XII.3. Cementación gaseosa

Entre los diversos tratamientos de cementación, los procesos en atmósfera gaseosa son los más utilizados en los talleres de tratamientos térmicos, ya que es posible conseguir de manera práctica, económica y sencilla piezas de aceros capaces de soportar los difíciles esfuerzos solicitados.

Toda cementación, aún aquella que se realiza en medios sólidos o líquidos, tiene lugar mediante una fase gaseosa en la que se verifica el transporte de carbono desde el medio cementante al acero. El poder producir un gas cementante regulable, ha sido una necesidad técnica desde los comienzos del empleo de estos tratamientos, hasta llegar al sistema actual que presenta indudables y grandes ventajas, ya que las leyes de equilibrio químico y las teorías de difusión, resuelven los múltiples problemas de la cementación sobre bases científicas y no por razones de tipo práctico como ha ocurrido durante siglos.

Para la obtención de una atmósfera gaseosa cementante se parte de dos gases:

a) Gas portador o gas endotérmico que, como se verá más adelante, se obtiene de una combustión incompleta de hidrocarburos; según ésta sea más o menos incompleta, la atmósfera que proporciona puede ser cementante, inerte u oxidante; será cementante si en ella hay más contenido de carbono que en la pieza a tratar, inerte si existe el mismo contenido, y oxidante si el contenido de carbono de la pieza es superior al de la atmósfera. El gas portador debe tener normalmente un contenido constante de carbono a lo largo de todo el proceso y para todos los hornos que existan en la instalación.

b) Gas cementante, para obtener en la atmósfera de cada horno y en cada momento del proceso el contenido adecuado de carbono, se adiciona al gas portador un gas de enriquecimiento o cementante, en nuestro caso es el gas natural (metano) o el gas propano.

Por lo tanto:

GAS ENDOTERMICO o PORTADOR + GAS CEMENTANTE = ATMOSFERA CEMENTANTE

Gas endotérmico: se produce en un generador cuya función es suministrar regularmente el gas portador necesario en los procesos de cementación con una composición de ser posible, constante. Se consigue por combustión controlada de una mezcla rica en gas natural (metano) y aire en proporción tal que exista el suficiente oxígeno para formar el monóxido de carbono (*CO*), e hidrógeno (*H*) pero sin excesivo anhídrido carbónico (CO_2) o vapor de agua (H_2O). El calentamiento de la retorta del generador endotérmico puede ser por gases o eléctrico. La reacción en la cámara catalizadora se realiza a1.050° C; un esquema del diagrama de flujo de un generador endotérmico se muestra en la Fig. XII.12.

El gas natural se controla por un flotámetro y se mezcla en la válvula dosificadora con el aire, que es medido con otro flotámetro. La válvula debe mantener fija la dosificación o proporción de aire-gas, y cuando ésta varía, un regulador de punto de rocío o de infrarojo (a los cuales aludiremos más tarde) actúa sobre una válvula adicional de aire, regulando la entrada del mismo para corregir el desvío.

La mezcla de aire y gas es aspirada por el compresor y enviada al generador, si hay sobrepresión se abre una válvula uniendo la aspiración con la impulsión del compresor y recirculando la mezcla parcialmente. Ésta penetra al generador por la parte inferior de la retorta (para generadores de mayor capacidad pueden ser dos o tres retortas) calentada exteriormente. En el interior de estas retortas se encuentra el catalizador, constituido por cubitos de refractarios porosos impregnados con óxido de níquel.

En la parte superior, rodeando a los tubos de salida, se inicia la refrigeración del gas. El refrigerador es un intercambiador de calor gas-agua. Su función es bajar la temperatura del endogas, para prevenir la reacción reversible del gas y evitar la formación de hollín en la cañería que lleva los gases a los hornos, lo que por supuesto altera la composición del gas portador.

La reacción que se produciría si el gas no se enfriara rápidamente entre 480-700° C, sería

$$2\,CO \rightarrow C + CO_2$$

(precipita en la cañería)

La capacidad de los generadores comerciales oscila entre 7 y 110 m^3/hora, aunque se han construido hasta de 400 m^3/hora. Es aconsejable que su funcionamiento no sea en ningún momento inferior al 50% de su capacidad. Las reacciones que se producen en el generador dependen del gas utilizado para obtener el gas portador.

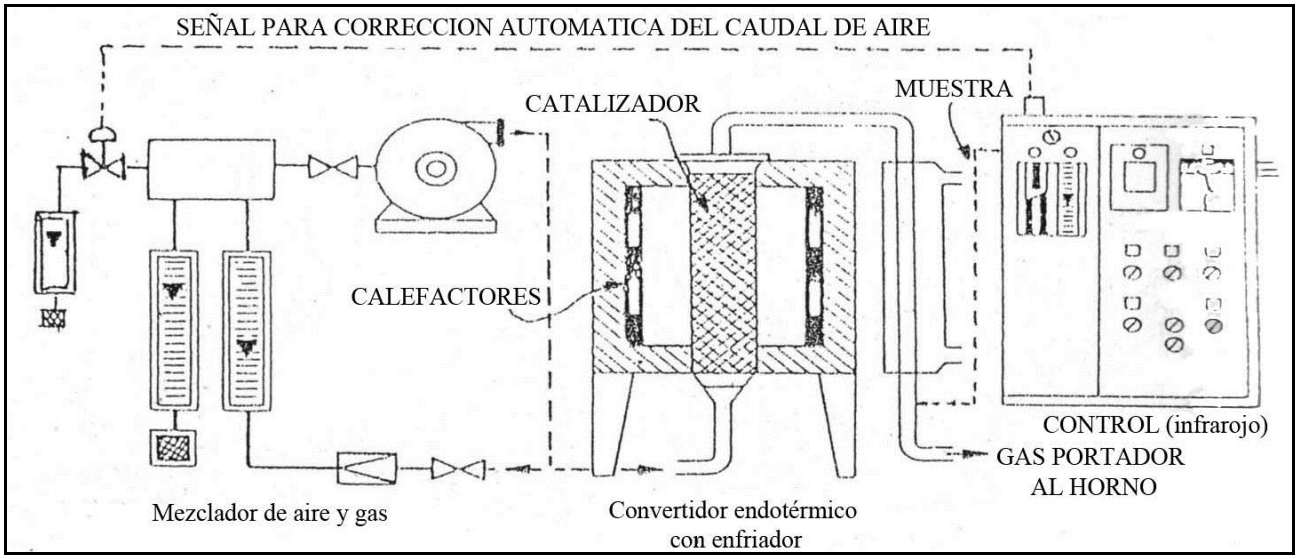


Fig. XII.12: Esquema del generador endotérmico

Reacción con gas natural: Como consecuencia de que el gas natural está compuesto principalmente de metano (CH_4), la reacción química total que tiene lugar en el generador endotérmico puede expresarse de la siguiente forma:

$$2\ CH_4 + O_2 \leftrightarrow 4\ H_2 + 2\ CO \qquad (20)$$

despreciando los 3,8 volúmenes de nitrógeno por cada 2 volúmenes de metano. Esta reacción no es totalmente endotérmica, como el nombre del generador lo implica, sino que es exotérmica. Sin embargo, tiene lugar en dos etapas. En la primera, algo del metano quema con el aire y genera calor. En la segunda, el metano restante reacciona con el CO_2 y vapor de agua, producido en la primera etapa, y esta reacción es definitivamente endotérmica. Además, son necesarios una temperatura elevada y un lecho catalítico, limpio y suficiente, para obtener un gas completamente reaccionado y eliminar CO_2, exceso de CH_4 y vapor de agua.

Se estima que las reacciones son las siguientes:

$CH_4 \leftrightarrow C + 2\ H_2$ $\quad \Delta H = +19$ Kcal (21)

$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ $\quad \Delta H = +32$ Kcal (22)

$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3\ H_2$ $\quad \Delta H = +51$ Kcal (23)

$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2\ CO + 2\ H_2$ $\quad \Delta H = +61$ Kcal (24)

Pero las reacciones finales son las que se indican abajo.

Un gas completamente reaccionado, significa que el porcentaje de CH_4 no sea superior al 0,4-0,8%. Si la temperatura no es suficientemente elevada o el gas no ha reaccionado completamente, el catalizador se llenará de hollín. Cuando ello ocurre, se vuelve inefectivo y la composición del gas oscilará, dando como resultado un aumento en el contenido de CH_4, CO_2 y vapor de agua. Así, el proceso no puede ser controlado para mantener un potencial en carbono definido. Además, el metano no reaccionado craqueará en el horno de tratamiento térmico formando hollín.

Un catalizador limpio y activo es de suma importancia para un control adecuado del punto de rocío[1] y potencial de carbono. Frecuentemente se usa el tipo de base refractario poroso, impregnado con óxido de níquel.

El cálculo del total de moles volúmenes producidos en la reacción del CH_4 con el O_2 (incluyendo 3,8 moles de N_2 en ambos lados de la reacción) es el siguiente:

$$2\ CH_4 + 0_2 + 3{,}8\ N_2 \leftrightarrow 2\ CO + 4\ H_2 + 3{,}8\ N_2 \qquad \Delta H = -14 \text{ Kcal} \qquad (25)$$

(6,8 moles)(9,8 moles) (exotérmico)

Los totales indican que la reacción resulta en un aumento de 3 moles volúmenes; por lo tanto, el generador del tipo endotérmico produce más gas que el que conduce, en condiciones normales de presión atmosférica y temperatura (15,5º C). Si suponemos que se utiliza un gas natural constituido por 100 % CH_4,

[1] Temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, niebla o escarcha.

el rendimiento del generador sería:

$$n = \frac{9,8}{6,8} = 1,44$$ veces la cantidad de aire y gas

El análisis del gas sería el siguiente:

$$CO = \frac{2}{9,8} x\ 100 = 20,4\ \%$$ molar o vol/vol

$$H_2 = \frac{4}{9,8} x\ 100 = 40,8\ \%$$

$$N_2 = \frac{3,8}{9,8} x\ 100 = \mathbf{38,8}\ \%$$

La ecuación también indica que por cada 2 moles volúmenes de CH_4, se necesitan 4,8 de aire para efectuar el craquing, siendo entonces la relación $\frac{aire}{gas} = \frac{4,8}{2} = 2,4$.

Sin embargo, se sabe que el gas natural no está compuesto de un 100 % de CH_4 y que debe preverse, por consiguiente una variación en los resultados antes obtenidos. Por ejemplo, el rendimiento real del generadores aproximadamente1,35 veces la cantidad total de aire y gas, en lugar del valor teórico 1,44.

Reacción con propano: Aunque normalmente se utiliza gas natural, el generador endotérmico craqueará satisfactoriamente propano, butano y otro gas hidrocarburo. Si se emplean cualquiera de los gases citados, tales como propileno o butileno, se impregnará de hollín el catalizador, debido a que no craquean adecuadamente. En los Estados Unidos, el propano o butano obtenidos como subproductos de las refinerías de petróleo, puede contener hasta un 50 % de hidrocarburos no saturados; en algunos países de Europa hay un tipo refinado con menos del 5%. El propano reacciona en el generador endotérmico de la siguiente manera:

$$2\ C_3H_8 + 3\ O_2 + 11,4 N_2 \leftrightarrow 6\ CO + 8\ H_2 + 11,4\ N_2 \qquad \Delta H = -53,2\ \text{Kcal} \qquad (26)$$

(16,4 moles) (25,4 moles) (exotérmica)

del mismo modo que ocurría con el gas natural, se produce un incremento en los moles volúmenes de gas reaccionado, elevando en 1,55 veces la proporción de aire-gas.

De acuerdo a la ecuación, la relación $\frac{aire}{gas} = \frac{14,4}{2} = 7,2$ suponiendo un craquing perfecto o un bajo punto de rocío del gas. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones la relación varía de 7,5 a 8,0. La composición teórica resultante, puede calcularse de los moles volúmenes de cada constituyente de acuerdo a lo siguiente:

$$CO = \frac{6}{25,4} x\ 100 = 23,6\ \%$$ vol/vol

$$H_2 = \frac{8}{25,4} x\ 100 = 31,5\ \%$$

$$N_2 = \frac{11,4}{25,4} x\ 100 = \mathbf{44,9}\%$$

Se puede observar que el contenido de *CO* es más elevado que el obtenido craqueando gas natural y el de H_2 es menor. Sin embargo, la curva de equilibrio de la Fig. XII.13, entre el punto de rocío y el CO_2, que ha sido desarrollada para gas natural, puede usarse como una guía cuando se emplea propano en el generador endotérmico (aunque es necesario utilizar un pequeño factor de corrección).

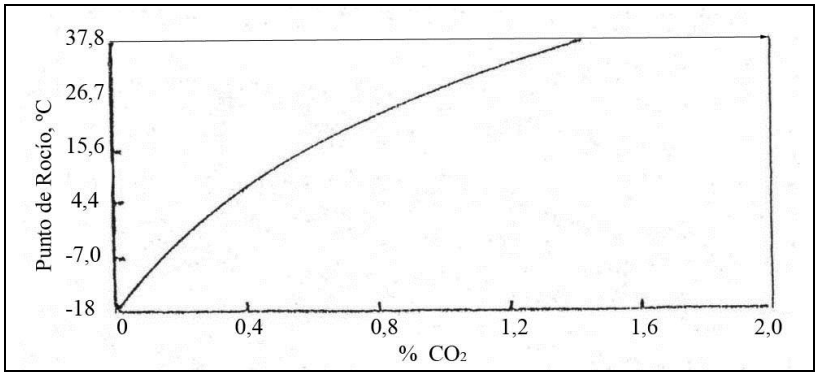


Fig. XII.13:
Relación entre el punto de rocío y el porcentaje de CO_2 en la generación de una atmósfera endotérmica

El análisis volumétrico, usando propano envasado en un generador endotérmico comercial, fue el

siguiente:

CO_2: 0,0%; *CO*: 23,4%; H_2:1,1%; CH_4: 0,2%; N_2 = 45,3 %; punto de rocío: -13°F (-25°C)

El propano es más difícil de regular a un punto de rocío determinado. En efecto, una pequeña variación en el volumen del gas provoca un gran cambio en aquel. En la regulación manual esta dificultad se ha superado por medio del ajuste de un micrómetro adicionado al carburador y bomba de mezclado para control del punto de rocío. Debido a que el butano es aún más dificultoso de regular, se prefiere el propano en aquellos lugares donde el gas natural no esté disponible.

XII.3.1. Control del generador

El control de la composición de gas en la producción de una atmósfera endotérmica, se mantiene determinando el punto de rocío y el contenido de CO_2. Se puede efectuar en forma manual o automática, en cuyo caso la medición es continua.

Cuando es manual, el punto de rocío se determina, tanto en el horno como en el generador, en forma periódica (aproximadamente cada 2 horas) y cualquier corrección se efectúa reajustando la relación aire-gas del mezclador del generador.

El personal experimentado puede estimar cuándo es necesario reajustarla para modificar el punto de rocío, pero no puede compensar las variaciones repentinas que pudiesen producirse como consecuencia de modificaciones en la velocidad de flujo o contenido térmico del gas.

En cambio, el sistema automático de control, ya sea del punto de rocío o del contenido de CO_2, suministra una acción correctora en forma constante. En efecto, si por ejemplo se produjese un cambio en el contenido termal del gas natural, el sistema automático corregiría tal variación inmediatamente. En la Fig. XII.12 se puede observar cómo el controlador automático actúa sobre una válvula adicional de aire para modificar su caudal en la mezcla y efectuar el cambio requerido.

Dado que el mismo sistema de control (punto de rocío o infrarojo) se utiliza para controlar la atmósfera de los hornos, estos sistemas y equipos se explicarán después de tratar las condiciones de los procesos de cementación en los hornos.

Es importante señalar que el gas endotérmico producido por el generador tiene normalmente un potencial de carbono medio, de allí que se lo suele mencionar como gas neutro pero no debe entenderse como potencial cero.

El generador suministra un gas que a la temperatura de cementación posee un potencial de carbono aproximadamente 0,50 (que equivale a un punto de rocío de -1º C ó 0,28 % de CO_2). Este potencial de carbono se aumenta dentro del horno por el agregado de gas natural.

XII.3.2.Procesos de cementación en hornos (ver Apéndice)

Las reacciones más importantes que ocurren entre la atmósfera cementante y las piezas dentro de los hornos son:

$$CH_4 \leftrightarrow [C]_{Fe\gamma} + 2\,H_2 \qquad (27)$$

$$2\,CO \leftrightarrow [C]_{Fe\gamma} + CO_2 \qquad (28)$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \qquad (29)$$

Donde *[C]* es el carbono disuelto en austenita. Las reacciones (27) y (28) indican la adición de C al acero a partir de metano o monóxido de carbono para formar la solución de C en la austenita y dar *H* y CO_2 respectivamente. Ambas reacciones son reversibles y los % de *H* y CH_4 ó CO_2 y *CO* requeridos para lograr el equilibrio con una concentración de C con la superficie de un acero a una temperatura definida, pueden calcularse de datos termoquímicos.

Sea una reacción reversible hipotética

$$aA + bB \leftrightarrow cC + dD,$$

donde “a” unidades de volumen de gas A, reaccionan con "b" unidades del gas B, para producir "c" unidades del volumen del gas C y "d" unidades del gas D. Por ser reversible, en el equilibrio donde ambas velocidades de reacción se igualan la constante está dada por:

$$K = \frac{(pA)^a.(pB)^b}{(pC)^c.(pD)^d}$$

Donde **p** es la presión parcial: presión del sistema multiplicado por la fracción de volumen del gas.

Cuando en la reacción hay sólidos y gas, se utiliza la actividad termodinámica para hallar la constante de equilibrio en lugar de las presiones parciales.

En este sistema, en las ecuaciones (27) y (28) se considera la presión parcial de la austenita saturada

como igual a 1 y para todas las concentraciones menores que la de saturación se asume como proporcional al grado de saturación.

Esta consideración de actividad proporcional no lleva a mucho error; el contenido de carbono para la austenita saturada varía con la composición del acero como lo muestra la Fig. XII.14.

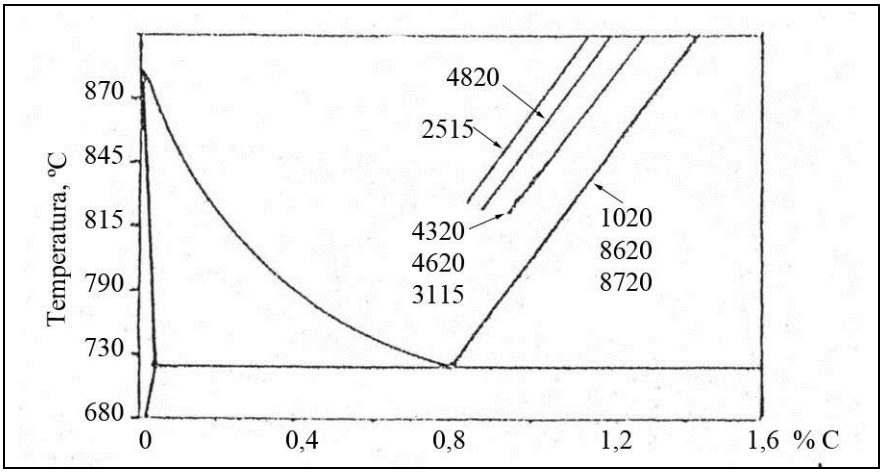


Fig. XII.14: Solubilidad aproximada de C en la austenita para 8 aceros.

Cuando, se aplica la ecuación (28), una actividad o porcentaje de saturación (A) debe emplearse para calcular las concentraciones de gas de equilibrio y poder alcanzar el nivel de *C* deseado.

$$2\ CO \leftrightarrow [C]_{Fe\gamma} + CO_2 \qquad K = \frac{(pCO)^2}{A\ .(pCO_2)}$$

(A): se considera como la actividad termodinámica del C disuelto en la austenita (que es igual a 1 si está en la concentración de saturación).

Por ejemplo, tomando la composición de la austenita saturada a 900° C como 1,18% C, si se desea tener 1% C en la superficie del acero, la actividad o grado de saturación $A = \frac{1,00}{1,18} = 0,847$, entonces

$$K \text{ x } 0,857 = \frac{(pCO)^2}{(pCO_2)}$$

dará la relación entre el *CO* y el CO_2 para lograr el 1 % de C en la superficie del acero.

La constante de equilibrio K depende fundamentalmente de la temperatura y ha sido determinada por los trabajos de F.E. Harris, con T temperatura absoluta en grados Rankine (°F + 460).

Para la ecuación (27) $\log K = \frac{8370}{T\ [°R]} - 5,770$

Para la ecuación (28) $\log K = \frac{-15996}{T\ [°R]} + 9,060$ ó $\log K = \frac{-8894}{T\ [°K]} - 5,770$

Para el sistema CO-CO_2, en la Fig. XII.15 se da la relación entre *CO* y CO_2 en equilibrio con varias concentraciones de carbono, para aceros a 4 temperaturas diferentes. De acuerdo con la ecuación (28), los diferentes valores de K en función de la temperatura son:

TEMPERATURA	K
815° C	8,17
845° C	13,00
870°C	20,30
900°C	31,00
930°C	46,40
955° C	68,40

Dado que el generador suministra un % de *CO* constante, bastará con controlar el CO_2 para determinar el potencial de carbono de la atmósfera del horno de cementación gaseosa.

Existe una relación definida entre los gases que intervienen en la reacción del gas de agua que se produce en el horno de atmósfera controlada, que es la reacción (29).

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \qquad (29)$$

Esta reacción es reversible y la proporción relativa de cada gas existente en el equilibrio es función de la temperatura, como lo muestra:

$$K = \frac{(CO).(H_2O)}{(CO_2).(H)}$$

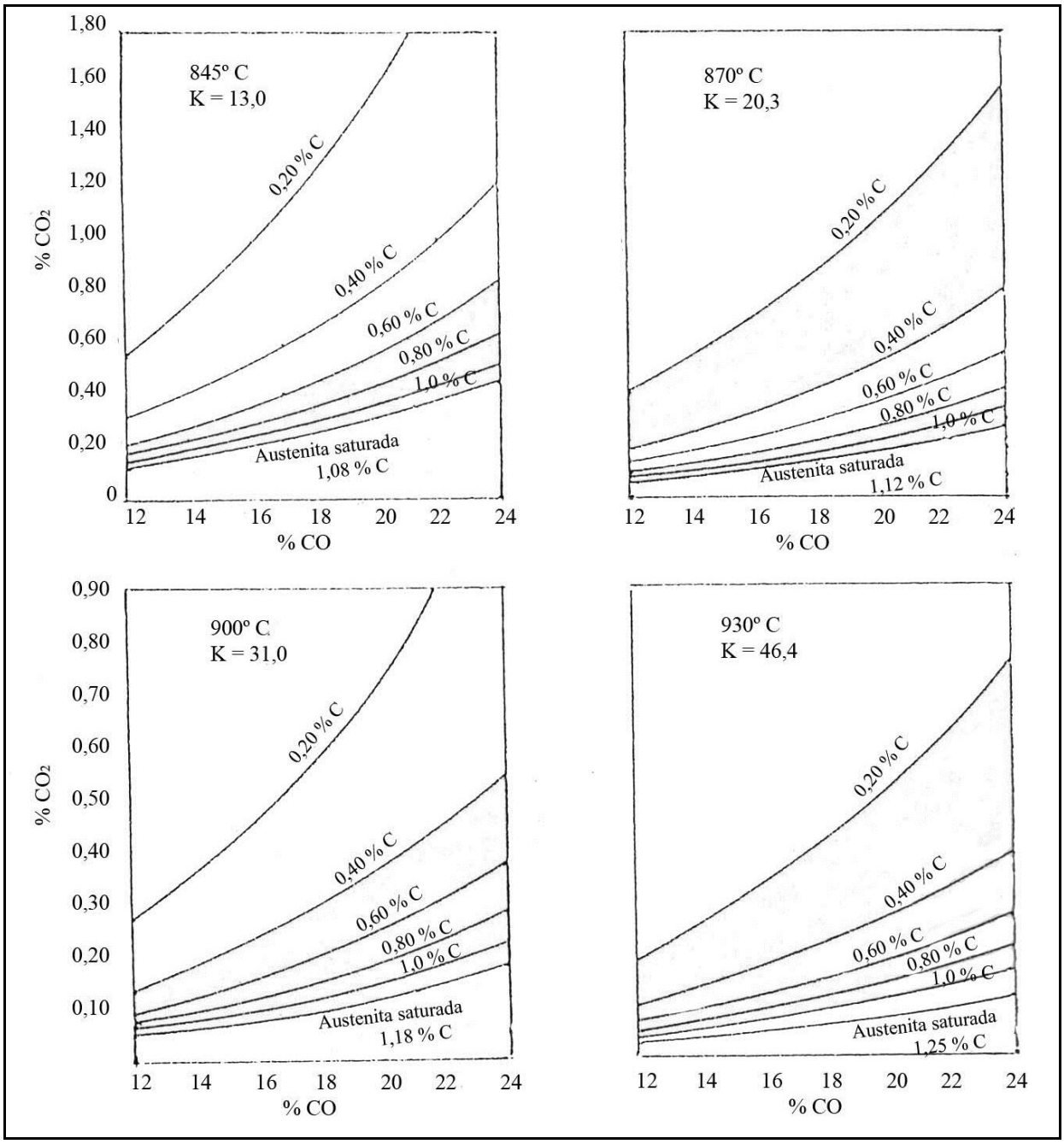


Fig. XII.15: Porcentajes de CO_2 y CO en equilibrio con varias concentraciones de carbono a 4 temperaturas diferentes.

La constante de equilibrio para la reacción (29) fue calculada por F.E. Harris

$$log.K = \frac{-3175}{T} + 1{,}627$$

también:

$$\frac{(H_2O)}{(H)} = K.\frac{(CO_2)}{(CO)}$$

Es evidente que para cualquier temperatura la relación $\frac{(H_2O)}{(H_2)}$ difiere de la relación $\frac{(CO_2)}{(CO)}$ solamente en una constante. Los valores de K a diferentes temperaturas son:

TEMPERATURA (°C)	K
815	1,02
845	1,12
870	1,22
900	1,33
930	1,44
955	1,55

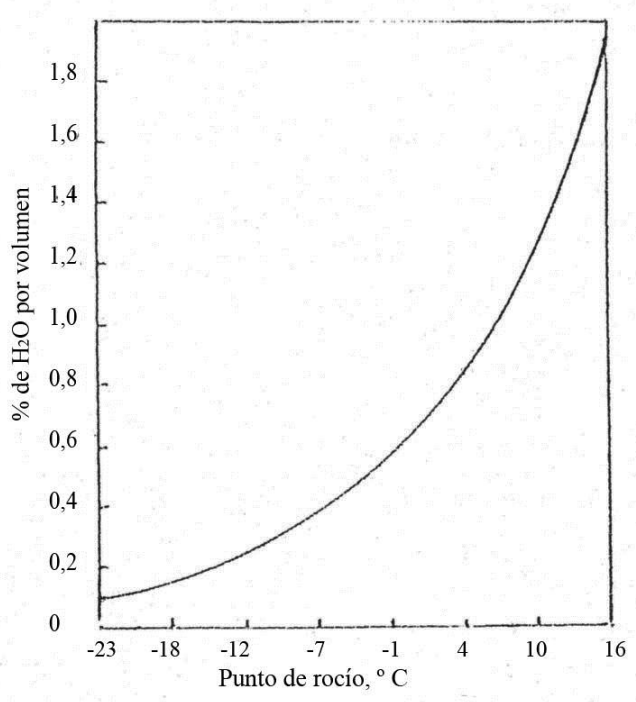


Fig. XII.16: Relación entre el punto de rocío y el porcentaje de H_2O por volumen.

Dado que el gas portador suministra % de *CO* y de *H* constante, evidentemente se produce una relación directa entre el H_2O y el CO_2para cada temperatura de proceso. Por eso el potencial de carbono puede determinarse no sólo controlando el % de CO_2sino también el % de H_2O, a través del control del punto de rocío.

En la Fig. XII.16 se muestra la relación entre el % de agua por volumen y el punto de rocío.

XII.3.3. Variables principales del proceso

El éxito del trabajo en la cementación gaseosa depende del control de tres variables principales: Temperatura, tiempo de permanencia y composición de atmósfera.

XII.3.3.1. Efecto de la Temperatura:

La velocidad máxima a la cual el carbono se introduce en el acero, está limitada por su difusión en la austenita. Esta se incrementa con la temperatura; en efecto, a 925°C es aproximadamente un 40% mayor que a 870° C.

La temperatura más usual para efectuar la cementación es 925°C. Esta permite una razonablemente rápida velocidad de carburación sin un deterioro excesivo del equipo, en particular en lo que concierne a las piezas construidas con aleaciones resistentes al calor. Recientemente se han sugerido temperaturas más elevadas, 955°C (y aún 980° C) para ciertos requerimientos de penetración. Para capas superficiales, se utilizan temperaturas más bajas, dado que puede controlarse mejor la profundidad, dentro de los límites especificados, cuando la velocidad de cementación es menor como consecuencia de una baja temperatura de proceso.

Para obtener resultados uniformes es importante que no existan diferencias apreciables de temperatura en la carga, lo cual depende de la densidad de ésta, del diseño del horno y de la velocidad de calentamiento y circulación de la atmósfera.

Para una determinada densidad de la carga, la diferencia entre la temperatura exterior e interior de la misma puede ser elevada a las temperaturas de cementación, como consecuencia de que el exterior de la carga se calienta principalmente por radiación y la velocidad de calentamiento es rápida a esas temperaturas. Al mismo tiempo, la posibilidad de que el gas circulado aminore la diferencia de temperatura es limitada, debido a su baja densidad a esas temperaturas.

A temperaturas de cementación inferiores (840-870° C), la diferencia en el tiempo requerido para que las distintas zonas de la carga adquieran la temperatura de trabajo, tiene un menor efecto en la penetración.

Otras causas en las diferencias a temperaturas elevadas son:

a) una relación elevada entre el área de la superficie y el volumen de las piezas individuales;
b) una energía de calentamiento elevada.

Respecto a la primera, no puede intentarse nada; la segunda puede regularse automáticamente con un registrador y control, a los fines de reducir las diferencias en la carga.

Para obtener un mejor control en los hornos de mufla, la termocupla y el tubo de protección se

ubican lo más próximo posible a las piezas, sin interferir con el movimiento de éstas en el horno. Para facilitar el control, se las introduce a través de la pared lateral del horno. En los hornos continuos, en la primera etapa (de precalentamiento) la termocupla se colocará en la parte final, evitando que las piezas se sobrecalienten.

En la zona de cementación se ubicarán aproximadamente en la parte media. Cuando, a los fines de temple, la temperatura en la última zona debiera ser inferior que la de cementación, se logra un control más efectivo situando las termocuplas en la parte final de la misma.

Si las termocuplas de Chromel-Alumel, usadas frecuentemente a las temperaturas de cementación, toman contacto con los gases reductores de la cámara del horno, se producirán errores en la medición. Para prevenir este contacto es necesario introducirlas en los tubos de protección efectuando preferentemente un barrido interior con una atmósfera neutra.

Actualmente, todos los equipos de cementación utilizan controles de temperatura automáticos. Sin embargo, eventualmente se originan errores que ocasionan pérdidas por el costo de las piezas mecanizadas; por lo tanto, es aconsejable efectuar controles frecuentes.

XII.3.3.2. Efecto del tiempo:

F. E. Harris ha desarrollado una fórmula para determinar el efecto del tiempo y temperatura en la penetración, en la cementación normal:

$$\text{Penetración} = \frac{31{,}6.\sqrt{t}}{10^{(6700/T)}} \text{ [en pulgadas]} \qquad (30)$$

donde T: temperatura absoluta en grados Rankine (°F + 460) y t:tiempo a temperatura, en horas.

Para una temperatura de cementación determinada, la relación es simple:

$$\text{Penetración} = K.\sqrt{t} \qquad (31)$$

$= 0{,}025 .\sqrt{t}$ para 1700º F (925° C)

$=0{,}02l .\sqrt{t}$ para 1650°F(900° C)

$= 0{,}018 .\sqrt{t}$ para 1600°F (870° C)

En la tabla XII.4, se indican las penetraciones, expresadas en milímetros y calculadas para tiempos de permanencia entre 2 y 36 horas, a tres temperaturas de cementación diferentes. Corresponden a la *capa total*, donde la concentración de C es aproximadamente 0,07 mayor que la del núcleo.

Tabla XII.4: Valores de penetraciones calculadas por la Ecuación de Harris.

Tiempo, horas	**Penetraciones (mm.) después de cementar a**		
	870° C	**900º C**	**925º C**
2	0,63	0,75	0,88
4	0,88	1,00	1,25
8	1.25	1,50	1,77
12	1,50	1,80	2,17
16	1,77	2,10	2,50
20	2,00	2.35	2,80
24	2,15	2,51	3,00
30	2,40	2.90	3,40
36	2,70	3,15	3,70

Cuando la cementación se controla adecuadamente para producir concentraciones en carbono superficial algo inferior que la de la austenita saturada, las penetraciones son menores que las calculadas por la ecuación de Harris.

Además del tiempo a la temperatura de cementación, pueden requerirse varias horas para llevarlas piezas a la temperatura de trabajo. Si éstas van a ser templadas directamente en el horno de cementación, el ciclo puede prolongarse a los fines de reducir la temperatura a aproximadamente 800º C. Aunque en este intervalo de tiempo se produce difusión del carbono de la superficie al núcleo, y ésta es más lenta; este periodo puede usarse deliberadamente para una difusión moderada, a los fines de disminuir la concentración en la superficie, manteniendo una atmósfera de bajo potencial en contacto con las piezas durante el mismo.

F. E. Harris ha desarrollado también ecuaciones para un **método en dos etapas**: *cementación y*

difusión:

$$T_c = \text{Tiempo de cementación} = T_t \cdot \frac{(c_{fd} - c_n)^2}{(c_{fc} - c_n)^2} \qquad (32)$$

T_d = Tiempo de difusión = T_t - T_c

Donde T_t: Tiempo total en horas (se calcula de la ecuación (31))
C_{fd}: concentración final de carbono deseado
C_{fc}: concentración de carbono al término del ciclo de cementación
C_n: concentración de carbono en el núcleo

Este método es más adaptable al equipo tipo mufla. Una aplicación exitosa requiere un horno bien acondicionado y un gas portante de bajo carbono. Se supone que todas las adiciones de gas natural se efectúan durante el ciclo de cementación. Después que el agregado de gas natural se ha interrumpido y el ciclo de difusión ha comenzado, se presume que no se efectuarán otras adiciones de carbono al acero.

XII.3.3.3.Control de la atmósfera

Además del abastecimiento de carbono por la reacción cementante, los gases hidrocarburos pueden incrementar el potencial de carbono de la atmósfera en el interior de la cámara cementante, por disminución del punto de rocío (% H_2O) y el % de CO_2, de acuerdo a las siguientes reacciones:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + H_2 \qquad (33)$$

$$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2.CO + 2\,H_2 \qquad (34)$$

Sin embargo, estas reacciones son relativamente lentas y muchas veces se requiere más metano que el necesario, para producir una disminución equivalente en el punto de rocío y contenido de CO_2.

No es aconsejable suministrar en el horno, un gas portante con un punto de rocío y CO_2 elevado e intentar "limpiar" la atmósfera en el interior de la cámara cementante, dado que pueden ocurrir extrañas reacciones en la superficie del acero, las cuales originarían resultados impredecibles. Para obtener buenos resultados en el trabajo, es preferible producir un gas portador de una composición aproximadamente en equilibrio con una concentración en carbono, de 0,4-0,5 % en la superficie a la temperatura de cementación.

Se puede disminuir fácilmente el potencial de carbono de las atmósferas en el interior de la cámara cementante, introduciendo aire en pequeños porcentajes, a los fines de incrementar el punto de rocío (% H_2O) y el contenido de CO_2 de acuerdo a las reacciones siguientes:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad (35)$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \qquad (36)$$

Las reacciones (35) y (36) se producen rápidamente. El procedimiento se ha empleado exitosamente para disminuir el potencial de carbono en la zona final de hornos continuos de cementación, con el objeto de obtener un período de difusión con una menor concentración en carbono subsiguiente en la superficie.

Para cementar con concentraciones de carbono superficial comprendidas entre 0,80 y 1,00 % C, utilizando una atmósfera endotérmica como gas portante, el punto de rocío del mismo deberá oscilar entre + 10º a 30º F (-12,2 a -1,1° C).

Los agregados necesarios de hidrocarburo para producir un potencial de carbono deseado, se efectúan en el horno junto con el gas portante, para lograr un punto de rocío inferior a + 10º F.

Para concentraciones de carbono bajas, requeridas a menudo para una cementación homogénea, la relación aire-gas suministrada al generador, puede regularse para producir puntos de rocío mayores que + 30 °F; las curvas de equilibrio, como muestra la Fig. XII.17, son valiosas para establecer y controlar la atmósfera.

Líquidos o gases hidrocarburos no diluidos, se aplican sólo a hornos tipo mufla con buenos cierres en las puertas y tapas, y con ventiladores para la circulación. Cuando se efectúa la cementación con gas o hidrocarburos líquidos sin gas portador, puede ser dificultoso regular la atmósfera, excepto que las condiciones dieran como resultado austenita saturada a la temperatura de cementación. Sin embargo, el elevado tenor de carbono resultante puede ocasionar la formación de un exceso de austenita retenida después del temple. Para obtener una superficie con un contenido bajo de aquél y un gradiente no demasiado pronunciado, es necesario efectuar un ciclo de difusión a la temperatura de cementación.

Esto se realiza interrumpiendo el flujo de gas o líquido hidrocarburo, o bien disminuyéndolo hasta que se mantenga en el horno una atmósfera con un potencial en carbono reducido durante el ciclo de

difusión. La adopción de un método u otro depende de la hermeticidad del equipo. Por lo general, cuando se utilizan gases o líquidos hidrocarburos, es difícil efectuar la cementación sin depositar algo de hollín sobre las piezas y en el horno. La interrupción del flujo de atmósfera durante el ciclo de difusión permite, a menudo, quemarlo con la infiltración de aire, formando una atmósfera de monóxido de carbono-hidrógeno con bajo potencial en carbono, que no es conveniente reducir demasiado.

Los líquidos cementantes que se utilizan son el alcohol iso-propílico, el varsol y mezclas de ambos.

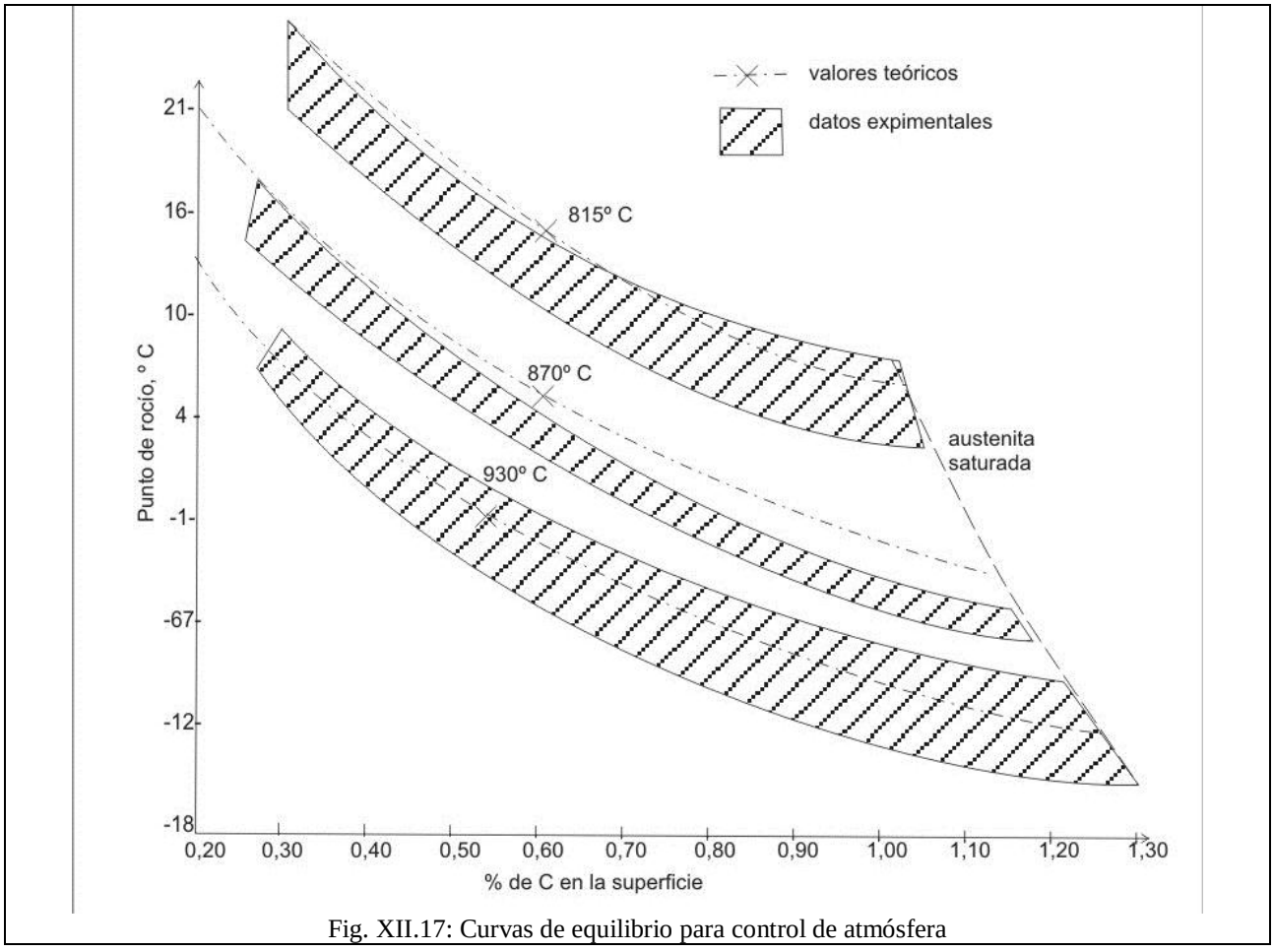


Fig. XII.17: Curvas de equilibrio para control de atmósfera

XII.3.4. Tratamientos posteriores a la cementación

XII.3.4.1.Cementación con temple directo

Mantener a la temperatura de cementación superior a A_{c3}, durante el período requerido, mientras transcurre el proceso de cementación y difusión. El temple se realiza desde la temperatura de cementación, en el medio deseado según el acero, es decir en agua, aceite o baño caliente.

Es apto para piezas sencillas y donde se requiere que temple el núcleo a la máxima dureza, pudiendo tratarse de tornillos, tuercas, pernos, etc.

Este proceso tiene la dificultad de formar estructuras bastas, agujas gruesas de martensita con austenita residual. Otra desventaja es que produce mayor distorsión.

La Fig. XII.18 muestra el curso de la temperatura en un proceso de cementación con temple directo.

XII.3.4.2. Cementación, homogeneización de temperatura y temple directo

Es una modificación del anterior, muy utilizado en hornos de atmósfera controlada para piezas más delicadas, tales como ejes estriados y engranajes. Consiste en efectuar la cementación y difusión a temperatura superior a Ac_3, disminuyéndola posteriormente hasta A_{c1}, dejar un tiempo de homogenización y luego efectuar el temple.

De esta manera se logra una adecuada estructura martensítica en la capa con una menor reacción del núcleo, se disminuye la distorsión y la presencia de austenita en la capa.

La Fig. XII.19 muestra el curso de la temperatura en este proceso.

XII.3.4.3. Cementación con temple único sin afino de núcleo

Consiste en efectuar la cementación a una temperatura superior a A_{c3} y enfriar lentamente; posteriormente calentar a aproximadamente 780°C (encima de A_{c1}) y templar. Se obtiene una capa cementada fina y con alta dureza; la temperatura es insuficiente para austenizar el núcleo, por lo que aparece ferrita gruesa y bajas propiedades mecánicas.

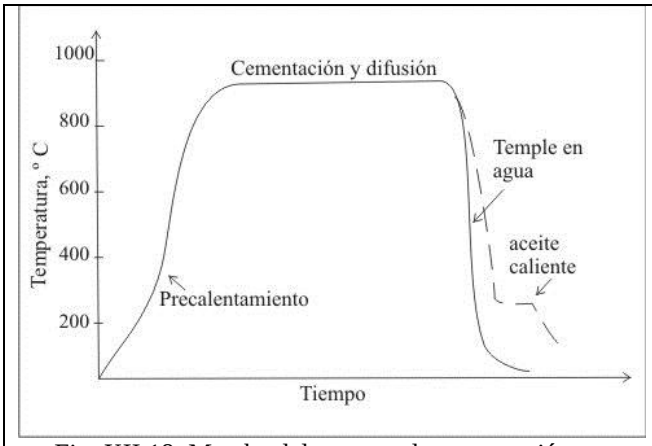


Fig. XII.18: Marcha del proceso de cementación con temple directo

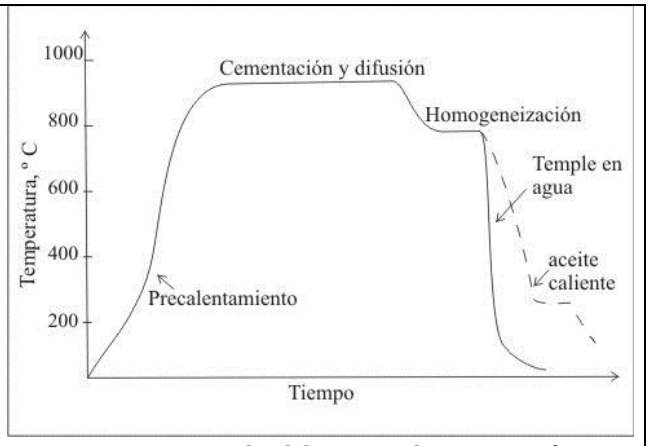


Fig. XII.19: Marcha del proceso de cementación, homogeneización de temperatura y temple directo

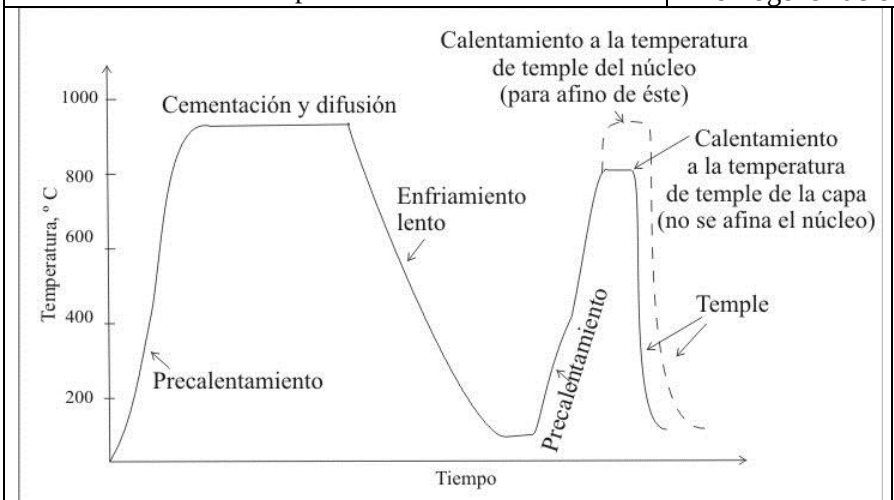


Fig. XII.20: Marcha del proceso de cementación con temple único sin afino de núcleo (líneas llenas) y afino del grano del núcleo (líneas de rayas)

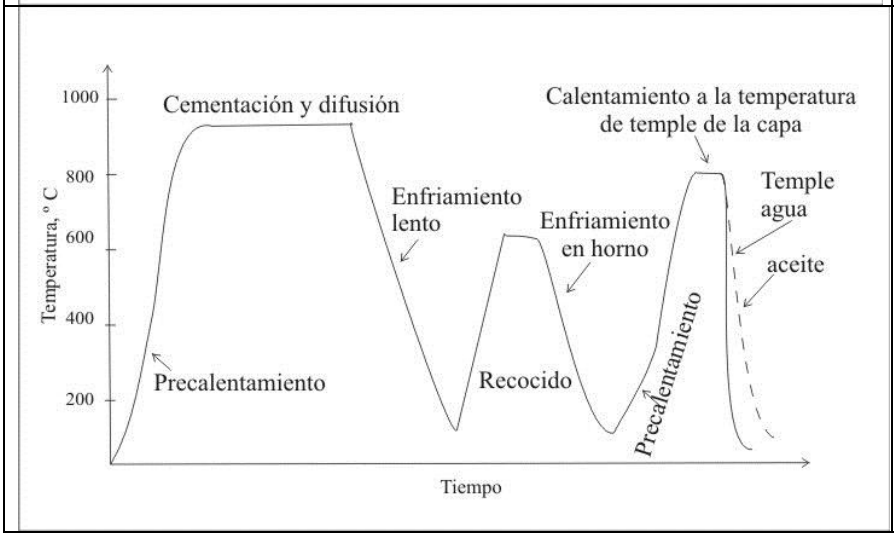


Fig. XII.21: Marcha del proceso de cementación con temple único y recocido intermedio

Se utiliza cuando se cementa en caja o bien en piezas que trabajan, fundamentalmente al desgaste con baja carga, como ser algunos engranajes de velocidad.

Como no se produce transformación de núcleo, la distorsión por el tratamiento térmico es pequeña. En la Fig.XII.20 se muestra el curso de la temperatura para este proceso.

XII.3.4.4. Cementación con temple único y afino del grano del núcleo

Se diferencia del proceso anterior en que se realiza la operación de temple a la temperatura de transformación de núcleo. Se utiliza para piezas que están sometidas a cargas elevadas y donde el temple doble produce excesiva distorsión.

Como la capa cementada se sobrecalienta, se formarán agujas grandes de martensita con austenita retenida. En la Fig. XII.20 se muestra el curso de la temperatura para este proceso.

XII.3.4.5. Cementación con temple único y recocido intermedio

Consiste en realizar un recocido después del cementado con enfriamiento lento y luego el temple con o sin afino del núcleo.

Se utiliza en aquellas piezas que necesitan alguna operación de maquinado después del cementado y antes del temple; como se trata de aceros aleados, deben ser recocidas para disminuir la dureza y hacerlas maquinables; además distensiona al material con lo que se reduce la distorsión por el temple.

En la Fig.XII.21, se indica el curso de la temperatura para este proceso.

XII.3.4.6. Cementación con doble temple y afino del núcleo

Posterior al proceso de cementación y enfriamiento lento se efectúan dos temples, el primero a elevada temperatura, superior a A_{c3}, y a continuación desde la temperatura de transformación de la capa. Se debe procurar que el calentamiento para el segundo temple sea lo más breve posible, para evitar que el núcleo se caliente demasiado y pierda propiedades mecánicas.

Este proceso se utiliza cuando se pretende lograr en una pieza la mejor combinación de dureza y tenacidad, en la Fig. XII.22, se muestra el curso de la temperatura en función del tiempo.

XII.3.4.7. Cementación con doble temple desde la temperatura de cementación

Es un proceso similar al anterior, con la diferencia de que el primer temple se realiza directamente al finalizar la cementación; se utiliza en procesos en horno de sales o atmósfera controlada, donde la carga puede ser templada directamente. El segundo temple se realiza a la temperatura de transformación de la capa, con el cuidado indicado anteriormente de que el tiempo de calentamiento sea breve.

En la Fig. XII.23 se indica el curso de la temperatura para este proceso.

XII.3.4.8. Cementación, transformación isotérmica y temple

Posterior al proceso de cementado y desde alta temperatura, se efectúa el temple en un baño a 550° C, lo que consigue formar una estructura fina de perlita laminar en el núcleo.

El calentamiento final para transformar la capa solamente debe ser breve, y no empeorar la estructura del núcleo, que adquiere una adecuada tenacidad. Este proceso se emplea para piezas complicadas sensibles al agrietamiento y a la distorsión, sometidas en servicio a elevadas solicitaciones en la capa cementada y núcleo. En la Fig. XII.24 se muestra el curso de la temperatura para este proceso.

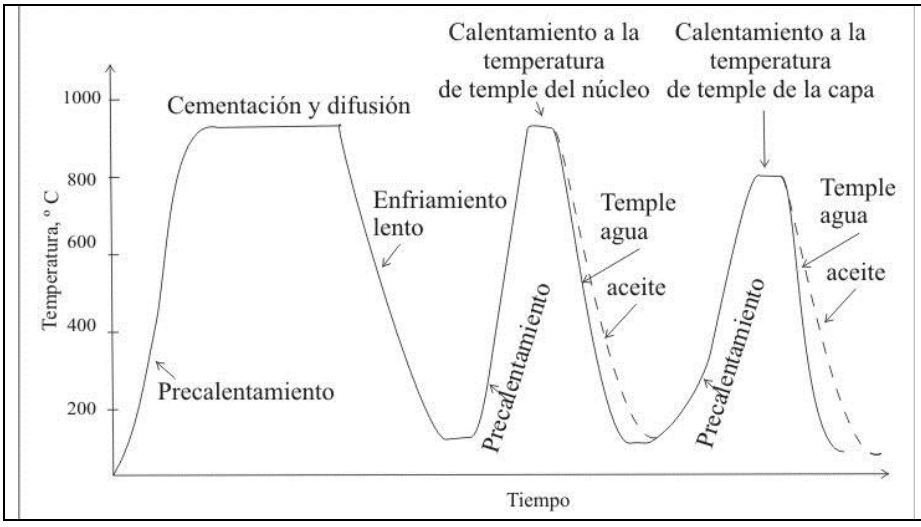


Fig. XII.22: Marcha del proceso de cementación con doble temple y afino del núcleo

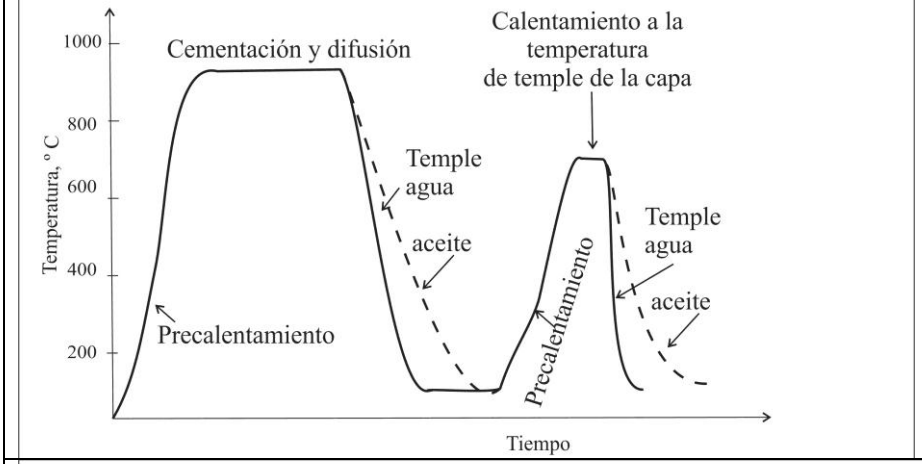


Fig. XII.23: Marcha del proceso de cementación con doble temple desde la temperatura de cementación

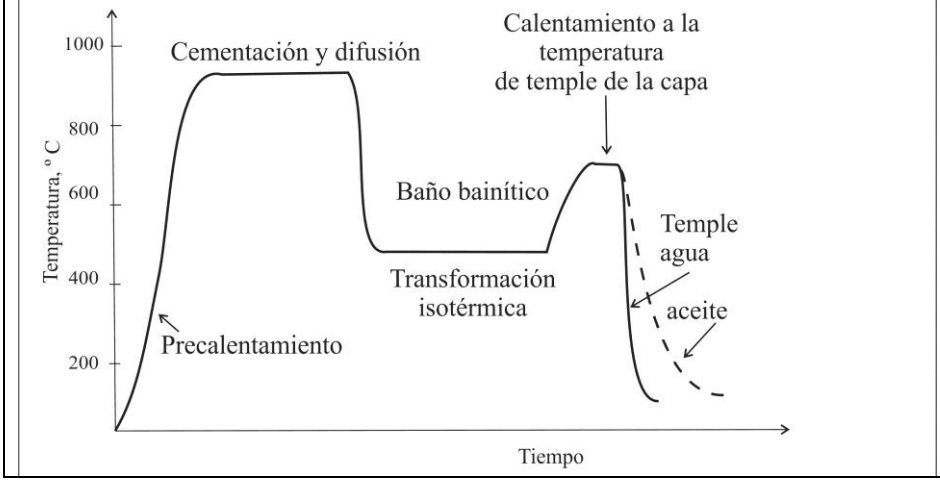


Fig. XII.24: Marcha del proceso de cementación**,** transformación isotérmica y temple

XII.4. Métodos de control de la capa cementada en piezas procesadas

Para la evaluación de una capa cementada es necesario conocer fundamentalmente la estructura y la profundidad de la capa para determinar si se encuentra dentro de los límites deseados.

Existen varios métodos para el control, pero ninguno es recomendado para todas las aplicaciones, generalmente es necesario utilizar dos o más métodos para el control de las piezas procesadas.

XII.4.1.Ensayo de dureza: es quizás el más simple pero, cuando se ensaya en la superficie de la pieza, no alcanza a determinar la profundidad de la cementación o de descarburación, si existiese.

Pueden utilizarse tres procedimientos para el control de la capa cementada con dureza.

a) Medida de la dureza superficial, con dos condiciones de carga, tales como Rc y R15N; de esta manera es posible detectar alguna descarburación superficial. Esto es válido para espesores de capa considerables ya que si la profundidad de capa es pequeña, el penetrador o su área de influencia podría sobrepasarla dando resultados erróneos.

En general puede considerarse las siguientes escalas de dureza en función del espesor de capa:

Para espesores de capa de 0,05 a 0,40 mm, usar R15N

Para espesores de capa de 0,45 a 0,80 mm, usar RA

Para espesores superiores a 0,80 mm, usar Rc.

b) Ensayo de dureza, superficial R15Nen escalones rectificados por debajo de la superficie a profundidades significativas. Este método da una indicación mejor de la profundidad a la cual el control del carbono es efectivo. Los valores de dureza obtenidos pueden graficarse en función de la distancia a la superficie donde puede determinarse la profundidad de capa total o la efectiva (profundidad equivalente a R_C50).

c) Control de microdureza en gradiente en una sección transversal; de esta manera también es posible determinar la profundidad de capa total y la efectiva. Este último método es el más adecuado aunque también el más laborioso y que exige un instrumental más sofisticado; puede determinar zonas con baja dureza, descarburación o algún otro defecto discontinuo en la capa.

Cuando los ensayos de dureza se emplean para evaluar el control de carbono, debe tenerse en cuenta que la dureza máxima en el temple se alcanza a aproximadamente el 0,70% C; si se obtienen valores de C mayores a éste, podría resultar austenita retenida con la consiguiente disminución de la dureza.

La baja dureza de las piezas templadas o probetas de ensayo pueden deberse a un temple insuficiente, por excesiva austenita retenida o por bajo contenido de carbono. De allí que para determinar el % de C de la capa conviene realizar otros procedimientos.

XII.4.2.Examen microscópico

El estudio metalográfico es muy útil para determinar los componentes de una capa cementada, especialmente si existe descarburación o carburación excesiva; este método necesita de habilidad y experiencia para evaluar los componentes.

El examen microscópico debe ser empleado para determinar la presencia de:

Ferrita: una capa de ferrita en la superficie indica una descarburación total. Si la ferrita se presenta intergranular la descarburación es parcial.

Cementita: la presencia de cementita reticular pone de manifiesto un elevado potencial de carbono en el proceso de cementado.

Perlita: se presenta en los aceros cementados con enfriamiento lento, la relación con la ferrita o cementita sirve para evaluar si el % de C de la capa es eutectoide (o hiper o hipoeutectoide)

Austenita: en los aceros cementados y templados aparece austenita retenida en la capa generalmente cuando el potencial de carbono utilizado fue elevado, o posee apreciable % de elementos de aleación por ejemplo Ni, Mn, etc, o el temple se realizó a elevada temperatura.

Martensita: una variación en el ataque de una estructura martensítica puede indicar una variación en el contenido de carbono. Un engrosamiento de la estructura puede deberse a elevada temperatura de temple.

Además de estos componentes, con una buena preparación metalográfica y adecuado reactivo de ataque, se puede detectar el tamaño de grano, observando el núcleo o la capa cementada.

El estado de enfriamiento lento es el más indicado para obtener información; por supuesto que deberá realizarse en una atmósfera adecuada, pero son más fácilmente detectables las diferencias en el % de carbono en la capa cementada, el tamaño de grano y la posibilidad de descarburación; además utilizando un ocular que contenga una escala milimetrada es posible evaluar la profundidad de capa en forma correcta.

XII.4.3. Examen de cortes consecutivos

Puede evaluar el control del carbono a una profundidad significante debajo de la superficie, en piezas que han sido expuestas a un ciclo de tratamiento térmico reproducible con una atmósfera controlada.

Como consecuencia de la exactitud extrema requerida en las operaciones de mecanizado para obtener una información confiable, la evaluación se realiza, generalmente, en probetas cilíndricas tratadas con las piezas. Después que aquellas han sido sometidas al tratamiento térmico, se efectúan cortes de 0,02 a 0,5mm. o más, desde el diámetro exterior, y se analizan las virutas de cada uno de ellos para determinar la concentración en carbono.

Por lo general, se presentan dudas respecto a la seguridad de los datos que suministran los primeros 0,02-0,1 mm.de la superficie. Sin embargo, ello es función de la seguridad con la cual se ha realizado el ensayo y del cuidado tomado en la preparación y mecanizado de las probetas. Estas deben ser construidas con el mismo tipo de acero empleado en la fabricación de las piezas y mecanizadas sobre centros para que adquieran la forma cilíndrica. El diámetro debe ser tal que la sección sea representativa de las piezas que van a ser evaluadas. La longitud debe ser sólo la suficiente para permitir la formación de virutas para un análisis de carbono. La probeta se carga con las piezas antes de ser introducidas en el horno, y recibe exactamente el mismo ciclo que éstas. Si las piezas son enfriadas lentamente en el horno, las probetas deben ser:

a) Enfriadas lentamente con la carga.
b) Lavadas con jabón y agua, y enjuagadas con agua limpia.
c) Enjuagadas con bencina para desplazar el agua y secadas de tal forma, que no se forme óxido.
d) Arenadas o granalladas ligeramente.
e) Enderezadas a 0,02 mm.de la lectura total del indicador.
f) Lavadas con jabón y agua y enjuagadas con agua limpia.
g) Enjuagadas con bencina.

h) Mecanizadas

Si las piezas son templadas al final del ciclo y las probetas son de acero del tipo SAE 1117 y 8620, se deberá seguir la misma secuencia, a excepción que sean revenidas en aire a 650°C entre las etapas c y d.

Con los resultados obtenidos se puede confeccionar un gráfico con el gradiente de carbono en función de la distancia a la superficie, para diferentes tiempos y atmósfera de ciclo de cementación, pudiéndose obtener curvas similares a las indicadas en la Fig. XII.25.

Este método permite determinar las variaciones del contenido de carbono de la capa cuando se utilizan ciclos diferentes de tratamiento térmico. También permite evaluar el tiempo de los ciclos, flujos de gas, métodos de carga, condiciones del horno, etc. La desventaja principal es que es un método de análisis lento. En efecto, la información no puede ser obtenida hasta que las piezas fueron procesadas, siendo entonces demasiado tarde para efectuar correcciones si los resultados no son satisfactorios.

XII.4.4. Análisis de láminas

Las láminas pueden usarse efectivamente para determinar el potencial de carbono de una atmósfera. El éxito de este método se debe a la rapidez de cementación de la probeta delgada, lo cual elimina la difusión de C como una variable en la evaluación de la atmósfera. La exactitud de este ensayo permite aplicarlo con seguridad en el control del carbono en la cementación comercial, restauración de éste y carbonitruración.

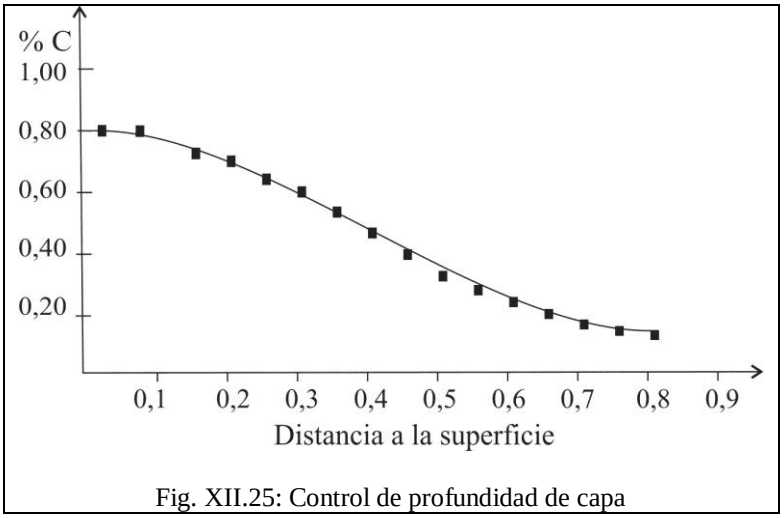


Fig. XII.25: Control de profundidad de capa

En la primera, un fleje de acero 1010 recocido de 31 x 85x 0,10-0,15mm. es pesado antes y después de 1 hora de exposición en la atmósfera del horno. El incremento de peso, calculado como un balance analítico, se emplea para determinar el carbono de la atmósfera de la forma siguiente:

Potencial de carbono= aumento de peso/peso final *x 100 + % carbono inicial.*

El tiempo total del ensayo es de aproximadamente 1 1/2 hora. La Fig. XII.26 representa la varilla empleada en la determinación del potencial de carbono en este ensayo en las tres etapas siguientes:

Fig. XII.26: Conjunto de la varilla y fleje de ensayo.

Fig. XII.27: Fijación de la varilla a la pared del horno, preparatorio a la inserción del fleje de ensayo en la atmósfera de aquél. La misma posición se usa para enfriarla después de extraerla. En tal caso, la varilla debe ser soportada durante unos pocos minutos para evitar que se curve excesivamente. El fleje es enfriado durante 15 minutos.

Fig. XII.28: La probeta es introducida en el horno en una corriente de atmósfera libre por encima de la carga.

Durante el análisis deberán observarse las siguientes precauciones:

a) Cuando la temperatura del horno es baja (815° C o menores) el tiempo de exposición deberá incrementarse 11/2 hora para asegurar una cementación completa de la probeta.

b) Para evitar que la probeta se oxide durante el enfriamiento, se la transferirá al interior del niple, en el instante en que todas las puertas del horno estén cerradas.

c) No girar la probeta alrededor de la varilla. Ello conduce a una exposición sólo parcial, con los bajos resultados consiguientes, y también complica la extracción de aquella para pesarla nuevamente. Una sujeción adecuada se realiza por un simple doblez de las esquinas de la probeta, sobre la varilla, dejando el centro de la sección abierto al paso de la atmósfera.

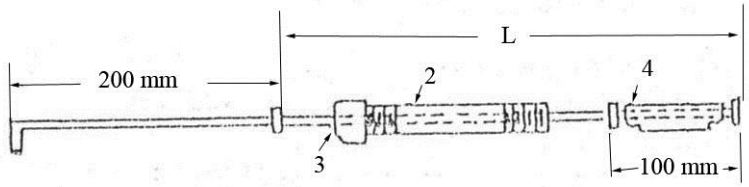


Fig. XII.26: Conjunto de la lámina de ensayo para determinación del potencial de C

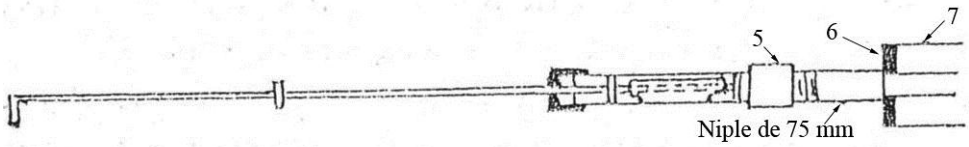


Fig. XII.27: Conjunto de la lámina de ensayo unida a la pared del horno o por una varilla antes de la introducción en aquel (la misma posición es usada en el enfriamiento)

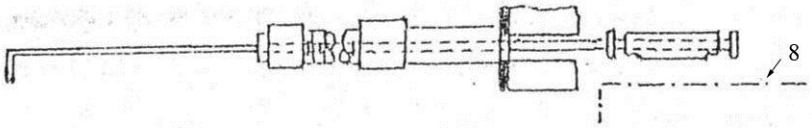


Fig. XII.28: Lámina insertada en el horno, arriba de las piezas en una corriente de atmósfera sin obstrucción

Referencias:

L: Longitud ajustada para la exposición de una varilla de 10 mm en el horno
2: Niple de 150 mm
3: Cabezal con agujero de 14 mm
4: Lámina de ensayo
5: Acoplamiento
6: Pared del horno
7: Ladrillos del horno
8: Nivel de las piezas

d) En hornos continuos, el potencial en carbono indicado por la probeta representa sólo la zona o área ensayada y no la atmósfera completa existente en el horno.

e) Exponer siempre la probeta a un flujo libre de la atmósfera. Ello se realiza fácilmente ubicándola por encima de la carga (Fig. XII.28)

f) Una probeta expuesta y enfriada conteniendo 1,30 % C, o menos, deberá estar limpia y brillante. Una ligera decoloración por oxidación, indica que la técnica empleada no ha sido la adecuada. El carbono así determinado será algo mayor, debido al incremento en peso causado por el óxido de hierro.

g) Una probeta que ha sido expuesta y enfriada, conteniendo 1,40 % C o más, tendrá una coloración mate opaco. Dependiendo del contenido actual de carbono de la probeta, la superficie del acero puede ser revestida con carbono flojo y seco. Esto es una apariencia normal provocada por una atmósfera de un potencial elevado en carbono. Aquel deberá ser eliminado antes de efectuar la nueva pesada.

Este sistema permite una referencia rápida de la atmósfera, dado que no es necesario esperar que se complete el ciclo de cementación. Por lo general es suplementario por el análisis de probetas que son cementadas con las piezas durante todo el ciclo. Posteriormente se establece la vinculación con las piezas.

El método de láminas determina el carbono máximo disponible en la atmósfera, tanto en hornos del tipo mufla como continuos. Por lo general, el carbono así determinado es más elevado que el de la superficie de piezas fabricadas con la mayoría de los aceros SAE; una excepción la constituyen aquellas que contienen un alto porcentaje de elementos formadores de carburos, tales como 3310, 52100 y 9330. En efecto, los citados o bien sus equivalentes, forman carburossuperficiales y, por consiguiente, tienen un tenor superior en carbono que el obtenido con las láminas.

Este ensayo es también aplicable a atmósferas carbonitrurantes. Aunque el incremento de peso es producido por el carbono y nitrógeno, en la práctica puede ser atribuida sólo a aquél, aplicándose los mismos cálculos que para las atmósferas cementantes.

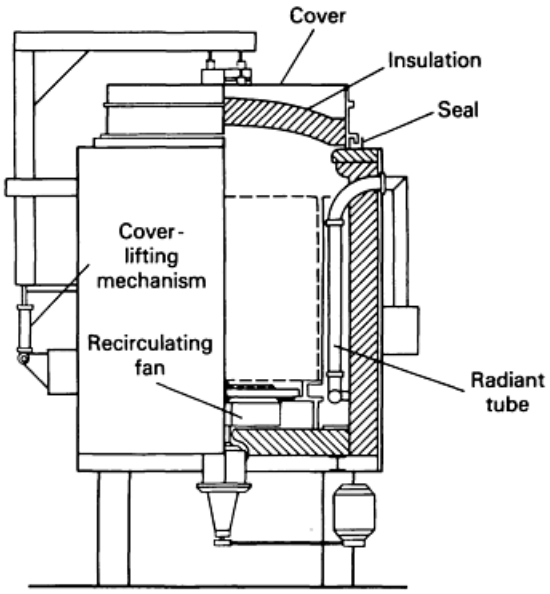
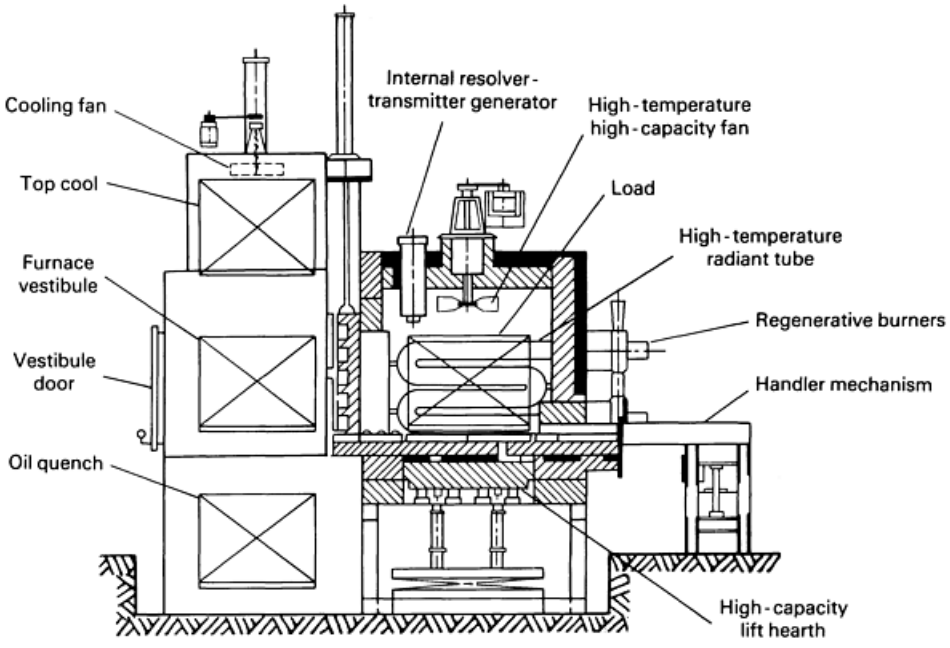
Las láminas pueden ser también analizadas por determinación gravimétrica del carbono, lo cual elimina la necesidad de pesarlas antes y después de la exposición a la atmósfera del horno.

XII.4.5. Análisis de un alambre laminado

Puede ser empleado también para determinaciones del potencial de carbono de la atmósfera. La composición química es la siguiente: 0,07 % C; 0,34 % Mn; 0,20 % Ni; 0,6 % Cr y 0,02 % Mo. El alambre de 3,2 mm. de diámetro es laminado plano a un espesor de 0,22 mm. y un ancho aproximado de 3,8 mm. Posteriormente, es aplicado en la misma forma que las láminas, a excepción de pequeñas variaciones del diseño del dispositivo empleado para la determinación del C de la atmósfera.

Después de ser expuesto a ésta es limpiado con HCl al 50 %, cortado en longitudes comprendidas entre 0,4-12,5 mm., pesado y analizado el contenido en carbono.

Apéndice: hornos de cementación gaseosa

	Horno de pote para cementación. La carga se ubica entre las líneas
	Horno de alta productividad con temple integrado