

2j. 8



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**EVALUACION DEL SISTEMA DE CONTROL
DE LA ATMOSFERA EN UN PROCESO DE
CARBURIZACION EMPLEANDO DOS METO-
DOS PARA DETERMINAR EL POTENCIAL
DE CARBONO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

P R E S E N T A :

JOSE FELIPE GOMEZ PICHARDO

**TESIS CON
FALLA DE CREDITO**

MEXICO, D. F.

1989



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.

I N D I C E

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| CAPITULO 1 | |
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO 2 | |
| ANTECEDENTES | |
| A) CARBURIZACION | 3 |
| Aa) Carburización con materias sólidas | 4 |
| Ab) Carburización líquida | 6 |
| Ac) Carburización gaseosa | 7 |
| Ac ₁) Efecto de la temperatura | 8 |
| Ac ₂) Efecto del tiempo. | 10 |
| Ac ₃) Composición de la atmósfera | 11 |
| Ad) Difusión del carbono | 14 |
| B) CLASIFICACION DE ATMOSFERAS | 19 |
| C) ATMOSFERA ENDOTERMICA | 24 |
| Ca) Efecto químico de los constituyentes atmosféricos. | 25 |
| Cb) Gases combustibles | 32 |
| Cc) Catalizadores | 36 |
| D) SISTEMAS DE CONTROL DE ATMOSFERAS | 38 |

| | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Da) Análisis por absorción de gas | 39 |
| Da ₁) Analizador Orsat | 40 |
| Da ₂) Análisis basado en el cambio de conductividad de las soluciones. | 40 |
| Db) Análisis basado en la medición de la conductividad térmica | 41 |
| Dc) Análisis basado en la medición del calor generado por reacciones específicas | 41 |
| Dd) Análisis basado en mediciones colo- rimétricas | 43 |
| De) Analizadores de oxígeno | 43 |
| Df) Cromatografía de gases | 44 |
| Dg) Analizadores colorimétricos | 44 |
| Dh) Celdas galvánicas como analizadores de gas | 45 |
| Dh ₁) Probeta de oxígeno | 45 |
| Di) Análisis y control de potencial de carbono | 49 |
| Di ₁) Medición directa del potencial de carbono | 50 |
| Di ₂) Medición indirecta del potencial de carbono | 51 |
| Di _{2.1}) Analizador de punto de rocío. | 51 |
| Di _{2.2}) Analizador infrarojo. | 55 |

| | |
|--------------------------------------------------|----|
| Dj) Sistemas de control computarizados | 57 |
|--------------------------------------------------|----|

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

| | |
|---------------------------------|----|
| A) DISEÑO EXPERIMENTAL. | 68 |
| B) MATERIAL Y METODOS | 76 |

CAPITULO 4

| | |
|---------------------------------|----|
| RESULTADOS Y DISCUSION. | 84 |
|---------------------------------|----|

CAPITULO 5

| | |
|-----------------------|-----|
| CONCLUSIONES. | 114 |
|-----------------------|-----|

| | |
|---------------------------|-----|
| RECOMENDACIONES | 116 |
|---------------------------|-----|

| | |
|------------------------|-----|
| BIBLIOGRAFIA | 118 |
|------------------------|-----|

C A P I T U L O 1

INTRODUCCION

Los tratamientos termoquímicos tienen por objeto mejorar las propiedades superficiales y características de los aceros, como por ejemplo el proceso de carburizado en el cual el tiempo, la temperatura y la composición de la atmósfera son las variables a controlarse, de acuerdo con la composición del acero, forma y tamaño de las piezas.

La instrumentación empleada en los hornos ha sido diseñada para proporcionar información y control sobre el desarrollo de los procesos térmicos y así, poder cumplir con los requerimientos de las piezas que cada día son mas estrictos, impuestos estos por las normas de control de calidad. Esto ha generado la investigación en la determinación del control de las atmósferas en los procesos de carburizado logrando grandes avances en este campo con la introducción de sistemas computarizados en la determinación del potencial de carbono en la atmósfera del horno.

En la actualidad pocas industrias en México que se dedican a los tratamientos térmicos y termoquímicos han implantado el sistema de control computarizado para atmósferas, por su alto costo. Sin embargo este es un sistema económico por

el decremento en los rechazos de las piezas y el ahorro en energía y combustibles. Mediante una producción controlada y adecuada dentro de las normas de calidad, estos productos pueden enfrentar nuevos mercados en la industria de bienes de capital.

Este trabajo tiene por objeto demostrar la eficiencia del control de la composición de una atmósfera en un proceso de carburizado en un acero de bajo carbono; con un sistema computarizado provisto de un analizador de infra-rojo y una probeta de oxígeno para la determinación del potencial de carbono en la atmósfera del horno; y con un sistema convencional para la determinación de puntos de rocío en la cámara del horno. Determinando posteriormente la profundidad de capa total y efectiva de carbono y además el porcentaje de carbono en la superficie de las piezas.

C A P I T U L O 2

ANTECEDENTES

A) CARBURIZACION

Los procedimientos más usados en la actualidad para conseguir las características de dureza y tenacidad, en la mayor parte de las superficies de algunas piezas que componen las máquinas y motores son los siguientes: la carburización, la carbonitruración, la nitruración, la nitrocarburización, la sulfínación, el temple localizado, depósitos por soldadura de capas delgadas superficiales, etc.

La carburización consiste en aumentar el contenido de carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego se temple las piezas, obteniéndose una gran dureza superficial.

Se pueden emplear carburantes sólidos, líquidos y gaseos oscilando la duración de la carburización de 6 a 10 horas cuando se utilizan carburantes sólidos, de 1 a 6 horas cuando se trata de sales o carburantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando carburantes gaseosos. La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850° y 1000°C, siendo las temperaturas próximas a 900°C las

mas utilizadas (1).

La cantidad y distribución de carbono difundido por las piezas depende de: 1.^o la composición del acero sometido a la carburización, 2.^o la naturaleza de la substancia carburante, y 3.^o la temperatura además de la duración del proceso (Fig. 1).

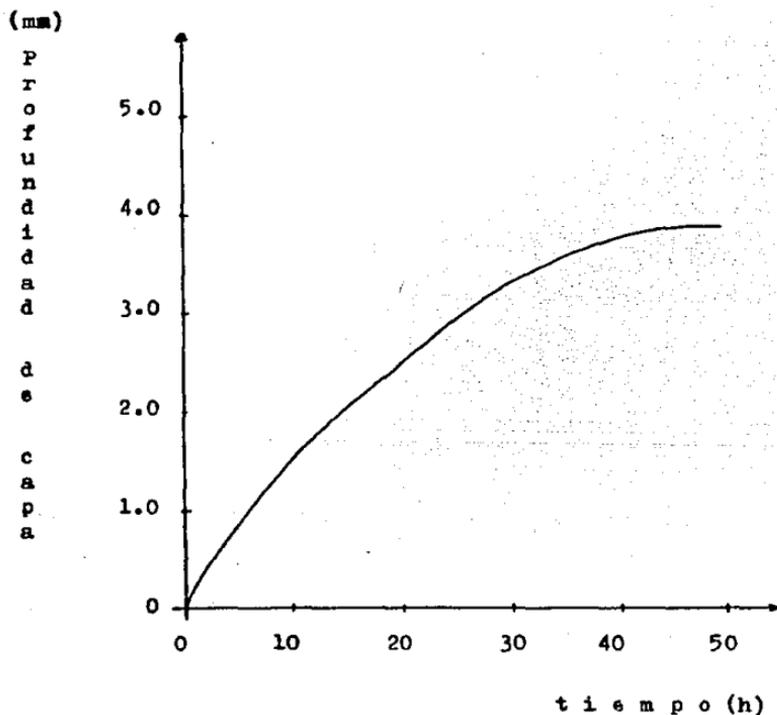
Aa) Carburización con materias sólidas

Durante la carburización se utilizan diversas materias para suministrar el carbono que ha de difundir en el acero. Las mas empleadas suelen ser el carbón vegetal, el negro -- animal, huesos calcinados, cuero, coque, etc., mezclados con carbonatos de bario, calcio y sodio. Estas mezclas alcanzan concentraciones de carbono hasta 1.20%.

Las principales ventajas de este método son que no se requiere una atmósfera preparada, es eficiente y económico -- para el procesamiento individual de pequeñas cantidades de -- piezas. Las desventajas son que no es muy adecuado para producir partes delgadas superficiales carburizadas que deben -- controlarse a tolerancias reducidas; elevado consumo de combustible; no suministra un grado de control preciso sobre el contenido de carbono en la superficie de las piezas; se requiere un mayor tiempo que en los procesos de carburización por líquidos o gases (?).

FIGURA 1

Efecto del tiempo sobre la profundidad de ca
pa de carbono cuando se realiza a 925°C (3).



Ab) Carburización líquida

Es un método de endurecimiento superficial que consiste en colocar la pieza en un baño de sales de cianuro, de modo que el carbono se difundirá desde el baño hacia dentro del metal por la que se producirá una parte superficial, comparable a la resultante por empuje o por gas.

La carburización líquida puede distinguirse de la cianuración por el carácter y composición de la superficie producida. Las superficies endurecidas con cianuro son más altas en nitrógeno y más bajas en carbono; lo inverso es cierto para las superficies endurecidas por carburización líquida.

Las superficies endurecidas con cianuro pocas veces tienen una profundidad mayor de 250 μm (0.25 mm); los baños de carburización líquida permite endurecidos superficiales tan profundos como 6400 μm (6.4 mm).

En general, la carburización líquida se adapta mejor a piezas de pequeño y mediano tamaño, ya que las piezas grandes son difíciles de procesar en baños de sal. Las ventajas de la carburización líquida son: a) eliminación de oxidación y problemas de hollín, b) profundidad de la superficie dura y contenido de carbono uniformes, c) gran rapidez de penetración, y d) el hecho de que el baño proporcione alta conductividad térmica, reduciendo de ese modo el tiempo requerido pa

ra que el acero alcance la temperatura de carburización. Las desventajas son: a) las piezas deben lavarse totalmente después del tratamiento para prevenir corrosión; b) es necesaria una revisión y ajustes regulares de la composición del baño, a fin de obtener profundidades uniformes de las superficies endurecidas; c) algunas formas no pueden manejarse porque llevan consigo cantidades excesivas de sal, y d) las sales de cianuro son venenosas y requieren de una seguridad muy rigurosa, por otro lado se requiere de lugares bien ventilados.

Ac) Carburización gaseosa

La carburización por gas puede ser por lotes o continua por lo que es mas adecuada para producir en gran escala tratamientos térmicos. El acero se calienta en contacto con monóxido de carbono y/o un hidrocarburo, que fácilmente se de compone a la temperatura de carburización. El hidrocarburo puede ser metano, propano, gas natural o hidrocarburo fluido vaporizado. La práctica comercial es utilizar gas transporta dor, como el obtenido con un generador endotérmico y enrique cerle con uno de los gases de hidrocarburo.

La carburización por gas permite un manejo mas rápido por templado directo, menor costo, alrededores mas limpios,

mas estricto control de calidad, y mayor flexibilidad de operación en comparación con la carburización por material sólido. En este proceso, manteniendo las piezas de 1 a 8 horas - en una atmósfera carburante, a temperatura de 850° a 950°C , se obtienen capas carburadas de 0.2 a 1.5 mm de profundidad. Únicamente en casos especiales, como la fabricación de blindajes se emplean procesos mas largos y se obtienen capas carburadas de mayor espesor.

Las diferentes etapas en un proceso de carburización gaseosa son (4):

- (i) Cambios químicos ocurridos en la fase gaseosa
- (ii) Período de difusión del gas
- (iii) Reacciones en la superficie del acero
- (iv) Difusión en el acero

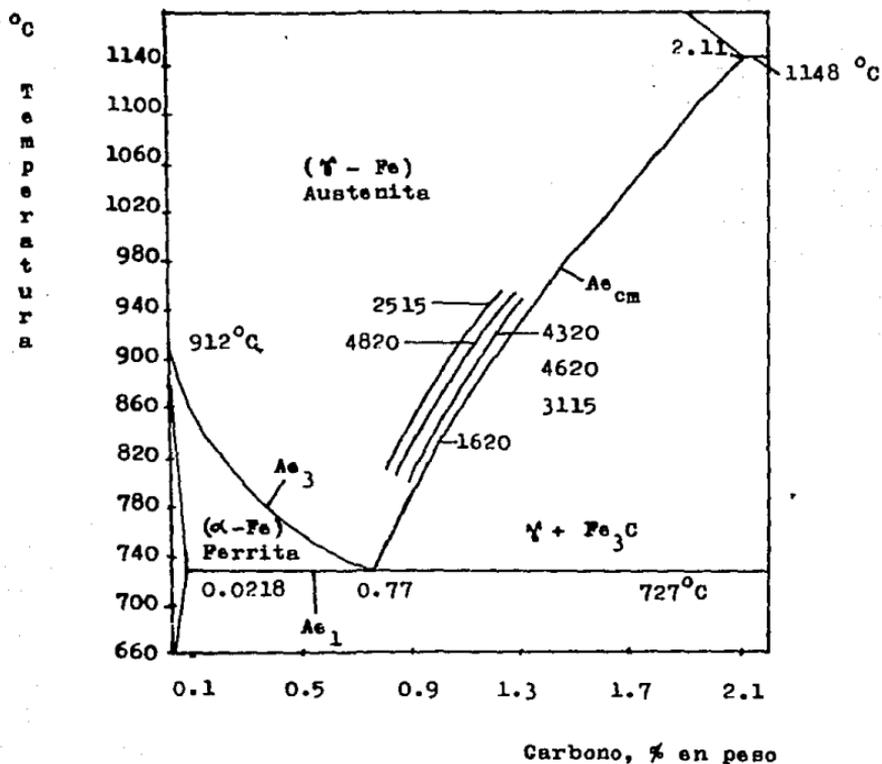
El proceso de carburizado gaseoso depende del control de tres principales variables: temperatura, tiempo y composición de la atmósfera (5).

Ac₁) Efecto de la temperatura

La máxima cantidad de carbono que puede ser añadida al acero esta limitada por el grado de difusión del carbono en la fase austenita. Este difusión aumenta con la temperatura y se muestra con la línea Acm en la Figura 2. La adición de

FIGURA 2

Diagrama Fe-Fe₃C. Límites aproximados de la solubilidad del carbono en austenita de 8 aceros (3).



elementos aleantes en el hierro tienden a reducir los límites de solubilidad del carbono. La temperatura más comúnmente utilizada para carburización es 925°C . Esta temperatura permite una carburización razonablemente rápida sin un deterioro excesivo del equipo empleado.

Para un resultado satisfactorio en carburización es importante que la temperatura sea uniforme. Esta uniformidad depende del diseño del horno, de la densidad de carga y del promedio de calentamiento.

Ac₂) Efecto del tiempo

Harris (6) desarrolló una fórmula del efecto del tiempo y la temperatura para determinar la profundidad de capa total en un proceso de carburizado. La fórmula equivalente en unidades SI es:

$$d = 802.6 \sqrt{t} / 10^{(3720/T)} \dots\dots (Ec. 1)$$

Donde d es la profundidad de capa total en milímetros; t es el tiempo a temperatura, en horas; y T es la temperatura absoluta, en grados kelvin.

Para una temperatura específica la relación es:

$$\begin{aligned} d &= \phi \sqrt{t} \dots\dots (Ec. 2) \\ &= 0.45 \sqrt{t} \text{ para } 875^{\circ}\text{C} \\ &= 0.54 \sqrt{t} \text{ para } 900^{\circ}\text{C} \\ &= 0.63 \sqrt{t} \text{ para } 925^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Los valores de la profundidad de capa calculados de 2 a 36 horas para tres diferentes temperaturas de carburizado se dan en la Tabla 1.

Harris también desarrolló un método para calcular el tiempo de carburizado y difusión para producir una capa carburizada de predeterminada profundidad y concentración de carbono en la superficie (7):

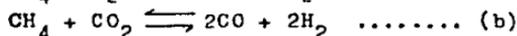
$$t_c = t_t (C - C_1)^2 / (C_0 - C_1) \dots\dots\dots (\text{Ec. 3})$$

$$t_d = t_t - t_c \dots\dots\dots (\text{Ec. 4})$$

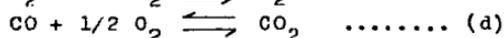
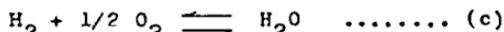
Donde t_t , t_c , y t_d son el tiempo total, tiempo de carburizado y tiempo de difusión respectivamente; C es la concentración de carbono deseado en la superficie; C_0 es la concentración en el final de la porción del ciclo de carburizado en la superficie; y C_1 es la concentración del núcleo.

Ac₃) Composición de la atmósfera

Adicionalmente a la fuente de carbono para la reacción de carburizado, los hidrocarburos gaseosos pueden también aumentar el potencial de carbono de la atmósfera en el horno haciendo que se disminuya el punto de rocío ($\% \text{H}_2\text{O}$) y el contenido de dióxido de carbono (CO_2), de acuerdo a las siguientes reacciones:



Estas reacciones son relativamente lentas y por lo general se requiere mayor cantidad de metano para disminuir el contenido de dióxido de carbono y el punto de rocío por el decremento de la relación gas-aire en el generador, donde la reacción ocurre a alta temperatura en presencia de un catalizador. El potencial de carbono en la atmósfera puede disminuir rápidamente en el horno por el suministro de pequeñas cantidades de aire, aumentando el punto de rocío y el contenido de dióxido de carbono por las reacciones:

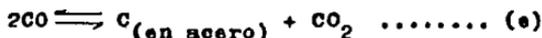


Estas reacciones ocurren muy rápido. En ocasiones se suministra aire para reducir el potencial de carbono con el objeto de obtener un período de difusión.

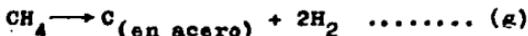
En los procesos de carburización para concentraciones de 0.80 a 1.00 % en carbono, usando gas endotérmico, es común operar el punto de rocío de -7 a -1°C ($+20$ a $+30^\circ\text{F}$).

La secuencia de las reacciones involucradas en carburizado no se conocen en detalle, pero se sabe que el carbono puede ser añadido o removido rápidamente de la superficie -

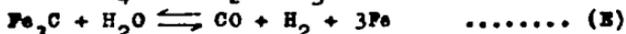
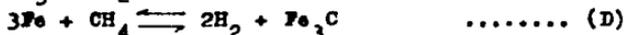
por las siguientes reacciones reversibles:



La suma de las reacciones (b) y (e) y en (a) y (f) es reducida a:



De esta manera, con el contenido de CO_2 y del punto de rocío constantes, los cambios en la composición de la atmósfera sera que una reducción en el contenido de metano aumentará el contenido de hidrógeno. La mezcla de gases generalmente no esta en equilibrio con el acero y pueden ocurrir numerosas reacciones. Estas reacciones descritas por Koebel - (8) son:



Las reacciones (A) y (B) producen óxidos (escamas); (C)

y (E) causan descarburización; (D) produce carburización; - (F), (G) y (H) involucran cambios químicos que ocurren en la fase gaseosa. Estas reacciones son reversibles, y mediante un control adecuado de los porcentajes de los diferentes gases, es posible dirigir las a favor. Por ejemplo un incremento en la proporción de hidrógeno forzará la reacción (A) a la izquierda, evitando la formación de escama. Similarmente aumentando la cantidad de óxido de carbono evita la formación de escama en la reacción (B).

Ad) Difusión del carbono

La difusión del carbono en el hierro está descrita por las leyes de difusión de Fick (3). La primera ley de Fick establece la condición de que el flujo de la sustancia que se difunde, carbono por ejemplo, perpendicular al plano del área de la sección transversal es proporcional al gradiente local de carbono perpendicular al plano. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de difusión D , el cual puede ser constante $(\text{distancia})^2 / \text{tiempo}$.

La segunda ley de Fick (9) se obtiene de un balance de materia en un elemento de volumen en un sistema. El flujo de carbono dentro de un volumen elemental de hierro menos el flujo de carbono fuera del volumen elemental es igual al ran

T A B L A 1

PROFUNDIDAD DE CAPA CALCULADA DE Eq. 1(a)

| tiempo (t), h | 870°C | 905°C | 925°C |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| | Profundidad de capa en mm (b), despues de un proceso de carburizacion. | | |
| 2 | 0.62 | 0.79 | 0.89 |
| 4 | 0.89 | 1.11 | 1.23 |
| 8 | 1.26 | 1.57 | 1.74 |
| 12 | 1.54 | 1.93 | 2.18 |
| 16 | 1.78 | 2.22 | 2.51 |
| 20 | 1.99 | 2.49 | 2.81 |
| 24 | 2.18 | 2.72 | 3.08 |
| 30 | 2.44 | 3.05 | 3.44 |
| 36 | 2.67 | 3.34 | 3.77 |

(a) Carburizado (Austenita saturada en la superficie del acero en temperatura).

(b) profundidad de capa igual a $0.445 \sqrt{t}$ para 870°C; $0.556 \sqrt{t}$ para 905°C; $0.528 \sqrt{t}$ para 925°C. (5).

go de acumulación de carbono dentro del volumen.

Combinando las dos leyes en una ecuación diferencial - que describe el proceso de difusión, para una sola dimensión tenemos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Donde C es la concentración de la sustancia difundida.

t es el tiempo

x es la distancia

Si la constante de difusión es independiente de la concentración de la sustancia difundida, entonces la solución - de la ecuación es utilizable para una variedad de condiciones. Con solución de la ecuación de difusión y valores de la constante de difusión, es probable predecir el gradiente y - la penetración de ciertos tratamientos térmicos de carburización. La constante de difusión de carbono en hierro austenítico depende del contenido de carbono. Si esta dependencia - es incorporada en la ecuación de difusión, la ecuación puede usarse para resolver problemas de estado estable.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

Una relación aproximada para el cálculo de la constante de difusión de carbono en hierro-austenita en función de

la temperatura es (10):

$$D = -16.2 \exp\left(\frac{-137800}{RT}\right) \text{ mm}^2/\text{seg} \quad \dots\dots\dots (\text{Ec. 5})$$

Donde $R = 8.314 \text{ J/K mol}$

$T =$ en grados Kelvin

En la carburización, la solución de la ecuación de difusión mas realista es la que considera que el flujo de carbono en la superficie, J esta gobernado por la primera reacción en la superficie:

$$J = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_s = K(C_a - C_s) \quad \dots\dots\dots (\text{Ec. 6})$$

Donde $\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_s$ es el gradiente de concentración de carbono.

En la superficie, C_a es el potencial de la atmósfera del horno y K es la constante de la reacción en la superficie, C_s es el contenido de carbono en la superficie. De esta forma, el contenido de carbono en la superficie cambia con el tiempo, aumenta rápidamente al inicio de un tratamiento de carburización y en el transcurso del tratamiento continúa incrementándose lentamente.

Para estimar la profundidad de capa es suficiente suponer que el contenido de carbono en la superficie instantánea

mente toma el valor de C_s y mantiene este valor durante todo el ciclo de carburización, entonces el contenido de carbono normalizado es:

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_s - C_0} \quad \dots\dots\dots (\text{Ec. 7})$$

Donde C_0 es el contenido inicial de carbono base en la aleación es función de la variable adimensional:

$$\frac{x}{\sqrt{Dt}}$$

Mostrada en la Figura 3 donde x es la distancia bajo la superficie. C^* disminuye a 0.05 en un valor de 2.75 para

$$\frac{x}{\sqrt{Dt}}$$

Y por la relación siguiente puede ser usada como una definición de profundidad de capa total en mm.

$$\text{Profundidad de capa total } (x) = 2.75 \sqrt{Dt} \quad \dots\dots\dots (\text{Ec. 8})$$

Donde D es dada por la ecuación 5 y t es el tiempo en segundos.

Similar criterio utilizo Harris para desarrollar su Tabla 1 de profundidad de capa total como una función del tiempo y la temperatura. En términos de contenido de carbono, la capa efectiva es definida como la profundidad de la capa has

ta donde se encuentra una concentración de 0.4 % en peso de carbono.

B) CLASIFICACION DE ATMOSFERAS

Los hornos para carburizado emplean una de las tantas atmósferas para diluir y reaccionar con el gas hidrocarburo usado como principal fuente de carbono. Las cuatro atmósferas mas comunes, son la clase 201, 202, 302 y 402 como se pueden apreciar en la Tabla 2. La clase 302 es la utilizada con mayor frecuencia en la actualidad porque es fácil de usar. La clase 102 también se menciona en la tabla pero es rara vez empleada.

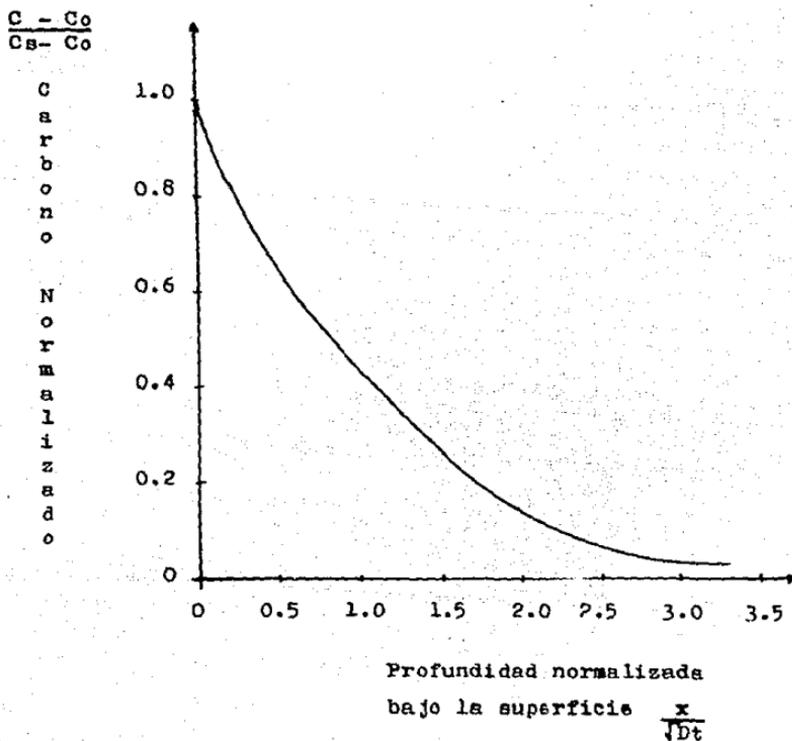
Clase 102

Cuando se usa sola es descarburizante, esto es "la pérdida de carbono de la superficie de una aleación ferrosa como resultado del calentamiento en un medio que reacciona con el carbono de la superficie". De acuerdo a las leyes de la difusión, la pérdida de carbono es función del tiempo, la temperatura, y el coeficiente de difusión del carbono, así como del potencial de carbono del medio (11).

Se emplea dependiendo de la adición del gas hidrocarburo. Bajo estas condiciones, la proporción de hidrocarburo y

FIGURA 3

Profundidad de capa efectiva después
de un proceso de carburización (3).



atmósfera debe ser aproximadamente de 1 a 1, lo que resulta un excesivo depósito de carbono libre sobre las piezas y en el horno.

Clase 202

Ofrece un moderado rango de control, algo de carbono se aprovecha para carburizar en la operación continua con puntos de rocío de -40°C o menores.

Clase 302 (endotérmica)

Es generalmente la preferida en hornos carburizadores y la más usada. Ofrece un amplio rango de control de carbono, una cantidad moderada de carbono es aprovechable para carburizar cuando se opera a -1°C de punto de rocío. Pueden utilizarse menores temperaturas de punto de rocío como -7°C , pero es necesario una quema de carbono más frecuente.

Clase 402

Puede utilizarse como atmósfera cuando se suministra el equipo para dar los requerimientos de control y un alto costo de mantenimiento es aceptado.

Gas nitrógeno

Es aprovechable en las plantas de licuefacción, como un subproducto de las plantas de oxígeno o de la modificación de generadores exotérmicos como la clase 201. El nitrógeno solo es neutro, pero en su forma comercial generalmente con-

tiene una o mas impurezas que pueden ser oxidantes o descarburizantes. La proporción de nitrógeno a gas hidrocarburo es demasiado grande, alrededor de 50 a 1 ó 100 a 1 (12).

TABLA 2

Principales atmósferas utilizadas en carburizado.

(a) Análisis basado en 1055 KJ (1000 BTU) de gas natural, siendo necesario 9.6 volúmenes de aire para combustión completa. Cuando el gas utilizado es alto en H_2 (gas artificial), multiplicar el ratio aire-gas por 0.5; para medio H_2 , alto en CO por 0.4; para propano, por 2.5; para butano, por 3.2. (b) Si se hace con gas artificial, el CO será ligeramente bajo y el H_2 alto. Con propano y butano, sera lo contrario. (c) Metros cúbicos (pies cúbicos) de 1055 KJ (1000 BTU) de gas natural requeridos para producir 28 m^3 (1000 ft^3) de atmósfera. Para gas artificial alto en H_2 multiplicar el valor mostrado por 2.0; para medio H_2 , gas artificial-CO, por 2.5; con propano, por 0.4; para butano, por 0.3. (d) La temperatura del punto de rocío enfriado por agua, puede ser reducido a $+4^\circ\text{C}$ ($+40^\circ\text{F}$) por refrigeración, y a -46°C (-50°F) por absorbentes. (e) Variación en el punto de rocío por cambios en el ratio aire-gas en el generador. La mayoría del carburizado con puntos de rocío (en el generador) de -12° a

TABLA 2

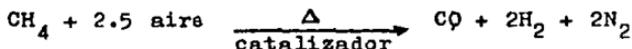
PRINCIPALES ATMOSFERAS UTILIZADAS EN PROCESOS DE CARBURACION (3)

| CLASE | METODO DE PREPARACION | PUNTO ATM/GAS (a) | COMPOSICION (% VOL) | | | | | PUNTO DE FUSION | | CAP. RESERVADO (C) | | NATURALEZA DE LA ATM. |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|----|--------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| | | | H ₂ | CO | CO ₂ | H ₂ O | CH ₄ | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 102 | base exoterica (mezcla rica) | 5.0 | 71.5 | 10.5 | 15.0 | 11.5 | 0.5 | 10 | 10 | 4.1 | 100 | combustible toxico, medio re- ductor. |
| 201 | base nitrogeno (mezcla pobre) | 5.0 | 97.1 | 1.7 | - | 1.1 | - | 10 | 10 | 2.0 | 10 | no trans- formable |
| 202 | base nitrogeno (mezcla rica) | 5.0 | 75.5 | 11.0 | - | 11.2 | 1.5 | 10 | 10 | 4.1 | 100 | combustible toxico, medio re- ductor |
| 302 | base endoterica reaccion completa y enfriamiento para evitar el resquebrajamiento de la | 0.7 | 29.8 | 50.7 | - | 19.7 | 9.8 | - | 10 | 5.7 | 10 | combustible toxico, medio reductor |
| 401 | base Charcoal | - | 64.1 | 14.7 | - | 1.2 | - | 10 | 10 | 5.7 | 100 lb Charcoal | combustible toxico, medio reductor |

-4°C ($+10^{\circ}$ a $+25^{\circ}\text{F}$). (f) Mas 7 m^3 (250 ft^3) de gas combustible por 28 m^3 (1000 ft^3) de atmósfera preparada, para el calentamiento de la retorta (3).

G) ATMOSFERA ENDOTERMICA

La atmósfera endotérmica se usa en tratamientos térmicos como una atmósfera protectora para endurecido, relevado de esfuerzos, restauración de carbono y carburizado. Para generar esta atmósfera se hace pasar una mezcla controlada de aire y gas hidrocarburo por un tubo de reacción caliente lleno de catalizador impregnado de níquel (Fig. 4). La reacción produce una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno con trazas de dióxido de carbono, vapor de agua y oxígeno. La reacción básica es (13):



El gas producido contiene aproximadamente 20% CO, 40% H_2 y 40% N_2 . 1 ft^3 de gas natural producirá 5 ft^3 de gas endotérmico. 1 ft^3 de aire producirá 2 ft^3 de gas endotérmico.

Las trazas de elementos en el gas producido indicaran que tanto fue completada la reacción de la mezcla aire-gas. Monitoreando uno de estos elementos, el análisis del gas endotérmico puede ser determinado. Si la reacción es incomple-

ta, puede ser causada por un bajo equilibrio de temperatura ó que el generador opere sobre los rangos de su capacidad, - produciendo trazas de metano en el gas generado.

El metano causará hollín (depósito de carbono) en la cama del catalizador. Esto creara dos problemas en el catalizador, el primero es el depósito de carbono que reduce la actividad del catalizador provocando mayor cantidad de hollín; - el segundo es la diferencia de expansión entre el carbono y el catalizador, el cual puede inducir fractura en el catalizador. El catalizador acelera la descomposición del hidrocarburo y a la temperatura de operación la molécula se rompe - completamente (14).

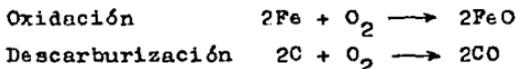
En la Figura 5 se señala la zona correspondiente a la - atmósfera endotérmica y exotérmica. Modificando la cantidad de aire, varia la composición de los productos de combustión a mayor cantidad de aire aumenta el contenido de agua y CO_2 , disminuyendo el contenido de H_2 y CO .

Ca) Efecto químico de los constituyentes atmosféricos

El efecto químico de los diferentes gases que componen una atmósfera endotérmica se muestra en la Tabla 3.

Oxígeno

El oxígeno reacciona con muchos metales para formar capas de óxido o escamas. Puede también reaccionar con un elemento específico de aleación, con el tiempo reacciona para formar FeO arriba de 575°C y Fe_2O_3 en todas las temperaturas también reacciona con el carbono del acero provocando descarburización.



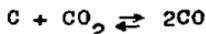
Nitrógeno

El nitrógeno puro molecular es pasivo en el hierro y puede ser usado como atmósfera protectora para tratamientos térmicos para aceros de bajo carbono. Cuando se usa para aceros de alto carbono, debe estar completamente seco y libre de oxígeno porque pequeñas cantidades de agua causarían descarburización. El nitrógeno no es atmósfera protectora apropiada ya que nitrura el acero.

Monóxido y dióxido de carbono

El monóxido es reductor mientras que el dióxido, oxida algunos metales y forma óxidos. La reacción principal con el dióxido de carbono ocurre a temperatura de austenización arriba de A_3 en el acero, donde descarburiza el acero produciendo

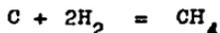
do monóxido de carbono.



El carburizado ocurre en sentido izquierdo de la reacción cuando el contenido de CO en el gas es alto y los contenidos de CO₂ y H₂O son bajos.

Hidrógeno

No tiene efecto químico sobre el hierro, pero reduce el óxido de hierro y tiende a descarburizar el acero. El efecto descarburizante depende de la temperatura, el contenido de carbono en el acero y el contenido de humedad de gas. Abajo de 700°C el efecto es despreciable pero se incrementa arriba de esta temperatura en presencia de H₂O. El hidrógeno reacciona con el carbono en el acero para formar metano y la humedad reacciona para formar monóxido de carbono e hidrógeno.

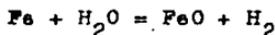


El efecto descarburante del hidrógeno aumenta en aceros de alto contenido de carbono.

Vapor de agua

Oxida al hierro:

arriba de 575°C



abajo de 575°C

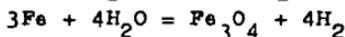


FIGURA 4

Diagrama de generador endotérmico
para producir atmósfera 302 (13).

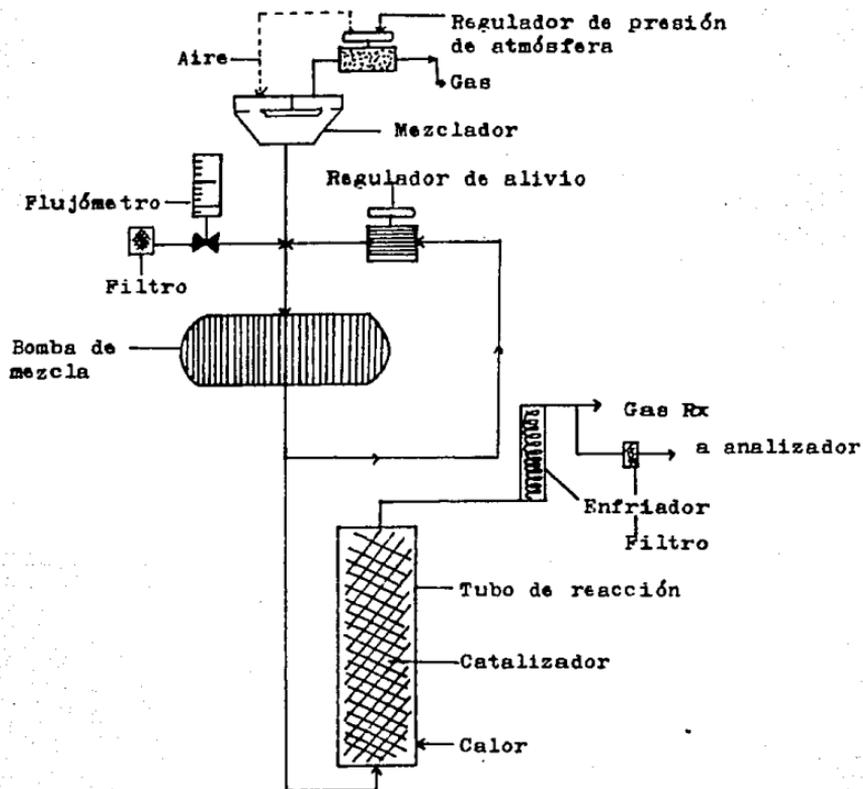


FIGURA 4

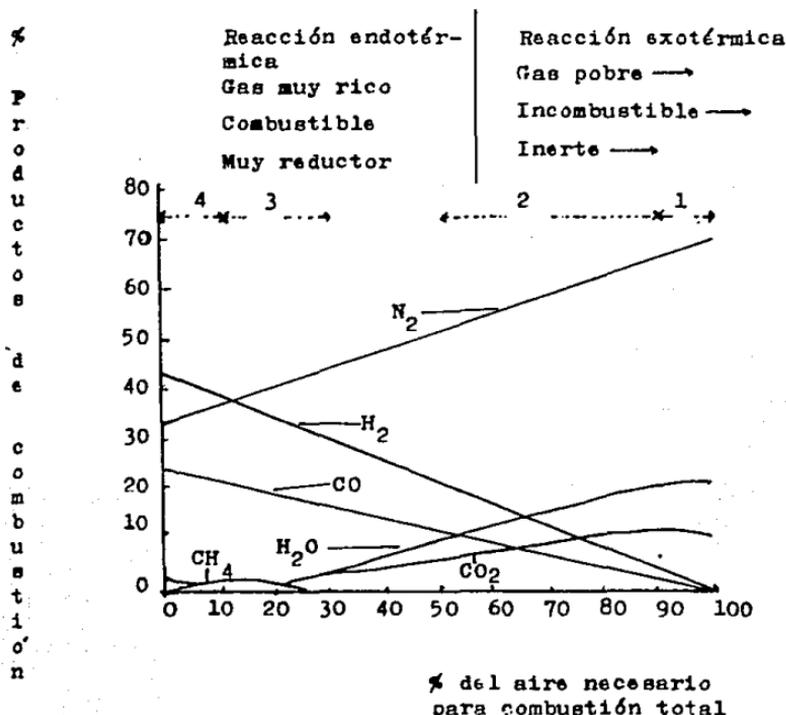
DIAGRAMA DE GENERADOR ENDOTERMICO

El regulador de presión en la línea de entrada es cargado con la línea de aire para que el gas y el aire entren a la misma presión en el mezclador. Cuando el flujo de aire cambia por la demanda de gas Rx, la presión en el orificio del aire aumenta y el flujo de gas se ajusta automáticamente. El mezclador tiene un plato excéntrico con un orificio de cada lado para que ambos puedan ser ajustados a la vez. La mezcla se introduce al sistema por el desplazamiento positivo de la bomba y presurizada para pasar a través del tubo de reacción lleno de catalizador.

La mezcla aire-gas es calentada a temperatura de equilibrio entre 815°C (1500°F) y 926°C (1700°F) dependiendo del generador y del rango de capacidad del tubo de reacción. El gas se enfría rápidamente para estabilizar los productos de la reacción. La presión de salida del enfriador se controla por un regulador de alivio, recirculando el exceso de gas a través de la bomba si no es requerido en el proceso. Para la exactitud en el control de los productos de reacción un sistema de control puede ser añadido al generador.

FIGURA 5

Diferentes resultados que se pueden obtener al quemar un gas combustible con diferentes porcentajes de aire (1).



T A B L A 3

EFFECTO QUIMICO DE VARIOS GASES SOBRE METALES (14)

| METAL | CONSTITUYENTES ATMOSFERICOS | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------|----|----------------|-----------------|------------------|----------------|--|
| | O ₂ | CO ₂ | CO | H ₂ | CH ₄ | H ₂ O | N ₂ | |
| HIERRO | O | O | C | | C | O | - | |
| ACERO | O | O | C | D | C | O | - | |
| ALUMINIO | O | O | - | - | - | - | - | |
| COBRE | O | O | - | - | - | - | - | |
| OXIDO DE HIERRO | - | - | R | R | R | - | - | |

DESCRIPCION DE SIMBOLOS:

- No produce efecto
- O Oxidante
- C carburante
- D Decarburante
- R Reductor

Cb) Gases Combustibles

Entre los gases combustibles se encuentran; gas natural propano, butano, etc. Las principales características para que un gas sea utilizado en la generación de una atmósfera protectora son: composición química constante y libre de impurezas, tales como polvo, aceite, compuestos sulfurados, etc., ya que estos dificultan el control atmosférico.

Cuando un gas contiene sulfuros, puede tener un efecto sobre el catalizador bajando su eficiencia por depósito o causar corrosión en las válvulas y partes que componen el generador. Gases con vapor de agua también podrían causar corrosión.

El almacenaje de propano o butano, gases de petróleo líquido (GLP), es por lo regular en recipientes de 100 a 150 Kg de capacidad. De aquí el gas pasa al generador a través de un evaporador.

El propano obtenido como un subproducto del refinamiento del aceite podría contener considerables cantidades de hidrocarburos insaturados, los cuales se descomponen fácilmente para formar coque; la gran ventaja radica en su composición química constante.

Los gases empleados mas frecuentemente son gas natural-

y propano. Ambos tienen la ventaja de contener principalmente un solo constituyente gaseoso (CH_4 y C_3H_8 respectivamente) y la cantidad de oxígeno necesaria para convertirse a monóxido de carbono e hidrógeno es constante. El principal constituyente del gas natural es metano, además las características del gas natural corresponden a las del metano. No tiene efecto tóxico pero cuando se inhala, causa asfixia debido a la ausencia de oxígeno, además de metano (85%), el gas natural contiene etano, butano, nitrógeno y dióxido de carbono.

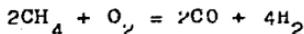
Propano y butano son una mezcla de hidrocarburos acompañados siempre por pentano, propileno, etano, etc. El propano es usualmente mezclado con alguna clase de materia sulfurosa. Cuando se emplea propano la necesidad de limpiar el catalizador es más frecuente porque los hidrocarburos insaturados provocan la formación de grietas donde hay depósito de hollín. El metano también forma depósito de hollín pero en menor proporción.

En condiciones normales el catalizador opera sin disturbios durante meses. Cuando se utiliza propano en el generador, el catalizador podrá ser reactivado (limpiado) como mínimo una vez al mes, aunque en algunas instalaciones se realiza de preferencia una vez a la semana. La oxidación de reacciones de combustión y la generación de atmósferas endotér-

micas de los principales gases combustibles son las siguientes:

a) Gas natural

Como el gas natural esta compuesto principalmente de metano, la reacción de oxidación puede expresarse de la siguiente forma:



La oxidación se lleva a cabo en dos etapas. En la primera, el metano al estar en contacto con aire, reacciona generando calor, de ahí que sea una reacción exotérmica. En la segunda etapa, el metano excedente reacciona con el dióxido de carbono y vapor de agua generando una reacción endotérmica. A fin de obtener una completa reacción del gas y eliminar el dióxido de carbono, el exceso de metano o exceso de vapor de agua es necesaria una temperatura alta y un catalizador limpio y adecuado. Para una completa reacción del gas el contenido de metano es aproximadamente 0.5 a 0.8%. Si la temperatura no es lo suficientemente alta y el gas no reacciona completamente, el catalizador sera cubierto de hollín y por lo tanto inefectivo.

Como consecuencia, mayor cantidad de metano y altos porcentajes de CO_2 y H_2O estaran presentes en la atmósfera. El catalizador mas comúnmente utilizado es el tipo refractario

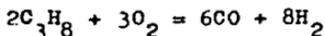
poroso impregnado con óxido de níquel.

El tener un catalizador limpio y activo es extremadamente importante para un control exacto del punto de rocío y potencial de carbono. Un análisis típico de una atmósfera producida por un gas natural es el siguiente:

| | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| CO = 10% | H ₂ = 40% | H ₂ O = 0.2% |
| CH ₄ = 0.5% | CO ₂ = 0.1% | N ₂ = 40% |

b) Propano

Cuando propano o butano son empleados, el gas puro no debe contener mas del 5% de hidrocarburos insaturados. La reacción de oxidación se muestra a continuación:

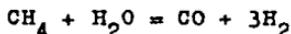


Un análisis típico de la atmósfera producida por este gas es: CO = 23%; H₂ = 31%; CH₄ = 0.2% y residuos de N₂; punto de rocío de -12°C.

Comparada con la atmósfera obtenida con el gas natural, el contenido de CO es mas alto y el contenido de H₂ se observa mas bajo. Con propano es un poco difícil de regular el punto de rocío, pero es aún mas con butano.

c) Hidrocarburos líquidos vaporizados

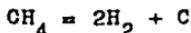
Cuando se emplea una atmósfera con un alto contenido de hidrógeno es para la reducción de óxidos, los gases hidrocarburos reaccionan de preferencia con el vapor de agua presente que con el aire. La reacción es la siguiente:



El análisis típico de una atmósfera generada de esta manera es: CO = 24%; H₂ = 70%; N₂ = 4.5%; CO₂ y H₂O = 0; punto de rocío es -12°C. La Tabla 4 muestra la composición de las principales atmósferas endotérmicas producidas a partir ciertos gases.

Cc) Catalizadores

Las reacciones que se llevan a cabo en el generador son fomentadas por el uso de catalizadores. Estos catalizadores aceleran la descomposición de los hidrocarburos y a la temperatura de operación los hidrocarburos son completamente disociados. La descomposición del metano, es de acuerdo a la siguiente reacción (8):



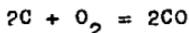
El carbono libre es oxidado a monóxido de carbono en el

TABLA 4

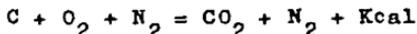
COMPOSICION DE ATMOSFERAS EMITERICAS PRODUCIDAS A PARTIR DE CIERTOS GASES (5)

| GAS COMBUSTIBLE | TIPO DE REACCION | EQUACION DE REACCION | RANGO DE TEMPERATURAS °C | COMPOSICION DE LA ATMOSFERA (%) | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| | | | | CO | H ₂ | CH ₄ | CO ₂ | N ₂ | O ₂ |
| GAS NATURAL CH ₄ | GAS NATURAL-AIRE | $COH_4 + 2 = CO_2 + 2H_2O$ | +15 -12 | 0 | 40 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 40 |
| PROPANO C ₃ H ₈ | PROPANO-AIRE | $CO_3H_8 + 5 = CO_2 + 4H_2O$ | +15 -12 | 23 | 51 | 0.2 | 0 | 0 | 45 |
| BUTANO C ₄ H ₁₀ | BUTANO-AIRE | $CO_4H_{10} + 6.5 = CO_2 + 6.5H_2O$ | +15 -12 | 25 | 70 | 0 | 0 | 0 | 45 |

generador por la adición de aire:



El catalizador siempre es incorporado en la retorta del generador. Es esencial que el gas endotérmico este en contacto con el catalizador en una superficie grande, además el catalizador es colocado sobre un material cerámico-poroso tal como ladrillo refractario, cuando el catalizador esta cubierto de hollín este puede limpiarse pasándose aire caliente a 600-650°C a través de el. La oxidación del carbono a dióxido de carbono provoca la eliminación de carbono del catalizador.



Esta reacción exotérmica genera calor en una pequeña zona de la retorta, la cantidad de aire introducido debe ser controlado.

D) SISTEMAS DE CONTROL DE ATMOSFERAS

El propósito de controlar la composición de la atmósfera protectora consiste en mantener la concentración de los elementos y/o determinar los cambios que ocurren bajo las

condiciones fijadas para obtener los resultados deseados.

El análisis de la atmósfera puede ser realizado por métodos físicos, fisicoquímicos o electromecánicos. Los métodos físicos son empleados cuando la atmósfera gaseosa a analizar contiene un constituyente con propiedades físicas considerablemente diferentes a los demás gases. Por ejemplo, muchos gases tienen diferentes características de absorción de luz, el oxígeno es fuertemente paramagnético, etc. Los valores de las mediciones son convertidas a señales eléctricas - las cuales son directamente proporcionales a la concentración del constituyente gaseoso buscado.

En los métodos físico-químicos las reacciones químicas son combinadas con técnicas de medición físicas, dependiendo estas de la reacción involucrada. Por ejemplo, podría emplearse un reactivo líquido que cambiara su color como resultado de su reacción con el constituyente gaseoso específico y este cambio representaría la concentración del gas a ser medido. En técnicas electroquímicas un efecto físico se manifiesta por una reacción química que provoca un cambio de voltaje detectado por un electrodo.

Da) Análisis de absorción de gas

El análisis basado en la absorción del gas a ser anali-

zado es un método convencional. El analizador Orsat por ejemplo, ha sido utilizado por mucho tiempo para el análisis y control de atmósferas. Sin embargo, recientemente el analizador de infra-rojo, el analizador de punto de rocío y el cromatografo de gases han desplazado al analizador Orsat por su mayor rapidez y sensibilidad.

Da₁) El analizador Orsat

Se basa en la absorción selectiva del gas deseado de una mezcla de gases por un líquido específico. Por medio de la medición del volumen de la mezcla de gases antes y después de la absorción, el porcentaje en volumen del gas requerido es determinado. Tiene la ventaja de ser portátil y fácil de operar, sus principales desventajas son que requiere una gran cantidad de tiempo para analizar los gases y existe la posibilidad de errores en la determinación de CO₂.

Da₂) Análisis basado en el cambio de conductividad de las soluciones

El método consiste en determinar el cambio en la conductividad eléctrica de una solución que absorbe el gas deseado. La lectura se realiza antes y después de absorber el gas y la diferencia entre los valores indica la concentración del

gas. Este método es solo aprovechado para medir trazas de gases. Se puede determinar también O_2 , SO_2 , CO_2 , H_2S , NH_3 .

Db) Análisis basado en la medición de la conductividad térmica.

Todos los gases son débiles conductores de calor. No obstante, los coeficientes de conducción térmica son básicamente diferentes uno del otro. En la Tabla 5 se muestran los datos de conductividad térmica en forma individual de algunos gases relacionada al aire.

Así, un ligero cambio en la concentración de H_2 causa un considerable cambio en la conductividad de una mezcla de gases. Esta conductancia es normalmente detectada por un método eléctrico integrado de un circuito de resistencias.

Dc) Análisis basado en la medición del calor generado por reacciones específicas.

Todas las reacciones generan cambios en la temperatura. El analizador requiere del uso de algunos reactivos que reaccionan exotérmicamente con el elemento a ser medido. La cantidad de calor liberada por la reacción es medida indirectamente por el aumento en la temperatura del reactivo. El método es empleado para medir trazas de elementos. Pueden ser de

T A B L A 5CONDUCTIVIDAD TERMICA DE GASES (2)

| GAS | CONDUCTIVIDAD TERMICA | GAS | CONDUCTIVIDAD TERMICA |
|-----------------|--------------------------|------------------|--------------------------|
| Aire (100°C) | 100 | CO | 97 |
| H ₂ | 715 | NH ₃ | 90 |
| CH ₄ | 150 | CO ₂ | 66 |
| O ₂ | 102 | H ₂ S | 54 |
| N ₂ | 99 | SC ₂ | 35 |

terminados los siguientes constituyentes atmosféricos: O_2 , CO_2 , SO_2 , H_2S y H_2O .

Dd) Análisis basado en mediciones calorimétricas

El calor calorífico es medido de la energía liberada de un combustible o constituyentes combustibles. La lectura se realiza al quemar el gas y el calor liberado es absorbido por un material de capacidad calorífica conocida.

De) Analizadores de oxígeno

Las propiedades magnéticas del oxígeno son las características en la cual se basan los instrumentos empleados para determinar su concentración. La concentración del oxígeno es valorada por dos fenómenos asociados con las propiedades magnéticas. Uno de estos es la caída de la conductividad térmica del oxígeno en un campo magnético y otro es la convección termomagnética.

En este equipo el elemento consiste de un circuito de alambres de platino. Si el oxígeno está presente en la atmósfera se produce un campo magnético en el alambre. La velocidad de flujo del gas en el alambre de medición es mayor en relación con la de referencia, de esta manera enfría más rápido que la de referencia causando un cambio en su resisten-

cia y la alta concentración de oxígeno en el gas sera medida por la caída en la resistencia. La diferencia del potencial producido entre los dos alambres es proporcional a la concentración del oxígeno, la lectura depende de la temperatura.

Df) Cromatografía de gases

Es un método relativamente rápido para medir la concentración de casi todos los gases presentes en la atmósfera. - La operación es completamente automática pero no es una operación continua, los análisis son intermitentes. La muestra tomada se introduce en el analizador utilizando como gas transportador; Hidrógeno, Helio, Argón o Nitrógeno. El analizador esta provisto de una columna que contiene una sustancia granular y los componentes de la muestra de gas son separados individualmente por absorción y dependiendo de su coeficiente de partición son retenidos en la columna por diferentes períodos de tiempo.

Dg) Analizadores colorimétricos

Las reacciones entre gas-líquido o entre gas-sólido - por lo regular resultan en un cambio de color. La diferencia en la coloración antes y después de la reacción puede ser usada para medir la concentración de ciertos gases como: NO,

H_2S , Cl_2SO_2 , O_2 .

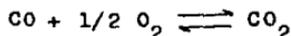
El principio de operación del equipo es el siguiente: - El gas a analizar se hace burbujear a través de un líquido, el cual absorbe selectivamente al constituyente requerido - causando un cambio de color. La celda es iluminada y la intensidad de luz transmitida a través de la celda es detectada por una fotocelda. La diferencia en absorción de luz es - la concentración de gas. El análisis por este método es discontinuo y demasiado lento; requiere de estandarización y la preparación de las celdas de absorción.

Dh) Celdas galvánicas como analizadores de gas

Las celdas galvánicas son capaces de funcionar como un analizador por la generación y medición de voltaje entre una muestra de concentración conocida y otra desconocida. Uno de los descubrimientos mas recientes en métodos de medición de potencial de carbono en una atmósfera de un horno, es la probeta o indicador de oxígeno.

Dh₁) PROBETA DE OXIGENO

En una atmósfera carburizante con base endotérmica o base exotérmica, una de las reacciones reversibles es:



El potencial de carbono de una atmósfera es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial de oxígeno (15). Además, por monitoreo de la concentración de oxígeno, el potencial de carbono puede ser determinado sin considerar la concentración de hidrógeno, vapor de agua o dióxido de carbono. El único constituyente atmosférico que influencia directamente la relación es monóxido de carbono. Mientras el contenido de monóxido de carbono sea razonablemente constante, la actividad de carbono puede ser controlada por el contenido de oxígeno.

Una probeta de oxígeno consiste de dos electrodos de platino separados por un electrolito sólido en forma de un tubo estrecho de zirconio cerrado por un extremo (Fig. 6).

La probeta, que se encuentra en una funda de cerámica es introducida a la atmósfera del horno a través de una ventana y uno de los electrodos hace contacto; el otro electrodo, dentro del tubo de zirconio, esta en contacto con el aire, el cual sirve como un gas de referencia de contenido constante de oxígeno. La diferencia en la presión parcial de oxígeno entre la atmósfera del horno y el aire induce una fuerza electromotriz (voltaje) a través de los electrodos, este voltaje es relacionado al contenido de oxígeno en la atmósfera del horno como es mostrado en la Figura 7 y es di-

FIGURA 6

Principales elementos de una probeta de oxígeno para control de atmósfera en carburizado (5).

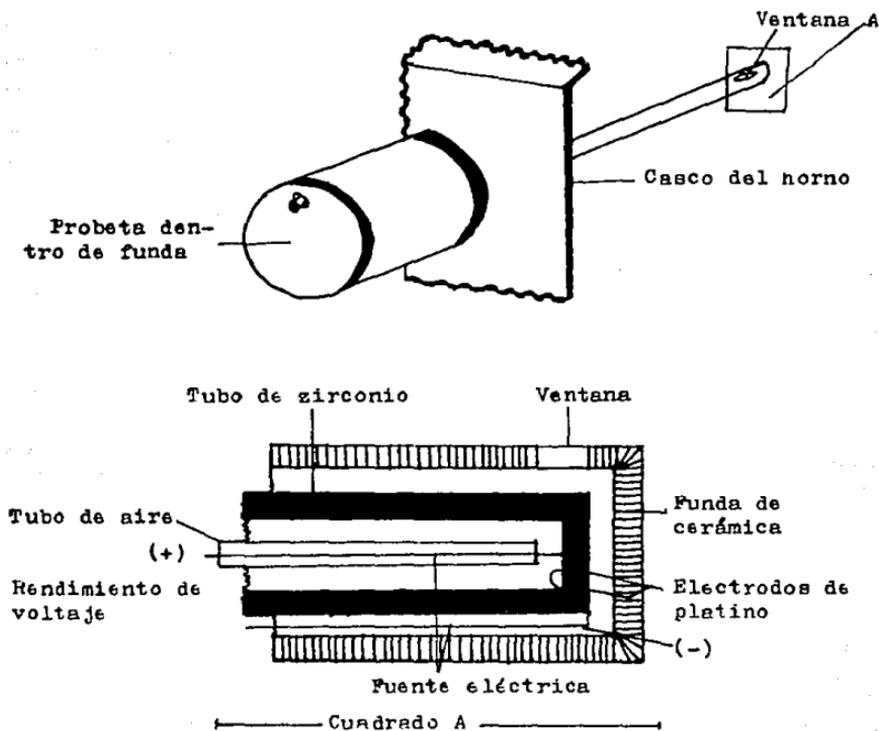
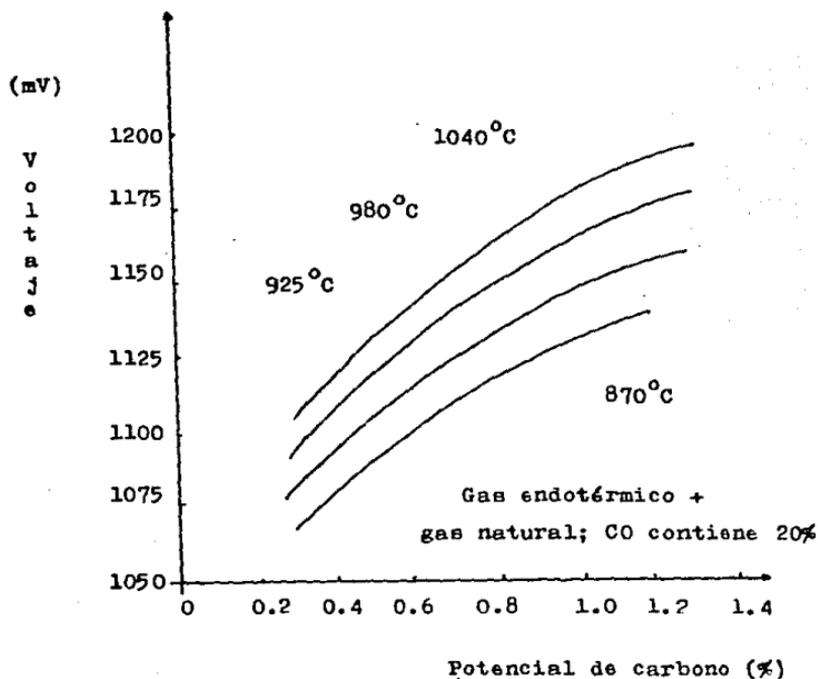


FIGURA 7

Voltaje a través de los electrodos de una típica probeta de oxígeno como función del potencial de carbono a cuatro temperaturas, de un gas endotérmico enriquecido con gas natural y conteniendo 20% de monóxido de carbono (5).



rectamente alimentado a un control de circuitos electrónicos. La mayor parte de los sistemas basados en la probeta de oxígeno tienen una condición de seguridad del 70.05% con respecto al potencial de carbono.

Limitaciones:

- a) La probeta requiere aire de referencia bombeado en su interior a fin de asegurar una correcta lectura de la atmósfera.
- b) El promedio de vida de una probeta es aproximadamente 12 meses. Dependiendo del uso, podría extenderse de 2 1/2 años a 3 años de vida, en algunos casos se ha observado una vida tan corta como de tres meses (16).
- c) Las probetas son relativamente caras, entre 1400 a 1800 dólares cada una.
- d) La respuesta de una probeta de oxígeno es casi instantánea y es directamente relacionado a un cambio en el potencial de carbono, con baja sensibilidad a temperaturas altas (980°C a 1040°C).

D1) Análisis y control del potencial de carbono

Una de las mas importantes características de un control de atmósferas es su potencial de carbono. El potencial de carbono esta definido como el contenido de carbono del hierro pu

ro después de haber alcanzado el estado de equilibrio, en una atmósfera apropiada de gas y a una temperatura dada.

La concentración de carbono en el horno durante el tratamiento térmico del acero y particularmente en el carburizado es de suma importancia, siendo determinada por el potencial de carbono.

Los sucesos y el desarrollo de estos procesos dependen primordialmente de la disponibilidad de instrumentos de control y precisión automática, los cuales son capaces de controlar las condiciones de equilibrio en el horno. La medición del potencial de carbono puede hacerse de un modo directo o indirecto.

D1₁) Medición directa del potencial de carbono

El acero tiene algunas características que varían de acuerdo al contenido de carbono como son: resistencia eléctrica, porcentaje de humedad, peso, etc., de ahí que estas propiedades se empleen para medir el contenido de carbono. Sin embargo, los métodos basados en la cantidad de humedad y aumento de peso no son apropiados para el control porque la medición no es continua. La medición basada en el cambio de la resistencia eléctrica es más apropiado para el control, ya que evalúa el efecto de la atmósfera en general.

Di₂) Medición indirecta del potencial de carbono

Los instrumentos empleados para la medición indirecta del potencial de carbono, el analizador de punto de rocío o el analizador por absorción (analizador de CO₂) basado en la absorción de radiación infra-roja son primordialmente utilizados, determinan alguna característica que tenga correlación bien definida con el potencial de carbono en una atmósfera dada. El potencial de carbono es determinado por la proporción del constituyente mas importante (CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄) de la atmósfera.

Di_{2.1}) ANALIZADOR DE PUNTO DE ROCIO

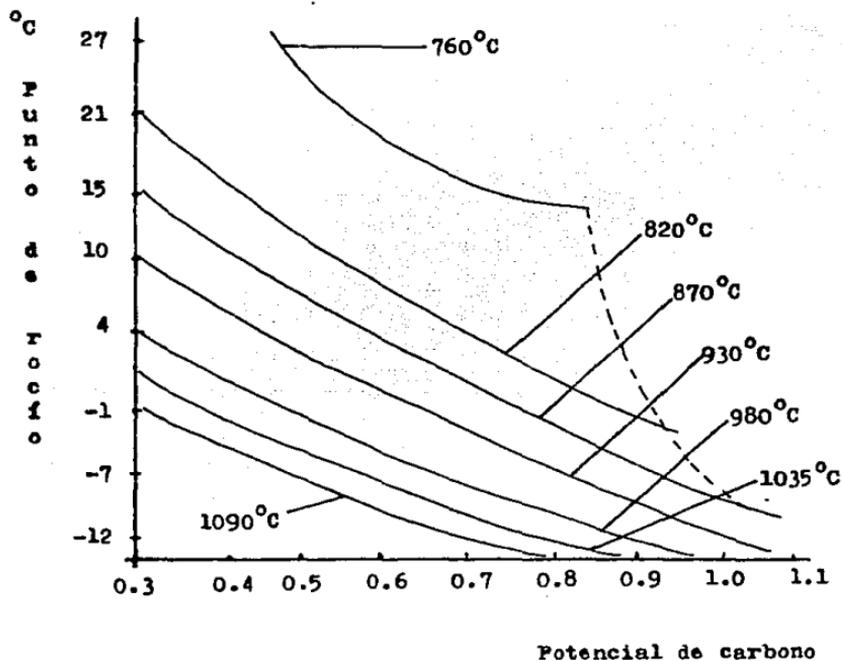
El analizador de punto de rocío mide la presión parcial de vapor de agua en la atmósfera del horno y es definido como la temperatura exacta a la que una mezcla de gases empieza a precipitar su contenido de humedad a una presión dada.

El uso de punto de rocío para control de potencial de carbono es rápido, barato y relativamente simple, por lo cual es ampliamente aceptado en la industria. La relación entre el potencial de carbono y el punto de rocío de la atmósfera es ilustrado en la Figura 8.

Medición del punto de rocío por la Cámara de Niebla

FIGURA 8

Relación entre el potencial de carbono y el punto de rocío de una atmósfera (14).



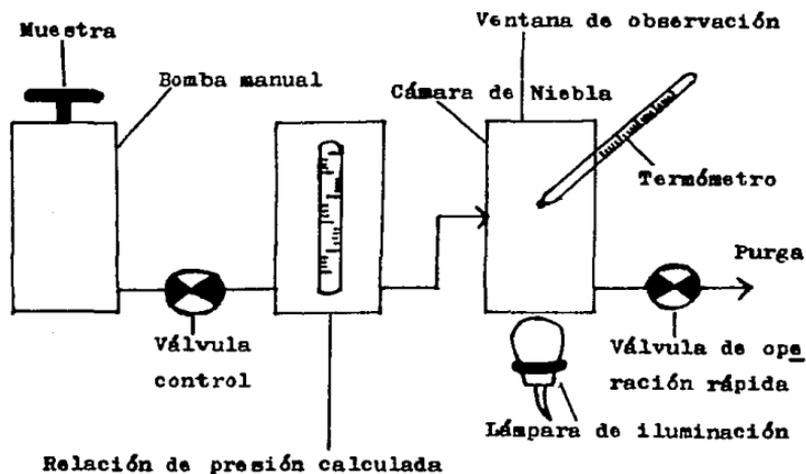
La cámara de niebla es otro tipo de instrumento manual empleado en la medición del punto de rocío, es usado en algunas industrias por su portabilidad y su habilidad en dar coherentes y acertadas lecturas a través de un amplio rango de puntos de rocío, no requiere de un enfriamiento externo o refrigeración mecánica.

La cámara de niebla opera sobre el principio de que una rápida expansión de un gas enfriado adiabáticamente produce una niebla únicamente cuando los requerimientos específicos de baja presión, temperatura ambiental y contenido de humedad en el gas muestreado son satisfactorios (Fig. 9).

La muestra de atmósfera a ser probada es atraída dentro del aparato y retenida bajo una presión en la cámara de niebla por una pequeña bomba manual. Cierta relación de presión calculada indicara la relación entre la presión de la muestra atmosférica del horno y la presión atmosférica ambiental. La temperatura es indicada en el termómetro colocado dentro de la cámara de niebla. La atmósfera muestreada es retenida en la cámara de niebla varios segundos hasta estabilizar la temperatura, después de esto se abre una válvula (operación rápida), liberando la presión y creando un enfriamiento adiabático, el cual causa una condensación visible o niebla suspendida en la cámara, la cual es fácilmente observada con un

FIGURA 9

Elementos que componen el aparato de la CAMARA DE NIEBLA para medición del punto de rocío (5)



sistema de lentes que provee un rayo de luz en la cámara - cuando la válvula es abierta, el procedimiento es repetido - hasta encontrar el punto final (cuando la niebla desaparece). El punto de rocío es entonces determinado de acuerdo a una - gráfica basada en lectura inicial de temperatura y la lectura de presión calculada al punto donde la niebla desaparece.

Limitaciones de los analizadores del punto de rocío

Por medio de los analizadores de punto de rocío pueden detectarse cambios con un probable grado de seguridad, estos cambios no siempre se correlacionan exactamente con los cambios en el potencial de carbono. Un error de únicamente unos cuantos grados celsius pueden representar un error del 0.1 a 0.2% de carbono en la evaluación del potencial de carbono de una atmósfera dada, el cual puede sufrir una disminución hasta de un 25% si el contenido de carbono deseado esta cercano a la composición eutectoide.

Di_{2.2}) ANALIZADOR INFRA-ROJO

Este analizador se basa en el paso de una radiación infraroja a través de una mezcla de gases, y así algún componente presente en la mezcla absorbera la energía infra-roja de acuerdo a su concentración en la mezcla, esta radiación - es absorbida selectivamente a diferentes longitudes de onda

(rango aproximado de 380 a 780 μm), por gases con moléculas consistentes de dos o más átomos, tales como CO , NH_3 , CO_2 , CH_4 , etc. Gases elementales tales como hidrógeno y oxígeno no absorben radiación infra-roja por lo cual no pueden ser analizados por este método.

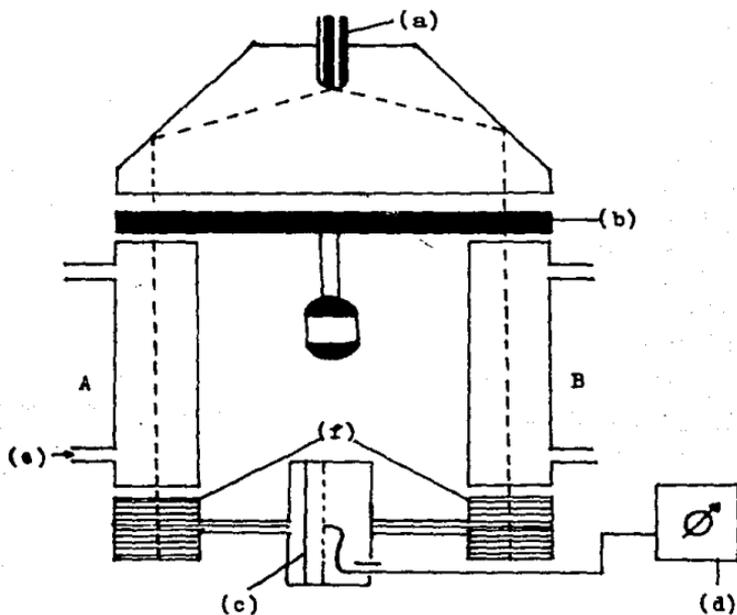
El principio del instrumento es ilustrado en la Figura 10, como fuente de origen de la radiación infra-roja usualmente se emplea un espiral de alambre de níquel-cromo (a), - el cual se calienta entre 700 a 800 $^{\circ}\text{C}$, la radiación es continuamente interrumpida por una placa rotatoria (b). La radiación se extiende a las cámaras detectoras a través de las columnas A y B, si las columnas son ocupadas con un gas de referencia como nitrógeno, los instrumentos (d) del analizador no mostraran desviación porque pulsaciones iguales de energía golpearan ambos lados del detector.

La longitud de onda de absorción es característica del gas y el grado de absorción de la energía infra-roja es una medida de concentración, como consecuencia de la absorción - uno de los lados del detector se calienta menos que el otro y la diferencia en presión causara un movimiento de la flexible membrana. La distancia entre la membrana y el plato de metal fijo del condensador varia de acuerdo a la frecuencia de agitación de la radiación de infra-rojo y esta variación resulta en un cambio en la capacidad eléctrica, de este modo se produce una señal eléctrica que es proporcional a la con-

FIGURA 10

PRINCIPIO DEL ANALIZADOR DE INFRA-ROJO

(a) espiral de alambre calentado; (b) placa rotatoria;
(c) microfono del condensador; (d) instrumento de registro;
(e) celdas de medición; (f) gas succionado (14).



centración del gas. Después de la conversión y amplificación de la señal, esta es registrada.

El analizador de infra-rojo es rápido y mas de un proceso de registro pueden ser controlados por un mismo analizador, puede ser usado para el control de procesos donde los instrumentos de punto de rocío no pueden ser empleados. El analizador de infra-rojo es relativamente caro y complejo y su reparación requiere de habilidad de especialistas electricos. También se necesita una recalibración frecuente del equipo (16,17).

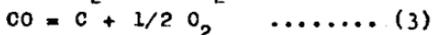
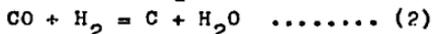
Dj) Sistemas de control computarizados

Los sistemas de control computarizados en tratamientos térmicos no se han utilizado en el pasado por los altos costos que involucran. Se utilizaban instrumentos convencionales como registradores, controles con termopar a los que después se les instalan circuitos, registradores digitales y otras inovaciones diseñadas para incrementar la exactitud del proceso.

Sin embargo, hubo la necesidad de incrementar o aumentar la calidad de producción en adición a los altos costos de energía, los sistemas computarizados brindan un efectivo

costo y sistemas flexibles para controlar estas variables.

El grado en que los compuestos de carbono transfieren - carbono al acero es gobernado por el potencial de carbono de la atmósfera, durante la carburización ocurren las siguientes reacciones:



Donde C es el carbono en solución en el acero. Cada reacción química ofrece una base de medición y control del potencial de carbono en la atmósfera del horno

Sistemas de control a base de CO_2

Este tipo de sistemas utiliza la ecuación (1) en donde la constante de equilibrio esta dada por:

$$K_1 = \frac{A_{\text{C}} P_{\text{CO}_2}}{(P_{\text{CO}})^2}$$

A_{C} = actividad del carbono

P_{CO} = presión parcial de CO

P_{CO_2} = presión parcial de CO_2

despejando Ac_1

$$Ac_1 = K_1 \frac{(P_{CO})^2}{P_{CO_2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Ac_1 es la actividad de carbono relacionada al potencial de carbono como se muestra en la Figura 11. K_1 depende solo de la temperatura y si consideramos la presión parcial de CO también constante, el potencial de carbono se puede controlar por la variación de la presión parcial de CO_2 y el porcentaje en peso de carbono en una atmósfera endotérmica que contiene 20% de CO se muestra en la Figura 12.

Sistema de control a base de punto de rocío

De la ecuación (2) la constante de equilibrio es:

$$K_2 = \frac{Ac_2 P_{H_2O}}{P_{CO} P_{H_2}}$$

Ac_2 = actividad del carbono

P_{H_2O} = presión parcial de H_2O

P_{CO} = presión parcial de CO

P_{H_2} = presión parcial de H_2

Despejando A_{c_2}

$$A_{c_2} = K_2 \frac{P_{CO} P_{H_2}}{P_{H_2O}} \dots\dots\dots (5)$$

Manteniendo constantes la temperatura, P_{CO} y P_{H_2} , el potencial de carbono puede ser controlado por la variación de la presión parcial de H_2O . En la Figura 13 se presentan las isotermas entre el punto de rocío y el porcentaje en peso de carbono para una atmósfera endotérmica que contiene 20% CO - y 40% H_2 .

El contenido de vapor de agua en la atmósfera es medido para determinar el punto de rocío, una ecuación que relaciona el punto de rocío en grados centígrados y P_{H_2O} en la atmósfera es:

$$\text{Punto de rocío } ^\circ C = \frac{5422.18}{(14.7316 - \ln P_{H_2O})} - 273.16$$

En la determinación del punto de rocío también puede ser calculado a partir de la ecuación llamada reacción AGUA-GAS.

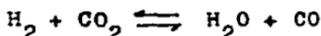


FIGURA 11

Equilibrio isotérmico entre la actividad y la concentración de carbono en austenita a diferentes temperaturas.

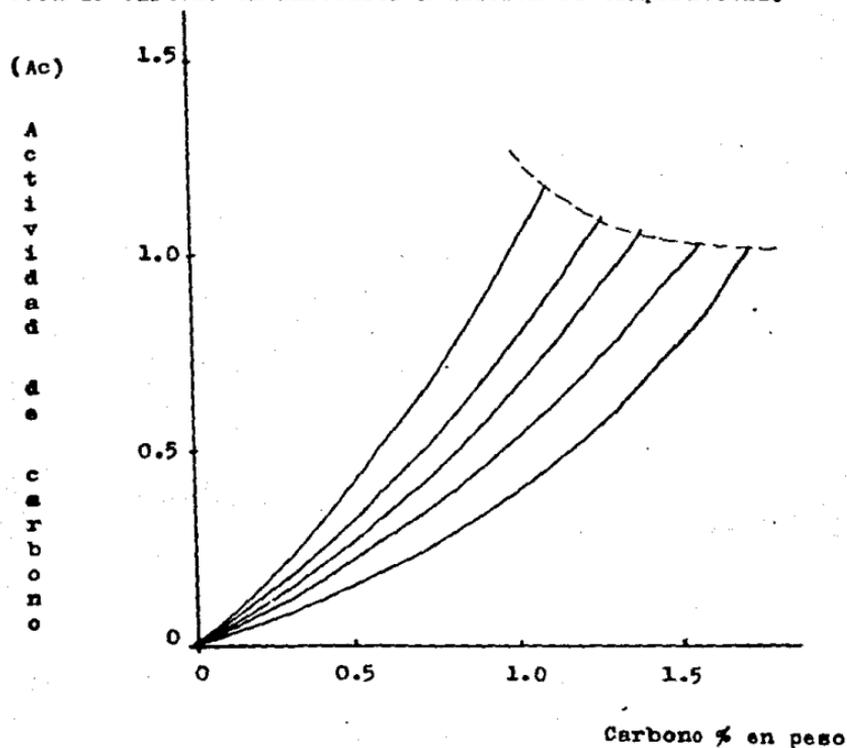


FIGURA 12

Relación entre % CO_2 y % en peso de carbono en una atmósfera endotérmica a diferentes temperaturas

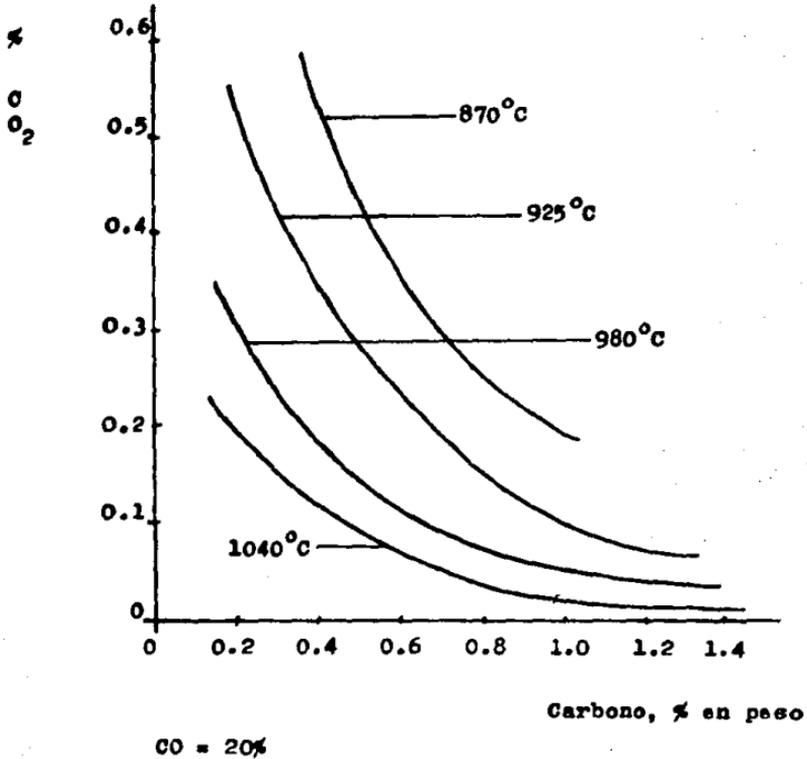
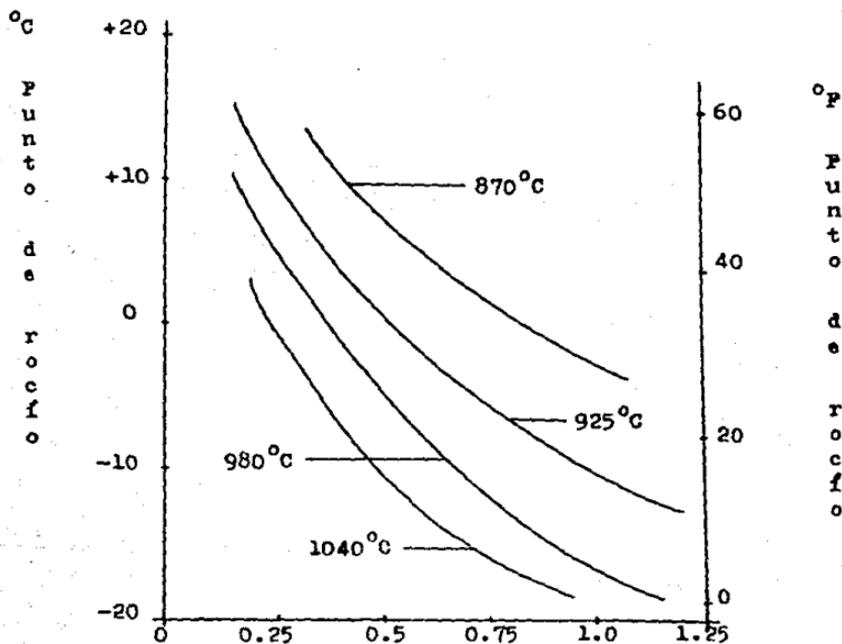


FIGURA 13

Relación entre punto de rocío y el % en peso de carbono en una atmósfera endotérmica a diferentes temperaturas.



Carbono % en peso
 Contenido de CO y H₂ constante a 20% y
 40% respectivamente.

La constante de equilibrio K_2 es:

$$K_2 = \frac{P_{H_2O} P_{CO}}{P_{H_2} P_{CO_2}}$$

Despejando P_{CO_2}

$$P_{CO_2} = \frac{P_{H_2O}}{K_2 P_{H_2}} P_{CO}$$

Sustituyendo P_{CO_2} en la ecuación (4)

$$Ac = K_1 K_2 \frac{P_{CO}}{P_{H_2O}} P_{H_2} \dots\dots\dots (6)$$

De igual manera, manteniendo constantes la temperatura al igual que P_{CO} y P_{H_2} el potencial de carbono es determinado controlando P_{H_2O} .

Sistemas de control a base de O_2

La constante de equilibrio a partir de la ecuación (3)

es:

$$K_3 = \frac{Ac_3 (P_{O_2})^{1/2}}{P_{CO}}$$

Despejando A_{c_3}

$$A_{c_3} = K_3 \frac{P_{CO}}{(P_{O_2})^{1/2}} \dots\dots\dots (7)$$

Si la temperatura es constante y la P_{CO} permanece constante en la atmósfera, el potencial de carbono puede ser controlado por la presión parcial de oxígeno.

Cada uno de estos sistemas de control descritos anteriormente se considera que la temperatura permanece constante. Sin embargo este caso nunca es real en la práctica y además considera que las presiones parciales de CO , CO_2 y H_2 son constantes, lo cual nunca ocurre.

Sistema computarizado

El microprocesador del sistema opera en base a las reacciones (1) y (4), midiendo tanto CO como CO_2 . Además también determina la temperatura del horno. Consecuentemente, todas las variables que afectan el potencial de carbono son monitoreadas. Los resultados obtenidos son computarizados y el potencial de carbono es determinado mediante la ecuación 8.

$$\text{Potencial de carbono} = A + \frac{B}{T} \log A_c \dots\dots\dots (8)$$

- A y B constantes
T temperatura
Ac actividad del carbono

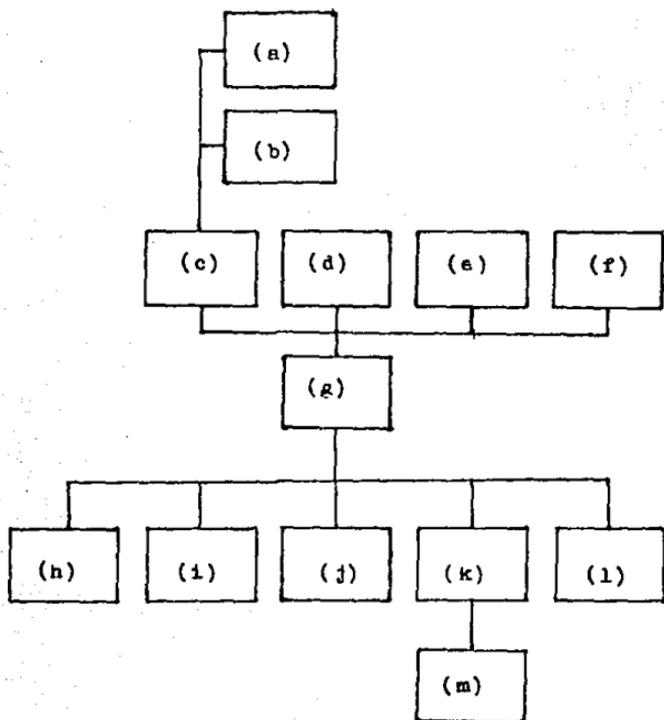
El sistema computarizado también tiene la capacidad de medir CH_4 , aunque este no se involucra en el cálculo del potencial de carbono, limita su concentración en la atmósfera del horno manteniendo las condiciones de equilibrio y minimiza la formación de hollín.

Componentes del sistema

- a.- Toma de muestra
- b.- Calibración por gases de referencia
- c.- Sistema de infra-rojo
- d.- Señal eléctrica del termopar (cálculo de temperatura)
- e.- Control de contactos (abierto- cerrado)
- f.- Fuente de energía y condiciones del sistema
- g.- Microprocesador
- h.- Alimentación de gas de enriquecimiento
- i.- Registrador
- j.- Controles de proporciones
- k.- Control de válvulas
- l.- Luces de alarma
- m.- Motores

La Figura 14 representa un diagrama de los multicomponentes de un sistema computarizado.

Diagrama de un sistema computarizado (3).



C A P I T U L O 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

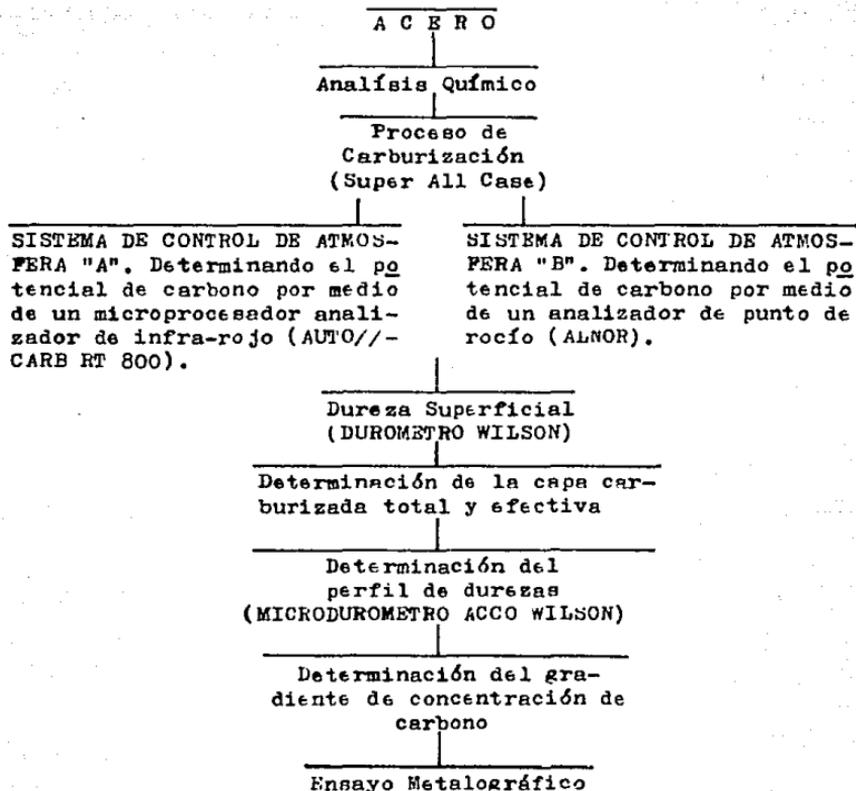
A) DISEÑO EXPERIMENTAL

Para evaluar los dos métodos de control de atmósfera empleados se desarrolló un diagrama de flujo (Fig. 15) que muestra mediante cuadros sinópticos cada uno de los pasos que se siguen durante el proceso experimental. Se inicia con la selección del acero a ser carburizado (Muestra A y B) y la determinación de la composición química.

Se elaboró un ciclo de carburización que consistió en llevar las piezas (muestras problema) hasta una temperatura de 927°C durante un tiempo determinado, utilizando un horno tipo lotes de atmósfera controlada y sistema automático de temple en aceite (SUPER ALL CASE, Fig. 16). La atmósfera empleada fue la clase 302 endotérmica (gas Rx), como gas de enriquecimiento se utilizó gas natural (CH_4). El flujo de gas Rx fue $18 \text{ m}^3/\text{hr}$ en la cámara del horno y $7 \text{ m}^3/\text{hr}$ en la cámara superior para mantener una presión en el horno de 0.2 pulgadas columna de agua, manteniendo un punto de rocío de 72°C en el generador.

F I G U R A 15

DIAGRAMA DE FLUJO



El ciclo de carburización diseñado se llevo a cabo en - cuatro etapas establecidas (Tabla 6), y que son como sigue:

a) Etapa de calentamiento

Donde se recupera la temperatura por efecto de la carga fria dentro del horno y se pretende que la temperatura de la pieza sea homogénea, conveniente para que sea carburizada.

b) Etapa de carburización

Donde existe un alto potencial de carbono para llevar a cabo reacciones que suministran carbono a la superficie del acero.

c) Etapa de difusión

Consiste en disolver y difundir carbono de la superfi-- cie hacia el centro de la pieza.

d) Etapa de igualación

Donde se realiza un descenso de la temperatura desde la etapa de difusión hasta la temperatura óptima para el temple que permite afinar las características como: tamaño de grano uniformidad de la capa carburizada y evitar austenita retenida después del temple.

Los valores de los parámetros establecidos en cada una de las etapas del ciclo térmico (temperatura °C, porcentaje de carbono y tiempo hr-min) se fijaron a base de bibliografía consultada y a los cálculos realizados en la determina-

T A B L A 6

CICLO DE CARBURIZACION DISEÑADO

| ETAPAS | PARAMETROS ESTABLECIDOS | | | GASES DE PROCESO | | |
|-------------------|-------------------------|----------------|--------------------|------------------|------|-----------------|
| | TEMPERATURA (°C) | CARBONO (%) | TIEMPO (hr:min) | CH ₄ | Aire | NH ₃ |
| CALENTAMIENTO | 927 | 0.80 | 0:10 | S | N | N |
| CARBURIZADO | 927 | 1.10 | 3:00 | S | N | N |
| DIFUSION | 927 | 0.90 | 1:45 | S | N | N |
| IGUALACION | 870 | 0.70 | 0:15 | S | N | N |
| ENFRIAMIENTO "Si" | | | | | | |

Gases de proceso 84°C abajo de temperatura establecida

S = Si se requirio

N = No se requirio

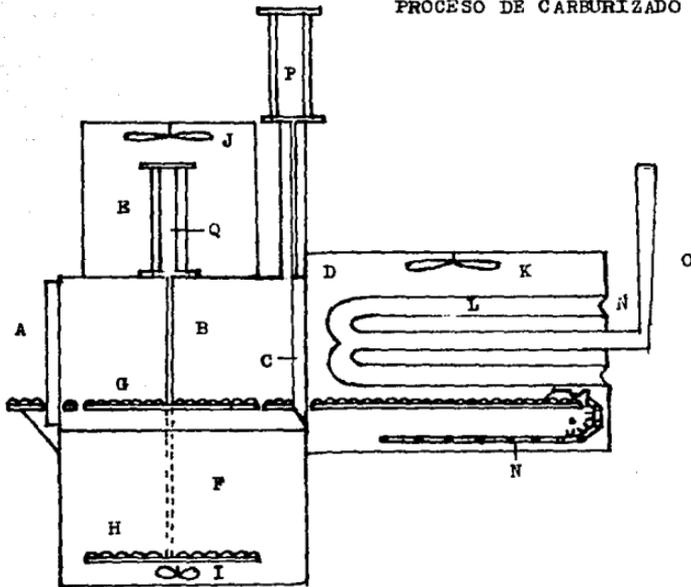
Los asteriscos indican que el tiempo depende de la temperatura y del % de carbono. Hay opción a una etapa de enfriamiento rápida, indicado por "si"

ción de profundidad de capa carburizada (Tabla 7).

Como método de control de atmósfera para la muestra A se utilizó un microprocesador con analizador de infra-rojo integrado que determina el potencial de carbono automáticamente, y como método de control para la muestra B se utilizó un instrumento de cámara de niebla que determina el punto de rocío y evalúa el potencial de carbono relacionándolo mediante gráfica los valores obtenidos.

Para conocer el comportamiento de cada ciclo de carburización en base al sistema de control de atmósfera empleado, se realizaron varias pruebas como: dureza superficial que permite evaluar en una forma indirecta el incremento en el contenido de carbono dependiendo de la dureza obtenida; determinación de la capa carburizada total y efectiva con el fin de conocer la penetración de carbono en el acero empleado en función de los parámetros establecidos en el ciclo; determinación del perfil de dureza y gradiente de concentración para evaluar el sistema de control de atmósfera utilizado en cada uno de los métodos

HORNO DE ATMOSFERA PARA
PROCESO DE CARBURIZADO



- | | | | |
|---|----------------------------------|---|--------------------------------------|
| A | Puerta del vestíbulo | J | Ventilador de recirculación |
| B | Vestíbulo | K | Ventilador recirculador de atmósfera |
| C | Puerta del horno | L | Tubo tridente |
| D | Hogar del horno | M | Riel guía |
| E | Cámara superior | N | Cadena |
| F | Tanque de aceite | Ñ | Quemador |
| G | Plataforma superior del elevador | O | Eductor |
| H | Plataforma inferior del elevador | P | Cilindro neumático para puerta |
| I | Agitador del aceite | Q | Cilindro neumático para elevador |

T A B L A 7

CALCULOS PARA DETERMINAR CAPA CARBURIZADA TOTAL
y EFECTIVA

CAPA CARBURIZADA TOTAL (d)

Utilizando la ecuación (1)

$$d = 802.6 \text{ t}/10^{(3720/T)} \dots\dots\dots \text{ecuación (1)}$$

$$T = 927^{\circ}\text{C} + 273 = 1200^{\circ}\text{K}$$

$$d = 1.38 \text{ mm} = 1380 \text{ um}$$

CAPA CARBURIZADA EFECTIVA (x)

Utilizando la ecuación (7) para el cálculo del contenido de carbono normalizado C^+

$$C^+ = \frac{C - C_0}{C_s - C_0}$$

 C_0 = % C en el acero C_s = % C máximo en la etapa de carburización C = 0.4 % C para capa efectivaMediante la ecuación (5) se determina la constante de difusión a 1200°K

$$D = 16.2 \exp \frac{(-137800)}{8.314 \times 1200}$$

$$D = 1.626 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{seg}$$

De la Figura 3 se determina el valor de la profundidad - normalizada bajo la superficie ($\frac{x}{\sqrt{Dt}}$) extrapolando C^+ con la curva

$$\frac{x}{\sqrt{Dt}} = 1.5$$

$$t = 17100 \text{ seg} = 4:75 \text{ horas}$$

Despejando x se que la profundidad de capa efectiva es:

$$x = 1.5 \sqrt{1.626 \times 10^{-5}} \times 17100$$

$$x = 0.790 \text{ mm} = 790 \text{ um}$$

B) MATERIAL Y METODOS

MATERIAL

El tipo de acero empleado para las muestras "A" y "B" - es un acero de bajo carbono que pertenece al grupo de aceros al carbono no sulfurados en el que el contenido máximo de manganeso es 1.0%. De acuerdo a AISI es un acero 1008 y su composición química es: 0.105% de carbono máximo nominal, 0.30 - 0.50% de manganeso, 0.40% de fósforo como máximo, 0.5 % de azufre como máximo.

Aceros similares: UNS G 10080; ASTM A 108, A 510, A 519; SAE J 403, J 412, J 414.

METODOS

Análisis químico

El método utilizado para determinar la composición química de las muestras "A" y "B" fue por medio de espectrometría de emisión óptica. Es una técnica para detectar y cuantificar la presencia de elementos específicos en un material. Utiliza el principio de que cada elemento tiene una estructura atómica única y cuando se le adiciona energía cada uno emite una luz o longitud de onda característica a lo largo -

del espectro, que pueden ser diferenciadas. La concentración del elemento puede ser medida porque la intensidad de la luz radiada es proporcional a la cantidad del elemento presente en la muestra.

El espectro de emisión contiene tres componentes básicos:

- 1.- Fuente de excitación para proveer energía a la muestra.
- 2.- Sistema óptico para separar y resolver la emisión de longitudes de onda provenientes de la excitación.
- 3.- Sistema de detección y medición para detectar el haz de varias longitudes de onda y medir sus intensidades con un sistema de lectura externo para presentar la información (18).

El SPECTROLAB debe calibrarse antes de realizar un análisis, quemando por tres ocasiones una muestra patrón. Los valores de frecuencia e intensidad se promedian y comparan contra los valores que están memorizados en el microprocesador para realizar los ajustes correspondientes.

La muestra a analizar estuvo libre de impurezas como son grasas o aceites y la superficie se lijó con lija de grano 60-40, posteriormente se realizó el análisis del acero y los valores obtenidos se reportaron en por ciento en peso del elemento.

Sistema de control de atmósfera "A"

En el control de atmósfera automático es necesario introducir los valores de los parámetros de temperatura, % de carbono, tiempos y condiciones del ciclo de carburización en un programa llamado Net Work Control Sistem mediante una computadora (IBM). Todo el ciclo es enviado y memorizado a un microprocesador (AUTOCARB RT 800) en el momento que el operador llama, el número de carga asignado para dicho ciclo, arranca cuando la puerta del horno se abre para introducir la carga.

El microprocesador monitorea las válvulas que operan los quemadores y las válvulas que adicionan el gas de enriquecimiento por medio de la señal de un termopar y por el análisis de infrarojo del contenido de CO y CO₂ en la atmósfera para determinar el potencial de carbono respectivamente. Los análisis de infrarojo se realizan cada minuto aproximadamente y se presentan en la pantalla del microprocesador al igual que el contenido de CH₄. Todos los cálculos del potencial de carbono que realiza el microprocesador se envían a un sistema estadístico que contiene el programa Net Work Control, donde al finalizar el ciclo reporta la media y desviación estándar de cada etapa durante el ciclo.

Sistema de control de atmósfera "B"

La atmósfera se controla al determinar el punto de rocío cada 30 minutos utilizando una cámara de niebla (ALNOR). El gas de enriquecimiento se introdujo al horno en forma manual dependiendo del punto de rocío determinado en cada ensayo. El ensayo consistió en tomar una muestra mediante una bomba que contiene el aparato y someter la muestra a una presión por unos segundos hasta estabilizar la temperatura, después se abre una válvula que libera la presión y crea un enfriamiento adiabático que causa una condensación visible o niebla suspendida en la cámara. El punto de rocío se determinó al relacionar la temperatura del aparato y la presión necesaria para alcanzar a observar la niebla.

Dureza superficial

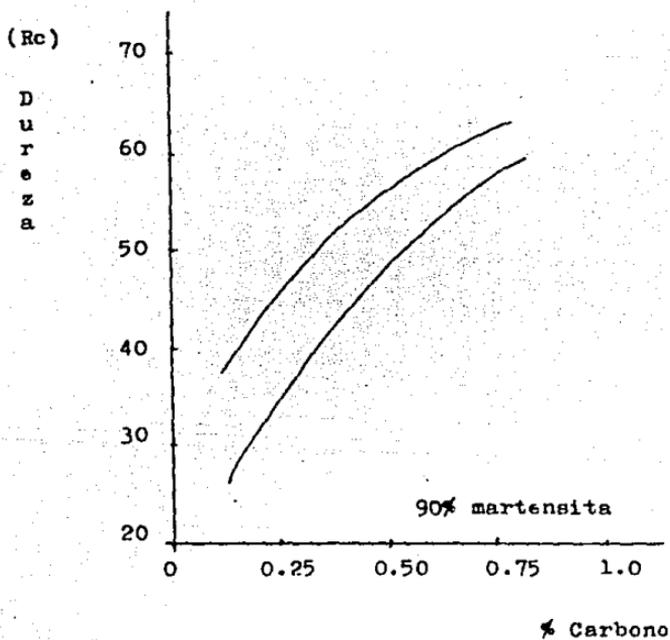
Se analizó la dureza superficial de las muestras "A" y "B" mediante el ensayo Rockwell superficial después del ciclo de carburización por medio de un durómetro (Wilson serie 500) en escala 15N (15 Kg ensayo con diamante). La dureza que se alcanza en un acero depende de su contenido de carbono y medio de severidad utilizado en el proceso de templado. La Figura 17 muestra la relación del efecto del porcentaje de carbono con respecto al grado de dureza.

Determinación de la capa carburizada efectiva

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

FIGURA 17

Relación del contenido de carbono y porcentaje de martensita contra dureza en Rc (3).



En cada uno de los procesos de carburización se introdujo una muestra de referencia de acero (MS1002 según especificaciones Caterpillar equivalente a un acero 1008 clasificación AISI) de grano grueso junto con las muestras problema "A" y "B". Al final del ciclo, cada muestra de referencia fue nuevamente calentada en una mufla a una temperatura de 780°C , durante 22 minutos y templadas en agua a $20-25^{\circ}\text{C}$, para determinar la profundidad de capa al 0.40% de carbono.

Las muestras de referencia fueron quebradas transversalmente y la cara de la fractura se atacó con nital al 10% durante 8 segundos. La profundidad de capa se midió perpendicularmente de la superficie de la pieza hasta el punto donde aparece ferrita libre. Se realizó esta operación en un microscopio metalográfico (OLYMPUS TOKYO).

La capa rica en carbono se delimita porque es más oscura que el corazón de la muestra después de ser atacada químicamente. En este proceso es muy importante que la temperatura (780°C) y el tiempo (12 min.) sean exactos, porque a esa temperatura se disuelve 0.4% de carbono en la fase austenita del diagrama de equilibrio Fe-Fe₃C y después de ser templada la pieza; se logra una transformación martensítica exclusivamente carbono que se tenía en solución a 780°C . La profundidad de capa efectiva es la distancia de la superficie de la

pieza hasta donde se encuentra una dureza de 50 Rc. La relación %C contra dureza en un acero después de un proceso de temple a 50 Rc equivale a un contenido de 0.40% de carbono en peso.

Determinación de la capa carburizada total

Para determinar la capa total las muestras "A" y "B" se cortaron y la cara transversal se ataco químicamente. La capa oscura formada representa la capa de carbono total obtenida.

Determinación del perfil de dureza

Las muestras "A" y "B" fueron montadas en baquelita con el fin de tener una base firme al revisar los valores de microdureza después del ciclo de carburización. La preparación de las muestras se realizó en la forma convencionalmente rutinaria hasta un pulido fino con alúmina de tamaño de partícula de 0.03 u. y atacadas químicamente.

La muestra se colocó en el microdurómetro bajo un objetivo de 20X y se ajustó al disco hasta apreciar claramente la microestructura. Cada lectura fue realizada en un rango de 0.125 mm de la superficie de la pieza hacia el centro de

misma. La carga utilizada fue de 500 g. y la escala en dureza Knoop convertida a grados de dureza Rockwell (Rc).

Determinación del gradiente de concentración de carbono

El contenido de carbono se determinó por medio de análisis espectrográfico. Este método usa un espectrometro al vacío (ESPECTROLAB) que permite medir las líneas espectrales en la región ultravioleta donde el aire puede comunmente absorber mucha de la radiación emitida.

El análisis espectrográfico consistió en desvistar la pieza cada 0.010 milésimas aproximadamente y realizar un análisis en cada desvaste para conocer el perfil de la concentración de carbono de la superficie al centro de la pieza.

C A P I T U L O 4

RESULTADOS Y DISCUSION

ANALISIS QUIMICO

En la Tabla 8 se presenta el análisis químico antes del proceso de carburización del acero utilizado tanto para el sistema de control "A" como para el "B", posteriormente se realizó la comparación en cuanto a porcentaje en carbono de los sistemas de control atmosféricos.

Esta prueba se realizó utilizando un aparato de espectrometría de emisión óptica que mide las longitudes de onda de cada elemento que contiene la muestra transformada automáticamente en porcentaje en peso. De acuerdo a los resultados obtenidos se trata de un acero de bajo contenido de carbono (0.08%) que puede clasificarse por su contenido en elementos de aleación como un 1008 según la clasificación AISI. Se empleó un acero bajo en carbono con el fin de conseguir una diferencia marcada en el contenido de carbono y propiedades mecánicas después del ciclo térmico.

TABLA 8

ANALISIS QUIMICO DEL ACERO

| CUEHA | C | Mn | P | S | Si | Cu | Ni | Cr | V |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 | 0.050 | 0.792 | 0.013 | 0.0007 | 0.165 | 0.251 | 0.032 | 0.000 | 0.0033 |
| 2 | 0.030 | 0.789 | 0.012 | 0.0000 | 0.169 | 0.237 | 0.032 | 0.000 | 0.0030 |
| 3 | 0.033 | 0.783 | 0.012 | 0.0000 | 0.164 | 0.241 | 0.033 | 0.000 | 0.0030 |
| 7x | 0.031 | 0.783 | 0.013 | 0.0002 | 0.163 | 0.243 | 0.033 | 0.000 | 0.0031 |

| | Mo | Ti | Al | Nb | Fe |
|----|-------|--------|-------|--------|-------|
| 1 | 0.001 | 0.0065 | 0.015 | 0.0100 | 98.60 |
| 2 | 0.007 | 0.0067 | 0.015 | 0.0094 | 98.63 |
| 3 | 0.006 | 0.0066 | 0.014 | 0.0092 | 98.62 |
| 7x | 0.008 | 0.0066 | 0.013 | 0.0100 | 98.62 |

PROCESO DE CARBURIZACION

SISTEMA DE CONTROL DE ATMOSFERA "A"

En la Tabla 9 se presenta la información recopilada del microprocesador con analizador de infrarojo integrado del ciclo de carburización "A", el cual muestra las etapas involucradas en el ciclo con referencia a los parámetros establecidos (temperatura, potencial de carbono y tiempo), y los rangos de variación, media y desviación estándar de los mismos. Calculados por medio de un sistema estadístico que contiene el microprocesador.

En la etapa de CALENTAMIENTO, el parámetro involucrado tiempo, registró 1 hora; 29 minutos para alcanzar la temperatura establecida (927°C). En la Gráfica 1 (etapa A) se aprecia un decremento rápido de la temperatura por efecto de la carga fría dentro del horno, así como también su recuperación hasta alcanzar el valor fijado.

En la segunda etapa, CARBURIZACION la temperatura se mantuvo casi constante con una mínima variación ($\overline{DS} = 1.41$). El porcentaje de carbono registró una media de $1.10\% \text{ C}$ ($\overline{DS} = 0.086$) similar al parámetro establecido y un tiempo de 3 horas; 9 minutos, notándose un aumento de 9 minutos con respec

to al tiempo fijado debido a los rangos de variación de los parámetros involucrados. Las muestras de tomadas constante--mente y la frecuencia de los análisis de infrarojo minimizan los rangos de variación en el potencial de carbono.

En la tercera etapa, DIPUSION la temperatura se ajusta a la requerida, ya que registra una media de 927°C ($\overline{DS} = 0.32$). El porcentaje de carbono muestra una media de $\overline{X} = 0.89$, 0.01% abajo del valor fijado con una mínima desviación ($\overline{DS} = 0.075$). El tiempo necesario fue de 1 hora; 51 minutos es decir 6 minutos mas del tiempo fijado, necesarios para alcanzar los parámetros establecidos.

En la uráfica 1 (etapa C) se observa el registro de la temperatura que permanece sin cambios importantes debido a la respuesta rápida del descenso del porcentaje de carbono para alcanzar el valor fijado en esta etapa. La temperatura sin cambios permite que no exista variación en el potencial de carbono. En esta etapa la temperatura permanece constante y el porcentaje de carbono se reduce para lograr que el contenido de carbono en la superficie del acero difunda mas rápidamente y de manera uniforme hacia el interior de la pieza.

La última etapa, IGUALACION registra una temperatura con $\overline{X} = 865^{\circ}\text{C}$ ($\overline{DS} = 0.76$) y en el porcentaje de carbono se -

obtuvo una $\bar{X} = 0.73$ ($\overline{DS} = 0.092$). el tiempo necesario para -
lograr ajustar condiciones establecidas fue de 39 minutos, -
24 minutos mas al tiempo fijado. En esta etapa decrece la -
temperatura para preparar las piezas a ser templadas evitando
distorsión y austenita retenida. También es importante dismi-
nuir el porcentaje de carbono con el fin de evitar depósitos
de hollín en la cámara del horno lo cual conduce a un ahorro
de energéticos.

La Gráfica 1 muestra el descenso rápido de la temperatu-
ra por efecto del enfriamiento en la cámara del horno, así -
como también el decremento del potencial de carbono para -
ajustarse al valor fijado. Es importante apreciar en el des-
censo de la temperatura como se afecta el potencial de carbo-
no que se controla hasta que la temperatura se mantiene prác-
ticamente constante.

Al terminar la etapa de igualación la carga fue llevada
a temple en aceite por un tiempo de permanencia de 10 minu-
tos. El temple tiene por objeto endurecer la capa rica en -
carbono del acero involucrado. Durante el proceso de carburi-
zación se utilizó gas natural en todas las etapas como gas -
de enriquecimiento para lograr alcanzar los potenciales de -
carbono establecidos en las etapas, el flujo a la cámara fue
controlado automáticamente.

Los gases de proceso en este caso GAS NATURAL tiene la condición de que 84°C abajo de la temperatura fijada no se permite su entrada por seguridad del equipo. El trabajar a una temperatura de 927°C permite realizar un proceso de carburización razonablemente rápido porque se puede disolver 1.10% C en la fase hierro austenita del acero, potencial de carbono para conseguir una capa carburizada de 0.790 mm de profundidad.

El sistema de control de atmósfera de la muestra "A" tiene la condición de correr el tiempo fijado hasta que las condiciones de porcentaje de carbono y temperatura han sido alcanzadas dentro de un rango ajustado enteramente. Esta cualidad permite ajustar automáticamente las variables de cada una de las etapas del ciclo térmico.

T A B L A 9

SISTEMA DE CONTROL DE ATMOSFERA 'A'

| ETAPAS | PARAMETROS ESTABLECIDOS | RANGOS DE VARIACION | X | DESV. ESTAND. % |
|----------------|-------------------------|---------------------|------|-----------------|
| CALENTAMIENTO | | | | |
| Temp. (C) | 927 | - | | |
| Potencial % C | 0.80 | - | | |
| Tiempo(Hr-min) | 0:10 | 1:29 | | |
| CARBURIZACION | | | | |
| Temp. (C) | 927 | 925-932 | 927 | 1.41 |
| Potencial % C | 1.10 | 1.08-1.12 | 1.10 | 0.066 |
| Tiempo(Hr-min) | 3:00 | 1:51 | | |
| REFUSION | | | | |
| Temp. (C) | 927 | 926-928 | 927 | 0.32 |
| Potencial % C | 0.90 | 0.88-0.93 | 0.89 | 0.075 |
| Tiempo(Hr-min) | | | | |
| IGUALACION | | | | |
| Temp. (C) | 870 | 864-867 | 865 | 0.76 |
| Potencial % C | 0.70 | 0.72-0.75 | 0.73 | 0.092 |
| Tiempo(Hr-min) | 0:15 | 0:39 | | |

Tiempo en el baño de aceite 10 min.

Gas de enriquecimiento utilizado = gas natural.

Suministro de gas - Automatico en las cuatro etapas.

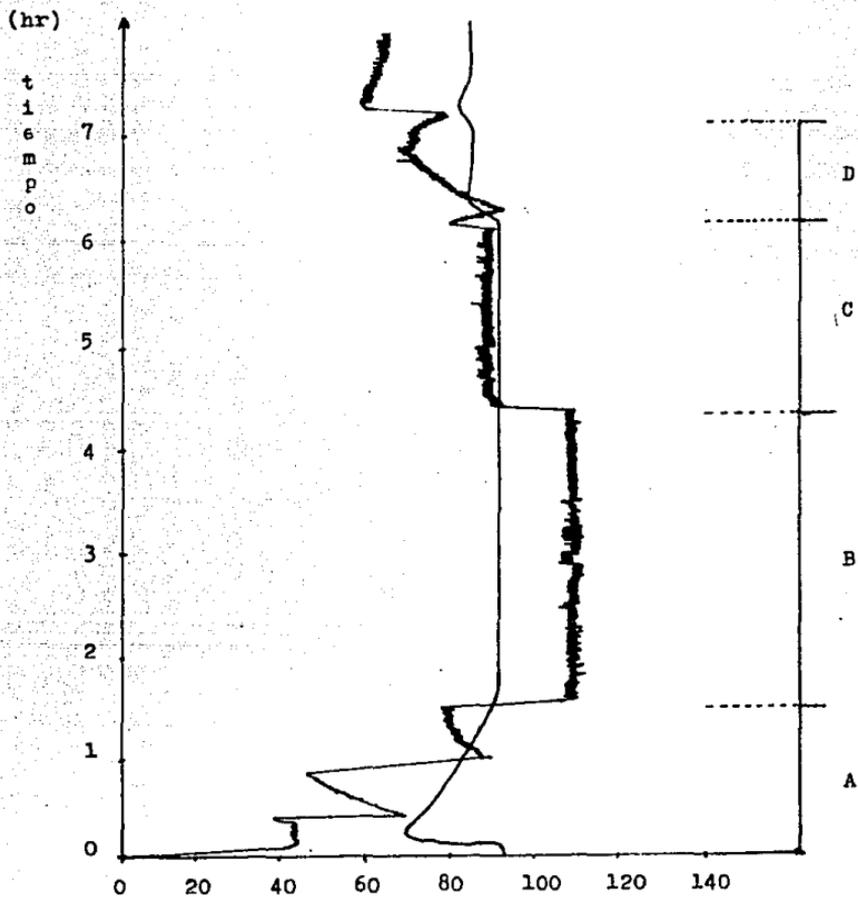
Sistema de enfriamiento |

para alcanzar la etapa |-- Aire forzado.

de IGUALACION |

Tiempo total DEL CICLO - 7:08 (Hr-min)

SISTEMA DE CONTROL DE ATMOSFERA "A"



| ETAPA | DESCRIPCION |
|-------|---------------|
| A | Calentamiento |
| B | Carburización |
| C | Difusión |
| D | Igualación |

— Temp. °C X 10
 - - - % Carbono X 10⁻²

SISTEMA DE CONTROL DE ATMOSFERA "B"

En la Tabla 10 se presentan los resultados del ciclo de carburización del experimento "B", en donde se utilizó un sistema de control de atmósfera de cámara de niebla que determina el punto de rocío, los cuales fueron tomados a intervalos de tiempo aproximadamente de 30 minutos durante el ciclo. El flujo de gas de enriquecimiento (CH_4) se controló manualmente y se introdujo a $1.41 \text{ m}^3/\text{hr}$ al alcanzar la temperatura de la etapa de calentamiento (927°C).

Durante la etapa de CARBURIZACION se observó que el valor de punto de rocío tendía a disminuir demasiado rápido y se optó por bajar el flujo de gas CH_4 a $0.70 \text{ m}^3/\text{hr}$ con el fin de encontrar un punto de rocío constante a la temperatura de trabajo.

En la etapa de DIFUSION se mantuvo el mismo flujo de gas CH_4 considerando que el potencial obtenido con esa cantidad de flujo era muy cercano al parámetro establecido para esta etapa (0.81% C). Sin embargo, se notó un nuevo incremento en el potencial de carbono de la cámara del horno al obtener puntos de rocío cada vez mas negativos, motivo por el cual se restringió a $0.14 \text{ m}^3/\text{hr}$ el flujo de gas CH_4 .

En la etapa de IGUALACION se cerró el suministro de gas

CH_4 para evitar depósitos de hollín en la cámara del horno - por el descenso de la temperatura. Durante esta etapa se tomaron dos datos en donde se aprecia el aumento en el punto de rocío pero además un gran incremento del potencial de carbono por efecto de la temperatura.

En la Gráfica 2 se presentan las curvas de temperatura, porcentaje de carbono y puntos de rocío de los datos obtenidos durante el desarrollo de este ciclo. En esta gráfica se observan grandes irregularidades en el control del potencial de carbono por efecto de las manipulaciones del gas de enriquecimiento (CH_4) que se realizaron con el fin de encontrar o acercarse a los parámetros establecidos del ciclo térmico diseñado.

En el sistema de control de la muestra "B" las variaciones en el punto de rocío son causadas por el efecto de la alimentación variable del metano como gas de enriquecimiento, considerando que el punto de rocío del gas Rx en el generador se mantuvo constante.

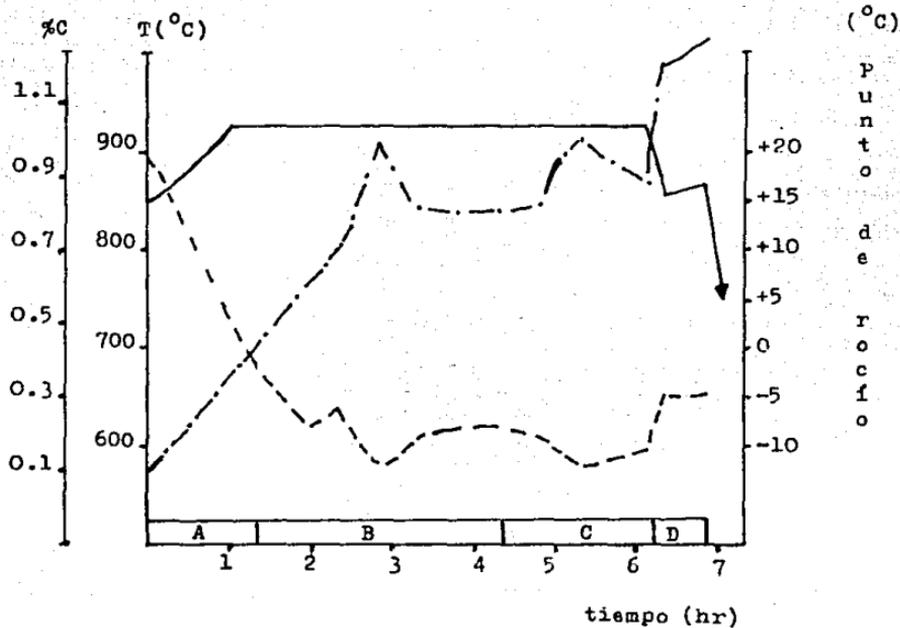
TABLA 10

SISTEMA DE CONTROL DE ATMOSFERA "A"

| ETAPA | LECTURA No. | TIEMPO Hr. | TEMP. °C | PTO. DE COND. | PLUGU. MC | |
|---------------|-------------|------------|----------|---------------|-----------|------|
| | | | | | 3 | 4 |
| CALENTAMIENTO | 1 | - | 850 | 100 | 0.13 | - |
| | 2 | 1.16 | 927 | - | - | 1.57 |
| | 3 | 1.33 | 927 | - | - | 1.57 |
| CARRUZACION | 1 | 0.50 | 927 | -8 | 0.43 | 1.71 |
| | 2 | 0.71 | 927 | -8 | 0.76 | 1.61 |
| | 3 | 1.00 | 927 | -6 | 0.77 | 1.61 |
| | 4 | 1.50 | 927 | -12 | 1.00 | 0.70 |
| | 5 | 2.50 | 927 | -8 | 0.77 | 0.70 |
| | 6 | 3.50 | 927 | -8 | 0.77 | 0.70 |
| | 7 | 3.00 | 927 | -7 | 0.77 | 0.70 |
| DIFUSION | 1 | 0.50 | 927 | -8 | 0.43 | 1.71 |
| | 2 | 0.83 | 927 | -11 | 0.88 | 0.70 |
| | 3 | 1.00 | 927 | -12 | 1.00 | 0.70 |
| | 4 | 1.09 | 927 | -10 | 0.88 | 0.11 |
| | 5 | 1.51 | 927 | -10 | 0.88 | 0.11 |
| | 6 | 1.75 | 927 | -10 | 0.88 | - |
| DIFUSION | 1 | 0.10 | 853 | -7 | 1.00 | - |
| | 2 | 0.30 | 966 | -5 | 1.35 | - |

TIEMPO TOTAL DEL CICLO = 6.26 Hr.
6.25 Hr. max.

Sistema de Control de Atmósfera "B"



- Temperatura
- .-.- Punto de rocío
- % Carbono

| ETAPA | DESCRIPCION |
|-------|---------------|
| A | Calentamiento |
| B | Carburización |
| C | Difusión |
| D | Igualación |

COMPARACION DE CONTROL ATMOSFERICO

Con el fin de evaluar estadísticamente los dos métodos de control utilizados en base a los resultados obtenidos de cada sistema, se tomaron las medias estadísticas correspondientes al rango de variación (límite alto y bajo) de cada una de las etapas involucradas en el ciclo y se calculó su desviación estándar con respecto al parámetro establecido del ciclo diseñado en el porcentaje de carbono.

Como se aprecia, el sistema de control atmosférico "A" presenta rangos de variación mas cercanos al parámetro establecido. Por ende su media estadística y desviación estándar reflejan que un sistema con determinación del porcentaje de carbono mediante análisis de infrarojo y control de sus variables automáticamente. Se tiene un mejor control que un sistema que determina puntos intermitentes durante el ciclo con adiciones de gas de enriquecimiento manualmente (Tabla 11).

TABLA 11

COMPARACION DE CONTROL ATMOSFERICO

| ETAPA | PARAMETRO ESTABLECIDO XC | RANGO DE CONTROL A | RANGO DE CONTROL B | - | - | - | - |
|-------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|------|-------|-------|-------|
| | | | | X/A | X/B | OS/A | OS/B |
| CAER. | 1.10 | 1.08-1.12 | 1.04 - 1.0 | 1.10 | 0.7 | 0.0 | 0.2 |
| DIF. | 0.30 | 0.58-0.93 | 0.8 - 0.92 | 0.89 | 0.82 | 0.005 | 0.02 |
| IGUA | 0.70 | 0.72-0.75 | 0.9 - 1.25 | 0.73 | 1.075 | 0.015 | 0.175 |

DUREZA SUPERFICIAL

Las Tablas 12 y 13 presentan los valores de las pruebas de dureza superficial en escala 15 N y su equivalente en escala Rc por ser mas utilizada. Este ensayo es uno de los mas rápidos que nos permiten conocer los resultados del ciclo - térmico efectuado y propiedades mecánicas de las piezas, mas no revela el comportamiento del ciclo de carburización.

Se utilizó la escala 15N por ser mas conveniente para - capas carburizadas de una profundidad menor a 0.889 mm (3). Los valores de dureza obtenidos después de los procesos de - carburización y temple directo en aceite, son muy similares lo cual significa que en ambos procesos el acero (1008) incremento su contenido de carbono en la superficie.

Los valores obtenidos de 59 y 60 Rc representan una dureza superficial óptima para una pieza que es expuesta a desgaste.

DUREZA SUPERFICIAL

T A B L A 12

Sistema de Control Atmosférico "A"

| Lectura No | Dureza Superficial | |
|---------------|--------------------|----|
| | 15N | Rc |
| 1 | 89 | 59 |
| 2 | 90 | 60 |
| 3 | 90 | 60 |
| 4 | 90 | 60 |
| 5 | 90 | 60 |

T A B L A 13

Sistema de Control Atmosférico "B"

| Lectura No | Dureza Superficial | |
|---------------|--------------------|----|
| | 15N | Rc |
| 1 | 89 | 59 |
| 2 | 90 | 60 |
| 3 | 90 | 60 |
| 4 | 89 | 59 |
| 5 | 90 | 60 |

DETERMINACION DE LA CAPA CARBURIZADA EFECTIVA Y TOTAL

En la Tabla 14 se muestran los valores que se obtuvieron de la profundidad de carbono a 0.40% C que representa según la literatura (Figura 17) 50 Rc y se conoce como capa efectiva de carbono. Este ensayo se realizó mediante una práctica indirecta que permite conocer este valor sin necesidad de sacrificar una pieza.

Los valores de ambos ciclos denotan una profundidad de carbono de 0.889 mm que representa la profundidad de la capa dura esperada de acuerdo al ciclo de carburización diseñado, por lo que se refiere a la temperatura, tiempo y alto potencial de carbono en la cámara del horno. Este valor es muy empleado en la industria porque permite conocer la profundidad de capa dura y en muchos casos determina el tiempo del ciclo de carburización.

La profundidad de capa carburizada total, la cual es la distancia de la superficie hasta encontrar ferrita de 1.270 mm y 1.290 mm se determinó para los ciclos "A" y "B" respectivamente. Esta medida representa la penetración máxima de carbono que se obtiene por el ciclo térmico diseñado. Los resultados muestran una pequeña diferencia en ambos ciclos, siendo el "B" más profundo a causa del incremento no contro-

lado del potencial de carbono que se tuvo durante el proceso.

Comparando los resultados con el valor calculado teóricamente (1.38 mm) existe una diferencia de 0.11 mm y 0.09 mm (ciclos "A" y "B" respectivamente) para alcanzar dicho valor. Esta diferencia es bastante aceptable cuando los límites de calidad prácticamente oscilan en ± 0.127 mm.

La igualdad en los resultados son causa de que la temperatura y tiempos en cada ciclo fueron prácticamente los mismos, por lo que se refiere al potencial de carbono se considera que se mantuvo elevado o cercano a 0.8% C.

T A B L A 14

DETERMINACION DE LA CAPA EFECTIVA A 0.40% DE CARBONO

| Ciclo de carburización No | Muestra de referencia No | Profundidad de capa carburizada al 0.40%C (mm) |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| A | 1 | 0.889 |
| B | 2 | 0.889 |

DETERMINACION DE LA CAPA TOTAL POR ATAQUE QUIMICO

| Muestra No | Profundidad de la capa carburizada (mm) |
|---------------|-----------------------------------------|
| A | 1.210 - 1.270 |
| B | 1.210 - 1.290 |

PERFIL DE DURRZA

Este análisis se realiza para conocer el comportamiento del ciclo térmico desarrollado, el cual se encuentra al determinar la dureza desde la superficie de la pieza hasta el corazón de la misma. En las Tablas 15 y 16 se presentan los valores de dureza de los ciclos "A" y "B" respectivamente - los cuales se obtienen a diferentes profundidades. En estas tablas se parecía que conforme aumenta la profundidad disminuye la dureza causado por las reacciones carburantes que se producen en la superficie de las piezas por estar en contacto con la atmósfera del horno y a la difusión de carbono que esta en función del coeficiente de difusión del material, atmósfera, temperatura y tiempo.

La dureza Knoop es una escala utilizada en ensayos de microdureza donde las impresiones de la marca son pequeñas - en forma de pirámide.

La Gráfica 3 relaciona los perfiles de dureza de cada uno de los ciclos desarrollados, analizando el perfil "A" se observa que la dureza decrece uniformemente hacia el interior de la pieza, mientras el perfil "B" presenta variaciones en la dureza y a una profundidad de 0.8 mm la línea del perfil cae bruscamente en relación al perfil "A".

Es necesario hacer notar que durante el ciclo de carburación "B" donde se utilizó un instrumento de cámara de niebla para controlar la atmósfera del horno se provocaron alteraciones en la difusión del carbono por los ajustes que se efectúan en el gas de enriquecimiento (CH_4) con el fin de encontrar el parámetro establecido del $\%C$ en la cámara del horno.

En el ciclo "A" el control de atmósfera utilizado permite un equilibrio provocando que la difusión de carbono en el acero sea mas estable. Al comparar en la Gráfica 3 los perfiles de dureza de los dos experimentos, se observa que la muestra "A" tiene una dureza mayor en la superficie debido prácticamente a los parámetros del proceso de temple, si consideramos que el potencial de carbono registrado durante el proceso de la muestra "B" fue mas elevado.

Siguiendo las curvas se presenta un incremento en la dureza en "B" que puede representarse por presencia de un mayor contenido de carbono en solución. Posteriormente la curva "B" cae por debajo de "A" por efecto de deficiente difusión durante el proceso de carburización.

T A B L A 15

PERFIL DE DUREZA

Sistema de Control de Atmósfera "B"

| PRUEBA | DUREZA | | | |
|--------|--------|-------------------|-----------------|--------------|
| | No | Profundidad mm | escala Knoop | escala Rc |
| 1 | | 0.125 | 650 | 56 |
| 2 | | 0.250 | 650 | 56 |
| 3 | | 0.375 | 638 | 55 |
| 4 | | 0.500 | 575 | 52 |
| 5 | | 0.625 | 575 | 52 |
| 6 | | 0.750 | 547 | 50 |
| 7 | | 0.875 | 465 | 45 |
| 8 | | 1.000 | 425 | 42 |
| 9 | | 1.125 | 330 | 33 |
| 10 | | 1.250 | 280 | 24 |

T A B L A 16

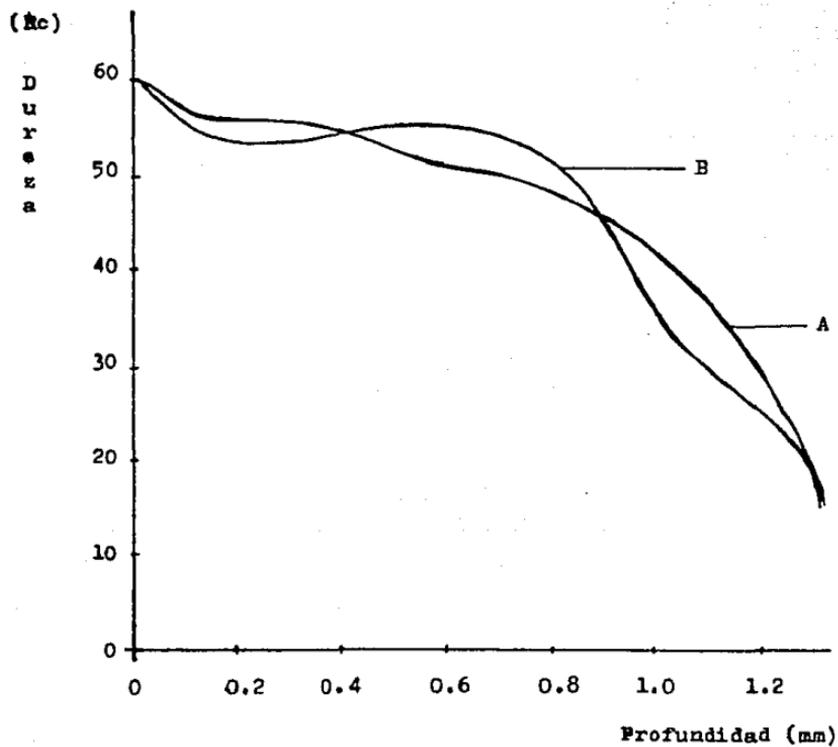
PERFIL DE DUREZA

Sistema de Control de Atmósfera "B"

| PRUEBA | DUREZA | | | |
|--------|--------|-------------------|-----------------|--------------|
| | No | Profundidad mm | escala Knoop | escala Rc |
| 1 | | 0.125 | 640 | 55 |
| 2 | | 0.250 | 607 | 54 |
| 3 | | 0.375 | 640 | 55 |
| 4 | | 0.500 | 655 | 56 |
| 5 | | 0.625 | 620 | 55 |
| 6 | | 0.750 | 600 | 54 |
| 7 | | 0.875 | 485 | 46 |
| 8 | | 1.000 | 335 | 34 |
| 9 | | 1.125 | 300 | 30 |
| 10 | | 1.250 | 280 | 26 |

GRAFICA 3

Perfil de dureza



GRADIENTE DE CONCENTRACION

La Tabla 17 muestra los valores de contenido de carbono a diferentes profundidades en ambas muestras. Los gradientes de concentración estan representados en la Gráfica 4.

Considerando que la temperatura, tiempo y tipo de acero son los mismos; la diferencia que presentan los gradientes de concentración deben su concentración de carbono a la atmósfera. De esto resulta un potencial de carbono mas elevado durante el ciclo "B" el cual se muestra en el contenido de carbono existente en las muestras obtenidas a través de la capa carburizada.

El gradiente de concentración del ciclo "A" representa que durante el proceso las condiciones de equilibrio de carburización no fueron alteradas. Esto se evalúa por la uniformidad y proporcionalidad que se presenta en la curva y datos de gradiente de carbono al examinar la pieza.

Por lo que se refiere al desarrollo del ciclo "B", el control empleado no permitió lograr las condiciones de equilibrio por la intervención manual de manejo de variables involucradas como gas de enriquecimiento lo cual se representa en las variaciones de los datos obtenidos.

Comparando los gradientes de concentración en ambas muestras, se observa que durante el ciclo de carburización de la muestra "B" el potencial de carbono en la cámara del horno se mantuvo demasiado elevado por la concentración que presenta en la superficie con respecto a los parámetros establecidos. Además el fenómeno de difusión se vio alterado por las manipulaciones provocadas.

La muestra "A" presenta una concentración de carbono más aproximada a la requerida y su gradiente de concentración se muestra muy irregular.

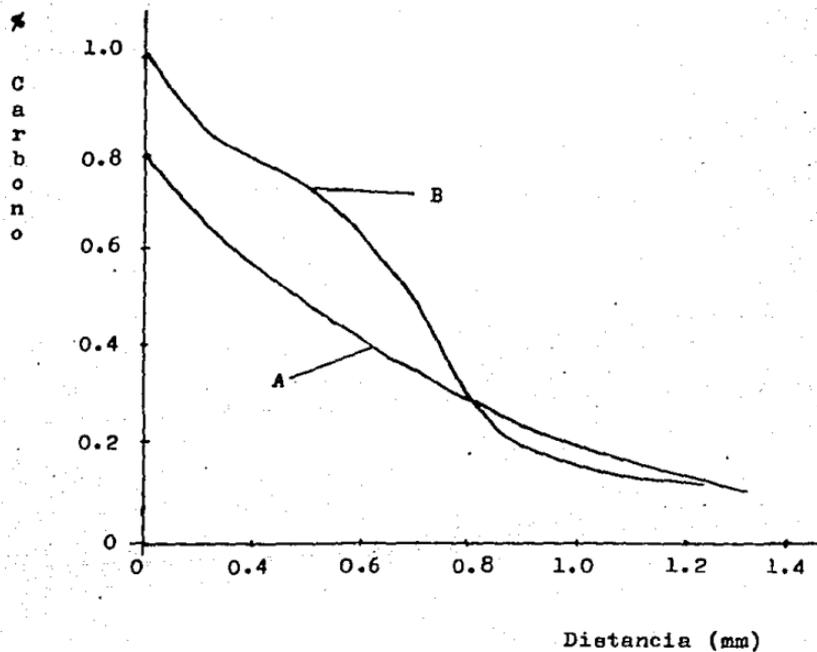
T A B L A 17

Gradiente de Concentración de Carbono

| MUESTRA "A" | | MUESTRA "B" | |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| Distancia mm | Carbono % | Distancia mm | Carbono % |
| Superficie | 0.814 | Superficie | 0.989 |
| 0.33 | 0.602 | 0.35 | 0.793 |
| 0.55 | 0.474 | 0.53 | 0.701 |
| 0.76 | 0.302 | 0.71 | 0.494 |
| 0.96 | 0.219 | 0.96 | 0.174 |
| 1.32 | 0.094 | 1.24 | 0.112 |

GRAFICA 4

Gradiente de concentración de carbono



A = Muestra "A"

B = Muestra "B"

ENSAYO METALOGRAFICO

FIGURA 1 - A



La figura 1 - A muestra la metalografía de la muestra "A" tomada a 400 aumentos, se aprecia el microconstituyente martensita producto del proceso de carburización y temple en aceite.

FIGURA 2 - B



La figura 2 - B muestra la metalografía de la muestra "B" tomada a 400 aumentos. En esta figura se aprecia una transformación martensítica y austenita retenida (blanco) - producto del elevado contenido de carbono disuelto en la superficie del acero antes de efectuarse el proceso de temple.

C A P I T U L O 5

CONCLUSIONES

Al evaluar los dos métodos empleados en los procesos de carburización se demostró que en el método "A", sistema con analizador de infra-rojo integrado, el potencial de carbono en la atmósfera del horno es determinado con mayor rapidez y exactitud debido a la velocidad de cálculo y frecuencia en las tomas de muestra. El análisis de variables como temperatura, CO, CO₂ genera un valor mas real en el potencial de carbono.

Los errores humanos de lectura son eliminados porque los ajustes de las válvulas que controlan la composición de la atmósfera son realizados automáticamente cada vez que se determina un valor de %C. Tiene la capacidad de calcular las variaciones de los parámetros fijados del ciclo deseado (temperatura, % carbono y tiempo) con los obtenidos durante el ciclo térmico que son alimentados en un archivo. Cuenta con la opción de integrarse a una computadora personal con el fin de aumentar la capacidad de archivos y monitoreo del proceso desde el lugar que se quiera.

Los consumos energéticos son menores y el índice de retrabajos es disminuido considerablemente. Los resultados ob

tenidos por este método muestran que partiendo de un acero clasificación 1008 con 0.08% carbono se obtuvo una dureza - de 60 Kc, lo que significa que el contenido de carbono en - la superficie se incremento hasta 0.8%C después del proceso de carburización y temple en aceite. El gradiente de concentración de carbono presenta una difusión de carbono en el - acero controlada lo cual se demuestra en la uniformidad de la curva.

Los parámetros fijados en el ciclo térmico (Temperatura, %C y tiempo) son para conseguir una profundidad de capa efectiva carburizada aproximadamente de 0.790 mm, el resultado encontrado por éste método es muy cercano al dato anterior. En el método "B" sistema de cámara de niebla se encontró durante el desarrollo del ciclo de carburización difi--cultad en controlar el potencial de carbono en la atmósfera del horno por medio de chequeos del punto de rocío, por consiguiente irregularidad en el flujo de gas de enriquecimiento (CH_4) con el fin de ajustar el potencial de carbono de--seado. Además lentitud en la toma de lecturas y una baja - frecuencia de prueba.

Existen errores de medición y el método "B" determina únicamente el contenido de agua en el gas considerando contantes la temperatura, H_2 y CO, lo que puede representar ma

por error en los datos obtenidos que el método "A". Es necesario determinar el contenido de CO del gas endotérmico por algún método para conocer el valor constante que se debe utilizar en el cálculo del potencial de carbono. Cuando se utiliza el método "B" es muy importante conocer los flujos de gases para diferentes concentraciones de carbono en la atmósfera con el fin de evitar deficientes difusiones de carbono en el acero y aumentar el índice de retrabajos o rechazos.

Los resultados obtenidos por este método son muy similares en las propiedades de dureza y profundidad de capa carburizada, sin embargo el gradiente de dureza y concentración muestra irregularidades en la difusión de carbono producidas por el desequilibrio en la atmósfera del horno por el monitoreo manual de control, además las variaciones de los parámetros del ciclo son mucho mayores que el método "A" demostrando que el método "B" tiene un control deficiente.

La microestructura presenta austenita retenida debido a que el potencial de carbono se elevó sin poder controlarlo antes de que la pieza fuera templada (método "B"). En general, el método "A" presenta mayor facilidad de operación y mejores resultados que el método "B".

RECOMENDACIONES

Todo sistema de control requiere de pruebas periódicas o auditorias para certificar la confiabilidad del proceso - que se maneja, por tal razón es importante establecer algunas recomendaciones:

- 1.- Auditar el control utilizado realizando pruebas en las - que se determine el gradiente de concentración utilizando el mismo tipo de acero y ciclo diseñado (realizar una especificación de prueba de control).
- 2.- Cuando se controle la atmósfera mediante sistemas que no permiten control automático es necesario estandarizar - los flujos de gas natural con el fin de que no existan - variaciones en la capa carburizada.
- 3.- En todo ciclo térmico es de gran importancia que el personal que opera la máquina cuente con una hoja de instrucción del proceso que va a realizar.
- 4.- En sistemas automáticos con analizador infrarojo es importante reajustar con los gases certificados la celda - de referencia por lo menos cada 24 horas.
- 5.- En los sistemas de control utilizado en esta práctica es necesario contar con personal capacitado.
- 6.- Cuando se utiliza el analizador de cámara de niebla, la condición de la atmósfera debe examinarse por lo menos - cada 30 minutos.

- 7.- Deben auditarse las presiones y flujos de gas de atmósfera en el sistema de infrarojo frecuentemente, aunque esté provisto de alarmas de seguridad.
- 8.- El mantenimiento preventivo del sistema de infrarojo es de gran importancia por lo que se refiere a filtros, vo
je, etc.
- 9.- La ventilación en un sistema de calentamiento debe cuidarse para evitar el sobrecalentamiento.
- 10.- Las filtraciones de aire en ambos sistemas causa errores en las lecturas efectuadas.
- 11.- Tener en existencia partes de repuesto esenciales en cualquier sistema que se utilice.

B I B L I O G R A F I A

- (1) José Apraiz Barreiro. Tratamientos térmicos de los aceros. Octava edición; Editorial Dossat; Cap XII y XIII, - 1981.
- (2) Sydney H. Avner. Introducción a la metalurgia física. Segunda edición; Editorial McGraw Hill; p 317-326, 1979.
- (3) Metals Handbook. Heat Treating. Novena edición; American Society for Metals; p 224-394, 1981.
- (4) R. Collins, S. Gunnarson, and D. Thulin. A Mathematical Model for Predicting Carbon Concentration Profiles of Gas - Carburized steel. Journal of the Iron and Steel Institute; p 785-789, October 1972.
- (5) Carburizing and Carbonitriding. American Society for Metals; Cap 7-11, 1977.
- (6) F.A. Still and H.C. Child. Predicting Carburising Data; Heat Treatment of Metals, Vol 3; p 67-72, 1978.
- (7) F.E. Harris. "Case Depth" - An Attempt at a Practical Definition; Metal Progress, Vol 44, No. 2; p 265-272, Aug 1943.

- (8) George Krauss; Principles of Heat Treatment of Steel. - American Society for Metals; p 140-157, 1981.
- (9) R. Collin; Mass-Transfer Characteristics of Carburizing Atmospheres. Heat Treatment, Vol 73; p 121-124, 1976.
- (10) R.P. Smith; The Diffusivity of Carbon in Iron by the - Steady-State Method. Acta Met., Vol 1; p 578-587, 1953.
- (11) Gassner, R.H. Decarburization and Its Evaluation by the Chord Method; Metal Progress, Vol 113, No. 3; p 59-63, Marzo 1978.
- (12) R.G. Bowes. Technical and Economic Aspects of Nitrogen based Controlled Atmospheres for Heat Treatment; Heat - Treatment of Metals, Vol 4; p 117-122, 1975.
- (13) Rolland R. Desautels. New Technology Endothermic Generators; Surface Combustion Division. Midland-Ross Corporation; p 1-10, 1983.
- (14) R. Nemeny. Controlled Atmospheres for Heat Treatment. - Pergamon Press; Cap 1-20, 1982.
- (15) R. N. Blumenthal and A.T. Melville; Control of Carbon -

Potencial in Heat Treating Atmospheres Using a Carbon -
Sensor. Industrial Heating, Vol 43; p 26, May 1976.

- (16) R.P. Poor; Furnace Atmosphere Control Using Modern -
Technology. Industrial Heating, p 16-18; October 1975.
- (17) Autocarb 880 Rt. Midland-Ross Corporation Surface Com-
bustion Division; p 1-3, 1985.
- (18) Instruction Manual. Spectrolab, optical emission spec-
trometer. Copyright p 4.5-4.21, 1985.
- (19) Caterpillar Tractor Co. Manufacturing General Office; -
Case Depth Checking using Test Specimens, Practice No.
ME10 19; p 6-10 Mar 11, 1982.

Profundidad de capa (mm)