

# Diagramas de Fases

## Augusto Camara Neiva

Sequência de solidificação em equilíbrio  
de uma liga ternária

**OBJETIVO: criar uma tabela que indique, para uma dada liga, as composições químicas e as frações das fases presentes em cada temperatura. Com isso, poderemos entender e prever microestruturas, por exemplo.**

# NOSSO PRODUTO FINAL SERÁ ALGO ASSIM:

LIGA: 50%A 30%B 20%C

transformação	T (°C)	COMPOSIÇÕES				FRAÇÕES			
		líquido	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	líquido	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
nenhuma	900	50% A 30% B 20% C				100.0%			
L $\rightarrow$ $\alpha$	700	43% A 34% B 23% C	76.5% A 14% B 9.5% C			83.5%	16.5%		
L $\rightarrow$ $\alpha + \beta$ (entrando no campo)	400	26% A 42% B 32% C	66% A 22% B 12% C	13% A 72% B 15% C		41.1%	58.9%	0.0%	
L $\rightarrow$ $\alpha + \beta + \gamma$	364 início	20% A 40% B 40% C	66% A 18% B 16% C	12% A 70% B 18% C		16.2%	66.9%	16.9%	0.0%
	364 durante	20% A 40% B 40% C	66% A 18% B 16% C	12% A 70% B 18% C	9% A 27% B 64% C	8.1%	68.2%	19.7%	4.0%
	364 final		66% A 18% B 16% C	12% A 70% B 18% C	9% A 27% B 64% C	0.0%	69.5%	22.5%	8.0%
apenas mudanças de composição	300		70% A 17% B 13% C	9% A 74% B 17% C	8% A 25% B 67% C		67.0%	21.2%	11.7%

MICRO-ESTRUTURAS

- 
- 
- 
- 
- 
- 

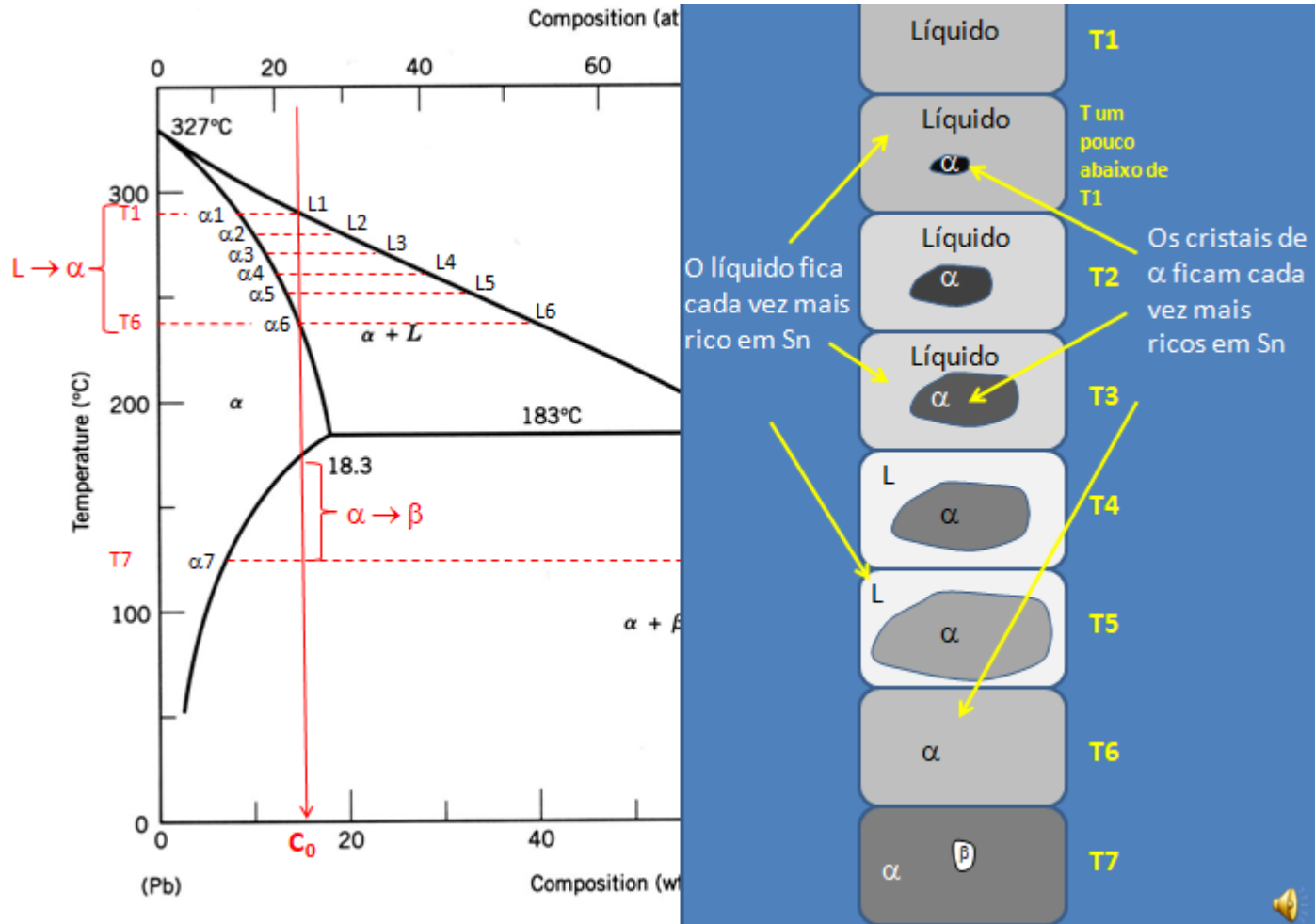


**LEITURA DIRETA NO DIAGRAMA**



**REGRA DA ALAVANCA**

# EM UM SISTEMA BINÁRIO, AS COMPOSIÇÕES PODEM SER LIDAS EM QUALQUER TEMPERATURA



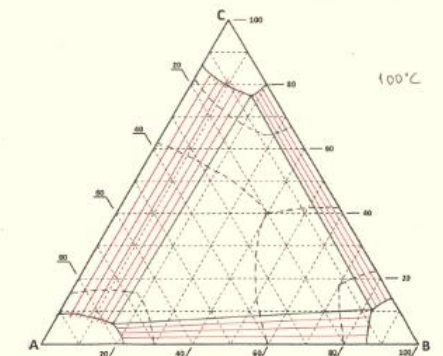
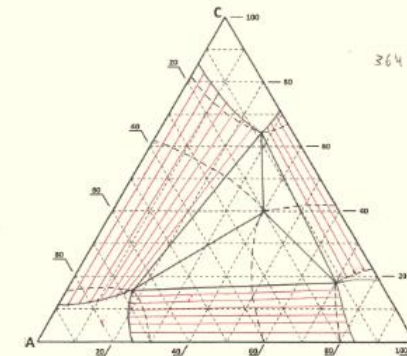
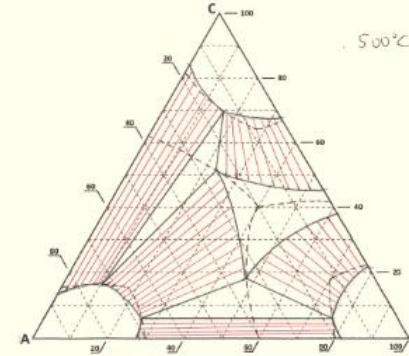
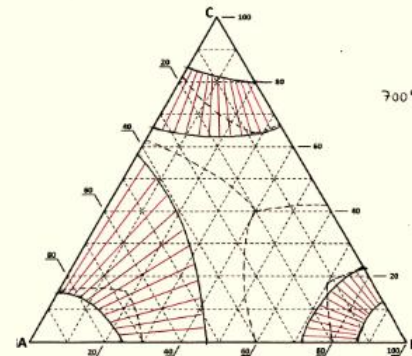
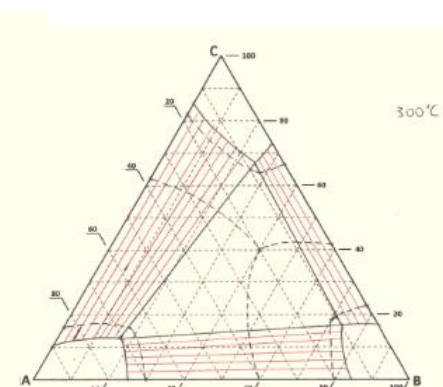
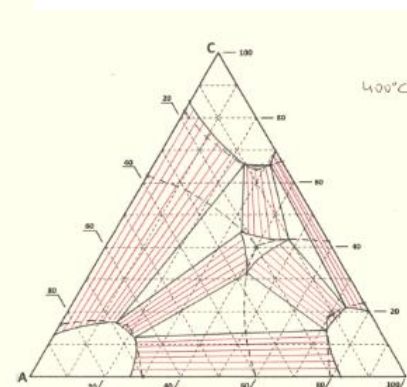
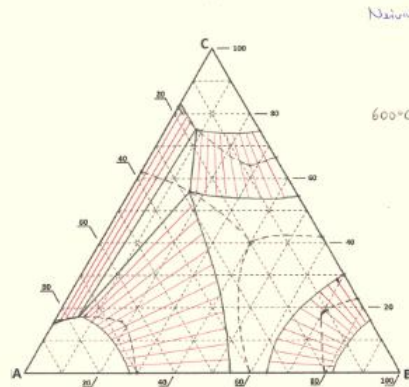
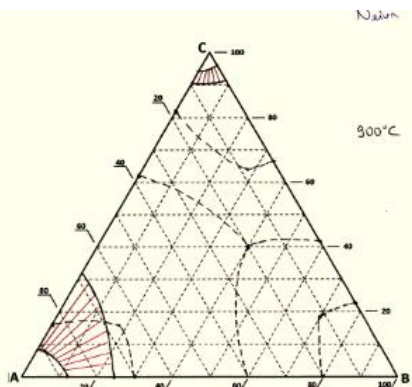
**EM UM SISTEMA TERNÁRIO, SÓ PODEMOS LER AS COMPOSIÇÕES NAS SEÇÕES ISOTÉRMICAS QUE ESTIVEREM DISPONÍVEIS. NOS CAMPOS DE DUAS FASES, É TAMBÉM NECESSÁRIO QUE ESTAS SEÇÕES TENHAM LINHAS DE CORRELAÇÃO (TIE-LINES)**

900°C

600°C

400°C

300°C



700°C

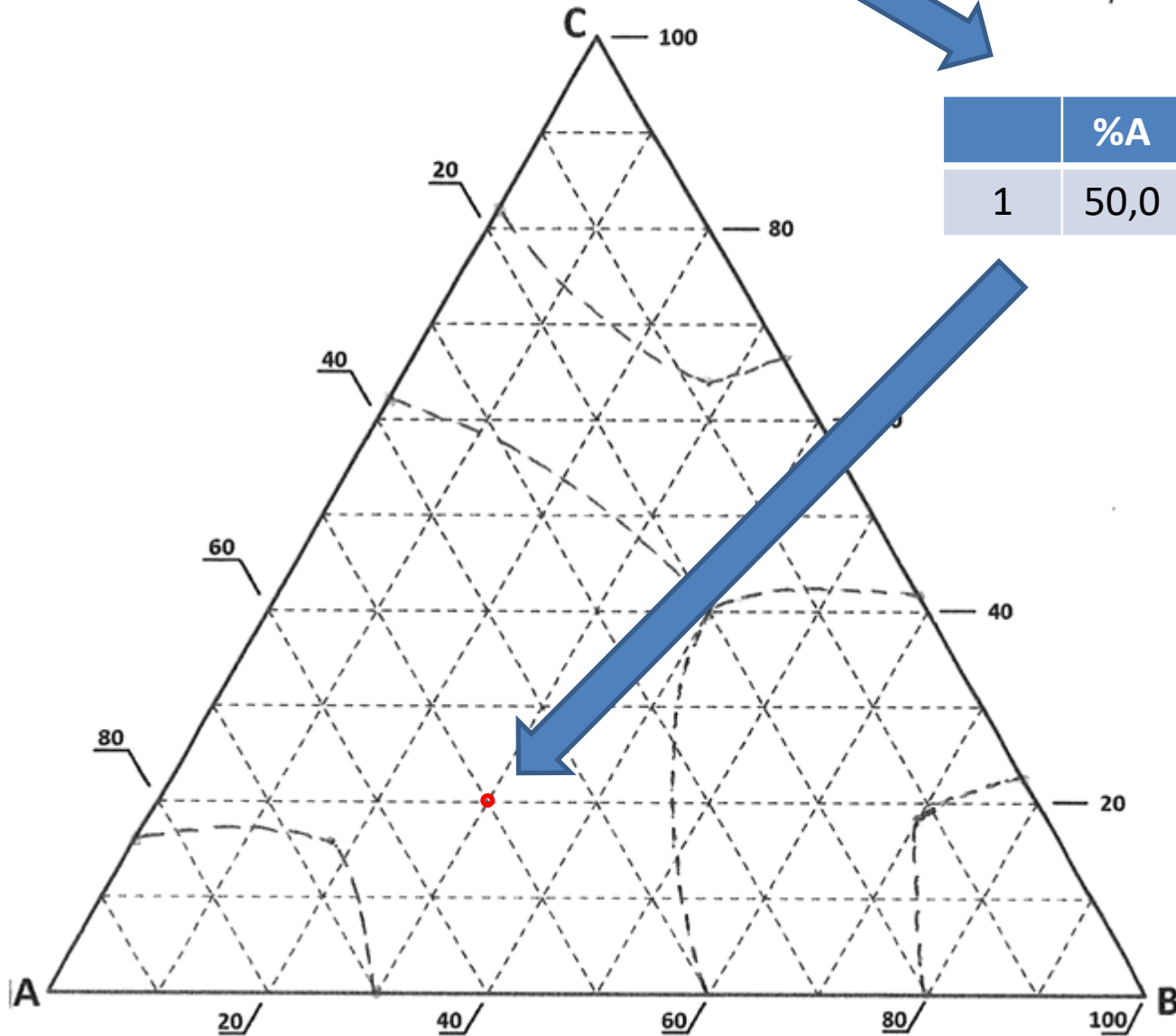
500°C

364°C

100°C

SEJA ESTA LIGA

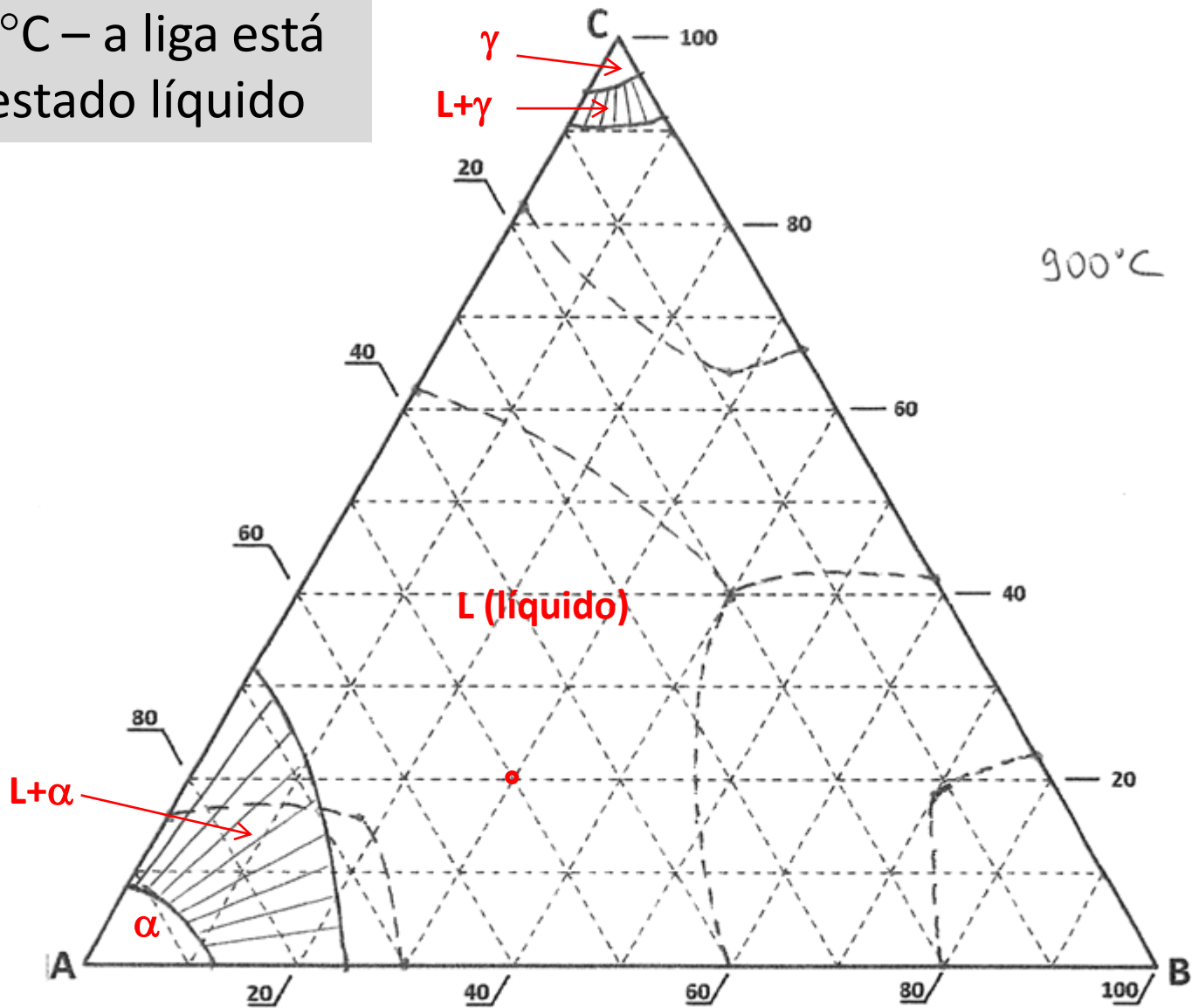
Neiva



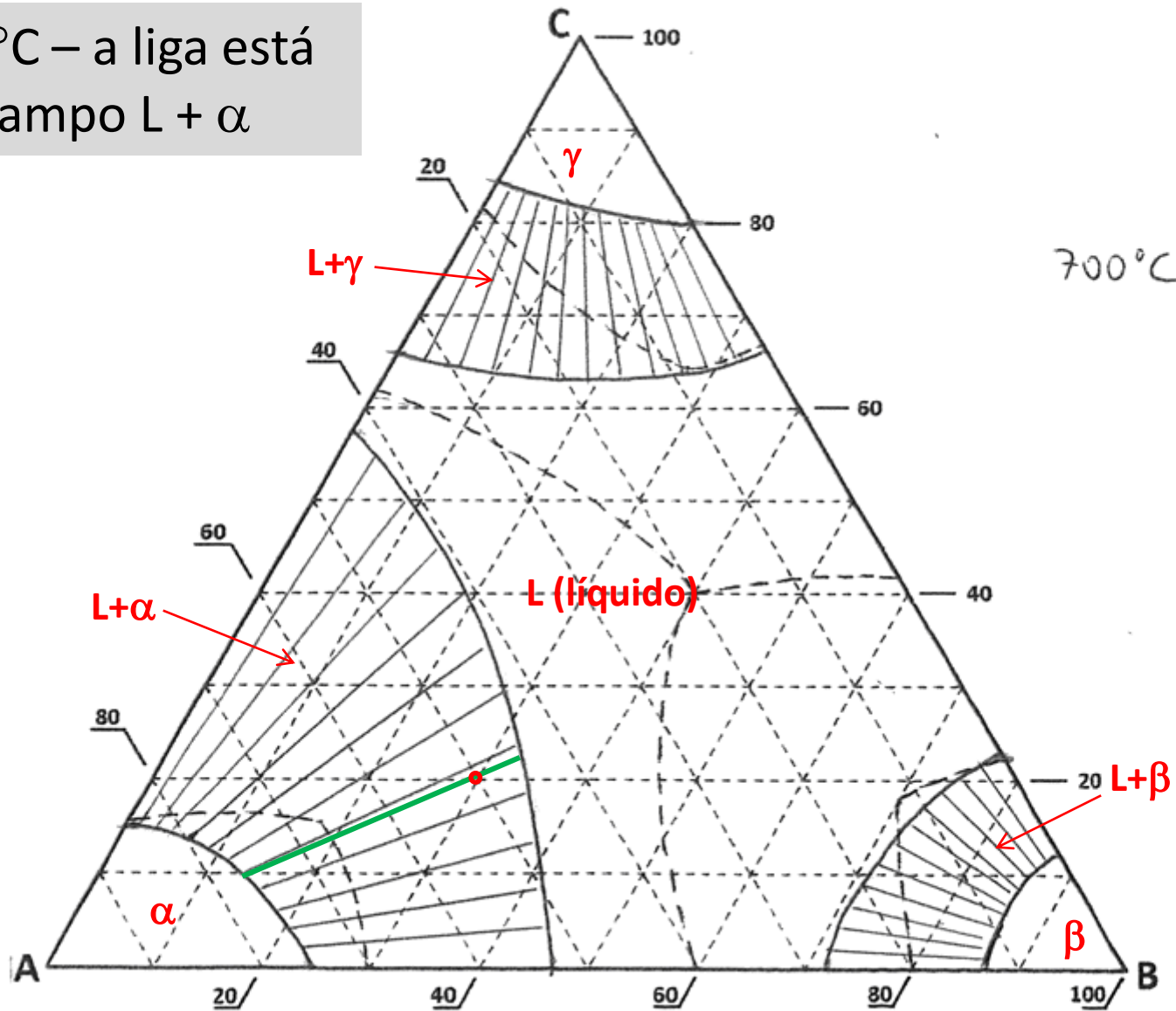
	%A	%B	%C
1	50,0	30,0	20,0

900°C – a liga está no estado líquido

Neiva



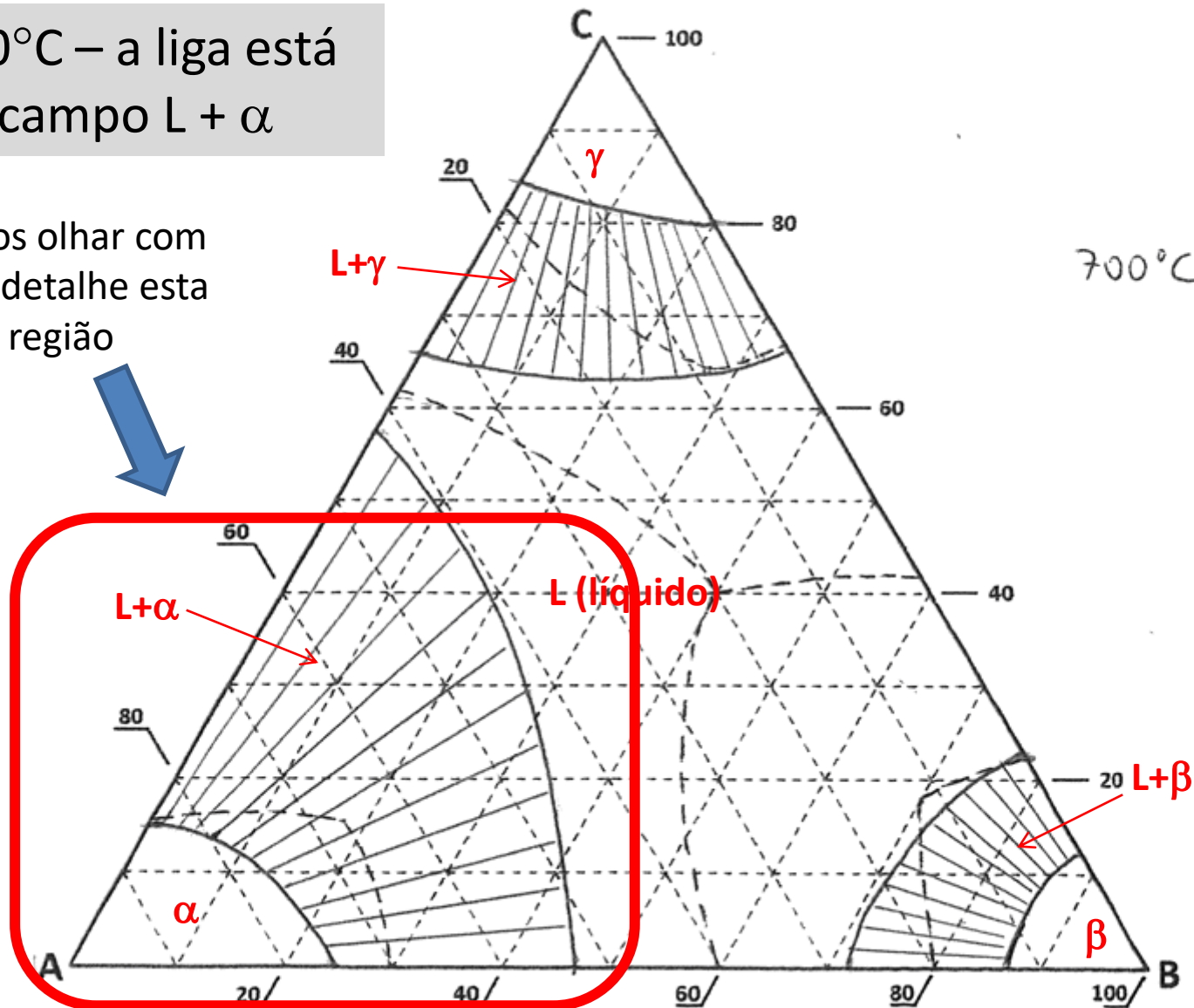
700°C – a liga está  
no campo L +  $\alpha$





700°C – a liga está  
no campo L +  $\alpha$

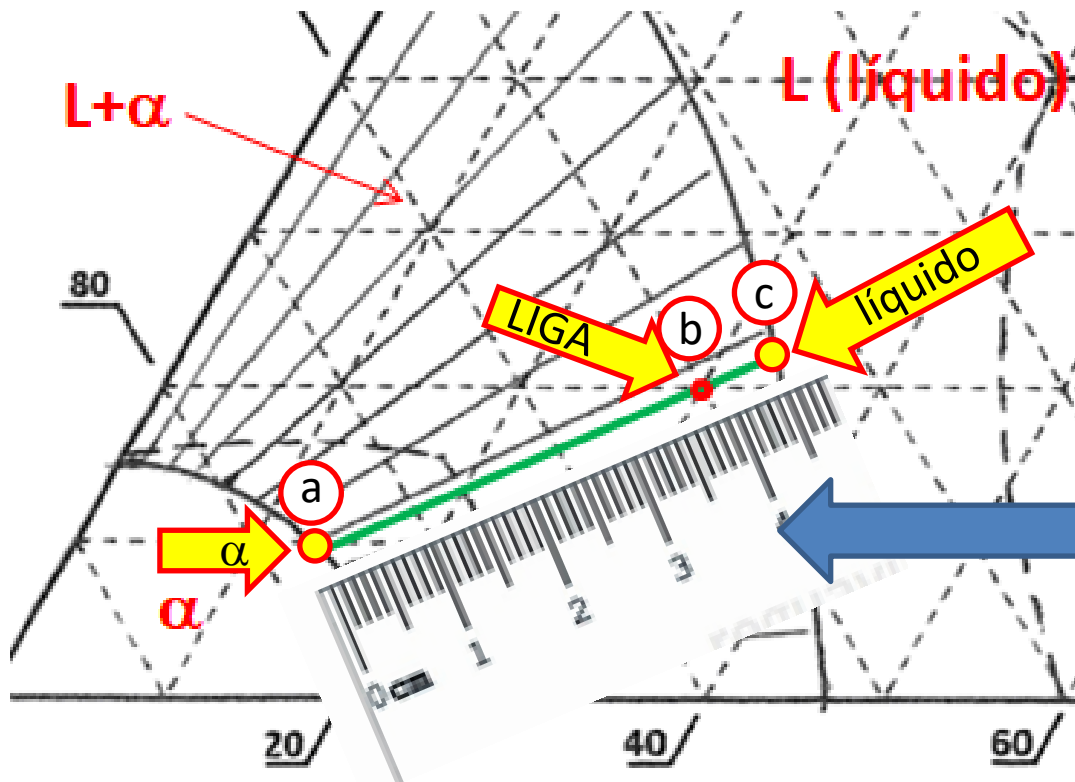
Vamos olhar com  
mais detalhe esta  
região



O ponto “a” corresponde à composição da fase  $\alpha$  em equilíbrio com líquido (ponto “c”) para a nossa liga (ponto “b”).

Estes dois pontos estão ligados por uma linha de correlação (*tie-line*), em verde, que passa pelo ponto “b”.

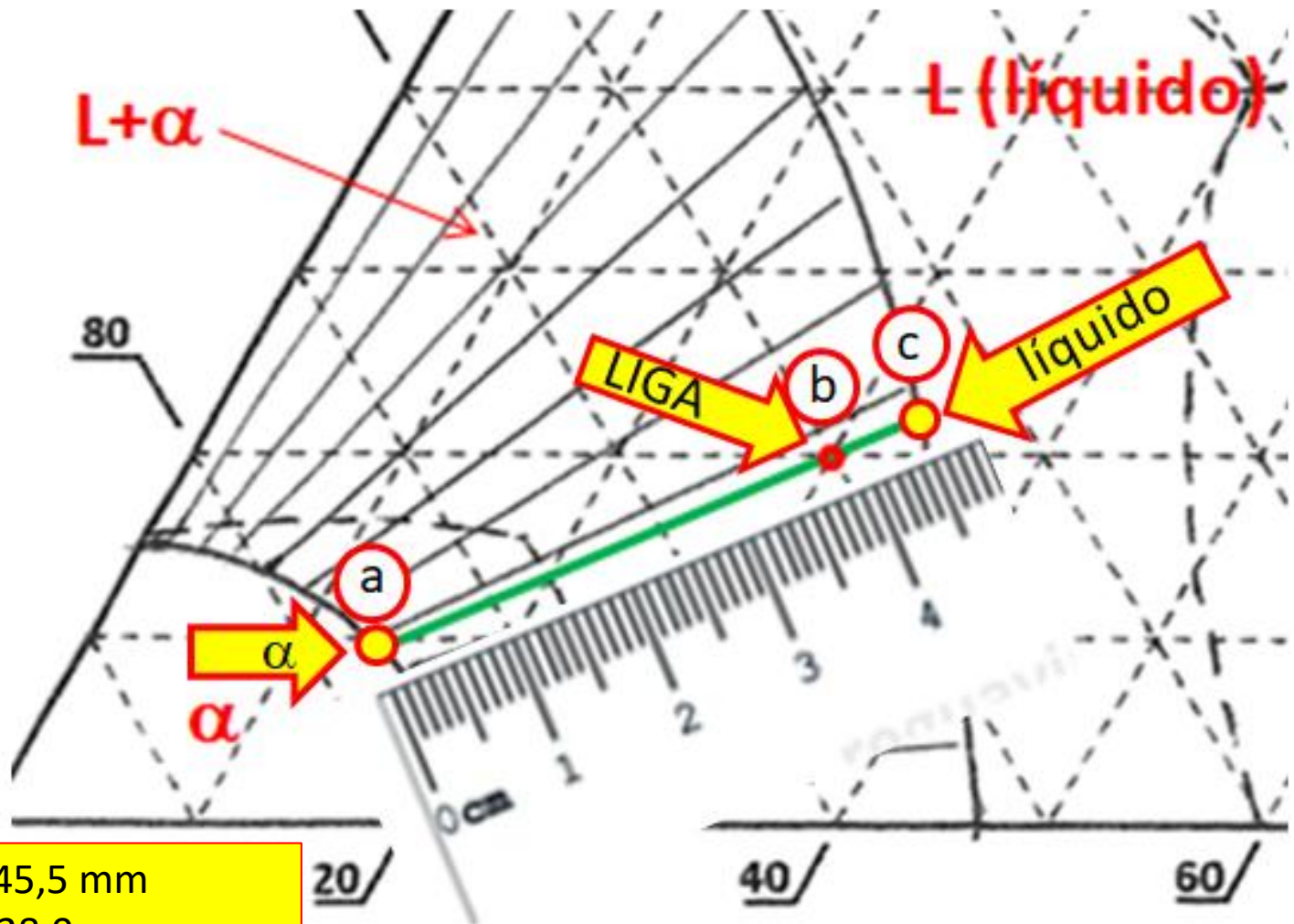
Esta linha de correlação foi traçada por nós com base nas linhas de correlação vizinhas, que estavam no diagrama.



Para determinar as frações das fases  $\alpha$  e líquido (regra da alavanca), utilizamos as três composições.

Poderíamos fazer isto analiticamente (utilizando matrizes, por exemplo), mas é mais simples medirmos as distâncias com uma régua.

# APLICAÇÃO DA REGRA DA ALAVANCA EM UM CAMPO DE DUAS FASES

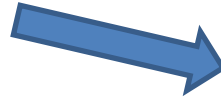


Distância a-c = 45,5 mm  
Distância a-b = 38,0 mm  
Distância b-c = 7,5 mm

fração de  $\alpha$  =  $7,5/45,5=16,5\%$   
fração de L =  $38,0/45,5=83,5\%$

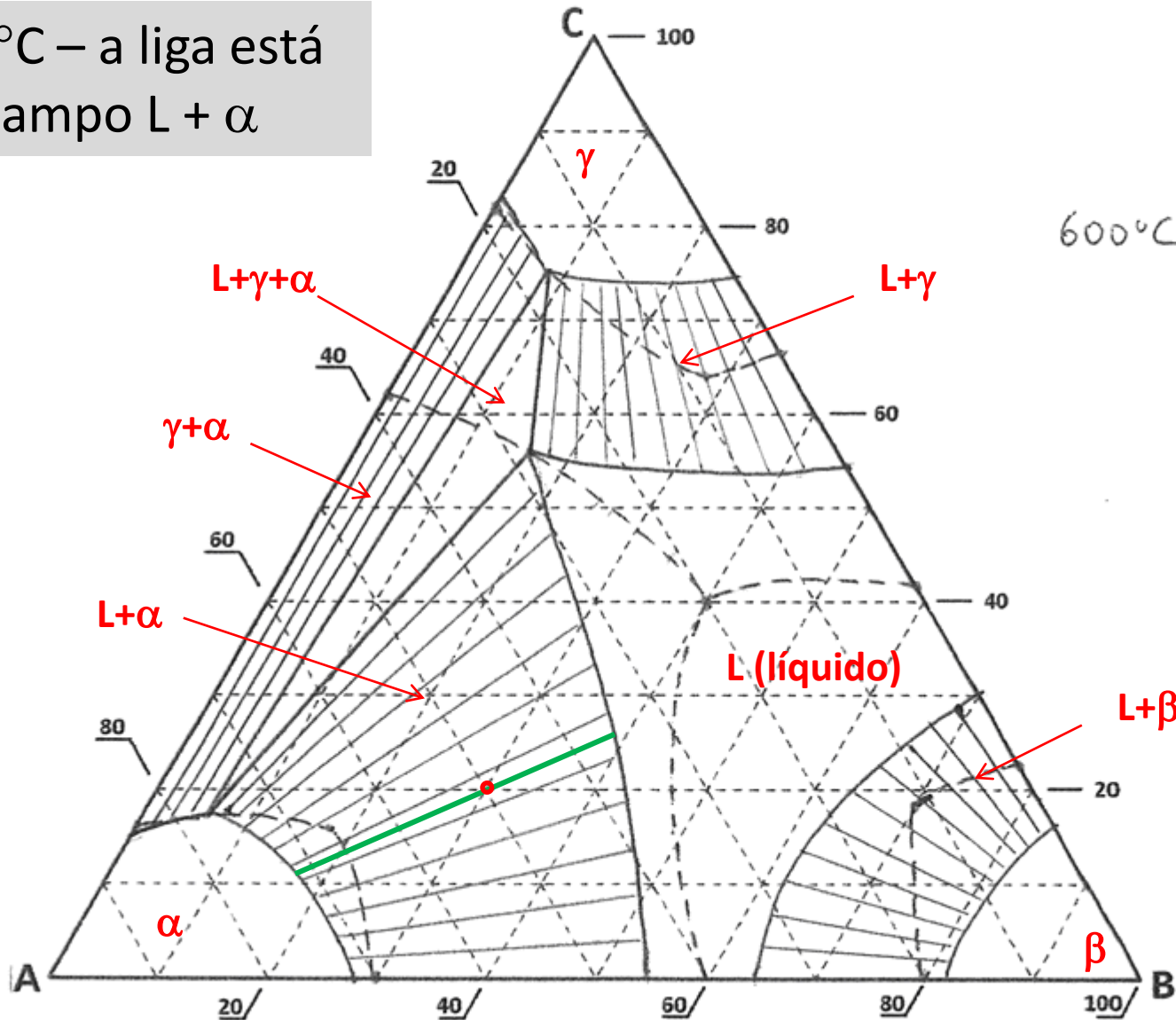
Evidentemente, estas distâncias dependem da escala do gráfico. Evidentemente, também, o resultado final independe disto.

Repetindo o  
procedimento anterior

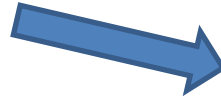


fração de  $\alpha = 20,5/51,5=39,8\%$   
fração de L =  $31,0/51,5=60,2\%$

600°C – a liga está  
no campo L +  $\alpha$

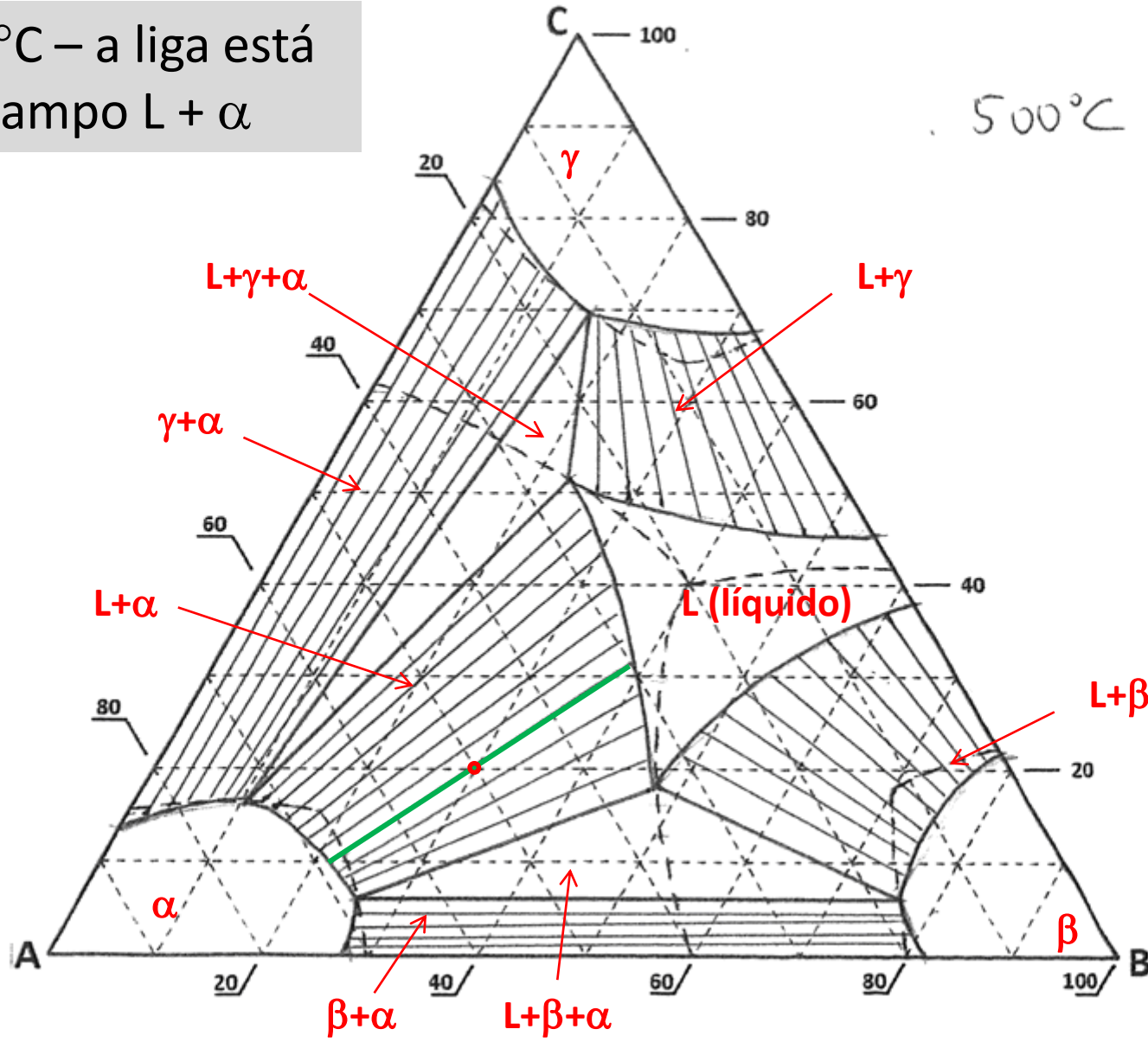


Repetindo o  
procedimento anterior



fração de  $\alpha = 31,0/55,5 = 52,3\%$   
fração de L =  $24,5/55,5 = 47,7\%$

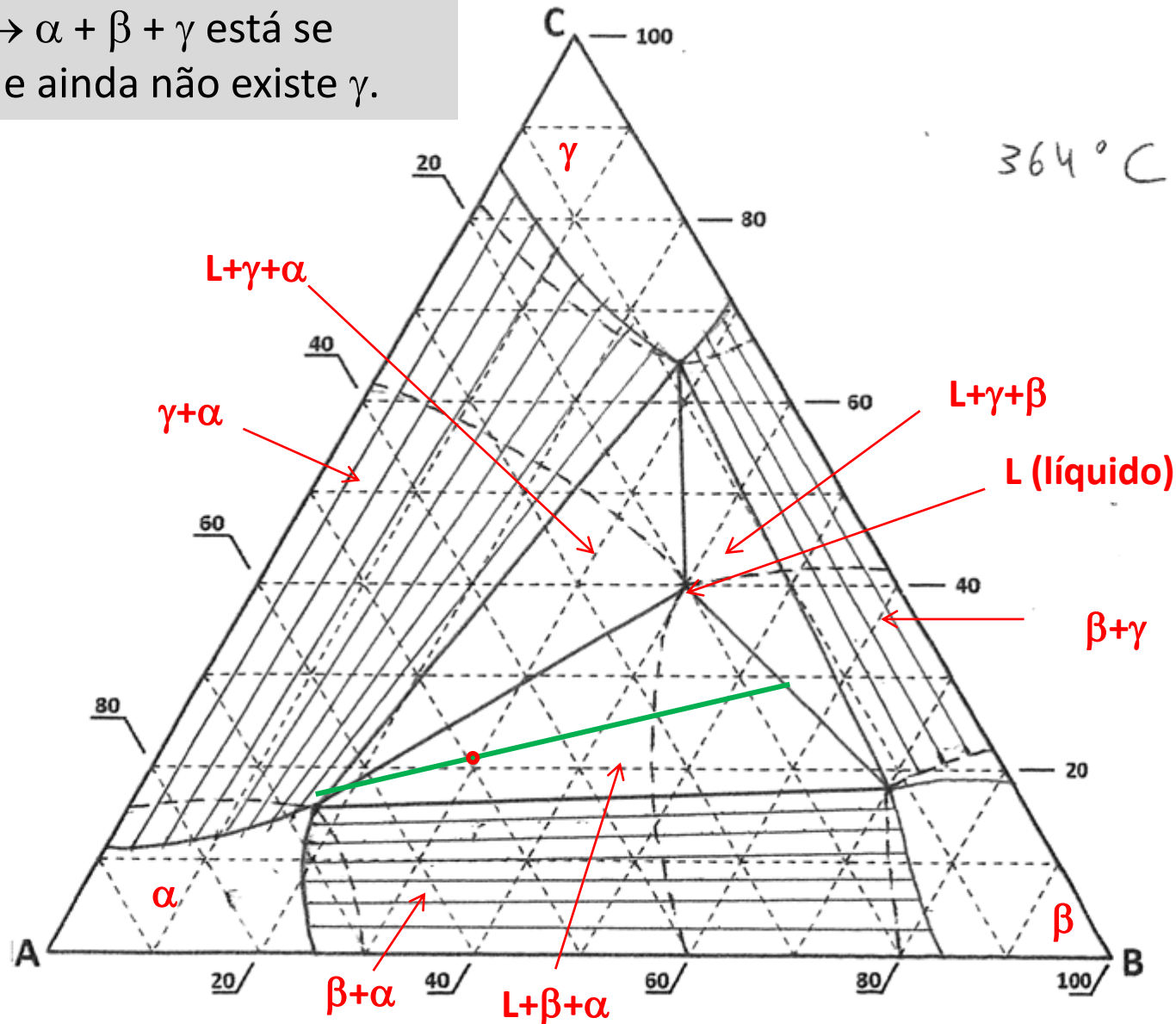
500°C – a liga está  
no campo L +  $\alpha$





364°C – A liga está no campo invariante  $L + \alpha + \beta + \gamma$ . Iremos supor, no resfriamento, que a reação  $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$  está se iniciando e ainda não existe  $\gamma$ .

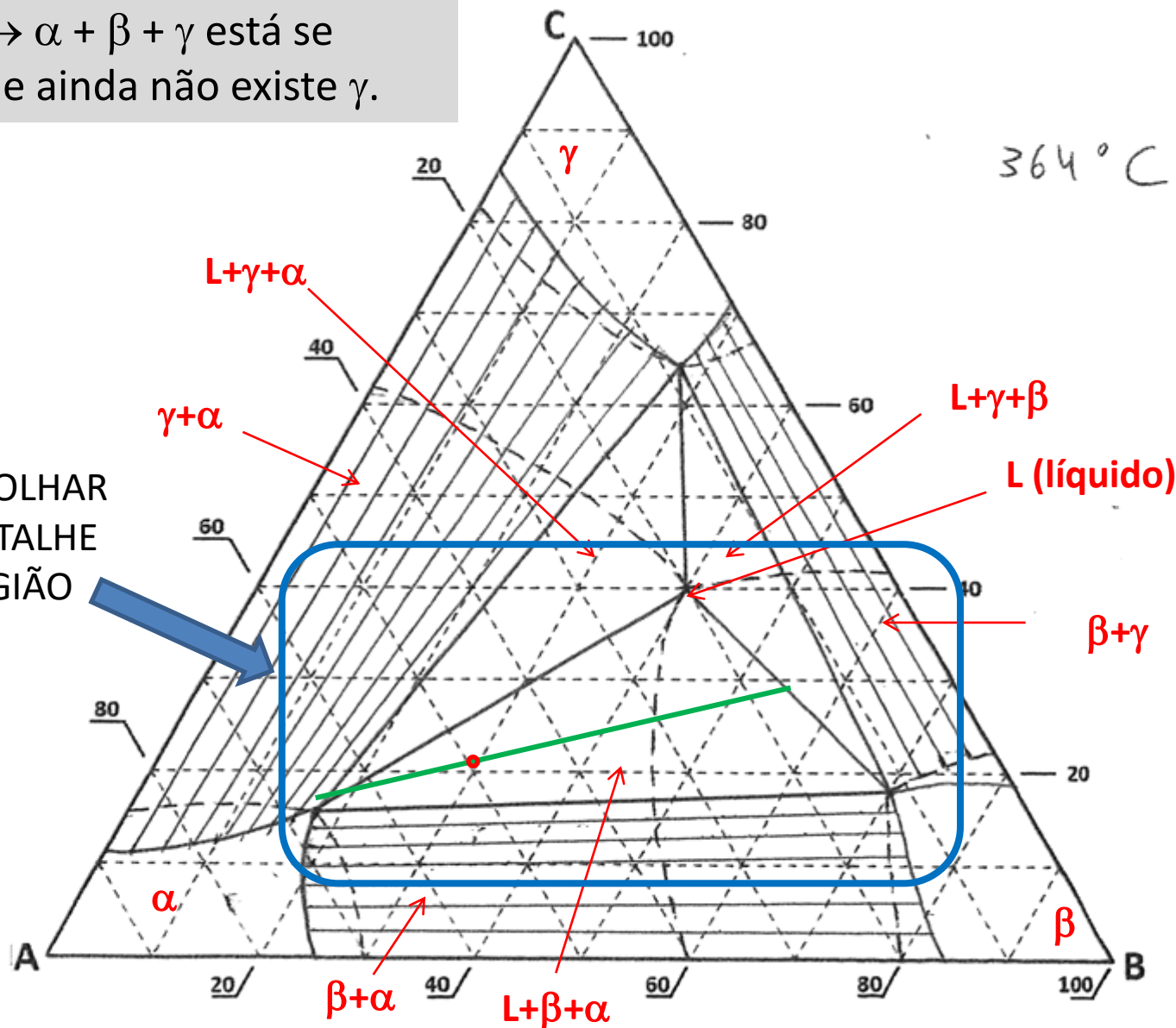
## INÍCIO DA REAÇÃO EUTÉTICA TERNÁRIA



## INÍCIO DA REAÇÃO EUTÉTICA TERNÁRIA

364°C – A liga está no campo invariante  $L + \alpha + \beta + \gamma$ . Iremos supor, no resfriamento, que a reação  $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$  está se iniciando e ainda não existe  $\gamma$ .

VAMOS OLHAR COM DETALHE ESTA REGIÃO

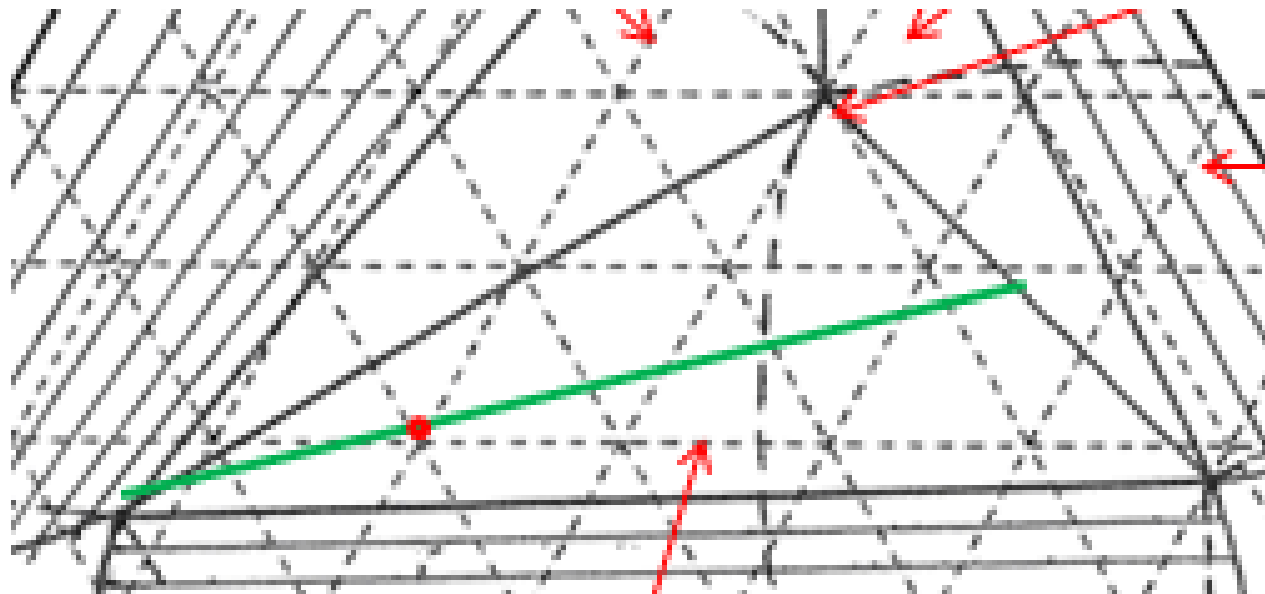


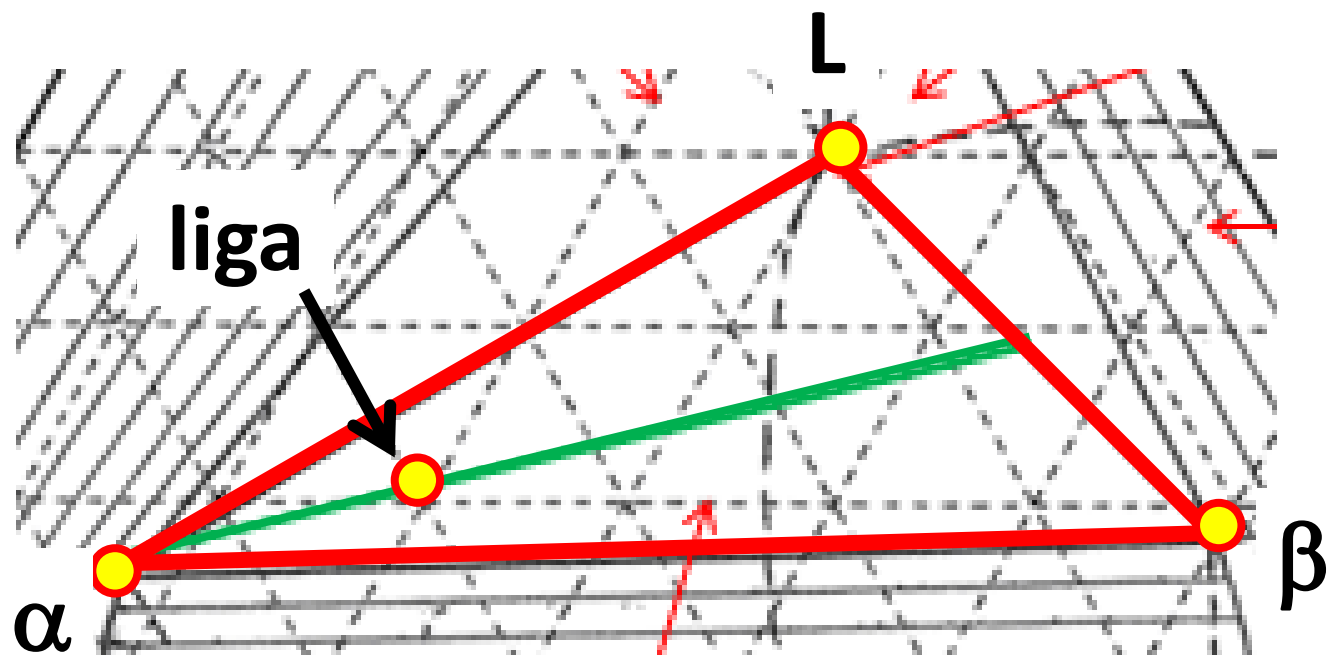
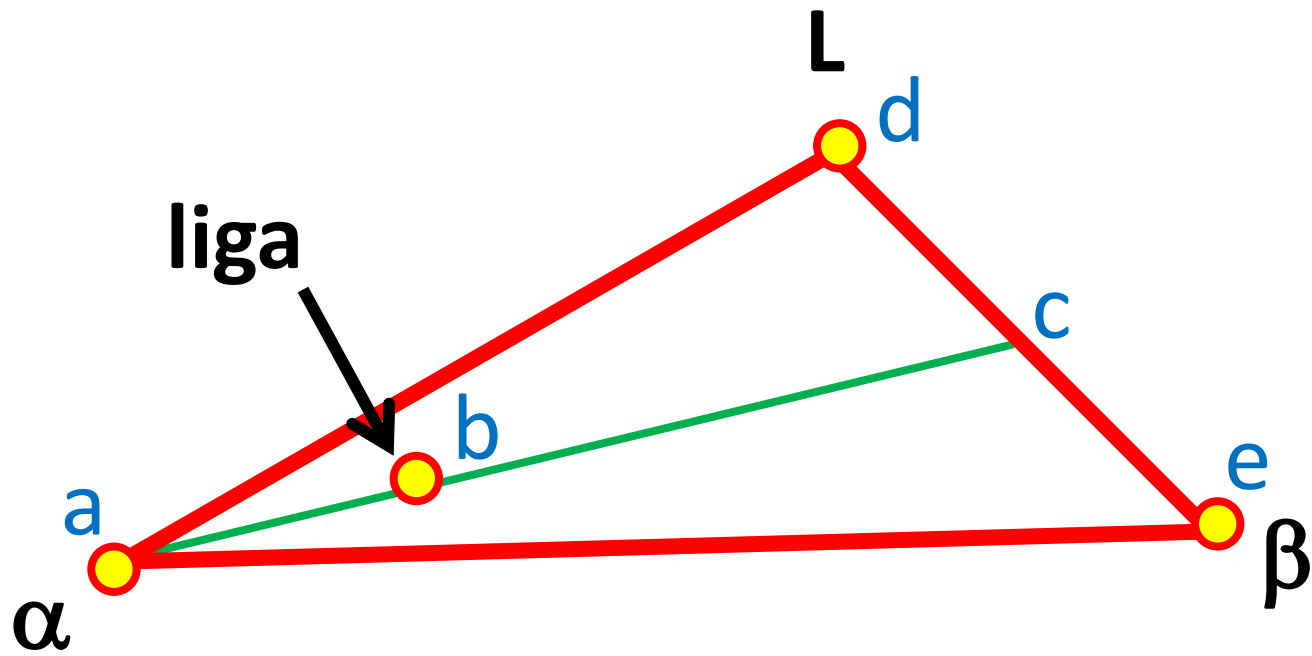


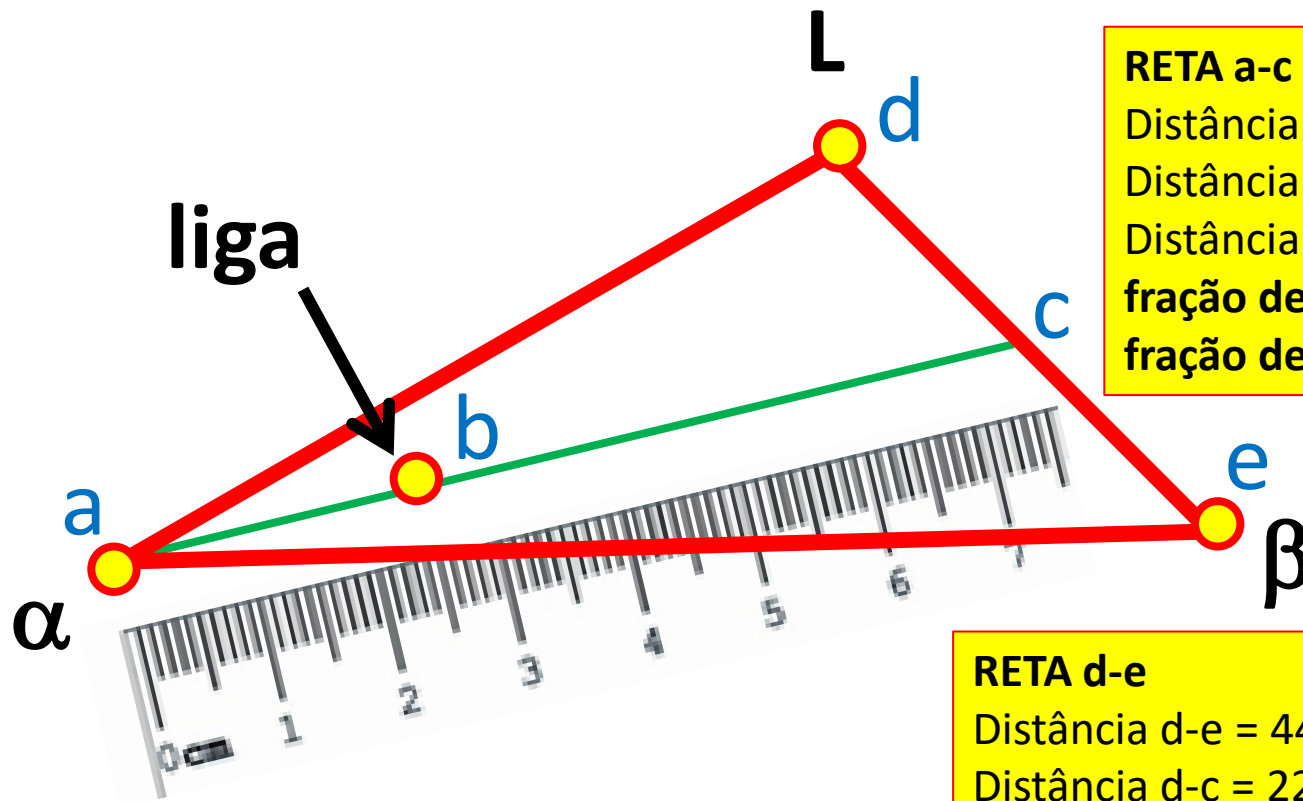
APLICAÇÃO DA REGRA DA ALAVANCA EM UM CAMPO DE TRÊS FASES

NO INÍCIO DA REAÇÃO EUTÉTICA TERNÁRIA ( $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$ )

(Para nossa liga, temos L,  $\alpha$  e  $\beta$ )







### RETA a-c

Distância a-c = 74,0 mm

Distância a-b = 24,5 mm

Distância b-c = 49,5 mm

fração de  $\alpha$  =  $49,5/74,0 = 66,9\%$

fração de  $L+\beta$  =  $24,5/74,0 = 33,1\%$

### RETA d-e

Distância d-e = 44,0 mm

Distância d-c = 22,5 mm

Distância c-e = 21,5 mm

fração de  $\beta$  em  $\beta+L$  =  $22,5/44,0 = 51,1\%$

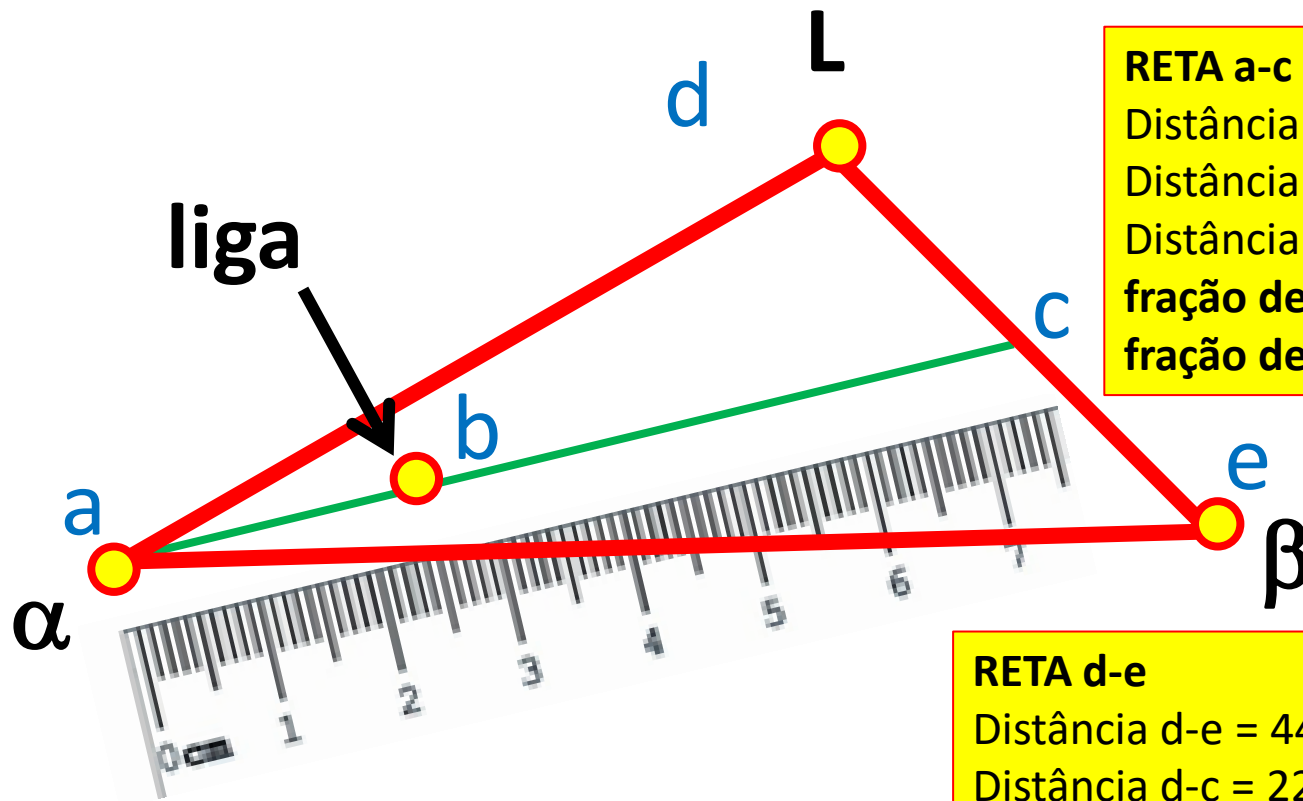
fração de  $L$  em  $\beta+L$  =  $21,5/44,0 = 48,9\%$

### RESULTADO FINAL

fração de  $\alpha$  =  $49,5/74,0 = 66,9\%$

fração de  $\beta$  =  $0,331 \cdot 0,511 = 16,9\%$

Fração de  $L$  =  $0,331 \cdot 0,489 = 16,2\%$



#### RETA a-c

Distância a-c = 74,0 mm

Distância a-b = 24,5 mm

Distância b-c = 49,5 mm

fração de  $\alpha$  =  $49,5/74,0 = 66,9\%$

fração de  $L+\beta$  =  $24,5/74,0 = 33,1\%$

#### RETA d-e

Distância d-e = 44,0 mm

Distância d-c = 22,5 mm

Distância c-e = 21,5 mm

fração de  $\beta$  em  $\beta+L$  =  $22,5/44,0 = 51,1\%$

fração de  $L$  em  $\beta+L$  =  $21,5/44,0 = 48,9\%$

#### RESULTADO FINAL

fração de  $\alpha$  =  $49,5/74,0 = 66,9\%$

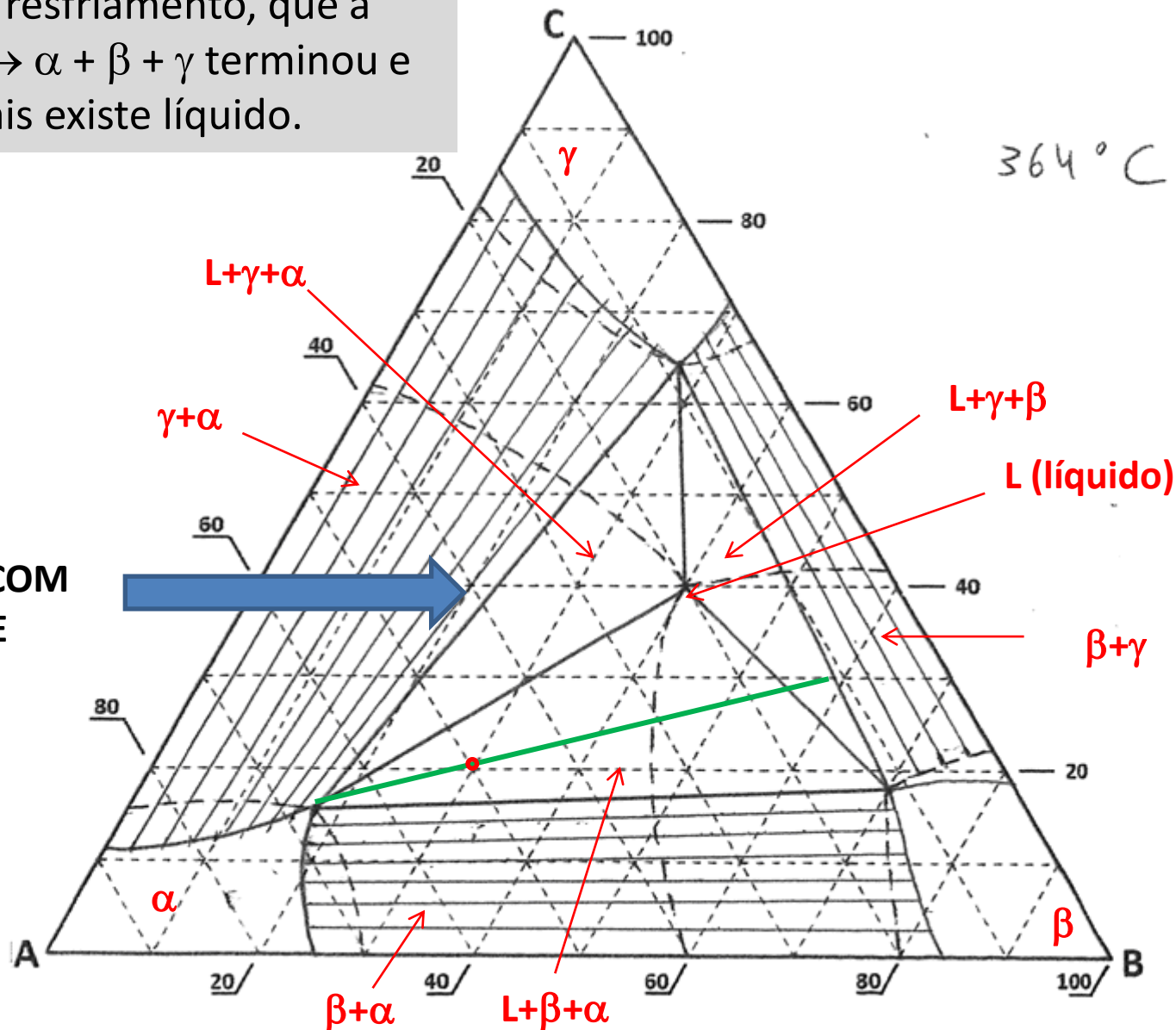
fração de  $\beta$  =  $0,331 \cdot 0,511 = 16,9\%$

Fração de  $L$  =  $0,331 \cdot 0,489 = 16,2\%$

## FINAL DA REAÇÃO EUTÉTICA TERNÁRIA

364°C – A liga está no campo invariante  $L + \alpha + \beta + \gamma$ . Iremos supor, no resfriamento, que a reação  $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$  terminou e já não mais existe líquido.

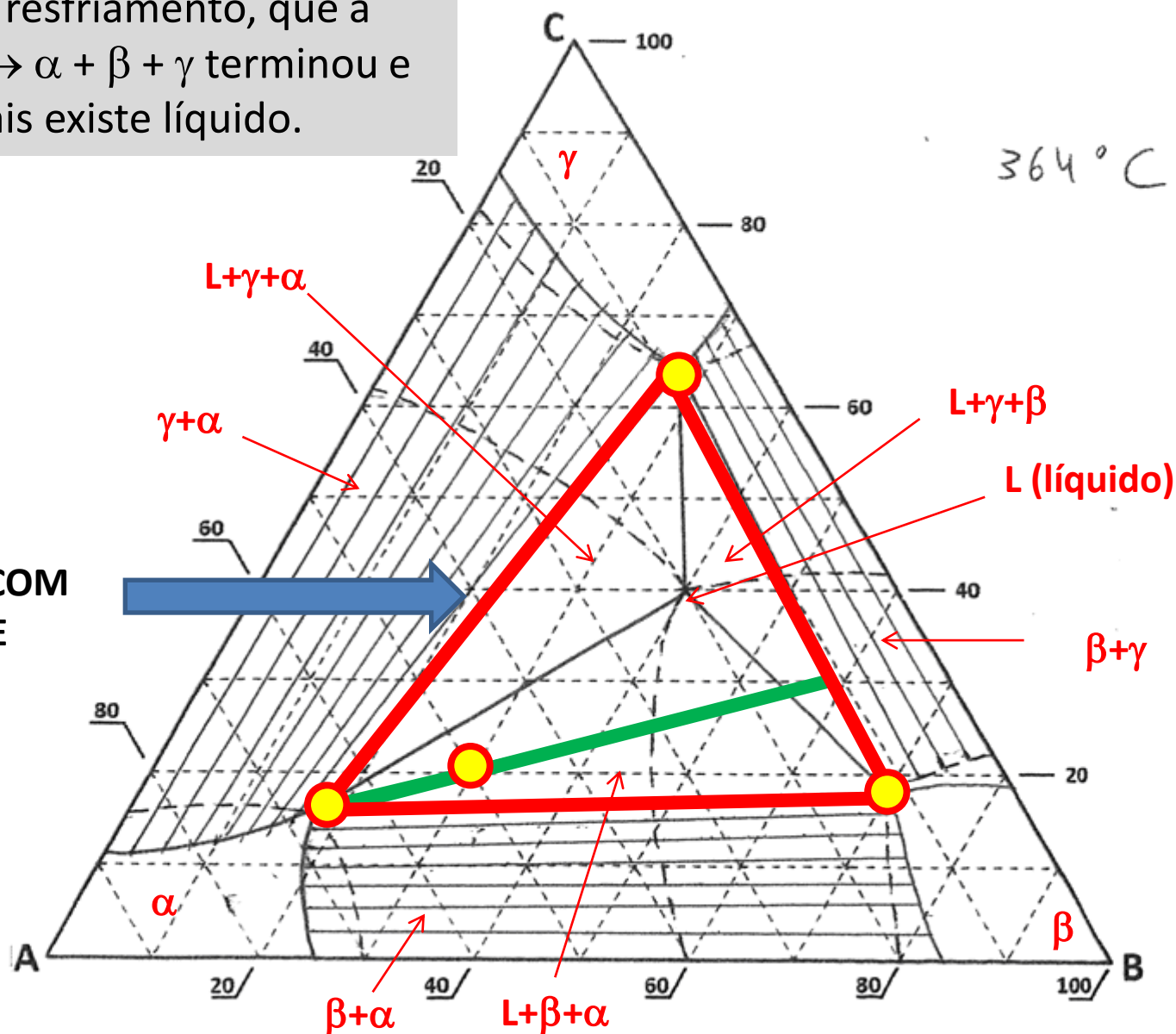
VAMOS OLHAR COM DETALHE



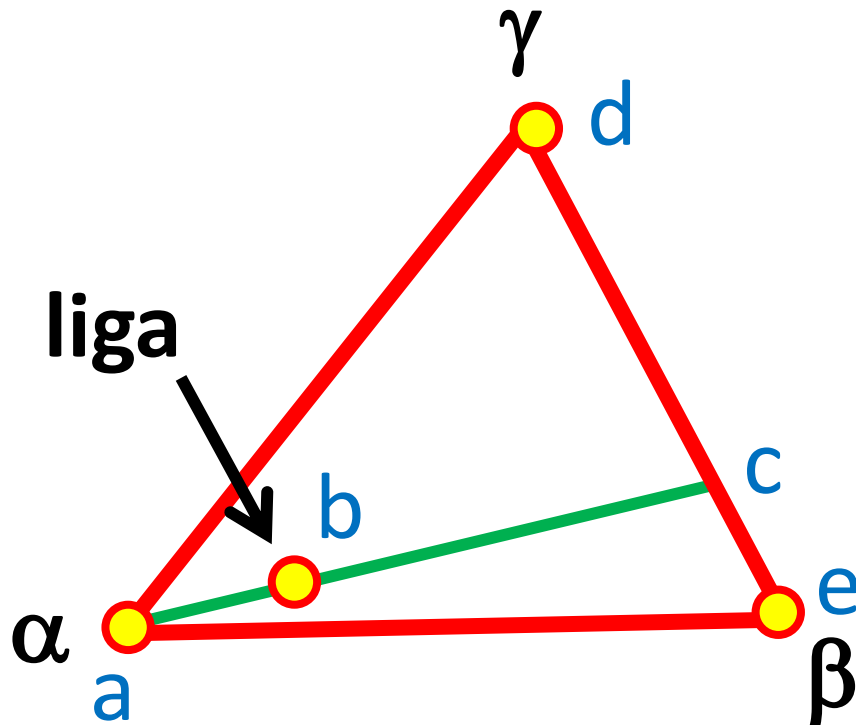
## FINAL DA REAÇÃO EUTÉTICA TERNÁRIA

364°C – A liga está no campo invariante  $L + \alpha + \beta + \gamma$ . Iremos supor, no resfriamento, que a reação  $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$  terminou e já não mais existe líquido.

VAMOS OLHAR COM DETALHE



## FINAL DA REAÇÃO EUTÉTICA TERNÁRIA ( $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$ )



### RETA a-c

Distância a-c = 82,0 mm

Distância a-b = 25,0 mm

Distância b-c = 57,0 mm

fração de  $\alpha = 57,0/82,0 = 69,5\%$

fração de  $\gamma + \beta = 25,0/82,0 = 30,5\%$

### RETA d-e

Distância d-e = 72,5 mm

Distância d-c = 53,5 mm

Distância c-e = 19,0 mm

fração de  $\beta$  em  $\beta + \gamma = 53,5/72,5 = 73,8\%$

fração de  $\gamma$  em  $\beta + \gamma = 19,0/72,5 = 26,2\%$

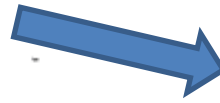
### RESULTADO FINAL

fração de  $\alpha = 57,0/82,0 = 69,5\%$

fração de  $\beta = 0,305 \cdot 0,738 = 22,5\%$

Fração de  $\gamma = 0,305 \cdot 0,262 = 8,0\%$

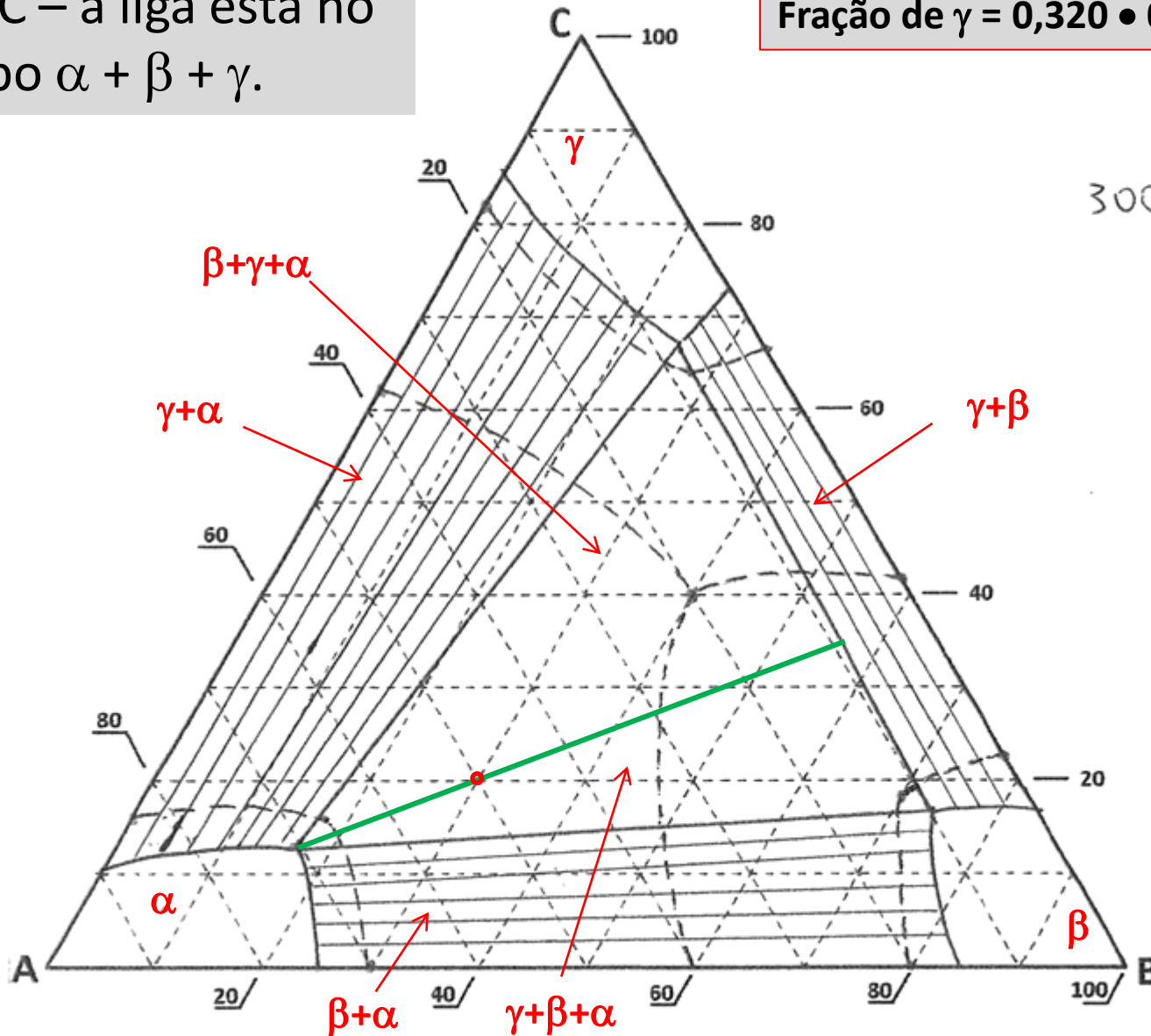
Repetindo o procedimento anterior



**RESULTADO FINAL**

fração de  $\alpha = 59,0/88,0 = 67,0\%$   
fração de  $\beta = 0,320 \cdot 0,644 = 21,3\%$   
Fração de  $\gamma = 0,320 \cdot 0,356 = 11,7\%$

300°C – a liga está no campo  $\alpha + \beta + \gamma$ .



300°C



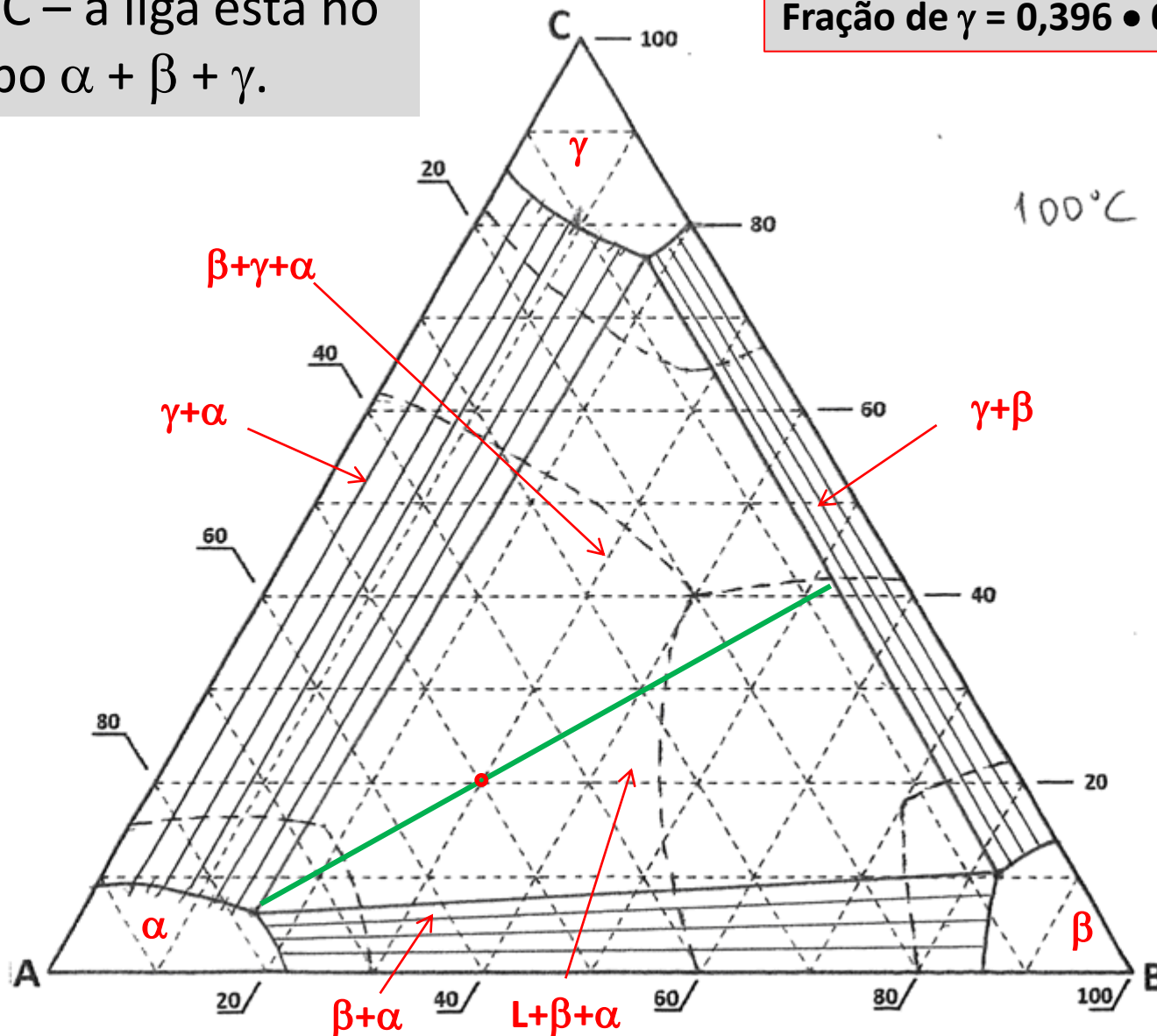
100°C – a liga está no campo  $\alpha + \beta + \gamma$ .

### RESULTADO FINAL

fração de  $\alpha = 61,0/101,0 = 60,4\%$

fração de  $\beta = 0,396 \cdot 0,533 = 21,1\%$

Fração de  $\gamma = 0,396 \cdot 0,467 = 18,5\%$



# RESUMINDO

LIGA: 50%A 30%B 20%C

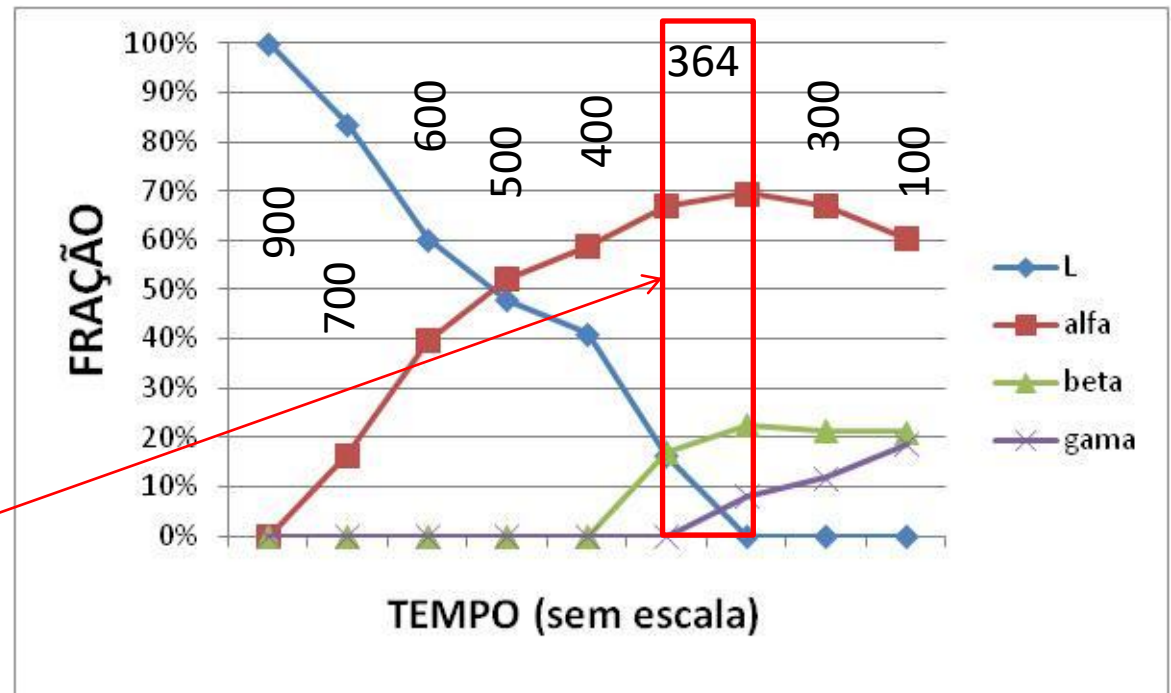
transformação	T (°C)	COMPOSIÇÕES				FRAÇÕES			
		líquido	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	líquido	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
nenhuma	900	50% A 30% B 20% C				100.0%			
L $\rightarrow$ $\alpha$	700	43% A 34% B 23% C	76.5% A 14% B 9.5% C			83.5%	16.5%		
	600	56% A 18% B 26% C	50% A 39% B 11% C			60.2%	39.8%		
L $\rightarrow$ $\alpha$	500	30% A 39% B 31% C	68% A 22% B 10% C			47.7%	52.3%		
L $\rightarrow$ $\alpha + \beta$ (entrando no campo)	400	26% A 42% B 32% C	66% A 22% B 12% C	13% A 72% B 15% C		41.1%	58.9%	0.0%	
L $\rightarrow$ $\alpha + \beta + \gamma$	364 início	20% A 40% B 40% C	66% A 18% B 16% C	12% A 70% B 18% C		16.2%	66.9%	16.9%	0.0%
	364 durante	20% A 40% B 40% C	66% A 18% B 16% C	12% A 70% B 18% C	9% A 27% B 64% C	8.1%	68.2%	19.7%	4.0%
	364 final		66% A 18% B 16% C	12% A 70% B 18% C	9% A 27% B 64% C	0.0%	69.5%	22.5%	8.0%
apenas mudanças de composição	300		70% A 17% B 13% C	9% A 74% B 17% C	8% A 25% B 67% C		67.0%	21.2%	11.7%

LEITURA DIRETA NO DIAGRAMA

REGRA DA ALAVANCA

# PLOTANDO AS FRAÇÕES

T (°C)	FRAÇÕES			
	líquido	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
900	100.0%			
700	83.5%	16.5%		
600	60.2%	39.8%		
500	47.7%	52.3%		
400	41.1%	58.9%	0.0%	
364 início	16.2%	66.9%	16.9%	0.0%
364 final	0.0%	69.5%	22.5%	8.0%
300		67.0%	21.2%	11.7%



reação invariante

**OBRIGADO**