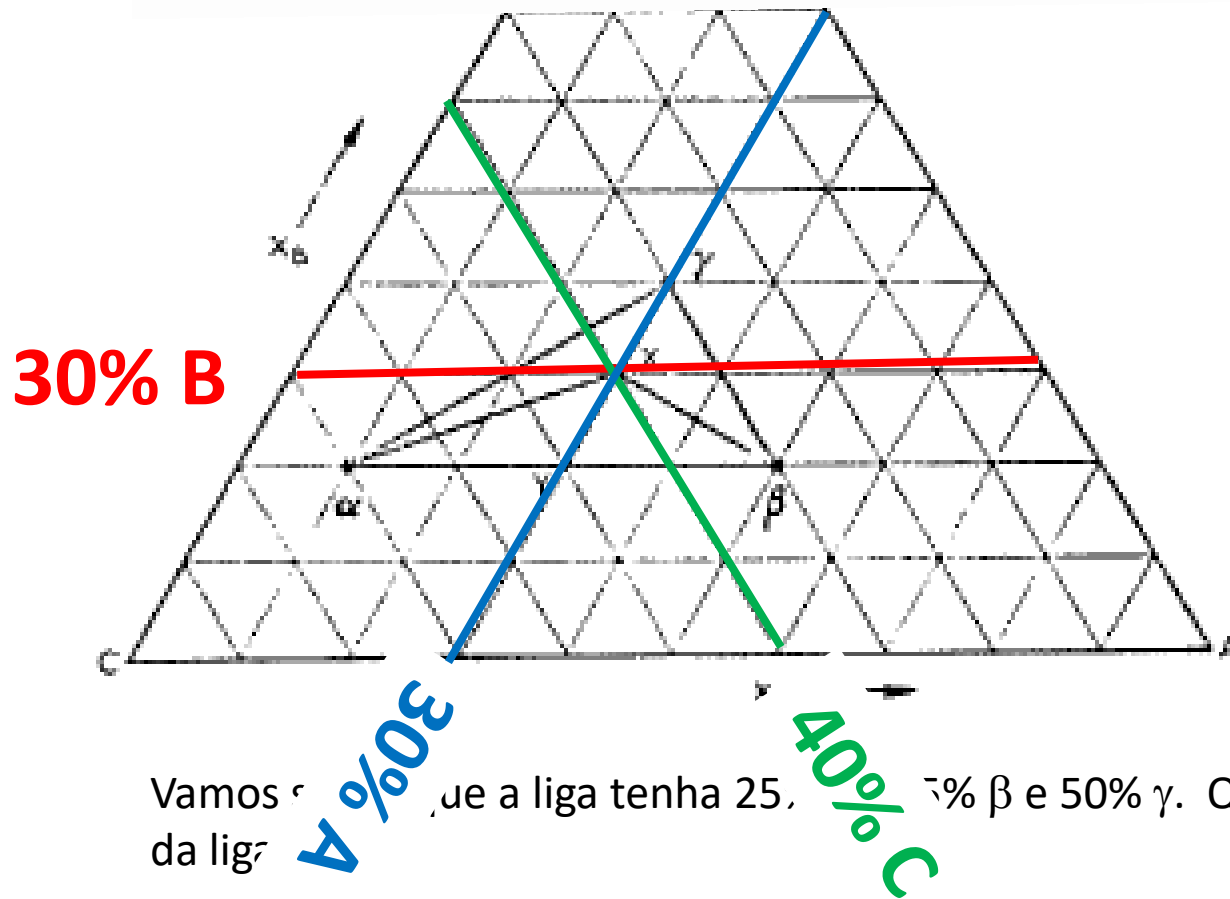
$$\left. \begin{aligned}
 0.25 (10\%) + 0.25 (50\%) + 0.5 (30\%) &= 30\% \text{ A} \\
 0.25 (20\%) + 0.25 (20\%) + 0.5 (40\%) &= 30\% \text{ B} \\
 0.25 (70\%) + 0.25 (30\%) + 0.5 (30\%) &= 40\% \text{ C}
 \end{aligned} \right\} X$$



**X é o centro de gravidade do triângulo**

Vamos supor que a liga tenha 25%  $\alpha$ , 25%  $\beta$  e 50%  $\gamma$ . Qual a composição da liga?

$$\left. \begin{aligned} 0.25 (10\%) + 0.25 (50\%) + 0.5 (30\%) &= 30\% \text{ A} \\ 0.25 (20\%) + 0.25 (20\%) + 0.5 (40\%) &= 30\% \text{ B} \\ 0.25 (70\%) + 0.25 (30\%) + 0.5 (30\%) &= 40\% \text{ C} \end{aligned} \right\} X$$



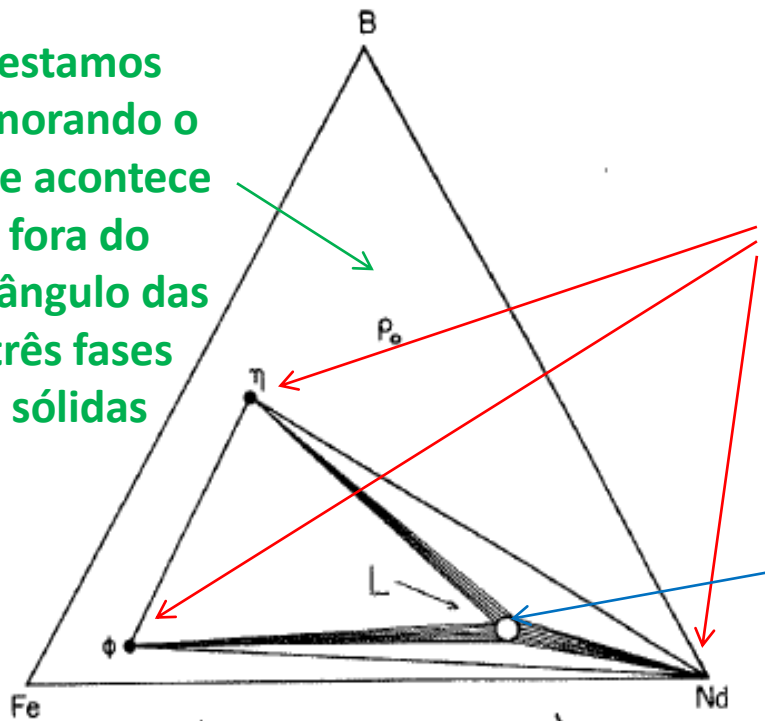
X é o centro de gravidade do triângulo

# EXEMPLO DE SEÇÕES ISOTÉRMICAS

Façam um paralelo com um eutético binário

a)  $T > 665^{\circ}\text{C}$

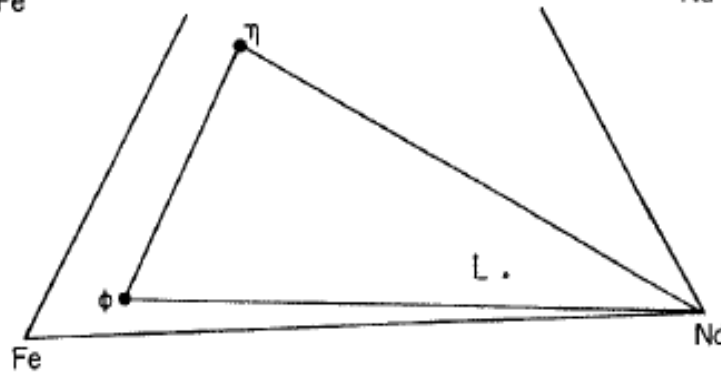
estamos ignorando o que acontece fora do triângulo das três fases sólidas



três sólidos com campos de solubilidade muito estreitos

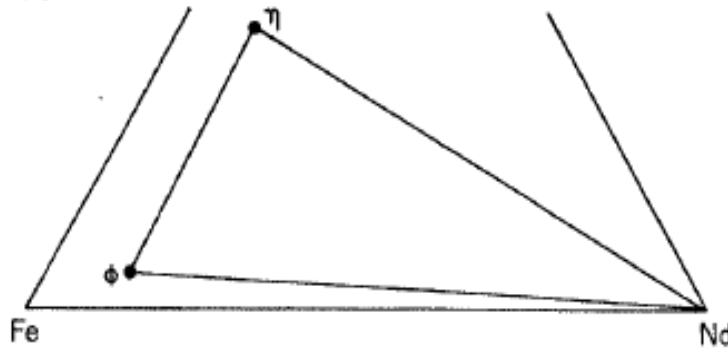
um líquido

b)  $T = 665^{\circ}\text{C}$

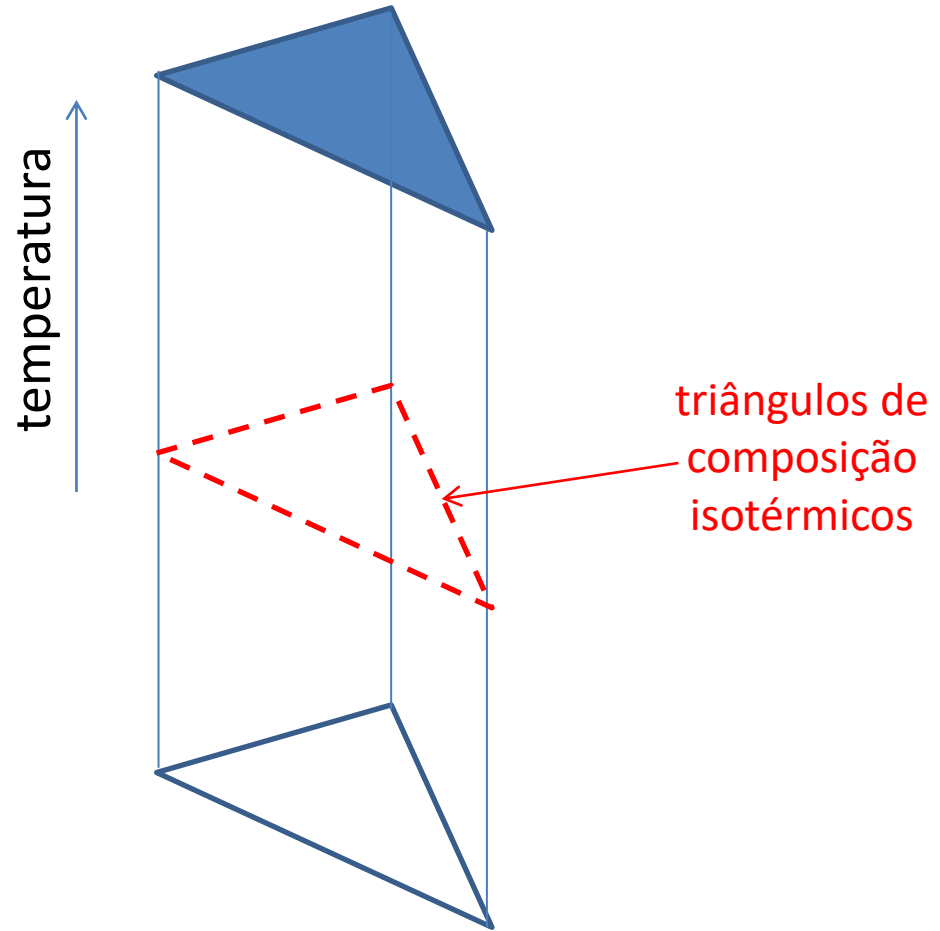


os três sólidos em equilíbrio com o líquido

c)  $T < 665^{\circ}\text{C}$



os três sólidos





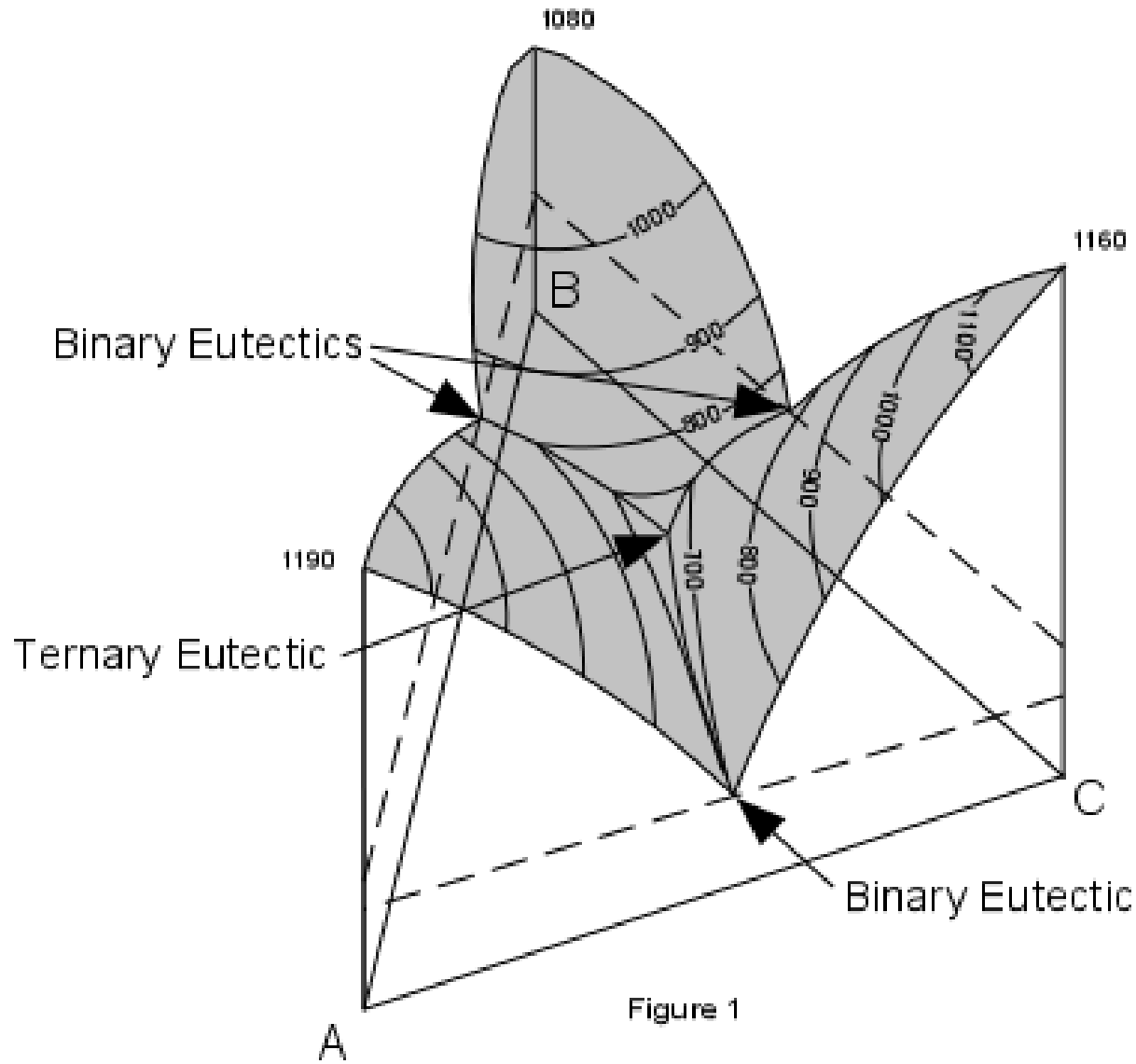


Figure 1

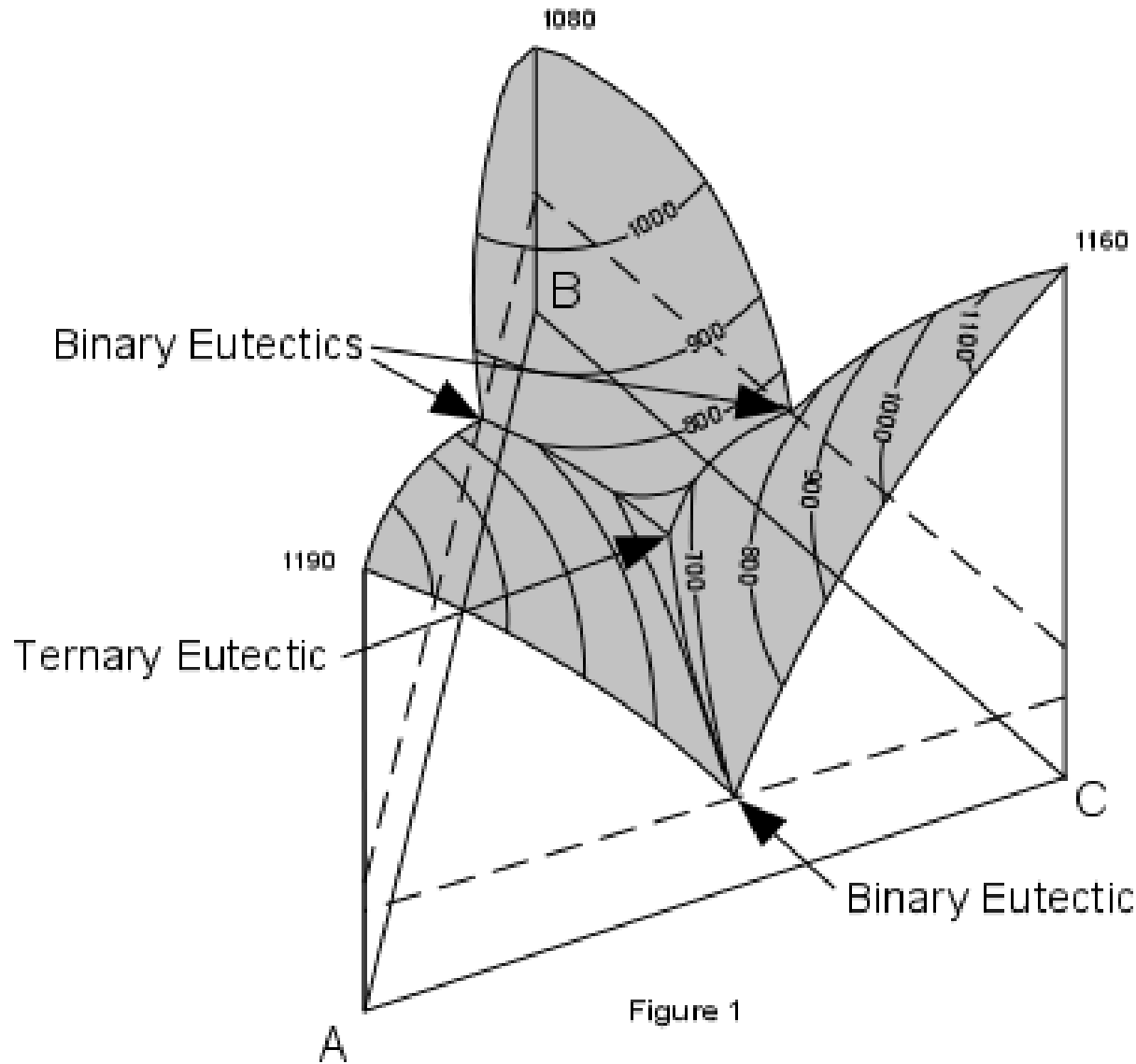


Figure 1

**ATENÇÃO:**  
 NESTE E NOS  
 PRÓXIMOS  
 EXEMPLOS, AS  
 FASES SÓLIDAS  
 TERÃO  
 SOLUBILIDADE  
 NULA PARA OS  
 DEMAIS  
 ELEMENTOS, E  
 SERÃO  
 CHAMADAS  
 PELO NOME  
 DO ELEMENTO  
 (A, ou B, ou C)

**ASSIM, NÃO CONFUNDAM, POR EXEMPLO, O SÓLIDO A COM O ELEMENTO A  
 (constituente do sólido A e também dos diferentes líquidos possíveis)**

# PROJEÇÃO POLITÉRMICA DA SUPERFÍCIE LIQUIDUS

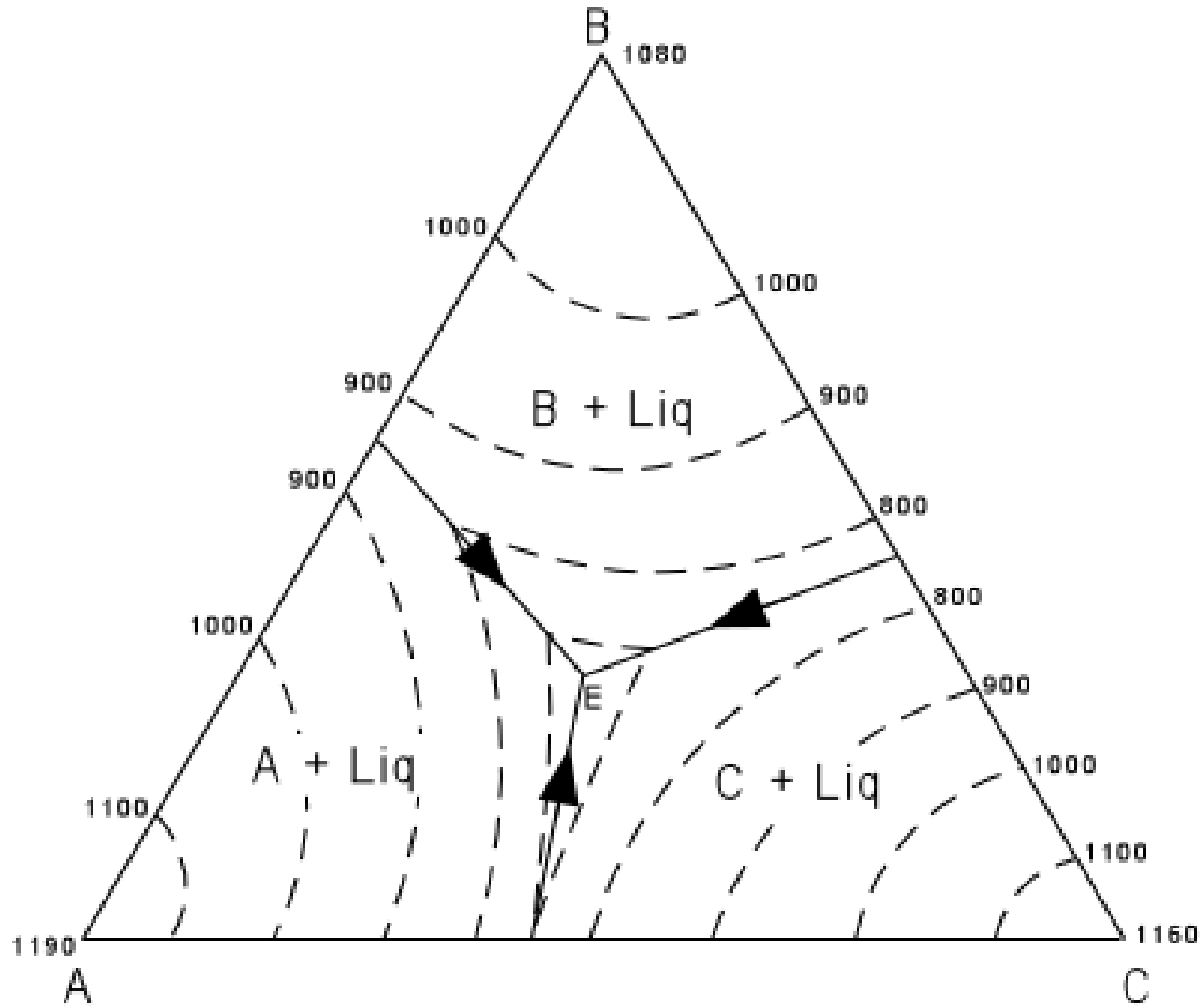
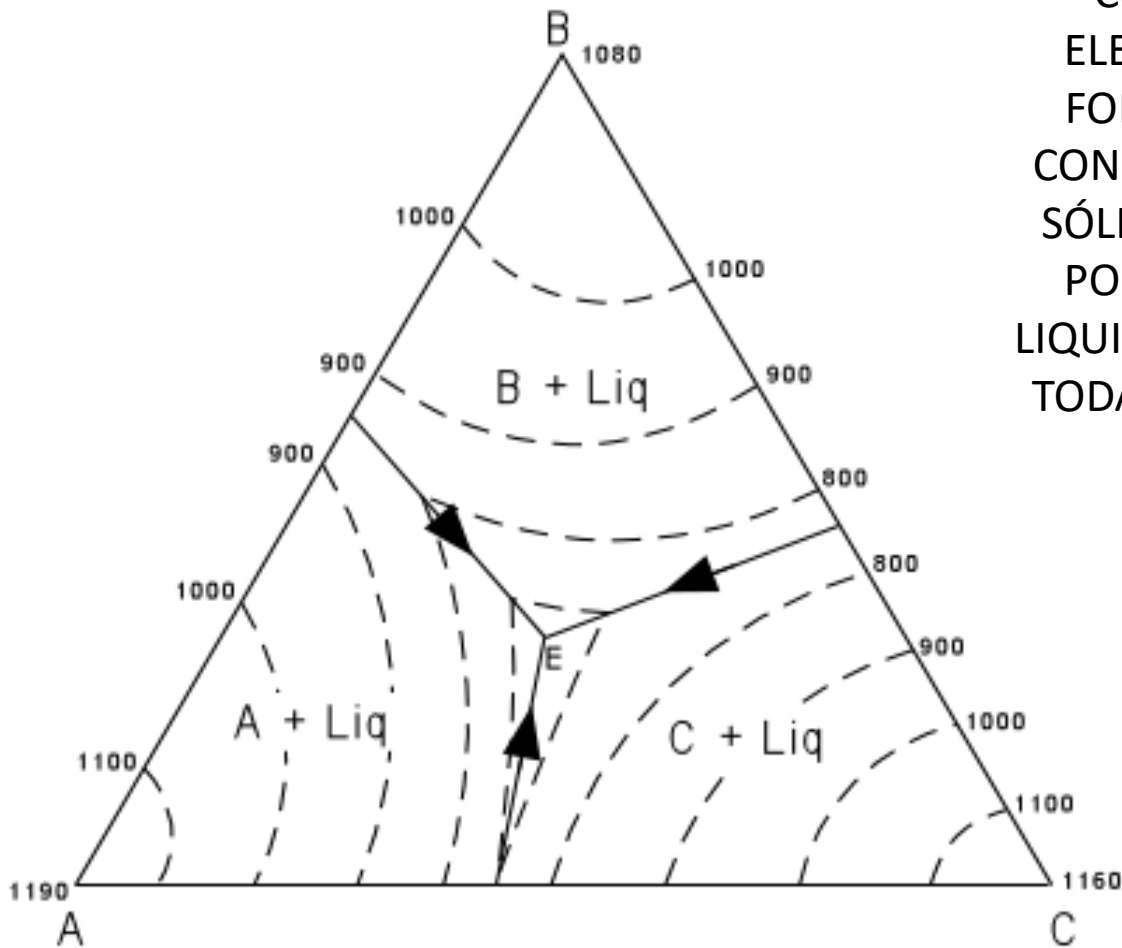


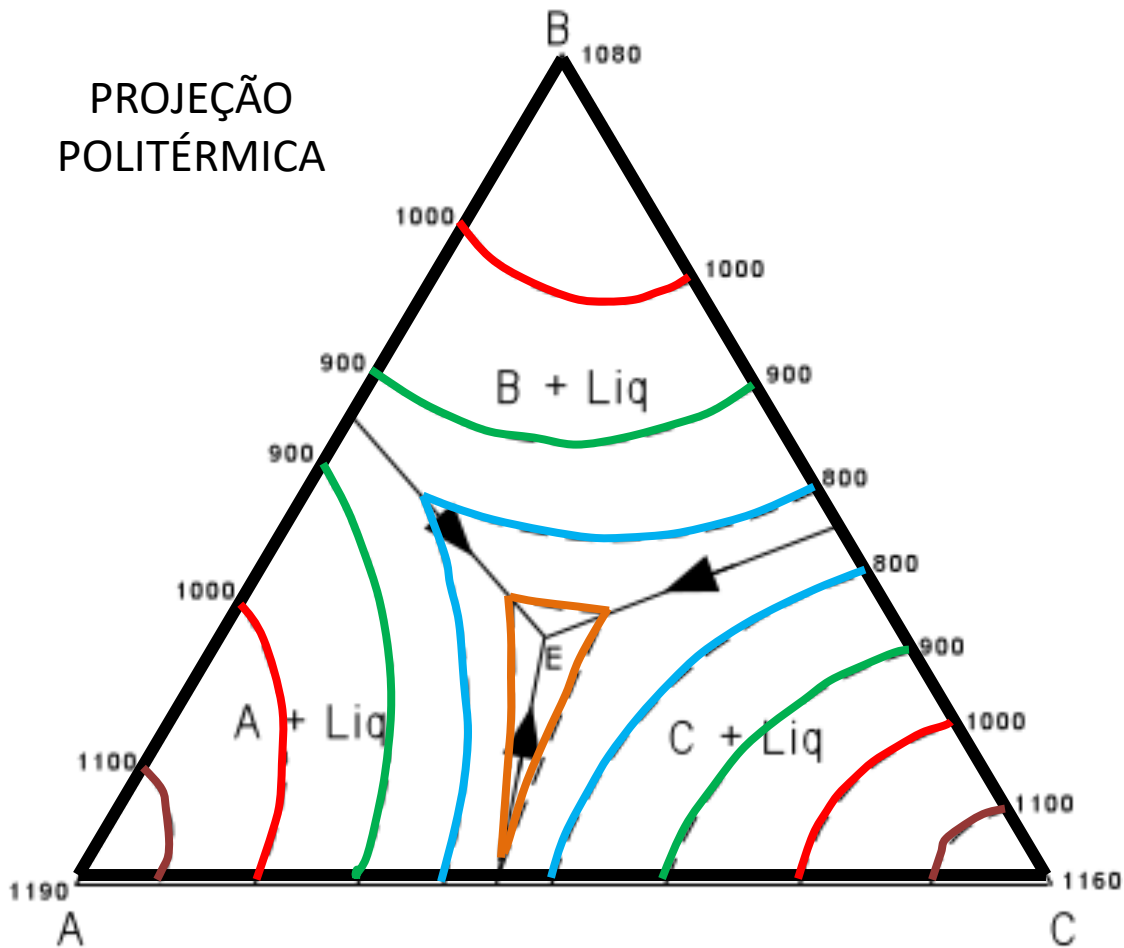
Figure 2

# CRIANDO SEÇÕES ISOTÉRMICAS A PARTIR DA PROJEÇÃO POLITÉRMICA



COMO AS SOLUBILIDADES DOS ELEMENTOS "B" E "C" NO SÓLIDO FORMADO POR "A" ESTÃO SENDO CONSIDERADA S NULAS (E IDEM NOS SÓLIDOS "B" E "C"), ESTA PROJEÇÃO POLITÉRMICA COM A SUPERFÍCIE LIQUIDUS PERMITE QUE DESENHEMOS TODAS AS SEÇÕES ISOTÉRMICAS QUE DESEJAMOS

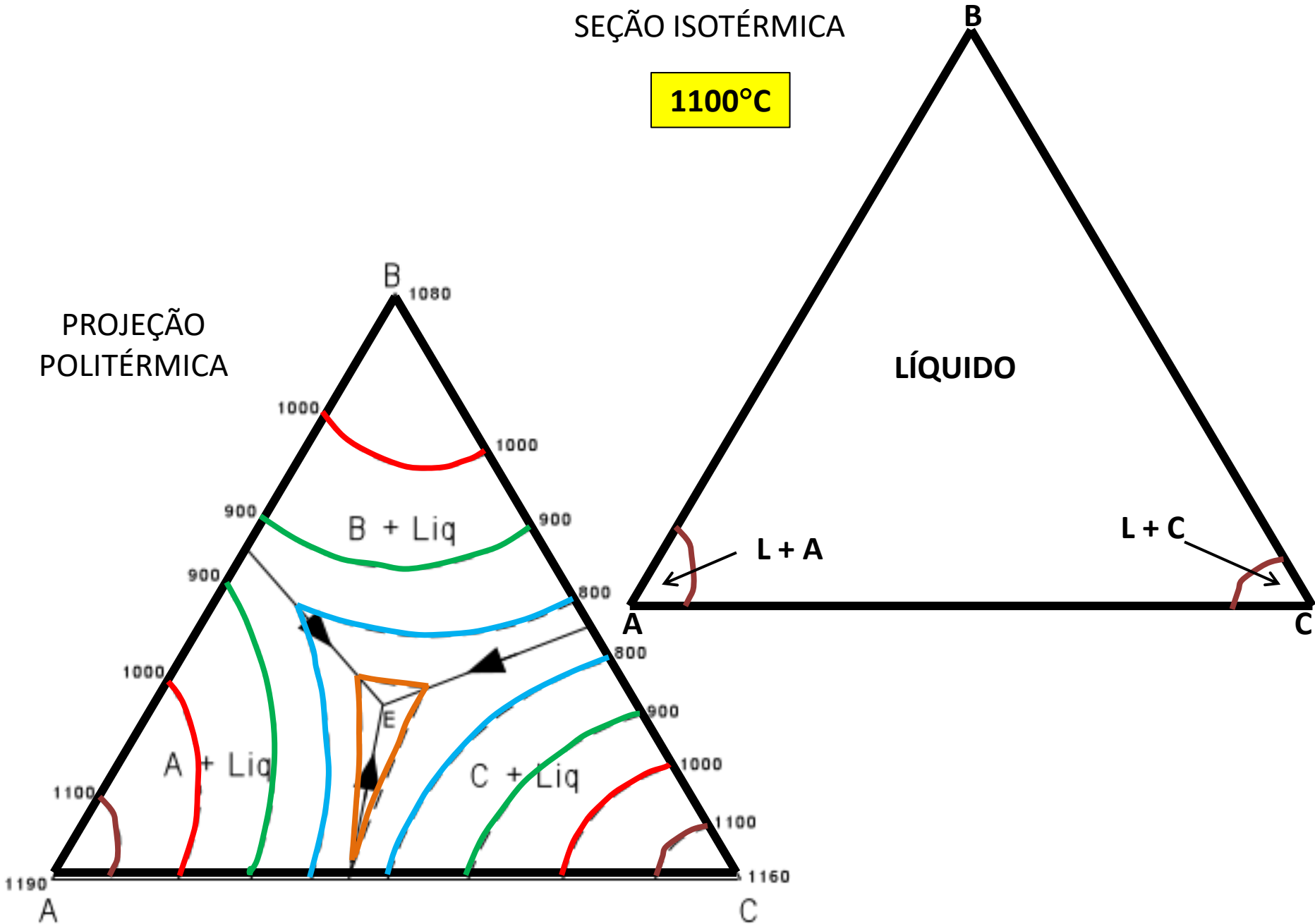
PROJEÇÃO  
POLITÉRMICA



SEÇÃO ISOTÉRMICA

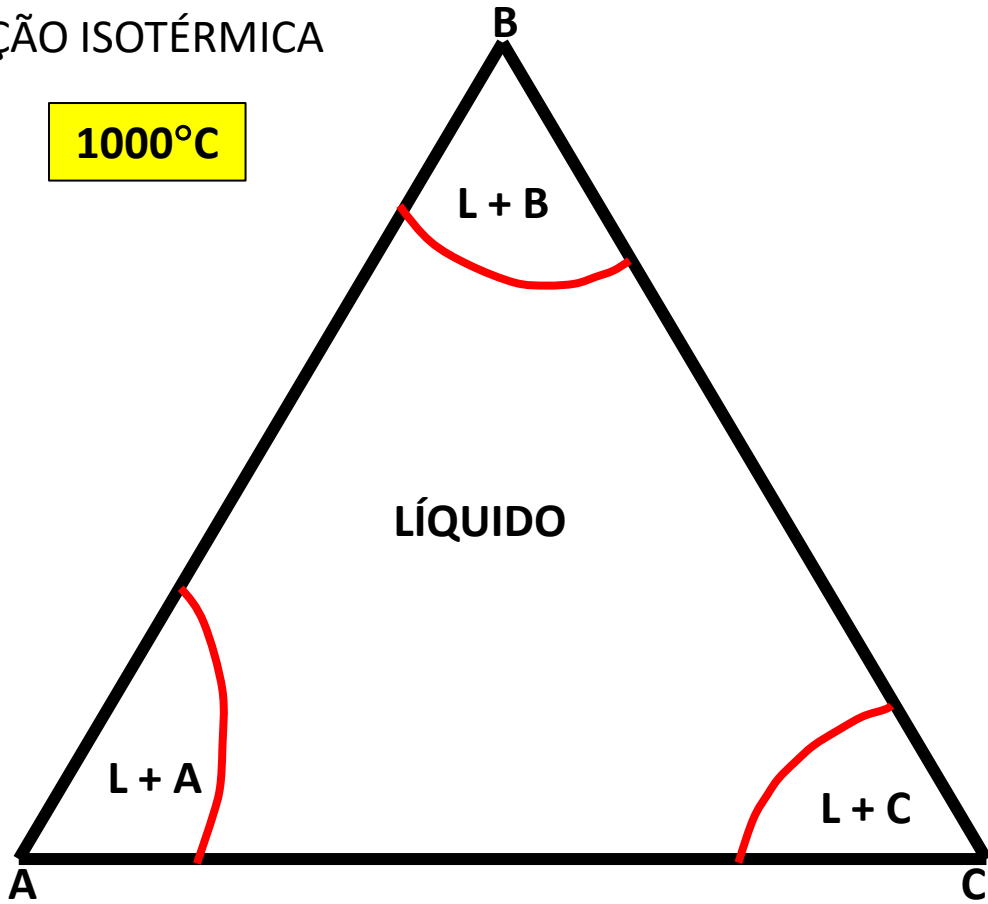
1100°C

PROJEÇÃO  
POLITÉRMICA

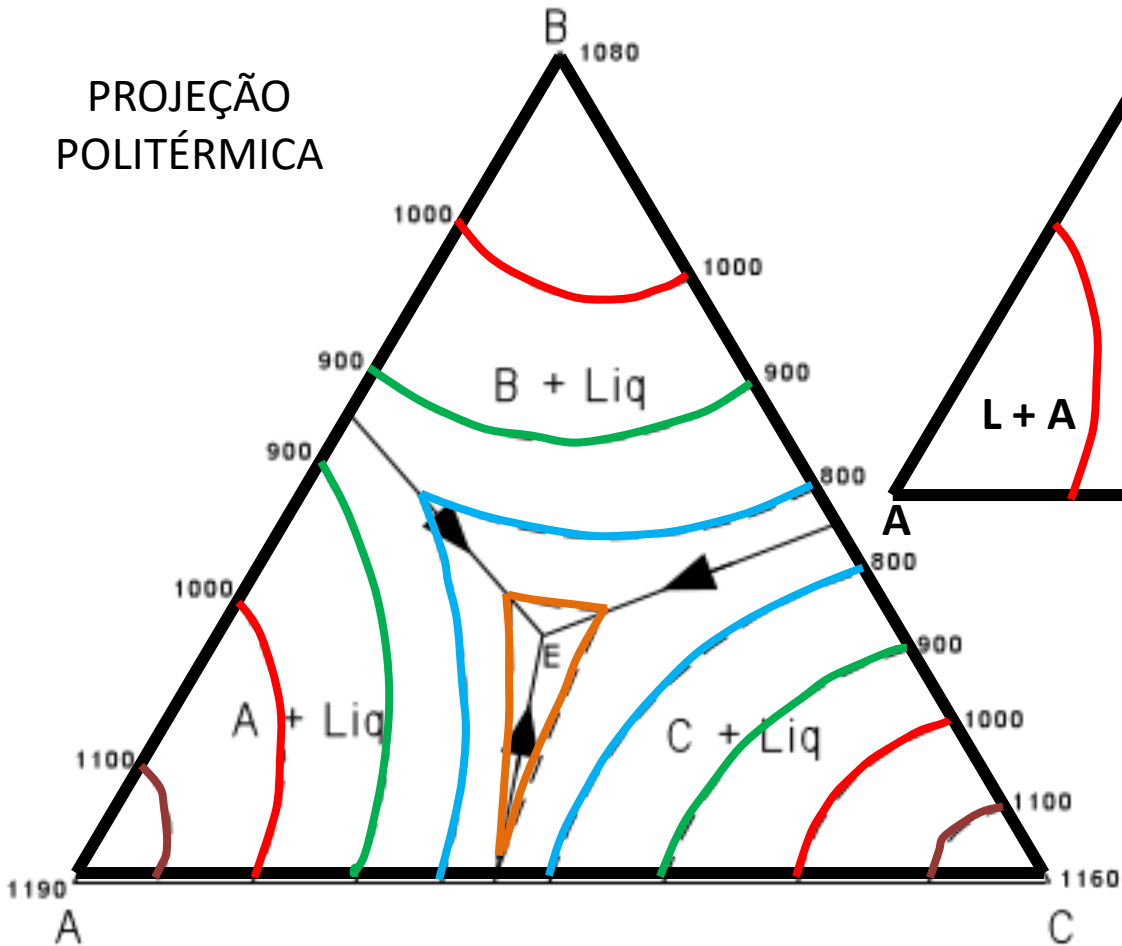


SEÇÃO ISOTÉRMICA

1000°C

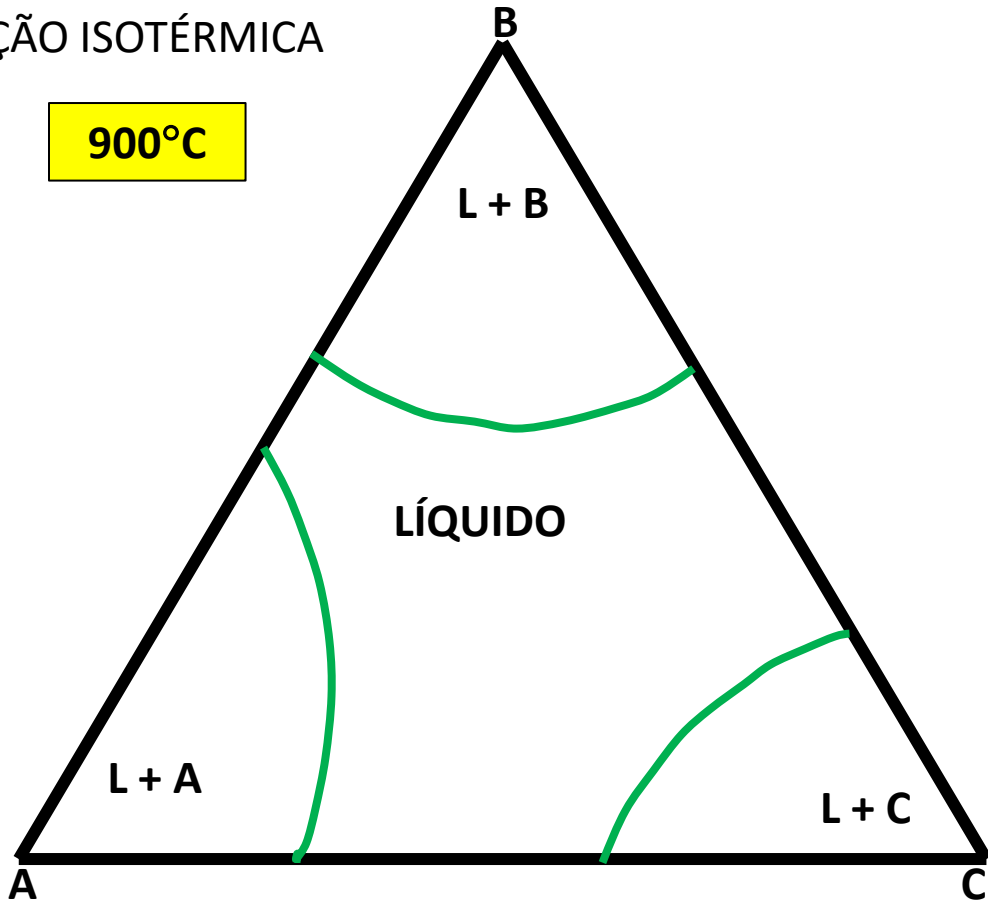


PROJEÇÃO POLITÉRMICA

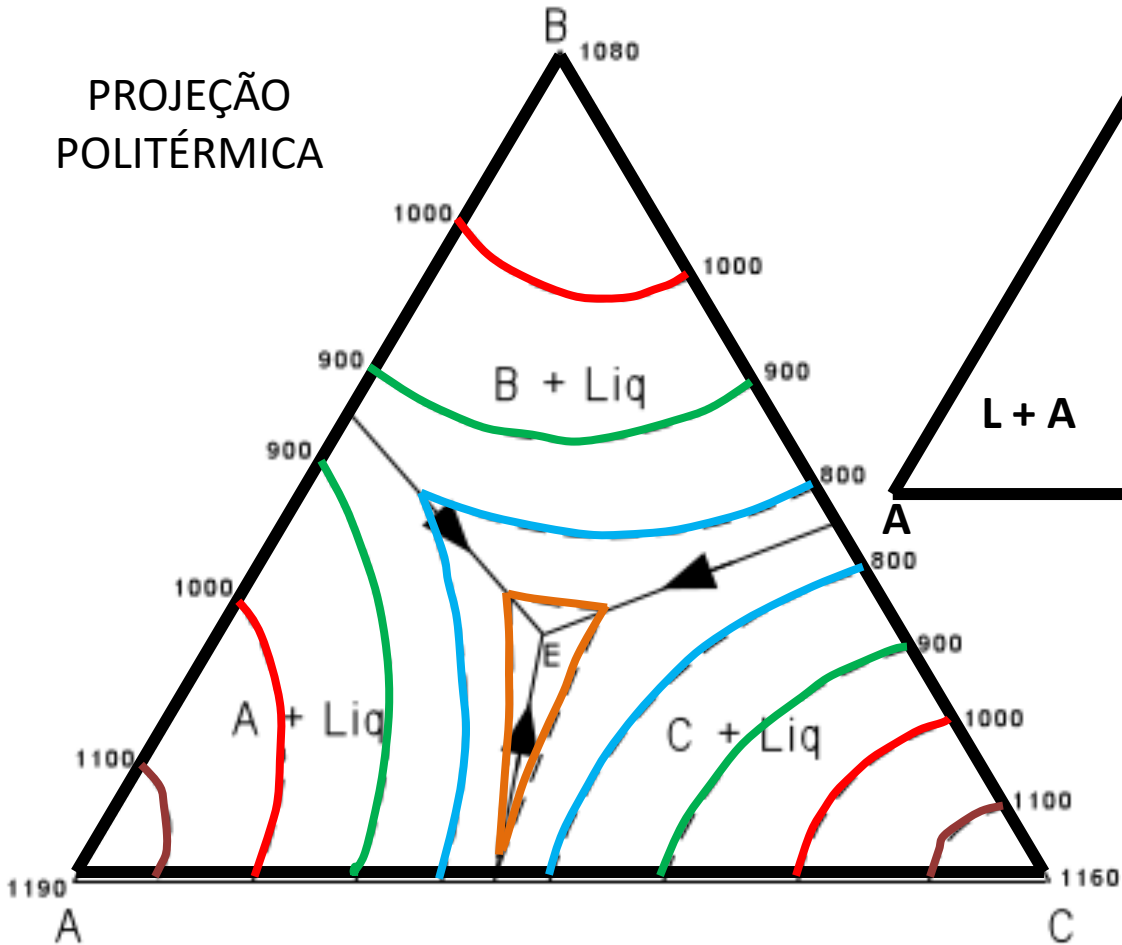


SEÇÃO ISOTÉRMICA

900°C



PROJEÇÃO POLITÉRMICA

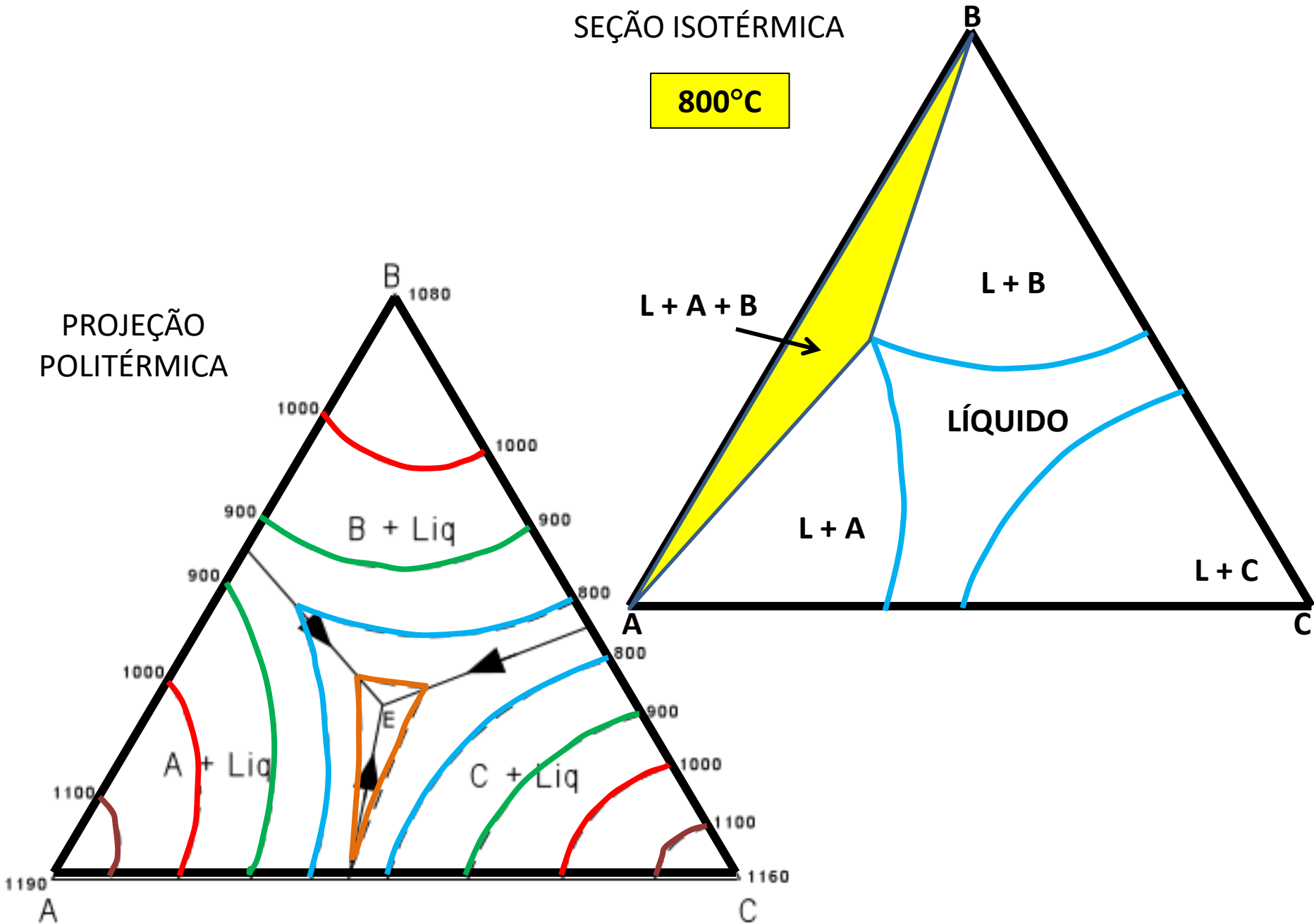




SEÇÃO ISOTÉRMICA

800°C

PROJEÇÃO POLITÉRMICA



SEÇÃO ISOTÉRMICA

700°C

LÍQUIDO

L + A + B

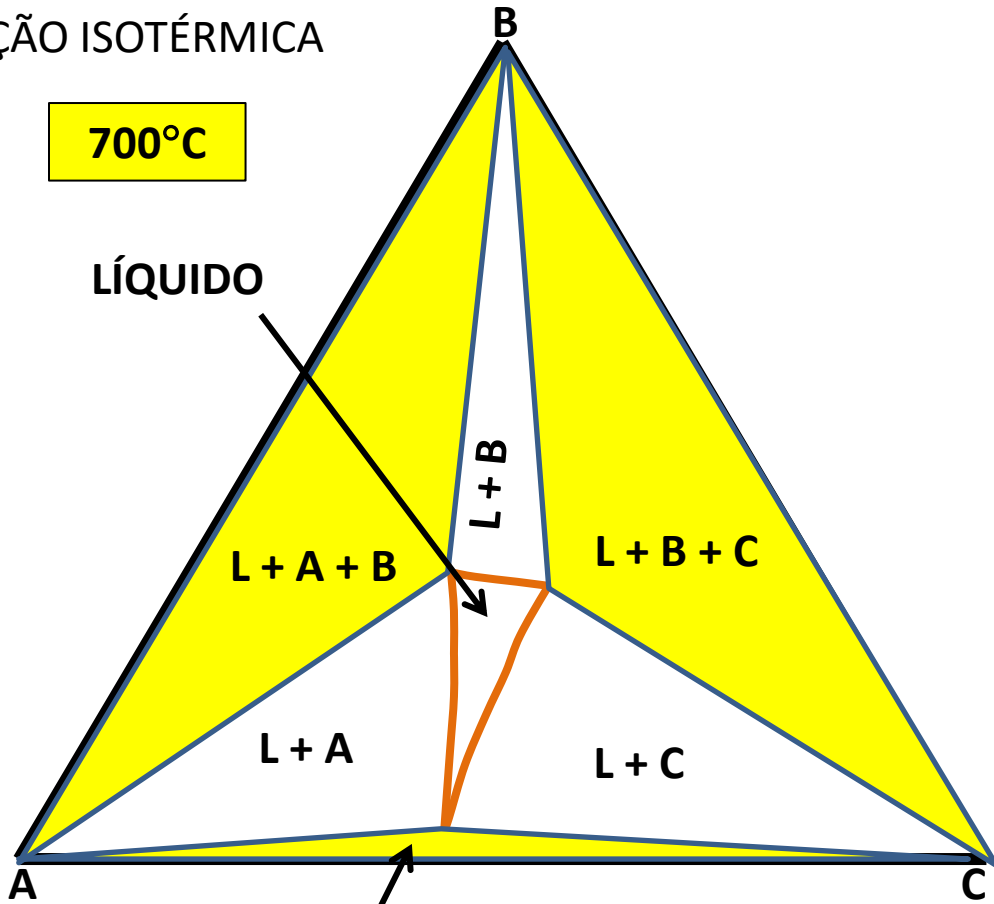
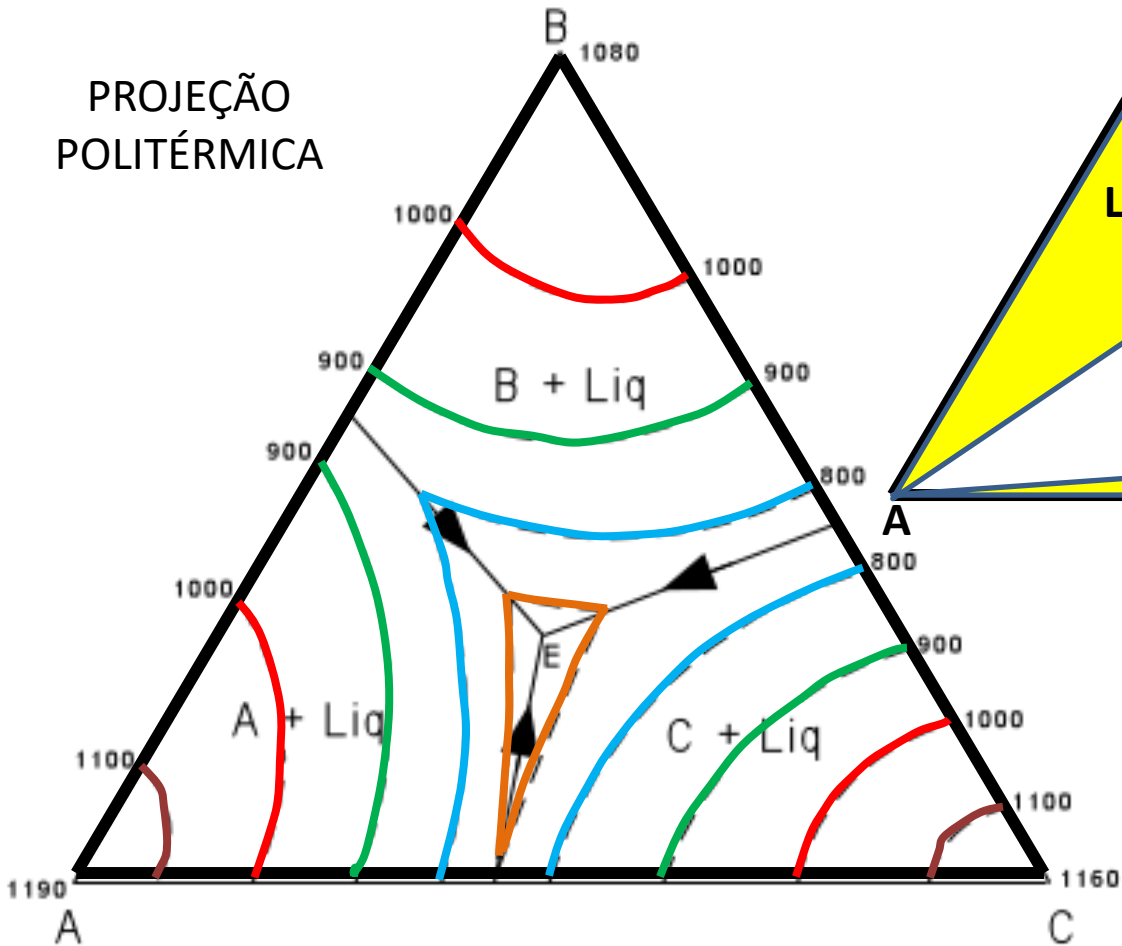
L + B + C

L + A

L + C

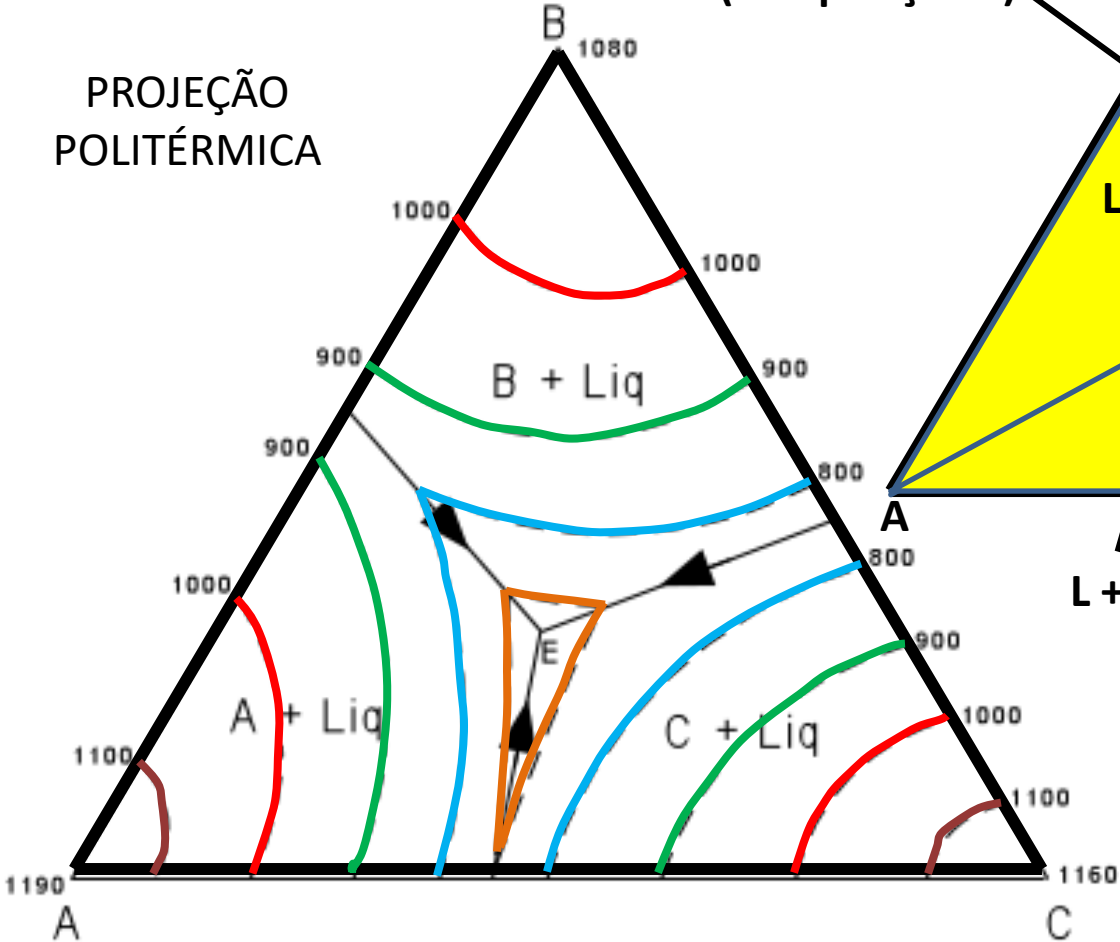
L + A + C

PROJEÇÃO POLITÉRMICA

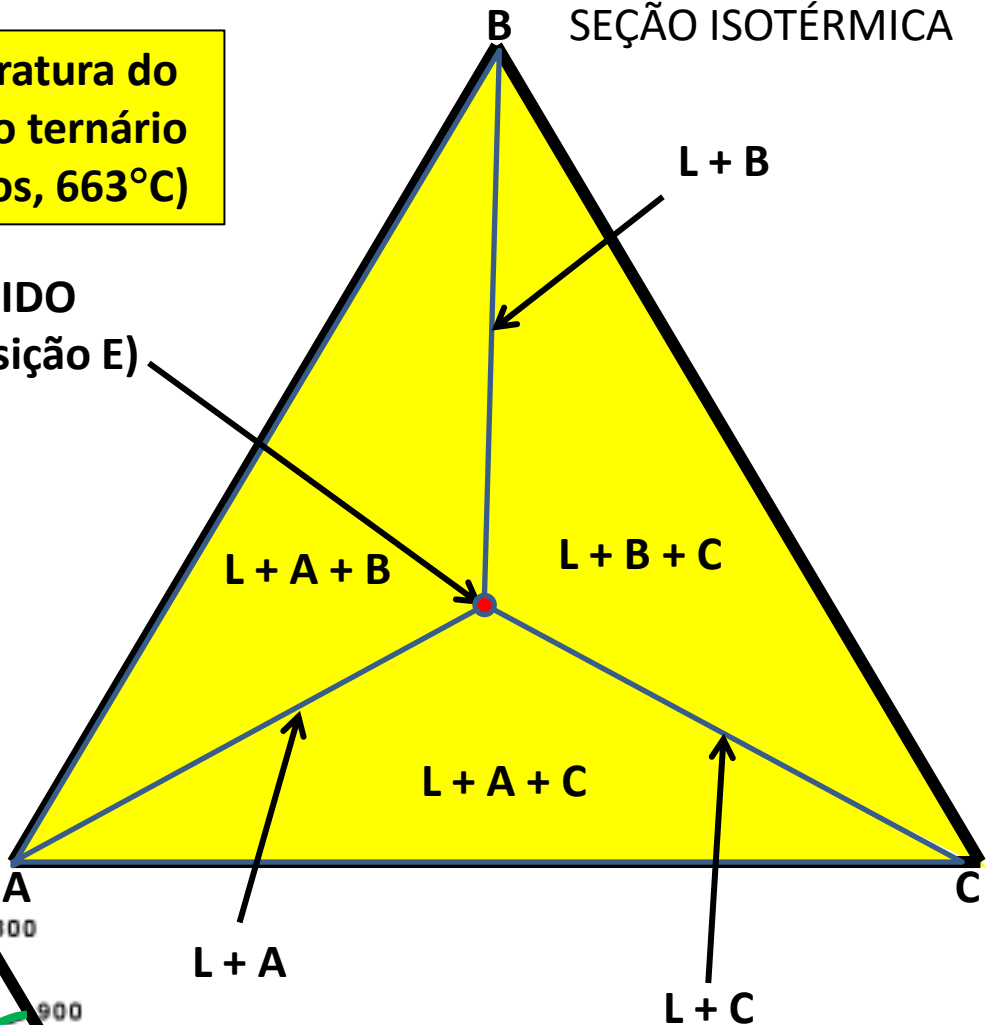


Temperatura do eutético ternário (digamos, 663°C)

PROJEÇÃO POLITÉRMICA



SEÇÃO ISOTÉRMICA

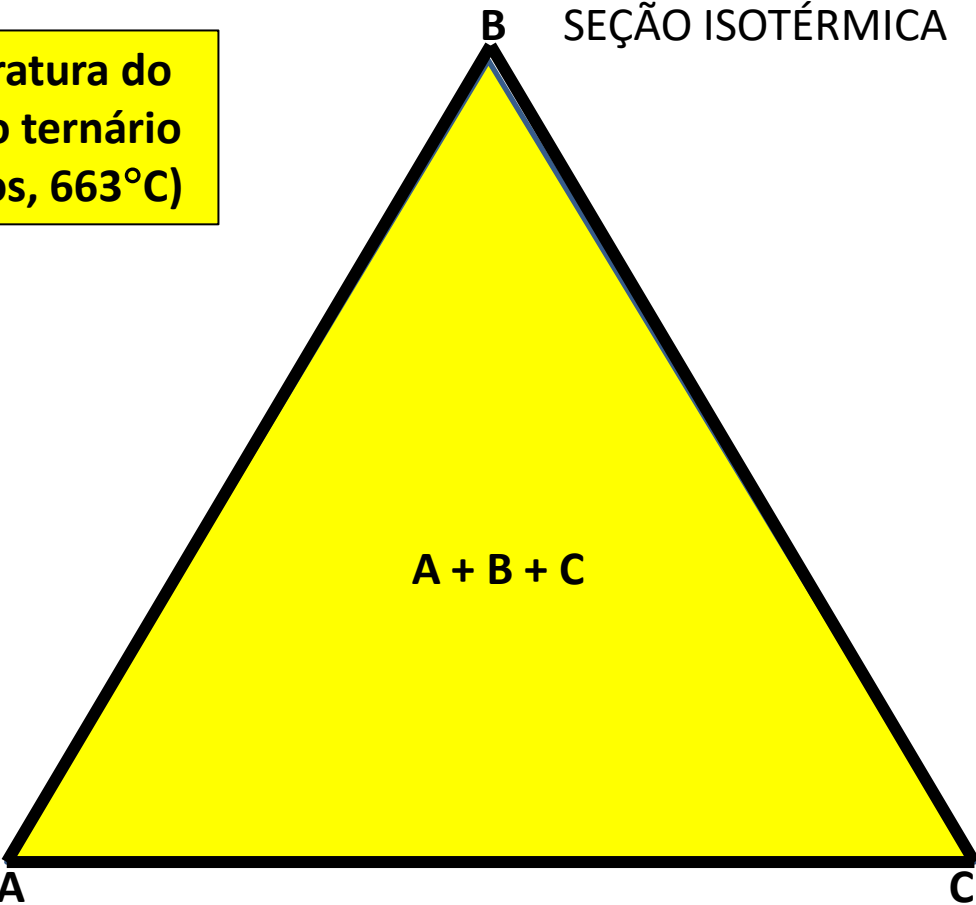
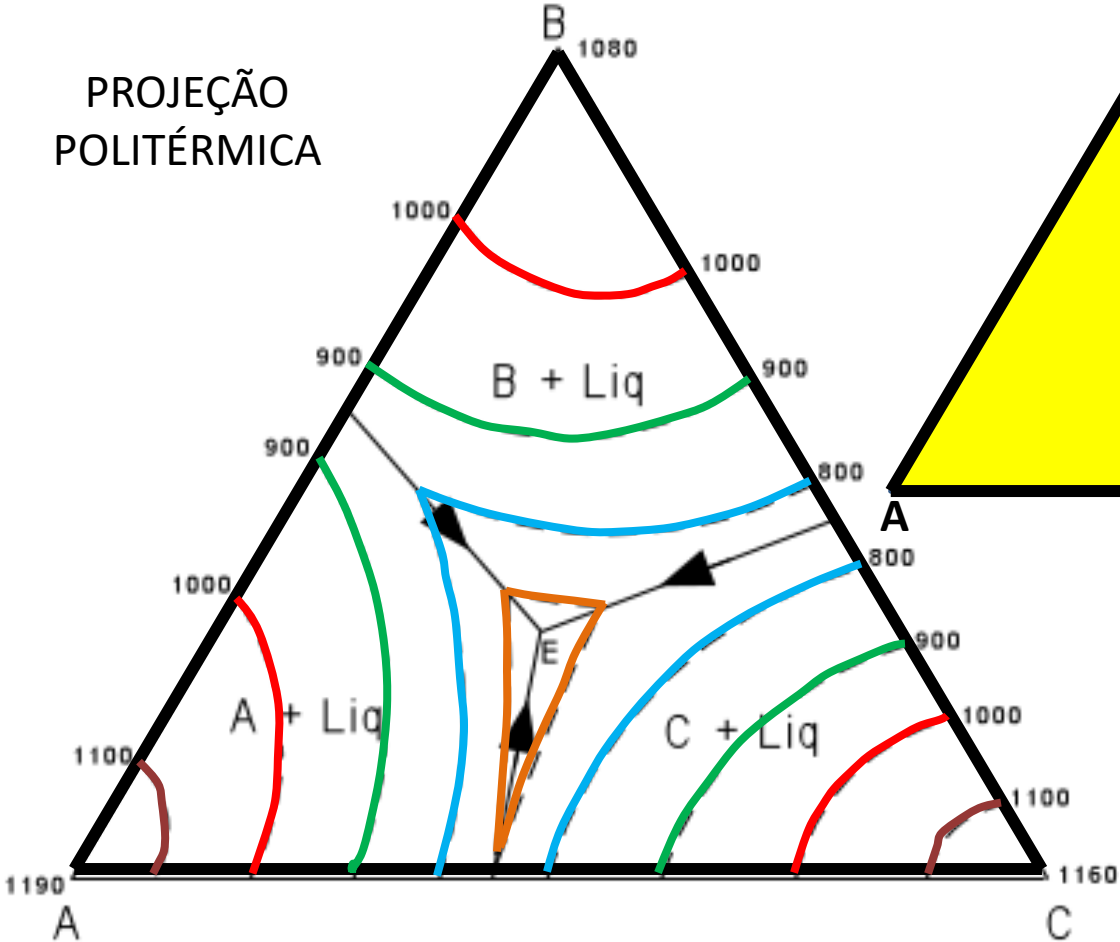


Início da reação eutética ternária

Temperatura do eutético ternário (digamos, 663°C)

SEÇÃO ISOTÉRMICA

PROJEÇÃO POLITÉRMICA

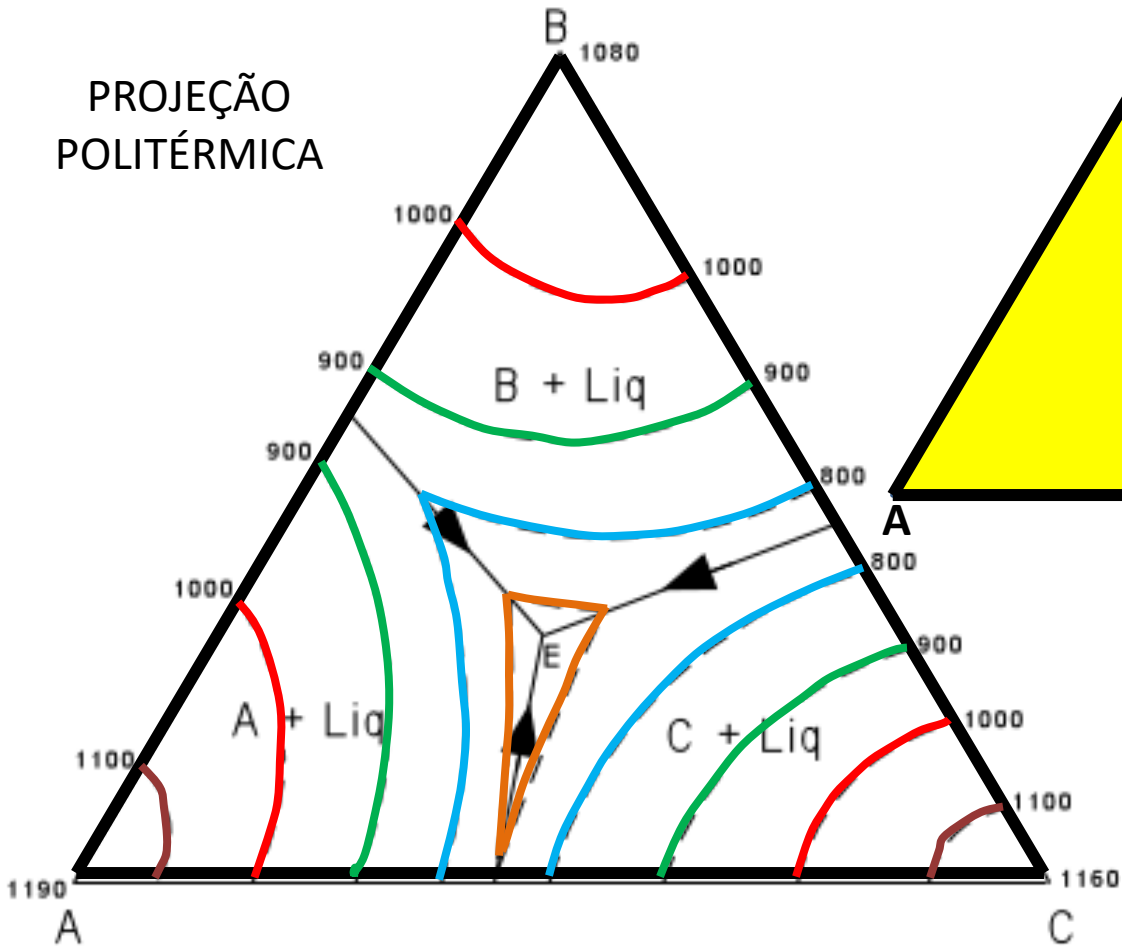


final da reação eutética ternária

$T < 663^{\circ}\text{C}$

SEÇÃO ISOTÉRMICA

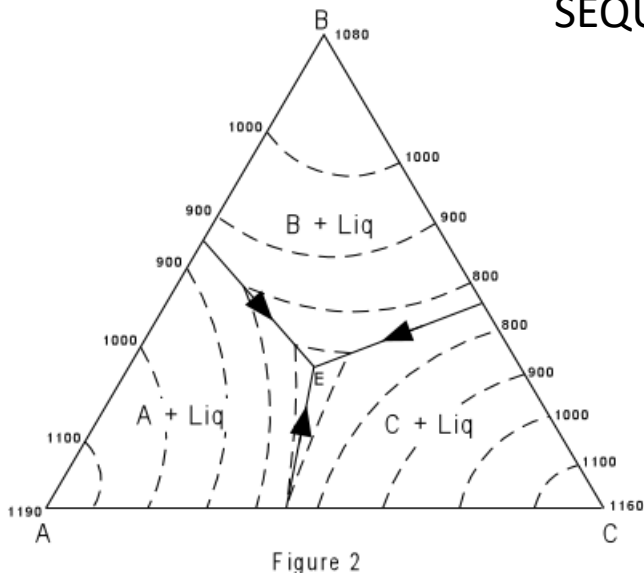
PROJEÇÃO  
POLITÉRMICA



A B C

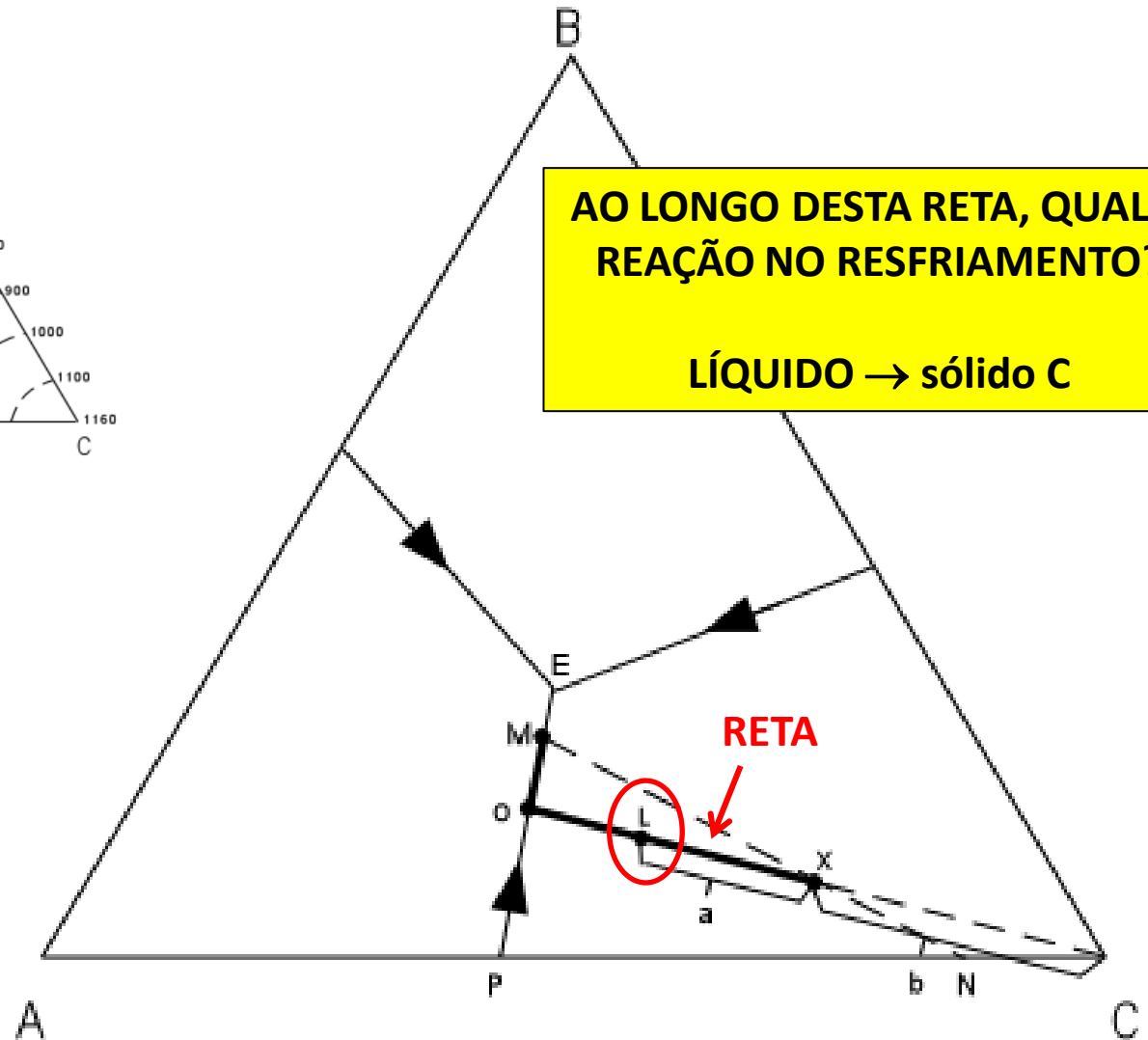
A + B + C

## SEQUÊNCIA DE SOLIDIFICAÇÃO EM EQUILÍBRIO DE LIGA X



**SEJA "L" A COMPOSIÇÃO DO LÍQUIDO EM UMA DADA TEMPERATURA (digamos, 820°C)**

**L, X (liga) e C (sólido) ESTÃO NA MESMA RETA: SÓ TEMOS DUAS FASES (L e C)**



**AO LONGO DESTA RETA, QUAL A REAÇÃO NO RESFRIAMENTO?**

**LÍQUIDO → sólido C**

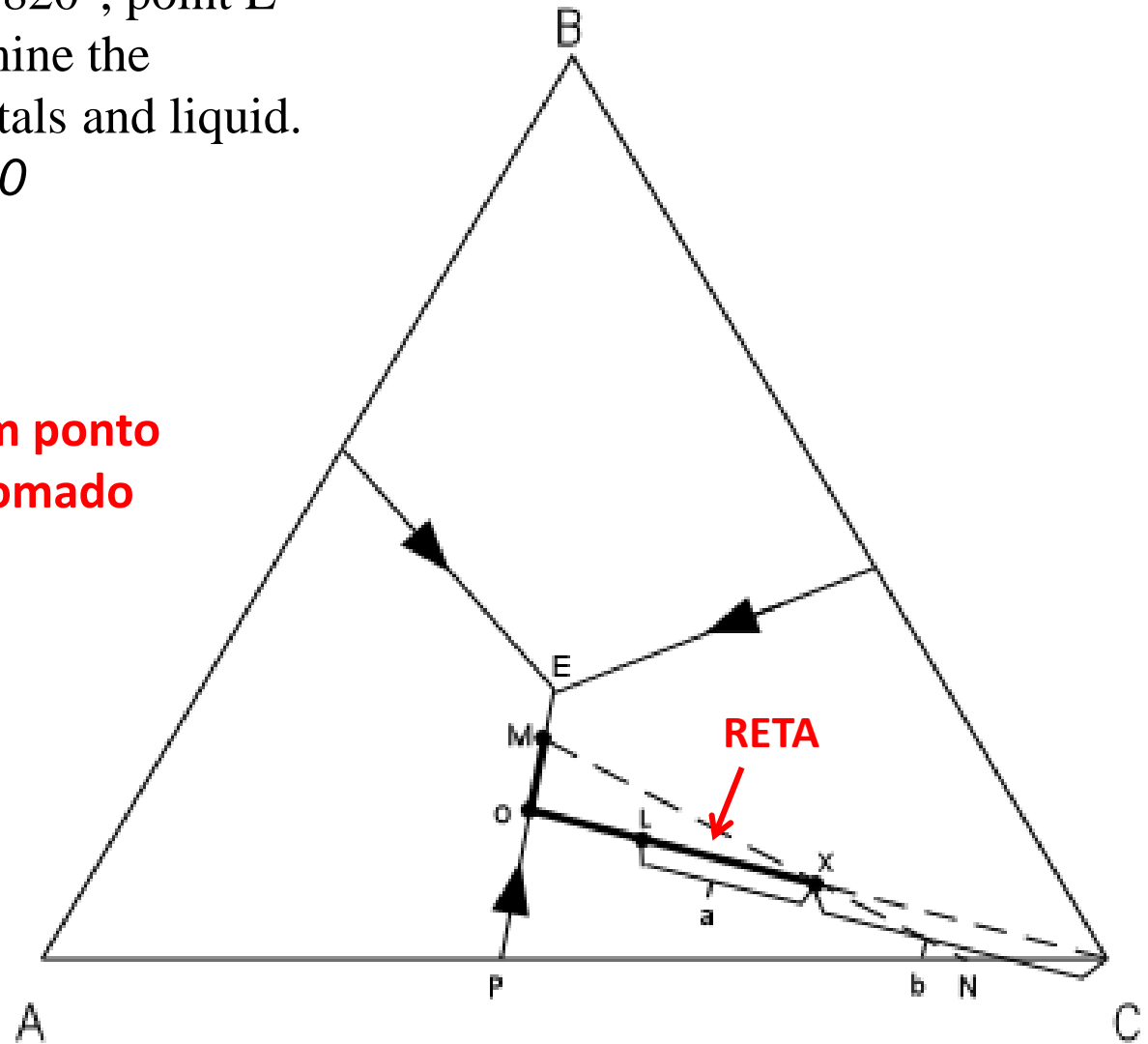
**RETA**

At a temperature of about 820°, point L in Figure 3, we can determine the relative proportion of crystals and liquid.

$$\% \text{ crystals} = a/(a+b)*100$$

$$\% \text{ liquid} = b/(a+b)*100$$

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



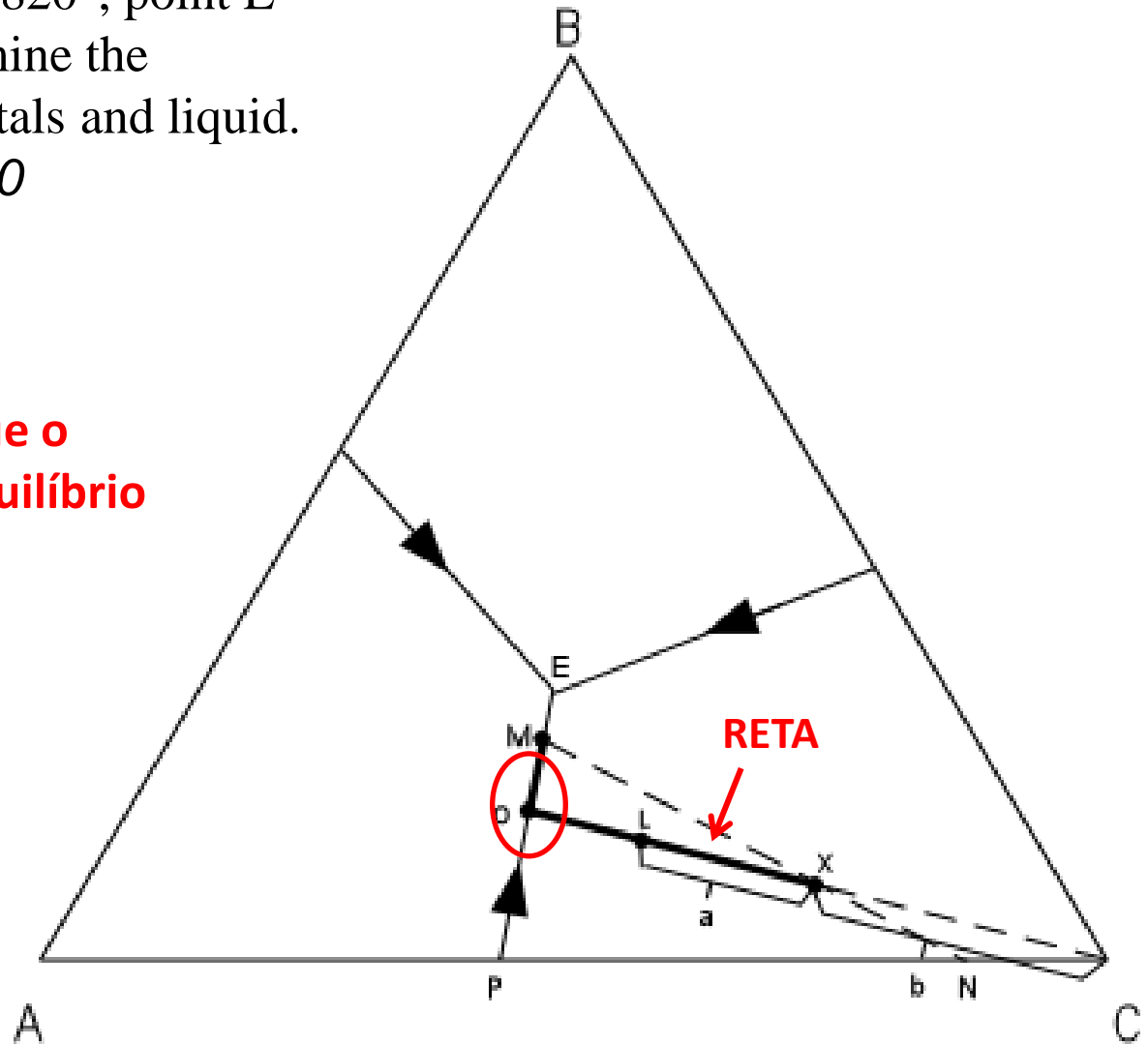
At a temperature of about 820°, point L in Figure 3, we can determine the relative proportion of crystals and liquid.

$$\% \text{ crystals} = a/(a+b)*100$$

$$\% \text{ liquid} = b/(a+b)*100$$

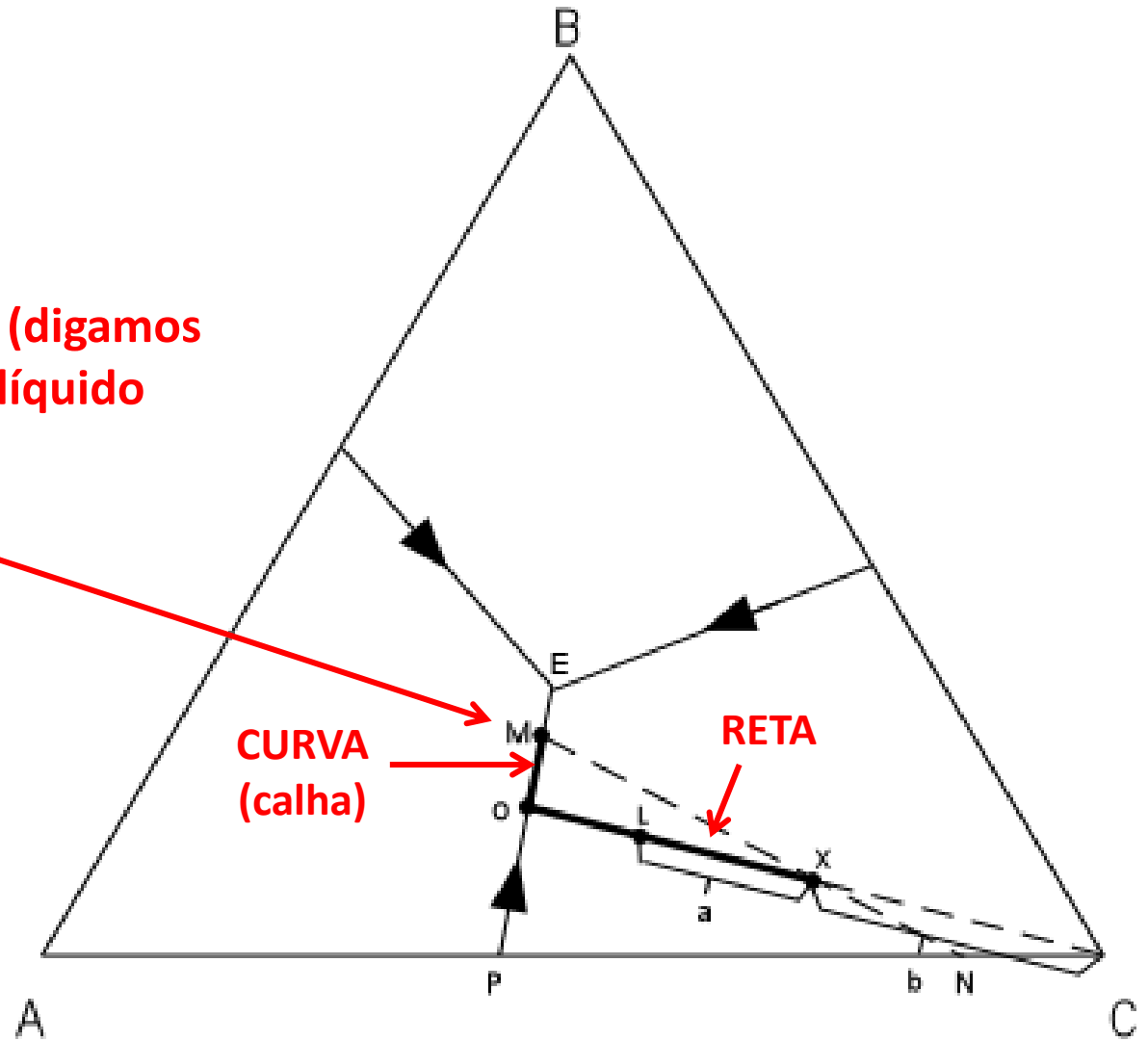
**A máxima composição que o líquido pode ter neste equilíbrio de duas fases é "o"**

**A partir de "o", começa a existir também o sólido "A"**



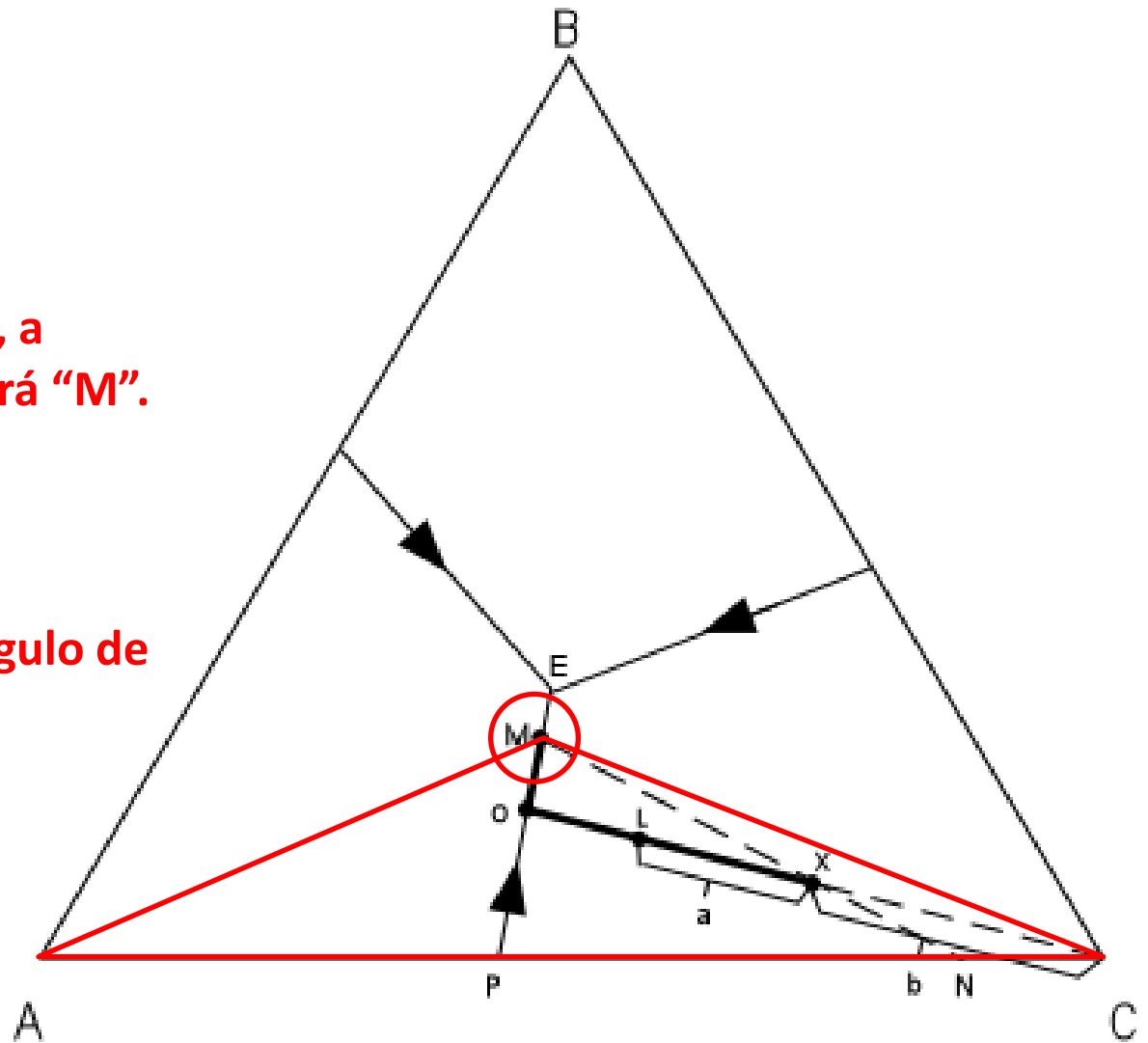


A uma dada temperatura (digamos 650°C), a composição do líquido será "M".



A uma dada temperatura, a composição do líquido será "M".

Podemos desenhar o triângulo de correlação A-M-C

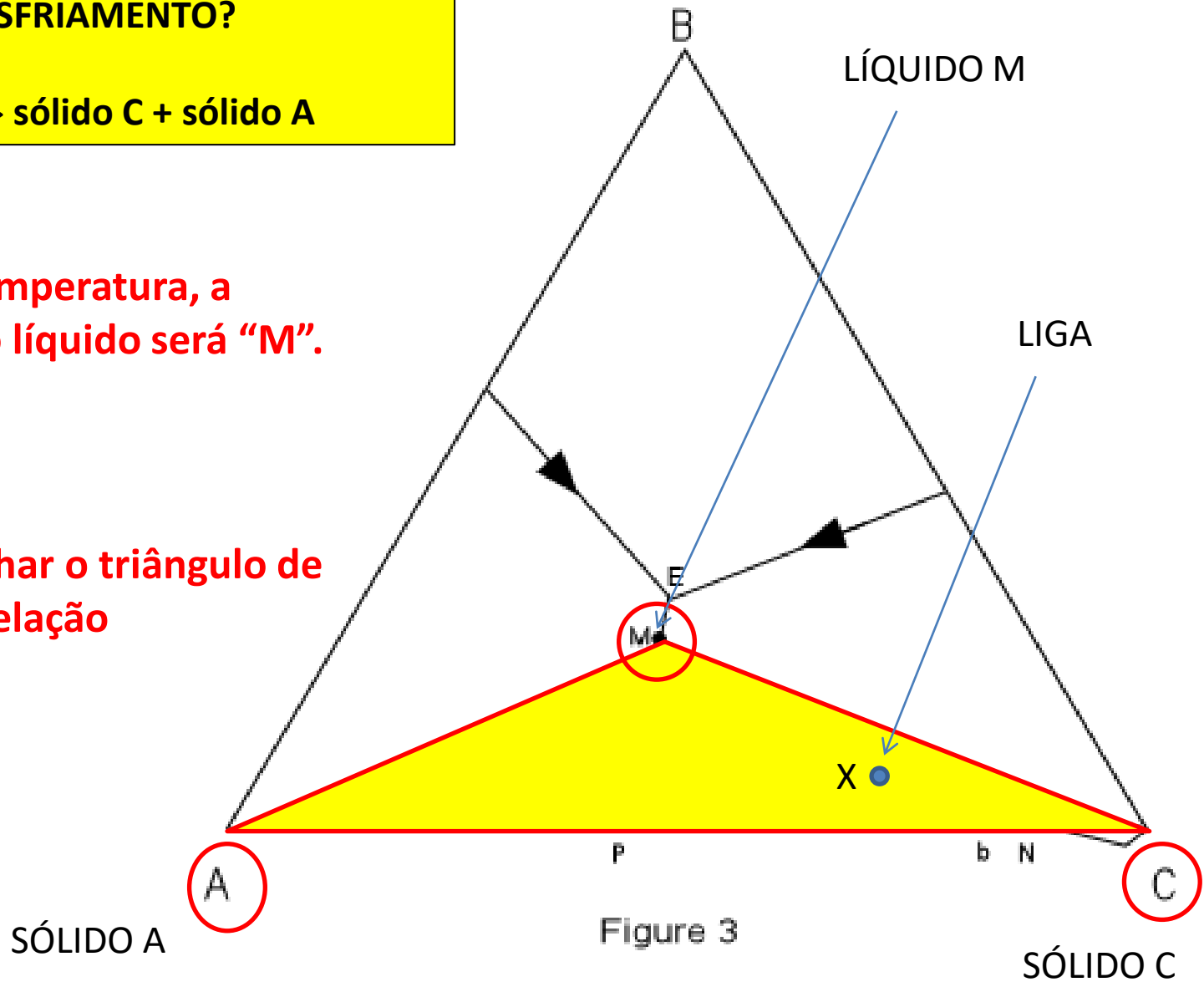


AO LONGO DESTA CALHA, QUAL A REAÇÃO  
NO RESFRIAMENTO?

LÍQUIDO  $\rightarrow$  sólido C + sólido A

A uma dada temperatura, a  
composição do líquido será "M".

Podemos desenhar o triângulo de  
correlação



SÓLIDO A

Figure 3

SÓLIDO C

A solidificação prossegue até o líquido chegar ao ponto E, quando então ocorre a reação eutética ternária ( $T = 663^{\circ}\text{C}$ ).

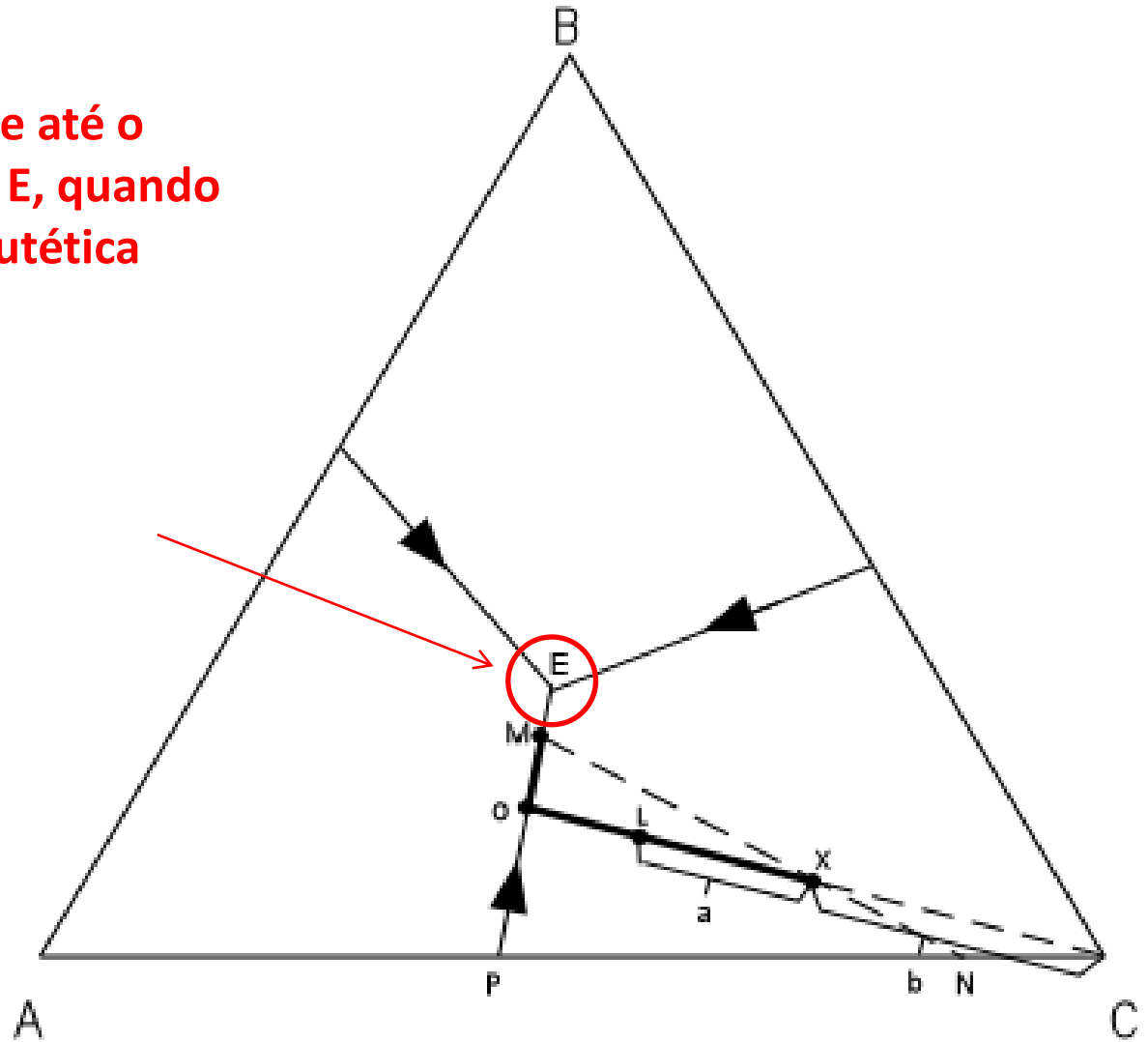
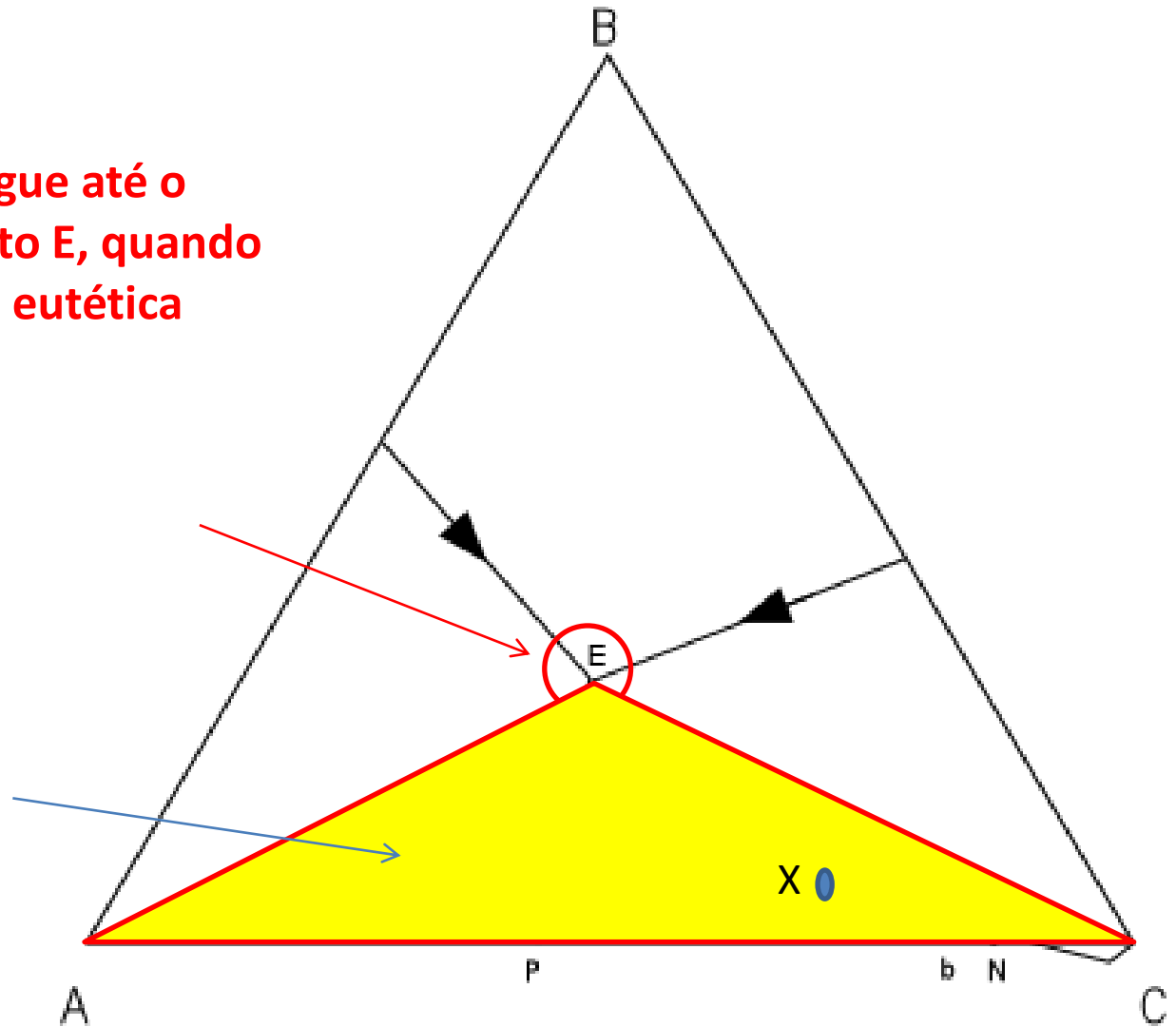


Figure 3

A solidificação prossegue até o líquido chegar ao ponto E, quando então ocorre a reação eutética ternária.

Este é o último triângulo de correlação Líquido + C + A antes de começar a reação eutética ternária

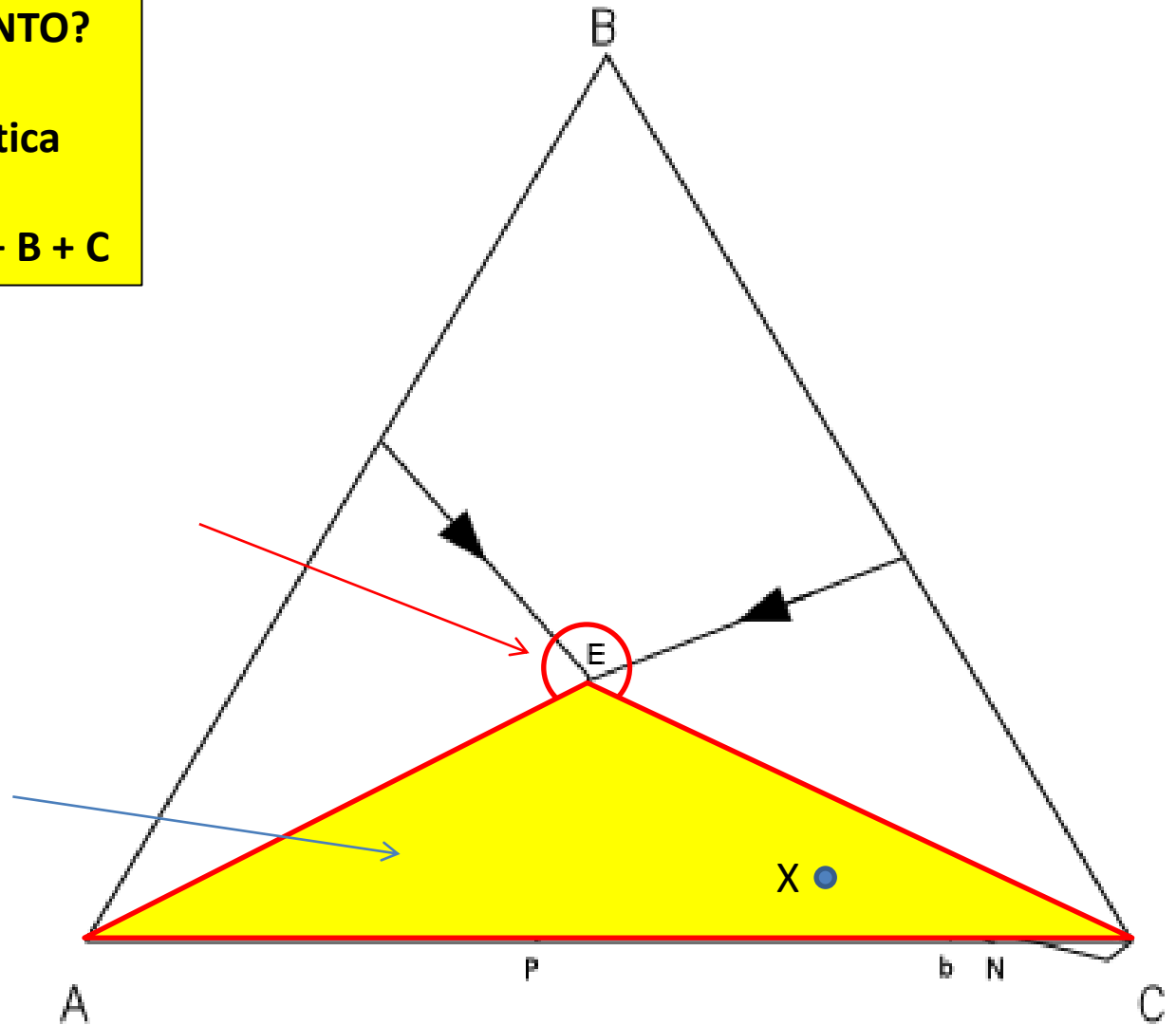


**NESTA TEMPERATURA, QUAL A REAÇÃO NO RESFRIAMENTO?**

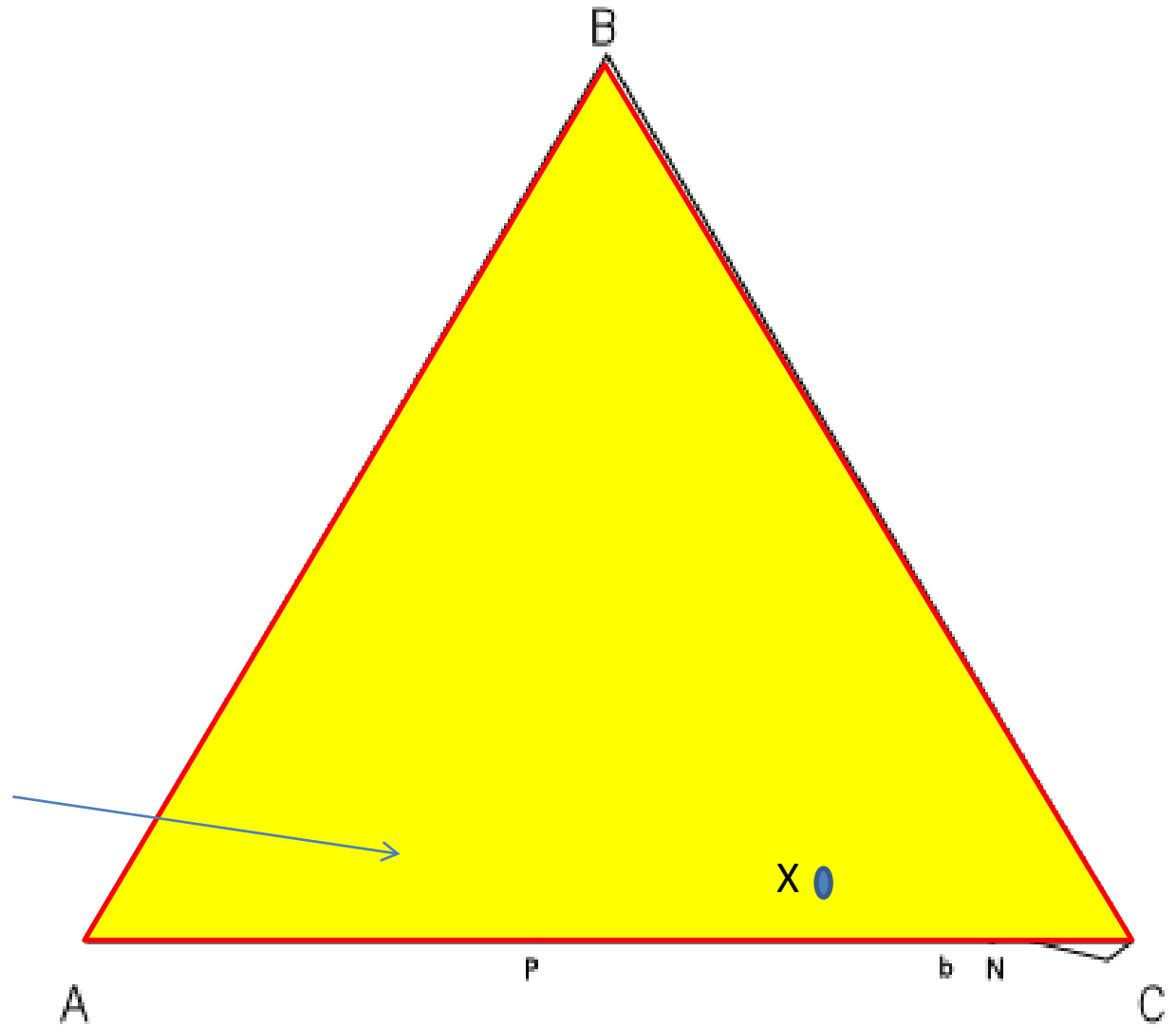
**Reação invariante eutética**

**LÍQUIDO (E)  $\rightarrow$  sólidos A + B + C**

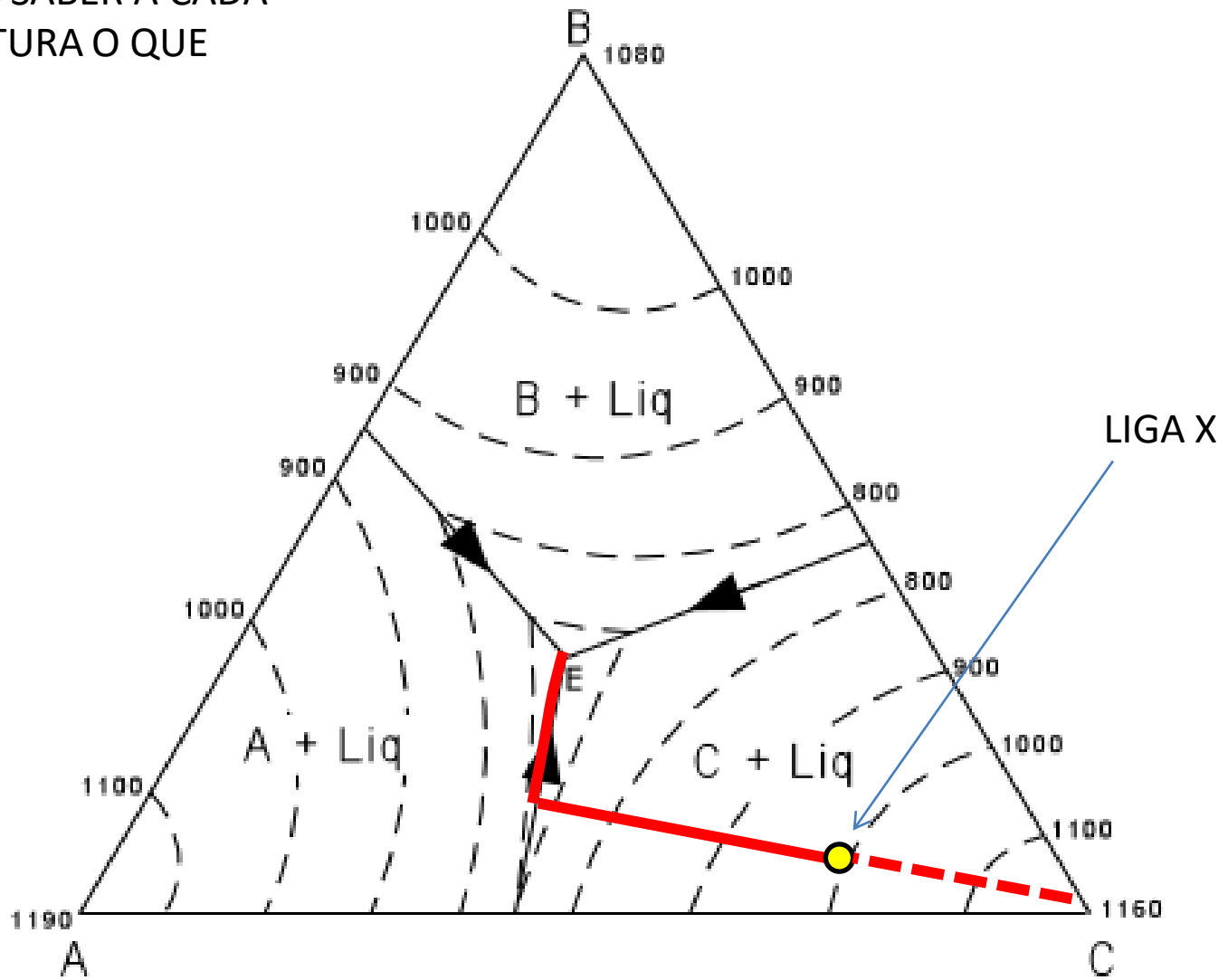
**Este é o último triângulo de correlação Líquido + C + A antes de começar a reação eutética ternária**



**Este é o triângulo de correlação após  
terminar a reação  
eutética ternária**

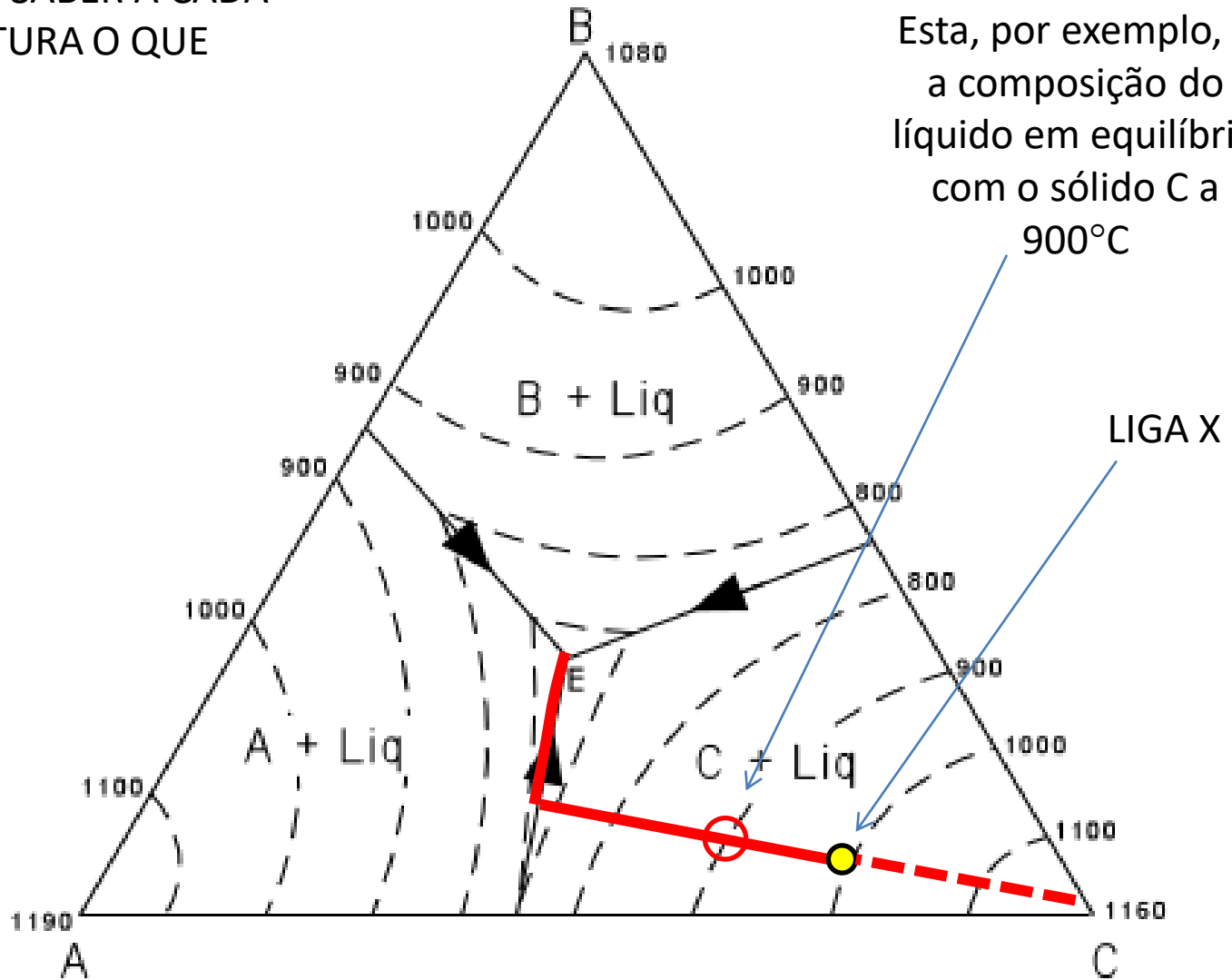


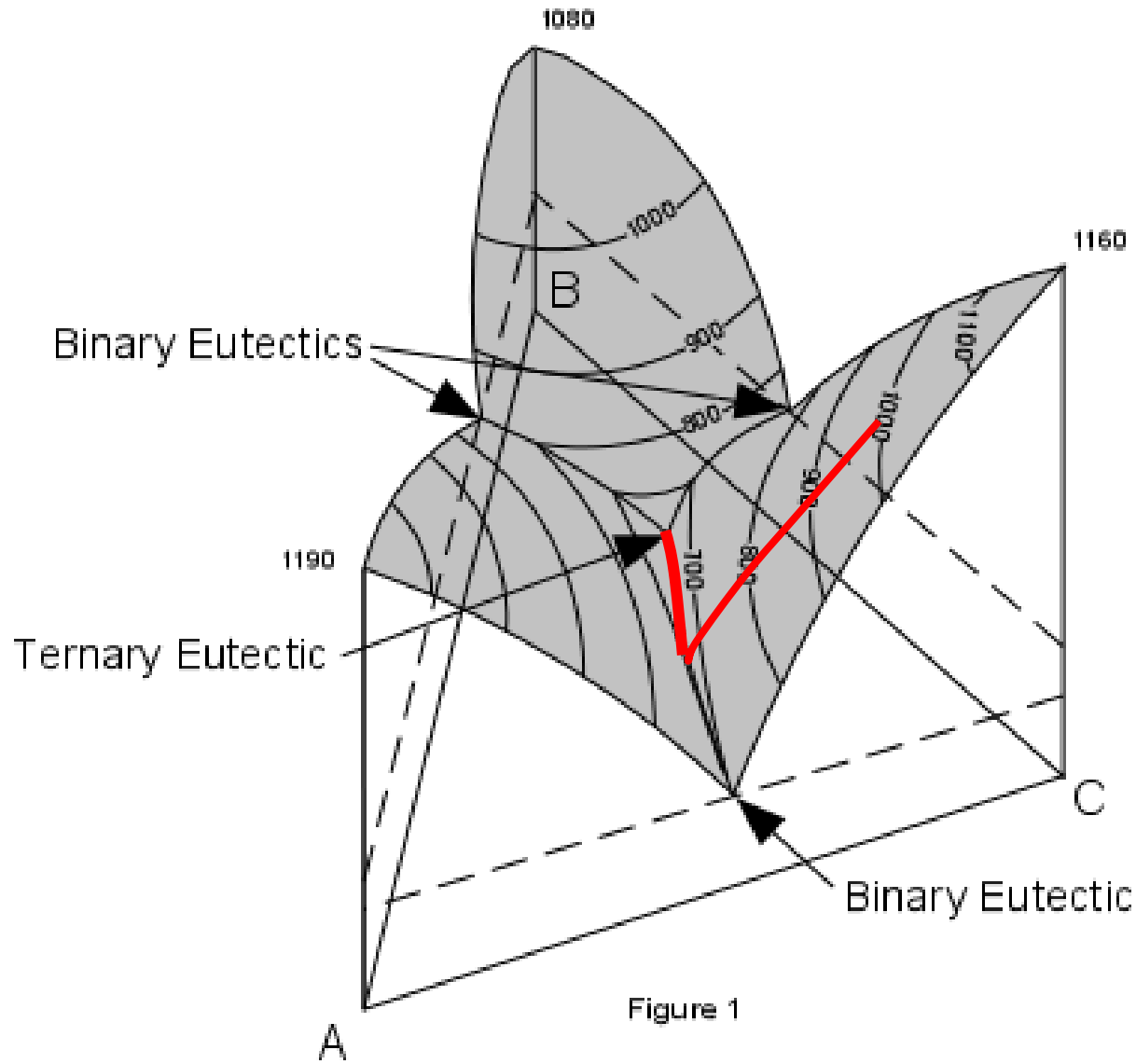
PODEMOS SABER A CADA TEMPERATURA O QUE OCORRE





PODEMOS SABER A CADA TEMPERATURA O QUE OCORRE





<http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/ternaryphdiag.htm>

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)