DIAGRAMA DE RIST

Diagrama de Rist

Ou Diagrama Operacional do Alto Forno

Balanço de massa e térmico, com restrição termodinâmica.

No AF e outros processos de redução por carbono, as principais reações envolvem oxigênio: redução do minério e oxidação do carbono.

A lista destas reações pode ser feita considerando um dos dois aspectos: “ de onde vem o oxigênio” e “ para onde vai o oxigênio”

Fontes de oxigênio (“de onde vem o oxigênio”)

- óxidos de ferro;
- sopro de ar;
- óxidos redutíveis na ganga do minério e cinzas do redutor.

Destinos do oxigênio (“para onde vai o oxigênio”)

- gera CO a partir do carbono ou
- CO2 a partir do CO

Coordenadas do diagrama:

-eixo X: átomos de O/átomos de C, ou seja, **destinos do oxigênio**

-eixo Y: átomos de O/átomos de Fe, isto é, **fontes de oxigênio**

Inclinação da reta (μ) fornece a relação entre carbono e ferro, isto é, o consumo específico de carbono para transferir o oxigênio do ferro para o carbono

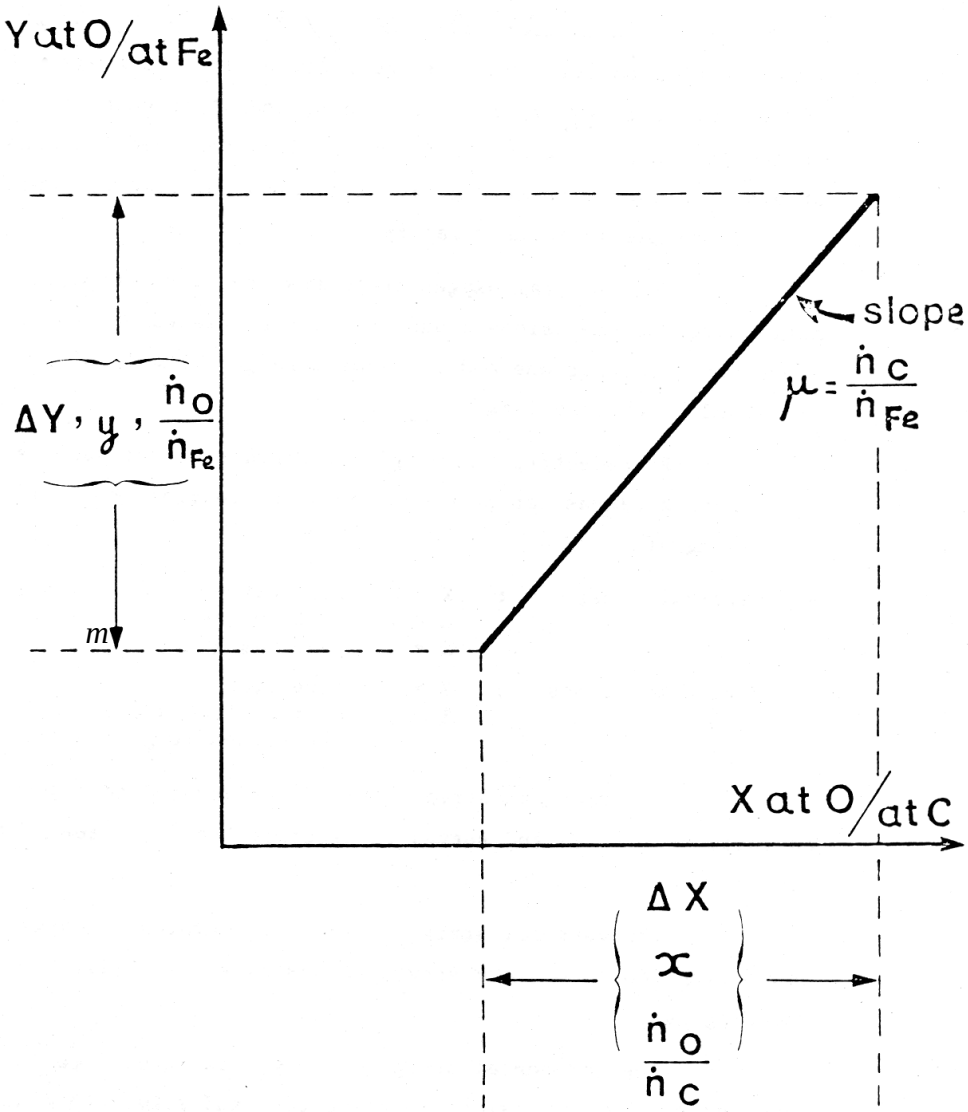

Fig. 1 SEGMENT REPRESENTING A TRANSFER OF OXYGEN IN THE COORDINATES X = O/C, Y = O/Fe .

Origem: carbono puro e ferro puro

3 linhas verticais:

X=0: carbono puro

X=1; CO puro

X=2: CO_2 puro

2 linhas horizontais:

Y=0: ferro puro

$Y=y_o$: grau de oxidação do ferro na carga (igual a 1,5 para Fe_2O_3, por exemplo)

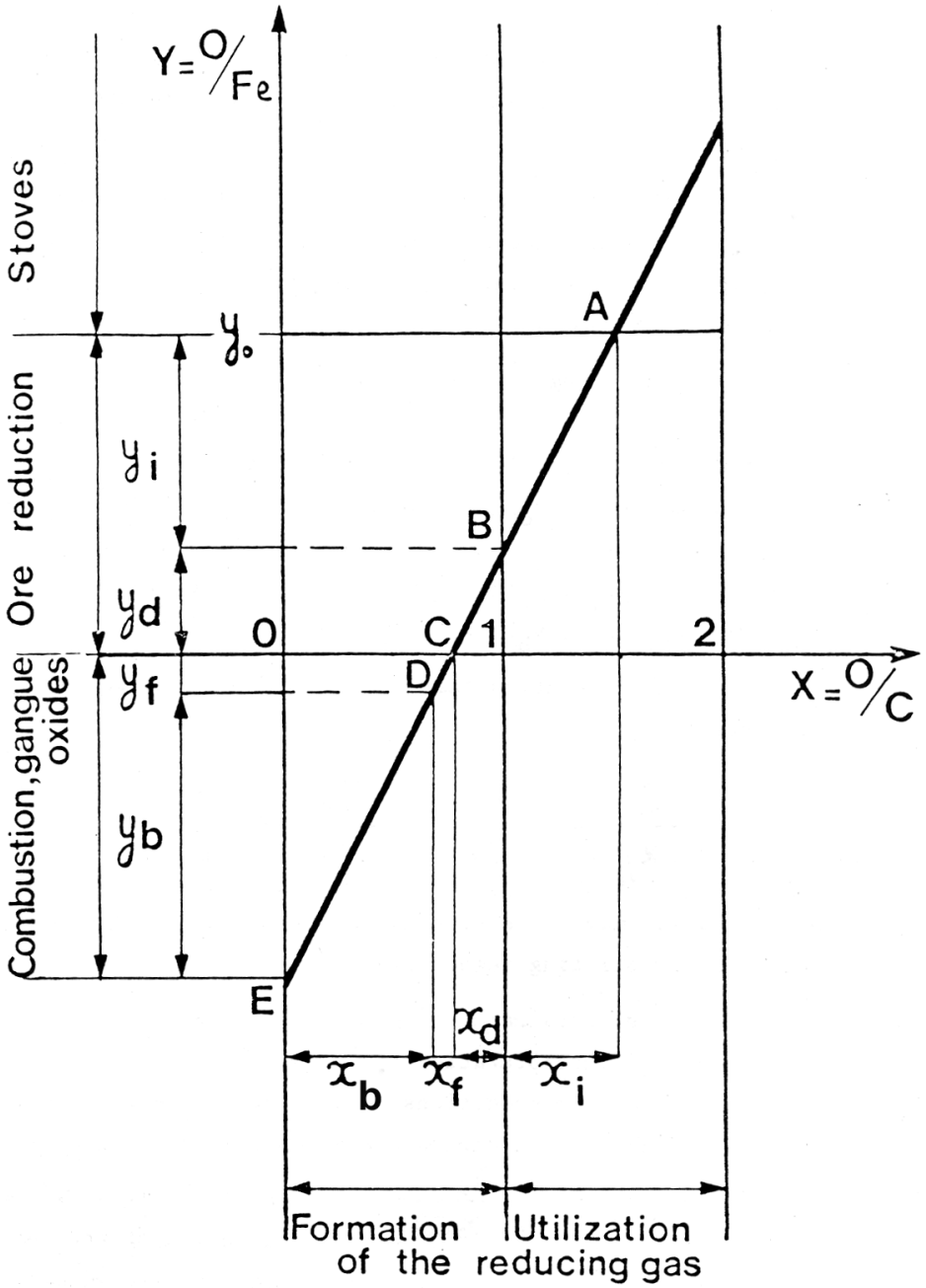

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Para 0<x<1, as fontes de oxigênio convertem C em CO (formação do gás redutor)

Para 1<x<2, oxigênio converte CC a CO_2 (utilização do gás redutor)

Para 0<y<y0, representa oxigênio associado ao ferro, presente nos óxidos de ferro, e descreve a redução dos óxidos até ferro metálico. O oxigênio dos óxidos d ferro vai parcialmente a CO (redução direta) e parcialmente a CO_2 (redução indireta.

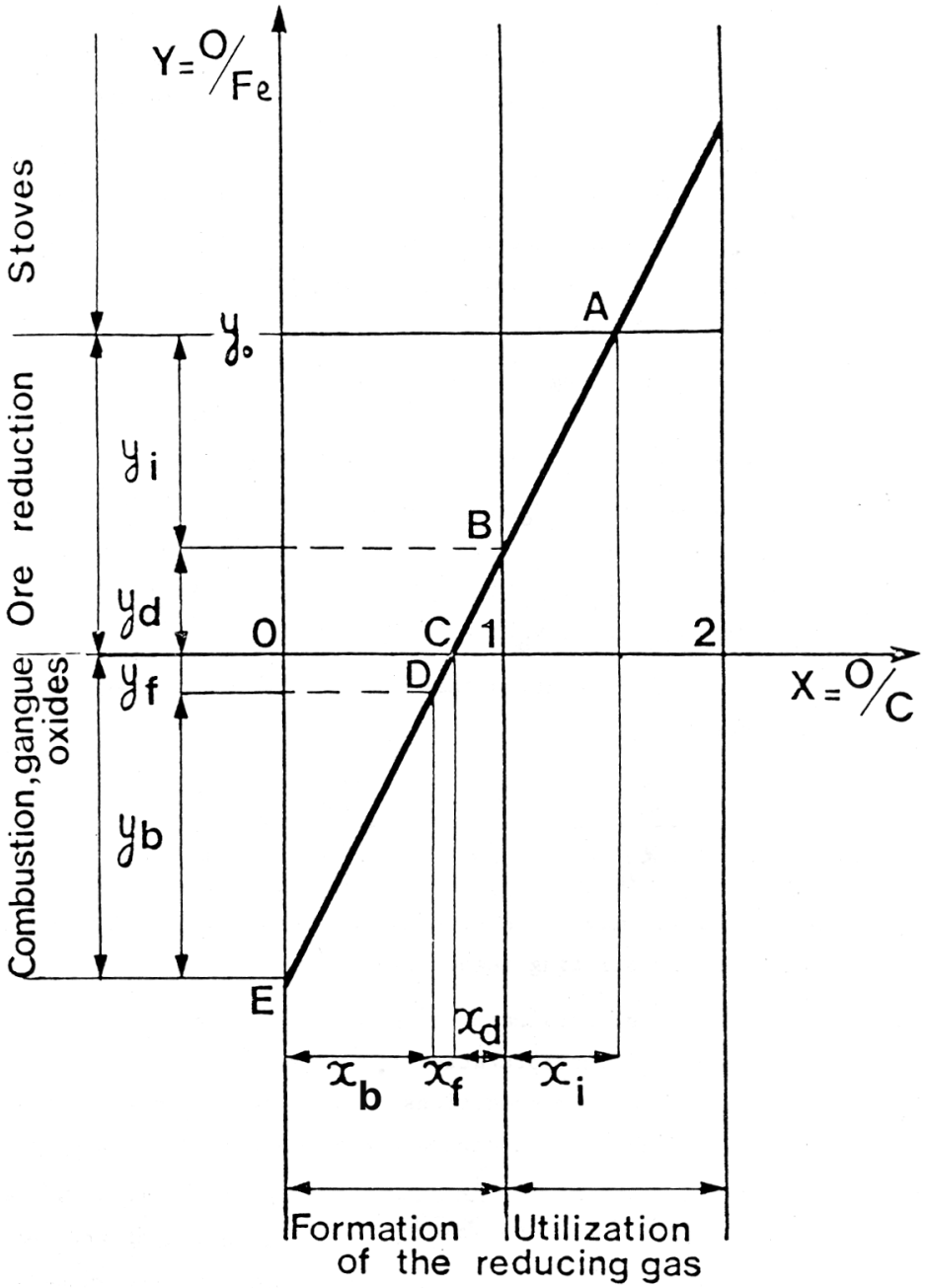

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Para y<0, representa fontes de oxigênio outras que os óxidos de ferro, ativas na parte inferior do forno (cadinho, ventaneiras, rampa), que participação da formação do gás redutor: combustão pelo sopro, redução da ganga.

Assim tem-se, na figura ao lado:

Segmento AB (x_i,y_i): redução indireta

Segmento BC (x_d,y_d): redução direta (Boudouard)

Segmento CD (x_f,y_f): redução da ganga

Segmento DE (x_b,y_b): combustão pelo sopro

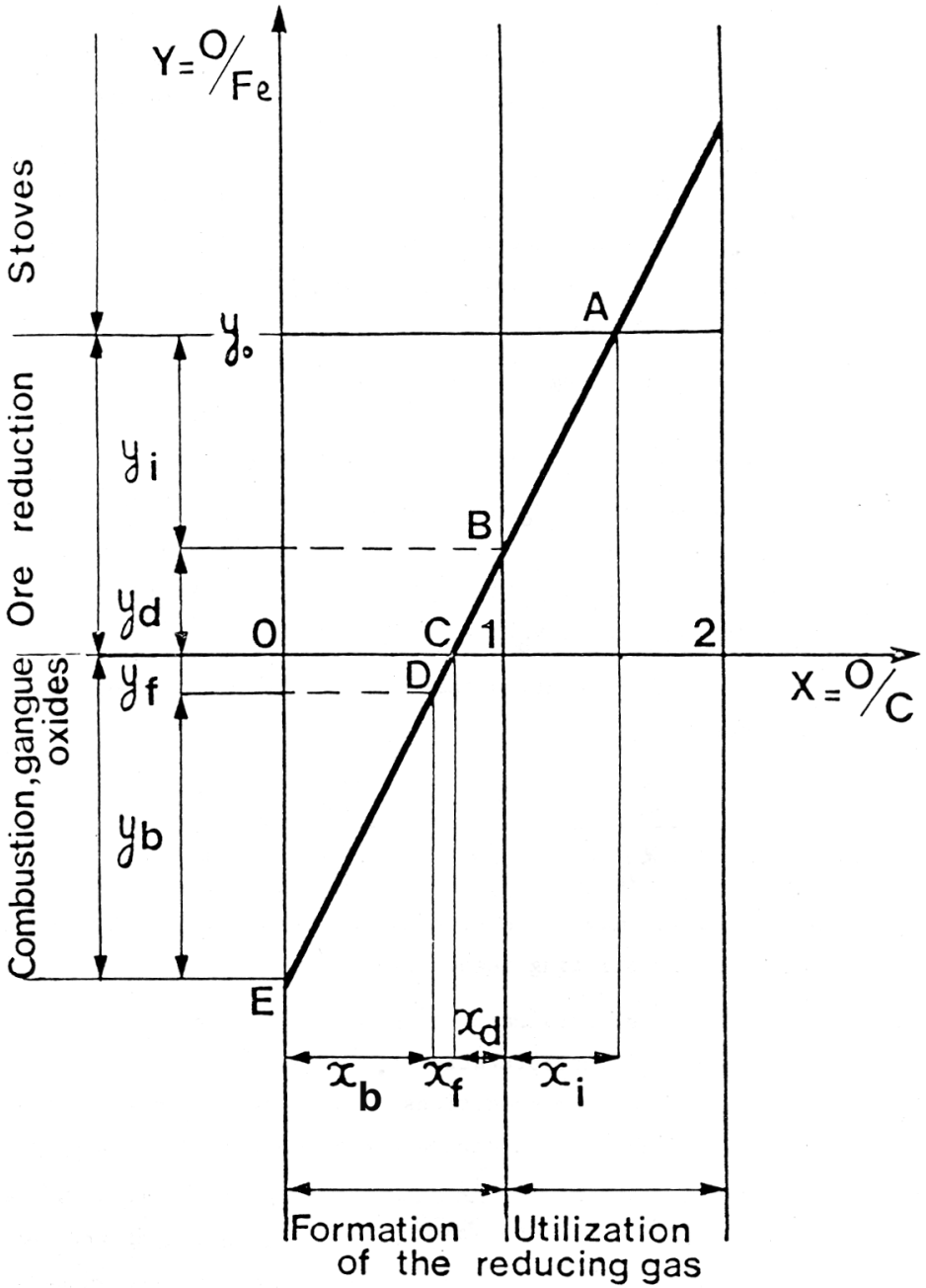

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Assim:

$y_b/x_b = y_f/x_f = y_d/x_d = y_i/x_i = ... = \mu$

Coordenadas

Ponto A

X_A= grau de oxidação do carbono no gás de topo (at.O/at.C)

$X_A - 1 = x_i = \%CO_2/(\%CO + \%CO_2)$

$Y_A = y_0 = y_i + y_d$=grau de oxidação inicial do ferro na carga, soma do oxigênio que será removido direta ou indiretamente

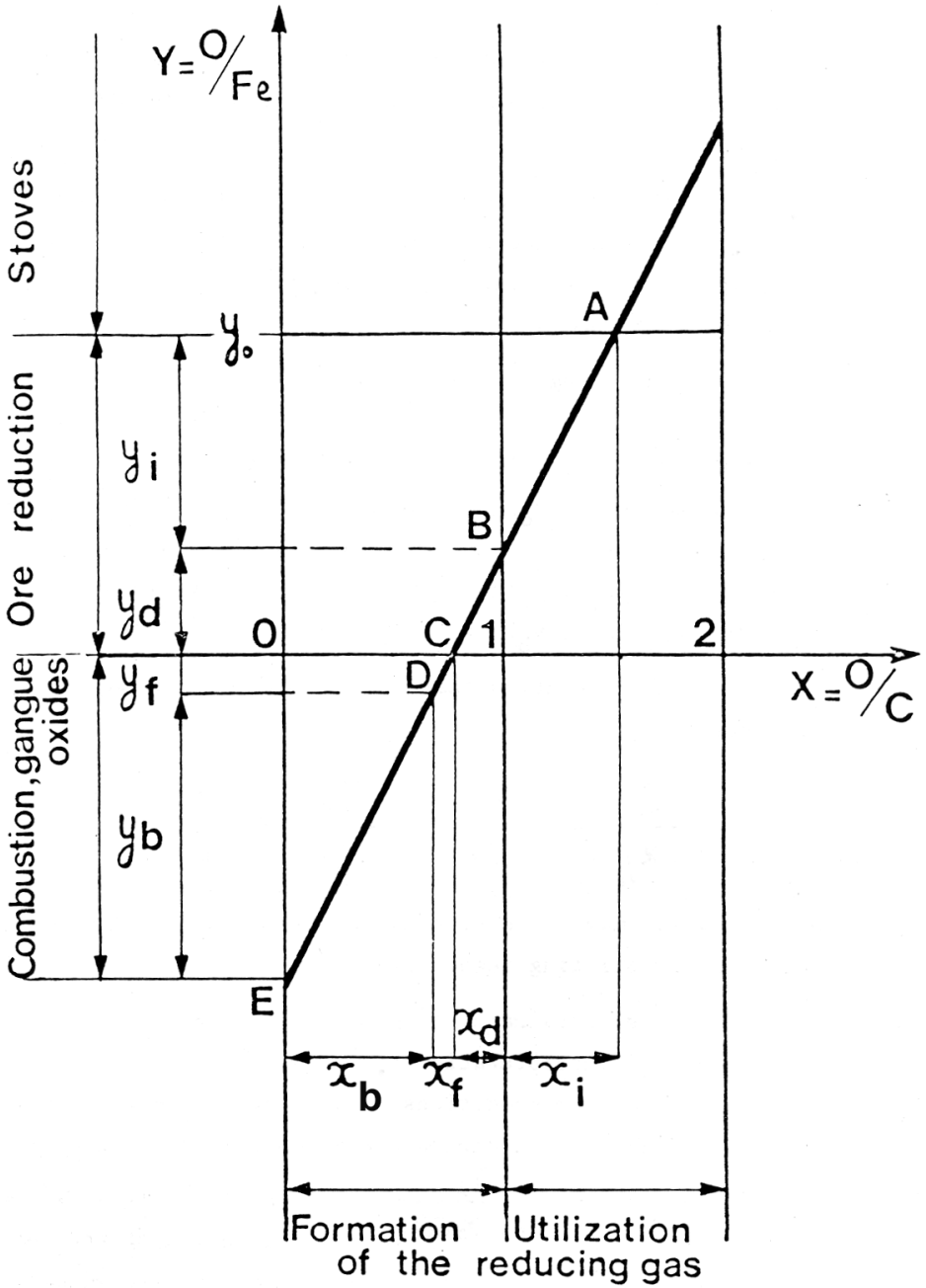

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Ponto B

Separação teórica entre redução direta e redução indireta

$X_B = 1 = x_b + x_f + x_d$; o gás da rampa não tem CO_2, a redução direta é a última contribuição para a formação do gás redutor

$Y_B = y_d$ =quantidade de oxigênio removido por redução direta

% redução direta = $100 \cdot y_d/y_0$

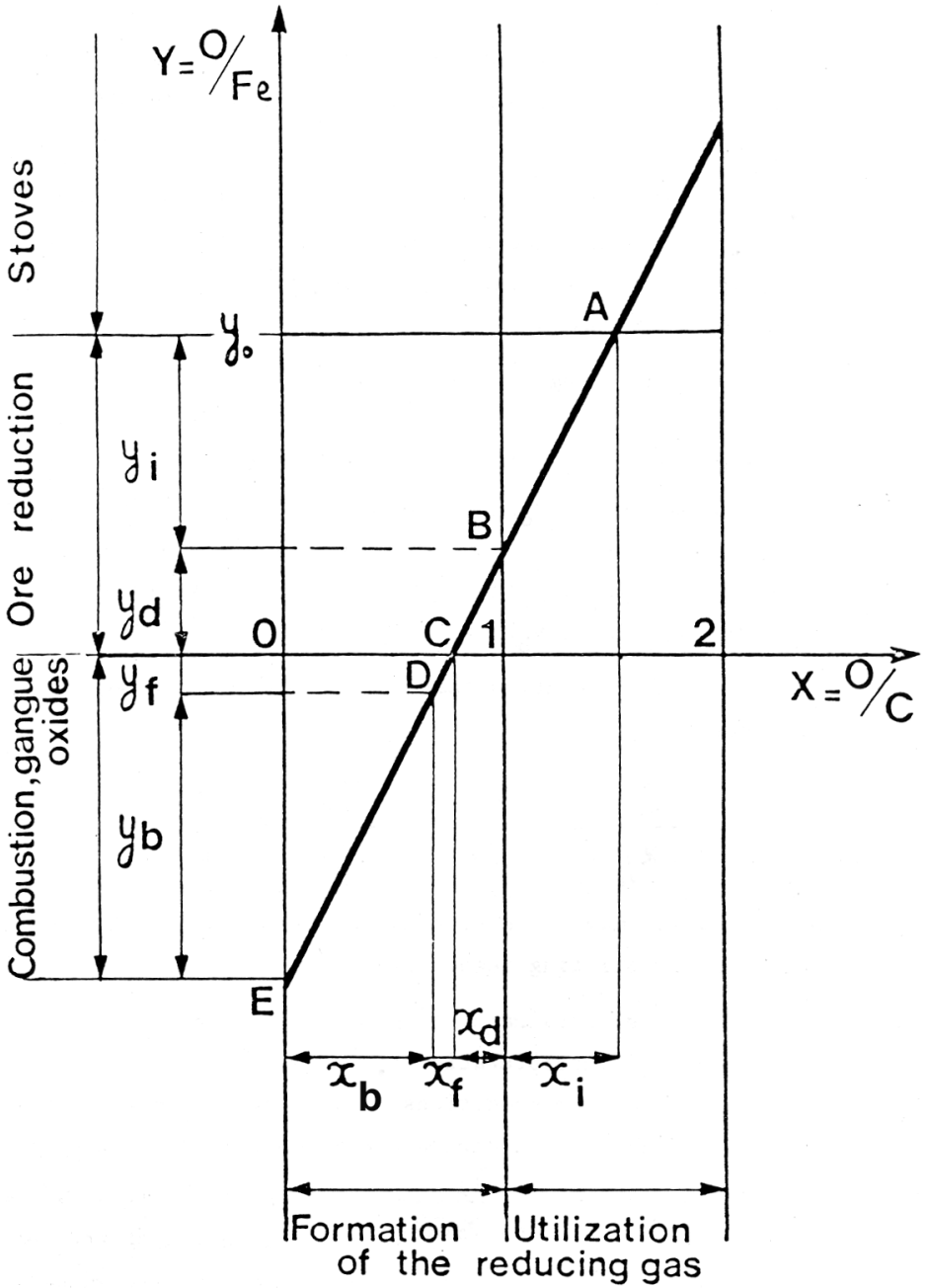

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Ponto C

Separação entre as frações de CO geradas pelos óxidos de ferro e por oxigênio de outras fontes (sopro, etc.)

$X_C = x_b + x_f$ = fração do gás redutor (CO) gerado pelo oxigênio do sopro e redução da ganga

$1 - X_C = x_d$ = fração do gás redutor gerado pela redução direta dos óxidos de ferro

$Y_C = 0$, representa o fim da redução dos óxidos de ferro

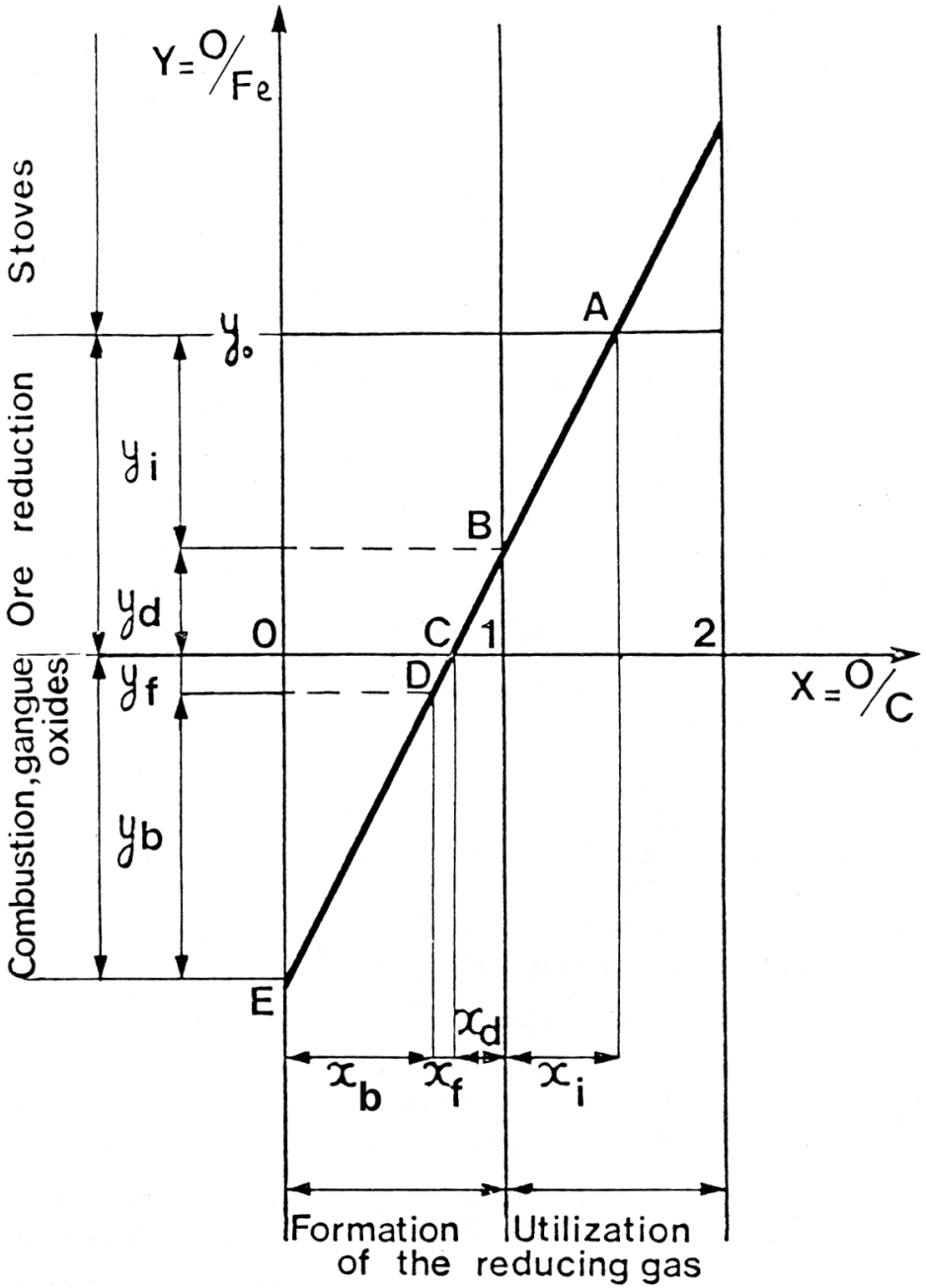

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Ponto D

X_D = xb =fração do gás redutor gerado pelo sopro

Y_D = -yf = depende da redução da ganga (Si, Mn, P,S)

Ponto E:

X_E = 0

Y_E = oxigênio do sopro + oxigênio da ganga

Oxigênio do sopro:

$y_b = n_{o,b}/n_{Fe}$

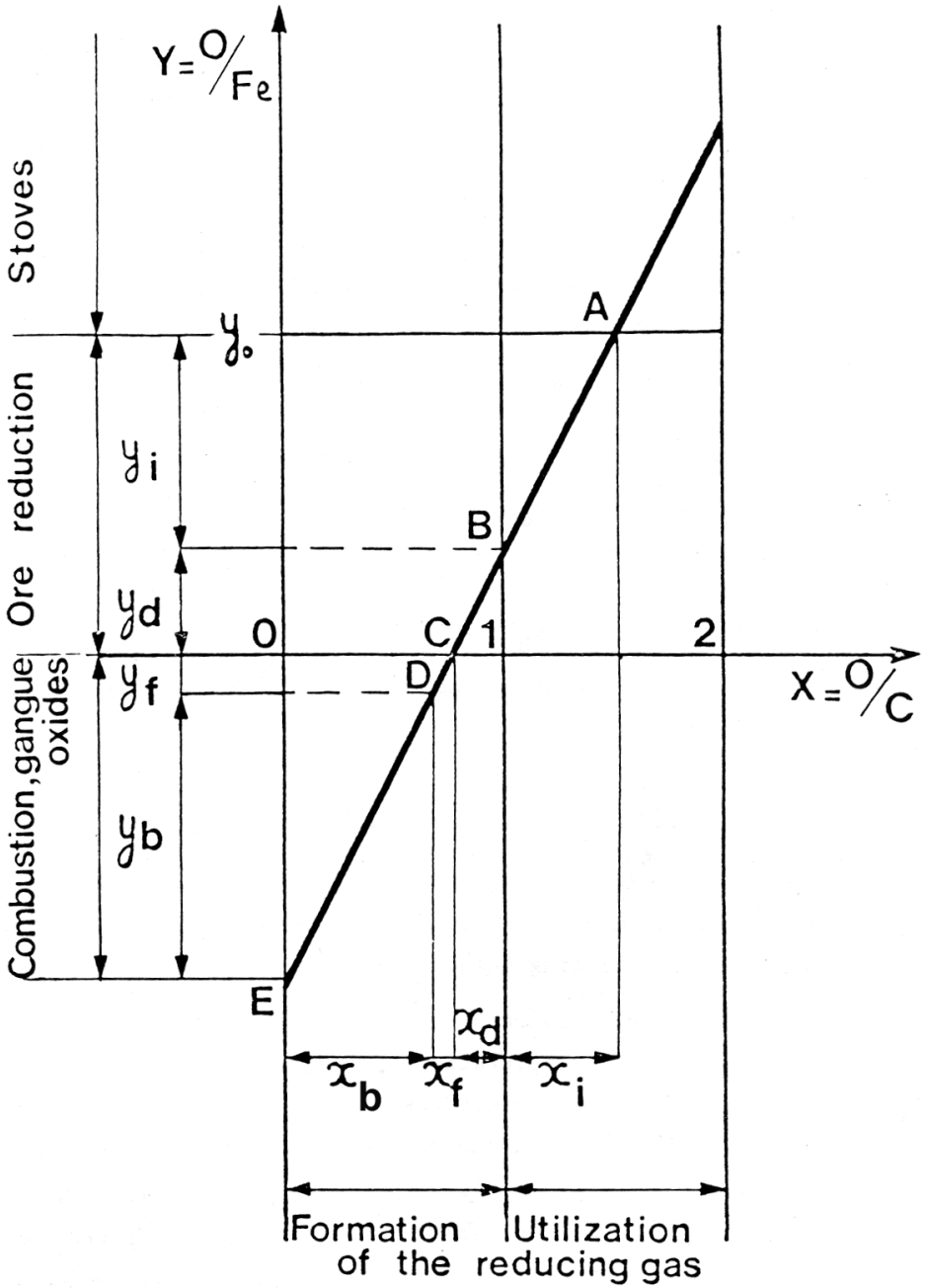

Fig. : 2 THE OPERATING LINE, INTERPRETATION OF ITS VARIOUS SECTIONS .

Balanço Material no Alto Forno

	Entradas	Saídas
Fe	minério	Gusa
C	coque	CO, CO_2 (gás); $\underline{C}$ no gusa
O	sopro, óxidos	

Nomenclatura

	Entrada	Saída
Fe	n_{Fe}^{i}	n_{Fe}^{0}
C	n_{C}^{i}	n_{C}^{0}
O	n_{O}^{i}	n_{O}^{0}

Balanço Material no Alto Forno

$(O/C)^g$ = relação molar oxigenio/carbono no gás de saída
$(O/Fe)^x$ = relação molar oxigênio/ferro nos óxidos
$(C/Fe)^m$ = relação molar carbono/ ferro no gusa

Balanços:
Ferro: $\mathbf{n_{Fe}^{i}} = n_{Fe}^{o} = 1$ (ferro que entra=ferro que sai)

Carbono: $n_C^o = n_C^g + (C/Fe)^m$ (carbono que sai é o carbono que sai no gás mais carbono do gusa)

Oxigênio:
$n_O^0 = n_o^B + (O/Fe)^x$ (oxigênio que sai é a soma do oxigênio que entra no sopro (n_0^B) mais oxigênio que entra nos óxidos $(O/Fe)^x$

Balanço Material no Alto Forno

Como oxigênio sai apenas no gás:
$n_O^0 = n_C^g \times (O/C)^g$ (oxigênio que sai = n° de moles de carbono no gás x relação oxigênio/carbono no gás.

Portanto:

$$n_o^B + (O/Fe)^x = n_C^g \times (O/C)^g$$

Sabendo que o carbono que sai no gás é o carbono ativo (desconta o que sai no gusa), tem-se:

$$n_0^B + (O/Fe)^x = n_C^A \times (O/C)^g$$

Restrição de Equilíbrio

O segmento AB pode ser interpretado como o caminho de redução dos óxidos de ferro na cuba do alto forno; sabe-se que é quase isotérmica (zona de reserva térmica), temperatura em torno de 1000°C. Assim, equilíbrio entre a fase gasosa e os óxidos de ferro introduz relação entre X (abcissa, destinos de oxigênio) e Y (ordenada, fontes de oxigênio).

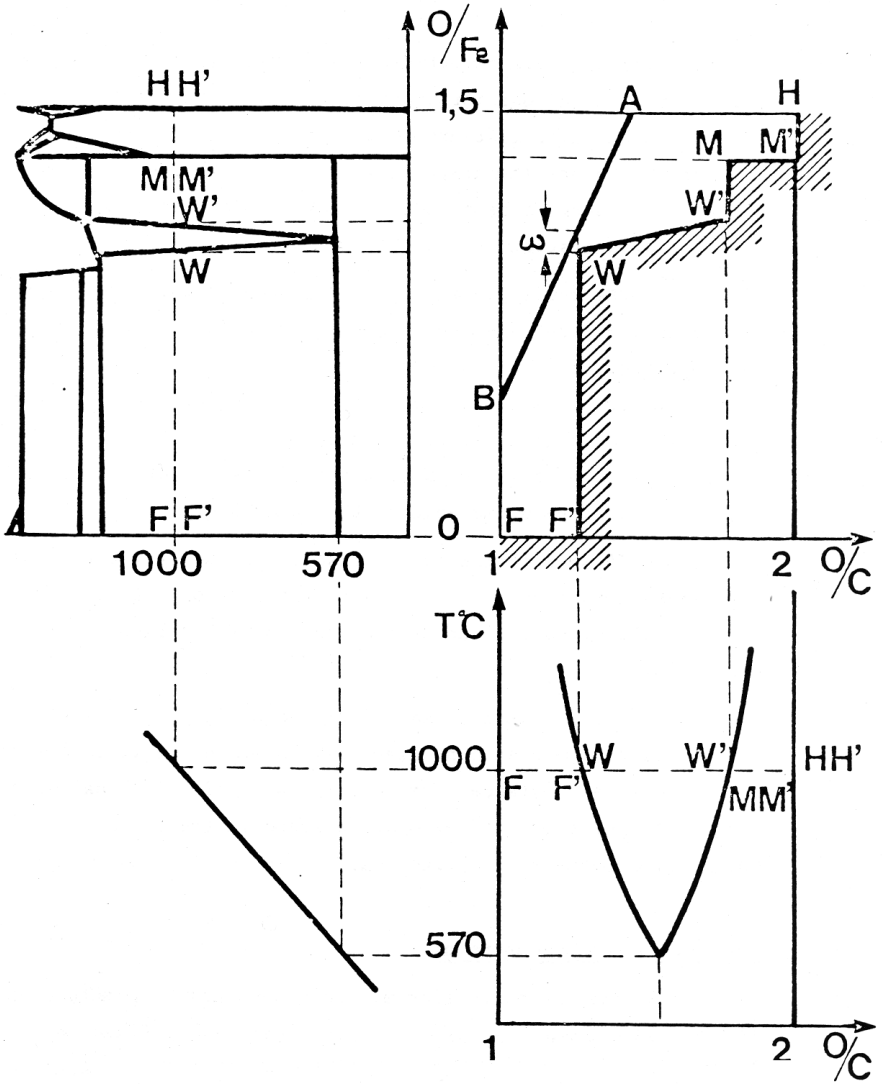

Fig. : 4 CONSTRUCTION OF THE EQUILIBRIUM CONTOUR IN THE OPERATING DIAGRAM .

O segmento AB no máximo encosta no “ombro” da wustita quando existe equilíbrio entre a fase gasosa e a sólida, não podendo “invadir” o campo da wustita. Se a operação não é ideal, a reta se afasta deste “ombro”.

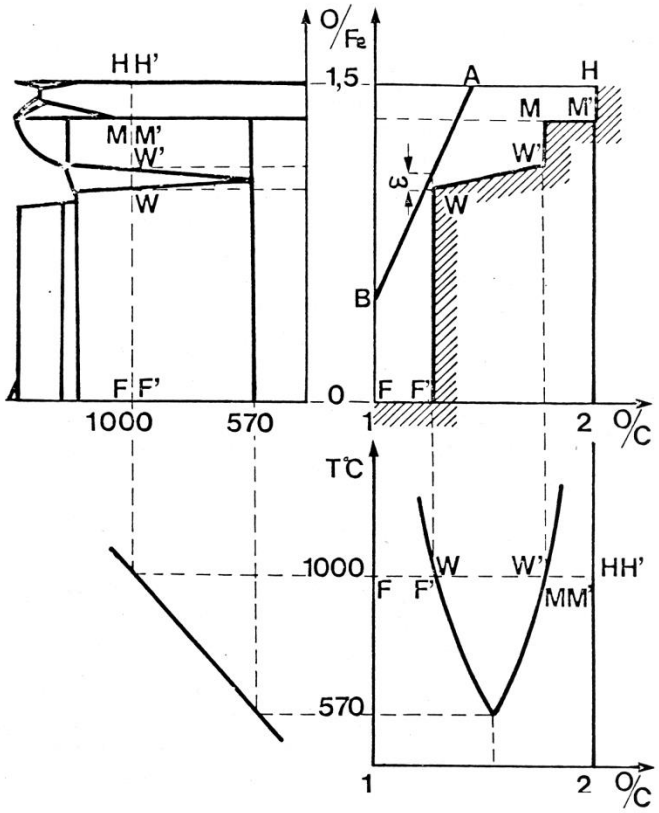

Fig. : 4 CONSTRUCTION OF THE EQUILIBRIUM CONTOUR IN THE OPERATING DIAGRAM .

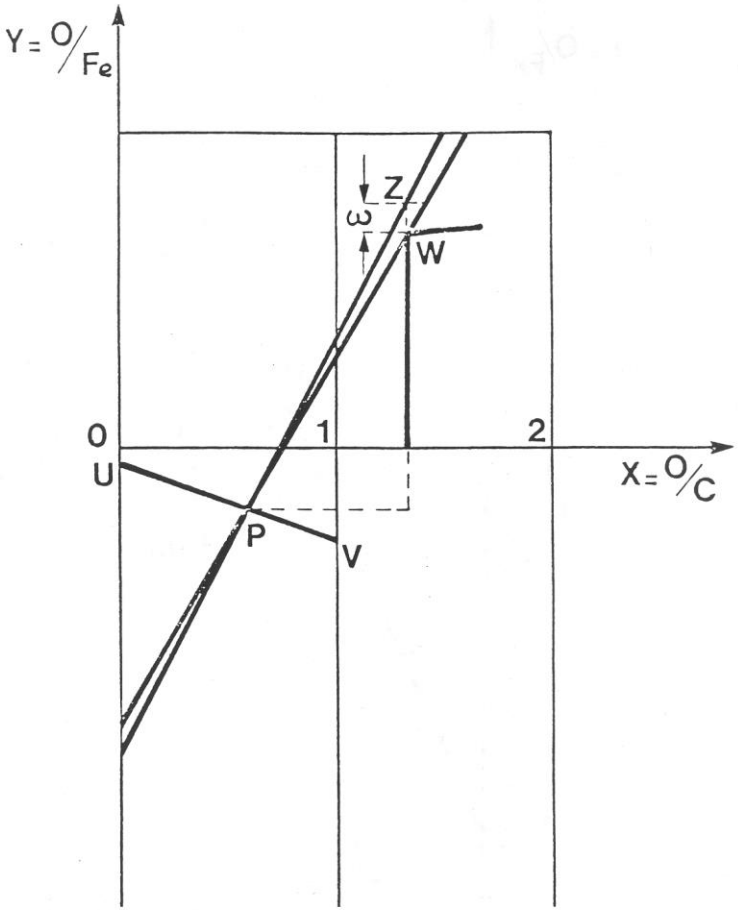

Fig. : 6 OPERATING LINES FOR AN IDEAL (PW) AND A NON IDEAL (PZ) PRACTICE .

Restrição do balanço térmico

A reta operacional pode ser determinada pelos pontos E e B, se forem dados yf, yb e yd. Para composição fixa do gusa, yf é constante, então as retas possíveis dependem dos parametros yb e yd. Cada um destes está associado a um importante efeito térmico no AF: yb com a combustão (exotérmica) e yd com a redução direta (endotérmica).

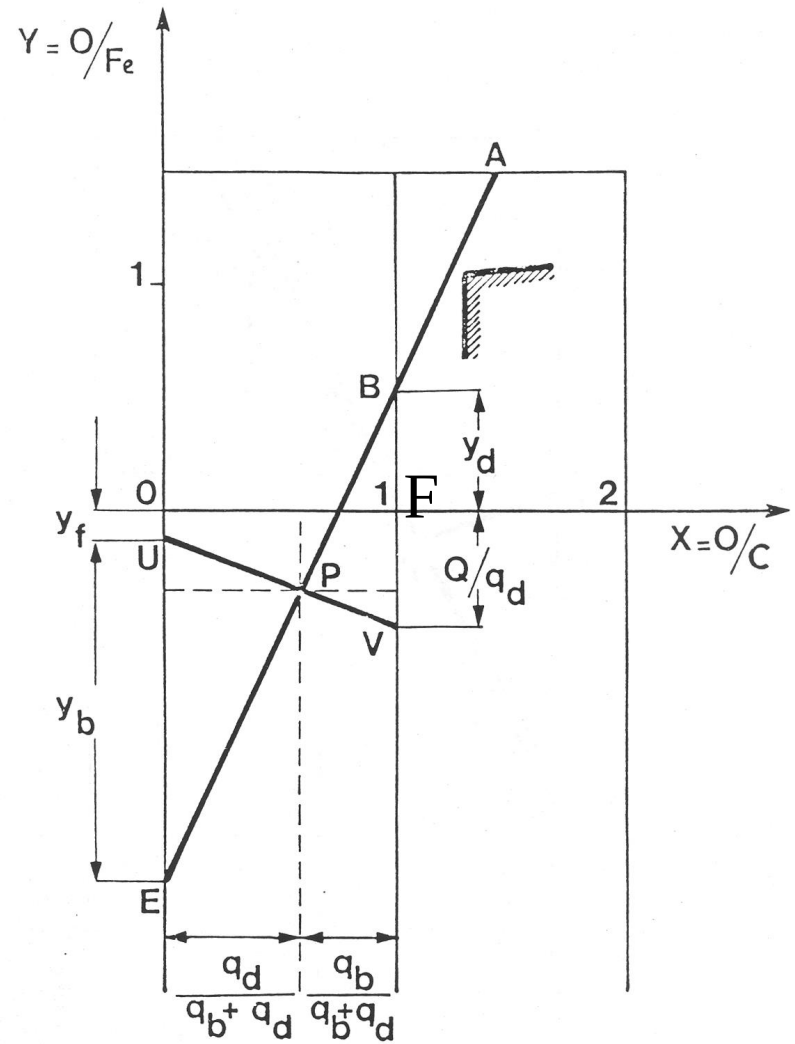

Fig. : 5 THE HEAT BALANCE CONSTRAINT ON THE OPERATING LINE : POINT P .

Qualquer balanço térmico do AF deve incorporar estes parametros e relacioná-los linearmente. Isto significa que a reta operacional deve passar por um ponto fixo que represente esta relação. Um balanço térmico da zona de reserva térmica, assumindo-se temperatura da zona de 1000C para os solidos e os gases, pode-se escrever:

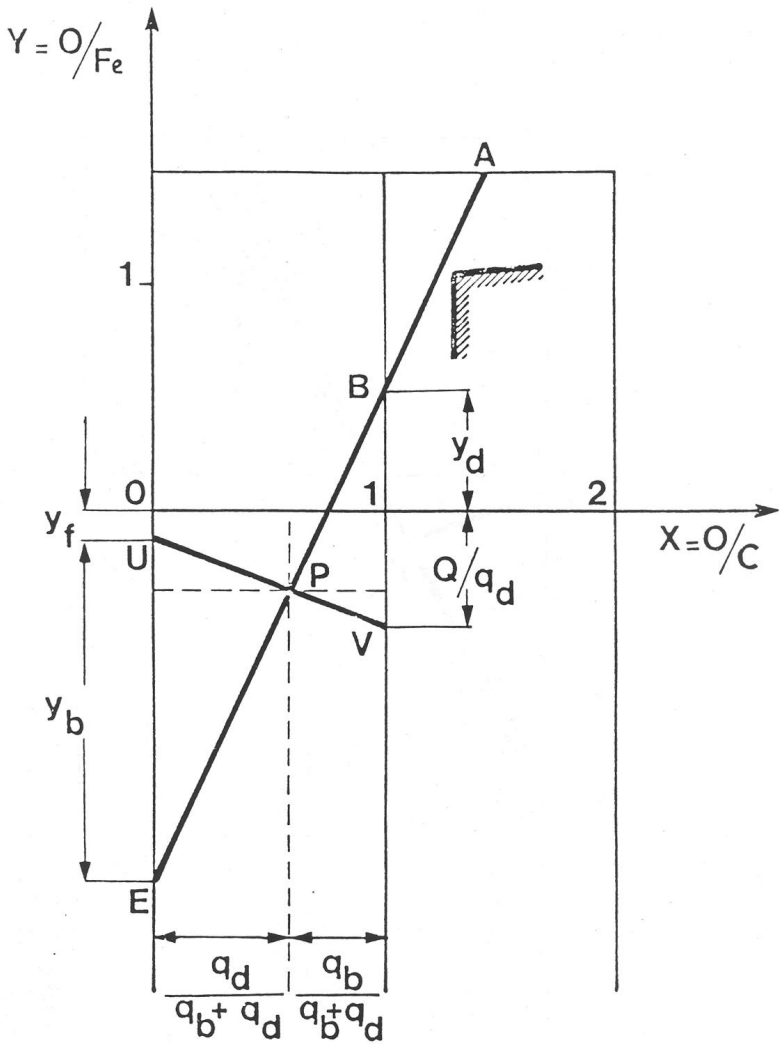

Fig. : 5 THE HEAT BALANCE CONSTRAINT ON THE OPERATING LINE : POINT P .

$$y_b \cdot q_b = Q + y_d \cdot Q_d$$

-o termo a esquerda representa a entrada de calor, proporcional a yb e qb, que é o calor disponível acima da temperatura de referencia por atomo de O a 1000C, incluindo o calor de combustão do coque a CO a 1000C e o calor sensível do sopro acima de 1000C;

-O calor necessário para redução direta do ferro, proporcional a yd e qd, que é o efeito endotérmico por atomo de O removido por redução direta a 1000C;

-Q representa a soma de todos os outros requerimentos térmicos

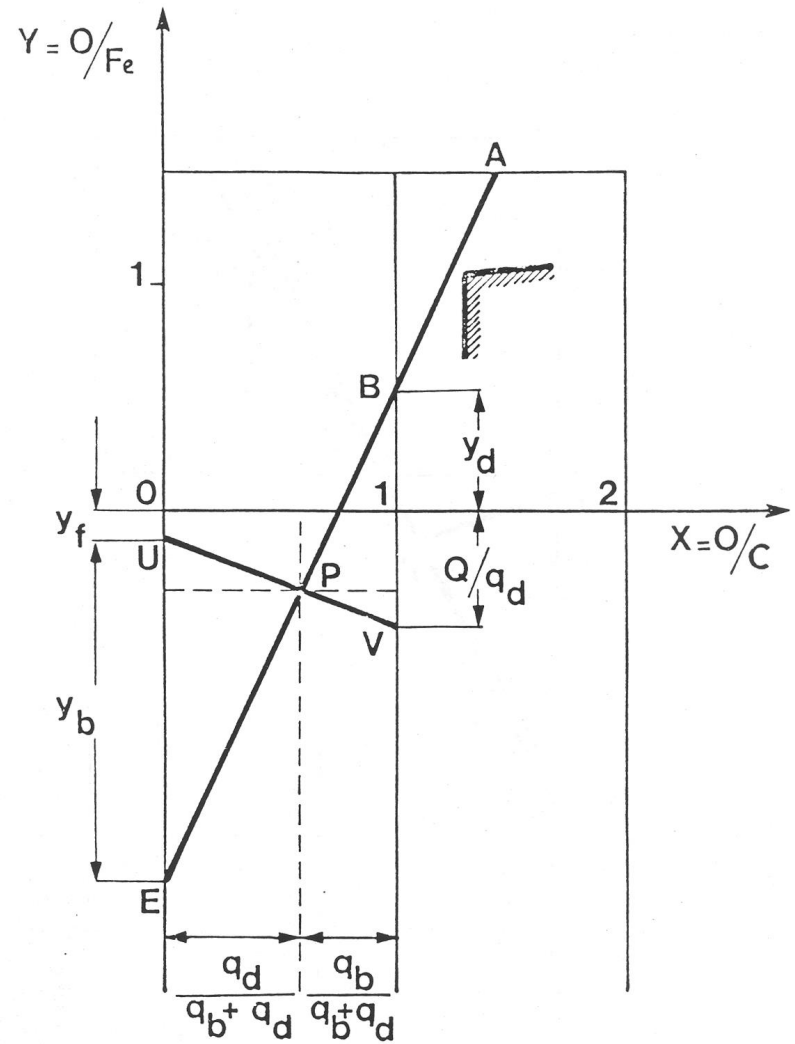

Fig. : 5 THE HEAT BALANCE CONSTRAINT ON THE OPERATING LINE : POINT P .

Estes requerimentos, fixados em termos de atomos de Fe produzidos, incluem: aquecimento do metal e escória acima de 1000C até a temperatura de vazamento, incluindo os calores de fusão, redução direta dos óxidos da ganga, redução indireta da wustita, etc. Pode ainda incluir as perdas térmicas.
A equação do balanço térmico desta zona quente fornece a relação linear entre yb e yd.

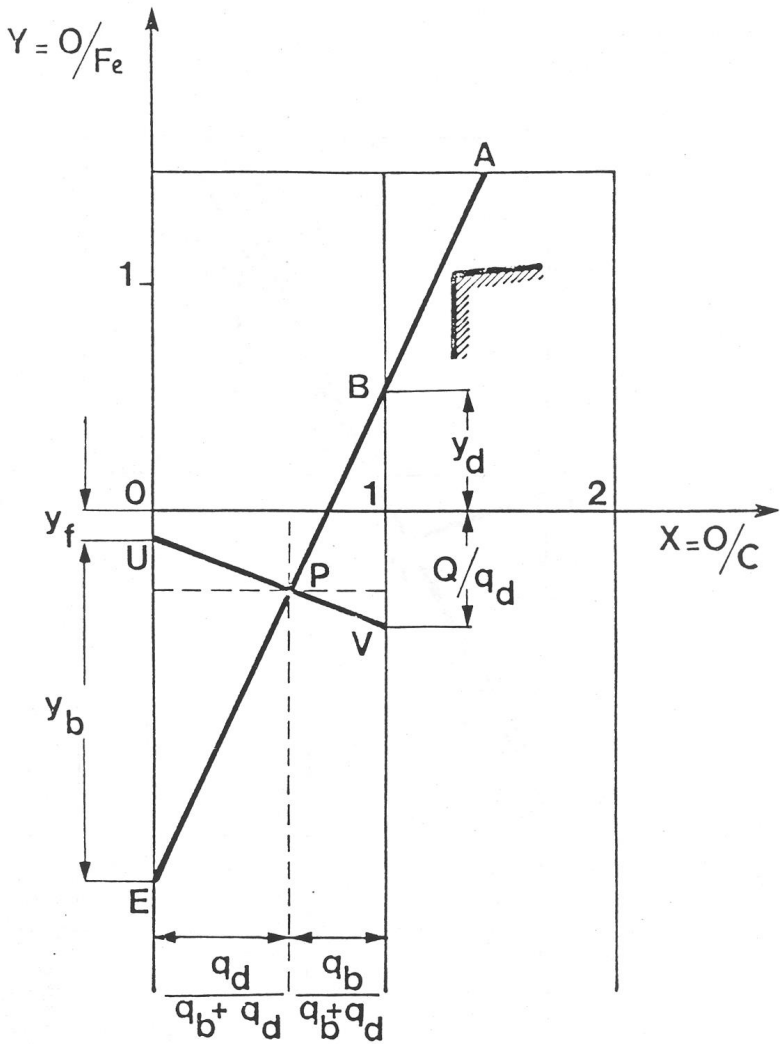

Fig. : 5 THE HEAT BALANCE CONSTRAINT ON THE OPERATING LINE : POINT P .

Pode-se reescrever a equação em termos de proporções:

$$\frac{y_b}{\frac{Q}{q_d} + y_d} = \frac{q_d}{q_b}$$

yb e yd são representados pelos segmentos EU e FB, fig 5; tem-se:

$$\frac{EU}{VB} = \frac{q_d}{q_b}$$

Esta expressão requer que a reta operacional passe por um ponto fixo, P, localizado no segmento UV e dividindo-o na proporção:

$$\frac{PU}{PV} = \frac{X_p}{1 - X_p} = \frac{UE}{VB} = \frac{q_d}{q_b}$$

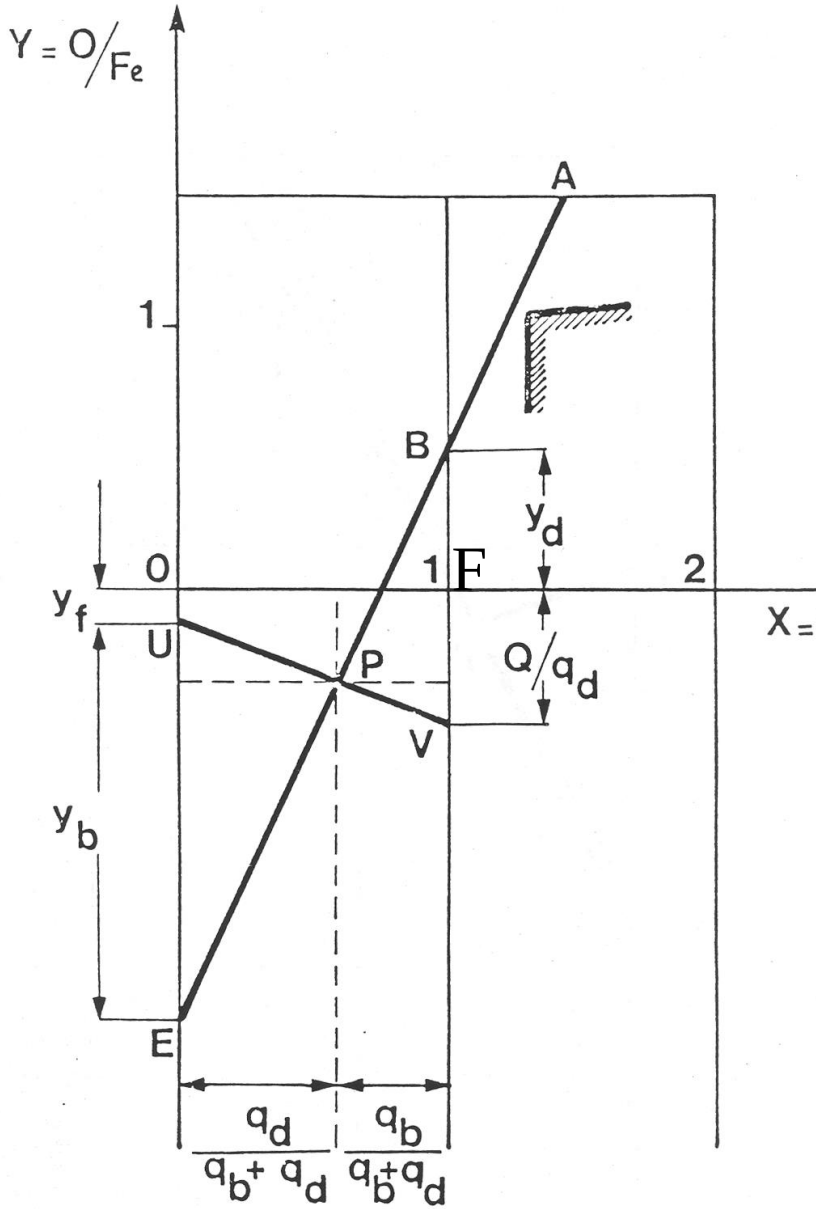

Fig. : 5 THE HEAT BALANCE CONSTRAINT ON THE OPERATING LINE : POINT P .

Portanto,

$$X_P = \frac{q_d}{q_d + q_b}$$

A abcissa do ponto P depende apenas da temperatura do sopro, através de qb.
A ordenada depende da composição do gusa, através de
YU = -yf
e de todos os requerimentos térmicos, fixados por atomo de Fe, através de
Yv = -Q/qd
A determinação do ponto P pode ser feita por:
a-calculo, usando os dados de operação idealizada (volume de escória, composição do gusa, temperatura de sopro, perdas térmicas, etc.)

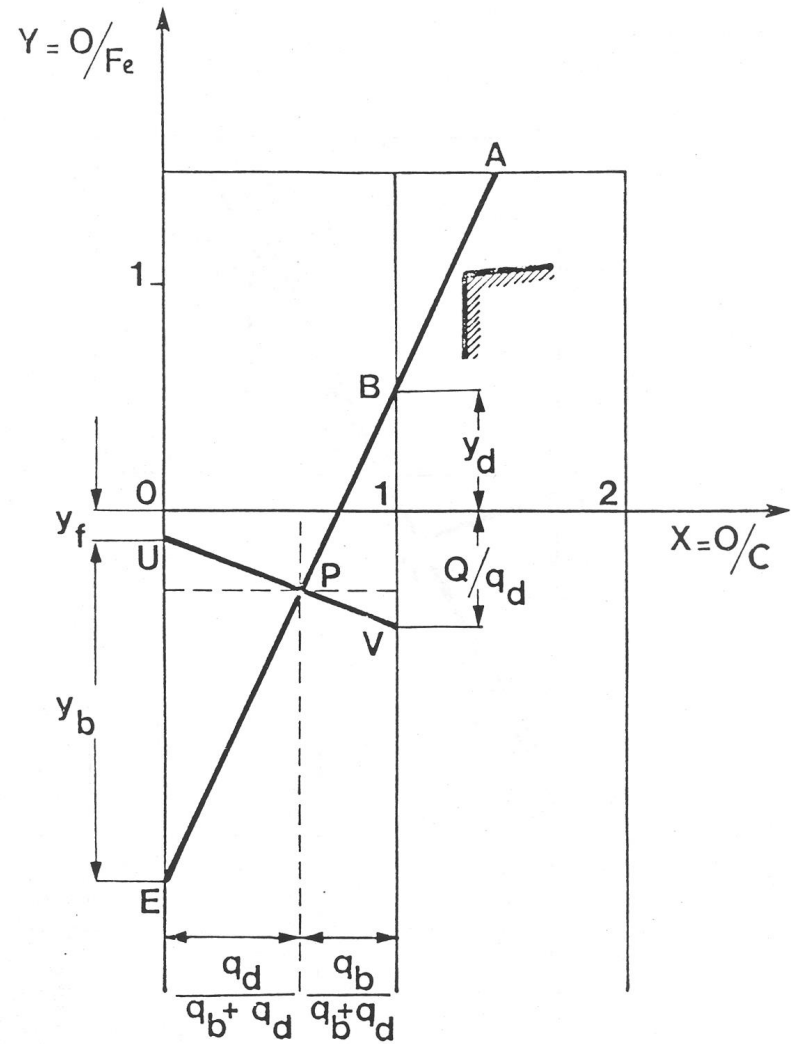

Fig. : 5 THE HEAT BALANCE CONSTRAINT ON THE OPERATING LINE : POINT P .

B- por experimentação e calculo, usando dados de operação reais, isto é, com uma dada reta operacional; um teste da precisão e consistencia dos dados é verificar se a reta operacional, a reta vertical Xp= f (Tb) e a linha UV interceptam-se em um único ponto, o ponto P.

Uma vez P posicionado, a reta operacional ideal é representada pela linha PW, com inclinação:

$$\mu_{ideal} = \frac{Y_w - Y_p}{X_w - X_p}$$ at. C/At. Fe

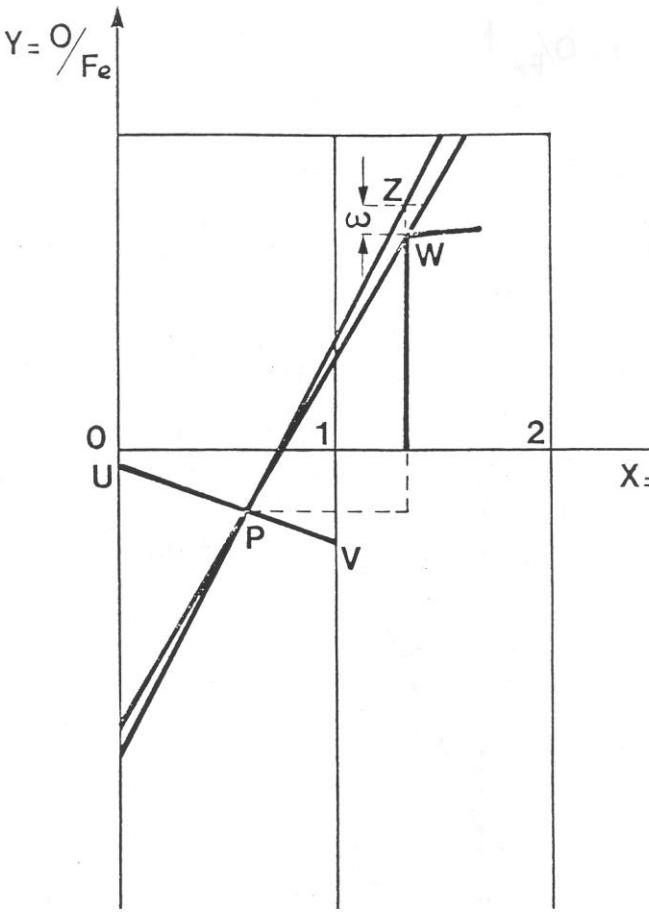

Fig. : 6 OPERATING LINES FOR AN IDEAL (PW) AND IDEAL (PZ) PRACTICE .

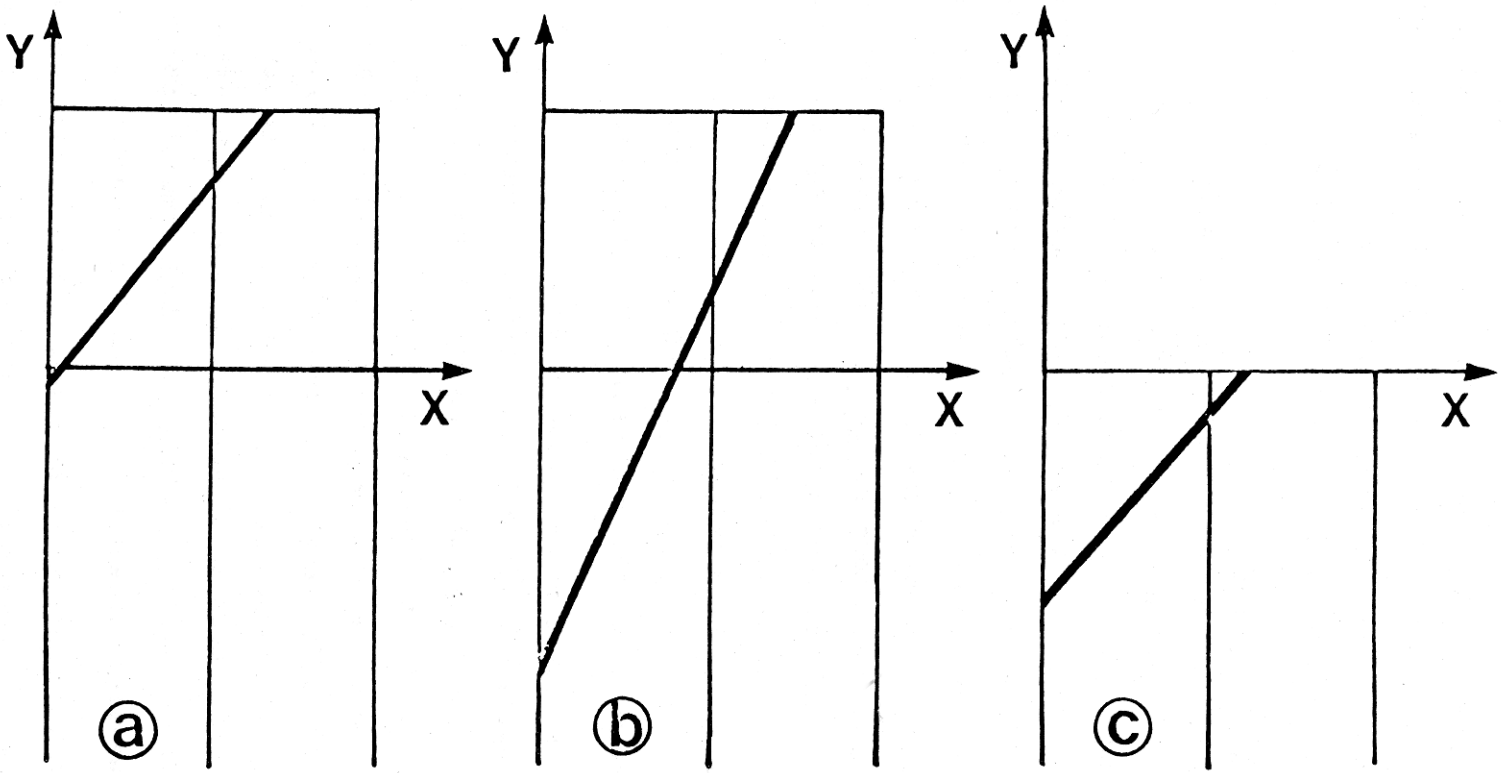

Fig. : 3 OPERATING DIAGRAMS OF :

a AN ELECTRIC REDUCTION FURNACE

b A BLAST FURNACE

c A CUPOLA

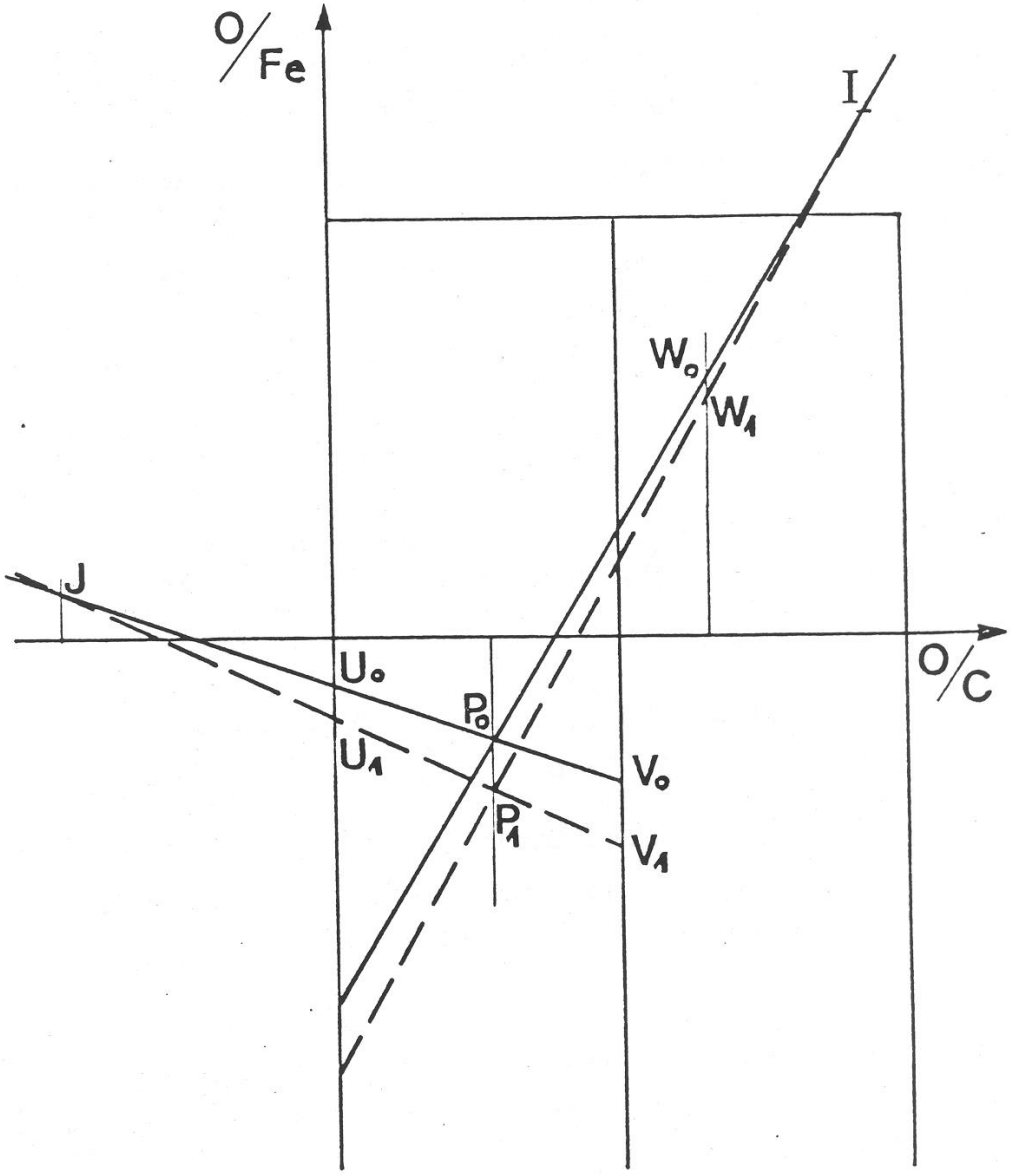

Fig. : 7 EFFECT OF SIMULTANEOUS VERTICAL DEPLACEMENTS OF POINTS U , V , P and W .

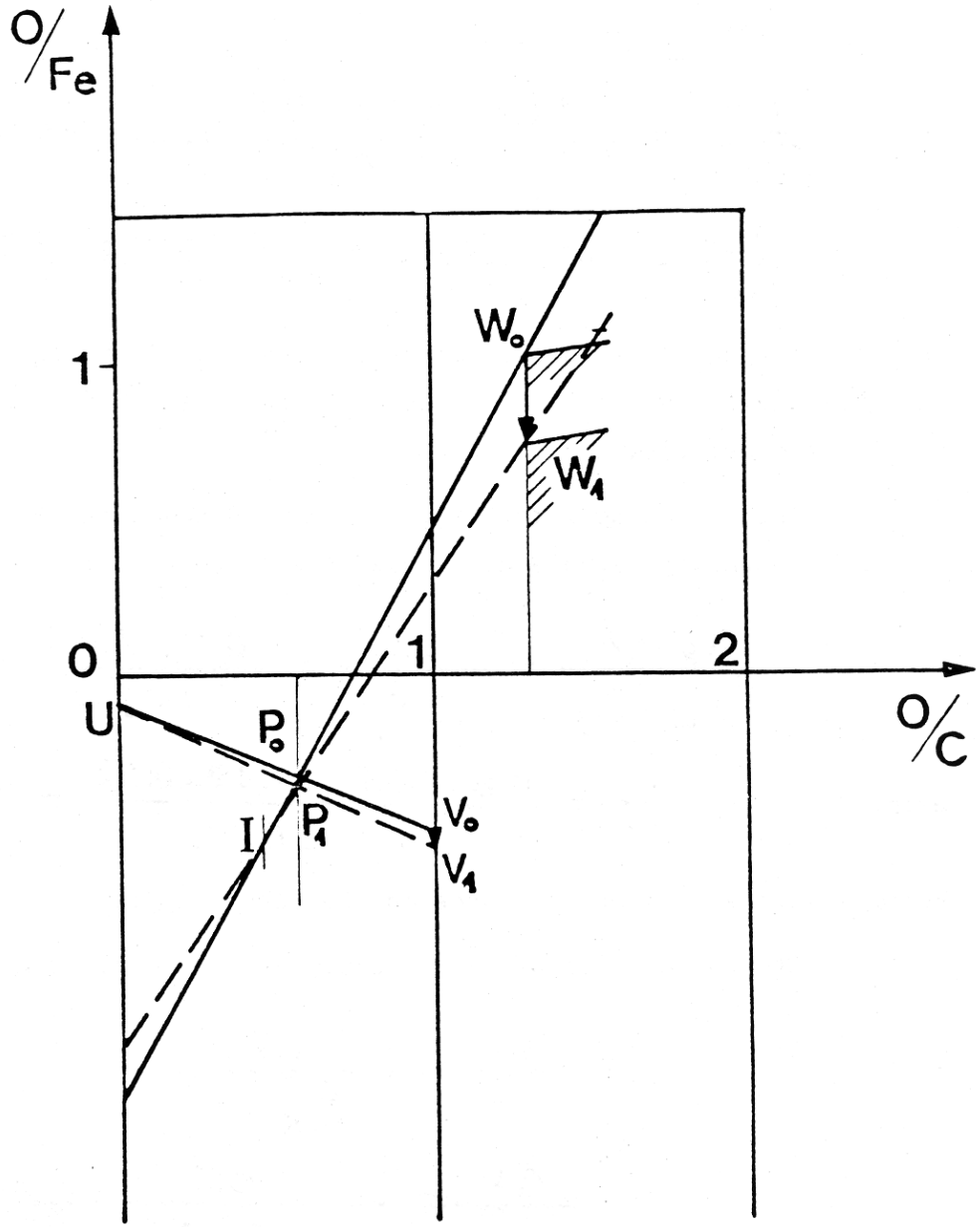

Fig. : 8 EFFECT OF PREREDUCTION OF THE BURDEN .

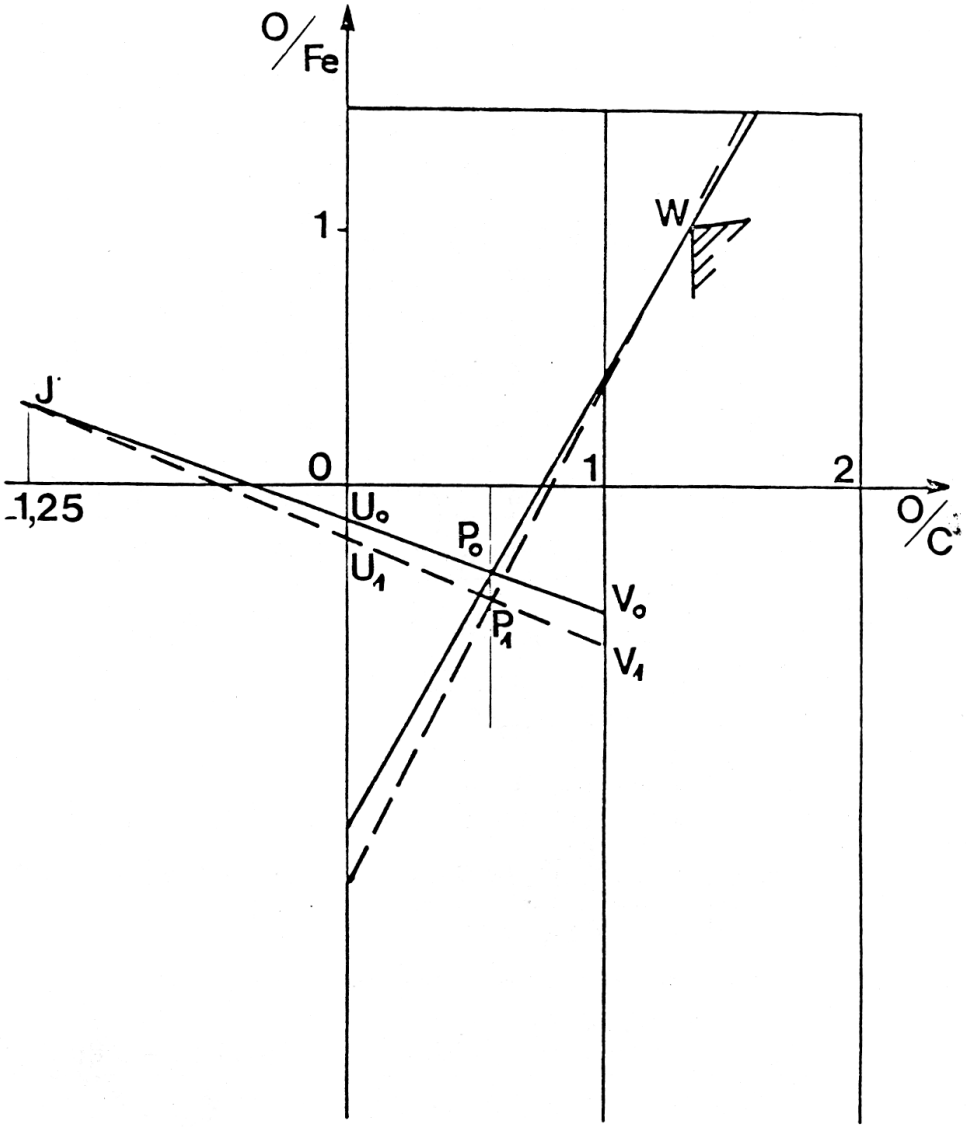

Fig. : 9 EFFECT OF EXTRA SILICON REDUCTION .

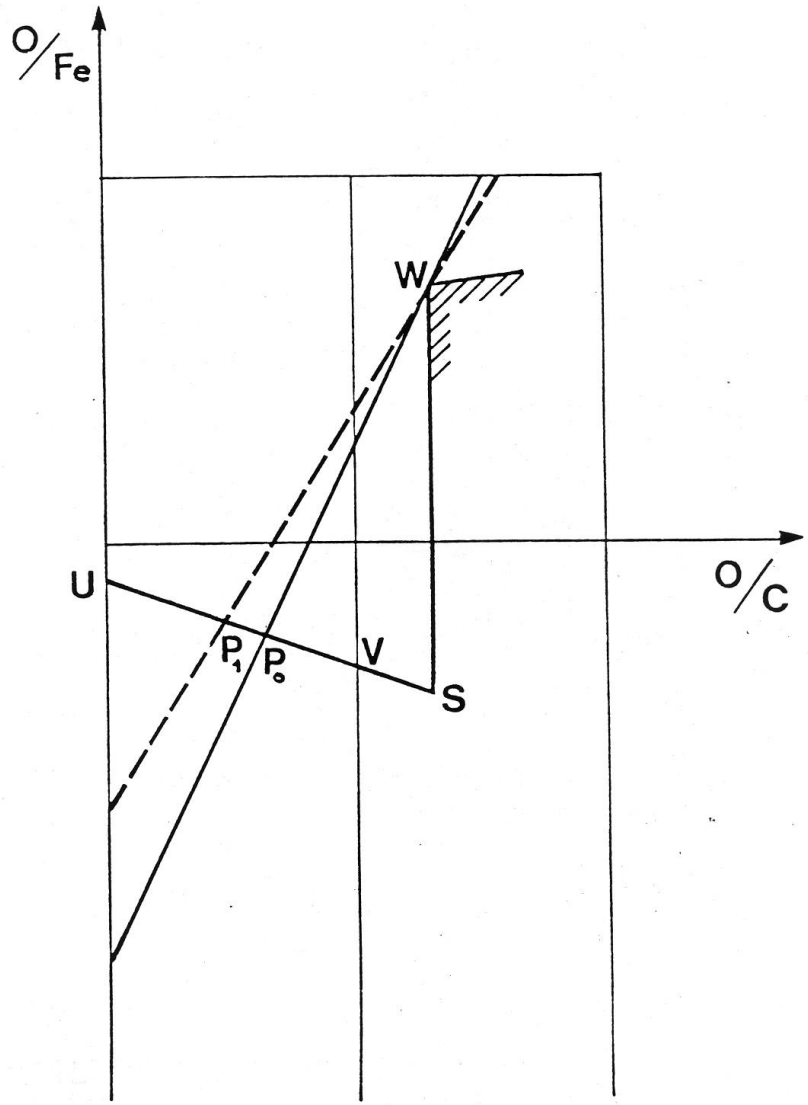

Fig. : 10 EFFECT OF AN INCREASE IN BLAST TEMPERATURE .

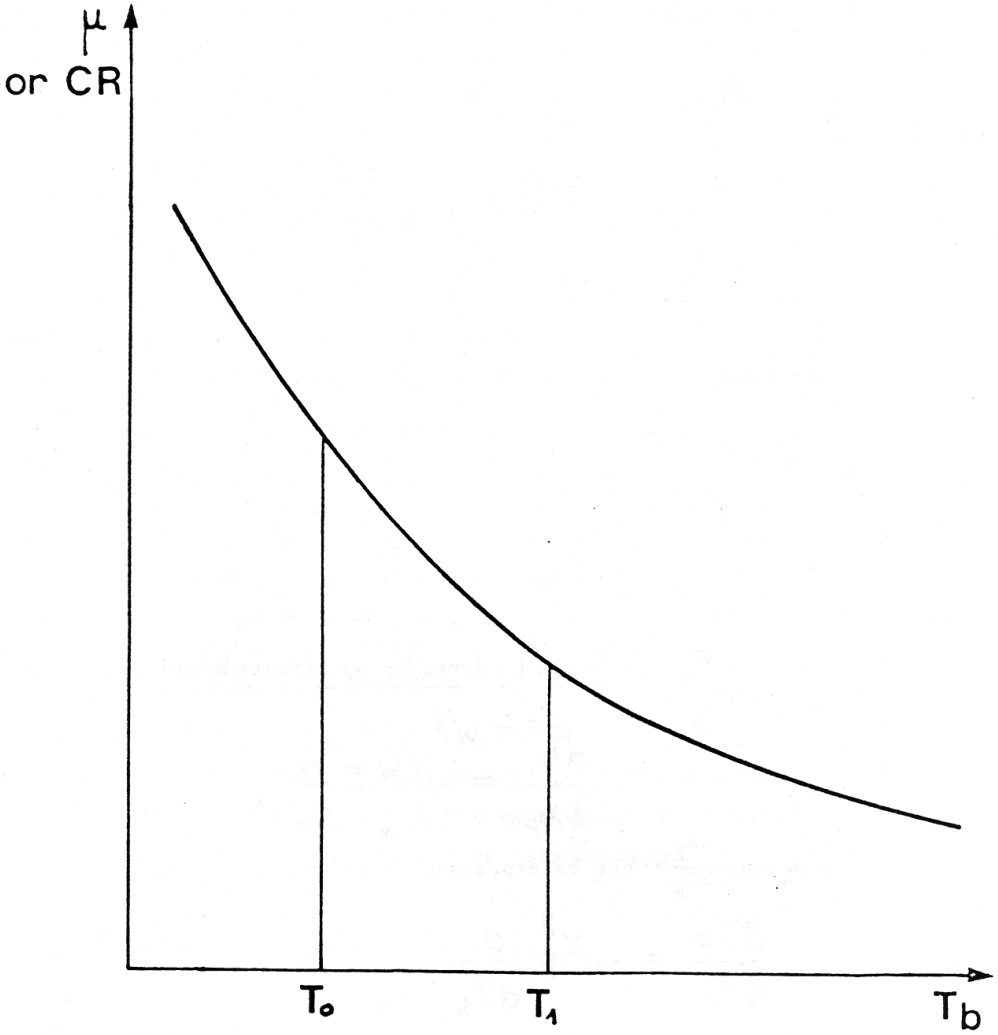

Fig. : 11 THE HYPERBOLIC RELATIONSHIP BETWEEN BLAST TEMPERATURE AND CARBON-RATE .