

7  
2ej.



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

## PRODUCCION Y CONTROL DE ATMOSFERAS ENDOTERMICAS PARA TRATAMIENTOS TERMICOS Y TERMOQUIMICOS EN ACEROS

**T E S I S**  
Que para obtener el Título de  
**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**  
p r e s e n t a  
**MARTIN I. GUERRERO LOPEZ**



México, D. F.

1992

FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

	pag.
Capítulo I	
1. Introducción.	1
Capítulo II	
2.1. Consideraciones teóricas de la carburación gaseosa.	4
2.2. Atmosferas utilizadas en los hornos de carburación o cementación.	9
2.3. Determinación de la presión de $H_2O$ en la atmósfera producida por el generador de atmósferas endotérmicas.	13
Capítulo III	
3.1. Composición química de la atmósfera endotérmica a la salida de la retorta del generador.	15
3.2. Cálculo de la composición química de la atmósfera endotérmica en el horno de tratamiento en base a la medición de punto de rocío.	21
3.3. Aspectos termodinámicos de la interacción gas-metal en tratamientos termoquímicos de carburación.	26
3.4. Inyección de gas natural a la atmósfera endotérmica.	37
Capítulo IV	
4.1. Determinador de punto de rocío.	48
4.1.1. Descripción para cuantificar el punto de rocío utilizando la regla provista por el equipo ALNOR <sub>sm</sub> .	47
4.2. Generador de atmósferas endotérmicas.	49
4.3. Hornos de carburación gaseosa.	52
Capítulo V	
5.1. Técnica experimental.	55
5.2. Seguimiento del proceso.	57
5.3. Discusión de resultados.	60
5.4. Conclusiones.	66

Apéndice A: Composición química de la atmósfera en función de la relación aire-gas.	67
Apéndice B: Composición química de la atmósfera en función del punto de rocío.	68
Apéndice C: Cálculo del punto de rocío requerido para efectuar la carburación especificada.	69
Apéndice D: Tablas de contenido de carbono en la capa carburada vs punto de rocío, para un acero 1045.	70
Bibliografía.	76

Quesada  
Luis  
Luis  
Luis  
Luis  
Luis  
Luis  
Luis

## 1. Introducción.

El objetivo básico del proceso de carburación gaseosa es la obtención de piezas que componen las máquinas y motores; se cementan de tal forma que las propiedades mecánicas sean bastante uniformes en toda la masa tales como: superficies muy duras resistentes al desgaste y la penetración y el núcleo central muy tenaz.

Para obtener piezas así se necesita un pleno dominio del citado proceso. La tesis presente nació de un problema industrial:

La necesidad de como estabilizar el generador de atmósferas controlando nada más el punto de rocío.

Para resolver el problema se hicieron las siguientes investigaciones:

- El conocimiento del valor de la presión parcial de agua ( $P_{H_2O}$ ) en una mezcla gaseosa posee diversas aplicaciones en el campo de la metalurgia, siendo una de las más importantes el control de la composición química de las atmósferas protectoras empleadas para efectuar tratamientos térmicos o termoquímicos a piezas ya terminadas.
- Con los valores de la  $P_{H_2O}$  obtenidos al variar la relación aire-gas del generador de atmósferas endotérmicas se observa que a la salida de la retorta del generador el gas se enfría hasta la temperatura ambiente mediante un radiador, entonces se debe fijar la máxima relación aire-gas que puede emplearse sin que haya condensación de agua (fijar el punto de rocío).
- Calculando la composición química de la atmósfera endotérmica en el horno de tratamiento, en base a la medición del punto de rocío y la temperatura de la retorta del generador, y partiendo de que el combustible que se quema es metano, se obtienen los valores de las presiones parciales ( $P_i$ ).
- La relación entre la atmósfera de tratamientos térmicos y el contenido de carbono en el acero se fijan anticipadamente y se controla la relación  $P_{CO}/P_{CO_2}$  en la atmósfera carburante. El control de esta relación se puede lograr variando la relación aire-gas (punto de rocío) en la mezcla de la retorta del generador o agregando algún hidrocarburo gaseoso al horno de tratamiento térmico.

-Debido a que la reacción de descomposición del gas en la retorta del generador es endotérmica y el calor requerido para mantener la reacción proviene de un quemador externo que calienta a la retorta, la relación aire-gas alimentada a la retorta solamente puede variar dentro de un intervalo pequeño alrededor del valor de diseño de equipo, y por esta razón la forma usual para controlar la reacción  $P^{2}CO/PCO_2$  es mediante la inyección de gas natural al horno.

A continuación se enumeran los elementos para la obtención de piezas carburadas bajo el proceso de carburación gaseosa.

Todas las variables se deben mantener constantes durante el proceso una vez que se hayan seleccionado.

- 1.-Elementos aleantes del acero.
- 2.-%C y dureza superficial.
- 3.-Espesor de capa.
- 4.-Temperatura.
- 5.-Tiempo.
- 6.-Relación aire-gas (punto de rocío) en el generador.
- 7.-El cociente  $P^{2}CO/PCO_2$ .
- 8.-Presiones parciales de  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ .
- 9.-Punto de rocío en el generador y horno.

La finalidad este trabajo se resume en los siguientes puntos:

-En la industria.

Está encaminada a un control automático del proceso de carburación gaseosa partiendo de 3 cálculos:

- 1.-La composición química de la atmósfera endotérmica del generador.
- 2.-La composición química de la atmósfera endotérmica en el horno de tratamiento termoquímico en base a la medición del punto de rocío.
- 3.-Aspectos termodinámicos de la interacción gas-metal.

En la mayoría de los casos para iniciar (arrancar) la operación del generador de atmósferas endotérmicas se hace de manera empírica, lo cual es un procedimiento largo y costoso además de antieconómico. Esta tesis reduce a un mínimo el tiempo necesario para el arranque del generador, reduciendo así tiempo y gastos de energía.

-En la U.N.A.M.

Iniciar la operación del generador de atmósferas endotérmicas ubicado en el edificio D de la Facultad de Química.



## 2.1. Consideraciones teóricas de la carburación gaseosa.

Este proceso de endurecimiento superficial consiste en aumentar el contenido de carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeandolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego se templen las piezas y quedando con gran dureza superficial.

Las atmósferas carburantes se preparan generalmente empleando un gas portador o de relleno y un gas activo o carburante.

Como gas portador se suele utilizar generalmente gas natural, casi totalmente quemado, para eliminar mercaptanos, tioles e hidrocarburos etilénicos que son perjudiciales. Luego este gas se regenera aumentando el % de Co y el % de H<sub>2</sub> al ponerlo en contacto con un catalizador de níquel. Este tipo de gas suele recibir el nombre de gas endotermico.

Como gas carburante se suele utilizar el metano y también se suele emplear butano y propano obteniendo buenos resultados.

La utilización del gas portador en la cementación gaseosa es debido a los costos de operación, porque es mas económico el uso de un gas portador barato que rellena fácilmente la cámara del horno, al que se añade una pequeña cantidad de hidrocarburos de precio elevado, que el empleo exclusivo de hidrocarburos. El uso de gas portador al entrar en la atmósfera del horno fig.(10), en proporción adecuada sirve para diluir el hidrocarburo que se introduce en el horno y evita la formación de hollín que a veces se presenta cuando la cementación no se se hace con las debidas proporciones de aire - gas portador. De esta forma, además, se consigue un gran potencial de cementación empleando solo cantidades muy pequeñas de metano. En este proceso se emplean aceros aleados y sin aleación de bajo contenido de carbono, tablas I y IB.

Las temperaturas de operación están comprendidas entre 850 °C Y 1000 °C, de estas temperaturas depende la cantidad de carbono que puede ser disuelto en la austenita, esta cantidad es el límite de solubilidad del carbón en el hierro y es mostrado como la línea Acm en el diagrama de fase hierro-carbón, también la adición de elementos de aleación al hierro tiende a reducir el límite de la solubilidad del carbon, el límite aproximado se muestra para varias aleaciones en la fig. 1. En aceros de baja aleación la austenita de la superficie es saturada con el carbón del límite de solubilidad y el resto del carbono se presenta como carburo (Fe<sub>3</sub>C), C. La cantidad del carbono desarrollada durante la carburación depende de los siguientes factores:

-Una alta actividad de carbón, mayor rapidez de carbono suministrado al acero, entonces se satura la superficie del acero con carbono.

-Las especies presentes; la velocidad de reacción en la superficie del acero se ve afectada directamente por la naturaleza y concentración de las especies moleculares (N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) presentes en la atmósfera del horno que son los que afectan la velocidad de reacción.

-El contenido de elementos aleantes en el acero ejercen una influencia primaria en el contenido de carbón de la superficie endurecida, y tiene una influencia secundaria en la velocidad de difusión del carbón dentro del acero.

-La temperatura de carburación; incrementando la temperatura incrementamos la velocidad de reacción de la superficie del acero, y más importante, se incrementa la velocidad de difusión del carbón hacia adentro del acero. El carbono, después de haber pasado al acero, queda disuelto en el hierro gamma y de acuerdo con las leyes de difusión al existir en la periferia una concentración más elevada que en el interior, penetra hacia el corazón. En el proceso de carburación se señalan tres fases diferentes.

- 1.-Producción de carbono naciente en las proximidades de la superficie del acero.
- 2.-Absorción del carbono en la zona periférica del carbono.
- 3.-Difusión del carbono hacia la zona central.

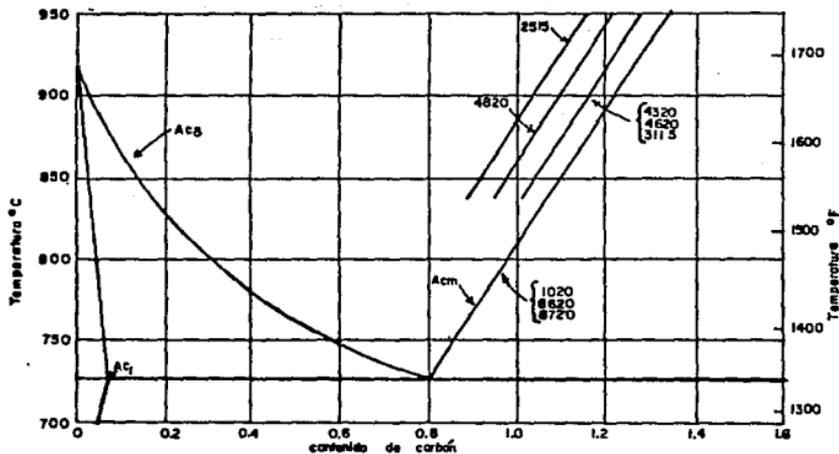


Fig.1 Límite aproximado de solubilidad del carbón en la austenita para ocho aceros en el diagrama de fases simplificado hierro-carbón.

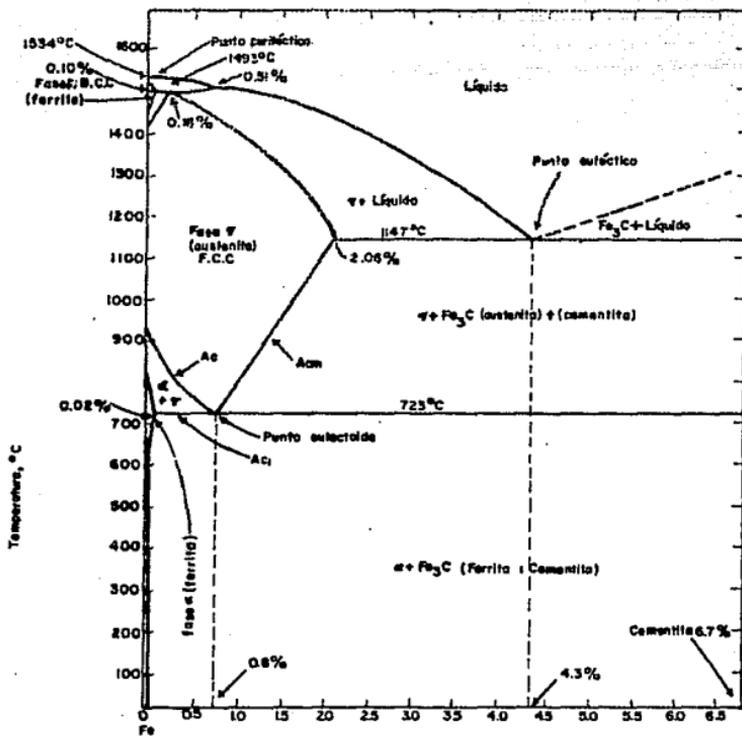


Fig. 2 El sistema metaestable Fe-Fe<sub>3</sub>C: (Según The Constitution of Binary Alloys).

-Efecto del tiempo; la capa de penetración de carbono se incrementa cuando el tiempo se incrementa.

Con el fin de evaluar el tiempo y la temperatura para realizar la cementación, Hartz desarrolló una expresión con base en las leyes de difusión esta es:

$$X = 860 \sqrt{t} e^{-8287/T} \sqrt{t}$$

donde el espesor de capa carburada X se expresa en mm, el tiempo t en horas y la temperatura T en grados Kelvin.

El éxito de la carburación gaseosa, depende en gran parte de la aptitud del medio carburante para suministrar y rodear la superficie del acero con carbono, en un estado que se puede llamar activo de tal naturaleza que su absorción por el acero se efectúe rápidamente, se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero se verifica siempre por medio de los gases que se desprenden al calentarse las mezclas carburantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el óxido de carbono (CO) el principal agente carburante. En la carburación gaseosa se realiza la cementación por la acción del metano que se descompone en hidrógeno y carbono naciente de acuerdo a la reacción principal de este proceso.



En todos los casos el carbono naciente que se forma es el que produce la cementación. Al estar en contacto con el hierro a alta temperatura sucede:



Formandose carburo de hierro o cementita y luego al difundirse el carbono o el carburo de hierro hacia el interior de las piezas es cuando se produce verdaderamente la cementación.

## 2.2. Atmosferas utilizadas en los hornos de carburación o cementación.

Las atmosferas protectoras que se emplean en los hornos donde se llevan a cabo los procesos de carburación sirven para mantener constante el contenido de carbono del acero durante el proceso y prevenir la oxidación superficial durante su calentamiento.

Estas atmosferas estan compuestas por Nitrógeno, Monóxido y Dióxido de Carbono, Hidrógeno, Vapor de Agua e Hidrocarburos.

La atmosfera utilizada en este proceso es del tipo endotérmico.

La atmosfera de base endotérmica se prepara con una mezcla relativamente pobre en aire, con un hidrocarburo gaseoso, en presencia de un catalizador de níquel.

En la tabla II se da la clasificación y composición principal de esta clase de atmosferas. Mismas que evitan la oxidación y la descaburación. Además, según el potencial de carbono de la atmosfera pueden producir carburación gaseosa en la superficie de los aceros.

Debido a su alta concentración de monóxido de carbono e hidrógeno se deben manejar con cuidado a fin de evitar explosiones.

Ahora se revisará el papel de cada gas que forma parte de la composición química de la atmosfera endotérmica.

La oxidación del Fe se efectúa cuando hay un alto contenido de  $CO_2$ :



### Nitrógeno:

El Nitrógeno al estado molecular no deteriora los aceros sino que es una atmosfera protectora conveniente. En cambio el Nitrógeno atómico se combina con el hierro formando nitruros en la capa superficial.

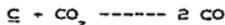
Cantidades aun pequeñas de vapor de agua en el nitrógeno producen descaburación de los aceros de alto carbono por lo que el gas Nitrógeno debe estar completamente seco cuando se le desea emplear como una atmosfera protectora.

Clase	Descripción	N%	CO%	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub>	Punto de rocío °C	Preparada a) b)
101	Exotérmica pobre	86.8	1.5	10.5	1.2	..	(a)	8.0
102	Exotérmica rica	71.5	10.5	5.0	12.5	.5	(a)	6.0
201	P. de N <sub>2</sub> pobre	97.1	1.7	....	1.2	..	-40	9.0
202	P. de N <sub>2</sub> rica	75.3	11.0	....	13.2	.3	-40	6.0
301	Endotérmica pobre	45.1	19.6	.4	34.6	.8	-6.7 a) b)	2.5
302	Endotérmica rica	39.8	20.7	....	38.7	..	-4 a -20	2.5
402	De Carbón	65.1	34.7	....	1.2	..	-29	....
501	Exo-endo, pobre	63.0	17.0	....	20.0	..	-57	7.5
502	Exo-endo, rica	60.0	19.0	....	21.0	..	-45.5	7.2
601	Amoniaco disociado	25.0	....	....	75.0	..	-51.5	....
621	Amoniaco qdo. pobre	99.0	....	....	1.0	..	(a)	3.7
622	Amoniaco qdo. rica	80.0	....	....	20.0	..	(a)	1.9

- a) El punto de rocío es alrededor 5.5 °C por encima de la temperatura del agua de refrigeración.  
b) Los valores indican las partes de aire por cada parte de gas.  
P) Preparada.  
Exo) Exotérmica.  
endo) Endotérmica.  
qdo.) Quemado.

#### Monóxido y Dióxido de Carbono:

El dióxido de carbono reacciona con el carbono de la superficie del acero durante la austenitización, para producir monóxido según la reacción:



Donde  $\underline{C}$  representa el carbono disuelto en el hierro. En presencia de bajos contenidos de CO y altos contenidos de  $CO_2$ , esta reacción se desplaza hacia la derecha produciéndose la descarbonación. Si el suministro de dióxido continúa como, por ejemplo, en el caso de hornos de combustión de gas, el hierro comienza a reaccionar de la siguiente manera:

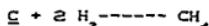


El FeO es estable a temperaturas por encima de 555 °C mientras que el óxido magnético ( $Fe_3O_4$ ) lo es por debajo de esa temperatura.

#### Hidrógeno:

Una atmósfera de hidrógeno reduce los óxidos de hierro a hierro metálico pero es muy efectivo para descarbonar el acero, lo cual depende de la temperatura del horno, del contenido de humedad, del gas del contenido de carbono del acero y del tiempo de tratamiento.

Este efecto se lleva a cabo a través de la reacción:



Y resulta despreciable a temperaturas inferiores a 700 °C.

#### Vapor de Agua:

El vapor de agua es oxidante y descarbonante de los aceros.

Su acción oxidante se produce por la reacción:



No Hay

Hoja

12.

No.

### 2.3. Determinación de la presión de H<sub>2</sub>O en la atmósfera producida por el generador de atmósferas endotérmicas.

El conocimiento del valor de la presión parcial de agua en una mezcla gaseosa posee diversas aplicaciones en el campo de la metalurgia, siendo una de las más importantes, el control de la composición química de las atmósferas protectoras empleadas para efectuar tratamientos térmicos o termoquímicos a piezas ya terminadas.

El primer paso para la determinación de la presión parcial de agua en una atmósfera consiste en la medición de la temperatura del punto de rocío de dicha atmósfera. Para explicar el principio bajo el cual opera esta determinación, recordemos que la humedad relativa de una atmósfera se define como:

$$\text{Humedad relativa} = \frac{\text{Presión parcial de agua}}{\text{Presión de equilibrio líquido-vapor}} \times 100 \quad (1)$$

Cuando una mezcla gaseosa contiene vapor de agua un enfriamiento progresivo de la mezcla da por resultado un incremento progresivo de la humedad relativa en ella debido a que la presión de equilibrio líquido-vapor disminuye conforme disminuye la temperatura, y así, una vez llegado a la temperatura en la que la humedad relativa alcanza un valor del 100% se iniciará la condensación de agua, formándose rocío.

Esta es la temperatura de punto de rocío.

Una vez determinada la temperatura del punto de rocío, mediante la aplicación de la ecuación de Clausius-Clapeyron para el equilibrio líquido-vapor:

$$\ln \left[ \frac{P_1}{P_2} \right] = \frac{\Delta H_v}{R} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (2)$$

Se calcula la presión parcial de agua en la mezcla gaseosa sabiendo que por ejemplo, la presión de equilibrio líquido-vapor a 100 °C es una atmósfera. Fig.3.

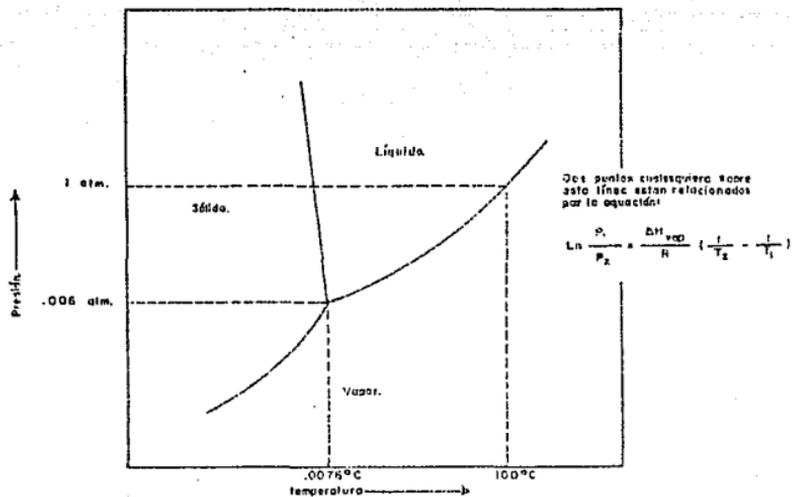


Fig. 3 Representación esquemática del diagrama de fase del agua en el plano P-T.



3.1. Composición química de la atmosfera endotérmica a la salida de la retorta del generador.

En la sección (4.2) se explica como trabaja y las partes que constituyen un generador de atmósferas endotérmicas.

Sea A la relación aire gas, es decir, la mezcla aire-gas se inyecta con la relación A:1.

Por cada mol de CH<sub>4</sub>, se inyectan A moles de aire, es decir:

$$.21 (A) \text{ moles de O}_2$$

$$.79 (A) \text{ moles de N}_2$$

Así pues, podemos tomar como base de cálculo:

$$1 \text{ mol de CH}_4$$

$$.21A \text{ moles de O}_2$$

$$.79A \text{ moles de N}_2$$

Expresamos la reacción de combustión como sigue:



De acuerdo con esta ecuación, el requerimiento estequiométrico es el siguiente:

$$\text{C: } 1 = \alpha + \beta \quad (4)$$

$$\text{H: } 4 = 2\alpha + 2\delta \quad (5)$$

$$\text{O: } 2 [.21A] = 2\alpha + \beta + \gamma \quad (6)$$

Los productos de reacción deben satisfacer adicionalmente el siguiente equilibrio:



para el cual la constante de equilibrio es:

$$K = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}} \quad (8)$$

La energía libre de Gibbs para la reacción (7) es:

$$\Delta G^\circ = 8000 - 7.02T \text{ cal} \quad (9)$$

por tanto:

$$K = \exp \left[ - \frac{4025.2}{T} + 3.53 \right] \quad (10)$$

Apartir de la ecuación (8) se obtiene:

$$\frac{\gamma \beta}{\alpha \delta} = K \quad (11)$$

Ahora únicamente resta resolver el sistema de ecuaciones (4), (5), (6) y (11) para lo cual partiendo de las ecuaciones (4) y (6) se elimina por suma-resta a  $\beta$  y se expresa a  $\alpha$  en función de  $\gamma$ .

$$\begin{array}{r} 1 = \alpha + \beta \\ - .42A = -2\alpha - \beta - \gamma \\ \hline 1 - .42A = -\alpha - \gamma \end{array}$$

De donde:

$$\alpha = .42A - 1 - \gamma \quad (12)$$

Y de manera similar, obtenemos a  $\beta$  como función de  $\gamma$ :

$$\begin{array}{r} 2 = 2\alpha + 2\beta \\ - .42A = -2\alpha - \beta - \gamma \\ \hline 2 - .42A = \beta - \gamma \end{array}$$

De donde:

$$\beta = 2 - .42A + \gamma \quad (13)$$

De la ecuación (5):

$$\delta = 2 - \gamma \quad (14)$$

Sustituyendo las ecuaciones (12), (13) y (14) en la (11) se obtiene una ecuación con  $\gamma$  como incógnita:

$$\frac{\gamma (2 - .42A + \gamma)}{(2 - .42A - \gamma)(2 - \gamma)} = K \quad (15)$$

Despejando a  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} (2 - .42A)\gamma + \gamma^2 &= K [\gamma^2 + 2(2 - .42A - 1)\gamma + (2 - .42A + 1 - 2)\gamma] \\ (2 - .42A)\gamma + \gamma^2 - K\gamma^2 + (-.84A + 2)K\gamma + (2 - .42A + 1)K\gamma &= 0 \\ [1 - K]\gamma^2 + [2 - .42A + .42AK + K]\gamma + [2 - .84A]K &= 0 \quad (16) \end{aligned}$$

$$a = 1 - K$$

$$b = 2 - .42A + .42AK + K$$

$$c = [2 - .84A]K$$

Y entonces:

$$\gamma = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Una vez resuelta esta operación, el valor obtenido para  $\gamma$  se sustituye en la ecuación (12), (13) y (14) para obtener el valor de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$ .

El total de moles en el gas resultante en los componentes son:

$$N_T = \alpha + \beta + \gamma + \delta + .79A, \text{ y las presiones parciales de}$$

$$P_{O_2} = \frac{\beta}{N_T} \quad (17)$$

$$P_{H_2} = \frac{\delta}{N_T} \quad (18)$$

$$P_{CO_2} = \frac{\alpha}{N_T} \quad (19)$$

$$P_{H_2O} = \frac{Y}{N_T} \quad (20)$$

$$P_{N_2} = \frac{.79A}{N_T} \quad (21)$$

Y utilizando la ecuación (2) obtenemos el punto de rocío.

$$\ln \left[ \frac{P_2}{P_2} \right] = \frac{\Delta H_v}{R} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (22)$$

Donde:

$$\Delta H_v = 9820 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

$$\left[ P_1, T_1 \right] = \left[ 1 \text{ atm}, 373.15 \right]$$

$$\ln P_2 = -4942.12 \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{373.15} \right]$$

$$-2.023E-4 \ln P_{H_2O} = \frac{1}{T_2} - 2.679887E-3$$

$$T_2 = \frac{1}{2.679887E-3 - 2.023E-4 \ln P_{H_2O}} \quad (23)$$

Sustituyendo en esta expresión los valores de  $P_{H_2O}$  obtenidos al variar la relación aire-gas se obtienen los resultados mostrados en la Tabla III, los cuales se presentan en la figura 4. El programa de cómputo se lista en el apéndice A.

Debido a que la salida de la retorta el gas se enfría hasta la temperatura ambiente mediante un radiador, entonces la máxima relación aire-gas que puede emplearse sin que haya condensación de agua en el radiador es 2.9:1 (el punto de rocío de esta atmósfera es 22.7°C). Esto implica que mientras la relación aire-gas no sea mayor a 2.9 la composición química de la atmósfera alimentada, a los hornos de tratamiento térmico será igual a la presentada en la tabla III.

Rel. A-G	P. Rocio °F	P. Rocio °C	%CO <sub>2</sub>	%CO	%H <sub>2</sub> O	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
2.40	-13.15	-30.42	.037	20.38	.125	40.72	38.73
2.45	17.48	-8.06	.136	20.13	.451	40.06	39.22
2.46	20.92	-6.15	.155	20.07	.515	39.94	39.31
2.47	23.98	-4.45	.175	20.02	.580	39.81	39.41
2.48	26.75	-2.91	.194	19.97	.644	39.68	39.50
2.49	29.28	-1.52	.214	19.92	.707	39.55	39.60
2.50	31.59	-0.22	.233	19.86	.771	39.43	39.70
2.51	33.75	0.97	.252	19.82	.834	39.30	39.74
2.52	35.75	2.08	.272	19.76	.898	39.17	39.88
2.53	37.62	3.12	.291	19.71	.960	39.04	39.98
2.54	39.38	4.11	.310	19.66	1.023	38.92	40.07
2.55	41.05	5.03	.329	19.61	1.085	38.80	40.17
2.60	48.21	9.00	.424	19.36	1.395	38.17	40.64
2.70	58.83	14.91	.613	18.87	1.968	36.97	41.54
2.80	66.68	19.27	.796	18.39	2.580	35.79	42.44
2.90	72.90	22.72	.976	17.92	3.143	34.65	43.30
3.00	78.04	25.57	1.153	17.47	3.688	35.55	44.14
4.00	105.64	40.91	2.765	13.47	8.273	24.19	51.30
5.00	118.22	66.79	4.174	10.21	11.653	17.12	56.83

Tabla III

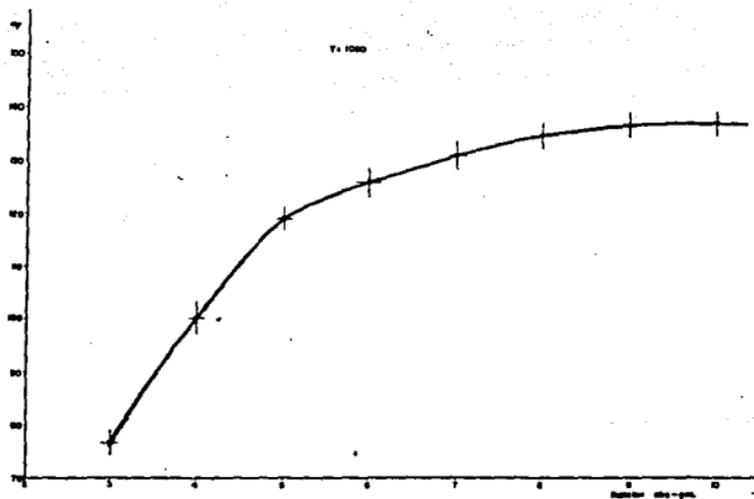
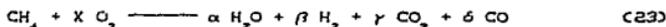


Fig. 4 Composición química de la atmosfera  
 $C\%CO_2, \%CO, \%H_2, \%H_2O, \%N_2$ .  
 Punto de rocío vs Relación aire-gas.

3.2. Cálculo de la composición química de la atmósfera endotérmica en el horno de tratamiento en base a la medición de punto de rocío.

Se calculará la composición química del gas tomando como datos su punto de rocío y la temperatura de la retorta del generador de atmósfera. Suponiendo que el combustible que se quema es metano, la reacción de combustión queda representada por la siguiente ecuación:



En esta reacción, X es el número de moles de  $\text{O}_2$  por cada mol de  $\text{CH}_4$  en la mezcla que se quema, ya que prácticamente todo el  $\text{O}_2$  se consume durante la combustión;  $\alpha$  es el número de moles de  $\text{H}_2\text{O}$  que se generan por cada mol de  $\text{CH}_4$  que se quema y similarmente  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , son el número de moles de  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  que se generan por mol de  $\text{CH}_4$ .

El número de moles de  $\text{N}_2$  que están presentes en la mezcla es:

$$n_{\text{N}_2} = \frac{.79}{.21} X$$

A partir de la estequiometría de esta reacción, una vez ocurrida la combustión se debe satisfacer:

$$n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} = 1 \quad (24)$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{H}_2} = 2 \quad (25)$$

$$n_{\text{H}_2} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} = 2X \quad (26)$$

Con la ayuda de las ecuaciones (24) y (25) se encuentra el número total de moles en equilibrio.

$$n_r = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{N}_2} = 1 + 2 + \frac{.79}{.21} X = 3 + 3.762X \quad (27)$$

Conociendo el punto de rocío de la atmósfera mediante la aplicación de la ecuación de Clausius - Clapeyron podemos conocer la presión parcial de  $H_2O$  en la atmósfera, por lo que se cuenta con la siguiente ecuación adicional:

$$P_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}^o}{3 + 3.762X} \quad (28)$$

De la ecuación (28) despejamos X y trabajamos con la variable  $P_{H_2O}$ .

$$P_{H_2O} (3 + 3.762X) = P_{H_2O}^o$$

$$3P_{H_2O} + (3.762X)(P_{H_2O}) = P_{H_2O}^o$$

$$3.762X = \frac{P_{H_2O}^o - P_{H_2O}}{P_{H_2O}}$$

$$X = \frac{P_{H_2O}^o - P_{H_2O}}{3.762 P_{H_2O}} \quad (29)$$

La ecuación (29), la sustituimos en (28).

$$P_{H_2O} + 2P_{H_2O} + P_{H_2O} = \frac{2(P_{H_2O}^o - 3P_{H_2O})}{3.762 P_{H_2O}} \quad (30)$$

Además, para la reacción:



$$\Delta G^o = 8000 - 7.02T \text{ cal} \quad (31)$$

$$\Delta G^o = -RT \ln K$$

$$-\frac{\Delta G^o}{RT} = \ln K; \text{ sacando antilogaritmos}$$

$$\exp\left(-\frac{\Delta G^o}{RT}\right) = K$$

$$\exp\left(-\frac{8000}{RT} + \frac{7.02T}{RT}\right) = K \quad (32)$$

La expresión de  $K$  para la ecuación (31) es:

$$\frac{P_{H_2O} \cdot P_{CO}}{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}} = K \quad (33)$$

Y tomando los valores  $R=1.9872$  obtenemos la siguiente expresión de  $K$ :

$$\frac{P_{H_2O} \cdot P_{CO}}{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}} = \exp \left[ - \frac{4025.7649}{T} + 3.53261 \right] \quad (34)$$

$$P_i = \frac{P_i}{P_T} = \frac{n_i}{n_T}$$

$$\frac{n_{H_2O} \cdot n_{CO}}{n_{H_2} \cdot n_{CO_2}} = \exp \left[ - \frac{4025.7649}{T} + 3.53261 \right] \quad (34')$$

$$\frac{n_{H_2O} \cdot n_{CO}}{n_{H_2} \cdot n_{CO_2}} = K$$

De las ecuaciones (35'), (30) multiplicándola por  $-1$  y sumando ambas:

$$n_{CO} + n_{CO_2} = 1 \quad (35')$$

$$-n_{H_2O} - 2n_{CO_2} - n_{CO} = \frac{-2n_{H_2O} + 6P_{H_2O}}{3.762 P_{H_2O}} \quad (36')$$

$$\frac{-n_{H_2O} - n_{CO_2}}{3.762 P_{H_2O}} = 1 \quad (37')$$

$$-n_{H_2O} - n_{CO_2} = \frac{-2n_{H_2O} + 6P_{H_2O} + 3.762 P_{H_2O}}{3.762 P_{H_2O}} \quad (38')$$

Y despejando  $\Pi_{2^o}$  y multiplicando por (-1):

$$\Pi_{2^o} = \frac{2\Pi_{1^o} - 9.762 P_{H_2^o}}{3.762 P_{H_2^o}} - \Pi_{2^o}$$

$$\Pi_{2^o} = \frac{\left[2 - 3.762 P_{H_2^o}\right] \Pi_{1^o} - 9.762 P_{H_2^o}}{3.762 P_{H_2^o}} \quad (39'')$$

Ahora con la ecuación (35') y la ecuación (30), multiplicándola por (-1/2) y sumando ambas.

$$\Pi_{2^o} = \frac{\left[-2 + 3.762 P_{H_2^o}\right] \Pi_{1^o} + 13.524 P_{H_2^o}}{3.762 P_{H_2^o}} \quad (40')$$

De la ecuación (25) despejamos  $\Pi_{2^o}$

$$\Pi_{2^o} = 2 - \Pi_{2^o} \quad (41')$$

Ahora sustituyendo las ecuaciones (39''), (40') y (41') en la ecuación (34')

$$\frac{\left[\Pi_{1^o}\right]}{1} \frac{\left[-2 + 3.762 P_{H_2^o}\right] \Pi_{2^o} + 13.524 P_{H_2^o}}{3.762 P_{H_2^o}} = K$$

$$\left[ \frac{\left[2 - 3.762 P_{H_2^o}\right] \Pi_{1^o} - 9.762 P_{H_2^o}}{3.762 P_{H_2^o}} \right] \left[ \frac{2 - \Pi_{2^o}}{1} \right]$$

Despejando el numerador.

$$\left[ \frac{-2 + 3.762 P_{H_2O}}{3.762 P_{H_2O}} \right] n_{H_2O} + (3.5949) n_{H_2O} = \left[ \frac{K}{3.762 P_{H_2O}} \right]$$

$$\left[ (4 + 2.238 P_{H_2O}) n_{H_2O} - (2 - 3.762 P_{H_2O}) n_{H_2O} - 19.524 P_{H_2O} \right] \quad (42')$$

Factorizando y reagrupando términos de la ecuación (42')

$$\left[ \left[ -\frac{53163}{P_{H_2O}} \right] + 1 \right] [1 - K] n_{H_2O} + \left[ 3.5949 - \frac{1.06326 K}{P_{H_2O}} - .5949 K \right] n_{H_2O} + 5.1989 K = 0$$

Es decir:

$$a n_{H_2O} + b n_{H_2O} + c n_{H_2O} = 0 \quad (43')$$

Donde:

$$a = \left[ -\frac{53163}{P_{H_2O}} + 1 \right] [1 - K]$$

$$b = 3.5949 - \frac{1.06326}{P_{H_2O}} K - .5949 K$$

$$c = 5.1989 K$$

Resolviendo la ecuación (43') se encuentra el valor de  $n_{H_2O}$  y posteriormente a partir de las ecuaciones (39'), (40') y (41') se encuentran  $n_{CO_2}$ ,  $n_{CO}$  y  $n_{H_2}$ . Los valores de las presiones parciales se obtienen entonces directamente a partir de estos valores. En el apéndice B se lista el programa "Punto de Rocío".

### 3.3. Aspectos Termodinámicos de La Interacción Gas-Metal en los Tratamientos Térmicos.

En esta sección se analizará la relación entre la atmósfera de tratamientos térmicos y el contenido de carbono en el acero.

Los cambios en el contenido de carbono disuelto en una matriz de Fe en el equilibrio con una fase gaseosa que tiene:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2$ , están dadas por la siguiente ecuación.



La constante de equilibrio para la reacción (37) es:

$$K = \frac{P_{\text{CO}}^2}{ac \text{ Pco}_2} \quad (38)$$

Donde  $ac$ =actividad del carbono.

$$\log K = -8918/T + 9.1148 \quad (39)$$

En términos de fracción molar, la actividad está dada por la ecuación:

$$ac = \gamma_c X_c \quad (40)$$

En términos de por ciento en peso:

$$ac = f_c \%C \quad (41)$$

Donde:

$\gamma_c, f_c$ = Coeficiente de la actividad del carbón, en función de la composición y la temperatura.

$X_c$ = Fracción atómica del carbono.

$\%C$ = Por ciento en peso.

Combinando las ecuaciones (38) y (41) se obtiene:

$$K = \frac{P_{CO}^2}{(f_c \%C) P_{CO_2}} \quad (42)$$

Despejando %C:

$$\%C = \left[ \frac{1}{K f_c} \right] \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} \quad (43)$$

En base a la ecuación (42), el control del carbono durante los tratamientos termoquímicos (T.TQ.) para cualquier aleación de acero en particular, requiere el conocimiento del coeficiente de actividad del carbono, el CO y CO<sub>2</sub> contenidos en la atmósfera.

Actualmente en las operaciones de T.TQ. estos dos componentes CO y CO<sub>2</sub>, pueden ser medidos en la atmósfera del horno para determinar el contenido en la mezcla por la técnica de espectroscopia infrarroja o por cromatografía de gases.

Para una aleación sencilla, los datos ternarios suficientes son:

Fe-aleante-carbono, sistemas estudiados por Wada, Elliot y Chipman <sup>(4)</sup>.

Los sistemas Fe-Ni-C, Fe-Si-C, Fe-Mn-C, Fe-Cr-C, Fe-Mo-C y Fe-V-C, tienen por ecuación:

$$\log f_c = 2300/T - 2.24 + A \%C + B \% \text{ Aleación} \quad (44)$$

Donde:  $T = [^{\circ}K]$

Por ejemplo, la relación entre CO y CO<sub>2</sub> de la atmósfera de T.TQ. y el contenido de carbono en la aleación Fe-Cr-C se obtiene combinando (39), (42), (44) y los datos de la tabla IV.

De la ecuación (42), despejamos  $P_{CO}^2/P_{CO_2}$  y sacando logaritmo a toda la ecuación obtenemos:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = K f_c \%C \quad (45)$$

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = \log K + \log f_c + \log \%C \quad (46)$$

Sistema	A*	B*	%C	%Aleación	Rango T °K
Fe-Ni-C	183/T	(19.2/T+2.0E-3)	*	0 a 25	1073 a 1473
Fe-Si-C	(179+8.9%Si)/T	(62.5/T+0.41)	0 a 1	0 a 3	1121 a 1420
Fe-Mn-C	181/T	-21.8/T	0 a 1	0 a 15	1121 a 1420
Fe-Cr-C	179/T	-(102/T-0.33)	0 a 1.2	0 a 12	1121 a 1473
Fe-Mo-C	182/T	-(55/T-0.15)	0 a 1.2	0 a 4	1121 a 1473
Fe-V-C	179/T	-117/T	0 a 1.2	0 a 2	1121 a 1473

\*  $\log f_i = 2300/T - 2.24 + A \%C + B \%Aleación$  (T= °K).

\* El límite de solubilidad en función de la temperatura y el contenido de níquel.

Tabla IV: Sumario de los coeficientes de actividad,  $f_i$ , para varios sistemas Fe-M-C.

Elemento	Coefficiente de primer orden $\theta_i$	Coefficiente de segundo orden $n_i^{ij}$
C	8890/T	-
Ni	4606/T+.63	-
Si	7370/T+4.84	23030/T
Mn	-5070/T	-
Cr	-(21879/T-7.02)	-
Mo	-(21879/T-5.76)	-
V	-24642/T	-
W	9.03 a 1050°C 5.64 a 1125°C	-
Co	2.10*	-
Cu	-(9074/T-9.44)	-

\* Temperatura independiente de 1098 a 1323°K

Tabla V: Coeficientes de interacción de primero y segundo orden de elementos de aleación común en los aceros.

En (46) sustituimos: log K y log de  $f_c$ , ecuación (39) y ecuación (44) respectivamente.

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{8918}{T} + 9.1148 + \frac{2300}{T} - 2.24 + \frac{179}{T} \%C - \left(\frac{102}{T} - .033\right) \%Cr + \log \%C$$

Reagrupando términos:

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{T} + 6.875 + \frac{179}{T} \%C - \left(\frac{102}{T} - .033\right) \%C + \log \%C \quad (47)$$

Esta ecuación puede ser usada para estimar la composición química de la atmósfera de tratamiento térmico para el acero provisto de Fe-Cr-C, además de la concentración de los elementos de aleación más pequeños.

A continuación se dan las ecuaciones para los demás sistemas que se presenten en la tabla V.

Para el sistema Fe-Ni-C sustituyendo (39) y (44) en (46).

$$\log \left[ \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} \right] = -\frac{6618}{T} + 6.8748 + \frac{183}{T} (\%C) + \frac{19.2}{T} + 2.9 \times 10^{-5} (\%Ni) + \log \%C \quad (48)$$

Para el sistema Fe-Si-C.

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{T} + 6.8748 + \frac{(179 + 8.9 \%Si)}{T} (\%C) + \left(\frac{62.5}{T} + .041\right) \%Si + \log \%C \quad (49)$$

Para el sistema Fe-Mn-C.

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{T} + 6.8748 + \frac{181}{T} (\%C) - \frac{21.8}{T} \%Mn + \log \%C \quad (50)$$

Para el sistema Fe-Mo-C.

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{T} + 6.8748 + \frac{182}{T} \%C - \left(\frac{102}{T} - .033\right) (\%Mo) + \log \%C \quad (51)$$

Para el sistema Fe-V-C

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{T} + 6.8748 + \frac{179}{T} (\%C) - \frac{117}{T} (\%V) + \log \%C \quad (52)$$

El sistema base más representativo de un acero austenítico inoxidable es en general el Fe-Cr-Ni-C (sistema cuaternario). Nateson y Kassner tienen medido el coeficiente de actividad del carbón en la aleación Fe-8%, Ni-Cr-C en un rango T 725-1050°C. En un rango de la austenita, este autor da la ecuación general para el coeficiente de actividad  $f_C$  como:

$$\log f_C = \left[ .228 - \frac{130}{T} \right] \%C - \left[ .009 - \frac{3.14}{T} \right] \%Ni + \left[ .108 - \frac{175}{T} \right] \%Cr - 2.12 + \frac{2215}{T} \quad (53)$$

Y combinando (53) con (39) y (46):

$$-8918/T + 9.1148 + (.228 - 130/T) \%C - (.009 - 3.14/T) \%Ni + (.108 - 175/T) \%Cr - 2.12 + 2215/T + \log \%C = \log (P_{CO}^2/P_{CO_2})$$

Reagrupando y reduciendo términos tenemos:

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = \log \%C + \left[ .228 - \frac{130}{T} \right] \%C - \left[ .009 - \frac{3.14}{T} \right] \%Ni + \left[ .108 - \frac{175}{T} \right] \%Cr - \frac{6703}{T} + 6.995 \quad (54)$$

Esta expresión puede ser usada para estimar el contenido de CO y CO<sub>2</sub> en atmósferas exotérmicas o endotérmicas extendidas para mantener un contenido de carbono específico en la serie de aceros inoxidables (300) provista de pequeñas cantidades de elementos de aleación.

El coeficiente de actividad del carbono para otros sistemas cuaternarios base Fe y otros sistemas de orden superior por lo general no son utilizados. Sin embargo los coeficientes pueden ser estimados de datos ternarios combinados de acuerdo a las fórmulas de los coeficientes de interacción. Los resultados de otras investigaciones del equilibrio carbono-austenita, son usualmente descritos en términos de concentración como la Relación Atómica (y's) o Relaciones de Red (z's).

Esto es importante para generalizar relaciones funcionales entre el porcentaje en peso, coeficiente de actividad,  $f$  y coeficientes de interacción basadas en otras unidades de concentración que deban ser desarrolladas. De acuerdo con Wada<sup>2</sup>, el coeficiente de actividad " $\psi_c$ " de una solución consistente de Fe, carbono y  $n$  elementos de aleación está dado en términos de coeficientes de interacción de 1er. orden ( $\theta_c$ 's) y de segundo orden ( $\Pi_c$ 's) como:

$$\ln \psi_c = \ln \psi_c^0 + \theta_c^0 y_c + \sum_j^n \theta_c^j y_j + \sum_j^n \Pi_c^{c,j} y_c y_j + \sum_j^n \sum_k^n \Pi_c^{j,k} y_j y_k \quad (55)$$

Donde:

$$\ln \psi_c^0 = 5297/T - 2.12$$

$$Y_i = \frac{n_i}{n_{Fe} \sum_j^n n_j} = \frac{\%i}{M_i \left[ \%Fe/55.85 + \sum_j^n \frac{\%i}{m_j} \right]} = \frac{\%i}{\lambda_i}$$

$n_i$  = número de átomo-gramo de  $i$ .

$\lambda_i$  = total átomo-gramo de la red atómica, peso del elemento  $i$ .

$M_i$  = peso atómico.

El coeficiente de actividad  $\psi_c$ , es definido como:

$$\psi_c = a_c/z_c \quad (56)$$

donde:

$$z_c = \frac{y_c}{1 - y_c}$$

$$a_c = \psi_c z_c = f_c \%C \quad (57)$$

$$\log f_c = \log \psi_c - \log \frac{\%C}{z_c} \quad (58)$$

Entonces sustituyendo la ecuación (55) y la definición de  $Z_c$  dentro de la ecuación (58) obtenemos:

$$\log f_c = \frac{1}{2.303} = \ln \psi_i^* + \frac{1}{2.3} \theta_i^* y_c + \frac{1}{2.3} \sum_j^n \theta_j^* y_j + \frac{1}{2.3} \sum_j^n \Pi_j^{*j} y_c y_j + \frac{1}{2.3} \sum_j^n \sum_k^n \Pi_{jk}^{*j} y_j y_k - \log \frac{\%C (1 - \%C)}{y_c}$$

ya que:

$$y_c = \frac{\%C}{\lambda_c} \quad \text{y} \quad \ln \psi_i^* = \frac{5297}{T} - 2.12$$

$$\log f_c = \frac{1}{2.303} \left( \frac{5297}{T} - 2.12 \right) + \frac{1}{2.3} \theta_i^* \frac{\%C}{\lambda_c} + \frac{1}{2.3} \sum_j^n \theta_j^* \frac{\%j}{\lambda_j} +$$

$$\frac{1}{2.3} \sum_j^n \Pi_j^{*j} \frac{\%C}{\lambda_c} \frac{\%j}{\lambda_j} + \frac{1}{2.3} \sum_j^n \sum_k^n \Pi_{jk}^{*j} \frac{\%j}{\lambda_j} \frac{\%k}{\lambda_k} - \log \frac{\%C \left( 1 - \frac{\%C}{\lambda_c} \right)}{\frac{\%C}{\lambda_c}}$$

$$\log \frac{\%C \left( 1 - \frac{\%C}{\lambda_c} \right)}{\frac{\%C}{\lambda_c}} = \log \lambda_c \left( 1 - \frac{\%C}{\lambda_c} \right) = \log (\lambda_c - \%C)$$

$$\log f_c = \frac{2300}{T} - .92 + \frac{1}{2.303} \theta_i^* \frac{\%C}{\lambda_c} + \frac{1}{2.303} \sum_j^n \theta_j^* \frac{\%j}{\lambda_j} + \sum_j^n \frac{\Pi_c^{*j}}{2.303 \lambda_c \lambda_j} (\%C) (\%j) + \sum_j^n \sum_k^n \frac{\Pi_{jk}^{*j}}{2.303 \lambda_j \lambda_k} (\%j) (\%k) - \log (\lambda_c - \%C)$$

Los coeficientes de siguiente orden  $\Pi_c^{*j}$  no son conocidos para los sistemas de interés, entonces se toman como cero. Combinando la ecuación (59), con (39) y (42) se obtiene:

$$\log K = -8918/T + 9.1148 \quad (39)$$

$$\log P_{co}^* / P_{co} = \log K + \log f_c + \log \%C \quad (42)$$

$$\log f_c = 2300/T - .92 - \log (\lambda_c - \%C) + \theta_i^* / 2.3 \lambda_c (\%C) + \sum_j^n \frac{\theta_c^j}{2.3 \lambda_j} \%j +$$

$$\sum_j^n \Pi_c^{*j} / 2.3 \lambda_c \lambda_j (\%C) (\%j) + \sum_j^n \sum_k^n \Pi_{jk}^{*j} / 2.3 \lambda_j \lambda_k (\%j) (\%k) \quad (59)$$

Se obtiene:

$$\log P_{CO}^2 / P_{CO_2} = -8918/T + 9.1148 + 2300/T - .92 - \log (\lambda_c - \%C) +$$

$$\theta_c^c / 2.3\lambda_c (\%C) + \sum_j^n \frac{\theta_c^j}{2.3\lambda_j} \%j + \sum_j^n \frac{\pi_c^{c,j}}{2.3\lambda_c \lambda_j} \%C \%j$$

Reagrupando.

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{8918}{T} + 8.195 - \log \lambda_c + \log \%C + \frac{\theta_c^c}{2.3\lambda_c} \%C + \sum_j^n \frac{\theta_c^j}{2.3\lambda_j} \%j +$$

$$\sum_j^n \frac{\pi_c^{c,j}}{2.3\lambda_c \lambda_j} \%C \%j$$

(60)

Los coeficientes de interacción de primer orden y de segundo orden para un número de elementos de aleación en común, está dado en la tabla III. Sustituyendo los coeficientes para Cr y Mo en la ecuación (60) se obtiene.

Conocemos la siguiente expresión:

$$\lambda_i = M_i \left[ \frac{\%Fe}{85.85} + \sum_j^n \frac{\%j}{M_j} \right]$$

Ejemplo para la aleación.

$$\%C = \text{Variable}$$

$$\%Cr = 2.25$$

$$\%Mo = 1$$

$$\%Fe = 100 - 2.25 - 1 - \%C$$

$$\%Fe = 100 - 2.25 - 1 = 96.75$$

$$\%Fe = 96.75$$

$$\lambda_c = M_c \left[ \frac{\%Fe}{55.85} + \frac{\%Cr}{52} + \frac{\%Mo}{96} \right]$$

$$\lambda_c = 12 \left[ \frac{96.75}{55.85} + \frac{2.25}{52} + \frac{1}{96} \right] = 21.432 \quad \text{(I)}$$

$$\therefore \log \lambda_c = \log 21.432 = 1.331 \quad \text{(II)}$$

Si suponemos  $\%C = .3 \rightarrow$

$$\log (\lambda_c - \%C) = \log (21.432 - .3) = 1.325 \quad \text{(III)}$$

además  $\log (\lambda_c - \%C) \quad \log \lambda_c$

$$\frac{\theta_c^{cr}}{2.3 \lambda_{cr}} (\%Cr) = - \frac{2.25}{2.3(92.872)} \left( \frac{21879}{T} - 7.02 \right) = - \frac{230.461}{T} + .074 \quad \text{(IV)}$$

$$\lambda_c = M_{cr} \left[ \frac{\%Fe}{55.8} + \frac{\%C}{12} + \frac{\%Mo}{96} \right] = 52 \left[ \frac{96.75}{55.85} + \frac{2.25}{52} + \frac{1}{96} \right] = 92.972 \quad \text{(V)}$$

$$\lambda_{Mo} = M_{Mo} \left[ \frac{\%Fe}{55.8} + \frac{\%Cr}{52} + \frac{\%Mo}{96} \right] = 96 \left[ \frac{96.75}{55.8} + \frac{2.25}{52} + \frac{1}{96} \right] = 171.605 \quad \text{(VI)}$$

$$\frac{\theta_c^{Mo}}{2.3 \lambda_{Mo}} (\%Mo) = \frac{-1}{2.3(171.605)} \left( + \frac{21879}{T} - 5.76 \right) = - \frac{55.433}{T} + .015 \quad \text{(VII)}$$

Ahora sustituyendo de I-VII en la ecuación (60) obtenemos.

$$\log \frac{P_{CO}^*}{P_{CO_2}} = - \frac{6618}{T} + 8.195 - \log \lambda_c + \log \%C + \frac{\theta_c^*}{2.3\lambda_c} \%C + \sum_j^n \frac{\theta_j^*}{2.3\lambda_j} \%j + \sum_j^n \frac{\eta_j^*}{2.3\lambda_c \lambda_j} \%C \%j \quad (60)$$

$$\log \frac{P_{CO}^*}{P_{CO_2}} = - \frac{6618}{T} + 8.195 - \log \lambda_c + \log \%C + \frac{\theta_c}{2.3\lambda_c} \%C + \frac{\theta_{cr}}{2.3\lambda_{cr}} (\%Cr) + \frac{\theta_c^{Mo}}{2.3\lambda_{Mo}} (\%Mo) + \frac{\eta_c^{Cr}}{2.3\lambda_c \lambda_{cr}} (\%C)(\%Cr) + \frac{\eta_c^{Mo}}{2.3\lambda_c \lambda_{Mo}} (\%C)(\%Mo) \quad (60')$$

$$\log \frac{P_{CO}^*}{P_{CO_2}} = - \frac{6618}{T} + 8.195 - 1.325 + \log \%C + \frac{8890}{T} \left[ \frac{\%C}{2.3 (21.432)} \right] - \frac{230.461}{T} + .074 - \frac{75.433}{T} + .015 \quad (60'')$$

Sumando términos semejantes.

$$\log \frac{P_{CO}^*}{P_{CO_2}} = - \frac{6903.894}{T} + 6.959 + \log \%C + \frac{180.348}{T} \%C \quad (61)$$

Mediante la ecuación 61 es posible controlar el contenido de carbono en solución en el acero tratado a la temperatura T, controlando la relación  $P_{CO}^*/P_{CO_2}$  en la atmósfera carburante. El control de esta relación se puede lograr variando la relación aire-gas en la mezcla a la retorta del generador o agregando algún hidrocarburo gaseoso al horno de tratamiento termoquímico.

Debido a que la reacción de descomposición del gas en la retorta del generador es endotérmica y el calor requerido para mantener la reacción proviene de un quemador externo que calienta a la retorta, la relación aire-gas alimentada a la retorta solamente puede variar dentro de un intervalo pequeño alrededor del valor de diseño del equipo, y por esta razón la forma usual para controlar la reacción  $P_{CO}^*/P_{CO_2}$  es mediante la inyección de gas natural al horno. En la siguiente sección se analizará con detalle este aspecto.

3.4. Inyección de gas natural a la atmósfera endotérmica.

En la sección 3.3 se analizó el valor que debe tomar el cociente

$P_{CO}^2 / P_{CO_2}$  para el caso de la carburación de aceros aleados con Ni, Si, Mn, Cr, Mo y V. Este cociente se da en las ecuaciones (48) - (52). El cociente calculado en estas ecuaciones, se controla en la práctica industrial mediante la inyección de gas natural.

Por ejemplo:

Se desea reducir el cociente  $P_{CO}^2 / P_{CO_2}$  en un horno de cementación para un acero 1045, inyectando gas natural a una atmósfera cuyo punto de rocío inicial es de 80°F hasta un valor:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = A \quad (62)$$

Cuanto debe valer el punto de rocío de la atmósfera del horno una vez alcanzado el valor del cociente (A) a una temperatura de 880 °C. (1153 °K.)?

La composición química nominal del acero 1045 es .45% C, .25% Si, .75%Mn.

El cociente (A) en equilibrio con un contenido dado de carbono y manganeso en la pieza despreciando la interacción del Si es la ecuación (50):

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{T} + 8.8748 + \frac{181}{T} (\%C) - \frac{21.8}{T} (\%Mn) + \log (\%C) \quad (50)$$

Para un contenido de .9% C en la capa carburada se obtiene.

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{6618}{1153} + 8.8748 + \frac{181}{1153} (.9) - \frac{21.8}{1153} (.75) + \log(.9)$$

$$\log \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = 1.2158$$

Sacando antilogaritmos:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = 16.45 \quad (63)$$

A continuación se calculará el punto de rocío de una atmósfera que satisfaga esta condición. Partiendo de una atmósfera con un punto de rocío de 80 °F cuya composición química se calcula como se explicó en la sección 3.2, es decir utilizando el programa de cómputo del apéndice A es:

2.2%	H <sub>2</sub> O
36.1%	H <sub>2</sub>
17.8%	CO
1.3%	CO <sub>2</sub>
42.6%	N <sub>2</sub>

Para esta atmósfera:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = \frac{.178^2}{.013} = 2.44 \quad (64)$$

Por lo que esta atmósfera no satisfase el requerimiento para obtener un contenido de 0.9% C en la superficie del acero que se va a cementar. Suponiendo que el equilibrio que se satisface en todo momento es:



Y haciendo el mismo desarrollo que se hizo en las ecuaciones (8) - (11) tenemos:

$$\frac{P_{H_2O} \cdot P_{CO}}{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}} = 1.042 \quad (65)$$

Al agregar gas natural se promueve la reacción:



Tomando como base una mol de atmósfera endotérmica, antes de agregarse el gas natural hay:

.022 mol H<sub>2</sub>O  
 .361 mol H<sub>2</sub>  
 .178 mol CO  
 .013 mol CO<sub>2</sub>  
 .426 mol N<sub>2</sub>

Supongamos que el CH<sub>4</sub> que se agrega al horno reacciona con X moles de H<sub>2</sub>O esto implica que se generan X moles de CO y 3X moles de H<sub>2</sub>.

Por esta razón la reacción (7) se desplaza hacia la derecha.

Supongamos que Y moles de H<sub>2</sub> reaccionan con Y moles de CO<sub>2</sub> de acuerdo a la reacción (7) y que se forman por tanto Y moles de H<sub>2</sub>O además de Y moles de CO. Entonces las cantidades en la mezcla gaseosa después de agregar el CH<sub>4</sub> serán:

.022 - X + Y moles H<sub>2</sub>O  
 .178 + X + Y moles CO  
 .361 + 3X - Y moles H<sub>2</sub>  
 .013 - Y moles CO<sub>2</sub>  
 .426 moles N<sub>2</sub>

El número total de moles en la mezcla gaseosa es ahora:

$$N_T = (.022 - X + Y) + (.178 + X + Y) + (.361 + 3X - Y) + (.013 - Y) + .426$$

$$N_T = 1 + 3X \tag{67}$$

$$P_{H_2O} = \frac{.022 - X + Y}{1 + 3X} \tag{68}$$

$$P_{CO} = \frac{.178 + X + Y}{1 + 3X} \tag{69}$$

$$P_{H_2} = \frac{.361 + 3X - Y}{1 + 3X} \tag{70}$$

$$P_{CO_2} = \frac{.013 - Y}{1 + 3X} \tag{71}$$

Se deben satisfacer las condiciones (63) y (65).

A partir de la ecuación (63) se obtiene:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = \frac{(0.178+X+Y)^2}{(1+3X)(0.013-Y)} = 18.45 \quad (72)$$

A partir de la ecuación (65) se obtiene:

$$\frac{P_{H_2O} P_{CO}}{P_{H_2} P_{CO_2}} = \frac{(0.022-X+Y)(0.178+X+Y)}{(0.361+3X-Y)(0.013-Y)} = 1.042 \quad (73)$$

De la ecuación (72) despejamos X.

$$X^2 + (0.28555+51.35Y)X + (-0.182166+18.806Y+Y^2) = 0 \quad (74)$$

Resolviendo esta ecuación de segundo grado se obtiene:

$$X = 0.14275 - 25.675Y \pm \sqrt{0.2025435 - 24.136213Y + 658.20563Y^2} \quad (75)$$

Sustituyendo la ecuación (75) en la (73) se encuentra numéricamente el valor de Y, empleando el método de la bisección.

De acuerdo a la estequiometría de la reacción (7) y dado que inicialmente solamente hay 0.013 moles de  $CO_2$ , el valor de Y debe estar comprendido en el intervalo:

$$0 < Y < 0.013$$

Para encontrar la solución por el método de la bisección se reescribe la ecuación (73) como:

$$(0.022-X+Y)(0.178+X+Y) - 1.042(0.361+3X-Y)(0.013-Y) = 0 \quad (73')$$

$$Y = 0.01039$$

$$X = 0.02706$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones (67) - (71) se obtiene:

$$P_{H_2O} = 4.93 \times 10^{-3} \text{ atm}$$

$$P_{CO} = .199 \text{ atm}$$

$$P_{H_2} = .432 \text{ atm}$$

$$P_{CO_2} = 2.41 \times 10^{-3} \text{ atm}$$

A partir de la ecuación Clausius-Clapeyron se encuentra la temperatura de punto de rocío para esta atmósfera.

$$\ln = \frac{P_1}{P_2} = -\frac{\Delta H_{vap}}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (76)$$

$$T_2 = 265.41^\circ K$$

$$T_2 = -7.7^\circ C$$

$$T_2 = 18.1^\circ F$$

Es decir, para lograr la carburación deseada, en este ejemplo particular se requiere agregar gas natural al horno de tratamiento, hasta que el punto de rocío baje desde 80°F (atmósfera endotérmica que entra al horno), hasta un valor de 18.1°F, manteniendo el horno a una  $T = 880^\circ C$  (1153°K) y obteniendo .0% de C en la superficie del acero.

Punto A de la Fig.5 : Punto de rocío de la atmósfera endotérmica requerido para controlar el contenido superficial del carbono en un acero 1045. De la misma manera podemos predecir para diferentes valores de %C y diferente temperatura del horno.

Los datos de esta figura se tabulan de la tabla (VI)-(XII), para diferentes temperaturas donde además se determina la  $P_{CO}$ ,  $P_{CO_2}$ ,  $P_{H_2O}$ ,  $P_{H_2}$  y  $P_{H_2}$  presentes en la mezcla a un determinado %C y punto de rocío.

Estas cantidades no pueden cambiar de valor si mantenemos fijo el punto de rocío; por lo tanto, con solo variar el punto de rocío, todas las variables descritas anteriormente cambiarán.

De esta manera queda establecida la metodología para efectuar los cálculos requeridos para la operación de carburación gaseosa, tomando en cuenta los elementos de aleación en el acero y la corrección que se debe hacer al generador para obtener el punto de rocío requerido en este proceso:

1. En base a la dureza deseada al final del proceso de carburación se determina el contenido de carbono en la capa carburada en el caso del acero trabajado en particular, mediante datos reportados en el "Production Gas Carburizing Control" tales como los muestra la fig. 5 y las Tablas I y Ia.
2. Utilizando el valor de contenido de carbono en la capa carburada y considerando el efecto del principal elemento aleante además del carbono, se calcula el cociente  $P_{CO}/P_{CO_2}$  que debe satisfacer la atmósfera carburante.
3. En base al valor del cociente se calcula el punto de rocío que debe mantenerse en la atmósfera bajo la cual se está efectuando el tratamiento de carburación.

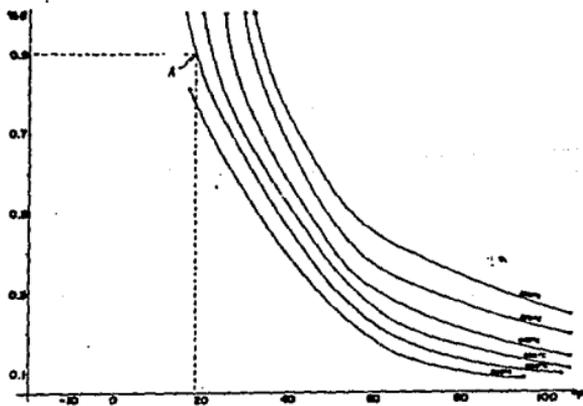
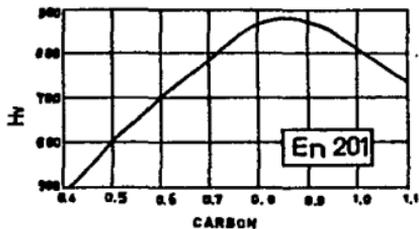
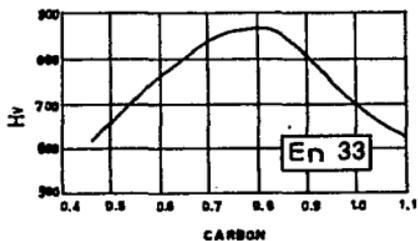
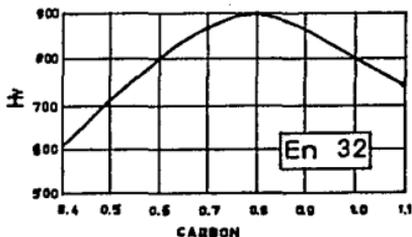
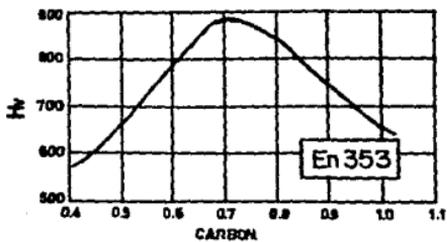
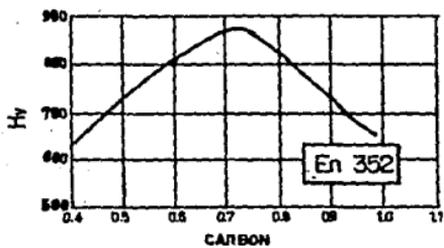
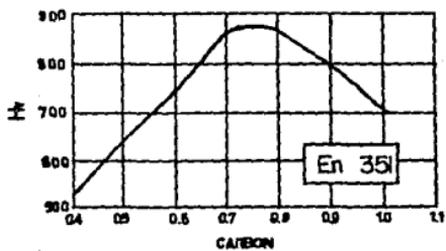
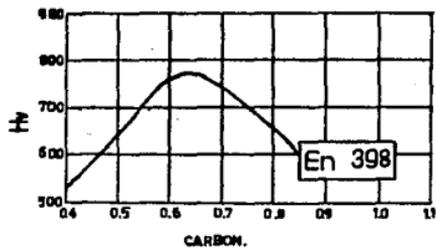
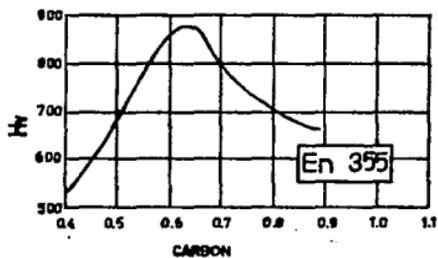
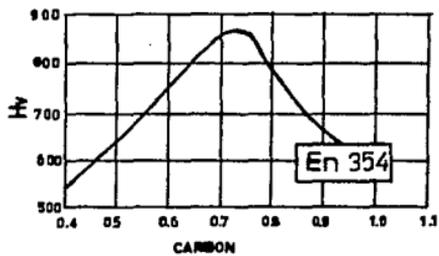


Fig. 5 Punto de rocío de la atmósfera endotérmica requerido para controlar el contenido superficial de carbono en un acero 1045.

Fig.6 Relación entre el contenido de carbón en la superficie y dureza superficial para acero carburados y templados.







## Composición %

Acero	C	Mn	Pta	Sa1	Si	Ni	Cr	Mo
<u>Acero al carbono</u>								
1010	.08-.13	.30-.60	.035	.045				
1018	.15-.20	.60-.90	.035	.045				
1019	.15-.20	.70-1.0	.035	.045				
1020	.17-.23	.30-.60	.035	.045				
1022	.18-.23	.70-1.0	.035	.045				
1039	.37-.44	.70-1.0	.035	.045				
1524	.19-.25	1.3-1.8	.035	.045				
1527	.22-.29	1.2-1.5	.035	.045				
<u>Aceros Resulfurados</u>								
1113	.13 max	.70-1.0	.07-	.24-				
			.24	.33				
1117	.14-.20	1.0-1.3	.04	.08-				
				.13				
<u>Aceros Aleados</u>								
3310	.08-.13	.45-.60	.025	.025	.20-.35	3.25-3.75	1.4-1.7	
4023	.20-.25	.70-.90	.035	.040				.2-.3
4027	.25-.30	.70-.90	.035	.040				.2-.3
4118	.18-.23	.70-.90	.035	.040	.20-.35		.4-.6	.08-.1
4140	.38-.43	.75-1.0	.035	.040	.20-.35		.8-1	.15-.2
4320	.17-.22	.45-.65	.035	.040	.20-.35	1.65-2.00	.4-.6	.2-.3
4620	.17-.22	.45-.65	.035	.040	.20-.35	1.65-2.00		.2-.3
4815	.13-.18	.40-.60	.035	.040	.20-.35	3.25-3.75		.2-.3
4820	.18-.23	.50-.70	.035	.040	.20-.35	3.25-3.75		.2-.3
5120	.17-.22	.70-.90	.035	.040	.20-.35		.7-.9	
5140	.38-.43	.70-.90	.035	.040	.20-.35		.7-.9	
8617	.15-.20	.70-.90	.035	.040	.20-.35	.40-.70	.4-.6	.15-.2
8620	.18-.23	.70-.90	.035	.040	.20-.35	.40-.70	.4-.6	.15-.2
8720	.18-.23	.70-.90	.035	.040	.20-.35	.40-.70	.4-.6	.2-.3
9310	.08-.13	.45-.65	.025	.025	.20-.35	3.00-3.5	1-1.4	.08-.1

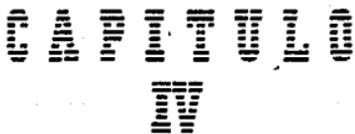
a) Composición máxima %

Tabla I: Composición de aceros para carburar o carbonitrurar

## Composición %

Acero	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Acero al carbono								
En 32	.10-.18	.60-1.0	.05	.05	.05-.35			
En 33	.10-.18	.30-.60	.05	.05	.10-.35			
En 351	≤.20	.60-1.0	.05	.05	≤.35	.60-1.0	.40-.60	≤.10
En 352	≤.20	.50-1.0	.05	.05	≤.35	.85-1.2	.60-1.0	≤.10
En 353	≤.20	.50-1.0	.05	.05	≤.35	1.0-1.5	.75-1.2	.08-.15
En 354	≤.20	.50-1.0	.05	.05	≤.35	1.5-2.0	.75-1.2	.10-.20
En 355	≤.20	.40-.70	.05	.05	≤.35	1.8-2.2	1.4-1.7	.15-.25
En 39B	.12-.18	≤.50	.05	.05	.10-.35	3.8-4.5	1.0-1.4	.15-.35

Tabla I: Composición de aceros para carburar y carbonitrurar.



#### 4.1. Determinador de punto de rocío, ALNOR<sub>TM</sub>.

En la fig.6 se muestra esquemáticamente el principio de operación del equipo.

Modo de empleo.

La muestra del gas es admitida y comprimida en la cámara de compresión por medio de un pistón hasta que se alcanza un valor determinado de cociente de presiones.

Al oprimir la válvula de operación se interrumpe primariamente la comunicación entre la cámara de compresión y el medidor de cociente de presiones y posteriormente se abre el paso entre la cámara de compresión y la cámara de observación ocurriendo entonces la expansión adiabática.

Esta expansión adiabática es cuantificada con la ayuda de una regla provista por el equipo ALNOR<sub>TM</sub> fig.7.

Al jalar la válvula de operación y abrir la válvula de purga el nivel de aceite en el medidor de cociente de presiones retorna a su posición original. Cerrando nuevamente la válvula de purga, el aparato está en condiciones para iniciar nuevamente el ciclo de compresión-expansión.

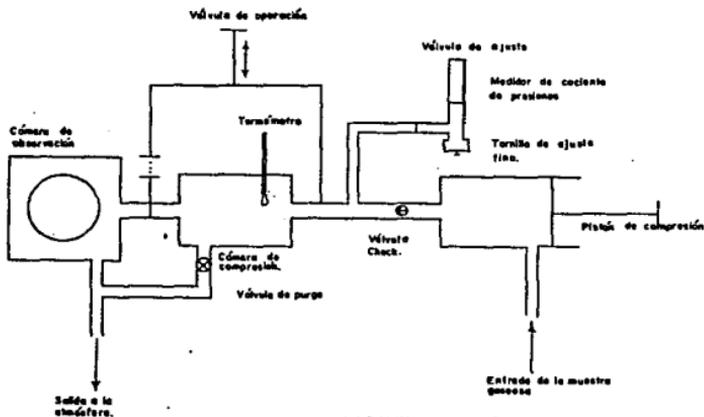


Fig.7 Diagrama esquemático del determinador de punto de rocío.

4.1.1. Descripción para cuantificar el punto de rocío  
utilizando la regla provista por el equipo ALNOR<sup>sm</sup>.

Esta regla consiste de tres círculos con cinco escalas diferentes  
(A, B, C, D, E).

- Escala A: Determina el valor de Q.
- Escala B: Relación de presiones observada.
- Escala C: Relación de presiones equivalente.
- Escala D: Relación de presiones.
- Escala E: Escala de temperatura en °F o °C.

-Cuando el valor de Q es igual a 0.286 :

Coloque la flecha 1 frente a la temperatura inicial  
en °F o °C en la escala E.

Frente al valor observado de relación de presiones sobre la  
escala D lea el punto de rocío en la escala E.

Por ejemplo:

Se trabaja con atmósfera endotérmica entonces:

Q= 0.2855.

T= 70°F. (Escala E).

.55 de relación de presiones (Escala D) y encima de .55 so-  
bre la escala E se lee -12°C éste es el valor del punto de  
rocío que se está cuantificando ya sea en el generador o  
en el horno.

-Cuando el valor de Q es distinto de 0.2855:

Coloque la flecha 1 frente a la temperatura en °F o °C en  
la escala E.

Coloque la flecha 2 frente al valor de Q en la escala A.  
Frente al valor observado de relación de presiones sobre  
la escala B lea sobre la relación de presiones equivalen-  
tes sobre la escala C. Luego con este valor sobre la escala  
D lea el punto de rocío en la escala E.

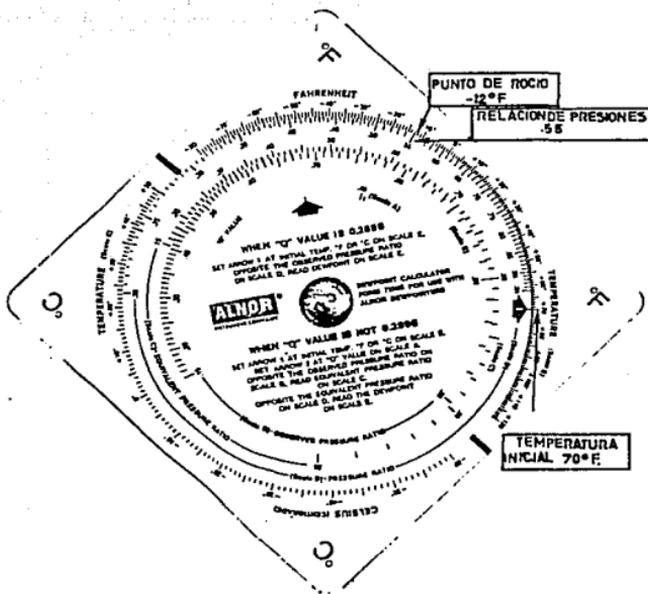


Fig. 8 Regla para determinar el punto de rocío.

#### 4.2. Generador de atmósferas endotérmicas.

El diagrama de flujo de generador endotérmico se muestra en la fig.8 como se indica en éste diagrama el aire y el gas son llevados a través del generador por una válvula mezcladora o carburador la cual posee controles apropiados, ya sea para un control automático o manual de la relación aire-gas. Esta mezcla entonces va a través de una bomba de desplazamiento positivo con una presión reguladora de modo que el lado o lugar de presión se mantenga de 1 a 2 psig. Después de pasar a través del retén de fuego, el gas se introduce en la retorta la cual se llena con catalizador.

El tipo más común de catalizador es un refractario poroso impregnado con óxido de níquel.

La reacción en la retorta se opera a una temperatura de 1200 °F para aleaciones de calderas (35Ni - 15Cr) y hasta de 1200°F para calderas refractarias.

Después de que la reacción se completa el gas se enfría rápidamente pasando a través de una cubierta de agua en lo alto de la retorta; el enfriamiento rápido provoca una acción contraria a la reacción y resulta un gas seco. Las capacidades de generadores comerciales varían de 250 a 4000 CFH.

Se recomienda no arrancar un generador a no menos del 50% de su capacidad.

El volumen de una atmósfera endotérmica que se necesita para la aplicación en una producción dada depende de la naturaleza de la operación (neutral o carburación) en la medida y número de piezas de trabajo que se tratan por unidad de tiempo y el tipo de horno.

##### Control del generador.

En la producción de una atmósfera de base endotérmica, el control de la composición del gas se mantiene por la medición del punto de rocío y del contenido de dióxido de carbono. Esto puede hacerse manualmente en cuyo caso las mediciones son hechas en intervalos o automáticamente, en cuyo caso la medición es continua.

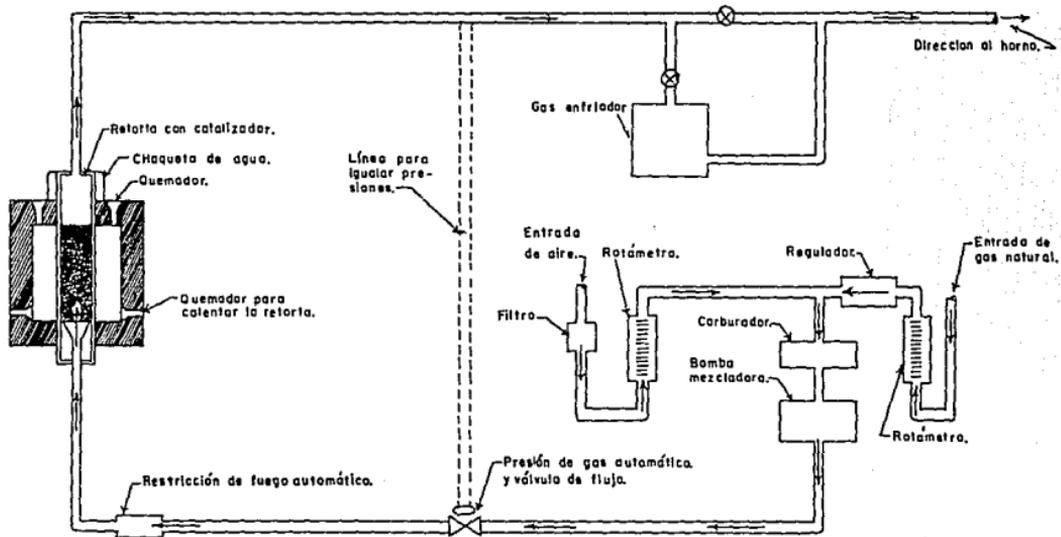


Fig. 9 Diagrama de flujo de un generador de gas endotérmico.

Un control manual se obtiene chequeando el punto de rocío entre el generador y el horno (aproximadamente cada 4 h) para cualquier corrección necesaria de la relación aire-gas se hace manualmente por el ajuste del carburador. personal experimentado puede estimar la cantidad de ajuste necesario para producir un cambio necesario en el punto de rocío, pero estos no pueden compensar cambios inesperados en el punto de rocío que pudieran ocurrir como resultado en el cambio de la relación aire-gas.

Un sistema controlado automáticamente para el punto de rocío el dióxido de carbono es más dependiente que el control manual porque provee constante acción más correctiva, más que periódica, por ejemplo: si hay un cambio en el contenido del calor del gas natural (un factor muy crítico en la operación del generador) el sistema automático tomará acción correctiva de inmediato.

#### 4.3. Hornos de carburación gaseosa.

Estos se clasifican en dos tipos:

- 1) Hornos de carburación continua.
- 2) Hornos de carburación intermitente (Batch).

La diferencia fundamental radica en el tamaño, la capacidad del horno y la manera en que trabajan.

En un horno batch hay que hacer cambios de carga y descarga en intervalos de tiempo determinados por el proceso de ahí el nombre de Batch.

En un horno de carburación continua, no hay necesidad de hacer cambios de carga de ahí el nombre de carburación continua, pero son de capacidad mas pequeña, éste tipo de horno solo admite piezas pequeñas a diferencia del batch que admite piezas pequeñas y grandes además de ser de mayor capacidad.

Aun que la velocidad de producción es mayor en un horno continuo la cantidad de producción es menor que en un horno Batch.

Un horno continuo es el adecuado para obtener capas carburadas desde 0.15 a 0.40 mm (0.005 a 0.015 in).

Las pruebas de este trabajo se realizaron en un horno de carburación intermitente (Batch).

Partes del horno de carburación intermitente.

Canasta para la carga.

Vaestibulo de precalentamiento.

Cámara de carburación.

Pistón elevador de puerta.

Ventilador de recirculación de atmósfera.

Intercambiador de calor.

Agitador.

Tanque de aceite o agua para tample.

(Ver fig. 9).

#### 4.3. Hornos de carburación gaseosa.

Estos se clasifican en dos tipos:

- 1) Hornos de carburación continua.
- 2) Hornos de carburación intermitente (Batch).

La diferencia fundamental radica en el tamaño, la capacidad del horno y la manera en que trabajan.

En un horno batch hay que hacer cambios de carga y descarga en intervalos de tiempo determinados por el proceso de ahí el nombre de Batch.

En un horno de carburación continua, no hay necesidad de hacer cambios de carga de ahí el nombre de carburación continua, pero son de capacidad mas pequeña, éste tipo de horno solo admite piezas pequeñas a diferencia del batch que admite piezas pequeñas y grandes además de ser de mayor capacidad.

Aun que la velocidad de producción es mayor en un horno continuo la cantidad de producción es menor que en un horno Batch.

Un horno continuo es el adecuado para obtener capas carburadas desde 0.15 a 0.40 mm (0.005 a 0.015 in).

Las pruebas de este trabajo se realizaron en un horno de carburación intermitente (Batch).

Partes del horno de carburación intermitente.

Canasta para la carga.

Vaestíbulo de precalentamiento.

Cámara de carburación.

Pistón elevador de puerta.

Ventilador de recirculación de atmósfera.

Intercambiador de calor.

Agitador.

Tanque de aceite o agua para temple.

(Ver fig. 9).

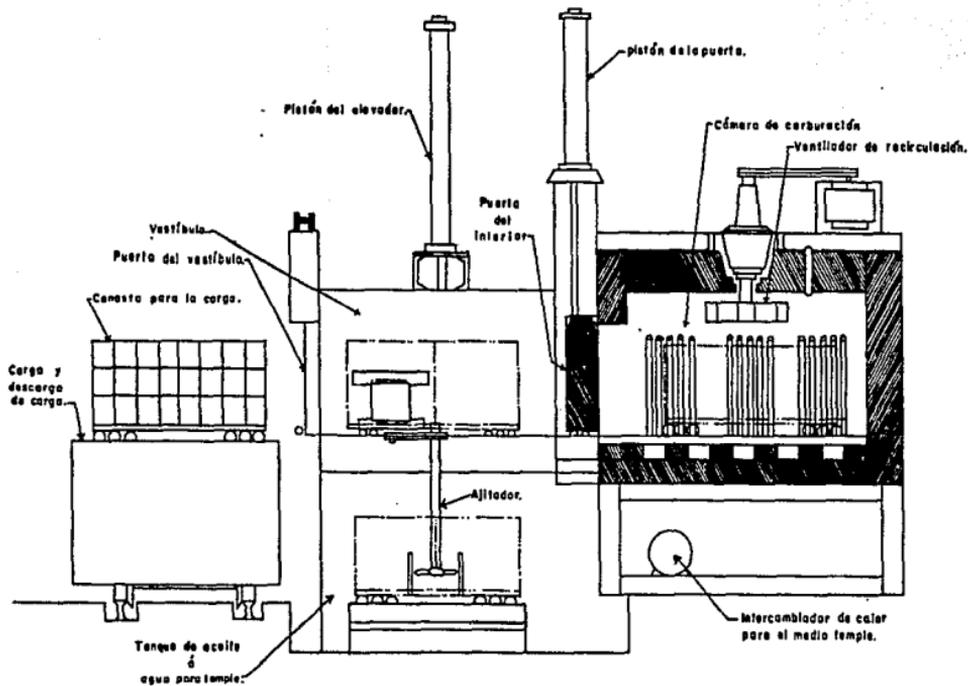


Fig.10 Horno carburación intermitente (Batch) con temple integrado.

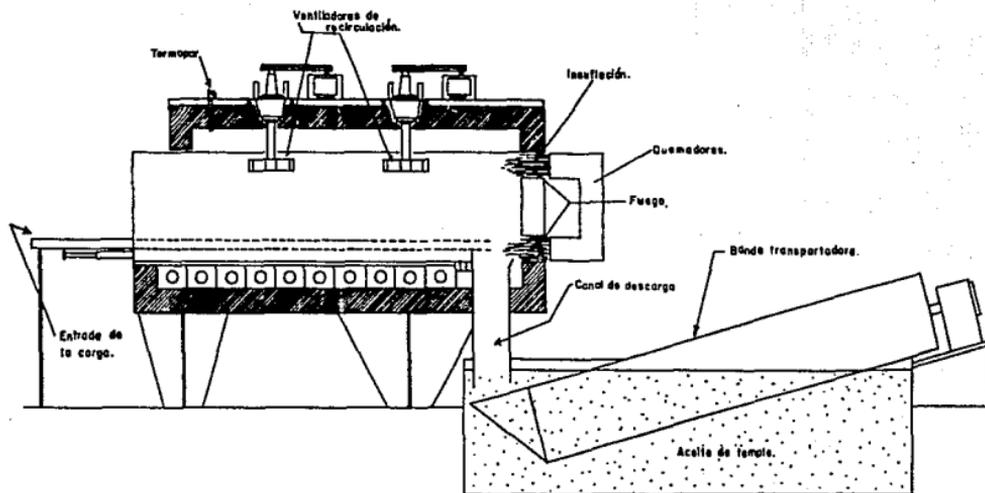


Fig.11 Horno de carburación continua.



### 5.1. Técnica experimental.

Este trabajo se realizó bajo las condiciones normales de operación en la planta de tratamientos térmicos y termoquímicos "Temple Fortuna", durante el proceso de carburación gaseosa.

La composición química del material adecuado para este proceso se da en las tablas I y Ia. Las probetas utilizadas durante el desarrollo experimental fueron de acero grado 8620 por ser este el material que más frecuentemente se recibe en esta planta para el proceso de carburación gaseosa.

Para poder hacer el seguimiento del proceso se parte del análisis de la relación aire-gas (sección 3.1, Fig. 5) del generador de atmósfera endotérmica.

El diagrama de flujo de la operación de este generador, (sección 4.2, fig. 8) la temperatura, relación aire-gas y punto de rocío establecidos por la planta (sección 5.3) Tabla XIII - XV.

El horno utilizado fue del tipo intermitente (Batch, sección 4.3).

Fig. 9 La temperatura, flujo de gas y punto de rocío establecidos por la planta (sección 5.3).

La temperatura en el horno de carburación gaseosa en esta planta es de  $880^{\circ}\text{C}$  ( $1153^{\circ}\text{K}$ ). Temperaturas superiores a ésta no se utilizan aquí porque disminuye la vida media del refractario con el que está cubierto el horno. El presente trabajo se encargó de estudiar los aspectos termodinámicos de la interacción gas-metal en tratamientos termoquímicos de carburación. (sección 3.4, fig. 5, apéndice B).

Para obtener el espesor de capa deseado en esta planta se utiliza la fórmula de Harris:

$$X = 600 * e^{-8287/T} * \sqrt{t}$$

Entonces teóricamente el tiempo para cada profundidad y capa es:

$t_1 = 12 \text{ h.}$	$X = 1.728 \text{ mm} = .068 \text{ in}$
$t_2 = 8 \text{ h.}$	$X = 1.411 \text{ mm} = .055 \text{ in}$
$t_3 = 6 \text{ h.}$	$X = 1.222 \text{ mm} = .048 \text{ in}$

El material que se va a someter al proceso de carburación gaseosa se coloca en canastas de acero inoxidable de 1.2 m. por lado por 0.8 m. de profundidad; el arreglo de las 10 probetas vistas desde arriba dentro las canastas fue el siguiente:

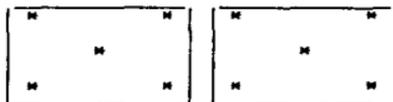


Fig.12 Arreglo de las 10 probetas en el proceso de carburación gaseosa.

La primera prueba de carburación gaseosa fue de 12 h. a una temperatura de 880°C, posteriormente se dejó bajar la temperatura hasta 840°C e inmediatamente ser templado en aceite al sacar la carga de la tina de aceite se lava con desengrasante a presión.

La segunda prueba se hizo con el mismo ciclo pero con 8 h. y la tercera con 6 h.

El punto de rocío fue manualmente controlado en el horno y en los generadores el punto de rocío requerido en el generador es de 35 a 40°F y de 18 a 20°F en el horno (Tablas XIII-XV); estos parámetros trataron de mantenerse a través del ciclo de carburación y hasta el final del proceso.

El medio de carburación es una atmósfera endotérmica a la cual se le agrega gas natural para bajar el punto de rocío hasta el valor requerido.

Es esencial una buena recirculación de gases.

La atmósfera adyacente al material rápidamente se agota de carbón disponible y si hay áreas obstruidas, resultan superficies excesivamente bajas de concentración de carbono y por lo tanto se obtendrá poca profundidad de capa reflejando por consiguiente una baja dureza.

A las 10 probetas de acero grado 8820 de cada ciclo se les tomaron microdurezas para determinar la profundidad de capa efectiva (Fig.12-14).

## 5.2. Seguimiento del proceso.

### -Tratamiento:

Carburación gaseosa.

Tiempo de carburación: 12 h.

Temperatura: 880°C (1153°K).

Templado en aceite: 840°C (1113°K).

### -Datos del horno:

Punto de rocío requerido: 18 a 20 °F.

Flujo de atmósfera endotérmica: 1000 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de gas natural: 250 ft<sup>3</sup>/h.

### -Datos del generador:

Capacidad: 4200 ft<sup>3</sup>/h.

Punto de rocío requerido: 44 a 48°F.

Flujo de aire: 1100 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de gas: 2200 ft<sup>3</sup>/h.

Temperatura de control: 1060°C.

Temperatura de exceso: 1100°C.

-Número de probetas: 10 de acero grado 8520.

Tiempo (horas)	Punto de Rocío °F	
	Generador	Horno
1	58	18
2	55	20
3	52	16
4	52	14
5	50	16
6	50	16
7	48	18
8	48	18
9	44	18
10	44	18
11	44	16
12	44	18

Tabla XIII

-Tratamiento:

Carburación gaseosa.

Tiempo de carburación: 6 h.

Temperatura: 880°C (1153°K).

Templado en aceite: 840°C (1113°K).

-Datos del horno:

Punto de rocío requerido: 18 a 20°F.

Flujo de atmósfera endotérmica: 1000 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de gas natural: 250 ft<sup>3</sup>/h.

-Datos del generador:

Capacidad: 1000 ft<sup>3</sup>/h.

Punto de rocío requerido: 44 a 48°F

Flujo de gas: 120 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de aire: 500 ft<sup>3</sup>/h.

Temperatura de control: 1100°F.

Temperatura de exceso: 1020°F.

-Número de probetas: 10 de acero grado 8620.

Tiempo (horas)	Punto de rocío	
	Generador	Horno
1	43	20
2	42	30
3	44	18
4	42	18
5	43	17
6	45	17

Tabla XV

-Tratamiento:

Carburación gaseosa.

Tiempo de carburación: 8 h.

Temperatura: 980°C (1153°K).

Templado en aceite: 840°C (1113°K).

-Datos del horno:

Punto de rocío requerido: 18 a 20°F.

Flujo de atmósfera endotérmica: 500 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de gas natural: 100 ft<sup>3</sup>/h.

-Datos del generador #1:

Capacidad: 1000 ft<sup>3</sup>/h.

Punto de rocío requerido: 44 a 48°F.

Flujo de gas: 80 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de aire: 500 ft<sup>3</sup>/h.

Temperatura de control: 1100°C.

Temperatura de exceso: 1150°C.

-Datos del generador #2:

Capacidad: 2500 ft<sup>3</sup>/h.

Punto de rocío requerido: 44 a 48°F.

Flujo de gas: 120 ft<sup>3</sup>/h.

Flujo de aire: 500 ft<sup>3</sup>/h.

Temperatura de control: 1080°C.

Temperatura de exceso: 1150°C.

-Número de probetas: 10 de acero grado 8620.

	Punto de Rocío °F		
Tiempo (Horas)	Generador #1	Generador #2	Horno
1	47	40	16
2	50	40	16
3	52	43	16
4	54	44	16
5	54	42	16
6	55	40	16
7	54	38	16
8	55	38	16

Tabla XIV

### 5.3. Discusión de resultados.

Este trabajo está encaminado a un control automático para el proceso de carburación gaseosa siendo los principales resultados:

A) Composición química de la atmosfera endotérmica al salida de la retorta.

Partimos de la estequiometría de la reacción de combustión.



Para determinar la relación aire-gas más adecuada durante el proceso de carburación gaseosa se elaboró un programa de cómputo (Apéndice A) para lograr un control automático.

Ahora comparando los datos calculados y los observados en la planta:

La relación calculada aire-gas (Tabla III) para un punto de rocío es:

Rel A-G	P. Rocío °F	%CO	%CO <sub>2</sub>
2.49	29.29	19.92	.21
2.50	31.59	19.66	.23
2.51	33.75	19.62	.25
2.52	33.75	19.76	.27
2.53	37.62	19.71	.29
2.54	39.38	19.66	.31
2.55	41.05	19.61	.32

La tabla reportada\*, Tabla II:

Clase	Rel A-G	P. Rocío °F	%CO	%CO <sub>2</sub>
301	2.6	19.94 a 50.0	19.6	.40
302	2.5	24.80 a -4.0	20.7	-

En la planta la relación aire-gas varía desde 2.1, 4.16 y 6.25 alcanzando valores de 30 hasta 50°F.

Las variaciones en la relación aire-gas se deben principalmente al desajuste en el medidor de flujo de gas y en el de flujo de aire, aunque también puede ser por desajuste en la temperatura o en cualquier otra parte del generador, ya sean causas mecánicas o eléctricas.

- B) Cálculo de la composición química de la atmósfera endotérmica en el horno de tratamiento en base a la medición de punto de rocío, cubriéndose este objetivo con el programa de cómputo del Apéndice B.
- C) Los aspectos termodinámicos de la interacción gas-metal en los tratamientos térmicos y la inyección de gas natural a la atmósfera endotérmica se cubren con el programa de cómputo del Apéndice C, tomándose como material acero grado 1045 para los datos calculados y acero grado 8620 para los datos experimentales.
- Para comparar los resultados experimentales con los calculados, se evaluaron las probetas de acero grado 8620 que se sometieron a los diferentes ciclos de carburación descritos en las secciones 5.1 y 5.2, obteniéndose los siguientes resultados:

Tiempo (horas)	Profundidad de capa		%Error
	Calculada	Experimental	
12	.068 in	.076 in	12
8	.055 in	.065 in	18
6	.048 in	.049 in	2

De acuerdo a estos resultados en los tres ciclos encontramos un exceso de capa.

Las figuras 12-14 relacionan dureza vs profundidad de capa para las probetas de acero grado 8620.

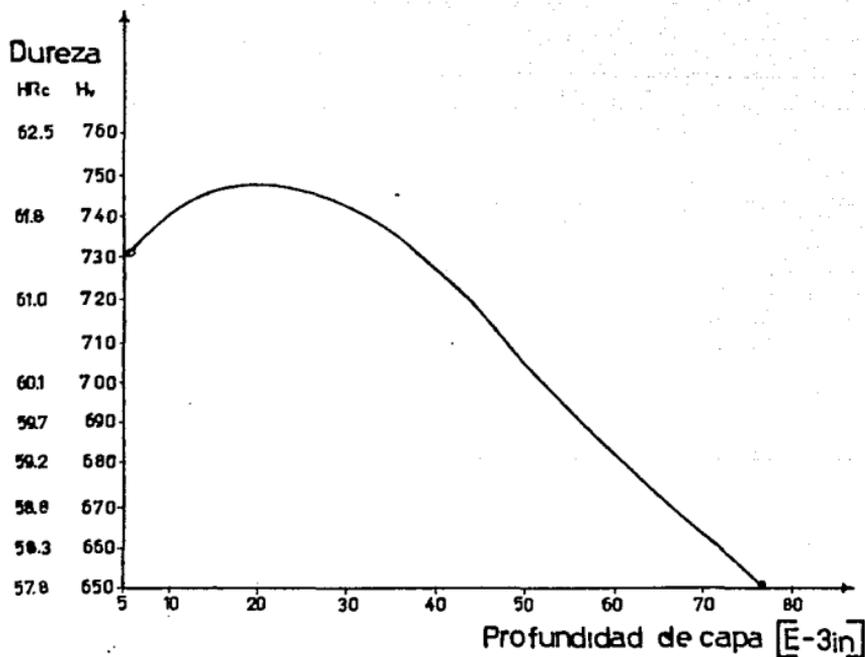


Fig.12 Profundidad de capa después de 12 horas con  $T = 880^{\circ}\text{C}$  en probetas de acero grado 8020, 1 in  $\phi$  x 2.75 in long.

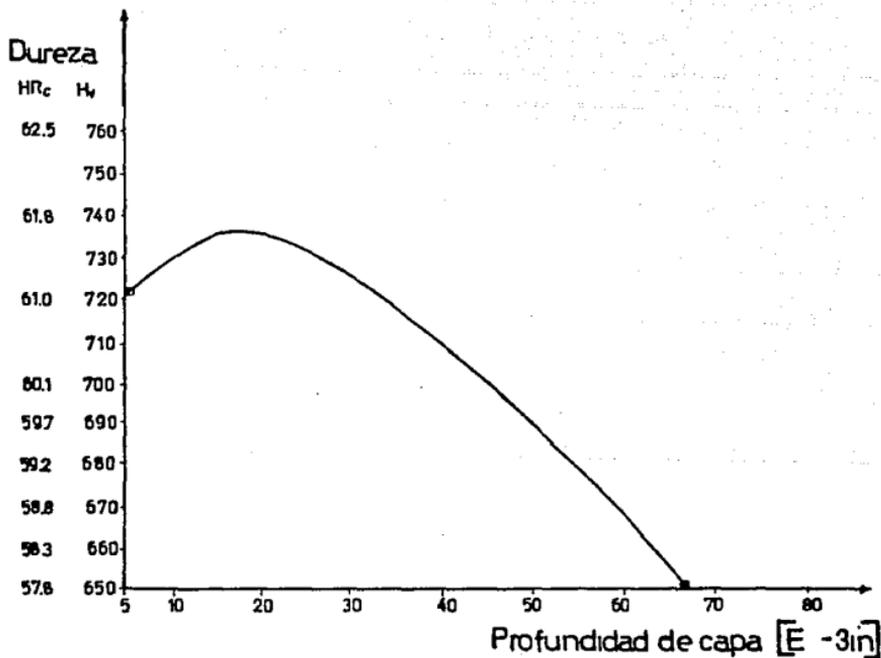


Fig.13 Profundidad de capa después de 8 horas con T<sup>o</sup> 860°C en probetas de acero grado 8620, 1 in  $\phi$  x 2.75 in long.

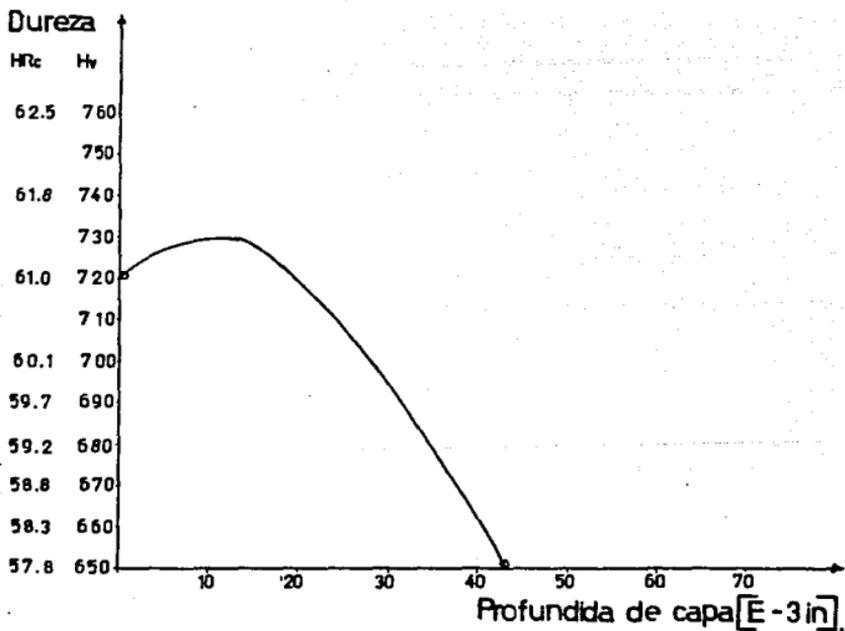


Fig.14 Profundidad de capa después de 6 horas con  $T=880^{\circ}\text{C}$  en probetas de acero grado 8620, 1 in  $\phi$  x 2.75 in long.

Estas probetas fueron carburadas durante 12,8 y 6 horas en diferentes ciclos de carburación a 880°C (1153°K) y logrando una dureza superficial de 60-61 Rc.

Se les midió microdureza a las probetas cada .003 in para determinar el espesor de la capa carburada. Se obtuvieron durezas hasta de 730-750 Hv (61-62 Rc) a una profundidad de 300 micras (.0118 in) debajo de la superficie, indicando la presencia de austenita retenida, esto fue más notorio para el ciclo de 12 horas.

La cantidad de austenita retenida en cantidades menores de un 15% en la capa endurecida no es nociva para la pérdida de resistencia por esfuerzos continuos, cuando la austenita está finamente dispersada.

La razón por la cual cantidades pequeñas de austenita retenida no son aparentemente perjudiciales es debido a que su presencia permite el apareamiento de superficies conformándolas para distribuir el esfuerzo.

Un contenido alto de austenita retenida entre 25 y 30% es conveniente para resistir la corrosión.

La cantidad de austenita retenida depende del contenido de carbono disuelto, y debido a que afecta a la dureza de la pieza templada es importante controlarla, de modo que se debe contar anticipadamente con la dureza superficial deseada (Fig. 6).

Confrontación de los calculos con los resultados de planta.

Para el caso del acero 8620, la dureza superficial obtenida en la planta es de 700-720 Hv, (60.1, 61.0 Rc).

Con este dato de la gráfica para el acero grado En 351 en la Fig. 6 (composición química equivalente); con un %C en la superficie de 0.58.

Utilizando este valor y el dato de composición nominal %Mn = .8 a partir de la ecuación 50 se obtiene:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = 12.45$$

Empleando el programa de cómputo para el cálculo de punto de rocío (Apéndice C) se obtiene:

$$\text{Punto de rocío} = 32.6^\circ\text{F}$$

Comparando este valor con el promedio de las mediciones efectuadas en la planta (44.3°F), se concluye que existe una discrepancia del 25%.

#### 5.4. CONCLUSIONES

En base al presente trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se derivaron las ecuaciones y se elaboró el programa de cómputo requerido para controlar la operación de un generador de atmósferas endotérmicas.
2. Se desarrolló el programa de cómputo para determinar la composición química de la atmósfera en base a la medición de su punto de rocío.
3. Se estableció la metodología para calcular la composición química de la atmósfera endotérmica requerida para obtener una concentración de carbono deseado en la capa carburada, tomando en cuenta el efecto de los dos principales elementos aleantes del acero en particular a carburar.
4. La validación del desarrollo teórico se efectuó en base a un acero grado 8620 para el cual se obtuvo un error del 25% en el cálculo del punto de rocío requerido para la carburación obtenida en la planta.



```

3 CLS
5 LOCATE 1,27 : PRINT"RELACION AIRE-GAS"
10 INPUT"ft^3 de aire por ft^3 de gas inyectado":F
20 INPUT"Temperatura da la retorta (grado C)":T
30 T=T+273.15
40 K=EXP(-4026.2/T+3.53)
50 A=1-K
60 B=2-.42*F+.42*F*K+K
70 C=(2-.84*F)*K
80 N(3)=(-B+(B^2-4*A*C)^.5)/(2*A)
90 N(1)=.42*F-1-N(3)
100 N(2)=2-.42*F+N(3)
110 N(4)=2-N(3)
120 N(5)=.79*F
130 N(6)=N(1)+N(2)+N(3)+N(4)+N(5)
140 P(1)=N(1)/N(6)
150 P(2)=N(2)/N(6)
160 P(3)=N(3)/N(6)
170 P(4)=N(4)/N(6)
180 P(5)=N(5)/N(6)
190 PRINT P(1)*100;"%CO2"
200 PRINT P(2)*100;"%CO"
210 PRINT P(3)*100;"%H2O"
220 PRINT P(4)*100;"%H2"
230 PRINT P(5)*100;"%N2"
240 R=1/(2.6799*10^-3-2.023*10^-4*LOG(F(3)))
250 R=R-273.15
260 R=1.8*R+32
270 PRINT"PUNTO DE ROCIO=";R;"grado F"
280 END

```



```

5 CLS
10 DIM N(6),P(5)
15 LOCATE 1,18 : PRINT"Composicion Quimica de la Atmosfera Endotermica"
20 INPUT"Temperatura (grado C)";T
30 T=T+273
40 INPUT"Punto de Rocío (grado F)";R
42 R=5*(R-32)/9+273
45 P=EXP(13.0867-(4883.329/R))
50 K=EXP((-4026.2/T)+3.5326)
60 A=((-.53163/P)+1)*(1-K)
70 B=3.5949-(1.06326*K/P)-.5949*K
80 C=5.1898*K
90 N(1)=(-B-(B^2-4*A*C)^.5)/(2*A)
100 N(2)=2-N(1)
110 N(3)=[(-2+3.762*P)*N(1)+13.524*P]/(3.762*P)
120 N(4)=[(-2-3.762*P)*N(1)-9.762*P]/(3.762*P)
130 X=(N(1)-3*P)/(3.762*P)
140 N(5)=3.762*X
150 N(6)=N(1)+N(2)+N(3)+N(4)+N(5)
160 P(1)=100*N(1)/N(6)
170 P(2)=100*N(2)/N(6)
180 P(3)=100*N(3)/N(6)
190 P(4)=100*N(4)/N(6)
200 P(5)=100*N(5)/N(6)
210 LOCATE 6,35 : PRINT P(1);"%H2O"
220 LOCATE 7,35 : PRINT P(2);"%H2"
230 LOCATE 8,35 : PRINT P(3);"%CO"
240 LOCATE 9,35 : PRINT P(4);"%CO2"
250 LOCATE 10,35 : PRINT P(5);"%N2"
260 END

```



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

```
5 CLS
7 LOCATE 1,30 : PRINT"PUNTO DE ROCIO"
10 INPUT"XC=";C
20 INPUT"TEMPERATURA DEL HORNO=";T
25 W=10^(-6618/T+6.8748+181*C/T-16.35/T+.43+2944*LOG(C))
30 K=EXP(-4025.76/T+3.5326)
40 Y(1)=0
50 Y(2)=-.013
60 I=1
70 GOSUB 190
80 I=2
90 GOSUB 190
100 Y(3)=(Y(1)+Y(2))/2
105 PRINT Y(3)
106 IF Y(3)=0 THEN GOTO 260
110 I=3
120 GOSUB 190
130 IF ABS(Z(3))<.00001 THEN GOTO 250
140 IF Z(2)*Z(3)<0 THEN GOTO 170
150 Y(2)=Y(3)
160 GOTO 100
170 Y(1)=Y(3)
180 GOTO 100
190 A=1
200 B=(2+3*W)*Y(I)-.039*W+.356
210 C=Y(I)^2+(.356+W)*Y(I)+.031684-.013*W
220 X=(-B+(B^2-4*A*C)^.5)/(2*A)
230 Z(I)=(.022-X+Y(I))*(.178+X+Y(I))-K*(.361+3*X-Y(I))*(.013-Y(I))
240 RETURN
250 Y=Y(3)
260 N(1)=-.022-X+Y
270 N(2)=-.178+X+Y
280 N(3)=-.361+3*X-Y
290 N(4)=-.013-Y
300 N(5)=-.426
310 N(6)=N(1)+N(2)+N(3)+N(4)+N(5)
315 PRINT
320 P(1)=(N(1)/N(6))*100
325 PRINT"PH20=";P(1)
330 P(2)=(N(2)/N(6))*100
335 PRINT"Pcc=";P(2)
340 P(3)=(N(3)/N(6))*100
345 PRINT"PH2=";P(3)
350 P(4)=(N(4)/N(6))*100
355 PRINT"Pco2=";P(4)
360 P(5)=(N(5)/N(6))*100
365 PRINT"PN2=";P(5)
370 R=4883.32938/(13.0867738-LOG(N(1)/N(6)))
380 R=R-273.15
390 R=(9/5)*R+32
400 PRINT "PUNTO DE ROCIO="; R "grados Fharenheit"
410 END
```



T = 800°C = 1073°K

%C	P. Rocio °F	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	P <sub>CO</sub>	P <sub>H<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>
.10	138.55	20.05	9.99	3.98	1.95	54.00
.15	129.99	15.79	11.85	11.64	1.79	58.69
.20	119.66	12.40	13.33	17.74	1.67	54.83
.25	109.84	9.56	14.58	22.86	1.56	51.42
.305	97.98	6.86	15.75	27.70	1.47	48.19
.40	69.63	2.95	17.46	34.73	1.32	43.51
.45	57.48	2.00	17.97	36.50	1.22	42.28
.505	54.17	1.79	18.23	36.96	1.10	41.90
.55	51.57	1.64	18.41	37.30	1.01	41.26
.605	48.74	1.49	18.59	37.63	.91	41.34
.70	42.23	1.28	18.86	38.12	.78	40.94
.75	41.89	1.18	18.93	38.34	.73	40.76
.80	39.84	1.09	19.08	38.52	.67	40.60
.85	37.83	1.02	19.18	38.69	.63	40.46
.905	35.71	.94	19.27	38.86	.58	40.32
.95	33.99	.89	19.34	38.98	.55	40.22

Tabla VI

$$T = 820^{\circ}\text{C} = 1093^{\circ}\text{K}$$

%C	P. Rocio °F	P <sub>N<sub>2</sub></sub> %	P <sub>CO</sub>	P <sub>H<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>
.10	133.08	17.51	11.10	8.56	1.86	60.95
.15	121.26	12.94	13.10	16.76	1.69	55.48
.20	109.06	9.36	14.66	23.21	1.56	51.18
.25	93.33	6.38	15.96	28.57	1.46	47.61
.30	78.02	3.83	17.08	33.15	1.35	44.56
.35	60.01	2.17	17.87	36.17	1.25	42.51
.40	56.33	1.92	18.16	36.72	1.11	42.06
.45	52.98	1.72	18.41	37.17	.99	41.69
.50	49.91	1.55	18.60	37.54	.89	41.38
.55	47.07	1.41	18.77	37.86	.81	41.12
.60	44.41	1.28	18.92	38.13	.74	40.90
.65	41.80	1.17	19.05	38.38	.68	40.70
.70	39.62	1.09	19.15	38.57	.62	40.54
.75	37.40	1.00	19.25	38.66	.58	40.38
.80	35.24	.93	19.34	38.62	.54	40.25
.90	31.37	.81	19.48	39.19	.46	40.03
.95	29.23	.75	19.55	39.33	.43	39.92

Tabla VII

$$T = 840^{\circ}\text{C} = 1113^{\circ}\text{K}$$

%C	P. Rocio °F	P <sub>H<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO</sub>	P <sub>H<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO</sub>	P <sub>H<sub>2</sub></sub>
.10	126.64	14.88	12.25	13.29	1.76	57.80
.15	111.65	10.04	14.37	21.90	1.58	52.00
.21	90.95	5.63	16.29	29.93	1.42	46.75
.25	72.31	3.21	17.35	34.26	1.33	43.82
.30	59.96	2.17	17.98	36.24	1.17	42.42
.35	55.76	1.89	18.30	36.85	1.02	41.92
.41	51.27	1.62	18.59	37.43	.88	41.45
.45	48.58	1.48	18.76	37.74	.80	41.20
.50	45.40	1.33	19.93	38.08	.72	40.93
.55	42.54	1.20	19.07	38.35	.68	40.70
.60	39.94	1.10	19.19	38.58	.59	40.51
.651	37.40	1.00	19.30	38.78	.54	40.35
.72	34.25	.90	19.42	39.02	.48	40.15
.7505	32.93	.85	19.47	39.11	.46	40.08
.801	30.70	.79	19.54	39.26	.43	39.96
.90	26.88	.68	19.66	39.48	.37	39.78
.95	25.02	.64	19.71	39.58	.34	39.69

Tabla VIII

T = 850°C = 1133°K

%C	P. Rocio °F	P <sub>H<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO</sub>	P <sub>H<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>
.10	118.91	12.17	13.43	18.15	1.66	54.56
.15	99.08	7.10	15.65	27.28	1.47	48.47
.20	72.43	3.43	17.34	34.24	1.33	43.83
.25	60.77	2.23	18.01	36.17	1.13	42.44
.30	55.66	1.88	18.38	36.91	.96	41.84
.35	51.60	1.64	18.65	37.43	.83	41.42
.40	47.76	1.44	18.87	37.86	.73	41.07
.45	44.31	1.28	19.04	38.21	.65	40.79
.50	41.10	1.14	19.19	38.50	.58	40.56
.55	38.27	1.04	19.31	38.74	.52	40.36
.60	35.02	.92	19.43	38.99	.47	40.17
.65	32.62	.84	19.52	39.15	.43	40.03
.70	30.82	.79	19.58	39.27	.40	39.94
.75	28.65	.73	19.65	39.40	.37	39.83
.80	26.60	.68	19.70	39.52	.34	39.74
.85	24.51	.62	19.76	39.63	.32	39.65
.90	22.65	.58	19.81	39.72	.29	39.57
.95	20.97	.55	19.85	39.80	.27	39.51

Tabla IX

$$T = 880^{\circ}\text{C} = 1153^{\circ}\text{K}$$

%C	P. Rocio °F	P <sub>H<sub>2</sub></sub> <sup>o</sup>	P <sub>CO</sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>
.10	109.35	9.43	14.63	23.09	1.56	51.27
.15	76.68	3.68	17.15	33.43	1.35	44.37
.22	60.08	2.18	18.15	36.32	1.04	42.28
.25	56.70	1.95	18.39	36.81	.93	41.89
.30	51.73	1.65	18.71	37.45	.79	41.38
.35	47.31	1.42	18.95	37.94	.68	40.99
.401	43.48	1.24	19.14	38.32	.59	40.68
.455	39.72	1.09	19.30	38.65	.52	40.42
.50	36.88	.99	19.40	38.87	.47	40.24
.55	34.22	.90	19.50	39.07	.42	40.08
.60	31.44	.81	19.59	39.25	.39	39.94
.65	20.02	.74	19.67	39.40	.35	39.82
.70	26.59	.68	19.73	39.53	.32	39.71
.75	24.36	.62	19.79	39.65	.30	39.62
.80	22.39	.58	19.84	39.75	.27	39.54
.85	20.66	.54	19.88	39.83	.25	39.48
.90	18.56	.50	19.92	39.92	.24	39.41
.95	16.70	.46	19.96	39.99	.22	39.55

Tabla X

T = 900°C = 1173°K

%C	P. Rocio °F	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	P <sub>CO</sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub>	P <sub>N<sub>2</sub></sub>
.10	96.87	6.67	15.84	28.05	1.46	47.96
.152	65.78	2.62	17.78	35.46	1.19	42.96
.20	58.61	2.08	18.33	36.57	.84	42.05
.251	52.65	1.70	18.37	37.38	.77	41.40
.30	47.68	1.44	18.98	37.93	.65	40.97
.35	43.24	1.23	19.19	38.37	.56	40.63
.40	39.52	1.08	19.35	38.69	.49	40.37
.4502	36.02	.96	19.47	38.96	.43	40.16
.50	32.85	.85	19.58	39.18	.38	39.99
.55	30.09	.77	19.76	39.35	.34	39.85
.60	27.46	.70	19.74	39.50	.31	39.73
.65	24.92	.63	19.80	39.64	.28	39.62
.70	22.51	.58	19.85	39.75	.26	39.53
.75	20.48	.54	19.90	39.84	.24	39.46
.81	17.97	.49	19.95	39.95	.22	39.38

Tabla XI

## Bibliografía

1. - R.W. Gurry. "Composition of Atmospheres Inert to Heated Carbon Steel". Transactions AIME, vol. 188, April 1950, Journal of Metals pp.671-687.
2. - T. Wada, H. Wada J.F. Elliott and J. Chipman, "Thermodynamic Aspects of gas-metal heat treating Reactions". Met. Trans. 1971, vol. 2, pp. 1507-1513.
3. - C. Dawes and D.F. Tranter. "Application of Gas Carburizing Theory to Practice", Metals Technology, vol. 1, September 1974, pp.397-403.
4. - C. Dawes and D.F. Tranter, "Production Gas Carburizing Control", Heat Treatment of metals, vol. 4, September 1974, pp.121-130.
5. - Source Book on Heat treating, vol. II. "Production and Engineering Practices American Society for metals", 1977.
6. - Carburizing and Carburizing.  
Prepared for the direction of the ASM committee on gas carburizing, 1977.
7. - Gassner R.H. "Decarburization and its evaluation by the Chord Method Metal Progress", March 1978, pp.55-62. Ed. ASM, U.S.A..
8. - American Society For Metals, "Metals Handbook", Vol. 4, Ninth edition, Heat Treating. Ed. ASM, U.S.A., 1961.
9. - Apraiz B. José. "Tratamientos térmicos de los aceros". Editorial Dossat, S.A., Octava Edición. España 1935.
10. - Sydney H. Avner, "Introducción a la metalurgia física", Editorial McGraw-Hill, México, 1933, segunda edición.
11. -D. R. Gaskell, "Introduction to Metallurgical Thermodynamics", Editorial McGrawHill, 1963.
12. -G. S. Upadhyaya, R.K. Dube. "Problemas de Termodinámica y Cinética en Metalurgia", Editorial Geminis S.R.L., 1979.